

Aus der Poliklinik für Kieferorthopädie
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
Direktor/Leiter: Univ.-Prof. Dr. Dieter Drescher

Evaluation der Therapieeffekte des Mesialsliders
—
**Dreidimensionale Analyse mittels eines optischen
Scanverfahrens**

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnmedizin
der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von
Chantal Helene Spieker
2019

Angabe der Referenten

Als Inauguraldissertation gedruckt mit der Genehmigung der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf.

gez.:

Dekan: Univ.-Prof. Dr. med. Nikolaj Klöcker

Erstgutachter: Prof. Dr. med. dent. Benedict Wilmes

Zweitgutachter: Prof. Dr. med. dent. Alfons Hugger

Teile dieser Arbeit wurden veröffentlicht:

Becker K, Wilmes B, Grandjean C, Vasudavan S, Drescher D. Skeletally anchored mesialization of molars using digitized casts and two surface-matching approaches: Analysis of treatment effects. *J Orofac Orthop.* 2018;79(1):11-18.

Becker K, Wilmes B, Grandjean C, Drescher D. Impact of manual control point selection accuracy on automated surface matching of digital dental models. *Clin Oral Investig.* 2018;22(2):801-810

Zusammenfassung

Hintergrund:

Der Mesialslider ist eine skelettal verankerte kieferorthopädische Apparatur, die im Oberkiefer zum compliance-unabhängigen Lückenschluss mittels Mesialisierung angewendet wird. Die Therapie kann einseitig, beidseitig oder in Kombination mit einem Distalslider erfolgen. Klinische Fallberichte beschreiben zufriedenstellende Behandlungsergebnisse des Mesialsliders, jedoch ohne quantitative Analyse.

Die Digitalisierung von dentalen Modellen ermöglicht die Ermittlung der dreidimensionalen Zahnbewegung unter kieferorthopädischer Therapie. Dies erfordert eine Überlagerung der Modelle verschiedener Zeitpunkte mit Hilfe eines Registrierungsverfahrens. Die Genauigkeit des Digitalisierungs- sowie Registrierungsverfahrens beeinflusst die ermittelte orthodontische Zahnbewegung. Es können kontrollpunkt-basierte sowie automatische Oberflächenregistrierungen angewendet werden.

Ziele:

Mit Hilfe der vorliegenden Arbeit soll der dreidimensionale Therapieeffekt des Mesialsliders durch Überlagerung digitalisierter dentaler Modelle bewertet werden. Die Analyse erfolgt durch kontrollpunkt-basierte und automatische *iterative closest point* (ICP) Registrierungsverfahren, sowie deren Kombination.

Methoden:

Der Therapieeffekt des Mesialsliders bei uni- und bilateraler Anwendung, sowie in Kombination mit einem Distalslider wurde bei 48 Patienten (11 bis 53 Jahre) retrospektiv untersucht. Dentale Oberkiefermodelle wurden vor und nach Behandlung digitalisiert und mittels zweier Registrierungsansätze überlagert. Vor Durchführung der Registrierung wurden alle Modelle einheitlich im kartesischen Koordinatensystem ausgerichtet. Das kontrollpunkt-basierte Verfahren basierte auf zehn manuell selektierten Punkten auf den Gaumenfalten. Das ICP-basierte Verfahren nutzte eine einheitliche palatinale Referenzregion. Es wurde die dreidimensionale orthodontische Zahnbewegung der Molaren ermittelt. Die Frontzahnpositionen sowie achsiale Veränderungen der Molaren unter der Therapie mit dem Mesialslider sind ebenfalls untersucht worden.

Ergebnisse:

Bei einer durchschnittlichen Anwendungsdauer des Mesialsliders von $11,7 \pm 7,8$ Monaten wurde eine mittlere Molarenbewegung von $6,3 \pm 2,6$ mm (anterio-posterior: $5,5 \pm 2,7$; vertikal: $0,0 \pm 1,9$; transversal: $0,1 \pm 2,7$) erreicht. Die oberen Inzisiven blieben mit einer Verschiebung unter 0,5 mm in allen drei Dimensionen ortsstabil. Sowohl das kontrollpunkt- als auch das ICP-basierte Verfahren und deren Kombination ermöglichten eine erfolgreiche Registrierung. Zwischen den entsprechenden ermittelten Zahnbewegungen der beiden Registrierungsansätze gab es keinen signifikanten Unterschied ($p < 0,01$).

Schlussfolgerungen:

Der Mesialslider ermöglichte im Oberkiefer einen erfolgreichen compliance-unabhängigen Lückenschluss durch Mesialisierung. Der durchschnittliche Mesialisierungseffekt der Molaren lag bei $6,3 \pm 2,6$ mm. Die skelettale Verankerung ermöglichte die Mesialisierung ohne klinisch relevanten dentalen Verankerungsverlust. Kontrollpunkt- und ICP-basierte Registrierungen ermöglichen eine dreidimensionale Bestimmung der kieferorthopädischen Zahnbewegung, auch in Fällen mit umfassender kieferorthopädischer Therapie.

Abstract

Background:

The Mesialslider is a skeletal anchored orthodontic appliance, used in the upper jaw to achieve space closure by mesialisation with a low level of compliance. It enables clinicians to mesialize upper molars and thus close upper spaces unilaterally, bilaterally or in combination with a Distalslider. Clinical case reports demonstrate satisfactory treatment results, however, without quantitative analysis.

Orthodontic treatment outcomes are frequently evaluated based on the superimposition of digital dental models. Digital casts pre- and posttreatment need to be superimposed. The accuracy of the determined three-dimensional orthodontic tooth-movement depends on the accuracy of digitalization and registration. Control point (CP) based or automated approaches are usable.

Objectives:

The aim of the present work was to assess the three-dimensional treatment effect of a Mesialslider appliance using superimposed digital models. CP-based and iterative closest point (ICP) matching approaches as well as combination of both are used.

Methods

In a retrospective study, we evaluated the effects of a skeletally anchored uni- and bilateral mesialization appliance (Mesialslider) as well as simultaneous mesialization and distalization appliance (Mesio-Distalslider) in 48 subjects (aged 11–53 years). Pre- and posttreatment casts of the upper jaw were digitized and superimposed with two different approaches, using ten manually selected CPs located at the anterior palate and by means of an automated ICP-matching approach using a standardized palatal reference area. All casts were aligned with the cartesian coordinate system before matching. The treatment effects were evaluated using CPs on the maxillary central incisors and maxillary molar teeth.

Results

Average duration of treatment was 11.7 ± 7.8 months. The average upper molar mesialization was 6.3 ± 2.6 mm (anteroposterior: 5.5 ± 2.7 ; vertical 0.0 ± 1.9 ; transversal 0.1 ± 2.7). Anchorage loss, designated as the mean amount of upper incisor displacement, was less than 0.5 mm in all investigated dimensions. Using the measurement method sufficient registration was possible using both approaches and corresponding tooth movements were significantly correlated ($p < 0.01$).

Conclusions

The Mesialslider enables successful space closure in the upper jaw with a low level of compliance. The average mesialization of the molars was 6.3 ± 2.6 mm. Skeletal anchorage allows mesialization without clinically relevant anchorage loss. Accurate measurements of tooth displacement can be performed using both CP- and ICP-based matching approaches, even in cases with comprehensive orthodontic treatment.

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
BM	beidseitiger Mesialslider
BSD	Berkeley Software Distribution
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CBCT	<i>cone beam computed tomography</i>
CSV	<i>comma separated value</i>
d	Durchmesser
DVT	Digitale Volumentomographie
EM	einseitiger Mesialslider
et al.	et alii/aliae/alia
FRS	Fernröntgenseitenbild
GB	Gigabite
ICP	<i>iterative closest point</i>
KP	Kontrollpunkt/e
Max	Maximum
MB	Megabite
MD	Mesial-Distalslider
mGP	marginale Grenzpunkte
Min	Minimum
mm	Millimeter
MP	Messpunkt/e
N	Größe der Grundgesamtheit
Qu	Quartile
RMS	<i>root-mean-square</i>
ROI	<i>region of interest</i>
s.o.	siehe oben
SpA	Spina nasalis anterior
SpP	Spina nasalis posterior
STA	Standardabweichung
STL	<i>stereolithography file</i>
s.u.	siehe unten
t0	Zeitpunkt vor Mesialisierungsbeginn
t1	Zeitpunkt nach Mesialisierungsabschluss
vs.	versus
z.B.	zum Beispiel
µm	Mikrometer
3D	dreidimensional
°	Grad
%	Prozent

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
Der Mesialslider	1
Indikationen	1
Kieferorthopädische Behandlungsalternativen	2
Behandlung	3
Skelettale Verankerung	5
Klinische Fallberichte	7
Evaluation des kieferorthopädischen Therapieeffektes	8
Konventionelle Methoden	8
Digitalisierung dentaler Modelle	8
Oberflächen-Registrierung	9
Studien zur Quantifizierung orthodontischer Zahnbewegungen mittels Modellscanregistrierung	11
Limitationen der bisherigen Studien	11
Ziele	13
Material und Methoden	14
Patientendaten/-angaben	14
Einschlusskriterien	14
Ausschlusskriterien	14
Patientenkollektiv	14
Patientencharakteristika	16
Untersuchungsmaterialien	17
Patientenmodelle	17
Digitalisierung und Bilddatenverarbeitung	17
Untersuchungsmethoden	19
Mess- und Kontrollpunktselektion	19
Modellausrichtung	23
Registrierung	24
Fernröntgenseitenbilddauswertung	26
Statistische Analysen	27
Ergebnisse	28
Behandlung mit dem Mesialslider	28
Behandlungsindikation	28

Behandlungsverlauf.....	28
Dreidimensionale Rekonstruktion der Molarenbewegung unter der Therapie mit dem Mesialslider	30
Registrierungsergebnisse des Mesialsliders.....	30
Orthodontische Zahnbewegung	33
Linearer Zusammenhang der dreidimensionalen Zahnbewegung unter Anwendung der beiden Registrierungsansätze	36
Auswertung der Fernröntgenseitenbilder.....	37
Validierung der Datenerhebung am optischen Scan	37
Datenerhebung durch Schieblehrenmessung	37
Datenerhebung mittels digitaler Volumentomographie.....	38
Diskussion	40
Evaluation des Registrierungsverfahrens	40
Registrierungs-Methodik.....	40
Validierung der Datenerhebung am optischen Scan	41
Therapie mit dem Mesialslider	42
Behandlungsindikation	42
Patientencharakteristika.....	42
Behandlungsergebnis	43
Behandlungsverlauf.....	43
Limitationen.....	44
Schlussfolgerungen.....	45
Dreidimensionale Analyse mittels optischem Scanverfahren	45
Evaluation der Therapieeffekte des Mesialsliders	46
Literatur- und Quellenverzeichnis	47

Einleitung

Diese Promotionsarbeit befasst sich mit der Evaluation der Therapieeffekte des Mesialsliders. Im Rahmen der Promotionsarbeit wurde eine computergestützte dreidimensionale Analyse kieferorthopädischer Modelle von verschiedenen Behandlungszeitpunkten durchgeführt, welche mittels optischem Scanverfahren digitalisiert worden sind.

Der Mesialslider

Indikationen

Schaltlücken im Zahnbogen sind ein häufiger Befund und treten sowohl bei Erwachsenen, als auch bei Kindern und Jugendlichen auf. Kongenitale dentale Aplasien bilden mit einer Prävalenz von 2,6-11,3% die häufigste kraniofaziale Malformation¹. Im Oberkiefer sind mit einer verhältnismäßig hohen Prävalenz von 1-2% die lateralen Inzisiven² und mit 1,39-1,61% die zweiten Prämolaren³ hervorzuheben. Extrem verlagerte Eckzähne, Hypoplasien oder Traumata der Frontzähne, die bei einer Prävalenz von bis zu 23,3% liegen⁴, können ebenfalls zu Lückenständen führen.

Bei jugendlichen Patienten ist die Mesialisierung eine favorisierte Behandlungsoption⁵, da dentale Implantate zu diesem Zeitpunkt nicht indiziert sind und ein Belassen der Lücke mit verschiedenen Problemen assoziiert ist: Lücken in der Oberkieferfront kompromittieren Patienten ästhetisch und stören die Phonetik. Weiterhin können Schaltlücken zur Elongation der Antagonisten und zur Mesialkipfung angrenzender Zähne führen. Darüber hinaus kann es zu einer vertikalen und horizontalen Alveolarkammatrophie kommen, die eine spätere implantologische Versorgung im frühen Erwachsenenalter erschwert^{6,7}. Es werden unter Umständen augmentative Maßnahmen erforderlich, was zu Problemen der rot-weiß-Ästhetik führen kann⁸. Als Vorteil der implantologischen Versorgung kann die Vervollständigung der Zahnanzahl und die beim erwachsenen Patienten in der Regel schnellere Durchführung der Behandlung als bei einem kieferorthopädischen Lückenschluss angesehen werden⁹.

Der klassische prothetische Lückenschluss durch Brückenversorgung hat den Nachteil des relativ hohen Verlustes an Zahnhartsubstanz, vor allem bei gekippten Pfeilerzähnen. Bei kariösen oder konservierend behandelten Nachbarzähnen wird dies jedoch als akzeptabel angesehen. Eine weniger invasive Variante bildet die Adhäsivbrücke. Der Vorteil der

Brückenversorgung liegt in dem im Vergleich zu den Alternativen schnellem Behandlungsabschluss.

Diese prothetischen Versorgungsalternativen können bei jungen Patienten bis zum Erreichen des Erwachsenenalters zu mehrjähriger Wartezeit und damit einhergehenden Einschränkungen führen. Ein kieferorthopädischer Lückenschluss erscheint vor allem in einem jungem Patientenkollektiv in den meisten Fällen vorteilhafter als ein Ersatz des Zahnes mittels Implantat- oder Brückenversorgung, da die Langzeitstabilität des natürlichen Zahnes durch prothetische Maßnahmen nicht zu erreichen ist. Hinzu kommen mögliche ästhetische Herausforderungen, vor allem im Frontzahnbereich. Die Risiken des Implantatverlustes oder im Laufe der Jahre auftretender ästhetischer Defizite, wie durchschimmernde oder freiliegende Gewinde trotz umfassenden Möglichkeiten der Weichgewebs- und Knochenaugmentation, sind ebenfalls gegeben⁸. Eine fortschreitende Alveolarkammatrophie unterhalb des Brückengliedes kann ebenfalls zu ästhetischen Defiziten führen¹⁰.

Weiterhin ist der Lückenschluss langfristig die kostengünstigste Therapie, da Zahnersatz insuffizient werden kann und dementsprechend erneuert werden muss^{11,12,13}. Deshalb heben viele Autoren bei Nichtanlagen und Lückenständen im adoleszenten Gebiss die Vorteile des kieferorthopädischen Lückenschlusses hervor¹⁴.

Ein Ersatz der seitlichen Schneidezähne durch die angrenzenden Eckzähne kann durch subtraktive Neugestaltung in Kombination mit einem Bleaching oder durch Keramik-Veneers mit gutem ästhetischem Ergebnis erreicht werden^{15,16}. Auch der Verlust eines 6-Jahres-Molaren lässt sich durch eine Mesialisierung der restlichen Molaren kompensieren¹⁷. Bei vorhandenen Weisheitszahnanlagen erhöht sich deren Durchbruchwahrscheinlichkeit nach Mesialisierung, wodurch die operative Weisheitszahnentfernung häufig vermieden werden kann¹⁴. Der kieferorthopädische Lückenschluss bildet auch für viele erwachsene Patienten eine Therapieoption¹⁸.

Kieferorthopädische Behandlungsalternativen

Der große Vorteil des kieferorthopädischen Lückenschlusses ist die Möglichkeit des weitgehenden Verzichtes auf Zahnersatz. Bei der Therapieentscheidung sind jedoch die individuelle Morphologie der Eck- und Schneidezähne, das Weichgewebsprofil, sowie die Lachlinie zu berücksichtigen. Reduzierte Zahnbestände stellen besondere Ansprüche an ein Verankerungssystem, wenn die Lücken kieferorthopädisch mit möglichst geringer Nebenwirkung auf die Verankerungseinheit geschlossen werden sollen. Je weiter mesial

der fehlende Zahn liegt, desto höher ist der Anspruch an die Verankerungsqualität besonders in asymmetrischen Fällen mit Mittellinienverschiebungen. Eine große therapeutische Herausforderung stellen körperliche Bewegungen von Molaren dar, da diese mehrere Wurzeln und daher eine insgesamt große Wurzeloberfläche aufweisen.

Klassische Systeme sind entweder extraoral oder intermaxillär verankert, um eine nach anterior gerichtete Kraft auf die Dentition auszuüben. Die extraorale Verankerung (Protraktionsmaske) erfordert eine hohe Compliance des Patienten. Außerdem ist sie für die Behandlung asymmetrischer Fälle, bei denen auf einer Seite distalisiert und auf der kontralateralen Seite mesialisiert werden muss, durch ihre beidseitig gleich gerichtete Kraftapplikation ungeeignet. Sie erlaubt jedoch eine Vermeidung reziproker Kräfte auf die Unterkieferdentition. Die häufiger angewendeten intraoralen Verankerungsalternativen (Klasse III Gummizüge) setzen ebenfalls eine gute Compliance des Patienten voraus. Darüber hinaus üben sie ungewünschte nach dorsal gerichtete reziproke Kräfte auf die dentale Verankerungseinheit im Unterkiefer und auf das Kiefergelenk aus^{14,17}. Jacobs et al. zeigten, dass die Mesialisierung mit intramaxillären Gummiketten und Achterligaturen deutliche Nebenwirkungen hervorriefen, die sich im Weichteilprofil als vergrößerte Distanz zwischen Ober- und Unterlippe darstellten. Die Mesialisierung der Molaren erfolgte weitestgehend translatorisch, jedoch kam es in der Verankerungseinheit zu einer Retrusion, sowie in der Front zu einer Retraktion. Unilaterale Mesialisierungen hatten zu 50% eine Mittellinienverschiebung zur Folge¹⁷.

