

Aus dem Institut für 3D-Dentalradiologie – MESANTIS Berlin

## **DISSERTATION**

# **Untersuchungen zu Behandlungserfolgen und Behandlungszeiten mit dem Konzept „*Virtual Surgery First*“ bei kombinierten kieferorthopädisch/kieferchirurgischen Therapien**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doctor medicinae dentariae (Dr. med. dent.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät  
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Christian Flechsig

aus Finsterwalde

Datum der Promotion: 26.02.2016

## Abstract

Für viele Patienten mit skelettalen Kieferfehlstellungen bietet das Konzept „*Surgery First*“ (SF) Vorteile bezüglich des Therapieerfolgs und der Behandlungsdauer, sodass sich diese Methode immer weiter etabliert. Dank des technischen Fortschritts lassen sich heute SF-Therapien auch virtuell planen und die notwendigen OP-Splinte in einem *Computer-aided design/computer-aided manufacturing*-(CAD/CAM)-Verfahren herstellen (VSF-*Virtual Surgery First*).

Im Vorfeld dieser Arbeit wurde von 24 Patienten mit Hilfe eines Dentalen Volumentomografie-(DVT)-Scans eine virtuelle Planung nach VSF mit der Software SimPlant Pro OMS (Materialise Dental, Leuven, Belgien) erstellt. Diese konnte über in einem 3D-Druckzentrum (Materialise Dental® NV, Leuven, Belgien) hergestellte OP-Splinte erfolgreich umgesetzt werden. Mit einem Dental-Scanner (Orthodontic 3D Scanner R700™ der Firma 3Shape) wurden die Anfangs- und Abschlussmodelle digitalisiert. Aus den digitalisierten Daten wurde, unter Verwendung der Software 3Shape OrthoAnalyzer™, der Peer Assessment Rating Index (PAR-Index) bestimmt. Das Patientengut umfasste Fälle mit symmetrischen und komplexeren asymmetrischen Kieferfehlstellungen. Ziel der Studie war es, die Behandlungsdauer und den Behandlungserfolg (PAR-Index-Veränderung) des VSF-Konzepts zu evaluieren.

Durch die Behandlung konnte eine signifikante Verringerung des PAR-Wertes um 33,67 Punkte bzw. 86,42% erreicht werden ( $p < 0,001$ ). Damit liegt die Verbesserung des PAR-Wertes deutlich über der in konventionell durchgeführten modellbasierten Therapien ohne SF (PAR-Veränderungen 72 - 77%). Insgesamt betrug die durchschnittliche Behandlungsdauer 14,8 Monate. Im Vergleich zu konventionellen Therapiemethoden konnte eine zeitliche Reduktion von 32,4 - 56,2% erreicht werden. Signifikante Unterschiede bezüglich des PAR-Index oder der Behandlungsdauer bei verschiedenen Subgruppen (prätherapeutische skelettale Klassen, bi- und monomaxilläre OPs) traten nicht auf.

Mit VSF-Konzepten können verschiedene skelettale Dysgnathien mit einem exzellenten Erfolg in deutlich kürzerer Behandlungszeit korrigiert werden. Die virtuelle Planung zeigt vor allem bei komplexeren asymmetrischen Dysgnathien große Vorteile. Es ist zu erwarten, dass sich das VSF-Konzept in Zukunft im dento-fazialen Bereich etablieren wird.

## Abstract

For many patients with the skeletal malposition of the jaw, the concept “Surgery First” provides many advantages regarding the therapeutic success and the duration of treatment. Therefore, this method is gaining popularity. Due to technological advances, treatment planning of SF can nowadays be done virtually on a computer and the necessary operation splints can be produced via a CAD/CAM-process (VSF-Virtual Surgery First).

Prior to this step, virtual planning after VSF was rendered with the help of DTV-Scans for 24 patients using the software SimPlant Pro OMS (Materialise Dental, Leuven, Belgium). This planning was able to be treated successfully by means of the 3D-printing centre (Materialise Dental® NV, Leuven, Belgium) produced OR-splints.

The dental scanner –Orthodontic 3D Scanner R700™ by 3Shape – digitalized initial and final models, and the Peer Assessment Rating Index (PAR-Index) was collected with the help of the software 3Shape OrthoAnalyzer™.

The patient material included symmetric as well as more complex asymmetric malpositions of the jaw. The aim was to demonstrate the therapeutic success of VSF via the PAR-Index as well as to clarify and discuss the advantages of the method with regard to the duration of treatment.

A significant reduction of the PAR-value by 33.67 points respectively 86.42% was able to be achieved ( $p < 0,001$ ). Therefore the improvement of the PAR-value lies significantly above the conventionally conducted model-based methods without SF, which are only able to reach an averaging PAR-modification of 72 to 77%. Overall, an average duration of treatment of 14.8 months was able to be achieved, which is an average timely reduction of 32.4 to 56.2% compared to conventional therapeutic methods.

Through VSF different kinds of skeletal dysgnathia can be treated and corrected at a really high standard in significantly shorter duration of treatment. The virtual planning is especially advantageous regarding more complex asymmetric dysgnathia. Because of this and of many more advantages, the virtual surgery within the dento-facial segment should be seen to gain influence in the future. Nevertheless, the concept VSF still calls for a thorough selection of patients and an experienced orthodontist.

# Inhaltsverzeichnis

	<b>Seite</b>
<b>Abstrakt</b> .....	<b>I</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>II</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Konventionelle Behandlung von Patienten mit Kieferfehlstellungen .....	1
1.2 Konzept „Surgery First“ .....	6
1.3 Virtuelle chirurgische Planung bei skelettalen Kieferfehlstellungen .....	12
1.4 Konzept „Virtual Surgery First“ (VSF).....	19
1.5 Peer Assessment Rating Index (PAR-Index) .....	23
<b>2 Fragestellung</b> .....	<b>28</b>
<b>3 Methodik</b> .....	<b>30</b>
3.1 Allgemeine Methodik .....	30
3.1.1 Patientengut .....	30
3.1.2 DVT-Geräte.....	32
3.1.3 Ablauf und Durchführung des VSF-Konzeptes .....	34
3.1.4 Erfassung des PAR-Index.....	41
3.1.5 Ablauf und Durchführung von Modellscan und Messung .....	44
3.2 Spezielle Methodik .....	52
3.2.1 Intraindividuelle Reproduzierbarkeit des PAR-Index/Fehleranalyse .....	52
3.2.2 Prä- und posttherapeutischer PAR-Index (prä-PAR/post-PAR).....	54
3.2.3 PAR-Index bei mono- und bimaxillärer OP-Methode .....	54
3.2.4 PAR-Index in unterschiedlichen skelettalen Klassen .....	54
3.2.5 Vergleich der Behandlungsdauer bei Patienten mit VSF .....	54
3.2.6 Vergleich der Behandlungsdauer bei mono- und bimaxillärer OP-Methode .....	55
3.2.7 Vergleich der Behandlungsdauer in unterschiedlichen skelettalen Klassen .....	55
3.3 Statistische Auswertung .....	55
<b>4 Ergebnisse</b> .....	<b>58</b>
4.1 Intraindividuelle Reproduzierbarkeit des PAR-Index/ Fehleranalyse .....	58
4.2 Prä- und post-therapeutischer PAR-Index .....	59
4.3 Vergleich des PAR-Index bei mono- und bimaxillärer OP-Methode .....	60
4.4 Vergleich des PAR-Index in unterschiedlichen skelettalen Klassen .....	62
4.5 Behandlungsdauer bei Patienten mit VSF .....	64
4.6 Vergleich der Behandlungsdauer bei mono- und bimaxillärer OP-Methode .....	65
4.7 Vergleich der Behandlungsdauer in unterschiedlichen skelettalen Klassen .....	66

---

<b>5 Diskussion .....</b>	<b>67</b>
5.1 Diskussion der Methoden.....	67
5.2 Diskussion der Ergebnisse.....	67
5.2.1 Intraindividuelle Reproduzierbarkeit des PAR-Index/Fehleranalyse .....	67
5.2.2 Prä- und posttherapeutischer PAR-Index .....	68
5.2.3 PAR-Index bei mono- und bimaxillärer OP-Methode .....	70
5.2.4 PAR-Index in unterschiedlichen skelettalen Klassen .....	71
5.2.5 Behandlungsdauer bei Patienten mit VSF .....	72
5.2.6 Vergleich der Behandlungsdauer bei mono- und bimaxillärer OP-Methode .....	75
5.2.7 Vergleich der Behandlungsdauer in unterschiedlichen skelettalen Klassen .....	76
5.3 Schlussfolgerungen.....	76
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>77</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>91</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>93</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>95</b>
<b>Eidesstattliche Versicherung.....</b>	<b>96</b>
<b>Lebenslauf .....</b>	<b>98</b>
<b>Danksagung.....</b>	<b>99</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Konventionelle Behandlung von Patienten mit Kieferfehlstellungen

Eine kombinierte kieferorthopädische und kieferchirurgische Behandlung ist bei Patienten mit ausgeprägten skelettalen Dysgnathien indiziert, bei denen eine rein kieferorthopädische Therapie nicht zu zufriedenstellenden Ergebnissen führt. Die Ursprünge der Behandlung von skelettalen Dysgnathien gehen bis auf das Jahr 1849 zurück, als der Chirurg Simon Hüllihen eine Segmentosteotomie im Unterkiefer (UK) an einem Brandopfer durchführte. Durch die Brandverletzung bedingte Narbenkontraktur war eine Lücke zwischen Eckzahn und Prämolaren entstanden. Durch die beidseitige V-förmige Entfernung von Knochenanteilen und deren Verbindung durch einen horizontalen Schnitt, konnte er den Alveolarfortsatz rückverlagern und damit die Lücke schließen. Bei der ohne Anästhesie stattfindenden Operation (OP) wurde das mobilisierte Knochenfragment mit Drahtligaturen fixiert und später mittels einer an Gipsmodellen hergestellten Silberplatte fixiert (Nanjappa et al. 2011; Reuther 2013). In den nachfolgenden Jahrzehnten wurden chirurgische OPs im Bereich des Gesichtsschädels vor allem bei Tumorresektionen, kongenitalen Anomalien, posttraumatischen Verletzungen oder bei einer starken Rückverlagerung der Maxilla in Verbindung mit Gaumenspalten durchgeführt (Moos & Ayoub 2011). Seit Mitte des 19. Jahrhunderts entwickelte sich eine fast unüberschaubare Fülle von OP-Methoden zur chirurgischen Behandlung skelettaler Dysgnathien.

Im UK wurden zunächst Kondylektomien, bei denen die physiologische Gelenkführung aufgehoben wurde, sowie Ostektomien und Osteotomien im Bereich des horizontalen UK-Astes entwickelt. Anfang des 20. Jahrhunderts empfahl Babcock, die Osteotomie im UK am aufsteigenden Ast durchzuführen (Babcock 1909). Trotz zahlreicher Modifikationen der OP-Methode im aufsteigenden Ast konnte die Problematik der Fixierung der Knochenfragmente nicht gelöst werden, da diese aufgrund der horizontalen Schnittführung nur eine kleine Oberfläche aufwiesen und damit dem Zug des Musculus pterygoideus lateralis und des Musculus temporalis schwer standhalten konnten. Wassmund (1935) führte aus diesem Grund die zapfenförmige Schnittführung ein, welche bald weiterentwickelt wurde (Caldwell & Letterman 1954; Trauner 1967). Nach zahlreichen Verbesserungen der OP-Techniken im Laufe der folgenden Jahre wurde 1955 die sagittale Osteotomie des UKs mit intraoraler Schnittführung weltweit als Standardmethode anerkannt. Mittels zwei horizontaler Knochenschnitte, lingual oberhalb des Foramen incisivum und bukkal auf Höhe des Kieferwinkels, wird dabei der UK intraoral sagittal gespalten (Obwegeser & Trauner 1955). Das Verfahren wurde durch eine retromolare Inzision für die bukkale horizontale Osteotomielinie verbessert (DAL-PONT-Osteotomie). Der Vorteil dieses Vorgehens ist die Vergrößerung der Knochenanlagerungsfläche, wodurch sowohl Vor- als

auch Rückverlagerungen des UKs vorgenommen werden können. Ein weiterer Vorteil ist, dass bei der Vorverlagerung des UKs kein Knochentransplantat benötigt wird (Dal Pont 1961). Durch die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten der sagittalen Spaltung des UKs wurde diese Methode zur Standardtherapie. Bei der Vorverlagerung des UKs können Rezidive durch eine Überkorrektur weitestgehend verhindert werden (Steinhauser 1972).

Die ersten Behandlungen im Oberkiefer (OK) fanden 1894 statt (Cunningham 1894). 1921 führte Cohn-Stock die erste partielle En-Block-Mobilisation des OK durch, welche als Grundlage für alle weiteren Methoden gelten sollte (Axhausen 1937). Später entwickelten Langenbeck und Cheever die OP-Methoden zur Mobilisierung der Maxilla weiter. Langenbeck führte erstmals eine Osteotomie in dem Bereich der heutigen LeFort-I-Ebene durch (Reuther 2013). Partsch arbeitete wiederum erstmals mit intraoralen Vestibulimschnitten, um die OP zu vereinfachen (Drommer 1986). Die Hauptindikationen für OPs waren zu Beginn des Jahrhunderts Tumorresektionen, Kriegsverletzungen im Mittelgesichtsbereich und starke Rückverlagerungen der Maxilla in Verbindung mit Gaumenspalten. Erst nach dem Ersten Weltkrieg wurde die LeFort-I-Methode zur Korrektur von Deformitäten im Mittel- und Untergesicht weitestgehend akzeptiert (Moos & Ayoub 2011). 1937 riskierte Axhausen als Erster eine vollständige Ablösung des OK von der Schädelbasis (Axhausen 1937; Reuther 2013). Da man lange Zeit bei der vollständigen Mobilisierung der Maxilla eine Devaskularisation des Knochens befürchte, wurde die LeFort-I-Osteotomie erst zwischen 1960 und 1970 zur Standard-OP-Methode. Ende der 1960er Jahre gelang an Rhesusaffen der Nachweis, dass bei einer vollständigen LeFort-I-Osteotomie die Durchblutung von Knochen und Pulpa durch das umliegende Gewebe erhalten bleibt (Bell 1973). Die Anwendung der LeFort-I-Osteotomie im OK sowie die sagittale Spaltung des UKs waren aus dem klinischen Alltag nicht mehr wegzudenken und ebneten gleichzeitig den Weg für die Einführung der bimaxillären Methode. Bei großen Diskrepanzen liefert die bimaxilläre Methode harmonischere Ergebnisse im Gesichtsprofil und beugt Rezidiven vor (Obwegeser 1970). Durch die LeFort-I-Osteotomie alleine oder in Kombination mit einer Split-Osteotomie des UKs können nahezu alle dreidimensionalen (3D) Dysgnathien behandelt und gewünschte Profilbilder erzeugt werden (Teuscher et al. 1983).

Bereits Ende des 19. Jahrhunderts erkannten verschiedene Wissenschaftler, dass aufgrund der Komplexität der Therapieplanung und der Durchführung solcher OPs eine interdisziplinäre Zusammenarbeit von Mund-Kiefer-Gesichtschirurgen und Kieferorthopäden unerlässlich ist. Durch die Verwendung von Planungsmodellen aus Gips, die in Fragmente zersägt wurden, sollte eine harmonisierte Okklusion gewährleistet werden. Die Fragmente sollten wiederum als präoperatives Planungsmodell für OP-Schablonen dienen, um die Knochenfragmente während der OP exakt entsprechend der Planung platzieren zu können (Angle 1898; Blair 1907). Trotz Etablierung der neuen OP-Techniken und der gipsmodellbasierten Behandlungsplanung be-

stand das Problem der postoperativen Stabilität weiter. Bis in die 1970er Jahre wurde für die Osteosynthese fast ausschließlich Draht verwendet. Später wurden Miniplattensysteme entwickelt, um durch eine möglichst stabile Fixation den Heilungsverlauf zu beschleunigen (Luhr 2000). Neben der Nutzung von Platten und Schrauben aus Titan wurden auch selbstauflösende Materialien wie Polyglycolid-Kunststoffstäbe, Poly-p-Dioxanon-(PDS-II)-Fäden, Knochenschrauben aus der Kortikalis des Femurs sowie Platten und Schrauben aus Poly-L/DL-Lactid getestet (Bouwman et al. 1994; Obwegeser 1994; Haers & Sailer 1998; Luther et al. 2007). Durch die Verwendung einer Kombination aus Schrauben und Platten konnte auf eine langwierige intermaxilläre Fixation verzichtet werden (Luhr 1985; Luhr et al. 1986). Bei der bis dahin üblichen langandauernden intermaxillären Fixation war es dem Patienten nur eingeschränkt möglich, Nahrungsmittel aufzunehmen, Mundhygiene zu betreiben oder bei einer Ventilationsstörung der Nase ungestört zu atmen. Eine Studie belegte, dass bei Patienten, bei denen die postoperative Stabilität ohne intermaxilläre Fixation erreicht werden konnte, weniger Komplikationen kurz nach der OP auftraten. Außerdem war die Inzidenz postoperativer Infektionen aufgrund der erleichterten postoperativen Mundhygiene geringer. Eine Nahrungsaufnahme durch eigenständige Mastikation war in der Regel bereits unmittelbar nach der OP möglich. Nach zwei bis vier Wochen gab es keine Einschränkung im Bezug auf die Nahrungsmittelwahl mehr (Krekmanov 1989). Ein weiterer Vorteil war der Erhalt der Mobilität des UKs unmittelbar nach der OP, was sich positiv auf die dauerhafte Mobilität des Kiefergelenks auswirkte (Aragon & Van Sickels 1987; Buckley et al. 1988; Zarrinkelk et al. 1996). Der größte Gewinn war jedoch, dass der Operateur die einzelnen Segmente in der vorab geplanten Position fixieren konnte. Bei der stabilen Osteosynthese traten jedoch gelegentlich Fehler auf, die zu Dislokationen des Kondylus führten. Daraus entstanden Okklusions- und Gelenkstörungen (Luhr 1989).

Die steigende Anzahl an jährlich durchgeführten Behandlungen mit kombiniert kieferorthopädisch-kieferchirurgischer Therapie belegt die Bedeutung einer umfassenden und präzisen Planung (Bell 1992; Santler 2000; Xia et al. 2000a; Troulis et al. 2002; Eckhardt & Cunningham 2004; Gateno et al. 2007; Swennen et al. 2007; Villegas et al. 2010b; Xia et al. 2010). Weiter wurden in den letzten Jahren vermehrt bimaxilläre OPs durchgeführt. Grund dafür sind der geringe Betrag an notwendigen Zahnbewegungen in den Kiefern, wodurch sich stabilere Gebissverhältnisse erzielen lassen, sowie der größere Einfluss auf die faziale Ästhetik. Allerdings muss bei diesem Vorgehen eine wesentlich komplexere Planung in Kauf genommen werden (Sun et al. 2013). Trotz der Wichtigkeit einer präzisen Planung und der steigenden Anzahl komplexer Fälle wird ein Großteil der Behandlungen heute immer noch mit der von Babcock Anfang des letzten Jahrhunderts auf Gipsmodellen basierenden Planung realisiert. Diese hat sich in den letzten 50 Jahren nicht grundlegend verändert und wird immer noch als Goldstandard angesehen (Xia et al. 2011b). Die derzeitige auf Gipsmodellen basierende Planung lässt



sich in drei grundlegende Schritte untergliedern: 1. Datenerhebung aus verschiedenen Quellen, 2. Simulation des chirurgischen Vorhabens, 3. Transfer der simulierten Planung im operativen Eingriff (Xia et al. 2005). Der erste Schritt besteht aus einer ärztlichen Untersuchung, einem vollständigen extra- und intraoralen Befund inklusive einer Fotodokumentation, Röntgenbildern, Fernröntgenbildern, computertomografischen (CT) Aufnahmen und anderen Medien. Außerdem müssen für die Fertigung der intraoperativen OP-Splinte für Schritt 3 die dentalen Strukturen erfasst und zugeordnet werden. Obwohl CT-Aufnahmen skelettale Strukturen ausgesprochen gut abbilden, dienen sie nur der Orientierung, da sie dentale Strukturen für die chirurgische Simulation nicht ausreichend genau erfassen (Santler et al. 1998; Gateno et al. 2003b). Aus diesem Grund werden Gipsmodelle angefertigt, die nach Gesichtsbogenübertragung und Bissregistrat in einen Artikulator übertragen werden (Bell et al. 1980; Bell 1992; Ellis et al. 1992). Die gesamte Datensammlung bietet dem Chirurgen die Grundlage für die Schritte 2 und 3. Bei Asymmetrien steigt die Komplexität der notwendigen Planung stark an (Xia et al. 2005). Mit der Simulation des chirurgischen Vorhabens in Schritt 2 werden metrische Angaben generiert, nach denen die Kiefer bzw. Kiefersegmente bewegt werden können. Bei der gipsmodellbasierten Methode dienen meist 2D-cephalometrische Röntgenbilder in frontaler und lateraler Ansicht als geometrische Grundlage für die Analyse. Mittels üblicher Messmethoden können die Parameter Größe, Form, Position und Ausrichtung von anatomischen Strukturen bestimmt werden. Bei der Verwendung von 2D-cephalometrischem Bildmaterial kommt es jedoch zu zwei grundlegenden Problemen (Xia et al. 1999; Troulis et al. 2002; Villegas et al. 2010b; Gateno et al. 2011b): Weder erfassen das laterale und das frontale cephalometrische Bildmaterial allein noch in Kombination alle erforderlichen Analysedaten (Swennen et al. 2007). Das zweite Problem tritt bei Patienten mit Asymmetrien auf, bei denen ein Großteil der Messwerte nur verzerrt wiedergegeben werden kann (Gateno et al. 2011a). Die Wiedergabe anatomischer 3D-Strukturen führt bei einer konventionellen 2D-Bildgebung zwangsläufig zu Überlagerungen und Projektionsfehlern, die besonders beim Auftreten von Asymmetrien zu Fehlinterpretationen und Fehlplanungen führen können (Huang et al. 2005). Auch die Gewinnung von cephalometrischem Bildmaterial aus CT- oder Dentalen Volumentomografie-(DVT)-Datensätzen für die Festlegung der Verlagerungsmaße unterliegt diesen Gesetzmäßigkeiten (Fuhrmann et al. 1996).

Am Ende der Planung werden die artikulierten Modelle zersägt und entsprechend den in der Planung ermittelten Verlagerungsmaßen ausgerichtet. Die dabei entstehende neue Okklusion dient der Herstellung der intraoperativen Splinte. Der letzte Schritt im Prozess der chirurgischen Planung ist die Umsetzung der Simulation im OP-Raum. Die OP-Splinte helfen dem Chirurgen bei der korrekten Platzierung der Kiefer und Segmente. Bei komplexen bimaxillären Behandlungen ist eine erfolgreiche Positionierung der Segmente in allen drei Raumebenen

ohne OP-Splinte nicht möglich (Ellis 1999). Durch die fehlende Wiedergabe der umliegenden Knochenanatomie durch die Gipsmodelle können Knochenüberlagerungen auftreten, die die planmäßige Umsetzung der Segmente verhindern (Santler 2000; Gateno et al. 2003b). Ein Versuch, Knochenüberlagerungen zu vermeiden, ist die Einbeziehung eines auf einem CT-Scan basierenden, mittels Stereolithografie-(STL)-Verfahren hergestellten Schädelmodells. Trotz der vorteilhaften exakten Knochendarstellung überwiegen bei dieser Methode jedoch die Nachteile. Aufgrund von durch metallische Restaurationen bedingten Artefakten während des CT-Scans wird die dentale Oberfläche für eine Übertragung in die chirurgische Simulation nicht ausreichend präzise wiedergegeben. Weitere Nachteile sind die fehlende Möglichkeit, verschiedene OPs an einem Modell zu simulieren, und der hohe Kostenaufwand der Fertigung (Xia et al. 2005).

Olszewski & Reyhler fassten die theoretischen Fehler und Ungenauigkeiten, die bei der traditionellen Methode auftreten können, zusammen: Die ersten Fehler treten bei der 2D- und 3D-Analyse von cephalometrischem Bildmaterial auf. Weitere Fehler entstehen bei der Übertragung der Kieferrelation in den Artikulator. Die externen Referenzpunkte der arbiträren Gesichtsbogenübertragungen, Meatus acusticus externus sowie Dorsum nasea, zeigen keine korrekten anatomischen Verhältnisse auf, wodurch die Rotationsachsen des Kiefergelenks nicht präzise erfasst werden können. Hinzu kommt die Manipulation durch den Patienten oder den behandelnden Arzt. Letztendlich ist die auf Gipsmodellen basierende Simulation der Planung äußerst kompliziert, da kein direktes Bindeglied zwischen der cephalometrischen Analyse und der modellbasierten Planung existiert. Die Übertragung der horizontalen und vertikalen Referenzlinien auf das Modell erfolgt mit 2D-Hilfsmitteln (Messschieber und Lineal), welche keine umliegenden Knochenstrukturen erfassen. Auch Rotationen und Translationen der Segmente können am Gipsmodell nicht exakt kontrolliert werden (Olszewski & Reyhler 2004).

In verschiedenen Studien wurden neue Vorgehensweisen zur Minimierung der Fehler der auf 2D-Modellen basierenden Behandlungsplanung untersucht, die aber bezüglich ihrer Exaktheit und Reproduzierbarkeit immer an ihre Grenzen stießen (Anwar & Harris 1990; Ellis 1990; Omura et al. 1995; Schwestka-Polly et al. 1998; Olszewski 2009; Akram et al. 2011). Bereits die Verwendung eines halbindividuellen Artikulators kann als Fehler betrachtet werden, da dieser das Rotationszentrum des Kondylus nicht real darstellen kann (Aboul-Hosn Centenero & Hernández-Alfaro 2012).

Letztendlich summieren sich im OP-Splint, der die finale relative Position zwischen Maxilla und Mandibula einstellt, alle Fehler der vorangegangenen Arbeits- und Planungsschritte (Olszewski & Reyhler 2004). Aufgrund der oben genannten Ungenauigkeiten ist derzeit ein Paradigmenwechsel bei der Behandlung skelettaler Dysgnathien weg von der gipsmodellbasierten Planung hin zu einer rein virtuellen Planung zu beobachten.

## 1.2 Konzept „Surgery First“

Die zurzeit standardmäßig durchgeführte Therapieplanung bei Patienten mit skelettalen Kieferfehlstellungen umfasst eine orthodontische Zahnbewegung sowohl vor als auch nach der chirurgischen Phase. Dies war jedoch nicht immer so. Vor 1960 wurde vor allem die mandibuläre Prognathie ohne kieferorthopädische Vorbehandlung korrigiert. Als Grundstein für die moderne orthognathe Chirurgie gilt die 1954 eingeführte Methode der Bilateralen Sagittalen Split Osteotomie (BSSO) sowie deren Weiterentwicklung (Caldwell & Letterman 1954; Obwegeser & Trauner 1955). Nur wenige Jahre später wurde die kieferorthopädische Vorbehandlung bei Patienten mit skelettalen Kieferfehlstellungen als Voraussetzung für den funktionellen und ästhetischen Erfolg weltweit anerkannt (Converse & Horowitz 1969). Mit Aussagen wie „*A good occlusion does not automatically make a good profile and vice versa*“ und „*Orthodontics can help a lot but it can also make the necessary surgery almost impossible*“ wird die Wichtigkeit der Zusammenarbeit von Kieferorthopäden und Chirurgen unterstrichen (Ponduri et al. 2011). Damit ist die präorthodontische Phase inklusive des Planungsprozesses bis heute ein elementarer Bestandteil der konventionellen Therapie skelettaler Anomalien (Leelasinjaroen et al. 2012).