Behandlung

Der Mesialslider ist eine skelettal verankerte kieferorthopädische Apparatur, die für den einseitigen oder beidseitigen Lückenschluss im Oberkiefer eingesetzt wird (Abb. 1a, b).



a)



b)



c)

Abb. 1: Der Mesialslider. Repräsentative klinische Bilder des Mesialsliders, verankert auf zwei Miniimplantaten im Gaumen (Wilmes et al. 2010¹⁴)

- (a) unilateraler Mesialslider
- (b) bilateraler Mesialslider
- (c) Mesial-Distalslider

Die Mesialisierung der durch ein kieferorthopädisches Band körperlich gefassten Molaren erfolgt entlang einem an den Implantaten verankerten Bogen aus Edelstahl. Durch zu einem schiebbaren Schloss (*activation lock*) gespannte Zugfedern (*closing spring*) oder Gummizüge wird eine nach anterior gerichtete Zugkraft von ca. 200 Gramm auf die Molaren appliziert, die wiederum bei Kontakt eine Schubkraft auf die vor ihnen liegende Dentition ausüben. Es resultiert eine Bewegung der Molaren und der in Zugrichtung vor ihnen liegenden Zähne nach mesial. Der Mesialslider ist durch zwei Mini-Implantate (para-) median der Sutura palatina skelettal im palatum durum verankert (s.u.). Die vertikale Position des Kraftansatzpunktes am palatinalen Bogen wird durch dessen einstellbare Biegung und die Position der Miniimplantate bestimmt. Somit ist die Krafteinwirkung nahe der Ebene des Widerstandszentrums der Molaren, was als optimal anzusehen ist und dessen körperliche Führung ermöglicht.

Die gleichzeitige Anwendung einer Multibandapparatur bei entsprechender Indikation bewirkt aufgrund der Friktion neben der Seitenzahn-Mesialisierung auch eine Protrusion der Front (Abb. 1b). Eine zusätzliche Multibandtherapie ist bei harmonisch ausgeformten Zahnbogen nicht zwingend notwendig. Der so genannte nach anterior gerichtete T-Bogen kann zusätzlich zur Verankerung und Stabilisierung der Frontzähne verwendet werden¹⁹. Eine verschobene Mittellinie ist mit einem Mesial-Distalslider durch die Kombination simultaner Mesialisierung sowie Distalisierung des entsprechenden kontralateralen

Quadranten therapierbar (Abb. 1c). Bei entsprechender Indikation können durch Angulation des palatinalen Führungsbogens zusätzlich zur Mesialisierung der Molaren eine simultane Intrusion oder Extrusion in die Apparatur einprogrammiert werden¹⁴.

Die Apparatur des Mesialsliders kann direkt intraoral angepasst oder auf einem Gipsmodell im Labor adjustiert werden. Die direkte Anpassung hat den Vorteil der Ersparnis einer Behandlungssitzung, während bei der laborunterstützten Anpassung weniger Stuhlzeit benötigt wird¹⁴. Kontrollen und gegebenenfalls notwendige Aktivierungen erfolgen in der Regel alle sechs Wochen.

Diese klinische Beschreibung entspricht der Therapie mit dem Mesialslider, wie sie in der Poliklinik für Kieferorthopädie der Westdeutschen Kieferklinik der Heinrich-Heine-Universität in Düsseldorf durchgeführt wird.

Skelettale Verankerung

Damit orthopädische und orthodontische Kräfte dauerhaft einwirken können, ist eine Verankerung erforderlich. Nach Newtons drittem Axiom erzeugt eine Kraft immer eine Gegenkraft: $actio = reactio$. Möglich sind intramaxilläre, intermaxilläre, extraorale oder skelettale Verankerungskonzepte, sowie deren Kombination. Hinsichtlich der Verankerungsqualität unterscheidet man minimale Verankerung, unter der beide Einheiten im gleichen Maß wandern, moderate Verankerung, bei der der Anker in Relation stabiler ist und die aktive Einheit im Vergleich doppelt so viel wandert und maximale Verankerung, bei der sich die Verankerungseinheit nicht bewegen soll und somit fixiert ist. Mit dem Ziel, eine zuverlässigere maximale Verankerung zu erreichen, sowie Nebenwirkungen durch reziproke Kräfte zu vermeiden, erfuhr die Nutzung von Mini-Implantaten in den letzten Jahren eine deutliche Zunahme^{20,21,18}. In der Erwachsenen-Kieferorthopädie nimmt die skelettale Verankerung durch Miniimplantate eine besondere Stellung ein, da durch eine reduzierte Zahnanzahl oder parodontale Läsionen herkömmliche dentale Verankerungsmöglichkeiten eingeschränkt sind¹⁸.

Der anteriore Gaumen wird im Oberkiefer bevorzugt als Insertionsregion gewählt, da die Implantate dort in besonders stabilen Knochen- und dünn-schichtigen Mukosaverhältnissen gesetzt werden können (Abb. 2)¹⁴. Da in dieser Region das Risiko der Zahnwurzelverletzung zu vernachlässigen ist, können Implantate mit großem Durchmesser verwendet werden, deren Frakturrisiko bei der Insertion geringer ist. Des Weiteren können aufgrund des guten vertikalen Knochenangebots auch lange Implantate verwendet werden, die eine höhere Belastungsstabilität aufweisen²². Im anterioren Bereich können längere

Implantate (bis 11mm), im posterioren Bereich eher kürzere Implantate (bis 9mm) inseriert werden (Abb. 2)²³. Die Insertion von zwei verblockten Implantaten reduziert das Risiko der Implantat-Kippung und somit deren Verlustrate, wodurch die Verankerungsqualität erhöht wird. Bei ausreichender Primärstabilität können die Implantate sofort belastet werden^{24,25}.

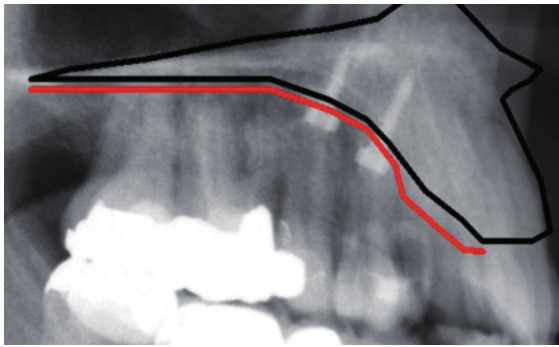


Abb. 2: FRS-Aufnahme von zwei palatinalen Miniimplantaten. „Die geeignete Insertionsstelle hat eine dünne Weichgewebsschicht (ca. 1 mm) und liegt posterior des dritten Gaumenfaltenpaares. Anterior in der Nähe der Papilla Incisiva ist die Mukosaschicht zu dick und somit ungeeignet für eine Mini-Implantat-Insertion. Der Knochen ist schwarz umrandet, die Schleimhautdicke ist durch die rote Linie dargestellt. (Wilmes et al. 2010¹⁴)

Eine unzureichende Mundhygiene erhöht das Risiko für Entzündungen und damit einhergehendem Implantatverlust²⁶. Eine Meta-Analyse, die 52 Studien über labiale Miniimplantate berücksichtigte, mittelte die Misserfolgsrate auf 13,5%²⁶, wohingegen für palatinale Miniimplantate Erfolgsraten von 94-95% bis zu 100% publiziert wurden^{27,28,29}. Die skelettale Verankerung im anterioren Gaumen ermöglicht eine verkürzte Behandlungsdauer mit einer Multibandapparatur oder sogar deren kompletten Verzicht, wodurch das Risiko von Wurzelresorptionen und Schmelzdemineralisationen reduziert wird³⁰. Mit einer 95%-igen Zufriedenheit ist die Akzeptanz der Patienten gegenüber palatinalen Implantaten als sehr hoch einzustufen. Sie werden nicht als unkomfortabel empfunden³¹.

Klinische Fallberichte

In klinischen Fallberichten von Wilmes et al. und Lübberink et al. wurden zufriedenstellende und zügige Behandlungsergebnisse durch den Mesialslider demonstriert^{14,19,32,33,34}. Erfolgreiche Behandlungen von drei erwachsenen Männern und zwei erwachsenen Frauen im Alter von 27 bis 53 Lebensjahren mit fehlenden lateralen Schneidezähnen, Eckzähnen, Prämolaren oder Molaren wurden dargestellt. Die Behandlungsdauer betrug 6-25 Monate. Drei Patienten wurden mit dem bilateralen, einer mit dem unilateralen Mesialslider und ein Patient mit dem Mesial-Distal-Slider behandelt.

Es wurde eine gute körperliche Führung der Molaren und eine gute Angulation der Inzisiven mit minimaler Veränderung dokumentiert. Bei Mesialisierung ohne Bebänderung wurde von einer leichten Kippung der durch den Molaren nach mesial geschobenen Zähne berichtet, was jedoch mit einer späteren Bebänderung kompensiert werden konnte³³.

Kanavakis et al. beschreiben klinisch allgemein und Ludwig et al. in drei Fallberichten von einer erwachsenen weiblichen, einem erwachsenem männlichen und einem jugendlichen männlichen Patienten, die Therapieergebnisse des Mesialsliders mit T-Bogen in Fällen mit fehlenden seitlichen Inzisivii. Sie postulieren ebenfalls eine gute körperliche Mesialisierung der posterioren Dentition ohne anteriore Verankerungsverluste auch in komplizierten Fällen^{35,36}. Die Mesialisierungsdauer reichte von 9 bis zu 13 Monaten. Es kamen unilaterale sowie auch bilaterale T-Mesialslider zum Einsatz. Nebeneffekte seien unter der Therapie nicht unüblich, jedoch bei früher Identifikation leicht zu beheben.

Zusammenfassend ist also der Mesialslider bei korrekter Indikation eine geeignete Apparatur zum compliance-unabhängigen Lückenschluss im Oberkiefer. Bei korrekter Frontzahnstellung ist er durch einen T-Bogen anterior erweiterbar, der die Front zusätzlich nach dem Prinzip der indirekten Verankerung stabil hält¹⁴.

Eine quantitative Analyse der Therapieeffekte des Mesialsliders wurde bisher noch nicht durchgeführt. Diese Promotionsarbeit soll deshalb den genauen Therapieeffekt des Mesialsliders eruieren.

Evaluation des kieferorthopädischen Therapieeffektes

Die Evaluation von kieferorthopädischen Therapieeffekten erfordert eine kritische Beurteilung. Sie dient der Prognostizierbarkeit der Behandlung und der Vergleichbarkeit von Behandlungsalternativen bei gleicher Indikation. Zu evaluieren sind nicht nur die erwünschten Behandlungsergebnisse, sondern auch die Nebeneffekte. Die Analyse von Behandlungsergebnissen und die Auswertung von orthodontischen Zahnbewegungen stellen jedoch eine große Herausforderung dar, da konstante anatomische Referenzstrukturen verwendet werden müssen.

Konventionelle Methoden

Konventionelle kieferorthopädische Analysen umfassen die Morphometrie radiologischer Fernröntgenseitenaufnahmen (FRS) und die Vermessung von Gipsmodellen. Fernröntgenseitenbilder verschiedener Zeitpunkte können anhand von Strukturen der Schädelbasis überlagert werden^{37,38,39,40}, erlauben jedoch nur eine zweidimensionale Analyse. Durch die Überlagerung ist eine unabhängige Analyse gegenüberliegender Quadranten schwierig bis unmöglich⁴¹. Die kieferorthopädische Analyse mittels Schieblehre ist auf nur eine Dimension beschränkt. Orthodontische Zahnbewegungen finden jedoch im dreidimensionalen Raum statt. Die digitale Volumentomographie (DVT) erlaubt die Analyse von dreidimensionalen Abbildungen und deren Überlagerung anhand anatomischer und skelettaler Strukturen⁴². Sie wurde bereits durch Hansen et al. zur Analyse der dentoalveolären Veränderung unter chirurgisch-orthodontischer Therapie verwendet⁴³.

Gegenwärtig gibt es in der Leitlinie für dreidimensionales Röntgen keine Indikation für die kieferorthopädische Routinediagnostik⁴⁴. Zudem können Artefakte kieferorthopädischer Apparaturen die Qualität von DVT-Aufnahmen reduzieren⁴⁵. Kamburoğlu et al. publizierten, dass die Genauigkeit der orthodontischen Messungen bei digitalen Scan-Modellen höher ist als im klinischen DVT⁴⁶.

Digitalisierung dentaler Modelle

Konventionelle dentale Modelle können heutzutage durch verschiedene Methoden digitalisiert werden. Zum einen besteht die Möglichkeit des optischen dreidimensionalen (3D) Laser-Scans dentaler Modelle sowie des intraoralen Scans. Außerdem können Modelle mittels DVT digitalisiert werden. Diese Methoden erlauben es, Situationsmodelle

unterschiedlicher Behandlungsstadien zu digitalisieren, zu dokumentieren und zu vergleichen^{47,48,49,50,51}.

Während der 3D-Scanner direkt die Oberfläche des Modells digital abbildet, muss diese beim DVT unter Anwendung eines geeigneten Schwellenwertes berechnet werden, was mit gängigen Softwarepaketen möglich ist. Dreidimensionale Oberflächen können unterschiedlich gespeichert werden. Besonders häufig ist die Anwendung digitaler „Netze“ (englisch *meshes*), bei welchen nicht jede 3D-Koordinate des Objektes gespeichert wird, sondern Normalenvektoren die Ausrichtung verbundener Dreiecke oder Polygone angeben. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Oberfläche als Punktwolke zu speichern. Dies bedeutet, dass die dreidimensionale Abbildung der Oberfläche durch eine Punktemenge in einem Vektorraum beschrieben ist. Jeder dieser Punkte hat eine durch seine Koordinaten dokumentierte dreidimensionale Position im Raum.

Eindimensionale Messungen einfacher Distanzen, wie z.B. der einfache Abstand zwischen zwei Zähnen, können an digitalisierten Modellen rasch durchgeführt werden und zeigen klinisch irrelevante Unterschiede oder identische Ergebnisse zu korrespondierenden Schieblehrenmessungen an Gipsmodellen^{52,53,54}. Die Genauigkeit der Messungen hängt jedoch von der Genauigkeit des Abdrucks und des Modells ab⁴⁶. Weiterhin könnten die Art der Digitalisierung (3D Scan vs. DVT) und die Registrierungsmethode Einfluss auf die Genauigkeit haben.

Oberflächen-Registrierung

Um die Messergebnisse zur Analyse der dreidimensionalen orthodontischen Zahnbewegung auswerten und vergleichen zu können, müssen korrespondierende Punkte von Modellen verschiedener Zeitpunkte, welche während der kieferorthopädischen Behandlung stabil geblieben sind, einander zugeordnet werden. Das bedeutet, dass ein Modell (bewegtes Modell) so im Raum rotiert und verschoben werden muss, dass sich die korrespondierenden Punkte der beiden Modelle bestmöglich überlagern. Erst nach solch einer Oberflächen-Registrierung können orthodontische Zahnbewegungen an digitalisierten Modellen durch Auswertung von Koordinaten ermittelt werden.

Man unterscheidet grundsätzlich zwei unterschiedliche Prinzipien der Oberflächen-Registrierung: 1. Ein automatisches Verfahren, 2. Ein kontrollpunktbasierendes Verfahren. Das automatische Oberflächen-Registrierungsverfahren wurde erstmals 1992 durch Besl und McKay beschrieben⁵⁵.

Die ausgewählten Flächen für die automatische Oberflächenregistrierung bilden entsprechend große Punktwolken. Iterativ wird dann eine Transformationsmatrix berechnet, in der die einzelnen Punkte der Punktwolken zueinander den minimalsten Abstand haben. Dieser Vorgang zwischen fixiertem und rotiertem Modell wiederholt sich solange, bis das Verfahren konvergiert. Seit der Einführung wurden mehrere Modifikationen und Verbesserungen veröffentlicht^{56,57,58}. Da es sich hierbei um ein Gradienten-basiertes Verfahren handelt, konvergiert es sehr schnell. Hierbei besteht die Gefahr der Passung lokaler Optima, welche dann als beste Registrierung identifiziert werden, obwohl die Modelle invers aufeinanderliegen. Solch ein *iterative closest point* (ICP) basiertes Verfahren ist gerade dann problematisch, wenn die Modelle vorab nicht günstig ausgerichtet worden sind. Dies kann durch eine initiale kontrollpunkt-basierte Registrierung vermieden werden.

Das kontrollpunkt-basierte Verfahren braucht mindestens drei korrespondierende Referenzpunkte auf den zu registrierenden digitalen Modellen. Mittels eines „kleinste-Quadrate“-Verfahrens wird eine Transformationsmatrix berechnet, welche den quadratischen Abstand zwischen den Referenzpunkten minimiert. Die Referenzpunkte werden in der Regel manuell ausgewählt.

Das für die automatische Überlagerung ausgewählte Areal und die Position der Referenzpunkte beeinflussen das Ergebnis der Registrierung. Es gibt einige Problemstellen bei der Überlagerung von digitalen Modellen unterschiedlicher kieferorthopädischer Behandlungszeitpunkte. Die Schädelbasis kann, anders als bei der FRS-Analyse, nicht als Referenz zur Überlagerung herangezogen werden. Das einzig abgebildete Hartgewebe sind die Zähne, die durch ihre behandlungsbedingten Lageveränderungen beim Überlagerungsprozess nicht herangezogen werden sollten. Der Alveolarkamm kann seine Form ebenfalls unter orthodontischer Therapie und während des Wachstums verändern, wobei der harte Gaumen weitestgehend unbeeinflusst bleibt. Schon in den späten Sechzigerjahren wurde die Stabilität der Gaumenfalten unter kieferorthopädischer Therapie untersucht^{59,60}.

Diese Feststellung wurde mehrfach bekräftigt^{61,62} und ebenso für Patienten im Wachstum⁶³ sowie unter kieferorthopädischer Behandlung mit einem Headgear oder funktionskieferorthopädischen Geräten bestätigt⁶⁴. Um eine (semi)-automatische Registrierung der Palatinalfläche zu erreichen, muss somit vorab das Areal der Gaumenfalten extrahiert werden. Anschließend wird ein Oberflächenregistrierungs-

algorithmus angewendet, um die Transformationsmatrix zu berechnen, die das bewegte Modell dem fixierten Modell entsprechend ausrichtet.