Ende der 1980er beschäftigten sich erstmals Kieferorthopäden mit einem Konzept, bei dem die präorthodontische Phase ausgelassen bzw. verkürzt werden kann (Behrman & Behrman 1988; Koole & Egyedi 1990; Brachvogel et al. 1991a; Brachvogel et al. 1991b). Ausgehend von der Annahme, dass das umliegende Weichgewebe (Lippen, Wangen und Zunge) erst nach dem chirurgischen Vorgehen unterstützend auf die Einstellung der gewünschten Zahnstellung wirkt, lässt sich so eine Verkürzung der gesamten Behandlungsdauer erzielen (Behrman & Behrman 1988). Die Chirurgen Koole & Egyedi diskutierten als Erste das Konzept „*Surgery First*“ (SF-Konzept). Sie beurteilten die präorthodontische Phase bei Behandlung skelettaler Dysgnathien als kontraproduktiv. Demnach kommt es in dieser Phase vermehrt zu Zahnbewegungen außerhalb des skelettalen Toleranzbereiches, was wiederum zu einer erhöhten Wahrscheinlichkeit von Wurzelresorptionen sowie einer verminderten posttherapeutischen Stabilität führt (Koole & Egyedi 1990). In der prächirurgischen Phase erfolgen die orthodontischen Zahnbewegungen gegen die vorangegangenen dento-alveolären Kompensationen sowie gegen Adaptationsmechanismen der umgebenden Weichgewebe. Die orthodontischen Zahnbewegungen sind leichter durchzuführen, wenn die Kiefer und die umgebenden Weichgewebe post-operativ in einer anatomisch-physiologischen und funktionellen Beziehung (Angle-Klasse I) stehen, da dann die Zahnbewegungen nicht gegen die Adaptionsmechanismen der skelettalen Dysgnathie korrigiert werden müssen (Brachvogel et al. 1991a). Zusätzlich zu der langen Behandlungsdauer kommt es in der präoperativen Phase zu einer vorübergehenden Verschlechterung der faziellen Ästhetik aufgrund von Dekompensationen der Zahnfehlstellungen. Patienten haben

heute große Erwartungen in Bezug auf die ästhetischen und funktionellen Ergebnisse einer solchen Therapie, besonders wenn sie über die verschiedenen Aspekte in ihrem Therapieverlauf gut informiert sind (Cunningham et al. 1996). Ein Großteil der Patienten empfindet die orthodontische Phase durch die Sichtbarkeit der verwendeten Apparaturen, die dabei auftretenden Schmerzen und aufgrund der langen Dauer als den unangenehmsten Teil der Therapie (Nurminen et al. 1999). Die Verlängerung der Behandlungsdauer und der temporäre ästhetische Misserfolg verringert die Compliance der Patienten während der postchirurgischen orthodontischen Phase und beeinflusst auch die Kariesprophylaxe negativ. Des Weiteren treten gehäuft Komplikationen wie gingivale Rezessionen und Wurzelresorptionen auf (Baek et al. 2010), die sich zusätzlich negativ auf die Compliance der Patienten auswirken. Aus diesen Gründen ist in den letzten Jahren ein zunehmendes Bedürfnis nach einer Therapie zu verzeichnen, die zu einer sofortigen ästhetischen Verbesserung führt und einen komplikationslosen Ablauf ermöglicht (To et al. 2014).

Bei dem SF-Konzept ist der Verzicht bzw. die maximale Verkürzung der prächirurgischen Phase der kieferorthopädischen Zahnbewegungen die grundlegendste Veränderung. Bei der traditionellen Behandlung von skelettalen Kieferfehlstellungen werden in der prächirurgischen Phase folgende zeitaufwendige orthodontische Zahnbewegungen durchgeführt:

1. Dekompensation der Zähne in Bezug auf die basalen knöchernen Verhältnisse. Dieser Prozess orientiert sich nicht an dem gegenüberliegenden Zahnbogen, wodurch eine vorübergehende Verschlechterung der fazialen Ästhetik sowie eine mastikatorische Beeinträchtigung entstehen.
2. Nivellierung und achsgerechte Einstellung der Zähne sowie die Auflösung von Engständen.
3. Harmonisierung der Zahnbögen.
4. Die Aufhebung von divergierenden Zahnwurzeln bei geplanter interdentaler Osteotomie (Proffit et al. 2003).

Die prächirurgische Phase dauert in Abhängigkeit vom Patienten und vom behandelnden Arzt mindestens sechs Monate. Bis zu einer „idealen“ prächirurgischen Okklusion können aber auch zwei Jahre vergehen (Dowling et al. 1999; Santler 2000; Luther et al. 2003). In einer Studie von Luther et al. (2003) betrug die durchschnittliche Behandlungsdauer in der prächirurgischen Phase 17 Monate, mit individuellen Zeiträumen von sieben bis 47 Monaten. Bei O'Brien et al. (2009) lag die Behandlungsdauer bei durchschnittlich 32,8 Monaten, wobei die präoperative Phase 25,2 Monate in Anspruch nahm. Ponduri et al. (2011) gaben für die gesamte Behandlungsdauer einen Zeitraum von 33,8 Monaten an. In einer norwegischen Studie war die durchschnittliche Behandlungsdauer mit 21,9 Monaten deutlich kürzer, wobei die prächirurgische Phase mit 15,9 Monaten einen Großteil der Zeit in Anspruch nahm (Dowling et al. 1999). Die

Dauer der Behandlung hängt vor allem vom behandelnden Arzt und weniger vom Alter und Geschlecht des Patienten ab (Luther et al. 2003). Auch ethnische Hintergründe könnten Einfluss auf die Divergenz der Behandlungsdauer in den unterschiedlichen Studien haben, was jedoch in weiteren Studie untersucht werden müsste (Arad et al. 2011). Eine mögliche Ursache für die große Schwankungsbreite der Behandlungsdauer könnte die erschwerte Kommunikation zwischen Kieferorthopäden und Chirurgen während der konventionellen modellbasierten Planung sein.

Aus diesen Gründen entstanden ab 1990 Denkansätze, die nicht auf dem traditionellen Dreiphasenmodell beruhen. Eine ausschließliche postchirurgische Zahnbewegung birgt folgende vorteilhafte Charakteristika:

1. Zahnbewegungen erfolgen in der postchirurgischen Phase nicht gegen die Adaptionsmechanismen. Die Zahnbewegungen sind leichter durchzuführen, nachdem die skelettale Phase und die umgebende funktionelle Matrix aus Weichgewebe in eine funktionelle und anatomische Beziehung gebracht worden sind (Brachvogel et al. 1991a).
2. Durch die Verwendung von okklusalen Splinten kann die OP zu jedem Zeitpunkt der Behandlung, auch direkt zu Beginn der Therapie, bei Verzicht auf eine präorthodontische Phase durchgeführt werden (Brachvogel et al. 1991a).
3. Durch die Verwendung von korrekt geplanten OP-Splinten kann die skelettale, intermaxilläre Kieferposition exakt übertragen werden, was wiederum die Voraussetzung für die im Profilbild geplante, optimale Gesichtsästhetik ist (Brachvogel et al. 1991b).
4. Die Voraussetzung für die Durchführung ist eine funktionsstabile Osteosynthese, die mittels am Knochen ansetzender Kräfte gewährleistet ist. In diesem Zusammenhang ist unter Funktionsstabilität eine gleichzeitige Retention und Fixation zu verstehen. Damit kann auf eine langwierige starre Immobilisation verzichtet werden. Durch die verbesserten Möglichkeiten der Osteosynthese kann eine korrekte 3D-skelettale Position von OK und UK eingestellt werden, ohne eine von der Planung abweichende Lagekorrektur vornehmen zu müssen (Brachvogel et al. 1991a).

Als Hauptmotiv für das SF-Konzept tritt somit die Verkürzung der Behandlungsdauer in den Vordergrund. Für die Patienten ist es von großer Bedeutung, dass die Gesichtsästhetik nicht über einen längeren Zeitraum negativ beeinflusst wird. Die frühzeitige Verbesserung von Funktion und Ästhetik wirkt sich positiv auf die Compliance des Patienten aus (Lee 1994). Die Arbeitsgruppe um Tsuroda setzte bereits 2003 das SF-Konzept bei interessanten Patientenfällen erfolgreich um (Tsuroda & Miyamoto 2003). Nagasaka et al. (2009) und Sugawara et al. (2010) ergänzten das SF-Konzept zusätzlich durch ein skelettales Anchorage System (SAS), um die skelettale Verankerung in der postchirurgischen Phase zu gewährleisten. In ihren Fallberichten zeigten sich in der postchirurgischen Phase eine deutlich schnellere und effizientere Dekom-

compensation sowie eine äußerst rasche Verbesserung des Patientenprofils. Außerdem führte das Vorgehen zu einer signifikanten Verkürzung der Gesamtbehandlungsdauer auf zwölf Monate bei einem Patienten mit skelettaler Klasse III (Nagasaka et al. 2009) und auf neun Monate bei einem Patienten mit skelettaler Klasse II (Sugawara et al. 2010). Bei einer missglückten OP oder beim Auftreten eines postoperativen Rezidivs kann das SAS zur Kompensation genutzt werden. Bei der konventionellen Methode ist dies aufgrund der bereits durchgeführten Dekompensation schwerer zu realisieren. Der enorme Zeitgewinn wurde in den letzten Jahren in zahlreichen Studien bestätigt (Liao et al. 2010; Liou et al. 2011a; Liou et al. 2011b). Bei einer Studiengruppe von 33 Patienten mit skelettaler Klasse III und offenem Biss betrug die durchschnittliche Behandlungsdauer bei Patienten ohne SF (n=13) 512 Tage und in der SF-Gruppe (n=20) 342 Tage. In dieser Studie bestanden keine klinisch relevanten Unterschiede in Bezug auf die posttherapeutische faziale Ästhetik, Okklusion und Stabilität zwischen den Methoden. Es konnte jedoch eine klare Verkürzung der Behandlungsdauer seitens der SF-Gruppe beobachtet werden (Liao et al. 2010). In anderen Studien lagen die benötigten Behandlungszeiten bei Verwendung des SF-Konzepts bei neun bis zwölf Monaten (skelettale Klasse II und III Patienten; Baek et al. 2010), bei sieben Monaten (Patientin mit einer skelettalen Klasse III sowie einer ausgeprägten mandibulären Asymmetrie; Villegas et al. 2010b) oder sogar nur bei vier Monaten (Patient mit skelettaler Klasse III; Yu et al. 2010). Die Behandlungsabläufe des SF-Konzepts wurden in verschiedenen Studien ausführlich dokumentiert (skelettale Klasse II und III Patienten: Liou et al. 2011a; Liou et al. 2011a; asymmetrische Behandlungsfälle: Villegas et al. 2010b; bimaxilläre Verfahren: Hernández-Alfaro et al. 2011). Mit Abstand die größte Anzahl von Studien wurde mit Patienten der skelettalen Klasse III veröffentlicht. Bei diesen Patienten zeigte das SF-Konzept besonders gute Resultate im Bezug auf die zeitliche Verkürzung der Behandlungsdauer sowie auf die erfolgreiche Umsetzung der Anliegen der Patienten (Nagasaka et al. 2009; Baek et al. 2010; Ko et al. 2011; Liao et al. 2010; Villegas et al. 2010a; Ko et al. 2011). In Bezug auf die posttherapeutische Stabilität und Rezidivneigung bestehen zwischen SF-Konzept und konventioneller Methode bei Patienten mit skelettaler Klasse III keine signifikanten Unterschiede (Wang et al. 2010).

Obwohl die Reduktion der Behandlungszeit deutlich erkennbar ist, bestehen große individuelle Unterschiede bezüglich der Therapiedauer. Dieser Befund deutet darauf hin, dass neben der verwendeten Methode auch der Schweregrad der dento-alveolären Dysgnathie, die angewandte chirurgische Technik, die postoperativ verwendeten Apparaturen sowie die biologische Resonanz den Verlauf der Therapie beeinflussen. Beim SF-Konzept scheint die biologische Resonanz von großem Nutzen zu sein und zum Zeitgewinn beizutragen. Das „*regional acceleratory phenomenon*“ (RAP) geht von einem erhöhten Knochenstoffwechsel nach einer Osteotomie während der Heilungsphase aus (Frost 1983; Frost 1989a; Frost 1989b). Diese These wird

durch Tierexperimente, in denen eine erhöhte Knochenumbaurate und erhöhte Osteoklastenaktivitäten festgestellt wurden, gestützt (Bogoch et al. 1993a; Bogoch et al. 1993b; Yaffe et al. 1994). Ähnliche Vorgänge konnten bei der selektiven labialen und lingualen Dekortikation des Alveolarknochens, mit dem Ziel, Engstände im UK aufzulösen, beobachtet werden. Das Phänomen wurde als „*accelerated osteogenic orthodontics*“ (AOO) bezeichnet (Wilcko et al. 2001). Auch Hajji (2000) beschreibt nach chirurgischen Eingriffen eine deutliche Abnahme der kortikalen Knochendichte mit einer verstärkten orthodontischen Zahnbewegung und einer deutlichen Reduzierung der Behandlungszeit. Zahlreiche ähnliche Befunde bestätigen die erhöhte orthodontische Beweglichkeit der Zähne nach chirurgischen Eingriffen. Bei dem „*monocortical tooth dislocation and ligament distraction*“- (MTDLD)-Verfahren, bei dem ebenfalls microchirurgische Osteotomien an den zu bewegenden Zähnen durchgeführt werden, kommt es zu einer Reduktion der Behandlungszeit von 60 bis 70%. Dabei spielt neben der Verringerung des kortikalen Widerstandes und damit dem erhöhten Zug auf das Parodont auch das RAP eine wichtige Rolle (Vercellotti & Podesta 2007). Die molekularen Mechanismen des RAP bzw. AOO sind derzeit noch nicht geklärt. In Fallstudien konnten verschiedene Marker (alkalische Phosphatase, C-terminales Telopeptid des Typ I Kollagens (ICTP)) für einen post-operativ erhöhten Knochenstoffwechsel nachgewiesen werden. Dieses Phänomen wurde von der ersten Woche bis drei Monate nach der OP beobachtet. Im Verlauf des vierten Monats stabilisierten sich die Werte auf dem Ausgangsniveau. Es bestand ein direkter Zusammenhang zwischen dem Ausmaß der Zahnbewegung und der Höhe der ICTP-Spiegel, nicht aber zwischen Zahnbewegung und alkalischer Phosphatase (Liou et al. 2011a; Liou et al. 2011b).

Trotz der klaren Vorteile des SF-Konzepts ist eine vorsichtige Patientenauswahl, eine detaillierte Behandlungsplanung und eine ständige Kommunikation zwischen Kieferorthopäden und Chirurgen unerlässlich (Hernández-Alfaro et al. 2011). Folgende Patienten sind für eine SF-Therapie geeignet (Liou et al. 2011a; Liou et al. 2011b):

1. Patienten mit gut ausgerichteten Frontzähnen bis hin zu einem mittleren Engstand in der Front.
2. Patienten mit flach bis mittelstark ausgeprägten Speekurven.
3. Patienten mit normalen bis mittelstark pro- bzw. retroinklinierten Frontzähnen.

Kontraindikationen für eine SF-Therapie sind stark ausgeprägte Engstände, die einer Extraktion bedürfen, sowie Klasse II/2 Okklusionen mit frontalem Überbiss. Fälle, die eine chirurgisch unterstützte Gaumennahterweiterung erfordern, um ein transversales Missverhältnis auszugleichen, sowie schwere Asymmetrien stellen komplexe Szenarien für die SF-Planung dar und sind daher als problematisch anzusehen. Beachtet werden sollte, dass die Therapie von komplexen Dysgnathien mittels SF-Konzept nur mit ausreichender Erfahrung realisierbar ist. Klinische Beispiele belegen aber, dass erfahrene Ärzte mit Hilfe von SF komplexere Szenarien un-

ter Verwendung einer skelettalen Verankerung mittels Miniplatten und Minischrauben erfolgreich bewältigen können. Temporomandibuläre Dysfunktionen und unkontrollierte parodontale Symptomatiken stellen absolute Kontraindikationen dar, weil in der postoperativen Phase eine stabile Okklusion sowie kontrollierte Zahnbewegungen nicht gewährleistet werden können (Hernández-Alfaro et al. 2014). Die Anforderungen an die Planung sowie das orthodontische Management sind bei dem SF-Konzept als besonders kompliziert einzustufen. Der erfahrene Kieferorthopäde muss bei bestehenden skelettalen Missverhältnissen bereits während der Planung die orthodontischen Möglichkeiten sowie die Limitationen erkennen (Sharma et al. 2015). Da zu Beginn der Therapie keine Okklusion vorhanden ist, kann sie nicht als Grundlage für die Umsetzung der Behandlungsziele genutzt werden. Daher ist eine exakte 3D-Planung durch einen erfahrenen Kieferorthopäden unerlässlich (Hsu et al. 2012). Auch die nach der OP entstandene instabile Okklusion stellt eine große Herausforderung für den Kieferorthopäden dar und setzt den raschen Beginn der postorthodontischen Phase voraus. Erfahrungen des Kieferorthopäden mit sekundären Verankerungen mittels Minischrauben und Miniplatten sind wichtig, um orthodontische Kräfte forciert anzuwenden sowie mögliche chirurgische Misserfolge zu kompensieren (Nagasaka et al. 2009; Sugawara et al. 2010).

Zusammengefasst beruht die Zeitersparnis beim SF-Konzept auf der Eliminierung der prächirurgischen Phase und dem postoperativ wirkenden RAP. Behandlungszeiten von einem bis 1,5 Jahren (konventionelle Methode sieben bis 47 Monate) oder weniger scheinen für die standardmäßige Anwendung des SF-Konzeptes vielversprechend (siehe Tabelle 1). Zusätzlich ist die Verbesserung der fazialen Ästhetik und die der dentalen Funktion bereits zu Beginn der Therapie vorteilhaft für den weiteren Verlauf sowie für die Mitarbeit des Patienten (Lee 1994; Liou et al. 2011a). Zu beachten ist, dass derzeit der Großteil der Studien, welche die Behandlungsdauer von SF evaluieren, auf einer modellbasierten Planung beruht. Die wenigen Studien, die sich auf eine virtuelle Planung und Umsetzung von SF beziehen, werden in 1.3 betrachtet.



**Tabelle 1: Tabellarische Gegenüberstellung von Behandlungszeiten von konventionell an Gipsmodellen durchgeführten OPs mit SF und ohne SF/VSF**

Abkürzungen: OK = Oberkiefer, SF = Surgery First; UK = Unterkiefer; VSF = Virtuell Surgery First

Autor (Jahr)	Patientenanzahl (n)	prächirurgische Phase (Monate)	postchirurgische Phase (Monate)	Behandlungsdauer (Monate)
Konventionelle Modelloperation ohne SF				
Dowling et al. (1999)	315	15,4	5,9	21,9
Luther et al. 2003	65	17 (7–47)	-	-
O'Brien et al. 2009	71	25,2	6,8	32,8
Ponduri et al. (2011)	20	-	-	33,8 (14-57)
Arad et al. (2011)	63	-	-	30,6 monomaxillär OK: 25,44 monomaxillär UK: 32,4 bimaxillär: 30,36
Durchschnitt:				29,78
Konventionelle Modelloperation mit SF				
Nagasaka et al. 2009	1	-	12	12
Sugawara et al. 2010	1	-	9	9
Liao et al. 2010	20	-	11,24	11,24
Villegas et al. 2010b	1	-	7	7
Yu et al. 2010	1	-	4	4
Durchschnitt				8,65
Virtuell geplante Operation mit SF-VSF				
Hernández-Alfaro et al. (2011)	2	-	-	7,65
Hernández-Alfaro & Guijarro-Martínez (2013)	45	-	-	8,69
Durchschnitt:				8,17

### 1.3 Virtuelle chirurgische Planung bei skelettalen Kieferfehlstellungen

Aufgrund der auftretenden Probleme bei einer konventionell auf Gipsmodellen basierenden Planung in Bezug auf die Genauigkeit und 3D-Darstellung ist derzeit ein Paradigmenwechsel hin zu virtuellen Planungskonzepten (*computer-aided surgical simulation (CASS)*) zu beobachten. In den 1980er Jahren wurden digitale 3D bildgebende Techniken mit dem Ziel eingeführt, die Trias aus Hartgewebe, knöchernen Anteilen des Gesichtsschädels und Zahnbögen sowie das umliegende Weichgewebe virtuell darzustellen. Dabei spielt neben den digitalen bildgebenden Verfahren (CT, DVT, Magnetresonanztomografie (MRT)) die Rekonstruktion von DICOM-Datensätzen (*Digital Imaging and Communications in Medicine*) eine entscheidende Rol-

le (Plooij et al. 2011). Alle 3D-Röntgenbilder werden in diesem DICOM-Format verarbeitet. Als offener Standard eignet sich DICOM gut für den Austausch von Informationen in der Medizin.

Burk führte erstmals eine Software ein, mit der neben der Darstellung und Analyse des Gesichtsschädels auch eine Planung der OPs möglich war (Burk et al. 1986). Die sprunghafte technische Weiterentwicklung in den 2000er Jahren führte zu neuen und verbesserten Software-Programmen (Everett et al. 2000; Schutyser et al. 2000; Zachow et al. 2001). Moderne Techniken mit geringer Strahlenbelastung wie die DVT spielten eine herausragende Rolle bei der Entwicklung von Planungskonzepten mittels 3D-Datensätzen. Die DICOM-Datensätze ermöglichten die virtuelle Planung in verschiedenen Ausführungen sowie eine verbesserte Kommunikation zwischen Kieferorthopäden und Chirurgen. Durch die Verwendung der 3D-Diagnostik kombiniert mit einer 3D-Planungssoftware für Chirurgie ließen sich Fehlerquellen in Bezug auf Materialien, technische Prozesse und Gerätschaften sowie manuelle Fehler verringern (Mah & Bumann 2001).

Die Vorteile bei der virtuellen Planung und Umsetzung von OPs sind groß (Hernández-Alfaro & Guijarro-Martínez 2013):

1. Der behandelnde Arzt bekommt mehr und qualitativ höherwertige Informationen über die anatomischen Verhältnisse. Dies ermöglicht über simple Korrekturen hinaus eine 3D-Harmonisierung der fazialen Ästhetik.
2. Anders als bei der konventionellen Methode können mit Software-Programmen viele verschiedene Planungsmodelle virtuell erstellt und miteinander verglichen werden.
3. Die Planung lässt sich durch die Verwendung von *computer aided design/computer aided manufacturing*-(CAD/CAM)-Verfahren schnell und exakt in den OP-Raum übertragen (Gateno et al. 2003c; Aboul-Hosn Centenero & Hernández-Alfaro 2012).
4. Die virtuelle Planung von OPs vereinfacht die Kommunikation unter Kollegen, die Durchführung von Lehrveranstaltungen und durch die animierte Darstellung die Patientenaufklärung zur geplanten Therapie.
5. Bei der Verwendung von „*voxel based rigid registration*“ und Überlagerung an 3D-Referenzsystemen wird eine Evaluation der Behandlungsergebnisse möglich, die wissenschaftlich genutzt werden kann (Cevidane et al. 2005; Cevidane et al. 2006).

Dennoch treten mit der steigenden Technisierung auch eine ganze Reihe neuer Probleme auf. Zu den grundlegendsten Problemen zählt, dass derzeit kein 3D-Verfahren in der Lage ist, die Trias aus Hartgewebe (Zähne und Knochen) und Weichgewebe mit einem einzigem Scan in einer für die virtuelle Planung und chirurgische Umsetzung ausreichenden Qualität zu erfassen (Swennen et al. 2009a; Gateno et al. 2003b; Nkenke et al. 2004; Ayoub et al. 2007; Swennen et al. 2009b; Xia et al. 2009; Plooij et al. 2011). Trotz der ausgezeichneten Darstellung von

knöchernen Strukturen sind CT und DVT nicht imstande, die dentalen Strukturen für die Herstellung von OP-Splinten im CAD/CAM-Verfahren ausreichend präzise zu erfassen (Santler et al. 1998; Gateno et al. 2007; Plooij et al. 2011). Bei metallischen Brackets sowie bei Restaurationen treten besonders bei der CT verstärkt Verzerrungen auf (Nkenke et al. 2004). Aufgrund dieses Problems musste lange Zeit auf das konventionelle gipsmodellbasierte Verfahren bei der Splintherstellung zurückgegriffen werden (Xia et al. 2000a; Xia et al. 2000b). Zu Beginn der Entwicklung arbeiteten verschiedene Forschungsgruppen an der virtuellen computergestützten Integration von Gipsmodellen in physische Schädelmodelle (Kärcher 1992; Lambrecht et al. 1995; Mozzo et al. 1998; Santler et al. 1998; Terai et al. 1999; Santler 2000). Dabei entstanden erstmals Schädelmodelle, in denen sowohl die knöchernen als auch die dentalen Strukturen exakt dargestellt wurden. Allerdings konnten an diesen Modellen keine virtuellen OPs durchgeführt werden. Trotz eines hohen technischen Aufwands ergab sich ein vergleichsweise geringer Nutzen für das eigentliche Hauptanliegen der virtuellen Planung. Außerdem wurde das Weichgewebe als wichtige Komponente für die ästhetische Planung des Gesichtsprofils nicht erfasst. In den letzten Jahren gab es daher verstärkte Forschungsbestrebungen, eine klinisch geeignete Methode zu entwickeln, Datensätze, die exakte Informationen zu den dentalen Strukturen enthalten, mit Datensätzen aus CT/DVT, die Informationen zu knöchernen Strukturen und Weichgewebe liefern, zu fusionieren. Ziel ist die Schaffung eines visualisierbaren Datensatzes („*image fusion model*“), welcher alle darzustellenden Strukturen enthält, dessen Grundlagen jedoch auf mindestens zwei verschiedene Datensätze aus zwei verschiedenen bildgebenden Techniken zurückzuführen sind. Derzeit kann man zwischen drei unterschiedlichen 3D-Techniken für die Rekonstruktion des Gesichtsschädels wählen:

1. Computertomografie (CT)
2. Dentale Volumetomografie (DVT)
3. Magnetresonanztomografie (MRT)

1. Die CT wurde um 1968 von dem englischen Elektroingenieur Sir Godfrey N. Hounsfield entwickelt und erfasst mittels fächerförmiger 2D-Röntgenstrahlenbündel den Schädel in mehreren Umläufen in einer Schichtabtastung mit verschiedenen 1D-dimensionalen Sensoren. Pro Winkelgrad einer Umrundung werden zwei bis vier Messungen erfasst. Aus allen elektrischen Signalen jeder Umrundung wird ein 2D-Schichtbild erstellt, aus dem wiederum der 3D-Datensatz rechnerisch zusammengefügt werden kann. Für eine exakte Abbildung des Schädels sind hohe effektive Strahlendosen notwendig, die die Dosen bei 2D-Röntgenaufnahmen und bei DVT-Analysen deutlich überschreiten (Monsour & Dudhia 2008). Bei den Aufnahmen entstehen Artefakte vor allem durch Restaurationen und Brackets. Aufgrund der Konstruktion von CT-Geräten befindet sich der Patient in einer horizontalen Position, was wiederum die Erfassung

der Weichgewebe in natürlicher Erscheinung behindert (Plooij et al. 2011). Zudem stellt der konstruktionsbedingte hohe Kostenaufwand dieser Geräte einen weiteren Nachteil dar.

2. 1997 wurde das „NewTom DVT 9000“ eingeführt. Im Unterschied zum CT benötigt ein DVT-Gerät bei der Erstellung eines 3D-Datensatzes nur einen Umlauf mit Hilfe eines kegelförmigen Strahlenbündels (engl. *Cone-Beam Computed Tomography*, CBCT) zur Schichtabtastung. Der Strahl wird über einen flächigen CCD-Empfängersensor (*Charge-coupled Device*) als 2D-Parallelprojektion erfasst (Mozzo et al. 1998). Die anschließende computergestützte 3D-Rekonstruktion bietet eine ausgezeichnete Bildqualität für knöcherne und dentale Hartgewebsstrukturen vor allem im Bereich der vorderen Schädelbasis, der oberen Atemwege sowie der Nase- und Nasennebenhöhlen (Bremke et al. 2009; Guijarro-Martínez & Swennen 2011).

Die effektive Strahlendosis von DVT-Geräten ist abhängig vom „*Field of View*“ (FOV), von der Röntgenröhrenspannung, vom Röntgenröhrenstrom und vom Gerät (Silva et al. 2008). Durch Variation des FOV in Höhe und Durchmesser kann das DVT lokal für stomatognathe oder auch für kraniofaziale und dentoalveoläre Behandlungsplanungen genutzt werden. Viele Studien belegen, dass DVT-Geräte effektive Strahlendosen von unter  $100\mu\text{Sv}$  erzielen (Ludlow & Ivanovic 2008; Loubele et al. 2009; Roberts et al. 2009; Grünheid et al. 2012; Pauwels et al. 2012; Ludlow 2014).

Pauwels et al. (2012) detektierten bei zwölf von 14 DVT-Geräten, unabhängig von der Größe des FOV, Werte unter  $100\mu\text{Sv}$ . Grünheid et al. (2012) evaluierten für das DVT-Gerät i-CAT „new generation“ für ein mittleres FOV eine effektive Dosis von  $46\text{--}69\mu\text{Sv}$  und für ein sehr großes FOV  $127\text{--}131\mu\text{Sv}$ . Die effektive Strahlendosis von DVT-Geräten liegt im Vergleich zu CT-Geräten um einen Faktor 2–4 niedriger. Darüber hinaus ist auch die Expositionszeit bei vergleichbarer Detailauflösung wesentlich kürzer (Loubele et al. 2009; Schulze et al. 2014) und die Artefaktbildung im Bereich der Okklusionsebene aber auch in den umliegenden Strukturen geringer (Mah et al. 2003; Huang et al. 2005; Tsiklakis et al. 2005). Anders als CT-Geräte lassen DVT-Geräte den Scan-Vorgang bei neutraler Kopfhaltung (NHP) zu, wodurch das Weichgewebe in natürlicher Erscheinung erfasst werden kann (Plooij et al. 2011).

3. Der Vollständigkeit halber wird hier auch die MRT für die Rekonstruktion des Schädels aufgeführt. Diese Technik bietet den Vorteil, Gewebe ohne die Verwendung von Röntgenstrahlen oder anderen ionisierenden Strahlen darstellen zu können. Dabei bilden derzeitige Geräte das Weichgewebe in guter Qualität ab, nicht aber die für kieferorthopädische und chirurgische Vorhaben benötigten Hartgewebe (Chirani et al. 2004).

Für eine exakte Erfassung der dentalen Strukturen existieren derzeit vier unterschiedliche Techniken:

1. Die Digitalisierung von Gipsmodellen mittels DVT/CT (Schutyser et al. 2005), Laser-Scanner (Braumann et al. 2002) oder über einen Raster-Scan mit Moiré-Effekt (Kawai et al. 1990) zeichnen sich durch eine geringe Artefaktbildung aus, setzen jedoch einen Abdruck der Zahnbögen sowie deren Abguss voraus (Nkenke et al. 2004). Dadurch entstehen weitere Arbeitsschritte sowie neue mögliche Fehlerquellen. Ein Vorteil dieser Methode ist die lediglich einmal notwendige Strahlenexposition für den Patienten.
2. Mit einem DVT-Scan lassen sich über DICOM-Datensätze die dentalen Strukturen aus einzelnen tomografischen Schichtbildern errechnen (Schutyser et al. 2005). CT-Scans sind aufgrund durch metallische Restaurationen und Brackets entstehende Artefakte und aufgrund der durch Kunststoffrestaurationen abgebildeten Graustufen, die den Weichteilen ähnlich sind, weniger geeignet. Die Entstehung von Artefakten bleibt jedoch auch bei DVT-Scans zu groß für eine ausreichende Detailwiedergabe der dentalen Strukturen, um daraus CAD/CAM generierte OP-Splinte zu fertigen (Plooiij et al. 2011).
3. Mit einem DVT/CT-Scan der dentalen Impressionen eines Bissregistrats lassen sich Zahnbögen exakt erfassen. Das dabei entstehende digitale dentale Modell enthält die Zahnbögen von OK und UK bereits in korrekter Relation (Rangel et al. 2012).
4. Zahnbögen können auch über intraorale digitale Scanner erfasst werden (Hernández-Alfaro et al. 2014). Trotz der schnellen Weiterentwicklung dieser Technik fehlen derzeit noch ausführliche klinische Studien zur virtuellen Planung von chirurgischen Vorhaben. Die hohen Anschaffungskosten dieser Technik sind möglicherweise die Ursache für die derzeit noch fehlende Verbreitung.

Nach der Rekonstruktion der DVT/CT-Scans des Schädels und der Digitalisierung der dentalen Strukturen erfolgt ein komplizierter Fusionsprozess beider Datensätze mit dem Ziel, die Qualität der Zahnbögen zu verbessern. Die Möglichkeit einer exakten virtuellen Planung und Simulation rechtfertigt die teilweise entstehende erhöhte Strahlenexposition des Patienten und die längere Bearbeitungsphase der Datensätze am Computer. Bei der Fusion der Daten gibt es drei grundlegende Techniken, die digitalisierten dentalen Strukturen in die exakte Position innerhalb des Datensatzes des Gesichtsschädels zu überführen (Plooiij et al. 2011):

1. Point-based registration
2. Surface-based registration
3. Voxel-based registration

1. Bei der sogenannten „*Point-based registration*“ stammen die Datensätze einerseits von einem CT/DVT-Scan des Patienten und ein weiterer von einem CT/DVT-Scan von Gipsmodellen oder Abformungen. Somit beruht die Technik auf einem doppelten Scan-Verfahren, welches sich für die Fusion über spezielle Marker als Bindeglied für die Registrierung zunutze macht. Diese Marker sind in der Regel sphärische Strukturen aus Metall, die in einen speziellen Tray integriert sind, welcher den Biss registriert, integriert. Durch schrittweise Annäherung und punktgenaue Platzierung der Datensätze über die Marker mittels Rotation und Translation (*point based iterative closest point* (ICP) registration) werden die Datensätze übereinandergelegt, bis sie eine deckungsgleiche Oberfläche bilden (Gateno et al. 2003a; Gateno et al. 2003b; Schutyser et al. 2005; Uechi et al. 2006; Gateno et al. 2007; Xia et al. 2009; Villegas et al. 2010b). Die Methode zeichnet sich durch ihre Exaktheit aus, ist jedoch aufgrund des Registrats zeitaufwendig und techniksensibel. Nachteile dieser Methode waren, dass die sphärischen Marker außerhalb des Mundes lokalisiert wurden und damit über die verfälschte Lippenhaltung keine verlässliche Beurteilbarkeit der Weichgewebe und somit keine genaue Planung der faszialen Ästhetik des Patienten gewährleisten werden konnten (Swennen et al. 2009a; Rangel et al. 2012).
2. Bei der „*Surface-based registration*“-Methode wird in ein virtuelles Schädelmodell generiert aus einem DVT/CT-Datensatz ein STL-Datensatz integriert, der wiederum aus einem optischen Laser-Scan der Oberfläche eines Modells/Abformung generiert wird. Die exakte Fusion der Daten richtet sich nach der Oberfläche der dentalen Strukturen. Vorteilhaft sind die Exaktheit der Methode und die deutliche Reduzierung von Artefakten an metallischen Restaurationen (Nkenke et al. 2004). In einem *in vitro/in vitro*-Protokoll evaluierten Hernández-Alfaro & Guijarro-Martínez (2013) die „*Surface-based registration*“-Methode unter Verwendung eines intraoralen Oberflächen-Scan (Lava Scan ST Scanner (3M ESPE, Ann Arbor, MI, USA)). Nach anschließender Überlagerung des 3D-DVT-Scans des Schädels mit dem STL-Files des Oberflächen-Scans im Programm SimPlant Pro OMS Software (Materialise Dental, Leuven, Belgien) wurde mit Hilfe der gleichen Software die Chirurgie virtuell geplant und im Anschluss die OP-Splinte im CAD/CAM-Verfahren hergestellt. Bei der Fehlerberechnung zwischen der virtuell simulierten intermaxillären Position und der intraoperativen intermaxillären Position zeigten sich kaum Abweichungen. Das Protokoll bietet die Möglichkeit einer exakten virtuell geplanten Chirurgie mit CAD/CAM-Splinterstellung ohne Entnahme der dentalen Impressionen und damit unter Ausschluss einer weiteren Fehlerquelle. Zusätzlich erleichtert das Vorgehen den computergestützten Planungsprozess und minimiert die Strahlenbelastung des Patienten (Hernández-Alfaro & Guijarro-Martínez 2013).

3. Ähnliche Methoden, die mit Hilfe von Scan-Vorgängen an konventionellen Gipsmodellen ablaufen, werden von verschiedenen Autoren beschrieben (Uechi et al. 2006; Metzger et al. 2008; Xia et al. 2009; Noh et al. 2011).
4. Die „*Voxel-based registration*“ basiert auf einer Fusion von Datensätzen aus DVT-Scans mittels eines Algorithmus, der sich an unterschiedlichen Graustufen der Scans orientiert. Auf der Grundlage eines dreifachen DVT-Scanverfahrens konnten dentale Strukturen exakt integriert werden. Der erste DVT-Scan wurde in NHP mit zentraler Okklusion sowie entspannten Lippen aufgenommen. Danach wurde der Patient mit einem speziellen Bissregistrator (triple tray; Alginate Kerr USA, Orange, CA, USA), der die dentalen Impressionen erfasst, gescannt. Der dritte DVT-Scan wurde am Bissregistrator allein durchgeführt. Der zweite Scan hatte eine geringere Auflösung und ein kleineres FOV, um die Strahlenexposition für den Patienten so gering wie möglich zu halten. Der mit den Impressionen gescannte Tray wurde über einen „*Voxel-based rigid registration*“-Algorithmus in den DVT-Scan des Patienten integriert. Das Verfahren wurde ohne Marker und ohne Verwendung von Gipsmodellen umgesetzt. Zusätzlich konnte eine Verzerrung der facialen Weichgewebe ausgeschlossen werden (Swennen et al. 2009a). Nachteilig bei dieser Methode ist die Strahlenbelastung aufgrund des doppelten DVT-Scans. Des Weiteren ist der dreifache Scan zeitaufwendig und die Voxel-basierte Registrierung der Daten kompliziert (Rangel et al. 2012). Die exakte Umsetzung ist von der Compliance des Patienten während der Scan-Vorgänge und der Bissregistrierung abhängig. Die Reduzierung der Scan-Zeiten kann dazu beitragen, Fehler durch Bewegungen des Patienten bei den Scan-Vorgängen zu verringern (Hernández-Alfaro & Guisjarro-Martínez 2013).

Basierend auf diesen grundlegenden Methoden wurden weitere Verfahren veröffentlicht, mit dem Ziel, den klinischen Alltag zu erleichtern. Fleming et al. (2011) zeigten, dass auch digitalisierte Abdrücke die Dentition exakt und reproduzierbar wiedergeben. Obwohl auf eine Modellherstellung verzichtet werden konnte, bestand die Abformung als mögliche Fehlerquelle weiterhin. Rangel et al. (2012) stellten eine Methode vor, die Titanium-Marker sowie einen Abdruck-Scan verwendet. Im Unterschied zu der bei Gateno et al. 2003 beschriebenen Methode wurden die Titanium-Marker (1×2×1,5mm) auf der Gingiva mit einem N-Butyl 2-Cyanoacrylate-Gewebekleber befestigt. Durch die kleinen Baumaße und die intraorale Fixation konnten die Weichgewebe anders als bei Gateno et al. 2003 in einer natürlichen Haltung wiedergegeben werden. Nach einem hochauflösenden DVT-Scan wurden mit einer Abformung die dentalen Impressionen entnommen, wobei die umflossenen Titanium-Marker mit dem Abdruck entfernt wurden. Daraufhin wurde der Abdruck über einen weiteren CT-Scan mitsamt der Marker erfasst. Nach einem komplexen Matching-Prozedere aus „*Voxel-based registration*“ und „*Point-*

*based registration*“ ergaben sich sehr geringe Abweichungen der Impressionen vom Schädelmodell im inzisalen und okklusalen Bereich von 0,1mm bis 0,2mm. Zur Evaluation der Reproduzierbarkeit dieser Methode fehlen derzeit weitere klinische Fälle (Rangel et al. 2012). Für den klinischen Alltag scheint die Methode zu aufwendig.

Eines der umfangreichsten und bestprotokollierten Konzepte der CASS wurde von einer Gruppe von Wissenschaftlern um James Xia und Jamie Gateno entwickelt. Sie gelten daher als Pioniere der virtuellen Planung kombinierter kieferorthopädisch-kieferchirurgischer Vorhaben. In einer Studie erwies sich die CASS-Methode - insbesondere bei schweren oder asymmetrischen Dysgnathien bezüglich der skelettalen Harmonie von Maxilla und Mandibula - den konventionellen Methoden als signifikant überlegen (Xia et al. 2011b). In verschiedenen Modellen konnte die Präzision der CASS nachgewiesen werden:

- *in vitro* Schädelmodelle aus Kunststoff (Gateno et al. 2003b)
- Computer-generierte OP-Splinte (Gateno et al. 2003c)
- Erfassung und Transfer der NHP (Xia et al. 2011a)
- klinische Umsetzung (Xia et al. 2007)
- Planung nach chirurgischer Umsetzung (Hsu et al. 2013)

Die Verwendung von CASS in Kombination mit der Software SimPlant Pro OMS 10.1 (Materialise, Leuven, Belgien) erlaubt die Fertigung von OP-Splinten mit CAD/CAM sowie eine Voraussage des Ergebnisses in Bezug auf die postoperative Lage der Knochenstrukturen. In einer Studie erwiesen sich die über CAD/CAM hergestellten OP-Splinte den konventionell gefertigten Splinten als überlegen. Außerdem konnte eine hohe Übereinstimmung der CAD/CAM-gefertigten Splinte im OP-Raum nachgewiesen werden. Damit erweist sich das Verfahren als valide und reliable Technik zur Splintherstellung (Aboul-Hosn Centenero & Hernández-Alfaro 2012). Die Prognose der postoperativen Situation des Weichgewebes ist dagegen weniger exakt. Software-Programme wie Simplant OMS verfügen über einen Algorithmus für die Vorhersage von Fett, Muskulatur und Bindegewebe, die sich jedoch nicht immer als verlässlich erweist. Eine mögliche Ursache ist die große Variabilität des Verhaltens von Weichgewebe, das durch Schwellungen, durch den Muskeltonus sowie durch das chirurgische Vorgehen beeinflusst wird.

#### **1.4 Konzept „Virtual Surgery First“ (VSF)**

Das Ziel des VSF-Konzeptes ist es, die zahlreichen Vorteile des SF-Konzeptes (siehe Kapitel 1.2) mit denen der computergestützten Planung einschließlich CAD/CAM-generierter OP-Splinte (siehe Kapitel 1.3) in einem Konzept zu vereinen. Nach der theoretischen Entwicklung des SF-Konzeptes (Behrman & Behrman 1988; Koole & Egyedi 1990; Brachvogel 1991a;



Brachvogel et al. 1991b) beschäftigten sich spätere Veröffentlichungen meist mit dem Zeitgewinn durch die Anwendung des SF-Konzepts auf der Basis konventioneller modellbasierter Planungsmethoden. Kritisch anzumerken bleibt, dass die Studien nur mit begrenzten Fallzahlen ( $n \leq 20$ ) und teilweise streng selektiertem Patientengut durchgeführt wurden (Nagasaka et al. 2009; Sugawara et al. 2010; Liao et al. 2010; Villegas et al. 2010b; Yu et al. 2010). Umfassende Studien über den qualitativen Behandlungserfolg von SF- oder VSF-Konzepten wurden bisher nicht veröffentlicht. Zur Evaluation der Konzepte bedarf es aufgrund der Vielfalt und Komplexität der Behandlungssituationen zukünftig Studien mit größeren Fallzahlen und validierten Untersuchungsinstrumenten.

Zahlreiche Studien belegen die Präzision und Reproduzierbarkeit des seit einigen Jahren bei Patienten mit skelettalen Kieferfehlstellungen erprobten CASS-Konzepts in Kombination mit der Überführung dieser Planung mittels CAD/CAM-generierten OP-Splinten (Xia et al. 1999; Xia et al. 2000a; Xia et al. 2000b; Santler 2000; Gateno et al. 2003a; Gateno et al. 2003b; Gateno et al. 2003c; Nkenke et al. 2004; Cevidanes et al. 2005; Schutyser et al. 2005; Xia et al. 2005; Uechi et al. 2006; Ayoub et al. 2007; Gateno et al. 2007; Swennen et al. 2007; Xia et al. 2007; Swennen et al. 2009a; Swennen et al. 2009b; Xia et al. 2009; Villegas et al. 2010b; Gateno et al. 2011a; Gateno et al. 2011b; Guijarro-Martínez & Swennen 2011; Hernández-Alfaro et al. 2011; Moos & Ayoub 2011; Plooij et al. 2011; Xia et al. 2011a; Xia et al. 2011b; Aboul-Hosn Centenero & Hernández-Alfaro 2012; Hsu et al. 2012; Rangel et al. 2012; Hernández-Alfaro & Guijarro-Martínez 2013; Hernández-Alfaro et al. 2014). Aufgrund der zahlreichen Vorteile des CASS-Konzeptes gegenüber der konventionellen modellbasierten Planungsmethode ist die Weiterentwicklung und Einführung dieser Methode in den klinischen Alltag geboten. Dabei spielt der über DVT generierte 3D-Datensatz eine zentrale Rolle für die diagnostische Datenerhebung.

Durch den Verzicht auf frontales und laterales 2D-cephalometrisches Bildmaterial werden Überlagerungen und Projektionsfehler vermieden, die bei komplexen asymmetrischen Fällen zu Fehlinterpretationen und zwangsläufig zu Fehlern in der Planung führen (Troulis et al. 2002; Huang et al. 2005; Xia et al. 2007; Gateno et al. 2007; Villegas et al. 2010b). Durch 2D-Bildmaterial lassen sich die unbedingt notwendigen Referenzpunkte wie Porion und Condylare nicht exakt bestimmen (Adenwalla et al. 1988). Auch durch den Verzicht einer modellbasierten OP-Planung können weitere Fehlerquellen vermieden werden. Bei der CASS sind weder eine Modellherstellung, eine Kieferrelationsbestimmung mittels Gesichtsbogen noch am Gipsmodell simulierte Osteotomien notwendig. Stattdessen legt der Kieferorthopäde auf der Basis exakter anatomischer Informationen virtuell die Richtung und den Betrag der Osteotomien fest. Dabei ist es möglich, die Zahnbogenform im Verhältnis zu der Kieferbasis zu analysieren. Dieser diagnostische Vorteil spielt vor allem bei der Dehnung von Zahnbögen bei bestehenden Engstän-

den und transversalen Defiziten eine entscheidende Rolle. Vor der Festlegung der Osteotomie steht die exakte anatomische Information über das peridentale Knochenangebot zur Verfügung, wodurch unerwartete Perforationen und Wurzelresorptionen vor allem bei geplanten Expansionen und Protrusionen vermieden werden können. Auch bei einem geplanten Lückenschluss können die präzisen Daten über das vertikale und transversale Knochenangebot im Bereich der Lücke genutzt werden, um Gingivarezessionen vorzubeugen (Bumann et al. 2009). Mit Hilfe der Software für die virtuelle Planung der Osteotomien werden auch Knochenüberlagerungen zwischen den Segmenten angezeigt, sodass eine Planänderung während der OP aufgrund solcher Überschneidungen ausgeschlossen werden kann (Santler 2000; Gateno et al. 2003c). Studien zum SF-Konzept empfehlen eine skelettale Verankerung, um forciert kieferorthopädische Kräfte ausüben und mögliche postchirurgische Misserfolge kompensieren zu können (Nagasaka et al. 2009; Sugawara et al. 2010). Die DVT ist bei der exakten Positionierung von Verankerungspins und Implantaten für skelettale Verankerungen hilfreich. Für den Erfolg von Verankerungspins sollte ein gewisser Abstand zu Zahnwurzeln eingehalten werden (Kuroda 2007). Bei der Verwendung von Verankerungspins ist auch die individuelle Dicke von Knochenstrukturen im Gaumen zu beachten, um Knochenperforationen, Schädigungen der Wurzelspitzen von Frontzähnen sowie eine Verletzung des Nervus palatinus zu vermeiden (Baumgaertel et al. 2008; Baumgaertel & Hans 2009). Neben der exakten Darstellung der anatomischen Verhältnisse von knöchernen und dentalen Strukturen erlaubt eine CASS unter Verwendung von DVT-Daten auch die Beurteilung von Weichgewebe, sodass Aussagen über das Gesichtprofil des Patienten getroffen werden können. Diese Kompetenz ist vor allem bei einer umfangreichen bimaxillären Vorgehensweise von immenser Bedeutung. Die CASS ist nicht nur für die Planung von Osteotomien äußerst hilfreich, sondern erleichtert auch die Kommunikation zwischen Patient und behandelndem Arzt. Plooij et al. (2011) bezeichnen die Vorhersage des Gesichtspröfils mit Hilfe von DVT-Scans und CASS sowie die Integration von dentalen Strukturen als derzeitigen Goldstandard. Insbesondere erweist sich die NHP während des Scanvorgangs als vorteilhaft. Nichtsdestotrotz ist derzeit die Vorhersage des Gesichtspröfils noch unzuverlässig, da DVT-Scans zwar die exakte Oberflächenstruktur des Gesichtspröfils des Patienten, nicht jedoch die individuelle Zusammensetzung des Weichgewebes und die exakte Struktur der Gesichtshaut erfassen. Hinzu kommt, dass derzeit die Algorithmen der Software-Programme für exakte Aussagen nicht ausreichen und sich das Weichgewebe und die Oberflächenstruktur der Haut postchirurgisch sehr individuell verhalten (Plooij et al. 2011).

CASS bietet anders als die konventionelle Methode die Möglichkeit der Ausführung verschiedener Planungsoptionen und erleichtert die Kommunikation zwischen Kieferorthopäden und Chirurgen. Zusammengefasst erlaubt CASS, die vom Kieferorthopäden erstellte Planung über

CAD/CAM-gefertigte OP-Splinte exakt in den OP-Raum zu übertragen (Aboul-Hosn Centenero & Hernández-Alfaro 2012).

Bei der Umsetzung des VSF-Konzeptes für Patienten mit skelettalen Dysgnathien sollen die Vorteile der exakten Planung durch CASS mit den Vorteilen des SF-Konzeptes kombiniert werden. Dabei gilt es, komplexe asymmetrische Behandlungssituationen in deutlich kürzerer Behandlungsdauer zu bewältigen.

Derzeit existieren zum VSF-Konzept nur wenige klinische Studien. Als Erste veröffentlichten Hernandez-Alfaro et al. im Jahr 2011 ihre Erfahrungen bei der Umsetzung des VSF-Konzeptes. In der Studie berichteten sie von zwei erfolgreich behandelten Patienten. Die Behandlungszeiten betragen 264 Tage (8,8 Monate) bei einer Patientin mit skelettal offenem Biss und 195 Tage (6,5 Monate) bei einer weiteren Patientin mit skelettaler Klasse III Okklusion mit maxillärer Unterentwicklung und mandibulärer Asymmetrie. Das VSF-Konzept wurde mit der Software SimPlant OMS13.0 (Materialise, Leuven, Belgien) durchgeführt. Der intermediate OP-Splint wurde mit CAD/CAM gefertigt, der finale OP-Splint jedoch mit der konventionellen modellbasierten Methode. Die Fallstudie machte keine Angaben zum virtuellen Planungskonzept (Hernández-Alfaro et al. 2011). Hsu et al. (2012) beschrieben als Erste detailliert zwei verschiedene VSF-Planungskonzepte an einer Patientin mit Schlafapnoe. Das Hauptanliegen der Therapie war die Öffnung der oberen Atemwege. Dabei wurde die Problematik der postoperativen Okklusion bei VSF deutlich. Durch die fehlende präorthodontische Phase ist die Einstellung einer stabilen postoperativen Okklusion mit mindestens drei Kontaktpunkten zwischen Maxilla und Mandibula bei SF- und damit auch bei VSF-Konzepten nicht immer gegeben (Hsu et al. 2012). Allerdings kann in den Wochen nach der OP der intermediate, computer-generierte Splint genutzt werden, die vorübergehende Okklusion zu stabilisieren. Dennoch bleibt die Problematik bei schweren oder nicht behandelbaren Okklusionsverhältnissen, wie bei einem vollständigen Kreuzbiss oder stark ausgeprägten Mittellinienabweichungen, bestehen.

Im Jahr 2013 veröffentlichten Hernández-Alfaro & Guijarro-Martínez (2013) die bislang umfangreichste Studie, in der 45 Patienten mit Hilfe eines VSF-Konzeptes erfolgreich therapiert wurden. Das Patientengut beschränkte sich auf Patienten, bei denen eine symmetrische Dysgnathie vorlag und die keiner chirurgischen Gaumennahterweiterung bedurften. Auch Patienten, bei denen im Vorfeld Extraktionen durchgeführt werden mussten, wurden nicht in die Studie aufgenommen. Bei den OPs kamen meist bimaxilläre Verfahren zum Einsatz. Die durchschnittliche Behandlungsdauer betrug 37,8 Wochen (8,69 Monate). Die Zufriedenheit der Patienten und behandelnden Ärzte lag mit 9,4 und 9,7 von maximal zehn Punkten sehr hoch (Hernández-Alfaro & Guijarro-Martínez 2013).

## 1.5 Peer Assessment Rating Index (*PAR-Index*)

Der aktuell am häufigsten genutzte Index zur Bewertung von kieferorthopädischen Behandlungsergebnissen bei Malokklusion ist der PAR-Index. Der britische Gesundheitsminister ließ 1986 die Notwendigkeit kieferorthopädischer Behandlungen prüfen. Im Zuge dessen entwickelten zehn erfahrene Kieferorthopäden (*British Orthodontic Standards Working Party*) zwischen 1987 und 1992 den PAR-Index. Der PAR-Index ist ein quantitatives und objektives Screening-Instrument zur Erfassung der Malokklusion vor, während und nach einer kieferorthopädischen Behandlung. Er ermöglicht es, den Behandlungsfortschritt zu jedem Zeitpunkt zu erfassen, die Therapieerfolge zu dokumentieren und verschiedene Ergebnisse wissenschaftlich miteinander zu vergleichen (Richmond et al. 1992a; Richmond et al. 1992b). Der PAR-Index erlaubt dem geschulten Arzt eine schnelle Analyse der okklusalen Situation und kann dazu genutzt werden, Verbesserungen für die Therapiestrategie abzuleiten. Die Wahl der Behandlungsmethode hat neben der Erfahrung des Arztes den größten Einfluss auf den Therapieerfolg. Erhobene PAR-Index-Studien, bei denen verschiedene Methoden miteinander verglichen werden, erleichtern dem Behandler die Entscheidung für eine Methode oder ein Therapiemittel (O'Brien et al. 1993).