Studien zur Quantifizierung orthodontischer Zahnbewegungen mittels

Modellscanregistrierung

Choi et al. verwendeten eine automatische Oberflächenregistrierung einer jeweils beliebig umrandeten palatinalen Region mit den Gaumenfalten als Referenzareal, wobei durch einen automatischen Prozess die Position mit der höchsten Übereinstimmung der Oberflächen des Gaumens errechnet wurden^{48,65,66,67}. Sandler et al. sowie Grauer et al. haben hierbei ICP-basierte Verfahren angewendet^{68,69}. Talaat et al. verwendeten eine kommerzielle *Software* und umschrieben ein kleineres Referenzareal, das nur die Gaumenfalten umfasste⁷⁰. Andere führten die Registrierung anhand unterschiedlich vieler Kontrollpunkte auf dem ersten bis dritten Gaumenfaltenpaar oder der Papilla Inzisiva durch^{71,72,73}.

Ashmore et al. zeigten, dass die Errechnung der orthodontische Zahnbewegung basierend auf der Registrierung von Kontrollpunkten auf den Gaumenfalten von digitalen dentalen Modellen unterschiedlicher Zeitpunkte möglich ist. Zusätzlich richteten sie alle digitalisierten Modelle anhand der Papilla Inzisiva, der Sutura Palatina und der Okklusionsebene im kartesischen Koordinatensystem aus⁴⁷. Thiruvengkatachari et al. kombinierten die Methodik der Überlagerung durch palatinale Referenzpunkte mit einer anschließenden Anwendung der oberflächenbasierten Registrierung⁵¹. Lee et al. verwendeten ebenfalls eine Modellausrichtung im Koordinatensystem, ohne jedoch genaue Referenzebenen oder Registrierungs-Methoden zu beschreiben⁷⁴.

Limitationen der bisherigen Studien

Die Genauigkeit und Methode der Registrierung beeinflussen die Genauigkeit des Ergebnisses, welches seinerseits von der Anzahl und Art der Kontroll- und Eckpunkte abhängig ist. Leider machen die meisten Studien zur Analyse der dreidimensionalen Zahnbewegung weder zu diesen, noch zu den Algorithmen, die angewandt wurden, oder potenziellen Fehler der Registrierungsmethode genaue Angaben. Sie treffen somit keine Aussage über die Genauigkeit und Nachteile ihrer Analysemethode oder ermöglichen die übertragene Anwendung ihrer Methodik.

Die Methode des ICP-Registrierungsverfahrens hängt maßgeblich von der Genauigkeit der ersten Überlagerung ab und beinhaltet die Gefahr von lokalen zufälligen Optima, die grobe Überlagerungsfehler ergeben können. Somit wird häufig ein kontrollpunktbasiertes *Matching* vor dem ICP angewendet oder ein vorab ausgewähltes Areal für die Anwendung des ICP eingegrenzt. In Kontrast zum ICP-Ansatz benötigt das kontrollpunktbasierte Verfahren eine Vorauswahl der zu verknüpfenden Punkte. In manchen Fällen ist die akkurate KP-Auswahl im Gaumen durch wachstums- oder behandlungsbedingte Veränderungen erschwert und dort begangene Fehler wirken sich auf die Genauigkeit der ermittelten Zahnbewegung aus.

Um Behandlungsergebnisse miteinander vergleichen zu können, sollte die orthodontische Zahnbewegung entlang der anatomischen Dimensionen ventral, dorsal und kaudal beschrieben werden. Dafür müssen die digitalen Scans innerhalb eines Referenz-Koordinatensystems, das die anatomischen Orientierungen repräsentiert ausgerichtet werden. Der Großteil der erwähnten Studien beschreibt die Zahnbewegungen mit anatomischen Richtungsangaben, erwähnt aber keine entsprechende vorab durchgeführte Ausrichtung der Modellscans.

Ziele

Im Rahmen einer retrospektiven Studie soll der Therapieeffekt des Mesialsliders durch dreidimensionale Analyse dentaler Modelle, die durch ein optisches Scanverfahren digitalisiert wurden, evaluiert werden. Ziel war die computergestützte dreidimensionale Rekonstruktion der Bewegung von Zähnen unter orthodontischer Therapie anhand Überlagerung digitalisierter dentaler Patientenmodelle vor und nach Abschluss der Mesialisierung.

Es werden kontrollpunktbasierte und automatisierte Registrierungsverfahren, sowie deren Kombination angewendet. Um die Zahnbewegung in ihren Richtungsangaben akkurat beschreiben zu können, sollen die digitalen Modelle einheitlich innerhalb eines Referenz-Koordinatensystems ausgerichtet werden.

Es soll der dreidimensionale Mesialisierungseffekt der Molaren in verschiedenen Therapiekombinationen (einseitig, beidseitig, Mesial-Distalslider) untersucht werden. Nebeneffekte der Behandlung wie eine Mittellinienverschiebung, Zahnachsenveränderung der Front oder der bewegten Molaren werden ebenfalls untersucht.

Material und Methoden

Patientendaten/-angaben

In dieser Studie wurden Patienten der Poliklinik für Kieferorthopädie der westdeutschen Kieferklinik untersucht, die mit einem einseitigem Mesialslider (EM), beidseitigem (BM) oder einem Mesial-Distalslider (MD) behandelt wurden. Die primäre Patientenselektion erfolgte mit dem klinikinternen Softwareprogramm ImageCollector, einer Datenbank in der die Patienten der Poliklinik für Kieferorthopädie namentlich und nach Behandlungsart geordnet mit ihren Röntgenbildern und einer Fotodokumentation des Behandlungsverlaufes aufzufinden sind. Der Zeitraum der Studie erstreckte sich von 2008 bis 2014.

Einschlusskriterien

In die Studie wurden Patienten eingeschlossen, deren aktive Behandlungen abgeschlossen waren. Im Sinne der Vergleichbarkeit der wirkenden Kraftsysteme wurden ausschließlich Patienten eingeschlossen, bei denen außer einem Molaren im selben Quadranten keine zusätzlichen Zähne mit Hilfe des Mesialsliders mesialisiert wurden. Außerdem musste die Apparatur durch zwei Benefit Implantate (PSM medical solutions; Tuttlingen; Deutschland) skelettal (para-)median im anterioren Gaumen verankert worden sein.

Ausschlusskriterien

Ausschlusskriterien der Studie waren Syndrome, systemische Erkrankungen oder die Einnahme von Medikamenten, die den Knochenstoffwechsel beeinflussen. Außerdem wurden Patienten mit mäßigen oder schweren parodontalen Erkrankungen ausgeschlossen.

Patientenkollektiv

Die primäre Auswahl ergab ein Kollektiv von 89 Patienten, die mit dem Mesialslider zur Bewegung eines Oberkiefermolaren in einem oder beiden Quadranten behandelt wurden. Zwanzig dieser Patienten wurden einseitig (EM), 50 beidseitig (BM) und 19 in Kombination mit einem Distalslider behandelt (MD).

Von 16 Patienten der primären Auswahl waren zum Studienzeitpunkt keine Modelle verfügbar. Davon waren 2 Patienten aus Gruppe EM, 8 Patienten aus Gruppe BM und 6 Patienten aus Gruppe MD. Bei 24 Patienten waren die Modelle nicht vollständig vorhanden oder nicht auswertbar. Das bedeutet, dass entweder nur ein Ausgangs- (t_0) oder

ein Abschlussmodell (*t1*) vorlag oder die Modelle auf Grund von Schäden, die die Referenzpunkte oder Messpunkte unbestimmbar machten, nicht auswertbar waren. Von diesen Patienten waren 8 aus der EM-, 14 aus der BM- und 2 aus der MD-Gruppe.

Somit wurde der in dieser Studie analysierte Behandlungseffekt des Mesialsliders anhand von 48 Patienten retrospektiv untersucht, von denen 9 einseitig, 28 beidseitig und 11 in Kombination mit einem Distalslider behandelt wurden (Tabelle 1).

	EM	BM	MD	gesamt
Primäre Patientenauswahl	20	50	19	89
Modelle nicht auffindbar	2	8	6	16
Modelle ungeeignet oder teilweise fehlend	8	14	2	24
Weitere Ausschlusskriterien	1	0	0	1
Finale Patientenauswahl	9	28	11	48

Tabelle 1: Patientenauswahl: Einteilung nach Selektionskriterien und Behandlungsgruppen

Von 40 Patienten der finalen Auswahl lagen Behandlungsakten vor, von denen 7 mit dem EM, 24 mit dem BM und 9 mit dem MD behandelt wurden. In die Studie wurden sowohl Patienten eingeschlossen, deren Behandlung durchweg erfolgreich war, als auch Patienten deren Behandlungen Komplikationen aufwiesen, abgebrochen werden mussten oder deren Behandlungseffekt geringer war als geplant.

Des Weiteren wurden Fernröntgenseitenbilder (Orthophos XGplus, Sirona; Bensheim; Deutschland) der Patienten analysiert. Von 35 Patienten der primären Auswahl lagen Aufnahmen prae und post Therapie mit dem Mesialslider vor. Vierzehn dieser Patienten konnten nicht in die Analyse eingeschlossen werden. Gründe waren nach Abschluss der Mesialisierung bis zum Zeitpunkt der zweiten Aufnahme weitere durchgeführte, die Zahnachse beeinflussende kieferorthopädische Therapien oder nicht befundbare Röntgenaufnahmen durch starke Überlagerung in der Molarenregion. Somit wurde eine Analyse der Zahnachsenveränderung unter Therapie mit dem Mesialslider anhand der FRS von 21 Patienten durchgeführt. Fünfzehn dieser Patienten waren weiblich und sechs männlich.

Patientencharakteristika

In die Studie wurden 26 weibliche und 22 männliche Patienten eingeschlossen.

Das Patientenalter reichte zu Behandlungsbeginn von 11 bis zu 53 Lebensjahren (Abb. 3).

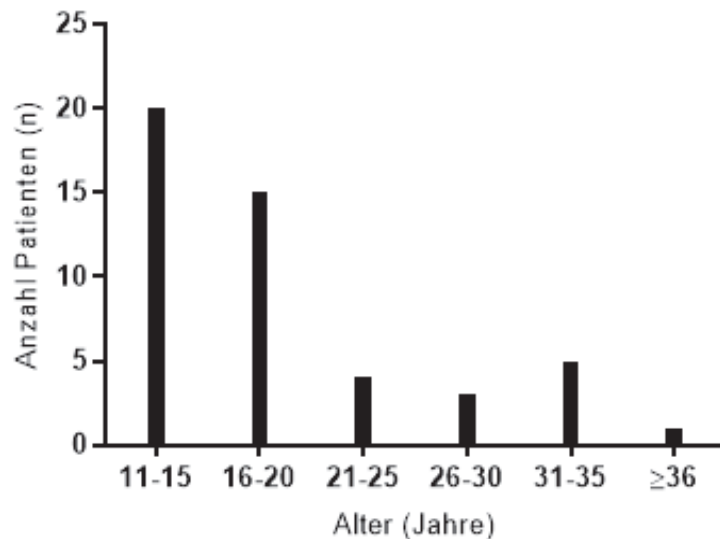


Abb. 3: Altersverteilung im Patientenkollektiv

Das durchschnittliche Alter des Patientenkollektivs betrug $19,1 \pm 8,2$ Jahre. Das mediane Alter lag bei 16,5 Jahren. Zwischen den Behandlungs-Gruppen gab es hinsichtlich des Alters keine signifikanten Unterschiede ($p > 0,05$) (Abb. 4).

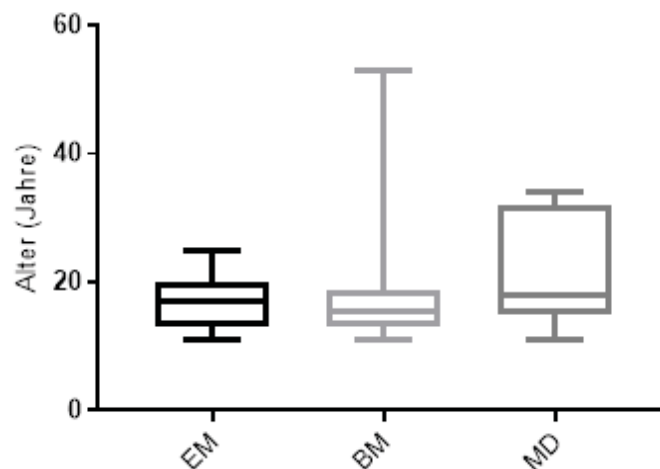


Abb. 4: Durchschnittliches Alter des Patientenkollektivs, unterteilt in die einzelnen Behandlungsgruppen mit Standardabweichung; Einseitiger Mesialslider (EM), beidseitiger Mesialslider (BM), Mesial-Distalslider (MD)

Ethische und rechtliche Unbedenklichkeit

Das Studienprotokoll wurde durch die Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf geprüft und als ethisch und rechtlich unbedenklich beurteilt. Das zugehörige Aktenzeichen lautet 5075.

Untersuchungsmaterialien

Patientenmodelle

Die Analysen wurden an archivierten dentalen Gipsmodellen der Patienten ausgeführt.

Das für die Herstellung der Modelle verwendete Abformmaterial war Alginat (Tetrachrom Nr.1150, Kanidenta, Germany). Als Modellwerkstoff wurde Hartgips (BonDur M, WiegemGPann Dental GmbH, Germany) verwendet.

Erstellungsindikation und -Zeitpunkt der Modelle waren:

- Schaumodelle zu Behandlungsbeginn (zwecks kieferorthopädischer Planung)
- Arbeitsmodelle zur Herstellung von kieferorthopädischen Geräten
- Schaumodelle während der Behandlung (zwecks Dokumentation von Zwischenergebnissen)
- Schaumodelle zu Behandlungsabschluss

Die *t0* und *t1* Modelle mussten eine ausreichend hohe Qualität aufweisen, sodass sowohl die bewegten Zähne, als auch die Zeichnung der Gaumenfalten unbeschädigt und suffizient abgeformt beziehungsweise ausgegossen worden sein mussten.

Digitalisierung und Bilddatenverarbeitung

Die Gipsmodelle wurden mit einem optischen Laser Scanner (Dentaurum Smart Optics Activity 300, Bochum, Germany) (Abb. 5) mittels Streifenlichtprojektion mit einer Auflösung von 20 µm mit dem Software-Programm „Activity Orthodontics V2.7.04“ (Dentaurum, Bochum, Germany) digitalisiert. Das standardisierte Einspannen der Modelle während des Scan-Vorgangs (Abb. 5 und 11) und die Einstellung „Oberkiefer-Scan“ im Software Programm ergab eine gleich orientierte Ausrichtung der digitalen Modelle (anterior/posterior; links/rechts; koronal/basal). Nach jedem Scan wurden die digitalen Modelle auf Fehler kontrolliert und die Option „*hole filling*“ des Softwareprogramms angewandt, falls Löcher im Bereich der Molaren oder des Gaumens vorhanden waren.



Abb. 5: Optischer Scanner mit im Objekthalter eingespanntem Gipsmodell

Nach dem Registrierungsprozess wurden die resultierenden *surface meshes* in das *stereolithography file* (STL) Format exportiert. Die entsprechenden *surface meshes* wurden mit einem kommerziellen Software-Programm (Matlab R2014a, The Mathworks, USA) generiert und vor Verarbeitung auf eine Einheitsgröße von 40.000 Flächen angeglichen. Die Punktselektion wurde mit einem *open source* Software Programm (Meshlab, 3D-CoForm project) durchgeführt. Die Koordinaten der manuell ausgewählten Punkte wurden mit dem *PickPoints-feature* erhoben und in diesem Format gesichert. Anschließend wurden sie mit einem von Dr. med. dent. Kathrin Becker programmierten Skript in ein *comma separated value file* konvertiert, bei dem MatLab Zugriff auf die Koordinaten hat.

Zur Validierung wurden exemplarisch die *t0* und *t1* Modelle von 10 zufällig ausgewählten Patienten der Gruppe BM für eine zusätzliche Modell-Digitalisierung mittels digitaler Volumentomographie (Orange green 3D, Vatech; Korea) ausgewählt. Dieses Patientenkollektiv wird im Weiteren als *Methodik-Gruppe* bezeichnet. Die Einstellung der Aufnahme-Parameter erfolgte nach der Empfehlung des Herstellers (*CBCT, Man, Normal; Mn, 8x5, low dose, center, standart* (0,080)). Mittels Amira R6.0.1 wurden die digitalen Modelle visualisiert. Die unten beschriebenen Mess- und Kontrollpunkte wurden auf den Modellen mittels Zinnfolie ($d=0,5\text{mm}$) markiert und mit dem Programm ImageJ-win64 die Koordinaten der Punkte von den jeweiligen Schnitten der DVT Aufnahmen (Abb. 6) erhoben und manuell in Excel übertragen.



Abb. 6: Visualisierung der digitalen Modelle: der optische Scan mit Matlab R2014a (links) und das DVT mit Amira R 6.0.1 (Mitte) sowie Schnitte der DVT Aufnahme (rechts).

Des Weiteren erfolgten im gesamten Patientenkollektiv manuelle eindimensionale Messungen zwischen einem Kontrollpunkt und einem Messpunkt mittels Schieblehre (Genauigkeit $\pm 0,02\text{mm}$) und dem *measuring-tool* in MeshLab, die miteinander verglichen wurden.

Ulf Schmücker berechnete im Zuge seiner Masterarbeit, in der er acht Digitale Volumen Tomographen und fünf 3D Scanner analysiert hat, die Abstände zwischen den digitalen Oberflächen der hier erstellten DVT-Aufnahmen und den hier erstellten 3D-Scans. Es wurden die DVT- und Scan-Datensätze der *t0* und *t1* Modelle der *Methodik-Gruppe* untersucht.

Die Modelle wurden mittels der fünf unten beschriebenen für das DVT gewählten Mess- und Kontrollpunkte sowie ICP-basierter Registrierung überlagert und die Abstände von der 3D-Scan- zur DVT-Oberfläche berechnet. Um sockelbedingte ausgeprägte Maximalwerte, wie im Beispielmodell abgebildet zu vermeiden (Abb. 23), wurden die STL-Datensätze durch einheitliches Beschneiden auf den Zahnkranz reduziert.

Untersuchungsmethoden

Mess- und Kontrollpunktselektion

Molaren-Messpunkte

Um die körperliche Bewegung der Molaren unabhängig von eventuellen behandlungsbedingten Rotationen zu beschreiben, wurde ein möglichst zentraler Punkt der okklusalen Fläche bestimmt. Dazu wurden Diagonalen zwischen den mesiopalatalen und

distobukkalen, sowie den mesiobukkalen und distopalatinalen Höckerspitzen gelegt. Der Schnittpunkt dieser Diagonalen bildete das Zentrum des Zahnes auf der okklusalen Fläche ab und bildete den Messpunkt (MP) des Molaren (Abb. 7). Alle manuell ausgewählten Messpunkte wurden auf den Gipsmodellen mit Bleistift markiert und fotodokumentiert, um ein sicheres visuelles Wiederauffinden in der digitalen dreidimensionalen Datei zu gewährleisten.