Beim PAR-Index wurde anhand von über 200 prä- und posttherapeutischen Gipsmodellen ein Schema entwickelt, das es ermöglicht, einzelne Merkmale der aktuellen Malokklusion bei Patienten zu erfassen. Das Schema besteht aus fünf Komponenten zu Zahnfehlstellungen und Okklusionsabweichungen (siehe Tabelle 2). Über Punktwerte wird die Ausprägung der Komponenten beschrieben. Die Summe der Punktwerte der einzelnen Komponenten bestimmt den Grad der bestehenden Malokklusion bzw. Dysgnathie. Eine ideale Zahnstellung und Okklusion entspricht dem Punktwert null. Je höher der Punktwert, umso schwerer ist die Irregularität zu bewerten. Die Differenz der PAR-Index-Punktwerte der prä- und posttherapeutischen Situation (prä-PAR – post-PAR) gibt Auskunft über den kieferorthopädischen Therapieerfolg.

Jedoch spiegelt ein PAR-Wert von null nicht in allen Fällen optimale nicht kieferorthopädisch behandlungsbedürftige Okklusionen bzw. Gebissverhältnisse wider, weil der Index nicht alle Komponenten ausreichend abdeckt. Beispielsweise werden im anterioren Segment nur Lücken  $\geq 1,1$ mm erfasst und Lücken im Seitenzahnggebiet überhaupt nicht. Außerdem beinhaltet der Index keine Informationen über Milchzähne, Karies, Wurzelresorptionen, Gingivarezessionen, Aplasien, verlagerte Zähne und Patientenzufriedenheit. Auch die faziale Ästhetik wird nicht berücksichtigt (DeGuzman et al. 1995; Bergström & Halling 1997; Birkeland et al. 1997a; Birkeland et al. 1997b; Birkeland et al. 1999; Riedmann et al. 1999; Riedman & Berg 1999). Aufgrund dessen ist der PAR-Index nur bedingt für die Einschätzung einer Behandlungsbedürftigkeit geeignet. Bei der Beurteilung von Behandlungsergebnissen ist er jedoch von großem Nutzen.

**Tabelle 2: Tabellarische Darstellung der einzelnen Komponenten des PAR-Index**

Komponenten des PAR-Index
1. Oberes und unteres anteriores Segment (Kontaktpunktverlagerung)
2. Linke und rechte bukkale Okklusion
3. Sagittaler Überbiss (Overjet)
4. Vertikaler Überbiss (Overbite)
5. Mittellinie

Der PAR-Index gilt als reliabel (Zuverlässigkeit der Ergebnisse einer Messung) und valide (Übereinstimmung der Messergebnisse mit dem, was zu messen beabsichtigt ist) (Richmond et al. 1992a; O'Brien et al. 1993; DeGuzman et al. 1995; Firestone et al. 2002). Die intrapersonelle Reliabilität wurde mehrfach als exzellent ermittelt, die interpersonelle Reliabilität wurde ebenfalls als gut beurteilt (Shaw et al. 1991; Richmond et al. 1992a; Buchanan et al. 1993; O'Brien et al. 1993; Firestone et al. 2002). Durch eine Gewichtung des PAR-Index konnte eine geringfügig höhere Reliabilität erreicht werden (ungewichtet: Reliabilitätskoeffizient ( $r$ )=0,91; gewichtet:  $r$ =0,93) (Richmond et al. 1992a). Die Validität des PAR-Index wurde von einer Gruppe von 74 britischen Zahnärzten und Kieferorthopäden geprüft. An 272 Modellpaaren wurden Abweichungen der Okklusion anhand einer Skala von null bis acht bewertet. Die Übereinstimmung zwischen der gemittelten Meinung des Gremiums und dem PAR-Index war hoch. Aus der Analyse konnten Wichtungsfaktoren gebildet werden, die die Genauigkeit einzelner Komponenten des PAR-Index weiter erhöhen ( $r$ = 0,85). Durch dieses Verfahren wurde der PAR-Index an die damalige Beurteilung von Zahnfehlstellungen in Großbritannien angepasst. Durch die Veränderung der Wichtungsfaktoren kann der PAR-Index beispielsweise an länderspezifische Kriterien adaptiert werden (Richmond et al. 1992a).

Bei einer Validitätsprüfung in den USA wurden Wichtungsfaktoren definiert, die die aktuelle amerikanische Beurteilung berücksichtigen. Die Wichtungsfaktoren in Europa und Amerika unterscheiden sich (DeGuzman et al. 1995; siehe Tabelle 3). Weitere Studien führten zu weiteren länderspezifischen Wichtungsfaktoren der einzelnen Komponenten des PAR-Index. Dadurch wird die Flexibilität des Index zwar erhöht, die Vergleichbarkeit verschiedener Untersuchungen aufgrund der internationalen Unterschiede jedoch erschwert. Daher fordern einige Wissenschaftler die Verwendung eines international einheitlichen Index (Richmond & Daniels 1998a; Richmond & Daniels 1998b).

**Tabelle 3: Tabellarische Darstellung unterschiedlicher Wichtungsfaktoren der einzelnen PAR-Komponenten nach Richmond und DeGuzman**

PAR-Komponenten	Richmond & Daniels (1998a, 1998b)	DeGuzman et al. (1995)
oberes anteriores Segment/ Kontaktpunktverlagerung	1	1
unteres anteriores Segment/ Kontaktpunktverlagerung	1	1
rechte/linke bukkale Okklusion	1	2
sagittaler Überbiss (Overjet)	6	4,5
vertikaler Überbiss (Overbite)	2	3
Mittellinienabweichung	4	3,5

Der PAR-Index hat sich aufgrund seiner guten Reliabilität und leichten Anwendbarkeit zur Prüfung von kieferorthopädischen Einrichtungen, Gesundheitssystemen und zur Effektivitätsprüfung neuer Behandlungsmethoden bewährt. Die Erwartung der Patienten an die Ergebnisse einer kombiniert kieferorthopädisch-kieferchirurgischen Therapie ist gewöhnlich extrem hoch (Cunningham et al. 1996). Neben den klinischen Ergebnissen ist daher die Zufriedenheit der Patienten von großer Wichtigkeit. Aufgrund der hohen Kosten und des immensen Aufwands ist die Bewertung der Behandlungsergebnisse von kombinierten kieferorthopädisch-kieferchirurgischen Therapien von großer Bedeutung. Bisher wurde der PAR-Index dafür nur selten verwendet (McMullan et al. 2003). Bergström und Halling (1997) verglichen den PAR-Index mit zwei weiteren schwedischen Indices an Patienten, die mit einer kombinierten Methode therapiert wurden, und an Patienten, die ausschließlich kieferorthopädisch behandelt wurden. Die Assoziation zwischen dem PAR-Index und den anderen Indices war bei den Patienten mit einer kombinierten Therapie recht gering. Daraus schlossen die Autoren, dass der PAR-Index für kombinierte Verfahren ungeeignet ist (Bergström & Halling 1997). Andere Autoren kamen zu einem abweichenden Urteil, weil unter anderem die am stärksten gewichteten PAR-Komponenten (Overbite, Overjet und Mittellinienabweichung) Indikationen für ein kombiniertes Vorgehen darstellen (Nurminen et al. 1999). Eine erneute Beurteilung der Validität des PAR-Indexes für kombinierte Therapien ergab, dass das Messinstrument zur Beurteilung von Behandlungsergebnissen sowie zur Verbesserungen von Therapiestrategien im kombinierten Setting geeignet ist (Templeton et al. 2006). In den letzten Jahren verwendeten nur wenige Studien mit kombiniert kieferorthopädisch-kieferchirurgischen Therapien den PAR-Index (siehe Tabelle 4). In den beiden Studien aus dem Jahre 2011 wurden Patienten mit kongenitalen Defekten, posttraumatischen Rekonstruktionen, Lippen-Kiefer-Gaumenspalten und deren Abstufungen sowie Patienten unter beeinflussender Medikation und solche mit vorangegangener kieferchirurgischer Behandlung ausgeschlossen (Arad et al. 2011; Ponduri et al. 2011).

Ponduri et al. (2011) untersuchten in einer Studie Gipsmodelle von 40 rein kieferorthopädisch sowie 40 kombiniert kieferorthopädisch-kieferchirurgisch behandelten Patienten mittels PAR-Index. 69% der Patienten in der Gruppe mit dem kombinierten Vorgehen unterzogen sich einem bimaxillären Prozedere. In der Gruppe mit der kombinierten Therapie wurde eine durchschnittliche PAR-Veränderung von 74%, bei einem finalen PAR-Wert von zehn in durchschnittlich 33,8 Monaten, erreicht. Bei keinem Patienten trat eine Verschlechterung bzw. überhaupt kein Effekt auf.

In der Studie von Arad et al. (2011) wurden 63 Patienten mit bimaxillären (65%) und monomaxillären OP-Methoden verglichen. Die durchschnittliche PAR-Veränderung betrug 77%, bei einem finalen PAR-Wert von 8,63 und einer durchschnittlichen Therapiedauer von 30,6 Monaten. Bei einem Patienten verschlechterte sich oder blieb der Zustand gleich. 76,3% der Patienten wurden der Kategorie „*greatly improved*“ zugeteilt. Bei der PAR-Wert-Veränderung bestand kein signifikanter Unterschied zwischen der bimaxillären und monomaxillären OP-Methode ( $p=0,62$ ).

**Tabelle 4:** Tabellarische Darstellung von PAR-Index-Parametern aus Studien mit Patienten mit skelettalen Kieferfehlstellungen

Autoren (Jahr)	Anzahl (n)	Behandlungszeit (Monate)	PAR Anfang	PAR Ende	PAR Diff.	PAR Diff. /%
O'Brien et al. (2009)	71	32,8	40,48 (38,5–42,4)	10,58 (8,7–12,4)	29,9	72 (67–78)
Ponduri et al. (2011) Gesamt	40	33,8	38	10	28	74
Arad et al. 2011 Gesamt	63	30,6	41,58	8,63	32,95	77,01
monomaxillär: OK	5	25,4	32,6	9,6	23	63,7
monomaxillär: UK	17	32,4	38,24	7,7	30,45	79,5
bimaxillär	41	30,4	44,07	8,9	35,17	77,53

Für gewöhnlich wird der PAR-Index an Anfangs- und Abschlussmodellen angewendet. Als Höchstwert ist eine Summe von 120 möglich, praktisch werden jedoch selten Werte über 50 erreicht. Es existieren unterschiedliche Ansätze, den Erfolg mittels PAR-Index zu bewerten. Zum einen kann dieser über den absoluten PAR-Endwert erfolgen. Nach Richmond et. al ist ein absoluter PAR Endwert  $\leq 5$  als nahezu ideal anzusehen, ein Wert  $\leq 10$  hingegen als akzeptables Ergebnisse einzustufen (Richmond et al. 1992a). Weitere Möglichkeiten, den Erfolg einer Therapie mit dem PAR-Index zu bewerten, bestehen in der Ermittlung der Differenz zwischen den absoluten PAR-Werten zu Beginn und am Ende der Therapie (prä-PAR – post-PAR) oder der Bestimmung der prozentualen Verringerung der gewichteten PAR-Werte ( $((\text{prä-PAR} - \text{post-PAR}) \times 100 / \text{prä-PAR})$ ). Die letzte Methode erweist sich als sensibelste (Richmond et al.

1993). Im Rahmen einer Validitätsuntersuchung entstand eine Methode zur grafischen Darstellung in einem Monogramm, in dem der Behandlungserfolg in die Gruppen „*worse* – oder nicht verbessert“, „*improved*“ und „*greatly improved*“ klassifiziert wurde. Die Werte vor der Behandlung werden auf der x-Achse aufgetragen, die der Endsituation bzw. der bestehenden Malokklusion auf der y-Achse. Die entstandene Koordinate stellt den Behandlungserfolg dar. Diese werden farblich oder grafisch in eine der oben genannten drei Kategorien eingeteilt. Für die Kategorie „*greatly improved*“ muss die Verbesserung mindestens 22 Punkte betragen. Das bedeutet, dass in diese Kategorie nur Patienten mit ausreichend hohen prä-PAR-Werten gelangen können. Ein Patient mit einem prä-PAR-Wert von 21 fällt maximal in die Kategorie „*improved*“, auch wenn er eine sehr hohe prozentuale Verbesserung aufweist. In der „*improved*“-Kategorie muss die prozentuale Verbesserung mindestens 30% betragen. Schlechtere Ergebnisse werden in die Kategorie „*worse – no difference*“ eingestuft (Shaw et al. 1991; Richmond et al. 1992b; Richmond et al. 1993). Behandlungskonzepte zeigen einen hohen Standard, wenn die mittlere prozentuale Verbesserung aller Patienten höher als 70% ist. Außerdem sollten weniger als 5% der Patienten der Kategorie „*worse – no difference*“ zugeordnet werden müssen und der Anteil der Patienten sollte in der Kategorie „*greatly improved*“ bei über 40% liegen (Richmond et al. 1992b; Richmond & Andrews 1993).



## 2 Fragestellung

Die Behandlung von skelettalen Dysgnathien im Erwachsenenalter erfolgt meist mittels einer Kombination aus Kieferorthopädie und orthognather Chirurgie. Bei der konventionellen Therapieform beinhaltet die Behandlung eine kieferorthopädische Phase vor und nach dem chirurgischen Eingriff. Die präoperative kieferorthopädische Phase beansprucht mit Abstand den größten Zeitraum. Das in den 1990er Jahren erstmals beschriebene SF-Konzept verkürzt durch den Verzicht auf die präoperative kieferorthopädische Behandlung und das biologische Phänomen einer stark erhöhten Knochenumbaurate unmittelbar nach der OP die Behandlungsdauer massiv.

Durch den Einzug der DVT in den kieferorthopädischen Alltag konnte sowohl die Diagnostik als auch die Therapie von kombiniert kieferchirurgisch-kieferorthopädischen Behandlungssituationen revolutioniert werden. DVT-Scans liefern überlagerungsfreie exzellente Bilder von anatomischen Strukturen, die bisher nur mit der CT möglich waren, wobei die Strahlenexposition vergleichbar gering ist wie bei zahnmedizinischen Röntgenaufnahmen. Durch eine kombinierte Verwendung von DVT-Datensätzen und digitalen Modellen ist durch den Verzicht einer modellbasierten OP-Planung und damit unter Ausschluss von Fehlerquellen die gesamte OP-Simulation durch den Kieferorthopäden am PC durchführbar. Weitere Vorteile sind die Möglichkeit des Vergleichs verschiedener Behandlungsoptionen und die erleichterte Kommunikation mit dem Chirurgen. Im Anschluss ermöglicht die Herstellung von CAD/CAM-gefertigten OP-Splinten eine exakte Überführung der Simulation in den OP.

Das VSF-Konzept soll die Präzision einer vollständig virtuell geplant und umgesetzten Chirurgie mit den zahlreichen Vorteilen des SF-Konzepts kombinieren. In der Literatur fehlen derzeit Studien, die eine vollständig virtuell geplante und durchgeführte kieferchirurgisch-kieferorthopädische Umsetzung nach dem VSF-Konzept analysieren.

Ziel dieser Studie war die Evaluation der aktiven Behandlungszeiten des Therapieerfolgs des VSF-Konzeptes. Der Therapieerfolg soll mit einem validierten Untersuchungsinstrument (PAR-Index) bestimmt werden, um einen wissenschaftlichen Vergleich mit anderen Ergebnissen zu ermöglichen.

Mit der vorliegenden Arbeit sollten im Einzelnen folgende Hypothesen überprüft werden:

1. Die Messung der Parameter des PAR-Index an digitalisierten Gipsmodellen liefert intraindividuell reproduzierbare Werte.
2. Der Vergleich des prä- und post-PAR-Index von Patienten mit skelettalen Kieferfehlstellungen, die nach dem VSF-Konzept behandelt wurden, deutet auf statistisch signifikante VSF-bedingte Behandlungseffekte hin.

3. Der Vergleich des prä- und post-PAR-Index von Patienten mit skelettalen Kieferfehlstellungen, die nach dem VSF-Konzept behandelt wurden, ergibt einen signifikanten Vorteil für Patienten mit bimaxillären OPs verglichen mit monomaxillär behandelten Patienten.
4. Bei dem Vergleich des prä- und post-PAR-Index von Patienten mit skelettalen Kieferfehlstellungen, die nach dem VSF-Konzept behandelt wurden, besteht ein signifikanter Unterschied in Abhängigkeit von den vor der OP diagnostizierten skelettalen Klassen.
5. Patienten mit skelettalen Kieferfehlstellungen, die nach dem VSF-Konzept behandelt wurden, weisen deutlich kürzere Behandlungszeiten auf als Patienten mit konventioneller kombiniert kieferorthopädisch-kieferchirurgischer Behandlung.
6. Von den Patienten mit skelettalen Kieferfehlstellungen, die nach dem VSF-Konzept behandelt wurden, weisen bimaxillär operierte Patienten deutlich kürzere Behandlungszeiten auf als monomaxillär operierte Patienten.
7. Die Patienten mit skelettalen Kieferfehlstellungen, die nach dem VSF-Konzept behandelt wurden, weisen in Abhängigkeit von der skelettalen Klasse deutliche Unterschiede bei den Behandlungszeiten auf.

## 3 Methodik

### 3.1 Allgemeine Methodik

#### 3.1.1 Patientengut

In den Jahren 2007 bis 2013 wurden 78 Patienten mit skelettalen Kieferfehlstellungen in der kieferorthopädischen Praxis „Ihre Kieferorthopäden in Berlin“ von Prof. Dr. Axel Bumann nach dem VSF-Konzept therapiert. Patienten mit kongenitalen Defekten, posttraumatischen Rekonstruktionen, Lippen-Kiefer-Gaumenspalten und deren Abstufungen sowie Patienten mit schweren Engständen, bei denen Extraktionen notwendig waren, wurde nicht in die Studie eingeschlossen. Fälle, bei denen aufgrund einer schweren transversalen Unterentwicklung eine chirurgische Gaumennahterweiterung im Vorfeld durchgeführt werden musste, wurden ebenfalls nicht in die Arbeit aufgenommen. Des Weiteren wurde darauf geachtet, dass keine akuten parodontalen Symptome, Kiefergelenksprobleme sowie Medikationen vorlagen, die eine Gefahr für den Patienten während der Therapie darstellen oder die Ergebnisse der Studie beeinflussen könnten. Weitere Einschränkungen bezüglich der Art und Ausprägung der Dysgnathie wurden nicht vorgenommen. Unter Berücksichtigung der genannten Selektionskriterien bezieht sich die Studie auf 24 Patienten, die mittels VSF therapiert wurden. Von allen Patienten lagen prä- und posttherapeutische Gipsmodelle, Fotodokumentationen sowie DVT-Datensätze aus dem Langzeitarchiv des 3D-Röntgeninstituts MESANTIS® Berlin vor.

In dem eingeschlossenen Patientenkollektiv bestand eine ausgeglichene Geschlechterverteilung von jeweils zwölf weiblichen und zwölf männlichen Patienten. Das Durchschnittsalter der 24 Patienten betrug zu Beginn der Behandlung 35,7 Jahre, wobei der jüngste Patient 18 Jahre und die älteste Patientin 59 Jahre alt waren. Das durchschnittliche Alter der weiblichen Patienten lag bei 37,1 Jahren, das der männlichen Patienten bei 34,3 Jahren. Da bei der Behandlung mit einer kombiniert kieferorthopädisch-kieferchirurgischen Therapie ein abgeschlossenes Knochenwachstum vorausgesetzt wird, befanden sich alle Patienten im adulten Alter (siehe Tabelle 5).

**Tabelle 5: Charakterisierung des Patientengutes nach Geschlecht und Alter**

	Anzahl (n)	Durchschnittsalter	Minimum	Maximum
weiblich	12	37,1	21	59
männlich	12	34,3	18	56
<b>Gesamt</b>	<b>24</b>	<b>35,7</b>	<b>18</b>	<b>59</b>

Die Patienten wurden in skelettale Klassen, die über den Wits-Wert definiert werden, eingeteilt (siehe Tabelle 6). Dieser Wert gibt Auskunft über die anteriore-posteriore Lagebeziehung der Kiefer zueinander in Abhängigkeit von der horizontalen und vertikalen Zahnstellung der Frontzähne und ist somit ein wichtiger Parameter zur Bestimmung des Schweregrades der bestehenden skelettalen Dysgnathie. Der Wits-Wert beeinflusst die Therapieplanung und die Auswahl der OP-Methode.

**Tabelle 6: Ermittlung der skelettalen Klasse über den Wits-Wert**

Wits-Wert	Kieferrelation/skelettale Klasse
Wits-Wert im Mittel männlich: 1–2 mm weiblich 0–2 mm	Neutrale basale Kieferrelation / skelettale Klasse I
Wits-Wert verkleinert < –1 mm	Mesiale basale Kieferrelation / skelettale Klasse III
Wits-Wert vergrößert >2 mm	distale basale Kieferrelation / skelettale Klasse II

Bei 14 der 24 Patienten konnte eine skelettale Klasse III festgestellt werden, bei sechs Patienten lag eine skelettale Klasse II und bei vier Patienten eine skelettale Klasse I vor (siehe Tabelle 7).

17 Patienten wurden mit einer bimaxillären OP-Methode behandelt, wobei gleichzeitig in der Maxilla und in der Mandibula Ostetomien durchgeführt wurden. Bei fünf Patienten wurden Ostetomien ausschließlich an der Maxilla und bei zwei Patienten ausschließlich an der Mandibula durchgeführt.

Tabelle 7: Übersicht über die skelettalen Klassen und durchgeführten OP-Methoden

Patient (n)	Skelettale Klasse	OP-Technik
1	III	bimaxilliäre OP
2	III	monomaxilläre OP Maxilla
3	II	bimaxilliäre OP
4	II	bimaxilliäre OP
5	III	bimaxilliäre OP
6	II	monomaxilläre OP Mandibula
7	III	bimaxilliäre OP
8	III	monomaxilläre OP Maxilla
9	I	bimaxilliäre OP
10	III	bimaxilliäre OP
11	I	monomaxilläre OP Maxilla
12	III	bimaxilliäre OP
13	III	bimaxilliäre OP
14	III	bimaxilliäre OP
15	I	monomaxilläre OP Mandibula
16	II	monomaxilläre OP Maxilla
17	I	bimaxilliäre OP
18	II	bimaxilliäre OP
19	III	bimaxilliäre OP
20	III	bimaxilliäre OP
21	II	bimaxilliäre OP
22	III	monomaxilläre OP Maxilla
23	III	bimaxilliäre OP
24	III	bimaxilliäre OP

Für jede DVT-Aufnahme bestand eine kieferorthopädisch rechtfertigende Indikation zur Anfertigung einer DVT nach der S1-Leitlinie der Deutschen Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (DGZMK).

### 3.1.2 DVT-Geräte

Alle DVT-Aufnahmen wurden bei MESANTIS® mit Hilfe DVT-Geräte „i-CAT classic“ (Imaging Sciences International, Inc., Hatfield, USA) oder der Sonderedition MESANTIS® *line* (Imaging Sciences International, Inc., Hatfield, USA; siehe Abbildung 1) angefertigt. Die technischen Daten der Geräte sind in Tabelle 8 dargestellt. Beide DVT-Geräte generieren DICOM-Datensätze, die mit Hilfe einer speziellen Auswertungssoftware für die weiteren Vermessungen verwendet werden konnten. Alle Patienten wurden nach der Okklusionsebene vertikal im DVT-Gerät ausgerichtet. Die sagittale Orientierung richtete sich nach der Nasenspitze und nach den Referenzpunkten „Porion rechts und links“.

**Tabelle 8: Technische Angaben der für die virtuelle Planung des Patientenguts verwendeten DVT-Geräte**

Abkürzungen: D=Durchmesser, H=Höhe, B=Breite, kV=Kilovolt, mA=Milliampere

	<b>i-CAT classic</b>	<b>MESANTIS® line</b>
<b>Bilddetektor</b>	Flachfeld, amorphes Silizium (ablesbarer Bereich) 23,8 cm × 19,2 cm (B × H)	Flachfeld, amorphes Silizium (erfassbarer Bereich) 23,8 cm × 19,2 cm (B × H)
<b>Voxelgröße</b>	0,3 mm oder 0,25 mm	0,3 mm oder 0,25 mm
<b>Graustufen</b>	12 Bit	14 Bit
<b>Bilderfassung</b>	Einzelrotation um 360° (max.)	Einzelrotation um 360° (max.)
<b>Bilderfassungsdauer</b>	20 oder 10 Sekunden	26,9 oder 8,9 Sekunden
<b>Sichtfeld (FOV)</b>	16 cm x 13 cm (D × H)	16,50 cm × 13,50 cm (D × H)
<b>Röntgenröhrenspannung</b>	120 kV	120 kV
<b>Stromstärke</b>	3–8 mA	3–7 mA



**Abbildung 1: DVT-Gerät „MESANTIS® line“**

### 3.1.3 Ablauf und Durchführung des VSF-Konzeptes

Der Therapie kann in fünf Phasen untergliedert werden, wobei die drei ersten Phasen weitestgehend nach einem standardisierten Protokoll ablaufen:

1. diagnostische Datenerhebung
2. präoperative Planung
3. präoperative orthodontische Präparation
4. Chirurgie
5. postoperative orthodontische Phase

1. In der Phase der diagnostischen Datenerhebung wurde neben einer umfangreichen klinischen Untersuchung ein DVT-Scan des gesamten Schädels durchgeführt. Des Weiteren wurden Präzisionsabdrücke der Zahnbögen genommen und ein Modell aus Gips hergestellt. Der DVT-Scan wurde im Anschluss als DICOM-Datensatz gespeichert. Anhand des DVT-Datensatzes wurde eine 3D-Koordinatenanalyse der dentalen knöchernen Strukturen durchgeführt. Dafür ist im Vorfeld eine korrekte Ausrichtung des Schädels in allen drei Raumebenen (Sagittalebene, Koronalebene, Axialebene) notwendig. Dieser Vorgang der Reorientierung benötigt einen Referenzpunkt (Nasion („N“)), welcher in allen drei Raumkoordinaten auf „0“ gesetzt wird (siehe Abbildung 2). Im Anschluss können dann mit der Software „3D-Imaging Software Invivo 5.1.6“ (Anatomage Inc. San Jose, Kalifornien, USA) mithilfe von spezifischen Orientierungspunkten im 3D-Datensatz sagittale, vertikale und axiale Parameter für die kieferorthopädische Behandlungsplanung bestimmt (siehe Abbildung 3) sowie tabellarisch aufgelistet werden (siehe Abbildung 4).

Der 3D-Datensatz wird außerdem zur Prüfung des peridental Knochenangebotes verwendet (siehe Abbildung 5). Die Bestimmung des peridental Knochenangebotes ist von großer Wichtigkeit, da es in vielen Fällen einen limitierenden Faktor für die Zahnbewegungen in der postorthodontischen Phase darstellt.

Die Gipsmodelle wurden mit dem Oberflächen-Scanner Dental Scanner - Orthodontic 3D Scanner R700™ der Firma 3Shape - digitalisiert und als STL-Datensatz (siehe Abbildung 6) gespeichert. Dieser Schritt war nötig, weil die DVT-Aufnahmen die dentalen Strukturen nicht in ausreichender Detailgenauigkeit für die Herstellung der OP-Splinte im CAD/CAM-Verfahren erfassen können.

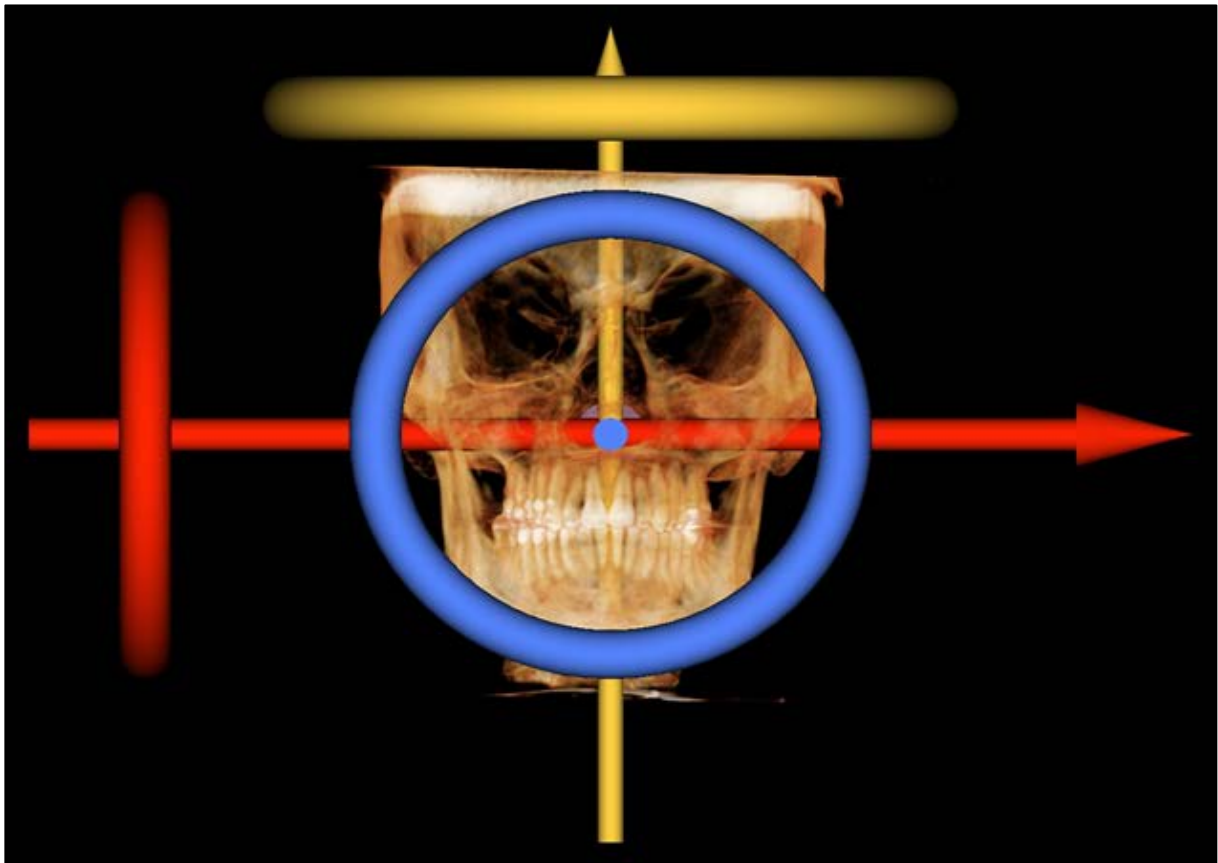


Abbildung 2: Klinisches Beispiel der Reorientierung des 3D-Datensatzes in Sagittal-, Koronal- und Axial-ebene über den Referenzpunkt Nasion (N)

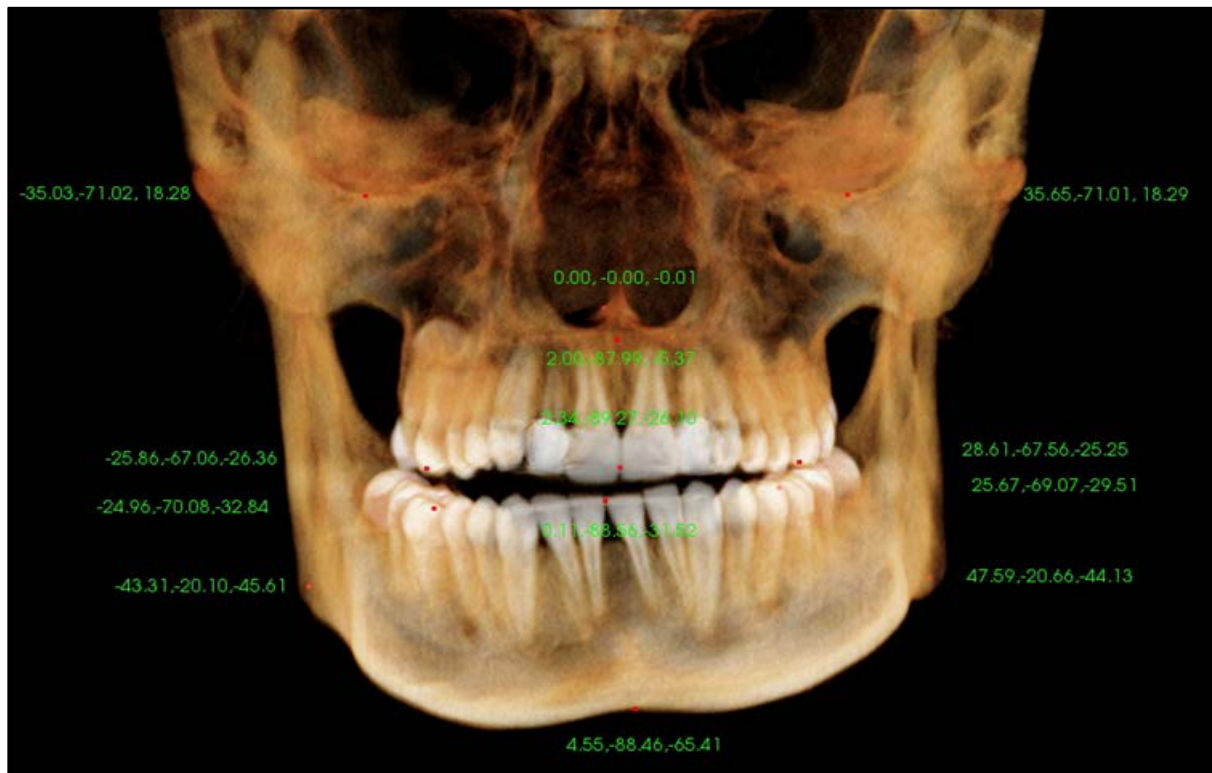


Abbildung 3: Klinisches Beispiel für die Festlegung der spezifischen Orientierungspunkte auf knöchernen und dentalen Strukturen zur Ermittlung von kieferorthopädischen Parametern für die Behandlungsplanung mit Koordinatenangabe in Sagittal-, Koronal- und Axialebene (grün)



MESANTIS Spatial Coordinates										
Supraorbitale right						Supraorbitale left				
-29,54	-88,42	53,21				-28,98			-88,91	54,36
Frontozygoma right						Frontozygoma left				
-48,54	-70,36	48,21				49,69			-70,24	46,95
Orbitale right						Orbitale left				
-36,86	-82,24	24,41				33,02			-82,16	24,39
Condylion right						Condylion left				
-50,55	-12,82	18,74				48,32			-11,36	19,69
Maxilla right						Maxilla left				
-33,03	-71,69	-4,29				26,22			-71,12	-5,27
			Basion							
			0	0	0					
Premolar right			Anterior nasal spina			Premolar left				
-26,79	-75,34	-31,23	-3,60	-96,72	-0,75	22,92	-75,72	-30,95		
Gonion right			Upper Midline Incision			Gonion left				
-53,47	-19,36	-34,88	-3,17	-105,01	-31,87	50,34	-22,36	-34,45		
			Lower Midline Incision							
			-0,16	-97,94	-34,66					
			Spina mentalis							
			-2,08	-78,56	-71,87					
			Menton							
			-2,31	-81,63	-78,85					

Abbildung 4: Klinisches Beispiel für die tabellarische Darstellung der Koordinatenangaben der im 3D-Datensatz festgelegten spezifischen Orientierungspunkte in Sagittal-, Koronal- und Axialebene

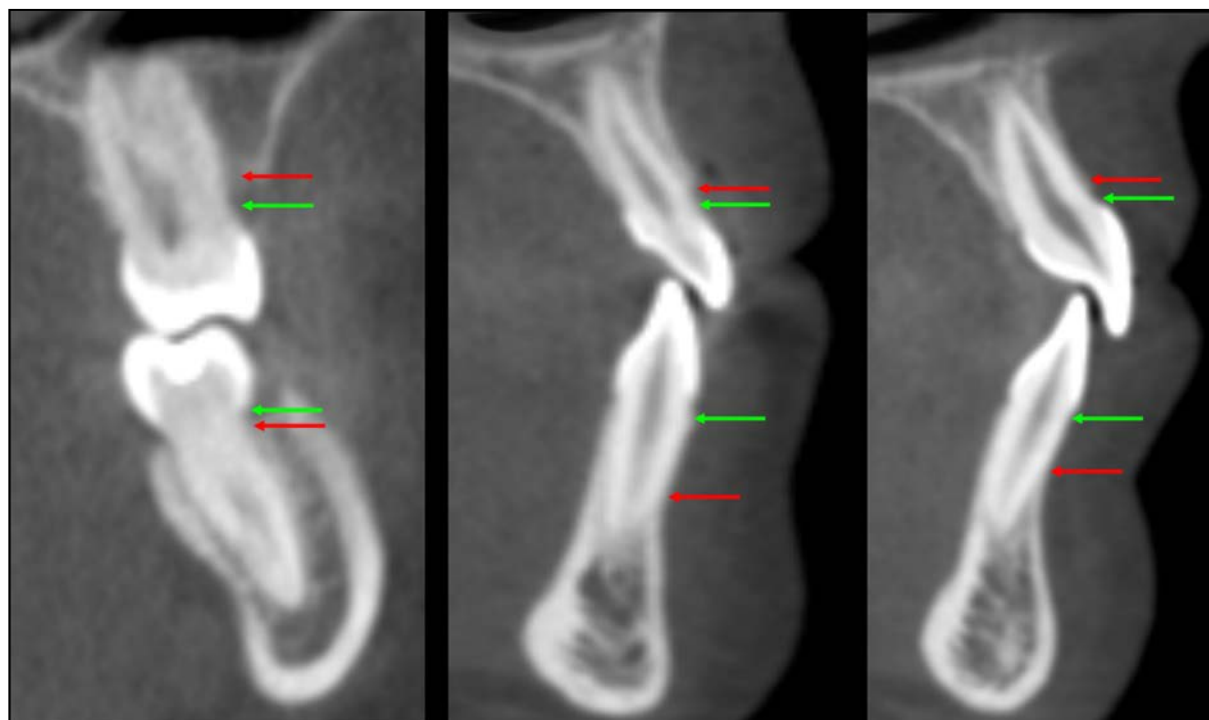
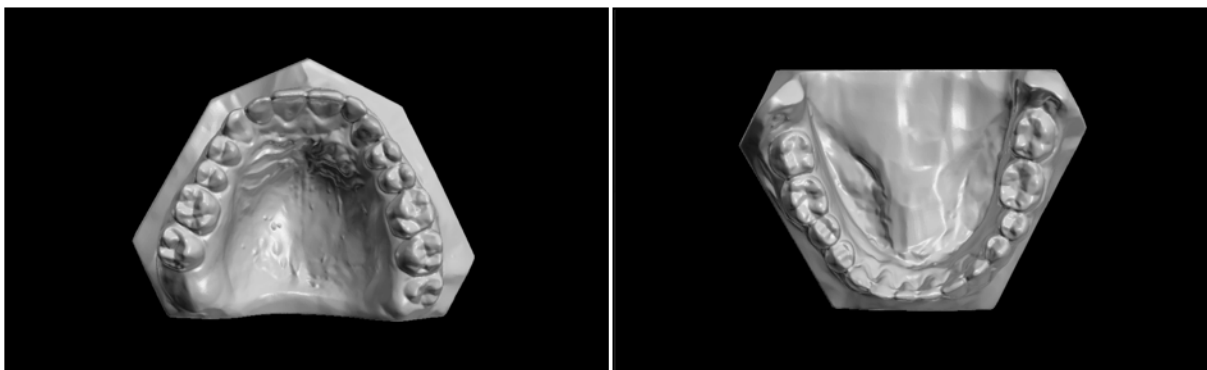
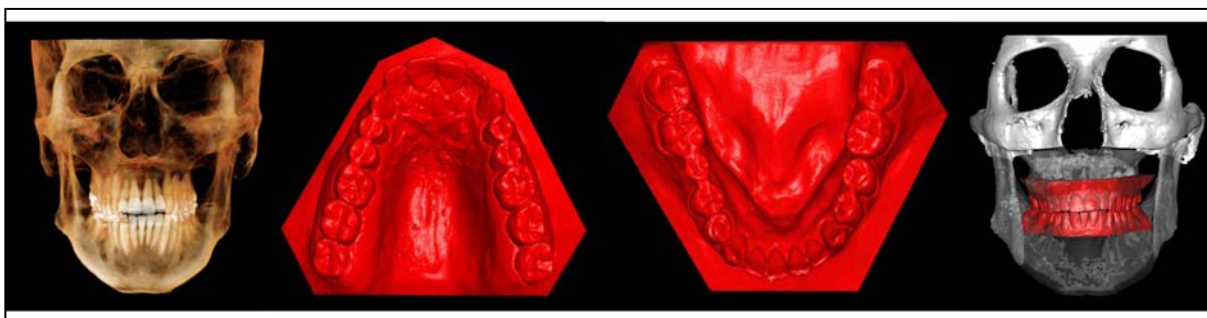


Abbildung 5: Klinisches Beispiel für die Analyse des peridental Knochenangebotes in der Software Invivo 5.1.6.



**Abbildung 6:** Klinisches Beispiel für die Darstellung digitalisierter Gipsmodelle durch den Oberflächen-scanner - Orthodontic 3D Scanner R700™ der Firma 3Shape

Im Anschluss wurde der unbearbeitete DICOM-Datensatz in das Programm SimPlant Pro OMS (Materialise Dental, Leuven, Belgien) importiert. Dadurch erhält man eine 3D-Darstellung des Schädels sowie der umliegenden Weichgewebe. Anschließend kam es zur Fusion der STL-Datensätze der einzelnen Kiefer mit dem DVT-Datensatz des gesamten Schädels (sogenanntes *Matching*). Dieser Schritt positionierte die mit hoher Detailgenauigkeit erfassten dentalen Strukturen in die richtige Relation zu den im DVT-Scan erfassten skelettalen Strukturen. Dazu wurden zunächst Artefakte ausgeschnitten und der Verlauf des Nervus alveolaris inferior markiert. Im nächsten Schritt wurde der STL-Datensatz des Modell-Scans importiert. Der Vorgang des Matchens erfolgte manuell. Nach der Bestimmung von Referenzpunkten konnten die Strukturen in allen drei Raumebenen mittels Translation und Rotation verschoben werden, bis sie konturenlos übereinstimmten (siehe Abbildung 7).



**Abbildung 7:** Klinisches Beispiel für die Fusion des DICOM-Datensatzes des Schädels mit den STL-Datensätzen der dentalen Strukturen (OK und UK) in der Software SimPlant Pro OMS

2. Die präoperative Planung begann ca. fünf Wochen vor dem geplanten OP-Termin mit der virtuellen Segmentierung der Kiefer. Dazu mussten sogenannte Bausteine (OK mit Schädelbasis, UK, Weichteile) erstellt werden. Hierfür wurden zuerst Referenzpunkte („landmarks“) in den Datensatz gesetzt. Für die Schnitfführung auf LeFort-I-Ebene im OK wurden Nasion, Pogonion und Orbitale als Referenzpunkte festgelegt. Die Software zeigte dort automatisch eine Schnittebene an (siehe Abbildung 8). Der behandelnde Arzt konnte mittels translatorischer und rotatorischer Bewegung die Schnittebenen sowie deren Dicke entsprechend der anatomischen Besonderheiten individualisieren. Weitere Schnitte zur Planung sagittaler Spaltungen und zur Mo-

bilisation einzelner Segmente konnten angeschlossen werden. Im UK wurde in der Regel eine bisagittale Spaltosteotomie nach *Obwegeser* und *DAL-Pont* durchgeführt. Die erforderlichen „landmarks“ waren das Foramen mandibulare sowie ein superiorer und inferiorer Punkt im retromolaren Bereich. Wiederum waren eine Individualisierung der Schnittebenen sowie die Festlegung der Schnittbreiten möglich. Nach der darauffolgenden Segmentierung konnten sowohl OK und UK als auch die einzelnen Segmente entsprechend der geplanten Osteotomien verschoben werden (siehe Abbildung 8). Diese Bewegungen konnten in allen Raumebenen durch Translation und Rotation umgesetzt werden (siehe Abbildung 9). Es bestand auch die Möglichkeit, Autorotationsbewegungen des UKs auszuführen. Letztendlich generierte die Software einen Report, der die aktuelle Planung der Ausgangssituation gegenüberstellt. Der Report umfasste alle geplanten Positionsveränderungen von Segmenten in visualisierter Form sowie in Millimeterangaben. Dieses Material eignete sich hervorragend dafür, die vom Kieferorthopäden erstellte finale Version mit dem behandelnden Chirurgen zu besprechen (siehe Abbildung 10 und 11). Im Anschluss wurde der gesamte Simplant-Datensatz an das 3D-Druckzentrum (Materialise Dental® NV, Leuven, Belgien) gesendet. Innerhalb von ca. zehn Werktagen wurde der komplette Satz an OP-Splinten geliefert (siehe Abbildung 12). Von Beginn der virtuellen Planung bis zum OP-Termin musste der Patient Repositionsschienen tragen, um Stellungsänderungen zu vermeiden.

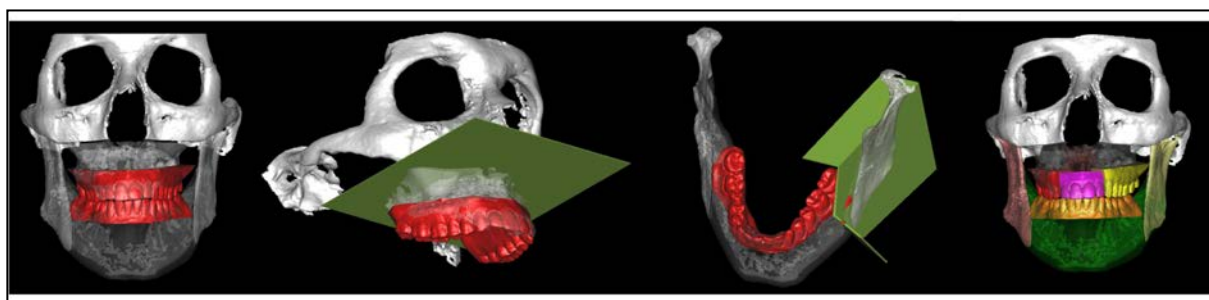


Abbildung 8: Klinisches Beispiel für Segmentierung der Kieferbasen und Darstellung der Osteotomieebenen in der Software SimPlant Pro OMS

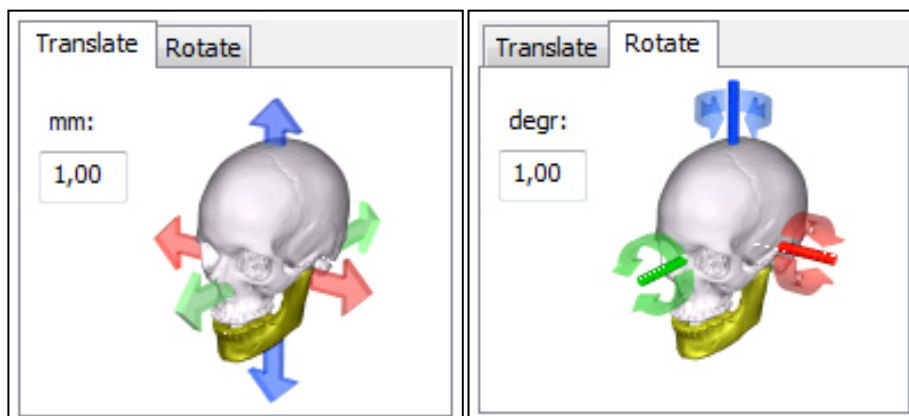


Abbildung 9: Darstellung der Benutzeroberfläche für die translatorische und rotatorische Verschiebung der virtuellen Kiefersegmente in der Software SimPlant Pro OMS

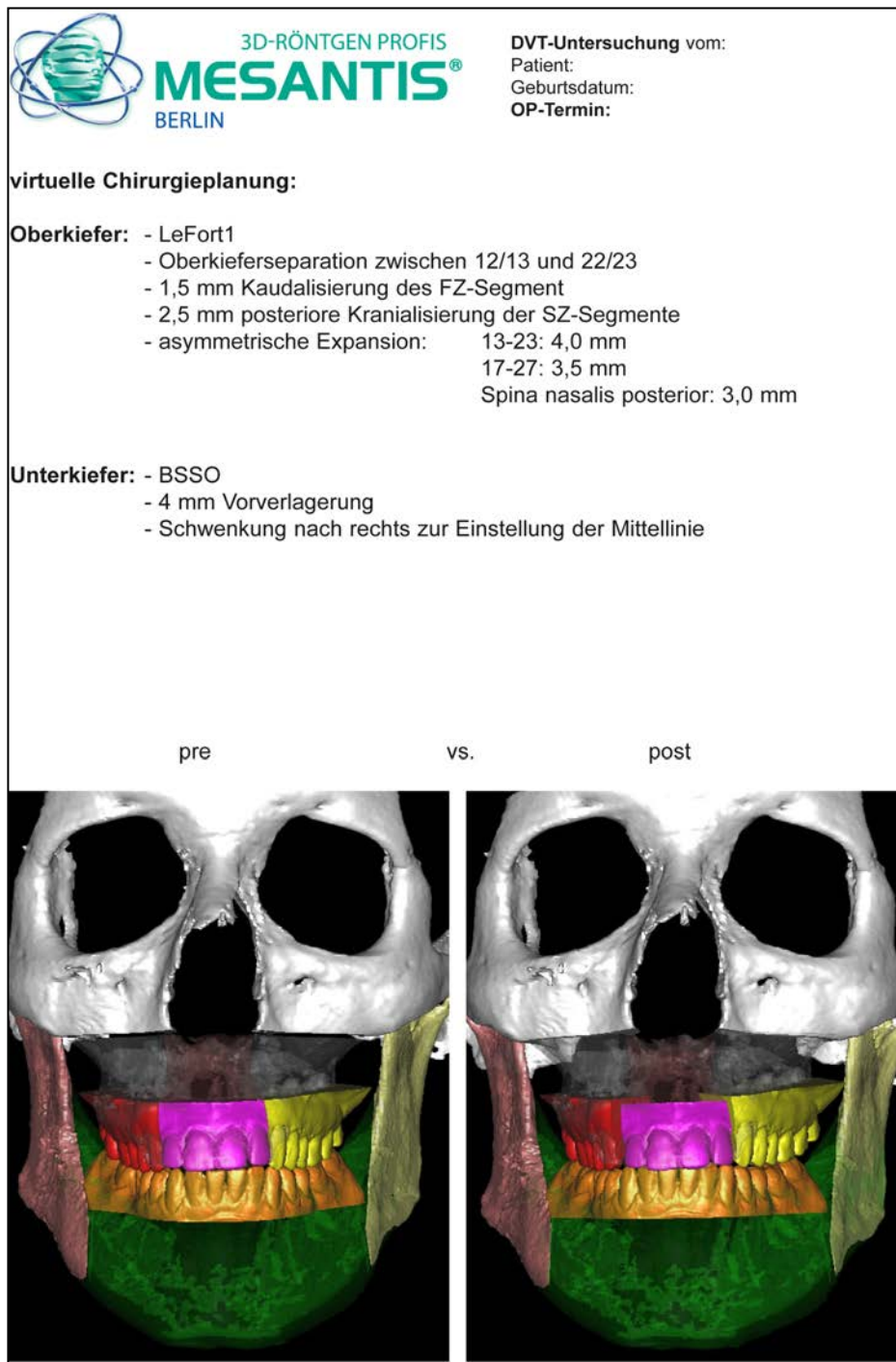


Abbildung 10: Klinisches Beispiel des finalen Planungsreports aus dem 3D-Röntgeninstitut MESANTIS® Berlin mit numerischen Angaben der virtuell geplanten Positionsänderungen der einzelnen Segmente im OK und UK