Die Punktauswahl der *Methodik-Gruppe* entspricht der Abbildung 7.

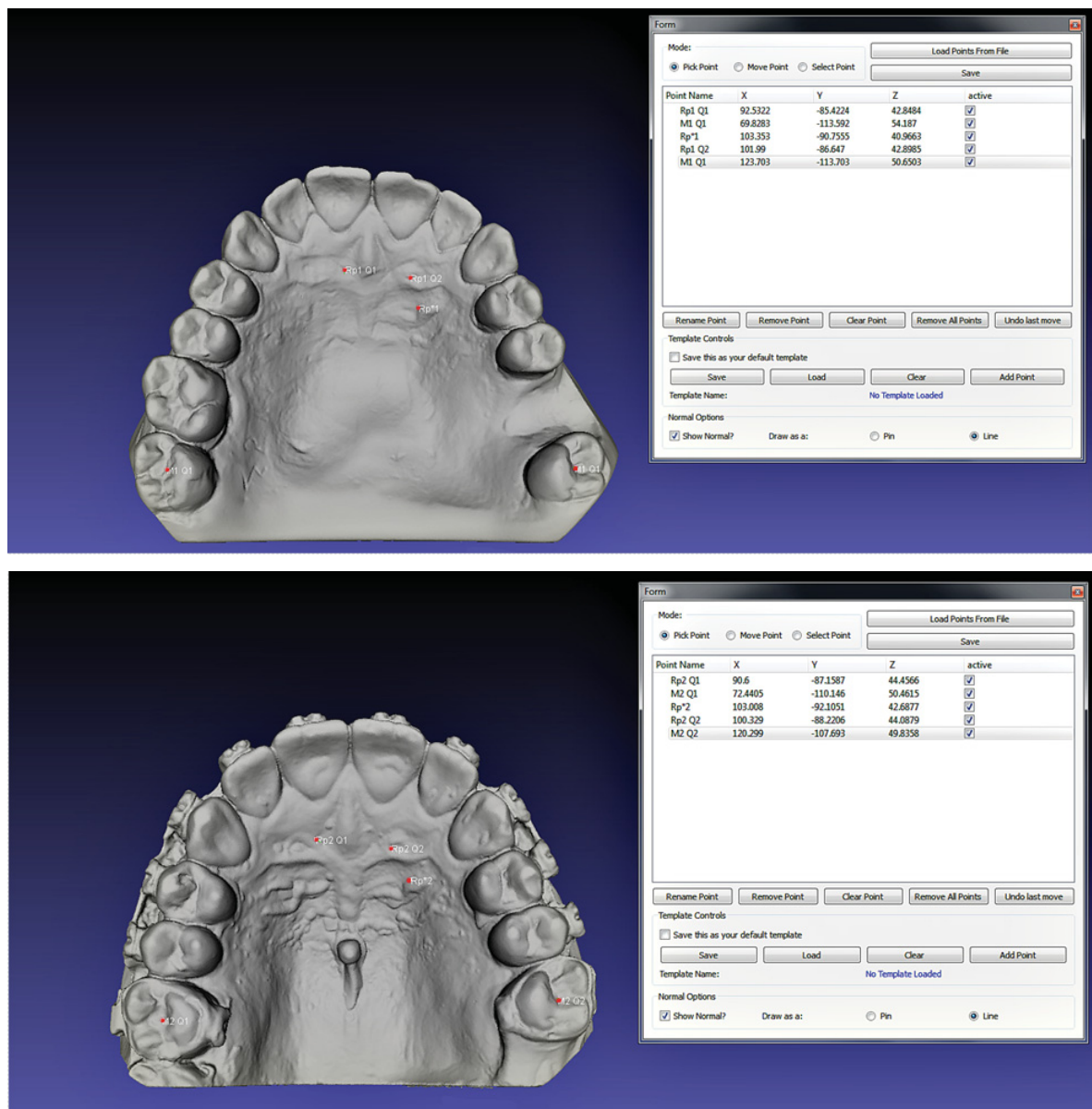


Abb.7: Messpunktbestimmung. Abgebildet ist ein in Meshlab dargestelltes Modell zum Zeitpunkt *t0* (oben) und *t1* (unten). Mit dem *PickPoints*-feature sind 3 Kontrollpunkte im anterioren Gaumen, sowie die beiden Messpunkte auf den Molaren dargestellt. In dem rechten Kasten werden die entsprechenden Koordinaten zu den Punkten angezeigt. Die hier abgebildete Punktauswahl entspricht der des Vergleiches der Registrierungsergebnisse zwischen DVT und Scan der *Methodikgruppe*.

Inzisiven-Messpunkte

Als ein möglicher Nebeneffekt der kieferorthopädischen Behandlung mit dem Mesialslider wurde die Mittellinienverschiebung untersucht. Es wurden jeweils die distalen und mesialen Enden der Inzisalkanten zu den Zeitpunkten t_0 und t_1 markiert. Aus den beiden mesialen Endpunkten der Inzisalkante wurde der Mittelpunkt rechnerisch bestimmt (Abb. 8).

Dieser Punkt wird im Folgenden als *Inzisalpunkt* bezeichnet. Verschiebungen der Mittellinie von t_0 zu t_1 wurden anhand dieses Punktes in ihrem räumlichen Ausmaß ermittelt.

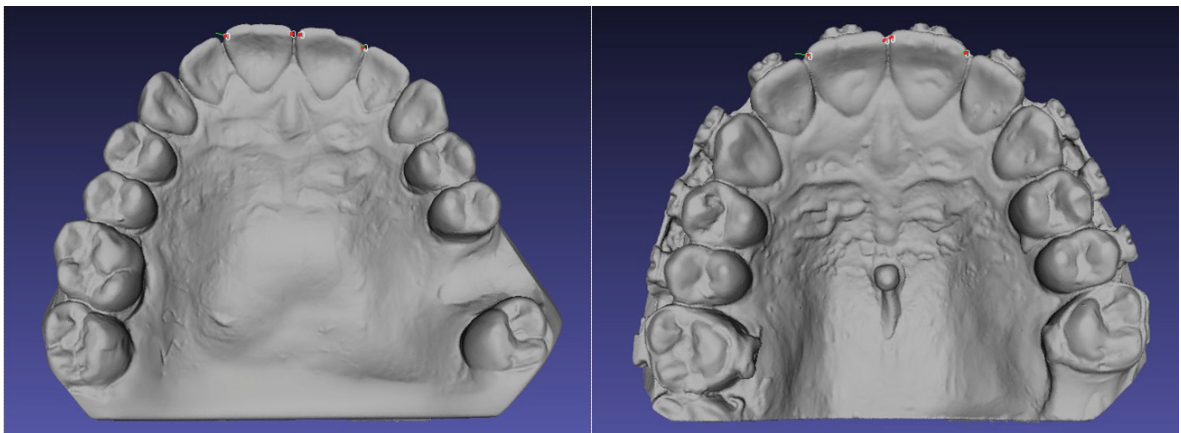


Abb. 8: Messpunktbestimmung. Abgebildet ist ein in Meshlab dargestelltes Modell zum Zeitpunkt t_0 (links) und t_1 (rechts). Mit dem *PickPoints*-feature sind die distalen und mesialen der Inzisalkanten der mittleren Inzisiven ausgewählt worden.

Kontrollpunkte der manuellen Oberflächenregistrierung

Zur kontrollpunktbasierter Oberflächenregistrierung wurden im Bereich des befestigten Gaumens anatomische Kontrollpunkte (KP), die durch die kieferorthopädische Behandlung nicht verschoben wurden, markiert. Diese lagen im Bereich der Gaumenfalten an definierten End- oder Aufzweigungspunkten, die an den t_0 und t_1 Modellen sicher aufzufinden waren (Abb. 9).

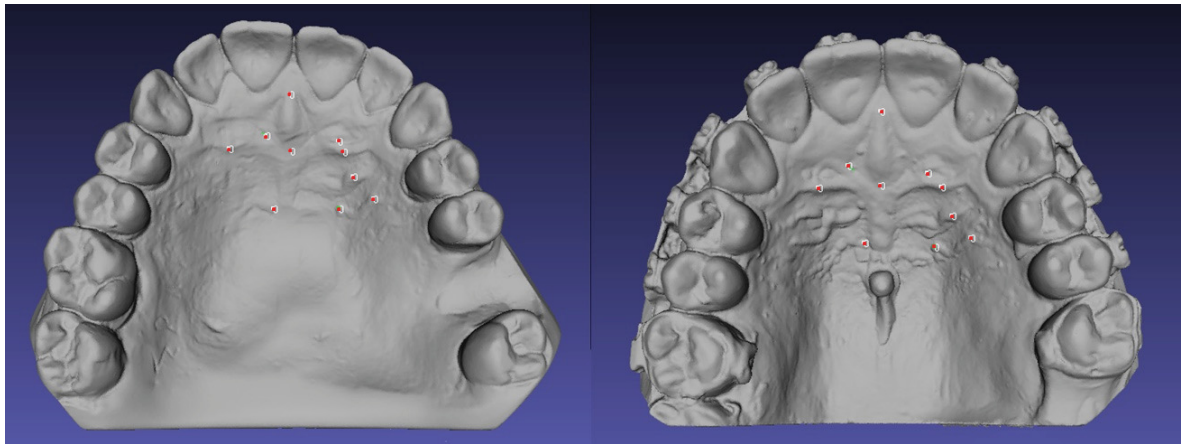


Abb. 9: Kontrollpunktbestimmung: Abgebildet ist ein in Meshlab dargestelltes Modell zum Zeitpunkt t_0 (links) und t_1 (rechts). Mit dem *PickPoints-feature* sind zehn anatomische Kontrollpunkte (rot) im Gaumen ausgewählt worden.

Kontrollpunkte für ICP und Alignment

Sechs weitere Kontrollpunkte dienen der Eingrenzung einer standardisierten *region of interest* (ROI) für die automatische Oberflächenregistrierung sowie der anatomisch orientierten Ausrichtung der Modelle im kartesischen Koordinatensystem. Der erste Punkt lag auf Höhe des marginalen Randes der Inzisiven in Verlängerung der Sutura Palatina. Der zweite Punkt lag auf Höhe der Molaren auf der Sutura Palatina. Weitere vier Punkte lagen auf korrespondierenden Bereichen der Modelle t_0 und t_1 auf Höhe des marginalen Randes des anterioren und posterioren Gaumens (Abb. 10).

Die Fläche unterhalb der marginalen Grenzpunkte bildet die ROI für das ICP-basierte Verfahren.

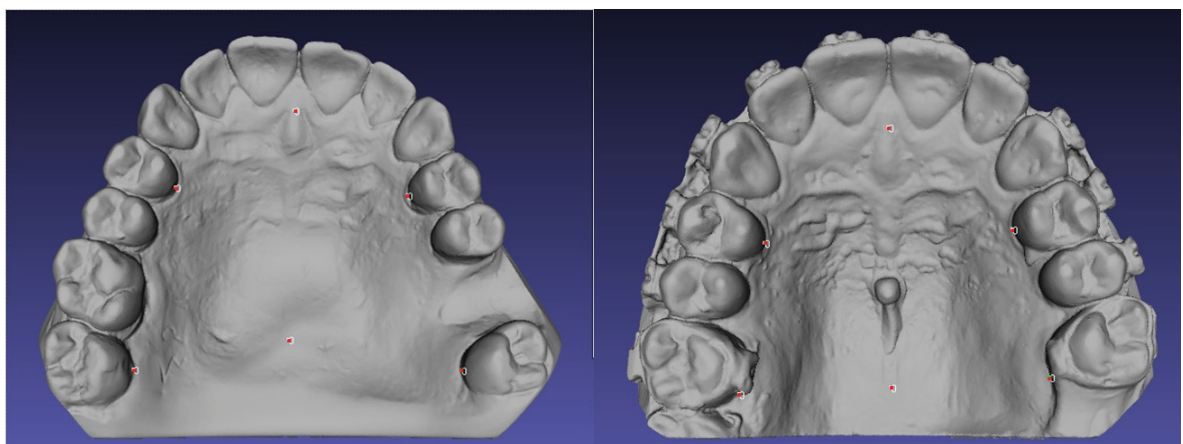


Abb. 10: Kontrollpunktbestimmung. Abgebildet ist ein in Meshlab dargestelltes Modell zum Zeitpunkt t_0 und t_1 . Mit dem *PickPoints-feature* sind fünf marginale Grenzpunkte und ein Punkt auf der Sutura Palatina ausgewählt worden.

Modellausrichtung

Da die ursprünglichen Modelle nicht nur aus Schau-, sondern auch aus Arbeitsmodellen bestanden, variierten sie in der Beschaffenheit ihrer Sockel, an denen die Modelle im 3D Scanner eingespannt wurden (Abb. 11). Selbst ein einheitliches Modelldesign im Sinne von Schaummodellen könnte durch patientenindividuelle Faktoren (z.B. durch Wachstum) keine identische Ausrichtung garantieren.



Abb. 11: Oberkiefermodell im Objekthalter. Die Halteschrauben liegen anterior, der Objekthalter ist basal

Um die Zahnbewegung anhand der Koordinaten zu bestimmen, war eine einheitliche Orientierung der Modelle notwendig. Dies bedeutete eine größtmöglich identische Ausrichtung der Modellscans in einem kartesischen Koordinatensystem gleichen Ursprungs.

Dies erfolgte durch ein für diese Anwendung programmiertes MatLab-Skript. Als erstes wurde der *Papillenpunkt* in den Ursprung translatiert und die vier weiteren mGP mittels Hauptkomponentenanalyse so nah wie möglich an die xy-Ebene heranrotiert. Eine Ausrichtung entlang der Okklusionsebene wurde nicht gewählt, da durch eventuell behandlungsbedingt indizierte Extrusion oder Intrusion der Molaren diese als Referenzebene zur Messung dieser Zahnbewegung als ungeeignet angesehen wurde. Im dritten und letzten Schritt wurde das digitale Modell anhand eines weiteren Referenzpunktes auf der Sutura palatina symmetrisch entlang der y-Achse ausgerichtet. Der *Papillenpunkt* entspricht weiterhin dem Nullpunkt. Somit war eine Bestimmung der dreidimensionalen kieferorthopädischen Zahnbewegung in anatomischer Ausrichtung möglich (Abb. 12).

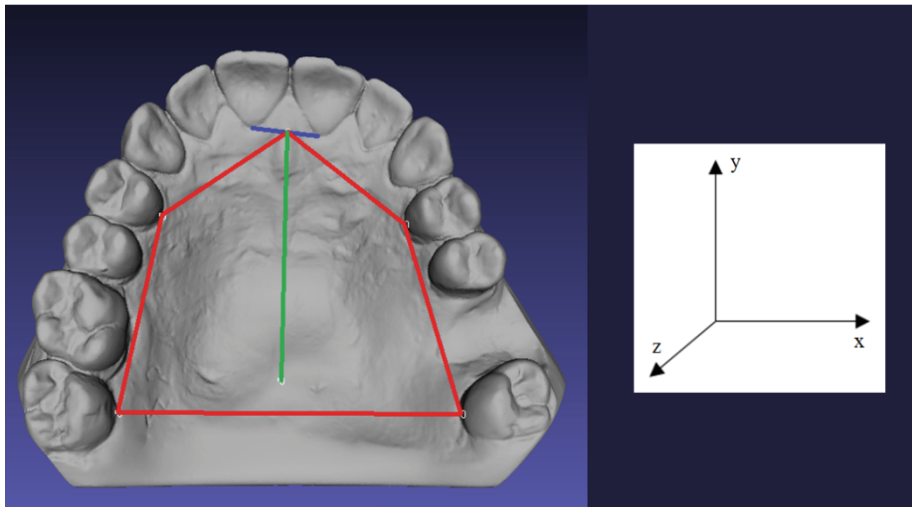


Abb. 12: Modellorientierung im Koordinatensystem. Blau die Verbindung der marginalen Grenzen der Inzisivi; Grün die Sutura Palatina; Die mGP bilden die Eckpunkte des roten Pentagons. Daneben die Orientierungsrichtungen des Modells im kartesischen Koordinatensystem.

Registrierung

Kontrollpunkt-basierte Registrierung

Nach der initialen Ausrichtung erfolgte die kontrollpunkt-basierte Registrierung mittels der manuell selektierten palatinalen Kontrollpunkte unter Verwendung des Ansatz von Besl und McKay⁵⁵ und der durch Nghia Ho⁷⁵ für Matlab erstellten Anwendung. Das $t0$ Oberflächennetz wurde als fixiertes Modell ausgewählt, während das $t1$ Oberflächennetz das bewegte Modell bildete. Unter Verwendung der entsprechenden Transformations-Matrizen wurden alle $t1$ Kontrollpunkte separat transformiert.

Anschließend wurden nach jedem Registrierungsschritt die *root-mean-square error* (RMS) und Hausdorff Distanzen⁷⁶ erfasst.

ICP-basierte Registrierung

Als nächstes erfolgte die Feinregistrierung unter Verwendung eines *iterative closest point algorithm* (ICP). Die Fläche basal der fünf marginalen Grenzpunkte bildete die *region of interest*, auf deren Basis die automatische Oberflächenregistrierung durchgeführt wurde (Abb. 13).

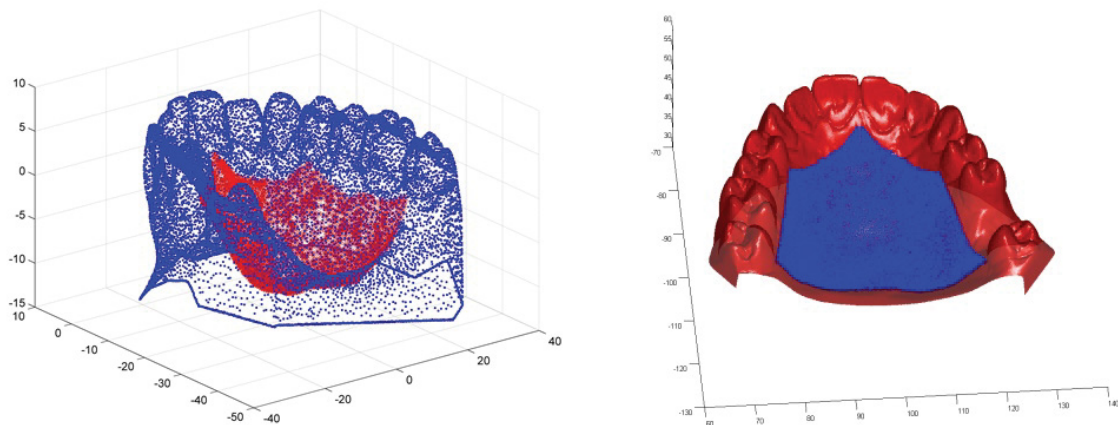


Abb. 13: Visualisierung der standartisierten Überlagerung. Die pentagonförmige *region of interest* für die *itreative closest point* basierte Registrierung links in rot und rechts in blau dargestellt.

Der k -d-Baum basierte ICP Algorithmus wurde angewandt mit $t0$ als fixiertem und $t1$ als bewegtem Modell. Es wurde eine unter der Berkeley Software Distribution lizenzierte und von Martin Kjer und Jakob Wilm 2013 implementierte ICP-Version verwendet⁵⁵. Die Messpunkte an den Molaren und Inzisiven des $t1$ -Modells wurden entsprechend des Ergebnisses der ICP basierten Registrierung separat transformiert.

Nach jedem Registrierungsschritt wurden die *RMS-scores* und Hausdorff Distanzen⁷⁶ erfasst.

Orthodontische Zahnbewegung

Die im Anschluss an die Registrierungsansätze ermittelten Differenzen zwischen den $t0$ und $t1$ Koordinaten der dentalen Messpunkte der Molaren und Inzisiven ergaben die entsprechende dreidimensionale orthodontische Zahnbewegung. Die absoluten Werte wurden als Euklidische Distanzen angegeben.

Fernröntgenseitenbildauswertung

In der FRS-Analyse wurden Nebeneffekte der Behandlung mit dem Mesialslider durch die Betrachtung der angulären Veränderung der bewegten Molaren sowie die Auswirkung auf die restliche Bezahnung exemplarisch anhand der Achsenänderung der Frontzähne unter Verwendung der Methodik von Nienkemper et al.²³ untersucht.

Die Achse des Molaren wurde durch die Verbindungslinie zwischen Trifurkation und Zentroidpunkt (Mittelpunkt zwischen der größten mesialen und distalen Ausdehnung der im Röntgenbild erkennbaren Zahnkrone) und die der oberen Frontzähne durch die Verbindung des Apex und der Inzisalkante definiert. Zur Erfassung der angulären Veränderungen wurden die Winkel zwischen den Zahnachsen und dem Oberkieferplanum (SpA-SpP) bestimmt (Abb. 14). Die Überlagerung der FRS wurde anhand von stabilen Referenzstrukturen (S, N) der anterioren Schädelbasis nach Björk und Skieller⁷⁷ durchgeführt und die Veränderung der beschriebenen Winkel automatisch durch den Überlagerungsprozess bestimmt.

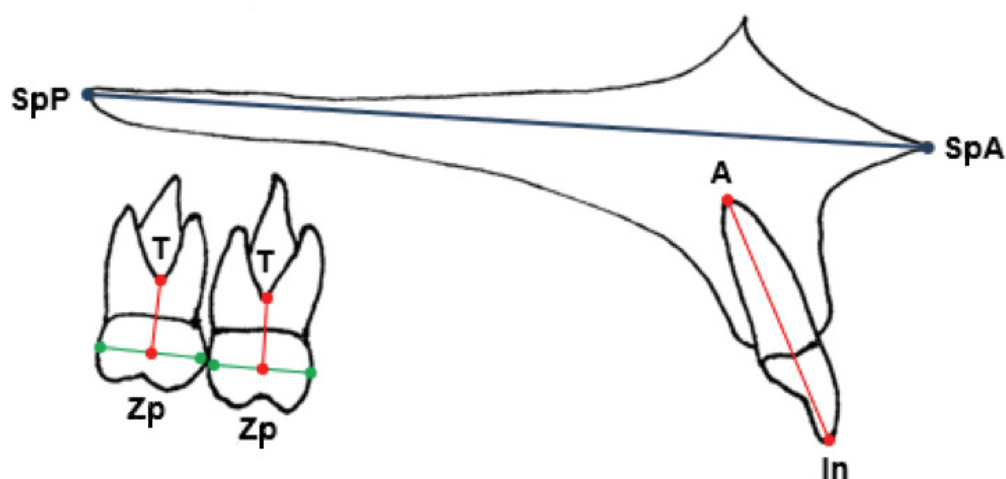


Abb. 14.: FRS-Analyse: Oberkieferplanum blau, Zahnachsen rot, mesio-distale Ausdehnung grün, Spina nasalis anterior (SpA), Spina nasalis posterior (SpP), Apex (A), Inzisalkante (In), Trifurkation (T), Zentroidpunkt (Zp)

Es wurden 21 FRS, die vor Mesialisierungsbeginn aufgenommen wurden und 21 FRS, die nach Mesialisierungsabschluss aufgenommen wurden, analysiert und überlagert.

Statistische Analysen

Die statistischen Analysen wurden mit dem Software-Programmen R (Development Core Team), Microsoft Excel 2016 und GraphPad prism 7 durchgeführt.

Für die Messwerte und Gruppen wurden Mittelwerte, Standardabweichungen, Mediane, Quartile sowie Minima und Maxima berechnet. Auf Normalverteilung der Daten wurde mit dem Shapiro-Wilk Test getestet.

Der statistische Unterschied zwischen zwei Gruppen wurde durch den *students t-test* ermittelt.

Ob ein linearer Zusammenhang unter den beiden Registrierungsansätzen ermittelten Zahnbewegungen besteht, wurde durch lineare Regressionanalysen untersucht. Die Ergebnisse wurden als signifikant gewertet, wenn $p < 0.05$ war.

Ergebnisse

Behandlung mit dem Mesialslider

Behandlungsindikation

Die Patienten der finalen Auswahl wurden der Mesialisierungsindikation entsprechend unterteilt. In der Gruppe BM wurden der erste und zweite Quadrant gesondert betrachtet, da dort nicht immer die gleiche Behandlungsindikation vorlag. Ein fehlender Frontzahn (Inzisivus, Caninus) bildete mit 34 Fällen die häufigste Behandlungsindikation zur Therapie mit dem Mesialslider im untersuchten Patientenkollektiv. In 22 Fällen wurde aufgrund fehlender Prämolaren und in 12 Fällen wegen fehlender Molaren mesialisiert. Gründe für die fehlenden Zähne waren Aplasien sowie Extraktionen aufgrund kariöser Zerstörung, Traumata sowie Platzmangel und andere Gründe. Zwei Patienten wurden mit dem BM aufgrund von Fehlständen in Form von Lückenständen bei voller Bezahnung und vier Patienten mit dem MD zur Korrektur einer inkorrekten Mittellinie behandelt (Abb. 15).

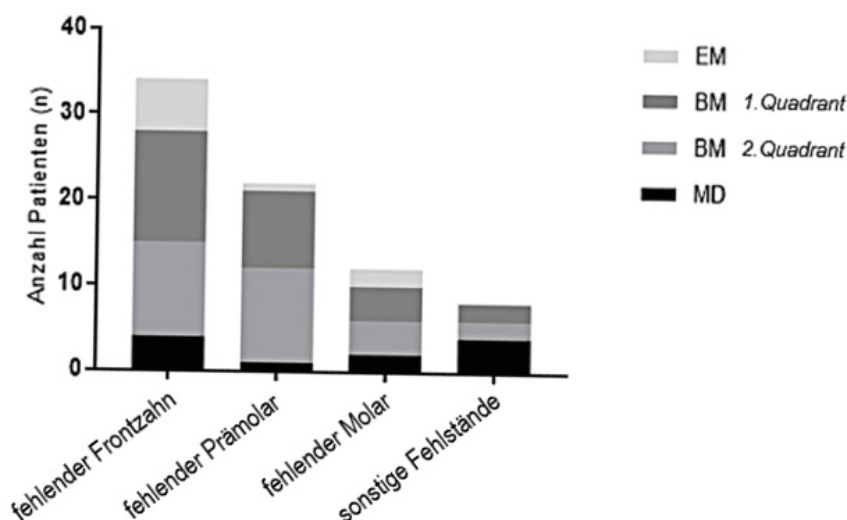


Abb. 15: Behandlungsindikation zur Therapie mit dem Mesialslider. Unterteilung in die drei Behandlungsgruppen: EM, BM, MD; In der Gruppe BM werden der erste und zweite Quadrant gesondert dargestellt.

Behandlungsverlauf

Die Zeitpunkte der Behandlungsbeginne mit dem Mesialslider erstreckten sich von 2007 bis 2013, die Abschlüsse der Mesialisierung erfolgten von 2008 bis 2014. Das Patientenkollektiv wurde mit einer mittleren Behandlungsdauer von $11,7 \pm 7,8$ (Median: 9) Monaten mit dem Mesialslider therapiert. Die kürzeste Behandlung mit dem Mesialslider

erfolgte in 2,5 Monaten, während die längste Behandlung 25 Monate andauerte. Die Therapiedauer in den verschiedenen Gruppen betrug in der Gruppe EM $11,6 \pm 7,6$ (9 Median), in der Gruppe BM bei separater Betrachtung der Quadranten $11,9 \pm 7,9$ (9 Median) und in der Gruppe MD $10,7 \pm 7$ (7,5 Median) Monate.

Vor Mesialisierung hatten 20 von 48 Patienten eine zufriedenstellende Frontzahnposition (EM: 7, BM: 11, MD: 2), während die restlichen 28 Patienten einer umfassenderen kieferorthopädischen Behandlung einschließlich der Frontzahnbewegung bedurften.

Komplikationen unter der Therapie mit dem Mesialslider

Die Auswertung der 40 Patientenakten des Studienkollektives ergab folgende Ergebnisse:

In der Gruppe EM wurden fünf Patienten ohne Komplikationen behandelt. Bei zwei Patienten kam es zur Lockerung der Implantate, die bei einem dieser Patienten aufgrund von Schmerzen frühzeitig entfernt wurden.

Unter der Therapie mit dem BM wurden 18 komplikationslose Behandlungen dokumentiert. In jeweils einem Patientenfall kam es zum Verlust eines Sliders, einer Zugfeder, einem defekten Slider oder zu einer Implantatlockerung. Bei einer 15-jährigen Patientin kam es nach erfolgreicher 10-monatiger Therapie zu einer Kippung der Seitenzähne und Bissöffnung. Die Therapie mit dem Mesialslider wurde daraufhin abgebrochen und es wurde konventionell weiter therapiert. Ein 18-jähriger Patient musste nach nicht angeschlagener Therapie, bei der die Molaren sich nicht kieferorthopädisch bewegen ließen, prothetisch versorgt werden.

Unter der Behandlung mit dem MD wurden bei fünf Patienten keine Komplikationen und bei drei Patienten Implantatlockerungen dokumentiert, wobei bei einem Patienten die Implantate vorzeitig entfernt wurden und konventionell weiter therapiert wurde. Bei einem Patienten musste ein Implantat aufgrund eines defekten Kopfes ausgetauscht werden.

Zusammengefasst wurden 28 Patienten komplikationslos mit dem Mesialslider therapiert. Bei sieben Patienten kam es zu leichten und bei fünf zu größeren Komplikationen, von der Implantatlockerung bis zum -Verlust. In einem Fall hat die Therapie mit dem Mesialslider nicht angeschlagen und in einem anderen Fall kam es durch unerwünschte Behandlungsnebenwirkungen zum Abbruch der Therapie. Bei 12 von 40 Patienten wurde eine unzureichende Mundhygiene dokumentiert.

Dreidimensionale Rekonstruktion der Molarenbewegung unter der Therapie mit dem Mesialslider

Registrierungsergebnisse des Mesialsliders

Alignment

Ein einheitliches *Alignment* der Modelle im kartesischen Koordinatensystem mit dem Papillenpunkt im Ursprung und der marginalen Grenze entlang der xy-Ebene wurde erfolgreich durchgeführt. Eine anschließende Rotation der Modelle, die die Sutura palatina in Deckung mit der y-Achse brachte, ermöglichte die Bestimmung der Zahnbewegung in allen anatomischen Orientierungen.

Registrierungsergebnisse

Die kontrollpunkt- und ICP-basierten Registrierungen wurden erfolgreich ausgeführt. Die Überlagerung der digitalen Modelle mittels palatinaler KP ergab in der primären visuellen Bewertung hohe Übereinstimmungen (Abb. 16).

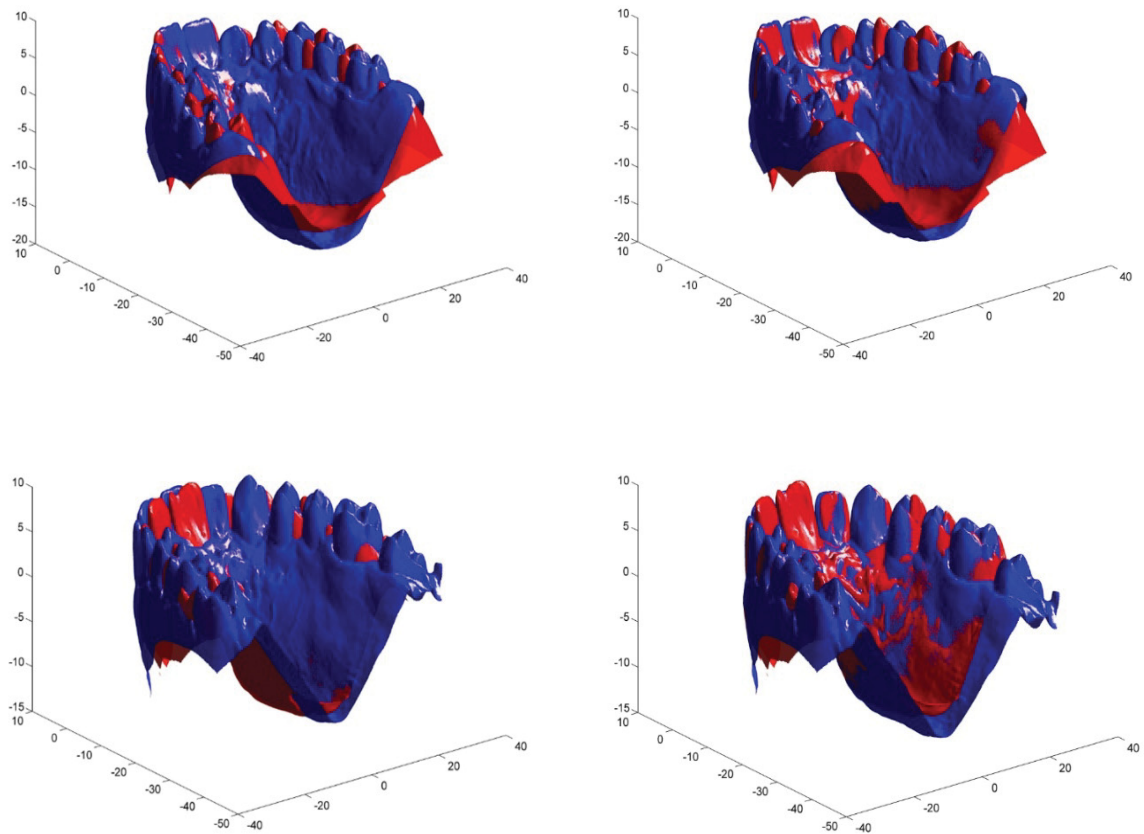


Abb. 16: Repräsentative Veranschaulichung der Registrierungsergebnisse. KP-basierte Registrierung (links), mit anschließender ICP-basierter Registrierung (rechts). Im oberen Fall mit vergleichbaren und im unteren Fall mit deutlichen Verbesserungen der Registrierungsergebnisse durch zusätzliche Anwendung des ICP-basierten Verfahrens.

Dies wird durch geringe RMS-scores von 0,6 - 1 mm bestätigt, die nach zusätzlicher ICP-basierter Registrierung median um nochmals 0,1 mm reduziert wurden. Die geringen mittleren Hausdorffdistanzen, die sich nach ICP nochmals reduzierten, bestätigen ebenfalls diese Ergebnisse. Folglich verbesserte sich die Registrierung durch eine zusätzliche ICP Anwendung (Tabelle 2).

	Hausdorff		RMS-error		
	Distanz	Distanz			
	(KP)	(KP+ICP)	(KP)	(ICP Start)	(KP+ICP)
Mittel	6.8	6.3	0.8	1.2	0.8
STA	2.9	3.1	0.4	0.5	0.3
Qu (25)	4.8	4.0	0.6	0.8	0.6
Median	6.7	5.6	0.8	0.9	0.7
Qu (75)	7.8	8.1	1.0	1.5	1.0

Tabelle 2: Deskriptive Statistik der Registrierungsfehler: Abgegeben werden die *root-mean-square* (RMS) scores nach kontrollpunktbasierter Registrierung (KP), bei der alleinigen Anwendung der *iterative closest point* basierten Registrierung (ICP) und deren Zusammenführung (ICP+KP), zusätzlich sind die entsprechenden Hausdorffdistanzen angegeben. Standardabweichung (STA), Quartile (Qu)

Bei einem Patienten wurden die Registrierungsergebnisse nach zusätzlichem ICP schlechter. In diesem Fall wurden die Molaren simultan intrudiert (Abb. 17).