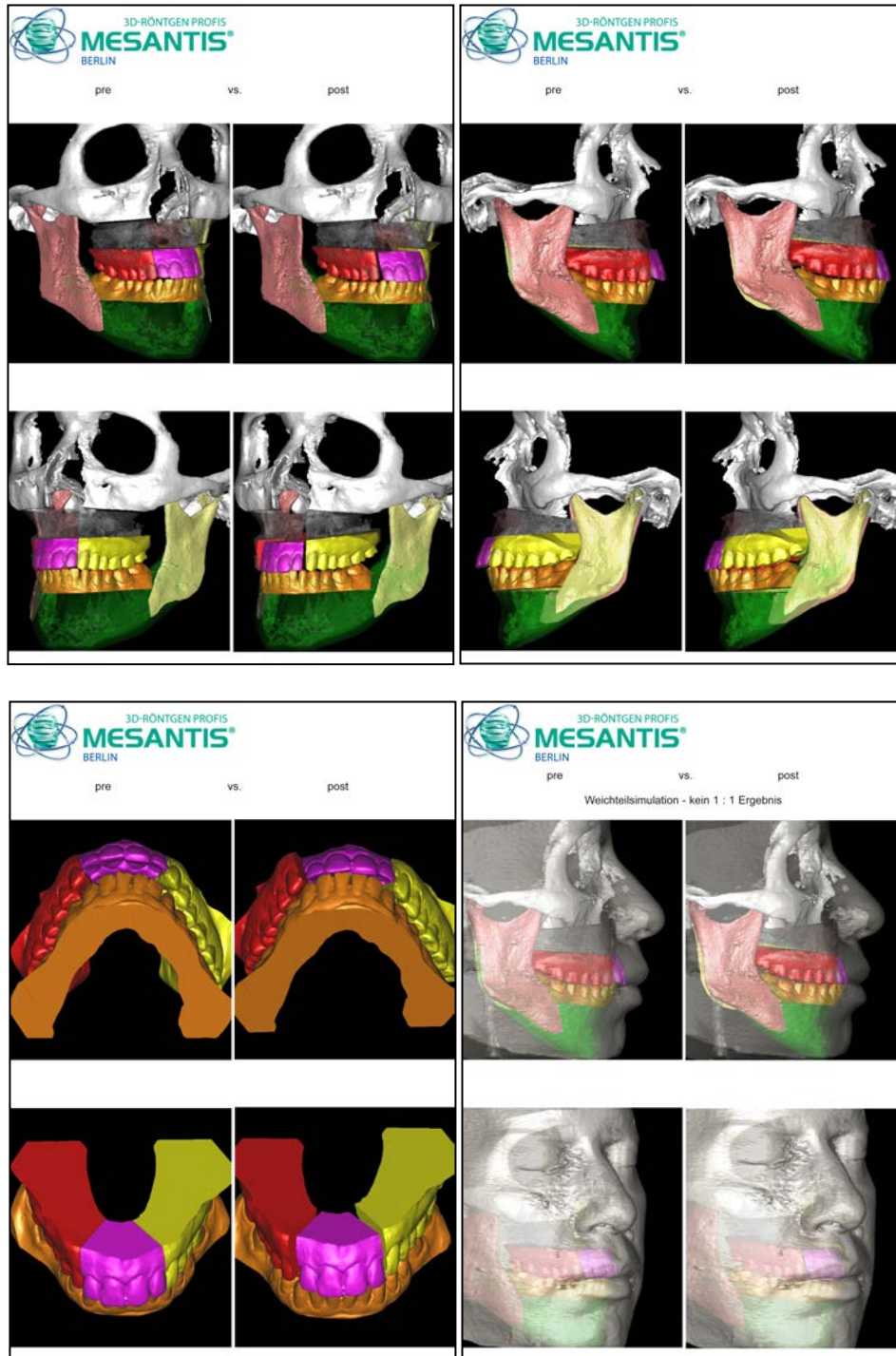
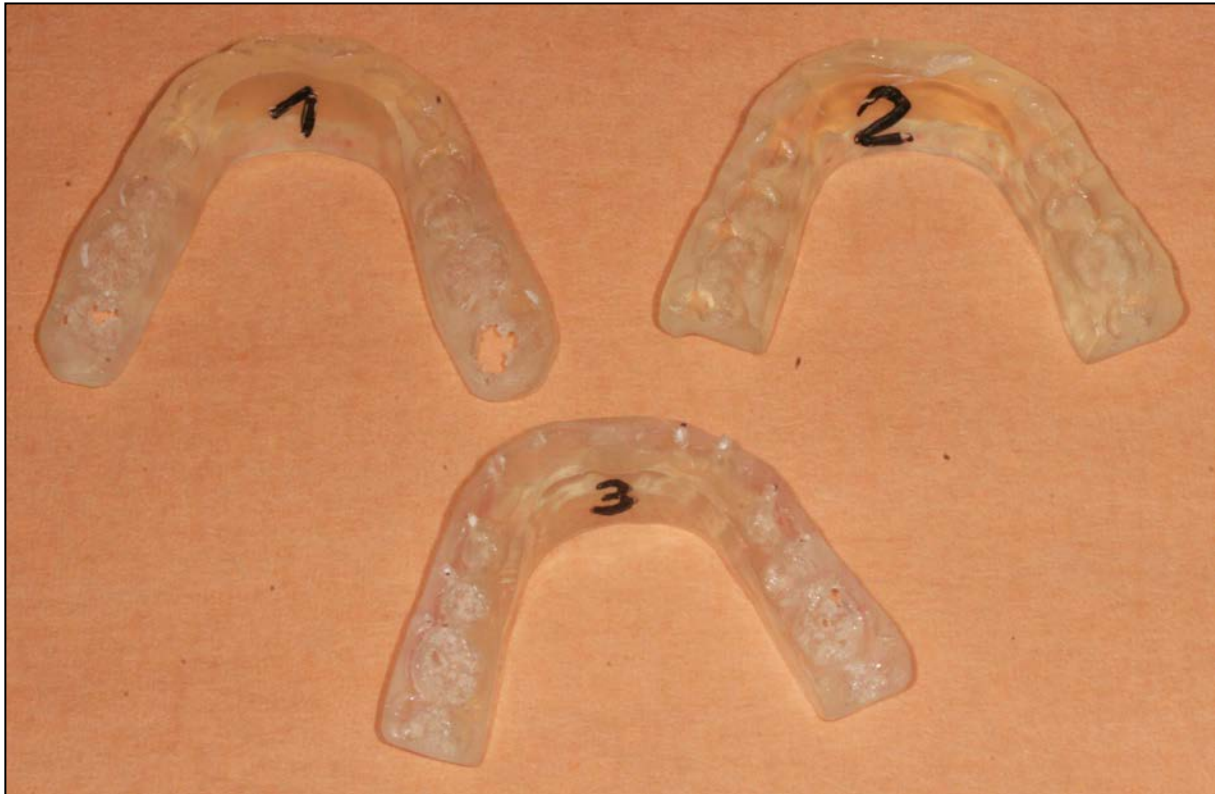


Abbildung 11: Klinisches Beispiel der virtuellen Positionsänderungen der dento-alveolären Strukturen im Bezug auf das Kranium in fronto-lateraler (oben links) und lateraler Ansticht (oben rechts) sowie Änderung der isolierten Zahnbögen (unten links) und des virtuell berechneten Weichteilprofils in lateraler und fronto-lateraler Ansicht (unten rechts)



**Abbildung 12: CAD/CAM-gefertigte OP-Splinte für eine bimaxillär geplante orthognathe Chirurgie**

3. Die präoperative orthodontische Phase begann eine Woche vor der OP. In dieser Phase wurden die Brackets an beiden Kiefern befestigt. Außerdem wurden die OP-Splinte angepasst.

4. Während der OP dienten die CAD/CAM-generierten Splinte in einer festgelegten Reihenfolge der Positionierung der segmentierten Kieferanteile. Dabei dient der erste Splint zur Einstellung der Zentrik, er fixiert OK und UK einer zentrischen Kondylenposition. Der zweite Splint ermöglicht unter Fixierung des aufsteigenden Astes eine exakte Positionierung der neu geplanten OK-Situation. Letztendlich stellte der letzte Splint die exakt geplante Position des UKs zum OK ein. Trotz ossärer Fixierung über Miniplattensysteme wurde der finale Splint postoperativ als Retentionsschiene verwendet.

5. Wenige Wochen nach der OP wurden die ersten kieferorthopädischen Drähte einligiert, um das RAP für die Zahnbewegungen zu nutzen. Die Dauer der Phase richtete sich nach dem Umfang der durchzuführenden Zahnbewegungen, der Art und Reihenfolge der verwendeten Bögen sowie der individuellen Knochenumbaurate.

### **3.1.4 Erfassung des PAR-Index**

Alle Messungen wurden von einem Untersucher (Verfasser der vorliegenden Arbeit) im Befundungszentrum des MESANTIS® Instituts Berlin an DIN-genormten Befundungsmonitoren durchgeführt. Die technischen Parameter sind in Tabelle 9 aufgelistet.

**Tabelle 9: Technische Informationen des verwendeten Befundungsmonitors**

Abkürzungen: cd=Candela

<b>EIZO 3 Megapixel RadiForce™ R31 Monitor</b>	
Produktionsfirma	Avnet Technology Solutions GmbH, Nettetal, Deutschland
DIN	6868-57 für Anwendungskategorie B
Bildpunkte	1536 x 2048
Kontrastverhältnis	400:1
Helligkeit/Leuchtdichte	400 cd/m <sup>2</sup>

In den folgenden Abschnitten wird die Erhebung der Komponenten des PAR-Index theoretisch erklärt. Auf dieser Grundlage wurden alle Werte der vorliegenden Dissertation erhoben – in Zentimetern auf die erste Dezimalstelle nach dem Komma gerundet. Der PAR-Index setzt sich, wie in Kapitel 1.5 beschrieben, aus fünf Komponenten (oberes und unteres anteriores Segment, linke und rechte bukkale Okklusion, sagittaler Überbiss, vertikaler Überbiss, Mittellinie; siehe Tabelle 2) zusammen, welche in dieser Arbeit ausschließlich mit den britischen Wichtungsfaktoren von Richmond et al. (1992a) multipliziert und anschließend addiert wurden. Außerdem wird die Bedeutung und die Auswertung prä- und posttherapeutischen PAR-Index-Werte erläutert.

### 1. Oberes und unteres anteriores Segment

Beide Segmente reichen vom mesialen Kontaktpunkt des linken Eckzahns zum mesialen Kontaktpunkt des rechten Eckzahns. Gemessen wird die kürzeste Distanz aller benachbarten Zähne zwischen den anatomisch approximalen Kontaktpunkten parallel zur Okklusionsebene. Dabei werden Engstände, Weitstände und impaktierte Zähne erfasst. Große Distanzen bedeuten hohe Punktwerte und umgekehrt. Fehlende Zähne werden nicht als Lücken beurteilt. Für einen impaktierten Zahn existiert jedoch ein spezieller Punktwert, wenn die an den impaktierten Zahn angrenzenden Nachbarzähne einen Abstand von  $\leq 4$ mm besitzen. Die Summe der kontaktpunktverlagerten und impaktierten Zähne ergibt einen Gesamtwert für jedes anteriore Segment. Die Gesamtwerte des OKs und des UKs gehen in die Wertung ein und bilden zusammen die Komponente Kontaktpunktverlagerung (siehe Tabelle 10).

**Tabelle 10: Auflistung der Punkteverteilung der Kontaktpunktverlagerung im PAR-Index**

<b>Kontaktpunktverlagerung</b>	<b>Punktzahl</b>
0 mm bis 1 mm	0
1,1 mm bis 2 mm	1
2,1 mm bis 4 mm	2
4,1 mm bis 8 mm	3
größer als 8 mm	4
impaktierter Zahn (Lücke $\leq 4$ mm)	5

## 2. Linke und rechte bukkale Okklusion

Die bukkale Okklusion wird vom Eckzahn bis zum letzten Molaren in allen drei Raumebenen (sagittal, vertikal und transversal) beurteilt. Ausgeschlossen werden gerade durchbrechende Zähne, Weißheitszähne und Milchzähne in Infraposition. Der OK und der UK werden gemeinsam bewertet, daher werden jeweils drei Werte für die linke und für die rechte Okklusion bestimmt. Die sechs Werte werden addiert und ergeben die Komponente „bukkale Okklusion“ (siehe Tabelle 11).

**Tabelle 11: Auflistung der Punktwertverteilung der bukkalen Okklusion im PAR-Index in der sagittalen, vertikalen und transversalen Ebene**

Abkürzungen: Pb=Prämolar

Sagittal	Pkt.	vertikal	Pkt.	transversal	Pkt.
gute Okklusion (I, II oder III)	0	kein offener Biss	0	kein Kreuzbiss	0
weniger als eine halbe Pb	1	lateral offener Biss (mindestens an 2 Zähnen >2mm)	1	Kreuzbisstendenz	1
mehr als eine halbe Pb	2			Einzelzahn-Kreuzbissverzahnung	2
				Kreuzbiss an mehr als einem Zahn	3
				mehr als ein Zahn in bukkaler oder linguale Nonokklusion	4

## 3. Sagittaler Überbiss (Overjet)

Der sagittale Überbiss bezieht sich auf alle Schneidezähne, wobei die am weitesten vorstehende Schneidekante in die Wertung eingeht. Das Messinstrument wird parallel zur Okklusionsebene angelegt. Die Messrichtung wird entsprechend des Radius des Zahnbogens gewählt. Im Kreuzbiss stehende Frontzähne werden gesondert beurteilt und zusätzlich zu den Overjet-Punktzahlen addiert. Des Weiteren werden auch Eckzähne in Kreuzbissverzahnung bewertet (siehe Tabelle 12).

**Tabelle 12: Auflistung der Punktwertverteilung des sagittalen Überbisses (Overjet) im PAR-Index**

Sagittaler Überbiss (Overjet)	Pkt.	Anteriorer Kreuzbiss	Pkt.
0 bis 3 mm	0	kein Kreuzbiss	0
3,1 bis 5 mm	1	ein oder mehrere Zähne im Kopfbiss	1
5,1 bis 7 mm	2	ein einzelner Zahn im Kreuzbiss	2
7,1 bis 9 mm	3	zwei Zähne im Kreuzbiss	3
größer als 9 mm	4	mehr als zwei Zähne im Kreuzbiss	4



#### 4. Vertikaler Überbiss (Overbite)

Der vertikale Überbiss bezieht sich auf alle Schneidezähne, wobei nur die größte Distanz der Schneidekanten in die Wertung eingeht. Gemessen wird von der OK-Schneidekante zur UK-Schneidekante. Dabei können positive Werte für einen offenen Biss und negative Werte für einen tiefen Biss vorkommen (siehe Tabelle 13).

**Tabelle 13: Auflistung der Punktwertverteilung des vertikalen Überbisses (Overbite) im PAR-Index**

offener Biss	Pkt.	vertikaler Überbiss (Overbite)	Pkt.
kein offener Biss	0	weniger als ein Drittel Überdeckung der unteren Schneidezähne	0
offener Biss $\leq 1$ mm	1	zwischen ein Drittel und zwei Drittel Überdeckung	1
offener Biss 1,1 mm bis 2 mm	2	mehr als zwei Drittel Überdeckung	2
offener Biss 2,1 mm bis 4 mm	3	Überdeckung der gesamten Zahnkrone	
offener Biss $\geq 4$ mm	4		

#### 5. Mittellinie

Hier wird die Mittellinienabweichung zwischen der oberen und unteren dentalen Mittellinie bestimmt. Ein Viertel der UK-Schneidezahnbreite wird dabei als 1,5mm angenommen und die Hälfte somit als 3mm (siehe Tabelle 14).

**Tabelle 14: Auflistung der Punktwertverteilung des vertikalen Überbisses (Overbite) im PAR-Index**

Mittellinie	Pkt.
Übereinstimmung oder Abweichung bis 1/4 der UK-1er-Zahnbreite	0
Abweichung zwischen 1/4 und 1/2 der UK-Incisivi-Zahnbreite	1
Abweichung mehr als eine UK-1er-Zahnbreite	2

Meist wird der PAR-Index an Anfangs- und Abschlussmodellen bestimmt. Als Höchstwert ist eine Summe von 120 möglich, praktisch werden jedoch selten Werte über 50 erreicht. Der PAR-Wert wird vor Beginn einer Behandlung als prä-PAR und nach Beendigung der Behandlung als post-PAR bezeichnet. Es existieren unterschiedliche Ansätze, den Erfolg einer Behandlung mittels PAR-Index zu bewerten (siehe Kapitel 1.5).

#### 3.1.5 Ablauf und Durchführung von Modell-Scan und Messung

Der ursprünglich für die Anwendung an Gipsmodellen entwickelte PAR-Index wurde analog mittels eines speziellen PAR-Index-Lineals (Ruler) bestimmt, der alle Parameter enthält. Die Messungen nahmen durchschnittlich drei Minuten für ein Modellpaar in Anspruch. Durch die

voranschreitende Technik und durch die Zunahme von digitalen Datenbanken mit papierlosem fotografischem und radiografischem Bildmaterial steigt der Bedarf an einer digitalen Veranschaulichung der Modelle, an denen kieferorthopädische und chirurgische Behandlungen geplant und prä- und posttherapeutische Zustände miteinander verglichen werden können. Der PAR-Index an digitalisierten Modellen liefert valide und reliable Informationen zu Malokklusion an Gipsmodellen (Mayers et al. 2005; Stevens et al. 2006; Andrews 2008).

Die durch Alginat oder Silikon abgeformten Kiefer wurden mit KFO-Hartgips Typ III ausgegossen. Die Modellpaare wurden durch Wachsbissregistratur in habitueller Interkuspitation einander zugeordnet. Für möglichst genaue Messungen mit der kieferorthopädischen Software 3Shape OrthoAnalyzer™ mussten die Modelle nach den kieferorthopädischen Standards in allen drei Raumebenen ordnungsgemäß getrimmt werden. Zunächst wurden die Modelle entsprechend der Okklusionsebene parallel zur Tischebene getrimmt. Die Okklusionsebene wurde als Ebene durch den Inzisalpunkt und die distobukkalen Höcker der zweiten UK-Molaren definiert. Danach wurde die Raphe-Median-Ebene festgelegt, die durch den Abgang des zweiten Gaumenfaltenpaares von der Raphe palatina und den Übergang des harten zum weichen Gaumen auf der Raphe bzw. den Mittelpunkt zwischen den paarigen Foveolae neben der Raphe aufgespannt wurde. Die Tuberebene, die durch den am weitesten distal liegenden Tuber maxillae verläuft, wurde senkrecht zur Raphe-Median-Ebene ausgerichtet. Abschließend wurden die Modelle mittels des Wachsbisses zugeordnet und so getrimmt, dass alle drei Raumebenen senkrecht zueinander standen. Die vertikale Stellfläche konnte benutzt werden, um die primär festgelegte Okklusion sicher aufzufinden. Die parallel zur Okklusionsebene getrimmten Modellunterseiten dienten der Orientierung von Messinstrumenten bei der Vermessung des PAR-Index mit der kieferorthopädischen Software 3Shape OrthoAnalyzer™. Die in der Okklusion fixierten Modellpaare wurden mit dem Dental Scanner - Orthodontic 3D Scanner R700™ der Firma 3Shape - erfasst (siehe Abbildung 13). Der Orthodontic 3D Scanner R700™ arbeitet auf der Basis des Laserschnittverfahrens in Kombination mit zwei hochauflösenden Kameras. Die zu scannende Modellsituation wurde in allen drei Raumachsen auf einem rotierenden Teller (360° Rotation) und zusätzlich auf einer Translations- und einer Kippachse bewegt (siehe Abbildung 14). Damit sollte eine optimale Abbildung der 3D-Geometrie sichergestellt werden. Der Scanner benötigt keine speziellen Gipsarten, da die Scanner-Parameter automatisch auf das Objektmaterial eingestellt werden. Laut Herstellerangaben liegt die Detailwiedergabe der Oberfläche nach einem Scan-Vorgang im Bereich von unter 20µm.



Abbildung 13: Außenansicht des Dental Scanners - Orthodontic 3D Scanner R700™ der Firma 3Shape

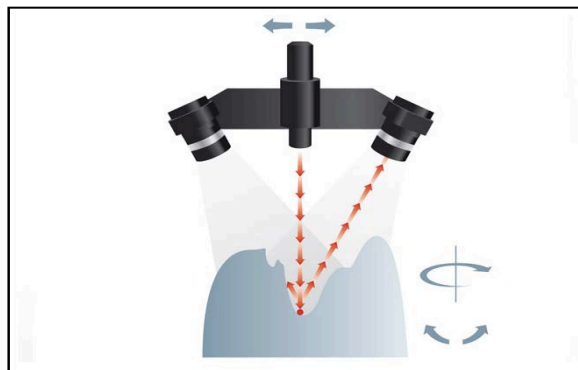


Abbildung 14: Grafische Darstellung der Arbeitsweise des Dental Scanners - Orthodontic 3D Scanner R700™ der Firma 3Shape - nach dem Prinzip des Laserschnittverfahrens in Kombination mit zwei hochauflösenden Kameras

Zur Erhaltung der Messgenauigkeit wurde der Scanner vor jedem Scan-Vorgang kalibriert. Der Scanner erzeugt ein unverschlüsseltes Standardformat (offene „*standard template library*“, STL), das gut archivierbar und für die Analysesoftware zugänglich ist oder zur Online-Kommunikation gebraucht werden kann. Die Bestimmung der einzelnen PAR-Komponenten erfolgte mit dem Zusatzmodul Ortho Analyzer™ der Firma 3Shape. Diese spezielle kieferorthopädische Analyse-Software ist mit dem Scan-Programm von 3Shape kompatibel. Sie ermöglicht dem Nutzer, virtuelle Setups zu erstellen und Behandlungspläne zu exportieren. Darüberhinaus stellt sie eine große Anzahl von Analyseobjekten wie Längen- und Winkelbestimmungen, Hilfsebenen, Raster und auch halbautomatische Overjet- und Overbite-Messinstrumente zur Verfügung. Der Scan-Vorgang pro Modell dauerte ca. zwei Minuten. Im Anschluss wurden die Modelle in habitueller Okklusion eingescannt. Bei nicht eindeutiger Zuordnung der Modelle konnten sie auch mittels Bissregistrator gescannt werden. Im Unterschied zur analogen Messung mittels PAR-Ruler mussten für die hier durchgeführten digitalen Messungen durchschnittlich 15 bis 30 Minuten je Modellpaar eingeplant werden, was einem fünf- bis zehnfachen Zeitaufwand entspricht. Die erhobenen Werte wurden in das Tabellenkalkulationsprogramm MS Excel® 2010 von Microsoft® (Unterschleißheim, Deutschland) eingetragen.

## 1. Kontaktpunktverlagerung

Zur Erfassung der Kontaktpunktverlagerung wurden die zur Okklusionsebene getrimmten Modelle mit einem Messschieberinstrument vermessen, welches die Messung parallel zur Okklusionsebene ausrichtet. Die die Messstrecken begrenzenden Punkte wurden zwischen den anatomischen approximalen Kontaktpunkten gesetzt (siehe Abbildung 15).

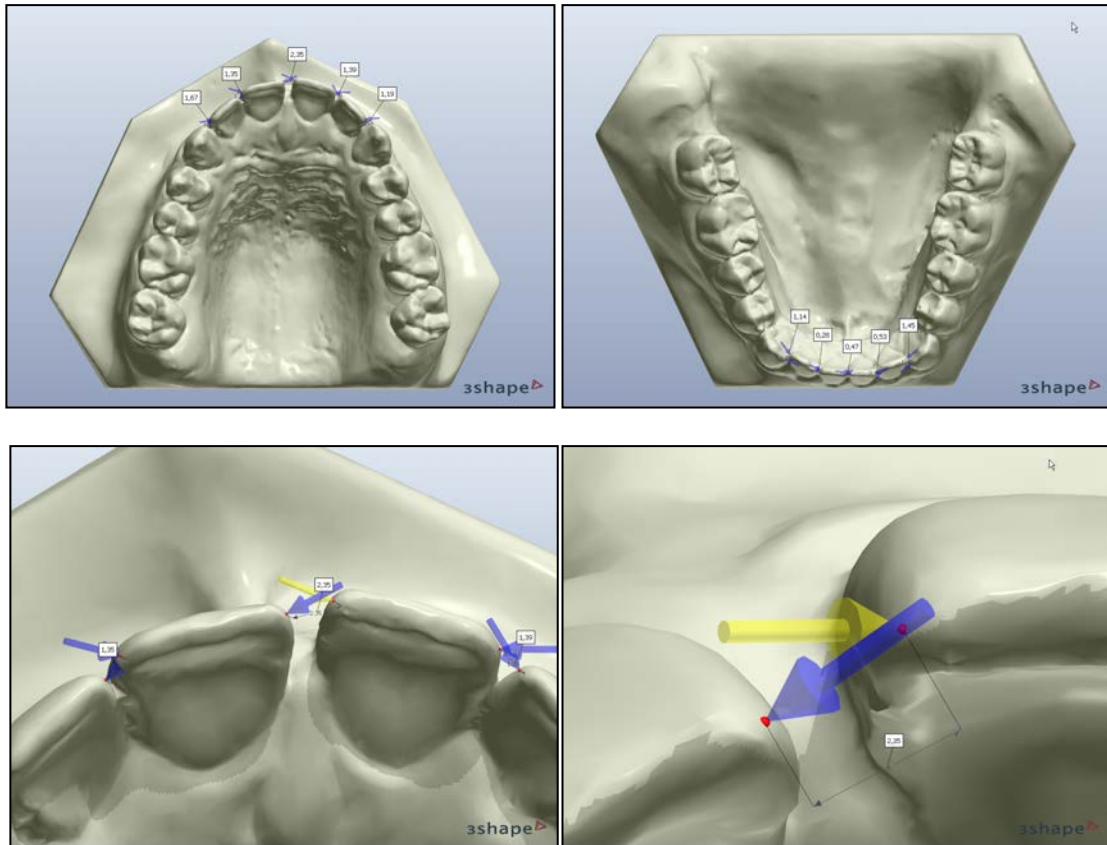
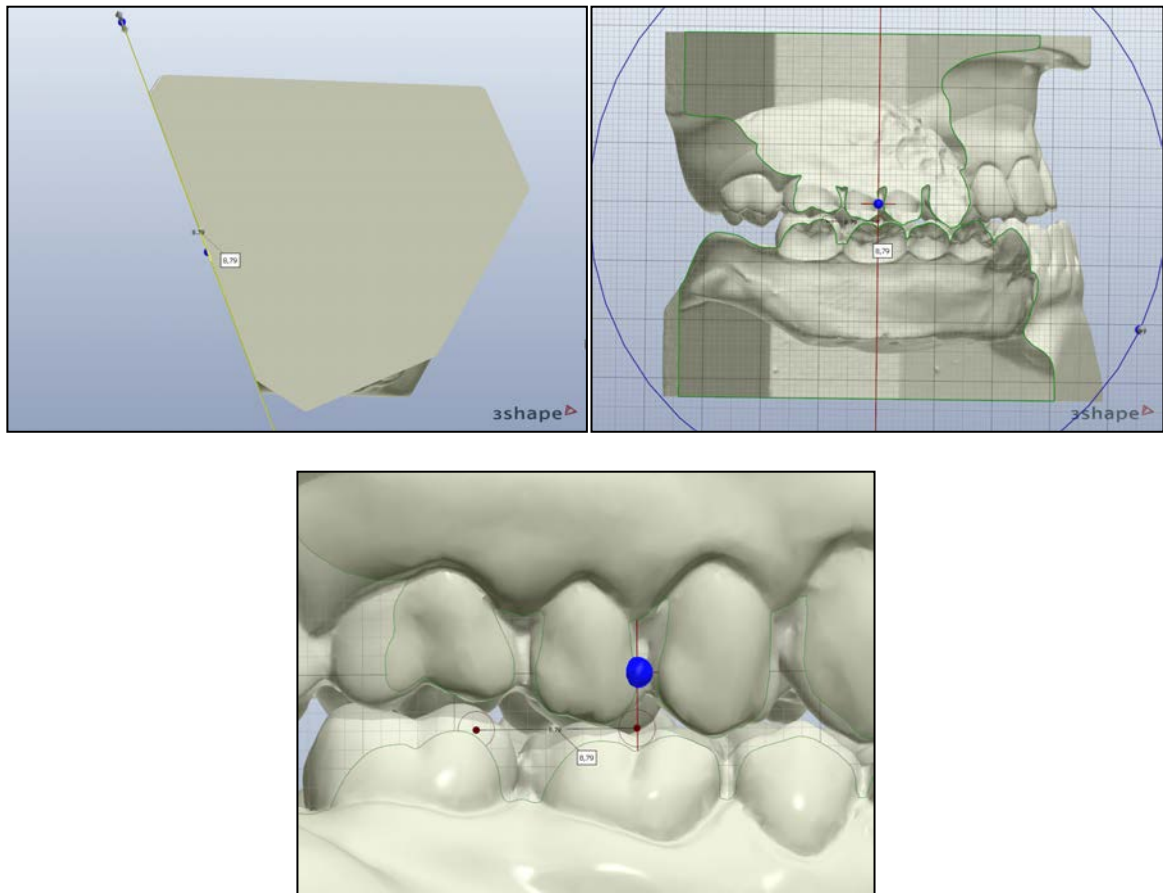


Abbildung 15: Darstellung der Messung der Kontaktpunktverlagerung mit der kieferorthopädischen Software 3Shape OrthoAnalyzer™

## 2. Rechte und linke bukkale Okklusion

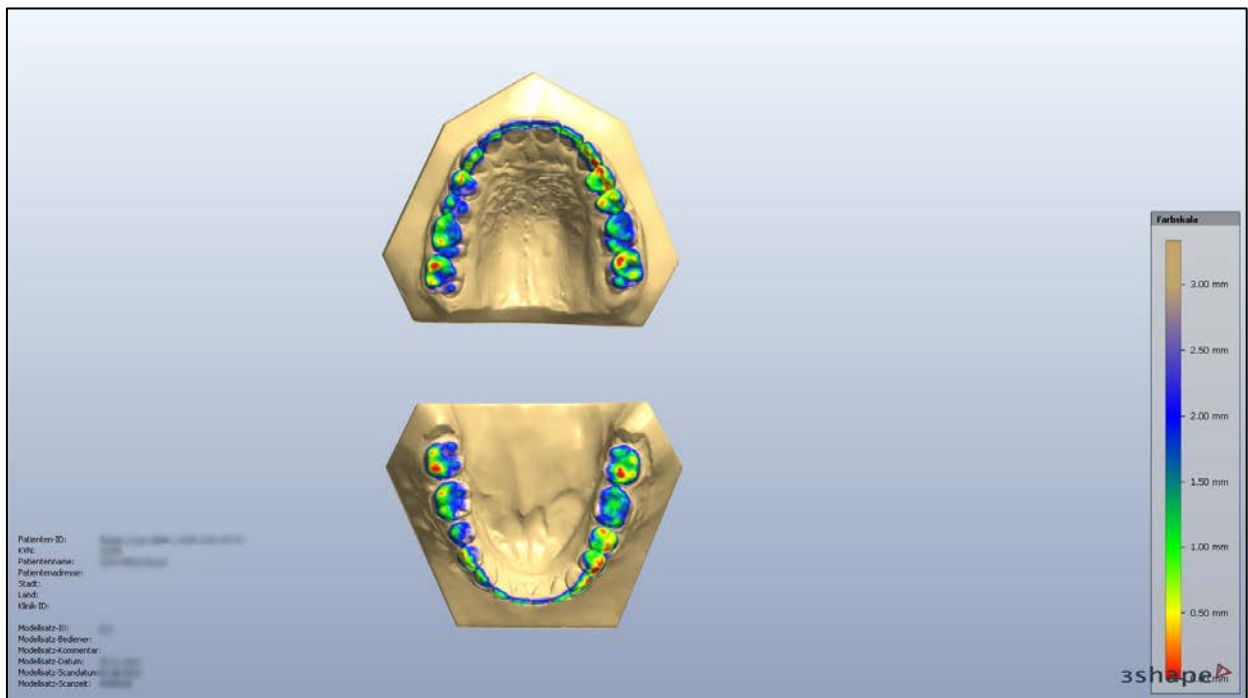
Sagittal: In der Sagittalen wurde eine Clipping-Ebene senkrecht zur Okklusionsebene und weitestgehend parallel zum seitlichen Zahnbogen ausgerichtet. Das Raster der Clipping-Ebene wurde im nächsten Schritt parallel zu den äußeren Modellkanten ausgerichtet und so nah wie möglich an die zu messenden Strukturen gebracht, um Verzerrungen der Messstrecken zu vermeiden. Nach der Ausrichtung der Ebene senkrecht zur Okklusionsebene und des Rasters der Ebene parallel dazu, wurde die Okklusionsebene in der Sagittalen so verschoben, dass sie die entsprechenden Messpunkte fast schnitt (mesialer Höcker des ersten Molaren im OK und Fissur zwischen mesialen und distalen Höcker des ersten Molaren im UK). Durch die Annäherung der Ebenen konnte in einer Ebene gemessen werden, wodurch Verzerrungen minimiert wurden. Gemessen wurde entlang des Rasters, parallel zur Okklusionsebene. Im Anschluss wurde die mittlere Prämolarenbreite bestimmt und ins Verhältnis zur gemessenen Okklusions-

abweichung im Seitenzahnggebiet gesetzt. Der Wert für die bukkale Okklusion in der Sagittalen wurde für die rechte und linke Seite notiert (siehe Abbildung 16).