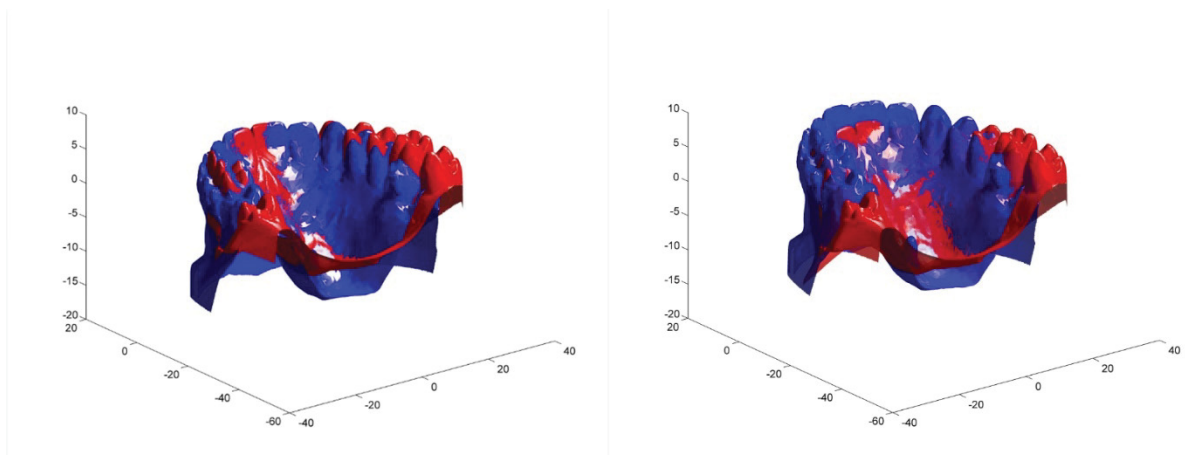


Abb. 17: Repräsentative Veranschaulichung der Registrierungsergebnisse. Die KP-basierte Registrierung ist links und die mit zusätzlich durchgeführtem ICP rechts dargestellt.

Orthodontische Zahnbewegung

Die Messergebnisse der orthodontischen Zahnbewegung wurden mittels der Kombination der kontrollpunkt- und ICP-basierten Registrierung ermittelt.

Die mittlere Bewegung der Molaren betrug $6,3 \pm 2,6$ mm (sagittal: $5,5 \pm 2,7$ mm; vertikal: $0,0 \pm 1,9$ mm; transversal $0,1 \pm 2,7$ mm). Nach Änderung des Vorzeichens der transversalen Bewegung des linken Oberkiefermolaren betrug die mittlere Zahnbewegung zur Raphe $0,1 \pm 2,4$ mm (Abb. 18).

Die Bewegung in mesiale bzw. sagittale Richtung war am stärksten ausgeprägt, gefolgt von den anderen beiden Richtungen.

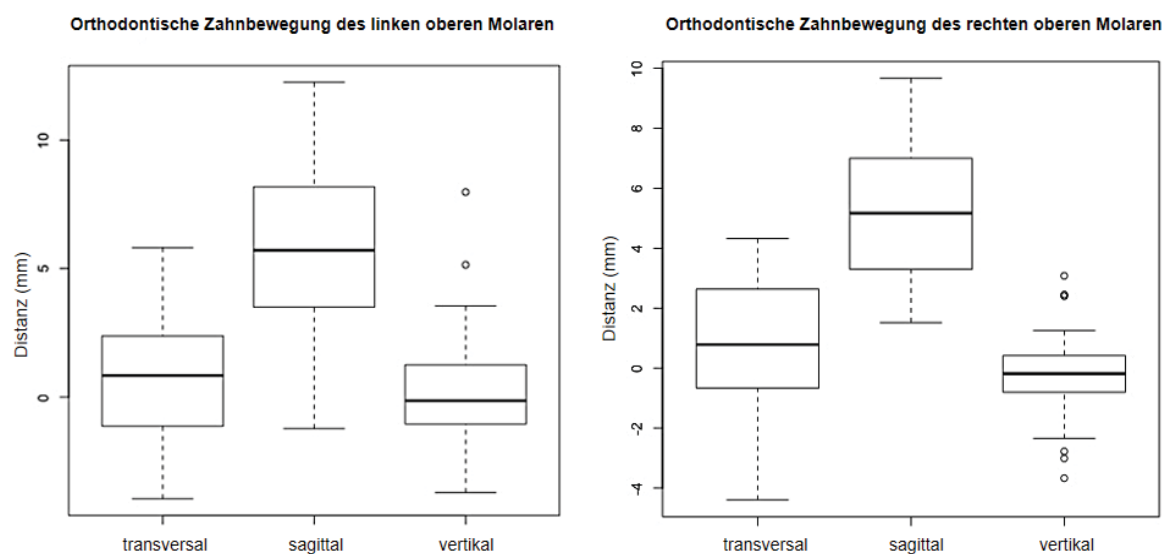


Abb. 18: Darstellung der orthodontischen Zahnbewegung: Box Plots der Bewegung des rechten (rechts) und linken oberen Molaren (links) in den drei Dimensionen. Sagittale Bewegung hat ein positives Vorzeichen in mesialer Richtung, transversal zum Gaumen hin und vertikal für Extrusion

Die ermittelte Bewegung der Molaren ergab zwischen den Behandlungsgruppen keine signifikanten Unterschiede ($p > 0,05$) (Tabelle 3):

- EM mittlere Gesamtbewegung: $5,9 \pm 2,0$ mm
(sagittal: $4,9 \pm 2,4$; transversal: $0,0 \pm 2,5$; vertikal: $1,0 \pm 2,3$)
- BM mittlere Gesamtbewegung: $6,4 \pm 2,6$ mm
(sagittal: $5,6 \pm 2,8$; transversal: $0,1 \pm 2,1$; vertikal: $0,0 \pm 1,9$)
- MD mittlere Gesamtbewegung: $5,9 \pm 3,2$ mm
(sagittal: $5,4 \pm 3,0$; transversal: $0,5 \pm 2,1$; vertikal: $-0,7 \pm 1,1$)

EM					MD			
	T	S	V	absolut	T	S	V	absolut
Mittel	0.06	4.88	1.12	6.03	0.50	5.44	-0.67	5.93
STA	2.19	2.39	2.48	2.01	2.22	3.01	1.17	3.16
Qu (25)	-0.29	4.24	-0.90	5.35	-0.26	2.81	-0.99	2.89
Median	-0.02	4.65	0.98	6.01	0.48	6.42	-0.60	6.92
Qu (75)	1.75	5.60	2.40	6.72	1.40	7.50	0.06	8.29

BM (M re)					BM (M li)			
	T	S	V	absolut	T	S	V	absolut
Mittel	0.61	5.57	-0.26	6.32	-0.65	5.62	0.25	6.60
STA.	2.52	2.43	1.58	2.43	2.39	3.15	2.17	2.90
Qu (25)	-1.02	3.35	-0.92	4.34	-2.32	3.50	-0.95	4.42
Median	1.40	6.01	-0.13	6.36	-0.99	5.29	-0.06	6.28
Qu (75)	2.59	7.58	0.50	8.12	1.19	7.47	1.29	8.40

Tabelle 3: Deskriptive Statistik der ermittelten dreidimensionalen orthodontischen Zahnbewegung der oberen Molaren der verschiedenen Behandlungsgruppen: EM, BM (rechter und linker Molar) und MD. transversal (T): palatinal (+), bukkal (-); sagittal (S): anterior (+), posterior (-); vertikal (V): Extrusion (+) Intrusion (-); Absolut: Gesamtbewegung als Euklidische Distanz; Angabe in mm; Standardabweichung (STA), Quartile (Qu)

Abbildung 19 zeigt beispielhaft die erfolgreich durchgeführte Therapie einer 27-jährigen Patientin mit dem BM. Die gesamte Behandlungsdauer betrug 25 Monate. Die Molaren 17 und 27 wurden um 8,7 und 8,0 mm nach mesial bewegt.

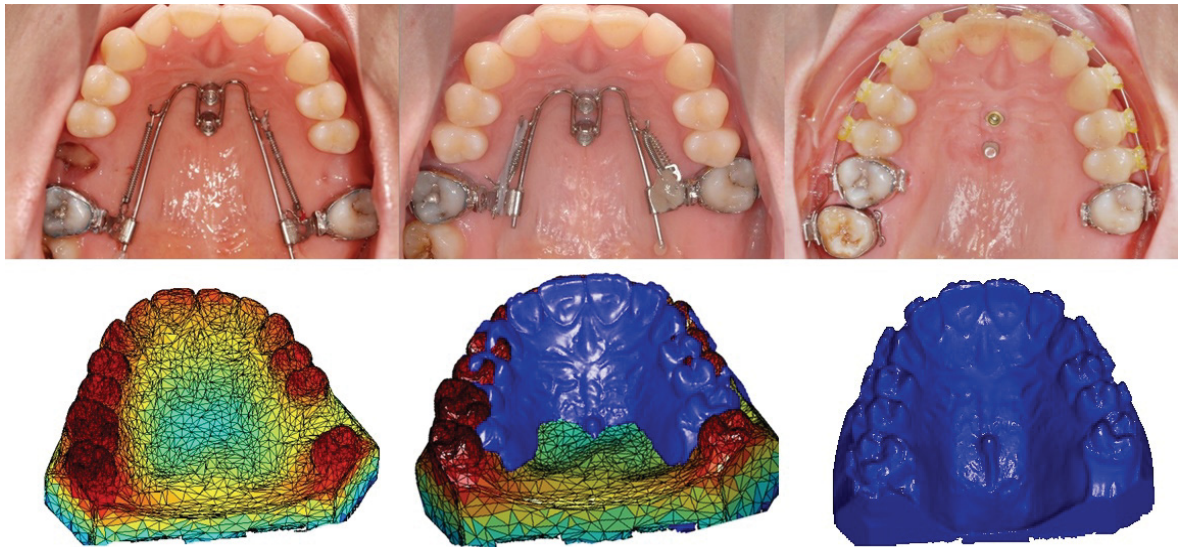


Abb. 19: Patientenfall BM

Zeile 1: Abbildung der klinischen Situation zu Mesialisierungsbeginn, unter der Therapie mit dem Mesialslider und zu Mesialisierungsabschluss.

Zeile 2: Digitale Scans der Modelle vor Mesialisierungsbeginn (links) und nach Mesialisierungsabschluss (rechts) sowie deren Überlagerung (Mitte).

Unter den 20 Patienten mit zufriedenstellender Frontzahnposition vor Behandlungsbeginn betrug die Frontzahnverschiebung nach Behandlungsabschluss weniger als 0,5 mm in sagittaler, transversaler und vertikaler Richtung (Tabelle 4).

	Linker oberer Inzisivus				Rechter oberer Inzisivus			
	T	S	V	absolut	T	S	V	absolut
Mittel	-0.1	0.4	-0.2	1.9	0.1	0.5	-0.1	1.9
STA	0.9	1.2	1.5	0.9	0.9	1.3	1.5	1.0
Qu (25)	-0.7	-0.4	-1.0	1.3	-0.6	-0.4	-0.9	1.1
Median	-0.3	0.5	-0.1	1.8	-0.1	0.4	0.1	1.7
Qu (75)	0.3	1.3	0.8	2.3	0.5	1.1	1.0	2.5

Tabelle 4: Deskriptive Statistik der Verschiebung der mittleren oberen Frontzähne: für die Untergruppe der Patienten mit zufriedenstellender Frontzahnposition vor orthodontischer Behandlung transversal (**T**): palatinal (+), bukkal (-); sagittal (**S**): anterior (+), posterior (-); vertikal (**V**): Extrusion (+) Intrusion (-); **absolut**: Gesamtbewegung als euklidische Distanz; Angabe in mm; Standardabweichung (STA), Quartile (Qu)

Linearer Zusammenhang der dreidimensionalen Zahnbewegung unter Anwendung der beiden Registrierungsansätze

Die lineare Regressionsanalyse der beiden Registrierungsverfahren ergab einen signifikanten linearen Zusammenhang für die berechneten orthodontischen Zahnbewegungen.

Für die Molaren- ($R_{\text{transversal}} = 0,1$; $R_{\text{sagittal}} = 0,85$; $R_{\text{vertikal}} = 0,69$) und die Inzisivenbewegungen ($R_{\text{transversal}} = 0,85$; $R_{\text{sagittal}} = 0,92$; $R_{\text{vertikal}} = 1,04$) zeigte sich eine signifikante Korrelation ($p < 0,01$) in jeder untersuchten Raumrichtung. Diskrepanzen fanden sich hauptsächlich bei dem Modell von einem Patienten mit vertikalen Zahnbewegungen während der kieferorthopädischen Behandlung (Abb. 17, 20).

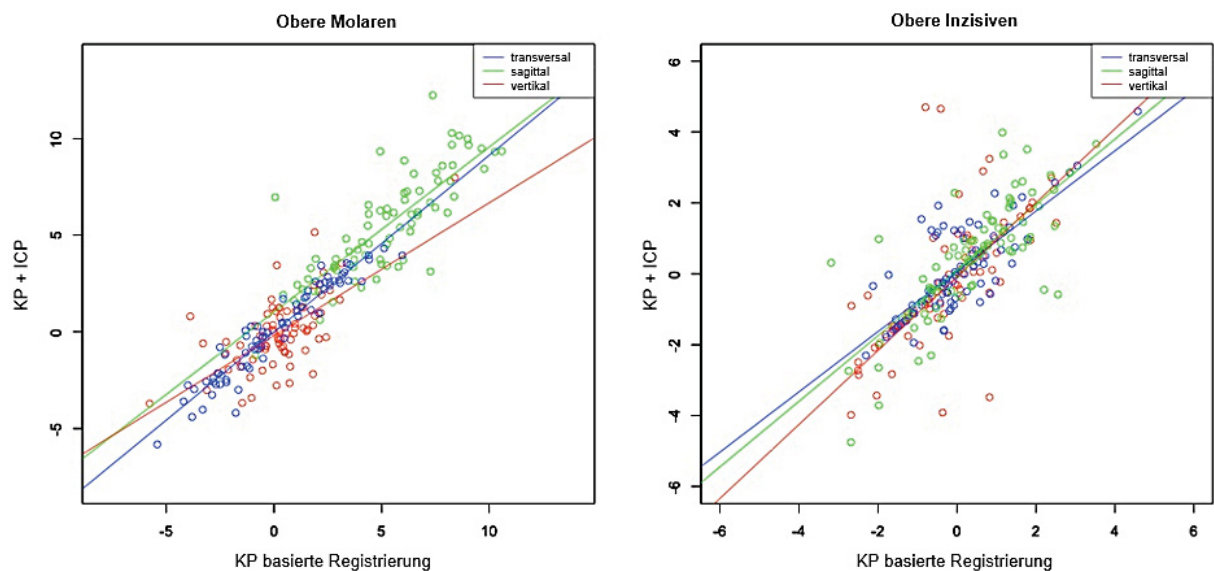


Abb. 20: Lineares Regressionsmodell der Bewegung der oberen Inzisiven und Molaren: Darstellung der Überprüfung der entweder mittels KP- oder mit ICP kombinierter Registrierung ermittelten Zahnbewegung durch lineare Regression. Die dargestellten Ergebnisse sind für oberen Molaren (links) und Inzisiven (rechts) signifikant.

Auswertung der Fernröntgenseitenbilder

Die Analyse der Fernröntgenseitenbilder ergab eine mittlere Kippung der Frontzahnkronen um $0,8 \pm 6,3^\circ$ nach vestibulär sowie der Molarenkronen um $3,6 \pm 6,6^\circ$ nach mesial (Abb. 21).

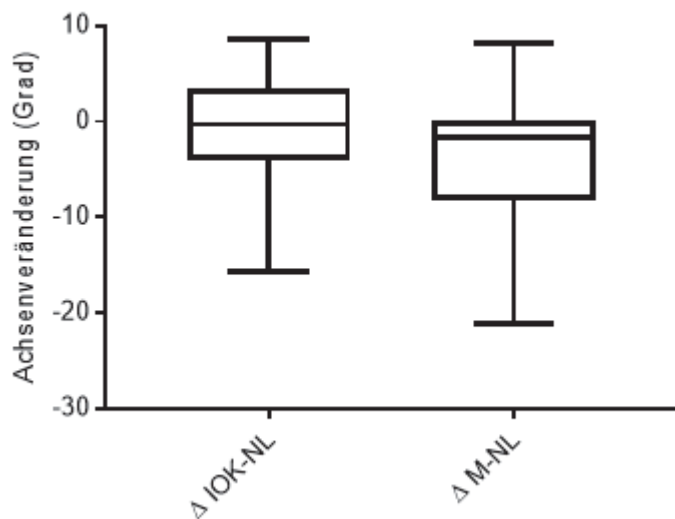


Abb. 21: Achsenänderung der Molaren und Inzisiven im FRS. Dargestellt sind die mittleren Veränderungen der Zahnachsen der Inzisiven und der bewegten Molaren von t_0 zu t_1 mit Standardabweichung.

Validierung der Datenerhebung am optischen Scan

Datenerhebung durch Schieblehrenmessung

Zur Validierung der Datenerhebung am optischen Scan wurden eindimensionale Messungen mittels Schieblehre und dem *measuring-tool* in MeshLab ausgeführt. Es wurde die Distanzdifferenz zwischen dem Messpunkt und einem ausgewählten Kontrollpunkt von t_0 zu t_1 ermittelt.

Die Messung des Mesialisierungseffektes mittels Schieblehre ergab eine mittlere Molarenbewegung um die Distanz von $4,77 \pm 2,5$ mm (EM: $3,87 \pm 1,37$; BM: $5,03 \pm 2,56$; MD: $4,15 \pm 2,62$). Die digitale Messung der Molarenbewegung im *measuring tool* ergab einen mittleren Mesialisierungseffekt von $4,76 \pm 2,59$ mm (EM: $3,63 \pm 1,62$; BM: $5,08 \pm 2,63$; MD: $4,04 \pm 2,62$) (Abb. 22).

Zwischen den digitalen und manuellen eindimensionalen Messungen bestand kein signifikanter Unterschied ($p > 0,05$).

Datenerhebung mittels digitaler Volumentomographie

Der von Ulf Schmücker ermittelte mittlere Abstand zwischen den einander entsprechenden Scan- und DVT-Modellen betrug im Mittel 0,1 mm (Tabelle. 5).

Scan vs. DVT

	Mittelwerte	RMS	Hausdorff Distanz	Median
Min	0,0592622	0,0744177	0,0622025	0,0493379
Qu (25)	0,07202885	0,09638238	0,575671	0,0569002
Median	0,07855465	0,1192795	0,9959585	0,0622632
Qu (75)	0,09665748	0,15405725	2,28864	0,07353683
Max	0,34755	1,13755	8,74988	0,0981456
Mittelwert	0,09797678	0,19148156	1,90263029	0,0658203

Tabelle 5: Deskriptive Statistik Unterschiede vom Modell-Scan zum DVT: Abgegeben werden die Mittelwerte, RMS-scores, Hausdorff Distanzen und Mediane der Abstände zwischen den beiden Modellen nach KP- und anschließender ICP-basierter Registrierung in mm.