**Abbildung 16: Messmethode der bukkalen Okklusion in der sagittalen Ebene mit der kieferorthopädischen Software 3Shape OrthoAnalyzer™**

Vertikal: Die verwendete Software *3Shape OrthoAnalyzer™* beinhaltet ein Instrument, das interokklusale Abstände der Zahnreihen nach der Größe farblich markiert. Beispielsweise stehen rote okklusale Flächen für einen direkten Kontakt zu einem Antagonisten, gelbe für einen Abstand von 0,5mm und grüne für einen Abstand von 1mm. Die Übergänge sind fließend. Der Übergang von blau zu violett entspricht einem Abstand >2mm. Tritt ein solcher Abstand an mindestens zwei Zähnen pro Seite auf, wird der Punktwert für einen offenen Biss in der bukkalen Okklusion in der Vertikalen gewählt (siehe Abbildung 17).



**Abbildung 17: Messmethode der bukkalen Okklusion in der vertikalen Ebene mit der kieferorthopädischen Software 3Shape OrthoAnalyzer™**

Transversal: In der Software *3Shape OrthoAnalyzer™* ist eine Clipping-Ebene integriert, die den gesamten Zahnbogen durchwandert und in einem Schnittdiagramm die transversalen Verhältnisse der Zähne grafisch darstellt. In der Regel ist eine optische Betrachtung im 3D-Bereich für die Beurteilung, ob eine Kreuzbisstendenz, ein Einzelzahnkreuzbiss, Kreuzbisse an mehreren Zähnen oder eine bukkale oder linguale Nonokklusion besteht, völlig ausreichend (siehe Abbildung 18).

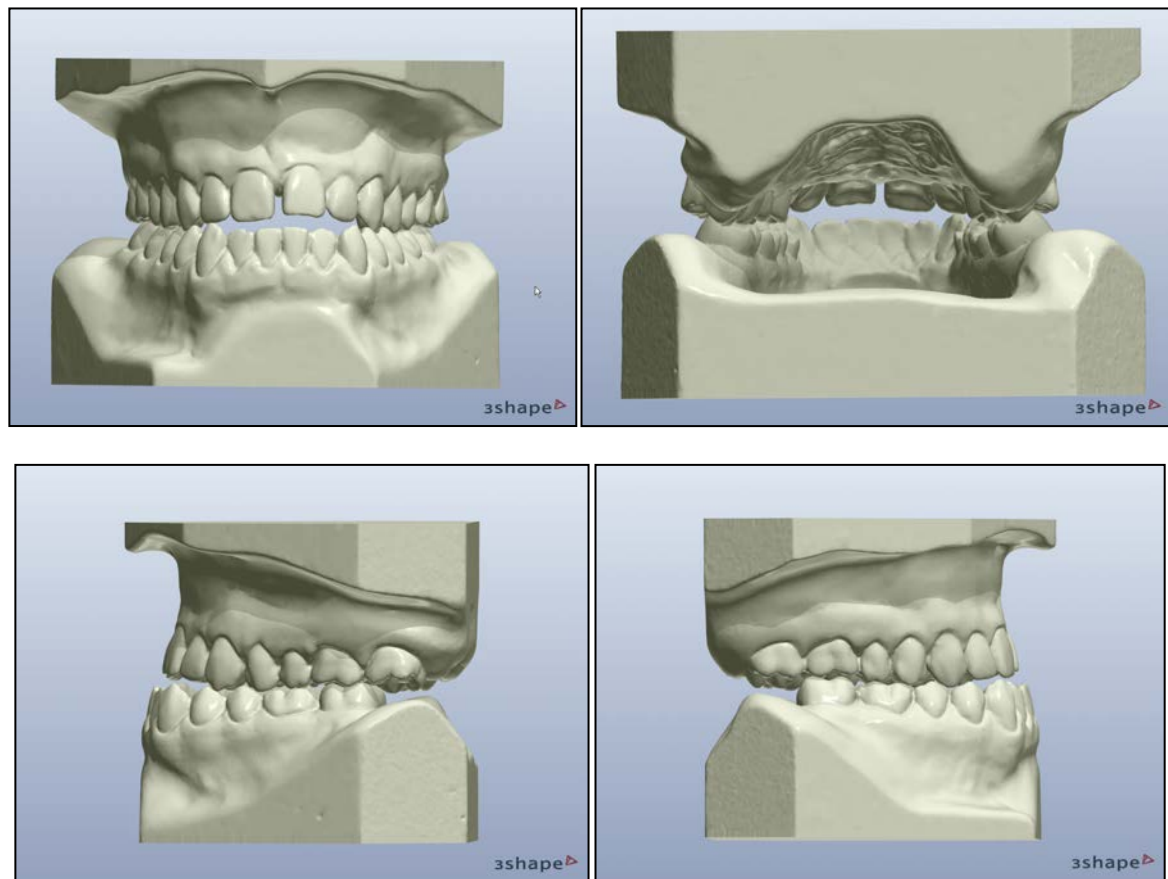
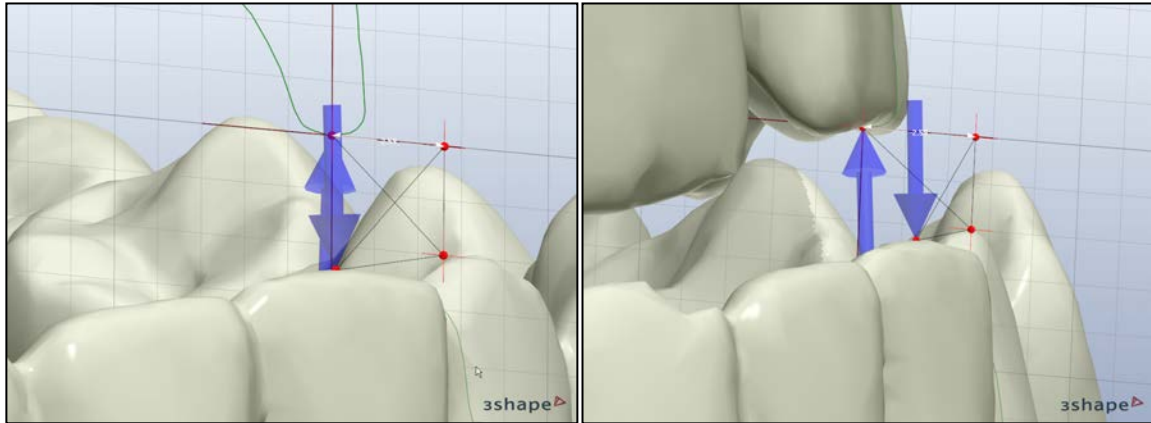


Abbildung 18: Messmethode der bukkalen Okklusion in der vertikalen Ebene mit der kieferorthopädischen Software 3Shape OrthoAnalyzer™

### 3. Sagittaler Überbiss (Overjet)

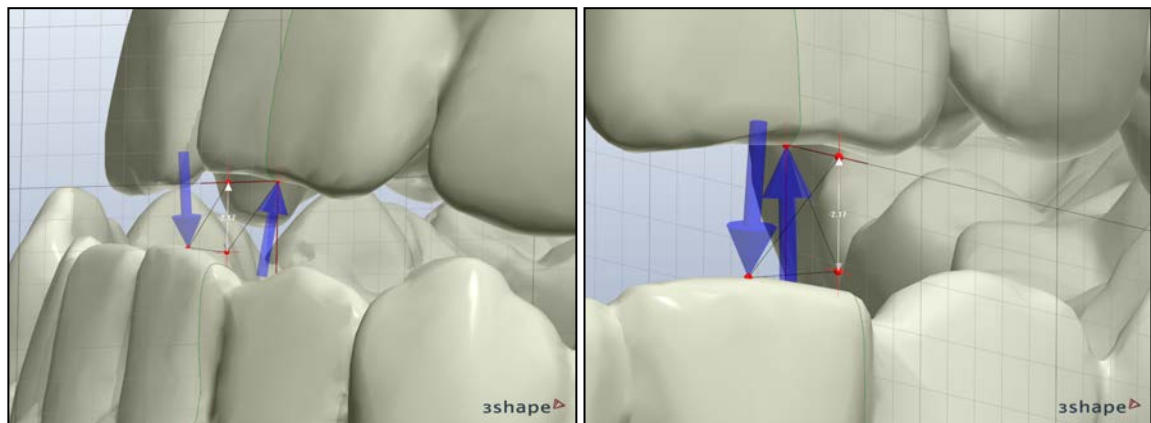
Die Software *3Shape OrthoAnalyzer™* ist ein hilfreiches Werkzeug zur Messung des sagittalen Überbisses (siehe Abbildung 19). Das Programm erkennt die Frontzähne automatisch und richtet, nach Auswahl des zu beurteilenden Zahnes, die Messebene entsprechend des Radius des Zahnbogens aus. Die beiden Messpunkte auf der OK-Schneidezahnkante und UK-Schneidezahnkante bzw. Fazialfläche der UK-Frontzähne wurden manuell gewählt. Der Overjet wurde automatisch errechnet. Da nur der am stärksten ausgeprägte Overjet in die Wertung eingeht, wurden bei nicht eindeutigen Verhältnissen alle Schneidezahnpaare durchgemessen. Die ebenfalls in die Wertung einfließenden Kreuzbisse wurden visuell beurteilt.



**Abbildung 19:** Messmethode des horizontalen Überbisses (Overjet) mit der kieferorthopädischen Software 3Shape OrthoAnalyzer™

#### 4. Vertikaler Überbiss (Overbite)

Auch bei der Bestimmung des vertikalen Überbisses ist die Software *3Shape OrthoAnalyzer™* ein hilfreiches Werkzeug. Die Zähne wurden erneut automatisch erkannt und die Messebenen automatisch ausgerichtet. Die Punkte an den Schneidekanten wurden manuell gesetzt. Da wiederum die größte Abweichung in die Wertung einging, wurden alle Schneidezähne analysiert. Bestand ein offener Biss, entschied die Größe der Abweichung in mm über den zu vergebenen Punktwert. Beim Tiefbiss wurde außerdem die Strecke von der Schneidekante bis zum tiefsten Punkt des Sulkus gemessen. Das Verhältnis zwischen Überdeckung und sichtbarem Zahn bestimmte die Punktevergabe (siehe Abbildung 20).



**Abbildung 20:** Messmethode des vertikalen Überbisses (Overbite) mit der kieferorthopädischen Software 3Shape OrthoAnalyzer™

#### 5. Mittellinie

Zur Erfassung der Mittellinienabweichung wurde eine Clipping-Ebene senkrecht zur Okklusionsebene gewählt, die die Modelle in anterior-posteriorer Richtung durchwanderte. Das Raster dieser Ebene wurde parallel zu den Modellaußenkanten ausgerichtet. Das Messinstrument wurde approximal zwischen die mittleren Frontzähne gebracht. Mittels Längenmessinstrument konnte die interdentalen Mittellinienabweichung erfasst werden. Außerdem wurde die mittlere



Breite der UK-Frontzähne bestimmt. Das Verhältnis zwischen der mittleren UK-Frontzahnbreite und der dentalen Mittellinienabweichung war für die Punktvergabe wichtig (siehe Abbildung 21).

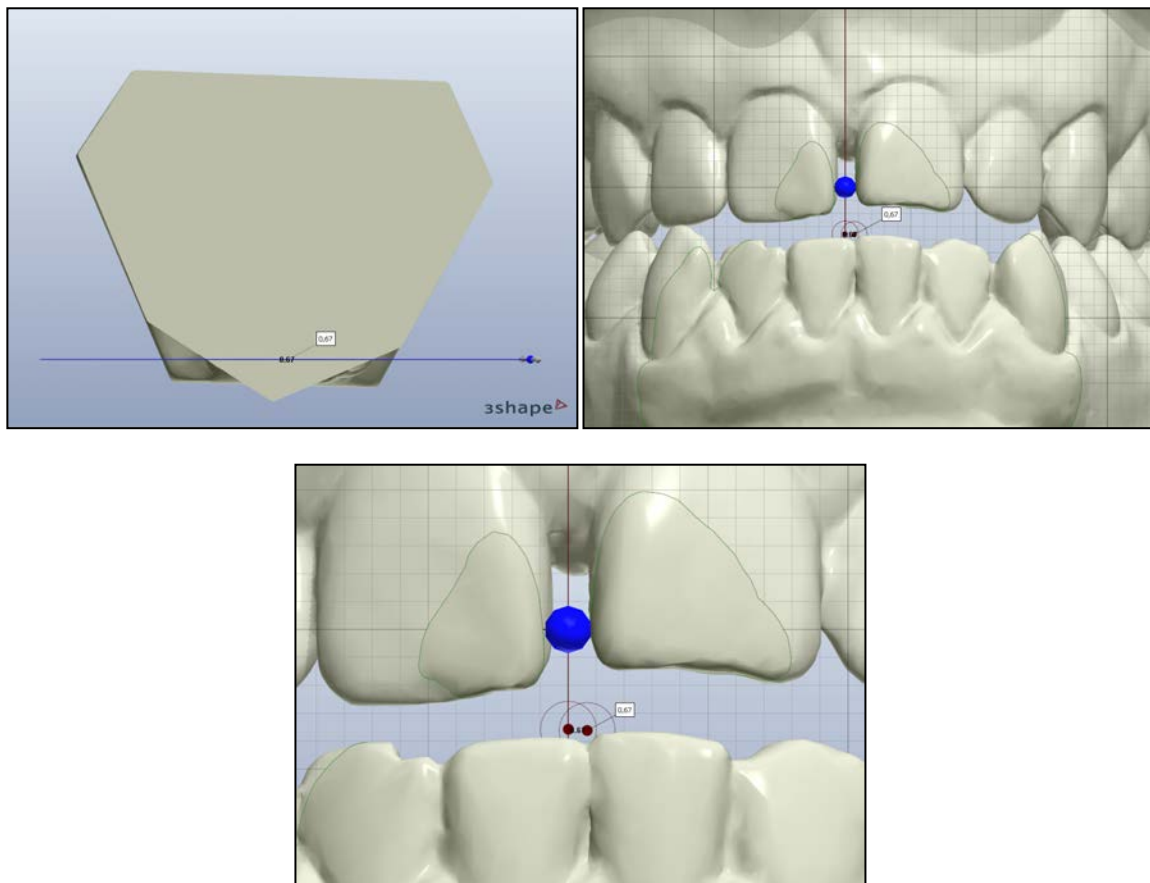


Abbildung 21: Messmethode der Mittellinienabweichung mit der kieferorthopädischen Software 3Shape OrthoAnalyzer™

## 3.2 Spezielle Methodik

### 3.2.1 Intraindividuelle Reproduzierbarkeit des PAR-Index/Fehleranalyse

Für die Bestimmung der intraindividuellen Reproduzierbarkeit des PAR-Index wurden nach der in Kapitel 3.1.4 aufgeführten Methode von allen 24 Patienten insgesamt sechs Messungen aller Komponenten an allen prä- und posttherapeutischen Gipsmodellen vom Autor der vorliegenden Dissertation durchgeführt. Auf eine Testung der interindividuellen Reproduzierbarkeit und der Validität des Index wurde verzichtet (Shaw et al. 1991; Richmond et al. 1992a; Buchanan et al. 1993; O'Brien et al. 1993). Somit wurde hier nur die interindividuelle Reproduzierbarkeit der beschriebenen Messmethode getestet.

Bei der folgenden Fehleranalyse wurde nur der zufällige Fehler betrachtet, da es im Grundsatz nicht möglich ist, den absoluten Fehler sowie die wirkliche Größe eines Messwertes zu bestimmen (Sachs & Hedderich 2009). Zu den zufälligen Fehlerquellen zählte die Eingabe von

digitalen Messpunkten, die von den anatomischen Punkten abwichen. Auch die optische Betrachtung von okklusalen Verhältnissen an digitalisierten Modellen kann zu unterschiedlichen Ergebnissen führen (Houston 1983).

Zur statistischen Überprüfung der intraindividuellen Varianz wurde von allen in Tabelle 15 gelisteten Komponenten des PAR-Index der Methodenfehler nach Dahlberg (1940) und der Zuverlässigkeitskoeffizient nach Houston (1983) ermittelt.

**Tabelle 15: Komponenten des prä- und post-PAR-Index zur Ermittlung der absoluten bzw. absolut/prozentualen PAR-Veränderung**

Variable	
Präoperativer PAR-Index (prä-PAR)	Postoperativer PAR-Index (post-PAR)
Kontaktpunktverlagerung	Kontaktpunktverlagerung
Bukkale Okklusion	Bukkale Okklusion
Overjet	Overjet
Overbite	Overbite
Mittellinie	Mittellinie
absolute PAR-Veränderung (PAR-change (abs))	
absolute PAR-Veränderung in % (%PAR-change (abs))	

Der Methodenfehler ( $S_{e2}$ ) beschreibt die Reproduzierbarkeit einer Messung und entspricht in der vorliegenden Arbeit der Standardabweichung der sechs Einzelmessungen aller Patienten. Da sich die ursprüngliche Formel zur Berechnung des Methodenfehlers von Dahlberg auf Doppelmessungen bezieht, war eine Änderung der Formel erforderlich (Dahlberg 1940).

$$S_{e2} = \frac{1}{2nm} \sum_{i=1}^n d_i^2$$

$d_i$  = Standardabweichung der Messergebnisse des Individuums  $i$

$n$  = Anzahl der untersuchten Individuen

$m$  = Anzahl der Messwiederholungen

Ausreißer werden durch die Quadrierung der Differenzen bei der Bestimmung des Methodenfehlers besonders gut erfasst. Durch den Zuverlässigkeitskoeffizienten nach Houston konnte der Methodenfehler in Relation zur Gesamtvarianz betrachtet werden.

$$Houston = 1 - \frac{S_{e2}}{S_{t2}}$$

$S_{e2}$  = Methodenfehler nach Dahlberg

$S_{t2}$  = gesamte Varianz

Beim Ausbleiben eines Fehlers in den Messungen ist der Methodenfehler nach Dahlberg 0 und der Zuverlässigkeitskoeffizient nach Houston 1. Demnach bedeutet ein hoher Zuverlässigkeitskoeffizient, dass die Varianz der Messwiederholungen bei einzelnen Individuen verglichen mit

der Varianz zwischen den Individuen gering ist. Ein Wert  $\geq 0,97$  spricht für eine exakte Messmethode, Werte  $< 0,90$  dagegen für eine unzureichende Messmethode (Midtgård et al. 1974).

### **3.2.2 Prä- und posttherapeutischer PAR-Index (prä-PAR/post-PAR)**

Die Daten wurden mit den in Kapitel 3.1.4 und 3.1.5 dargestellten Messmethoden erfasst. Aus dem Datenpool wurden 24 gewichtete prä- und post-PAR-Werte verwendet und anhand von Mittelwerten und Standardabweichungen, Minima und Maxima sowie den Quartilen in Excel charakterisiert.

Die prä- und post-PAR-Werte wurden in SPSS mit dem nicht parametrischen Wilcoxon-Test für Paardifferenzen statistisch verglichen.

Weiter wurden die prä-PAR- und post-PAR-Werte in einem Monogramm/Scatterplot (siehe Kapitel 3.1.4) dargestellt.

### **3.2.3 PAR-Index bei mono- und bimaxillärer OP-Methode**

Die Daten wurden mit den in Kapitel 3.1.4 und 3.1.5 dargestellten Messmethoden erfasst. Die absoluten PAR-Veränderungen sowie die prozentual/absoluten PAR-Veränderungen wurden für monomaxilläre OPs-Maxilla, monomaxilläre OPs-Mandibula sowie bimaxilläre OPs getrennt ausgewertet. Der Vergleich zwischen den Gruppen erfolgte anhand von Mittelwerten und Standardabweichungen, Minima und Maxima sowie den Quartilen in Excel.

Die Daten der Gruppen wurden mit SPSS anhand des Kruskal-Wallis-Tests auf statistisch signifikante Unterschiede geprüft.

### **3.2.4 PAR-Index in unterschiedlichen skelettalen Klassen**

Die Daten wurden mit den in Kapitel 3.1.4 und 3.1.5 dargestellten Messmethoden erfasst. Die absoluten PAR-Veränderungen sowie die prozentual/absoluten PAR-Veränderungen wurden für die skelettalen Klassen der Patienten (siehe Kapitel 3.1.1; Tabelle 7) getrennt erhoben. Der Vergleich zwischen den Gruppen erfolgte anhand von Mittelwerten und Standardabweichungen, Minima und Maxima sowie den Quartilen in Excel. Die Daten der Gruppen wurden mit SPSS anhand des Kruskal-Wallis-Tests auf statistisch signifikante Unterschiede geprüft.

### **3.2.5 Vergleich der Behandlungsdauer bei Patienten mit VSF**

Die Behandlungsdauer wurde aus den Zeitpunkten Therapiebeginn, OP-Tag und Tag der Entfernung der festsitzenden Multibracket-Apparatur in Monaten und Tagen bestimmt und anhand von Mittelwert und Standardabweichung, Minimum und Maximum sowie den Quartilen in Excel charakterisiert. Die ermittelten Daten wurden mit Literaturdaten zu anderen Behandlungsmethoden verglichen.

### **3.2.6 Vergleich der Behandlungsdauer bei mono- und bimaxillärer OP-Methode**

Die Mittelwerte und Standardabweichungen, Minima und Maxima sowie die Quartile der Behandlungsdauer (siehe Kapitel 3.2.5) wurden für die Subgruppen mit verschiedenen OP-Methoden getrennt ausgewertet. Im Unterschied zu Kapitel 3.2.3 wurde nur zwischen mono- und bimaxillärer Methode unterschieden. Die Überprüfung auf signifikante Unterschiede erfolgte mit dem nicht parametrischen Mann-Whitney-Test in SPSS, der für den Vergleich zweier unabhängiger Stichproben geeignet ist.

### **3.2.7 Vergleich der Behandlungsdauer in unterschiedlichen skelettalen Klassen**

Die Mittelwerte und Standardabweichungen, Minima und Maxima sowie die Quartile der Behandlungsdauer (siehe Kapitel 3.2.5) wurden für die Subgruppen der präoperativen skelettalen Klasse getrennt ausgewertet. Die Daten der Gruppen wurden mit SPSS anhand des Kruskal-Wallis-Tests auf statistisch signifikante Unterschiede geprüft.

## **3.3 Statistische Auswertung**

Die an 48 Gipsmodellen erhobenen Daten wurden mit Hilfe des Tabellenkalkulationsprogramms Microsoft® Excel 2007 (Microsoft, Redmond, WA, USA) erfasst. Für die Durchführung der statistischen Berechnungen wurde das Programm IBM SPSS Statistics 21 (SPSS Inc. an IBM Company, Chicago, IL, USA) verwendet.

Zunächst wurden der prä- und post-PAR-Index sowie die Parameter PAR-Veränderung absolut und prozentual anhand von Mittelwert und Standardabweichung, Minimum und Maximum sowie den 25%- und 75%-Quartilen charakterisiert und ihre Verteilung mit Hilfe von Whisker-Box-Plots (siehe Abbildung 22) grafisch dargestellt. Nach Sortierung der Daten in aufsteigender Reihenfolge wurden zunächst die Quartile bestimmt. Für das 25%-Quartil gilt, dass sich 25% der Werte unterhalb und 75% oberhalb des Wertes befinden, für das 75%-Quartil liegen 75% der Werte oberhalb und nur noch 25% unterhalb des Wertes. Der Interquartilabstand wurde durch die Box dargestellt. Die Berechnung der Quartile erfolgte in Abhängigkeit von der Anzahl der Werte ( $n$ ) des Datensatzes. Somit gilt:  $X\text{-Quartil} = x/100 \cdot n$ . Die waagerechte Linie innerhalb der Box gibt den Medianwert an. 50% der Datenwerte sind kleiner oder gleich diesem Kennwert. Die dünnen Linien ober- und unterhalb der Boxen (Whisker) stellen den größten bzw. kleinsten Wert der gesamten Menge dar. Ausreißer werden durch Punkte und extreme Ausreißer durch Sterne gekennzeichnet. Der Abstand zwischen dem oberen und unteren Whisker bzw. zwischen den Extremwerten werden als Spannweite bezeichnet und charakterisieren den gesamten Wertebereich des Datensatzes (Lange & Bender 2007).