Abbildung 23 visualisiert diese Ergebnisse an einem Beispielmodell dessen Abstände Median = 0.28 mm, im Mittel = 0.85 ± 1.53 mm, RMS-error = 1.75 mm, Max = 8.93 mm. Betragen.

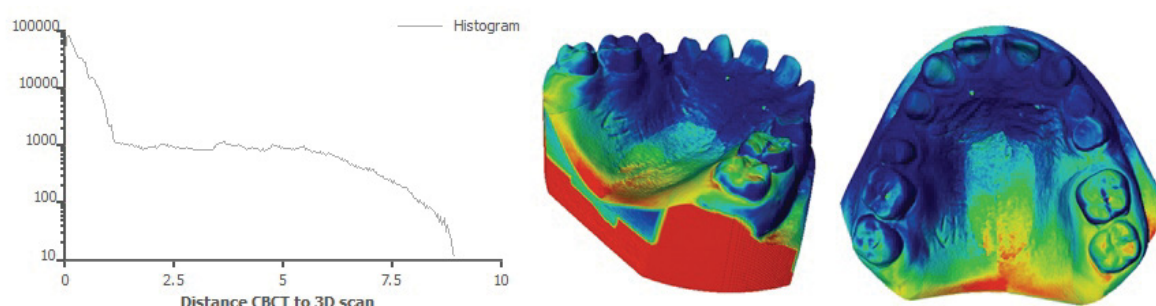


Abb. 23: Darstellung der Differenz der Digitalisierungsmethoden. Links: Abstand der digitalen Oberflächen des DVT zum Scan im Histogramm. Rechts: Visualisierung mit entsprechender Farbzurfarbung (blau = 0 mm, rot > 1 mm Oberflächenabstand vom DVT zum Scan)

Die Datenerhebung an den digitalen Modellen der DVT-Scans der Methodik-Gruppe ergab eine absolute orthodontische Zahnbewegung von $6,1 \pm 1,9$ mm (sagittal: $5,2 \pm 3,2$; vertikal: $0,6 \pm 3,3$; transversal: $2,5 \pm 2,2$). Der Spearman-Korrelationstest ergab eine signifikante positive Assoziation zwischen korrespondierenden Werten von DVT und Modellscan (Spearman $R = 0.91$, $p < 0.0001$) (Abb. 24).

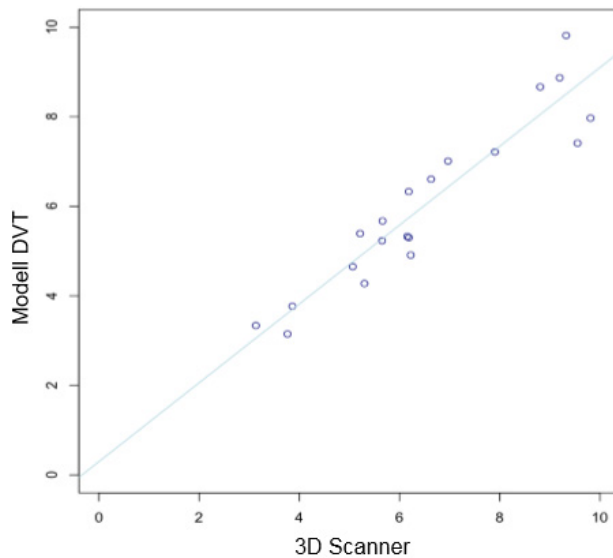


Abb. 24: Absolute Zahnbewegungen im Rahmen der Mesialslider-Behandlung: Digitalisierung mittels 3D Scanner vs. Modell DVT

Diskussion

Evaluation des Registrierungsverfahrens

Registrierungs-Methodik

Es wurde der dreidimensionale Therapieeffekt des Mesialsliders durch Überlagerung digitalisierter dentaler Modelle evaluiert. Die Analyse erfolgte durch kontrollpunkt-basierte und automatische *iterative closest point* (ICP) Registrierungsverfahren, sowie deren Kombination.

Die Durchführung zweier Registrierungsansätze ergab, dass nach kontrollpunkt-basierter Überlagerung die zusätzliche Anwendung des ICP-basierten Verfahrens in den meisten Fällen zu einer leichten Verbesserung der Registrierungsergebnisse führte. Zwischen den durch das kontrollpunkt-basierte Verfahren ermittelten Zahnbewegungen und dem Ergebnis nach zusätzlicher Anwendung des ICP's lag kein signifikanter Unterschied vor (Tabelle 2). In einem Fall kam es durch vertikale Molarenbewegung zu höheren Diskrepanzen zwischen den Registrierungsansätzen. Bei diesem Patienten hatte sich der posteriore weiche Gaumen nach der Molarenintrusion möglicherweise etwas nach kranial verlagert, wodurch das ICP-basierte Verfahren nicht in der Lage war, die Modelle in korrekter Position zu überlagern (Abb. 17). Derartige Probleme wurden in einer ähnlichen Studie bei Patienten mit maxillärer Expansion nicht beschrieben⁶⁶. Die vertikalen Zahnbewegungen waren in dieser Studie mit $0,0 \pm 1,9\text{mm}$ gering. Wurden durch die zusätzliche Anwendung des ICP's die RMS-scores und Hausdorffdistanzen reduziert, wurden diese Ergebnisse als final gewertet.

Die alleinige Anwendung des ICP-basierten Verfahrens zeigte die Gefahr der Konvergenz bei lokalen Optima (z.B. bei inverser Modellüberlagerung). Folglich erscheint das ICP-Verfahren ohne vorherige kontrollpunkt-basierte Registrierung als nicht geeignet, um zuverlässige Ergebnisse zu generieren. Die sorgsame Kontrollpunktselektion erweist sich somit als besonders wichtig, um Registrierungsfehler zu reduzieren.

Eine einheitliche anatomisch orientierte Ausrichtung der Modelle im karthesischen Koordinatensystem ermöglichte die Ermittlung der dreidimensionalen orthodontischen Zahnbewegung. Solch eine Art der Ausrichtung wurde bereits durch Ashmore et al. beschrieben⁴⁷, doch anstatt der Okklusionsebene wurden die Modelle in dieser Studie entlang der palatinalen marginalen Grenze ausgerichtet. Eine Ausrichtung entsprechend

der Okklusionsebene könnte aufgrund der Positionsänderungen der Molaren durch die Behandlung mit dem Mesialslider zu ungenauen Ergebnissen führen.

Als Limitation kann die Anwendbarkeit dieses Verfahrens nur auf den Oberkiefer angesehen werden. Der Unterkiefer bieten im Gegensatz zum Oberkiefer keine stabilen Referenzstrukturen für eine kontrollpunktbasierte Überlagerung.

Es ist jedoch möglich, ein Unterkiefermodell in Okklusion mit dem entsprechenden Oberkiefermodell zu scannen und dem Gegenkiefer entsprechend auszurichten. Somit kann die Überlagerung der digitalen Oberkiefermodelle durch die individuelle Verschlüsselung mittels Okklusionsscan auf die Unterkiefer übertragen werden. Die Überlagerungsmethode ist somit bedingt auf den Unterkiefer übertragbar, wenn eine identische Gelenkposition während der Bissnahme gegeben ist. Dies war jedoch nicht Teil dieser Studie.

Validierung der Datenerhebung am optischen Scan

Die eindimensionale Ermittlung des Mesialisierungsergebnisses, die nicht als richtiges Therapieergebnis betrachtet werden darf, ergab in digitaler Messung durchschnittlich 0,01 mm höhere Messergebnisse als bei manueller Messung am Gipsmodell, welche der konventionellen Methode entspricht^{54,78}. Grünheid et al. sowie weitere Autoren beschrieben ebenfalls vergleichbar geringe Unterschiede und werteten diese als klinisch nicht signifikant^{54,52,53}.

Auch im Vergleich zu den Kontrollmessungen der Modell-DVT Aufnahmen wurden im Scan im Mittel 0,1 mm höhere Messergebnisse ermittelt, mit etwas höherer Differenz als zu den manuellen Messungen. Diese Differenzen sind jedoch klinisch irrelevant.

Ein großer Vorteil des 3D Scans ist der geringe Zeitaufwand des Digitalisierungs- und Speicherprozesses von ca. einer Minute pro Modell mit einer reinen Scandauer von ca. 45 Sekunden und der Erstellung von STL-Dateien mit einer Größe von 41 bis 71 MB (innerhalb des Patientenkollektives). Die DVT-Aufnahmen benötigten im Vergleich eine sehr große Datenmenge von ca. 1,2 GB pro Modellaufnahme und einen entsprechend höheren Zeitaufwand im Speicher- und Verarbeitungsprozess.

Der Vergleich zwischen den durch Scan oder DVT digitalisierten Modellen ergab eine mittlere Differenz der Oberflächen von 0,1 mm (Tabelle 5). Es eignen sich somit sowohl der Modell-Scan als auch das Modell-DVT zur dreidimensionalen Bestimmung der orthodontischen Zahnbewegung. Dies bestätigte sich ebenfalls in der Ermittlung der dreidimensionalen Zahnbewegung der Molaren der Methodik-Gruppe, bei der es zwischen

den Ergebnissen der beiden Digitalisierungsverfahren keine signifikanten Unterschiede gab.

Therapie mit dem Mesialslider

Diese Studie untersucht retrospektiv den Behandlungseffekt des Mesialsliders durch die Ermittlung der dreidimensionalen Molarenbewegung und der Stabilität der Inzisiven auf Basis der Überlagerung von digitalisierten Gipsmodellen.

Behandlungsindikation

Mit 34 von 68 Fällen (bei separater Quadrantenbetrachtung) bildeten fehlende Frontzähne die Hauptbehandlungsindikation des untersuchten Patientenkollektives zur Therapie mit dem Mesialslider. Danach waren in absteigender Tendenz fehlende Prämolaren, Molaren und Fehlstellungen in Form von Lückenständen oder einer inkorrekten Mittellinie Gründe zur Therapie mit dem Mesialslider. Dies deckt sich mit den bisher beschriebenen Behandlungsindikationen in den Fallberichten^{14,19,32,33,34}.

Zusammengefasst hatte die Häufigkeitsverteilung der Behandlungsindikationen ein Verhältnis von ungefähr 3:2:1:0,5 (Abb. 15).

Patientencharakteristika

Das untersuchte Patientenkollektiv mit einem Alter von 11 bis 53 Lebensjahren umfasste 28 Jugendliche ($14,2 \pm 1,9$ Jahre) und 20 erwachsene Patienten ($26 \pm 8,6$ Jahre). Die Hauptbehandlungsindikation zur Therapie mit dem Mesialslider waren dentale Aplasien bei Jugendlichen, bei denen prothetische Behandlungsalternativen zeitnah nicht in Frage kamen. Jedoch entschieden sich auch viele Erwachsene für den Lückenschluss mittels Mesialslider als Alternative zum prothetischen Ersatz (Abb. 4, 5).

Bei der Interpretation der Ergebnisse muss auf die strengen Inklusions- und Exklusionskriterien der Studie hingewiesen werden. Es war jedoch nicht möglich, die Gipsmodelle nach standardisierten Zeitintervallen zu untersuchen. Auch wurden einige Patienten parallel zu der Behandlung mit dem Mesialslider mit einer Multibandapparatur behandelt und waren somit zur Untersuchung der Stabilität der Inzisiven ungeeignet.

Behandlungsergebnis

Die Therapie mit dem Mesialslider ergab einen durchschnittlichen Mesialisierungseffekt der Molaren um $6,3 \pm 2,6$ mm (sagittal: $5,5 \pm 2,7$ mm; vertikal: $0,0 \pm 1,9$ mm; transversal $0,1 \pm 2,4$ mm), was ungefähr einer Prämolarenbreite entspricht. Die mittlere Behandlungsdauer betrug $11,7 \pm 7,8$ Monate. Collin et al. beschreiben für den orthodontischen Lückenschluss unmittelbar nach Extraktion der ersten Molaren ohne skelettale Verankerung mit $10,1 \pm 2,6$ Monaten einen schnelleren Therapieabschluss, wobei jedoch der geringere ossäre Widerstand zu beachten ist⁷⁹. Die im Vergleich höhere Standardabweichung in der Behandlungsdauer des Studienkollektivs des Mesialsliders ist auf die unterschiedlichen Behandlungsindikationen mit entsprechend unterschiedlichen zu überwindenden Distanzen zurückzuführen (s.o.). Außerdem wurden sowohl einseitige als auch beidseitige (reziproke) Lückenschlüsse durchgeführt.

Mit einer mittleren Kippung der Frontzähne um $0,8 \pm 6,3^\circ$ und Positionsänderungen unter 0,5 mm in allen drei Dimensionen werden die in den Fallberichten beschriebenen geringen Auswirkungen auf die Frontzähne bestätigt, sowie die insgesamt gute körperliche Führung der Molaren mit einer leichten Mesialkippung um $3,6 \pm 6,6^\circ$ im FRS^{14,33}. Inwieweit diese einer eventuellen weiterführenden oder zeitgleichen kieferorthopädischen Therapie kompensiert wurde, ist nicht untersucht worden.

Behandlungsverlauf

Die in dieser Studie aufgetretene Komplikationsrate mit Implantatlockerungen oder -verlusten bei 12,5% der Studienteilnehmer kann im Vergleich zur Studienlage zur Stabilität von palatinalen Miniimplantaten, in der Erfolgsraten von 94-95% bis zu 100% publiziert wurden als erhöht angesehen werden^{27,29}. In diesem Zusammenhang wird jedoch eine höhere Fallzahl von 455 und 154 Patienten angegeben. Außerdem wurden die Patienten vor allem aufgrund einer Malokklusion therapiert. Die Therapie reduzierter Zahnbestände stellt jedoch eine besonders hohe Anforderung an die Verankerungseinheit dar, was eine mögliche Erklärung für die höhere Komplikationsrate darstellt.

In den meisten Fällen gingen die Komplikationen mit einer unzureichenden Mundhygiene einher. Somit ist zwar die Mechanik des Mesialsliders zwar als Compliance unabhängig anzusehen, eine hinreichende Mundhygiene des Patienten jedoch besonders wichtig.

Bei einer jugendlichen Patientin wurde als ernsthafte Komplikation eine stärkere Kippung der Seitenzähne dokumentiert. Die Behandlung mit dem Mesialslider wurde in diesem Fall abgebrochen und die Patientin wurde konventionell kieferorthopädisch weitertherapiert.

Bei einem anderen erwachsenen Patienten ist die Therapie nicht angeschlagen, da die Molaren keine Bewegung zeigten.

Die Therapie mit dem Mesialslider konnte in den restlichen 95% der Fälle erfolgreich durchgeführt werden.

Limitationen

Um möglichst genaue Ergebnisse über den Therapieeffekt des Mesialsliders zu erhalten, wäre es wünschenswert gewesen, die Modelle der Patienten zu definierten Zeitpunkten und nach bestimmten Intervallen für den Einbezug von Zwischenergebnissen zu analysieren. Da diese Studie retrospektiv durchgeführt wurde, war dies jedoch nicht möglich.

Bei der Kontrollpunktwahl muss äußerst sorgfältig vorgegangen werden, da dort die größte Gefahr für Fehler besteht. Es hat sich als vorteilhaft herausgestellt, die Überlagerungsergebnisse zu visualisieren, um Fehler im Registrierungsprozess aufzudecken.

Die Studie hat Untersuchungen über eventuelle Rotationen der Molaren unter der Therapie mit dem Mesialslider nicht eingeschlossen. Dies hätte zum Beispiel bei gleicher Methodik durch drei weitere Messpunkte auf den Höckerspitzen der Molaren analysiert werden können. Mit diesem Verfahren könnte man ebenfalls eine Kippung dieser Dreipunkt-Ebene erfassen und genauere Ergebnisse über die Mesialkippung der Molaren liefern als die Analyse der FRS, die durch Überlagerungen limitiert sind.

Da das Patientenkollektiv jedoch nicht nur ausschließlich mit dem Mesialslider, sondern teilweise mit Multibandapparaturen behandelt wurde, wäre eine solch genaue Analyse nicht aussagekräftig. Diese sollte jedoch noch in einer prospektiv angelegten Studie untersucht werden.

Schlussfolgerungen

Dreidimensionale Analyse mittels optischem

Scanverfahren

In der Analyse dentaler Modelle ist die Überlagerung der Modelle durch ICP- oder kontrollpunktbasierte Registrierung ein zunehmend häufig angewandtes Mittel, um Veränderungen zwischen diesen zu analysieren. Für diese Promotionsarbeit wurde zunächst untersucht, welche Registrierungsmethode sich zur Bestimmung der kieferorthopädischen Therapieeffekte besonders eignet.

Die sorgsame Kontrollpunktselektion erweist sich als besonders wichtig, um Registrierungsfehler zu reduzieren. Das Durchspielen verschiedener Szenarien innerhalb einer Simulationseinheit ergab die Empfehlung, in der klinischen Anwendung mit zehn möglichst akkurat ausgewählten palatinalen Kontrollpunkten und anschließender ICP-basierter Registrierung zu arbeiten. Außerdem sollten die Registrierungsergebnisse durch Visualisierung überprüft werden, um etwaige Fehler in der Überlagerung auszuschließen.

Um die Zahnbewegung in ihren Richtungsangaben genau beschreiben zu können, ist eine der anatomischen Orientierung entsprechende Ausrichtung der digitalen Modelle innerhalb eines Referenz-Koordinatensystems erforderlich. Die vorgestellte Methode erlaubt es, durch Überlagerung digitaler dentaler Modelle verschiedener Behandlungszeitpunkte die tatsächliche Verschiebung eines Zahnreferenzpunktes im dreidimensionalen Raum zu berechnen und somit die orthodontische Bewegung von Zähnen im dreidimensionalen Raum zu erfassen. Sowohl optische 3D Modell-Scans als auch Modell-DVT-Aufnahmen eignen sich zur Evaluation.

Das vorgestellte Verfahren ermöglicht die Ermittlung der dreidimensionalen kieferorthopädischen Zahnbewegung und kann in Zukunft bei anderen Therapiekonzepten und Patientenkollektiven zur Anwendung kommen.

Evaluation der Therapieeffekte des Mesialsliders

Klinische Fallberichte demonstrieren zufriedenstellende Behandlungsergebnisse des Mesialsliders^{14,19,32,33,34}. Die vorliegende Studie stellt mit 48 eingeschlossenen Patienten und 76 mesialisierten Molaren die erste quantitative Analyse zu den Therapieergebnissen dieses skelettal verankerten Gerätes dar.

Der Mesialslider eignet sich bei korrekter Indikation zum Lückenschluss bei einem oder mehreren fehlenden Zähnen im Oberkiefer. Die skelettale Verankerung ermöglicht eine compliance-unabhängige Therapie, wobei eine gute Mundhygiene Voraussetzung für einen guten Therapieverlauf ist. Die ermittelte mittlere Bewegung der Molaren betrug $6,3 \pm 2,6$ mm (sagittal: $5,5 \pm 2,7$ mm; vertikal: $0,0 \pm 1,9$ mm; transversal $0,1 \pm 2,4$ mm) bei einer mittleren Behandlungsdauer von $11,7 \pm 7,8$ Monaten.

Der Mesialslider ermöglicht bei Erwachsenen und Jugendlichen eine gute körperliche Bewegung der Molaren mit nur leichter mesialer Kippung und guter vertikaler Kontrolle. Die Inzisiven bleiben hierbei positionsstabil. Die skelettale Verankerung ermöglicht auch in asymmetrischen Fällen den Lückenschluss unter der Vermeidung reziproker Kräfte auf die dentale Verankerungseinheit, die bei intraoralen Verankerungsalternativen (z.B. Gummizügen) auftreten würden.

Die skelettale Verankerung ermöglicht vorher nicht realisierbare Behandlungsaufgaben. Nebenwirkungen im Sinne von unerwünschten Zahnbewegungen können vermieden werden.

Literatur- und Quellenverzeichnis

1. Larmour CJ, Mossey PA, Thind BS, Forgie AH, Stirrups DR. Hypodontia - a retrospective review of prevalence and etiology. Part I. *Quintessence Int.* 2005;36(4):263-270.
2. Robertsson S, Mohlin B. The congenitally missing upper lateral incisor. A retrospective study of orthodontic space closure versus restorative treatment. *Eur J Orthod.* 2000;22(6):697-710.
3. Polder BJ, Van't Hof MA, Van Der Linden FPGM, Kuijpers-Jagtman AM. A meta-analysis of the prevalence of dental agenesis of permanent teeth. *Community Dent Oral Epidemiol.* 2004;32(3):217-226.
4. Soriano EP, Caldas AF, Goes PSA. Risk factors related to traumatic dental injuries in Brazilian schoolchildren. *Dent Traumatol.* 2004;20(5):246-250.
5. Zachrisson BU, Rosa M, Toreskog S. Congenitally missing maxillary lateral incisors: canine substitution. Point. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 2011;139(4):434, 436, 438 passim.
6. Girish Kumar N, Chaudhary R, Kumar I, Arora SS, Kumar N, Singh H. To assess the efficacy of socket plug technique using platelet rich fibrin with or without the use of bone substitute in alveolar rid. *Oral Maxillofac Surg.* 2018;22(2):135-142.
7. Zhang Y, Ruan Z, Shen M, et al. Clinical effect of platelet-rich fibrin on the preservation of the alveolar ridge following tooth extraction. *Exp Ther Med.* 2018;15(3):2277-2286.
8. Irinakis T, Aldahlawi S. The dome technique: a new surgical technique to enhance soft-tissue margins and emergence profiles around implants placed in the esthetic zone. *Clin Cosmet Investig Dent.* 2018;10:1-7.
9. Hong DGK, Oh J-H. Recent advances in dental implants. *Maxillofac Plast Reconstr Surg.* 2017;39(1):33.
10. Kuć J, Sierpińska T, Gołębiewska M. Alveolar ridge atrophy related to facial morphology in edentulous patients. *Clin Interv Aging.* 2017;12:1481-1494.
11. Behr M, Winklhofer C, Schreier M, et al. Risk of chipping or facings failure of metal ceramic fixed partial prostheses - a retrospective data record analysis. *Clin Oral Investig.* 2012;16(2):401-405.
12. Ioannidis A, Bindl A. Clinical prospective evaluation of zirconia-based three-unit posterior fixed dental prostheses: Up-to ten-year results. *J Dent.* 2016;47:80-85.

13. Pockpa ZAD, Didia ELE, Mobio YS, Coulibaly NT, Djeredou KB. Evaluation of periodontal health of prosthetic abutments. Pilot study about 100 abutments of crowns and bridges. *Odontostomatol Trop*. 2015;38(152):39-47.
14. Wilmes B., Der Mesialslider. *J. Compr. Dentof. Orthod. + Orthop*. 2010;(3):53-62.
15. Zachrisson BU, Mjör I a. Remodeling of teeth by grinding. *Am J Orthod*. 1975;68(5):545-553.
16. Thordarson A, Zachrisson BU, Mjör I. Remodeling of canines to the shape of lateral incisors by grinding: a long-term clinical and radiographic evaluation. *Am J Orthod Dentofac Orthop*. 1991;100(2):123-132.
17. Jacobs C, Jacobs-Müller C, Luley C, Erbe C, Wehrbein H. Orthodontic space closure after first molar extraction without skeletal anchorage. *J Orofac Orthop*. 2011;72(1):51-60.
18. Wilmes B, Drescher D. Mini-Implantate in der Kieferorthopädie: Das Benefit-System. *Zahnmedizin up2date*. 2008;6:1-10.
19. Lübberink G, Nienkemper M, Wilmes B, Ludwig B, Drescher D. Nonsurgical Treatment of a Mature Adult Class III Patient. *J Clin Orthod*. 2014;48(11):697-702.
20. Fritz U, Diedrich P, Kinzinger G, Al-Said M. The Anchorage Quality of Mini-implants towards Translatory and Extrusive Forces. *J Orofac Orthop*. 2003;64(4):293-304.
21. Costa A, Raffainl M, Melsen B. Miniscrews as orthodontic anchorage: a preliminary report. *Int J Adult Orthodon Orthognath Surg*. 1998;13(3):201-209.
22. Ludwig B, Glasl B, Bowman SJ, Wilmes B, Kinzinger GSM, Lisson J. Anatomical guidelines for miniscrew insertion: palatal sites. *J Clin Orthod*. 2011;45(8):433-441.
23. Nienkemper M, Wilmes B, Pauls A, Yamaguchi S, Ludwig B, Drescher D. Treatment efficiency of mini-implant-borne distalization depending on age and second-molar eruption. *J Orofac Orthop*. 2014;75(2):118-132.
24. Kim YH, Yang S-M, Kim S, et al. Midpalatal miniscrews for orthodontic anchorage: factors affecting clinical success. *Am J Orthod Dentofac Orthop*. 2010;137(1):66-72.
25. Lim H-J, Choi Y-J, Evans CA, Hwang H-S. Predictors of initial stability of orthodontic miniscrew implants. *Eur J Orthod*. 2011;33(5):528-532.
26. Papageorgiou SN, Zogakis IP, Papadopoulos MA. Failure rates and associated risk factors of orthodontic miniscrew implants: a meta-analysis. *Am J Orthod Dentofac Orthop*. 2012;142(5):577-595.

27. Takaki T, Tamura N, Yamamoto M, et al. Clinical study of temporary anchorage devices for orthodontic treatment-stability of micro/mini-screws and mini-plates: experience with 455 cases. *Bull Tokyo Dent Coll.* 2010;51(3):151-163.
28. Nienkemper M, Wilmes B, Lübberink G, Ludwig B, Drescher D. Extrusion of impacted teeth using mini-implant mechanics. *J Clin Orthod.* 2012;46(3):150-155.
29. Lim H-J, Eun C-S, Cho J-H, Lee K-H, Hwang H-S. Factors associated with initial stability of miniscrews for orthodontic treatment. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 2009;136(2):236-242.
30. Nienkemper M, Pauls A. Multifunctional Use of Palatal Mini-Implants. *J Clin Orthod.* 2012;46(11):679-686.
31. Gündüz E, Schneider-D, el Savio T, Kucher G, Schneider B, Bantleon HP. Acceptance rate of palatal implants: A questionnaire study. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 2004;126(5):623-626.
32. Wilmes B, Katyal V, Willmann J, Stocker B, Drescher D. Mini-implant-anchored Mesialslider for simultaneous mesialisation and intrusion of upper molars in an anterior open bite case: a three-year follow-up. *Aust Orthod J.* 2015;31(1):87-97.
33. Wilmes B. Der Mesial-Distalslider. *J. Compr. Dentof. Orthod. + Orthop.* 2012;3-4:22-32.
34. Wilmes B, Nienkemper M, Nanda R, Lübberink G. Palatally Anchored Maxillary Molar Mesialization Using the Mesialslider. *J Clin Orthod.* 2013;47(3):172-179.
35. Kanavakis G, Ludwig B, Rosa M, Zachrisson B, Hourfar J. Clinical outcomes of cases with missing lateral incisors treated with the “T”-Mesialslider. *J Orthod.* 2014;41(1):33-38.
36. Ludwig B, Zachrisson BU, Rosa M. Non-Compliance Space Closure in Patients with Missing Maxillary Lateral Incisors. *J Clin Orthod.* 2013;47(3):180-187.
37. Skieller V, Björk A, Linde-Hansen T. Prediction of mandibular growth rotation evaluated from a longitudinal implant sample. *Am J Orthod.* 1984;86(5):359-370.
38. Larson BE, Sievers MM, Ko CC. Improved lateral cephalometric superimposition using an automated image fitting technique. *Angle Orthod.* 2010;80(3):474-479.
39. Garino F, Garino GB. Distalization of maxillary molars using the speed system: a clinical and radiological evaluation. *World J Orthod.* 2004;5(4):317-323.
40. Nienkemper M, Wilmes B, Franchi L, Drescher D. Effectiveness of maxillary protraction using a hybrid hyrax-facemask combination: A controlled clinical study. *Angle Orthod.* 2015;85(5):764-770.

41. Sauppe S, Abkai C, Hourfar J, Ludwig B, Ulrici J, Hell E. Automatic fusion of lateral cephalograms and digital volume tomography data-perspective for combining two modalities in the future. *Dentomaxillofac Radiol.* 2015;44(9):1-9.
42. Chen X, Liu D, Liu J, Wu Z, Xie Y, Li L, Liu H, Guo T, Chen C, Zhang S. Three-Dimensional Evaluation of the Upper Airway Morphological Changes in Growing Patients with Skeletal Class III Malocclusion Treated by Protraction Headgear and Rapid Palatal Expansion: A Comparative Research. *PLoS One.* 2015;10(8):1-13.
43. Hansen L, Tausche E, Hietschold V, Hotan T, Lagravère M, Harzer W. Skelettal verankerte Gaumennahterweiterung mit dem Dresden Distraktor. *J Orofac Orthop.* 2007;68(2):148-158.
44. Arbeitsgemeinschaft für Röntgenologie. s2k-Leitlinie Dentale digitale Volumentomographie. *AWMF-Leitlinien.* 2013;(AWMF-Register-Nummer:083-005):1-33.
45. Sanders MA, Hoyjberg C, Chu CB, Leggitt VL, Kim JS. Common orthodontic appliances cause artifacts that degrade the diagnostic quality of CBCT images. *J Calif Dent Assoc.* 2007;35(12):850-857.
46. Kamburoğlu K, Kurşun Ş, Kılıç C, Özen T. Accuracy of virtual models in the assessment of maxillary defects. *Imaging Sci Dent.* 2015;45(1):23-29.
47. Ashmore JL, Kurland BF, King GJ, Wheeler TT, Ghafari J, Ramsay DS. A 3-dimensional analysis of molar movement during headgear treatment. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 2002;121(1):18-29.
48. Choi D-S, Jeong Y-M, Jang I, Jost-Brinkmann PG, Cha B-K. Accuracy and reliability of palatal superimposition of three-dimensional digital models. *Angle Orthod.* 2010;80(4):497-503.
49. Cha BK, Lee JY, Jost-Brinkmann P-G, Yoshida N. Analysis of tooth movement in extraction cases using three-dimensional reverse engineering technology. *Eur J Orthod.* 2007;29(4):325-331.
50. Choi J-I, Cha B-K, Jost-Brinkmann P-G, Choi D-S, Jang I-S. Validity of palatal superimposition of 3-dimensional digital models in cases treated with rapid maxillary expansion and maxillary protraction headgear. *Korean J Orthod.* 2012;42(5):235-241.
51. Thiruvenkatachari B, Al-Abdallah M, Akram NC, Sandler J, O'Brien K. Measuring 3-dimensional tooth movement with a 3-dimensional surface laser scanner. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 2009;135(4):480-485.

52. Canto GDL, Pachêco-Pereira C, Lagravere MO, Flores-Mir C, Major PW. Intra-arch dimensional measurement validity of laser-scanned digital dental models compared with the original plaster models: a systematic review. *Orthod Craniofac Res.* 2015;18(2):65-76.
53. Porto BG, Porto TS, Silva MB, et al. Comparison of linear measurements and analyses taken from plaster models and three-dimensional images. *J Contemp Dent Pract.* 2014;15(6):681-687.
54. Grünheid T, Patel N, De Felipe NL, Wey A, Gaillard PR, Larson BE. Accuracy, reproducibility, and time efficiency of dental measurements using different technologies. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 2014;145(2):157-164.
55. Besl P, McKay N. A Method for Registration of 3-D Shapes. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell.* 1992;14(2):239-256.
56. Gruen A, Akca D. Least squares 3D surface and curve matching. *ISPRS J Photogramm Remote Sens.* 2005;59(3):151-174.
57. Okatani IS, Deguchi K. A Method for Fine Registration of Multiple View Range Images Considering the Measurement Error Properties. *Cviu.* 2002;87(1-3):66-77.
58. Park SY, Subbarao M. A fast point-to-tangent plane technique for multi-view registration. *Proc Int Conf 3-D Digit Imaging Model 3DIM.* 2003;276-283.
59. Peavy DC, Kendrick GS. The effects of tooth movement on the palatine rugae. *J Prosthet Dent.* 1967;18(6):536-542.
60. Jang I, Tanaka M, Koga Y, et al. A Novel Method for the Assessment of Three-Dimensional Tooth Movement during Orthodontic Treatment. *Angle Orthod.* 2009;79(3):447-453.
61. Hoggan BR, Sadowsky C. The use of palatal rugae for the assessment of anteroposterior tooth movements. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 2001;119(5):482-488.
62. van der Linden FP. Changes in the position of posterior teeth in relation to ruga points. *Am J Orthod.* 1978;74(2):142-161.
63. Kim H-K, Moon S-C, Lee S-J, Park Y-S. Three-dimensional biometric study of palatine rugae in children with a mixed-model analysis: a 9-year longitudinal study. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 2012;141(5):590-597.
64. Almeida MA, Phillips C, Kula K, Tulloch C. Stability of the palatal rugae as landmarks for analysis of dental casts. *Angle Orthod.* 1995;65(1):43-48.

65. Cha B, Lee J. Analysis of tooth movement in extraction cases using three-dimensional reverse engineering technology. *Eur J Orthod*. 2007;29(4):325-331.
66. Choi J-I, Cha B-K, Jost-Brinkmann P-G, Choi D-S, Jang I-S. Validity of palatal superimposition of 3-dimensional digital models in cases treated with rapid maxillary expansion and maxillary protraction headgear. *Korean J Orthod*. 2012;42(5):235-241.
67. Mavropoulos A, Karamouzos A, Kiliaridis S, Papadopoulos MA. Efficiency of Noncompliance Simultaneous First and Second Upper Molar Distalization: A Three-dimensional Tooth Movement Analysis. *Angle Orthod*. 2005;75(4):532-539.
68. Sandler J, Murray A, Thiruvenkatachari B, Gutierrez R, Speight P, O'Brien K. Effectiveness of 3 methods of anchorage reinforcement for maximum anchorage in adolescents: A 3-arm multicenter randomized clinical trial. *Am J Orthod Dentofac Orthop*. 2014;146(1):10-20.
69. Grauer D, Cevidane LH, Tyndall D, Styner MA, Flood PM, Proffit WR. Registration of orthodontic digital models. *Craniofac Growth Ser*. 2011;48:377-391.
70. Talaat S, Kaboudan A, Breuning H, et al. Reliability of linear and angular dental measurements with the OrthoMechanics Sequential Analyzer. *Am J Orthod Dentofac Orthop*. 2015;147(2):264-269.
71. Lai EH, Yao CC, Chang JZ, Chen I, Chen YJ. Three-dimensional dental model analysis of treatment outcomes for protrusive maxillary dentition: Comparison of headgear, miniscrew, and miniplate skeletal anchorage. *Am J Orthod Dentofac Orthop*. 2008;134(5):636-645.
72. Nalcacia R, Kocoglu-Altanb AB, Bicakcic AA, Ozturkd F, Babacand H. A reliable method for evaluating upper molar distalization: Superimposition of three-dimensional digital models. *Korean J Orthod*. 2015;45(2):82-88.
73. Chen H, Lowe AA, de Almeida FR, Wong M, Fleetham JA, Wang B. Three-dimensional computer-assisted study model analysis of long-term oral-appliance wear. Part 1: Methodology. *Am J Orthod Dentofac Orthop*. 2008;134(3):393-407.
74. Lee S-J, Jang S-Y, Chun Y-S, Lim WH. Three-dimensional analysis of tooth movement after intrusion of a supraerupted molar using a mini-implant with partial-fixed orthodontic appliances. *Angle Orthod*. 2013;83(2):274-279.
75. Ho N. Finding optimal rotation and translation between corresponding 3D points. 2013 http://nghiaho.com/?page_id=671 Stand vom 17.09.2018
76. Shonkwiler R. An image algorithm for computing the Hausdorff distance efficiently in linear time. *Informacion Processing Letters*. 1989;30(2):87-89.

77. Björk A; Skieller V. Normal and abnormal growth of the mandible: A synthesis of longitudinal cephalometric implant studies over a period of 25 years. *Eur J Orthod.* 1983;5(1):1-46.
78. Gracco A, Buranello M, Cozzani M, Siciliani G. Digital and plaster models: a comparison of measurements and times. *Prog Orthod.* 2007;8(2):252-259.
79. Jacobs C, Jacobs-Müller C, Luley C, Erbe C, Wehrbein H. Orthodontic space closure after first molar extraction without skeletal anchorage. *J Orofac Orthop.* 2011;72(1):51-60.