Für die weiteren statistischen Berechnungen wurden Mittelwert und Standardabweichung wie folgt berechnet:

Definition des Mittelwertes:

$$\bar{x} = \frac{\text{Summe aller x-Werte}}{\text{Anzahl aller x-Werte}} = \frac{\sum x_i}{n}$$

Um die Streuung der errechneten Mittelwerte zu beschreiben, wurde die Standardabweichung  $s$  berechnet. Diese wiederum ergibt sich aus der Quadratwurzel der Varianz.

$$s^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1} ; \quad s = \sqrt{s^2}$$

$x_{\min}$  : kleinster x-Wert einer Messserie

$x_{\max}$  : größter x-Wert einer Messserie

Weil parametrische Tests normal verteilte Daten voraussetzen, wurden die vorliegenden Datensätze mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung geprüft. Der Kolmogorov-Smirnov-Test ist ein explorativer statistischer Test, durch den die Gleichheit zweier Wahrscheinlichkeitsverteilungen geprüft werden kann. Normalverteilung wird durch eine kontinuierliche Wahrscheinlichkeitsverteilung charakterisiert. Diese liegt vor, wenn p-Werte  $>0,05$  sind. Beim post-PAR stellten sich signifikante Abweichungen von einer Normalverteilung heraus ( $p=0,003$ ).

$$KOLMOGOROV-SMIRNOFF (Z-Tail)(KS-Z) \quad \hat{D} = \frac{\max |F_B - F_E|}{n}$$

Im weiteren Verlauf erfolgte der Vergleich unabhängiger Stichproben mit dem Mann-Whitney-U-Test oder Kruskal-Wallis-Test. Der Mann-Whitney-U-Test ist ein nicht-parametrischer Test, der untersucht, ob sich zwei Stichproben signifikant voneinander unterscheiden. Der Kruskal-Wallis-Test kann bei mehr als zwei Stichproben feststellen, ob signifikante Unterschiede vorliegen.

Zwei abhängige Stichproben, wie die Messungen des prä-PAR-Index und des post-PAR-Index, wurden mit dem Wilcoxon-Test für Paardifferenzen auf Unterschiede bzw. signifikante Verän-

derung geprüft. Der Wilcoxon-Test ist nicht-parametrisch und errechnet aus den absoluten Beträgen jeder Paardifferenz eine Rangfolge.

Es wurde stets zweiseitig getestet und ein Signifikanzniveau von 5% zugrunde gelegt. Bei der weiteren Betrachtung wurden die p-Werte wie folgt bewertet:

- $p > 0,05$  Unterschied ohne Signifikanz
- $p \leq 0,05$  Unterschied mit Signifikanz
- $p \leq 0,01$  Unterschied mit hoher Signifikanz
- $p \leq 0,001$  Unterschied mit höchster Signifikanz.

Eine Alpha-Adjustierung für multiple Testverfahren fand nicht statt, die Ergebnisse haben demnach explorativen und beschreibenden Charakter.

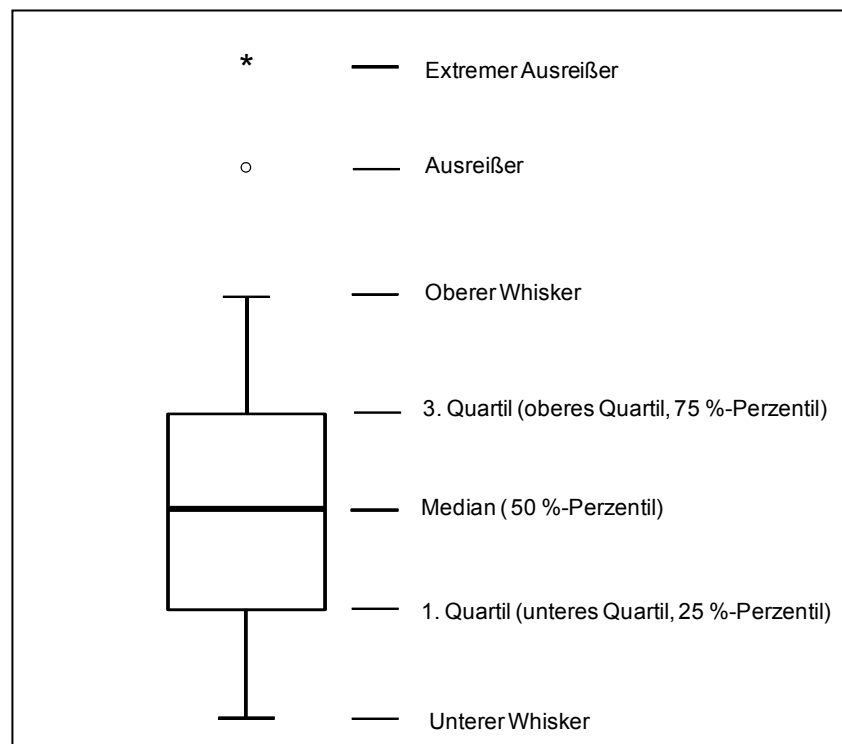


Abbildung 22: Aufbau eines Whisker-Box-Plots

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Intraindividuelle Reproduzierbarkeit des PAR-Index/ Fehleranalyse

Alle Messungen der Komponenten des prä- und post-PAR der 24 Patienten wurden vom Autor sechsmal wiederholt, mit dem Ziel, die intraindividuelle Reproduzierbarkeit zu bestimmen (siehe Kapitel 3.1.4 und Kapitel 3.2.1). Die Ergebnisse der Analyse sind in Tabelle 16 aufgeführt. Ein Methodenfehler nach Dahlberg trat ausschließlich bei Messungen der Komponente Kontaktpunktverlagerung beim prä-PAR-Index auf. Fehler bei der Bestimmung dieser Komponente beeinflussten außerdem die Messgenauigkeit der Variablen prä-PAR, PAR-Veränderung(abs) und die %-PAR-Veränderung(abs). Mit Werten von 0,0034 PAR-Punkten für prä-PAR und PAR-Veränderung(abs) bzw. 0,003% für die %-PAR-Veränderung(abs) fiel der Methodenfehler sehr gering aus, was für eine exakte Messmethode spricht. Diese These bestätigt auch der Zuverlässigkeitskoeffizient nach Housten (siehe Tabelle 16). Die Werte lagen alle oberhalb des Grenzwertes von 0,97, der als unterer Grenzwert für eine exakte Messung definiert ist. Mit 0,9998 näherten sie sich sogar weit dem Idealwert von 1 an. Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass die verwendete Messmethode äußerst genau und reproduzierbar misst.

**Tabelle 16:** r Methodenfehler nach Dahlberg und Zuverlässigkeitskoeffizienten nach Housten bei der Überprüfung der intraindividuellen Reproduzierbarkeit des PAR-Index

Variable	Dahlberg	Housten
Präoperativer PAR-Index		
Kontaktpunktverlagerung	0,0034	0,9998
Bukkale Okklusion	0,0000	1,0000
Overjet	0,0000	1,0000
Overbite	0,0000	1,0000
Mittellinie	0,0000	1,0000
PAR-Wert-Gesamt	0,0034	1,0000
Postoperativer PAR-Index		
Kontaktpunktverlagerung	0,0000	1,0000
Bukkale Okklusion	0,0000	1,0000
Overjet	0,0000	1,0000
Overbite	0,0000	1,0000
Mittellinie	0,0000	1,0000
PAR-Wert-Gesamt	0,0000	1,0000
PAR-change(abs)	0,0034	1,0000
%-PAR-change(abs)	0,0003	1,0000

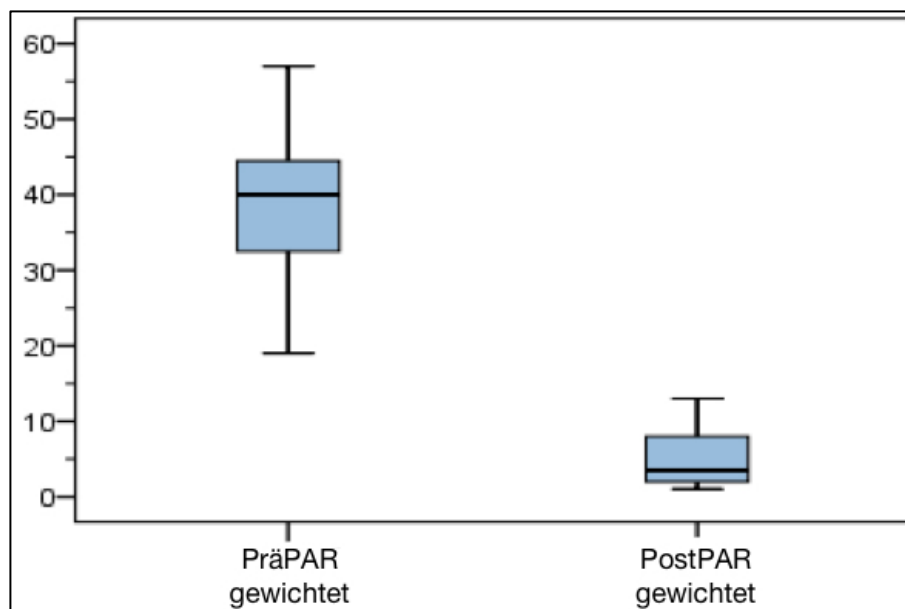
## 4.2 Prä- und post-therapeutischer PAR-Index

Es konnte bei allen 24 Patienten eine Verringerung des PAR-Wertes beim Vergleich des präoperativen und postoperativen Modells verzeichnet werden. Im Mittel konnte ein Prä-PAR von 38,83 Punkten erfasst werden, wobei die Schwankungsbreite der Messwerte relativ groß war und sich zwischen 19 Punkten im Minimum und 57 Punkten im Maximum erstreckte. Die Post-PAR-Werte fielen im Mittel mit 5,17 Punkten deutlich geringer aus, wobei sie mit Werten zwischen einem Punkt und 13 Punkten deutlich weniger schwankten (siehe Tabelle 17 und Abbildung 23).

**Tabelle 17: Gewichtete prä- und post-PAR-Werte der Patienten des Gesamtkollektivs**

	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum	Perzentile		
						25%	50% (Median)	75%
Prä-PAR gewichtet	24	38,83	8,756	19	57	32,25	40,00	44,75
Post-PAR gewichtet	24	5,17	3,975	1	13	2,00	3,50	9,00

Die statistische Analyse (siehe Kapitel 3.2.2) zeigte eine hochsignifikante Verringerung des PAR-Index zwischen dem präoperativen Zeitpunkt und dem Zeitpunkt nach Entfernung der Multibracket-Apparatur (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen  $p < 0,001$ ).



**Abbildung 23: Verteilung der gewichteten prä- und post-PAR-Werte im Gesamtkollektiv (Whisker-Box-Plot)**

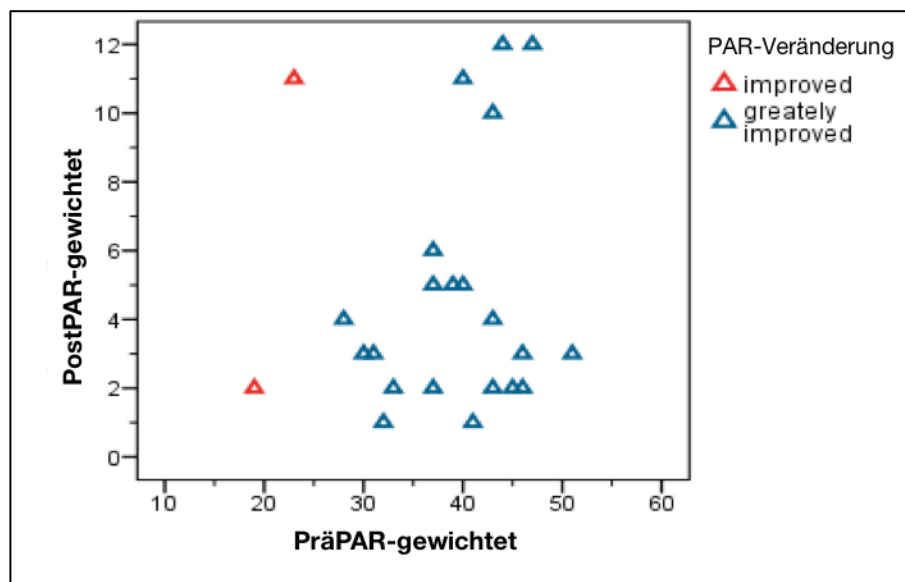


Wie in Kapitel 3.1.4 beschrieben, erhält man durch Subtraktion des Prä-PAR vom Post-PAR die absolute Veränderung des PAR-Wertes (PAR-Veränderung(abs)) bei einem Patienten (siehe Tabelle 18). Diese betrug für alle 24 Patienten im Mittel 33,67 Punkte, wobei sich die Veränderung von zwölf Punkten im Minimum und 48 Punkten im Maximum erstreckte. Die prozentuale Veränderung des PAR-Wertes (%-PAR-Veränderung(abs)) lag im Mittel bei 86,42%.

**Tabelle 18: Absolute und prozentuale Veränderung des PAR-Wertes der Patienten des Gesamtkollektivs**

	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum	Perzentile		
						25%	50% (Median)	75%
PAR Veränderung(abs)	24	33,67	8,565	12	48	29,50	33,50	40,75
PAR Veränderung(abs) %	24	86,42	10,838	52	98	78,75	89,50	94,75

Alle Patienten wiesen eine %-PAR-Veränderung(abs) über 30% auf, wodurch sie nicht in die Kategorie „*worse – no difference*“ fielen. Zwei Patienten (8,33%) gehörten in die Kategorie „*improved*“, da sie mit einer PAR-Veränderung(abs) von zwölf und 17 Punkten nicht die Anforderungen der Kategorie „*greatly improved*“ erfüllten. 22 von 24 (91,67%) der Patienten waren der Kategorie „*greatly improved*“ zuzuordnen (siehe Abbildung 24).

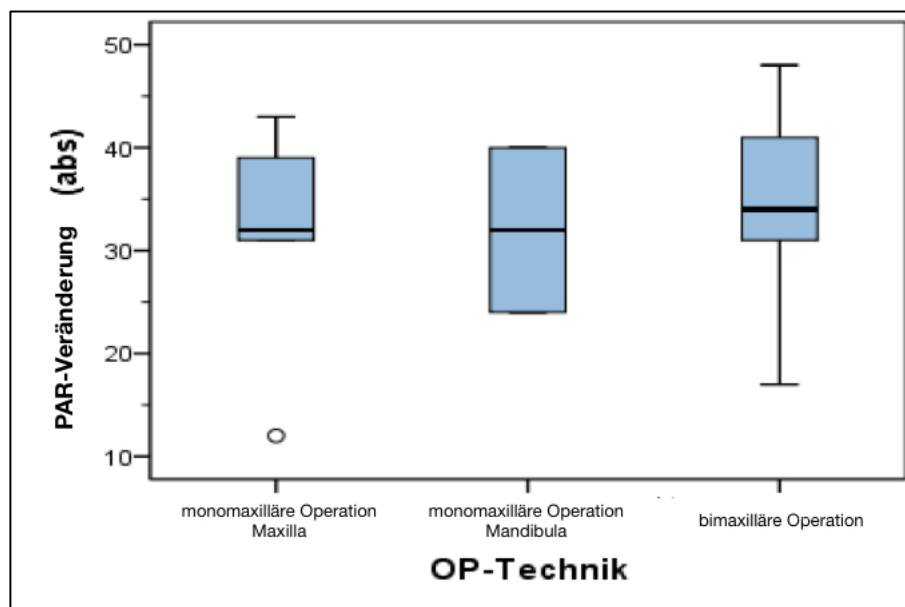


**Abbildung 24: Gewichtete prä- und post-PAR-Werte der Patienten des Gesamtkollektivs (n=24, Scatter-Plot)**

### 4.3 Vergleich des PAR-Index bei mono- und bimaxillärer OP-Methode

Die absolute PAR- und prozentuale PAR-Veränderung der Subgruppen der Patienten mit mono- und bimaxillären OPs wurden miteinander verglichen (siehe Abbildung 25). Die Mittelwerte des PAR-Veränderung(abs) betragen bei der monomaxillären OP-Methode an der Maxilla

31,40 Punkte und an der Mandibula 32 Punkte. Bei der bimaxillären OP-Methode lag der PAR-Veränderung(abs) bei 34,53 Punkten. Damit erreichte die bimaxilläre Methode eine um 3,13 Punkte bzw. 2,53 Punkte stärkere Reduzierung des PAR-Wertes als die an der Maxilla bzw. Mandibula isoliert durchgeführte Methode. Es bestand kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den PAR-Veränderung(abs) in den Subgruppen (Kruskal-Wallis-Test,  $p=0,832$ ).



**Abbildung 25:** Verteilung des PAR-Veränderung(abs) in den Subgruppen mit monomaxillären Operationen an der Maxilla oder Mandibula sowie mit bimaxillären Operationen (Whisker-Box-Plot) (monomax. Maxilla:  $n=5$ ; monomax. Mandibula:  $n=2$ ; bimax. OP:  $n=17$ )

Die Analyse der prozentualen PAR-Veränderung ergab abweichende Ergebnisse (siehe Abbildung 26). Die Mittelwerte des %-PAR-Veränderung(abs) betragen bei der monomaxillären OP-Methode an der Maxilla 83,20%, bei der monomaxillären OP-Methode an der Mandibula 92% und bei der bimaxillären OP 86,71%. Die Abnahme des %-PAR-Veränderung(abs) war bei Patienten mit der Mandibula-OP um 8,8% größer als bei den Patienten mit einer singulären Maxilla-OP und um 5,29% größer als bei Patienten mit einer bimaxillären OP. Die Werte lagen sehr eng beieinander und zeigten insbesondere in der Subgruppe mit bimaxillärer OP eine große Streuung. Ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen konnte bezüglich des %-PAR-Veränderung(abs) nicht nachgewiesen werden (Kruskal-Wallis-Test,  $p=0,720$ ).

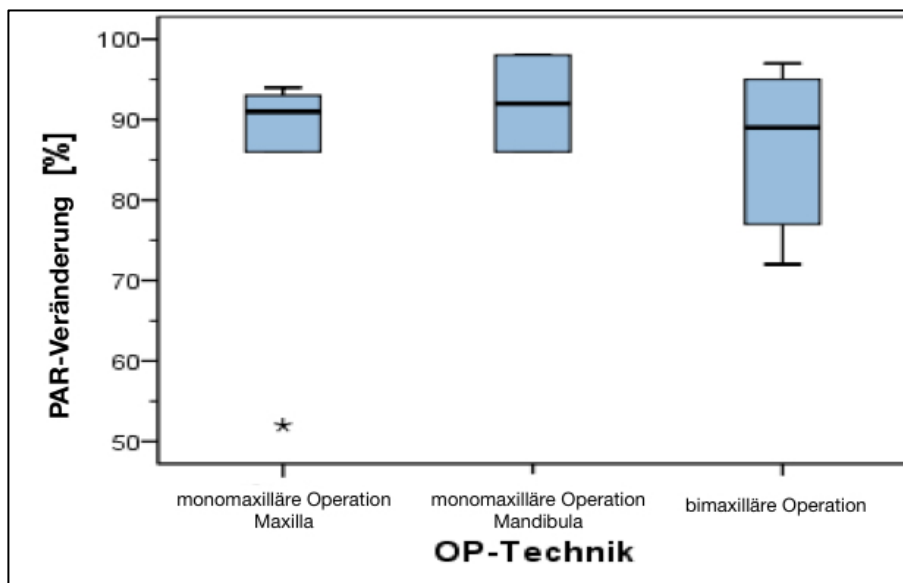
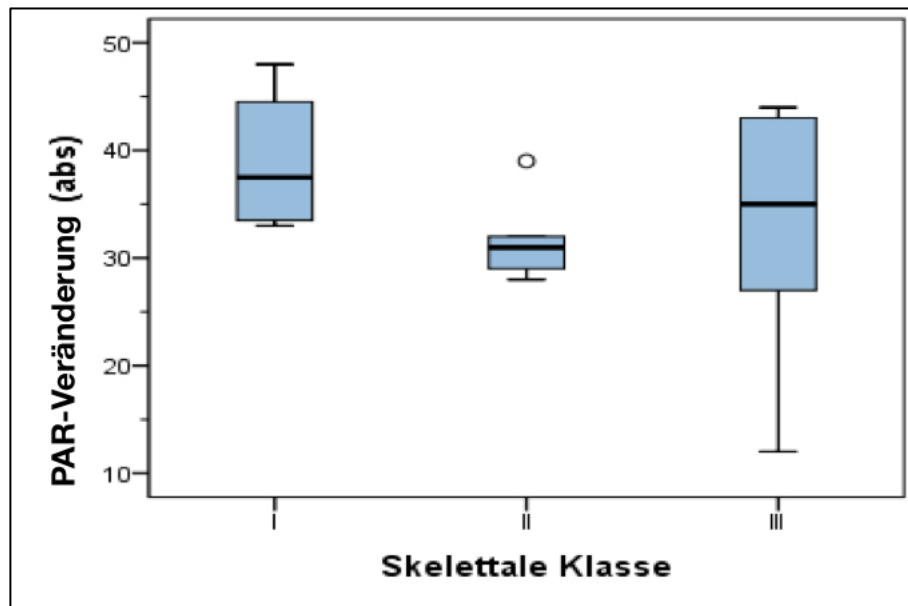


Abbildung 26: Verteilung des %-PAR-Veränderung(abs) in den Subgruppen mit monomaxillärer Operationen an der Maxilla oder Mandibula sowie mit bimaxillären Operationen (Whisker-Box-Plot) (monomax. Maxilla: n=5; monomax. Mandibula: n=2; bimax. OP: n= 17)

Zu beachten bei der Interpretation der Daten sind die geringen Fallzahlen von nur fünf Patienten, die isoliert an der Mandibula, und sogar nur zwei, die isoliert an der Maxilla operiert wurden. Aus diesem Grund sollten die Ergebnisse mit Vorsicht betrachtet werden.

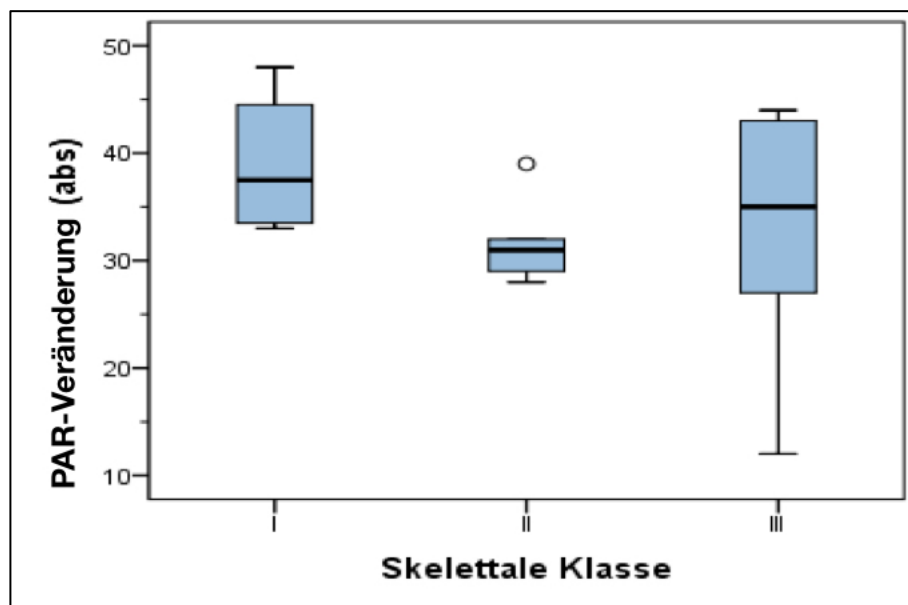
#### 4.4 Vergleich des PAR-Index in unterschiedlichen skelettalen Klassen

Die Patienten wurden hinsichtlich ihrer Ausgangssituation in drei skelettale Klassen eingeteilt. Die Subgruppen wurden bezüglich der absoluten PAR-Veränderung sowie der prozentualen PAR-Veränderung verglichen (siehe Abbildung 27 und 28). Die mittelwertige PAR-Veränderung(abs) betrug 39,00 Punkte in der skelettalen Klasse I, 31,67 Punkte in der Klasse II und 33,00 Punkte in der Klasse III. Mittels des Kruskal-Wallis-Tests konnte bezüglich dieses Merkmals kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen nachgewiesen werden ( $p=0,218$ ).



**Abbildung 27:** Verteilung des %-PAR-Veränderung(abs) in den skelettalen Klassen I–III (Whisker-Box-Plot) (skel. Klasse I: n=4; skel. Klasse II: n=6; skel. Klasse III: n=14)

Die Mittelwerte des %-PAR-Veränderung(abs) betragen 88,25% in der skelettalen Klasse I, 88,33% in der Klasse II und 85,07% in der Klasse III. Mit dem Kruskal-Wallis-Test konnte bezüglich dieses Merkmals ebenfalls kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Klassen nachgewiesen werden ( $p=0,919$ ).



**Abbildung 28:** Verteilung des %-PAR-Veränderung(abs) in den skelettalen Klassen I–III (Whisker-Box-Plot) (skel. Klasse I: n=4; skel. Klasse II: n= 6; skel. Klasse III: n=14)

Wiederum war die Fallzahl mit vier Vertretern in Klasse I, sechs Vertretern in Klasse II und 14 in Klasse III sehr gering. Dies sollte bei der Interpretation der Ergebnisse Berücksichtigung finden.

## 4.5 Behandlungsdauer bei Patienten mit VSF

Die kürzeste Behandlungsdauer betrug 7,03 Monate (214 Tage), die längste 26,22 Monate (798 Tage). Die durchschnittliche Behandlungsdauer lag bei 14,8 Monaten (450,8 Tage, siehe Tabelle 19).

**Tabelle 19: Individuelle Behandlungsdauer der Patienten**

Die Patienten mit der minimalen und maximalen Behandlungsdauer sind farblich gekennzeichnet.

Patient	Monate	Tage
1	7,03	214
2	11,96	364
3	11,01	335
4	11,04	336
5	17,15	522
6	8,51	259
7	16,46	501
8	17,51	533
9	11,24	342
10	16,3	496
11	10,07	334
12	12,62	384
13	12,71	387
14	14,23	433
15	11,53	351
16	26,22	798
17	12,25	373
18	22,54	686
19	20,44	622
20	7,59	231
21	27,2	843
22	25,33	771
23	13,93	424
24	9,2	280
Ø	14,8	450,8

#### 4.6 Vergleich der Behandlungsdauer bei mono- und bimaxillärer OP-Methode

Die Behandlungsdauer wurde auch in Abhängigkeit von der OP-Methode untersucht (siehe Abbildung 29). Die Behandlung der sieben Patienten mit monomaxillär durchgeführter OP betrug durchschnittlich 16 Monate (487,1 Tage), die der 17 Patienten mit bimaxillärer OP 14,2 Monate (435,8 Tage). Die Differenz der Behandlungsdauer zwischen den beiden Subgruppen lag durchschnittlich bei 1,8 Monaten (51,3 Tage). Patienten mit einer bimaxillären OP wurden im Durchschnitt kürzer therapiert.

Dieser Unterschied war jedoch statistisch nicht signifikant (Mann-Whitney-U-Test;  $p=0,852$ ). Wiederum war die Fallzahl in den Gruppen gering, was bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden sollte.

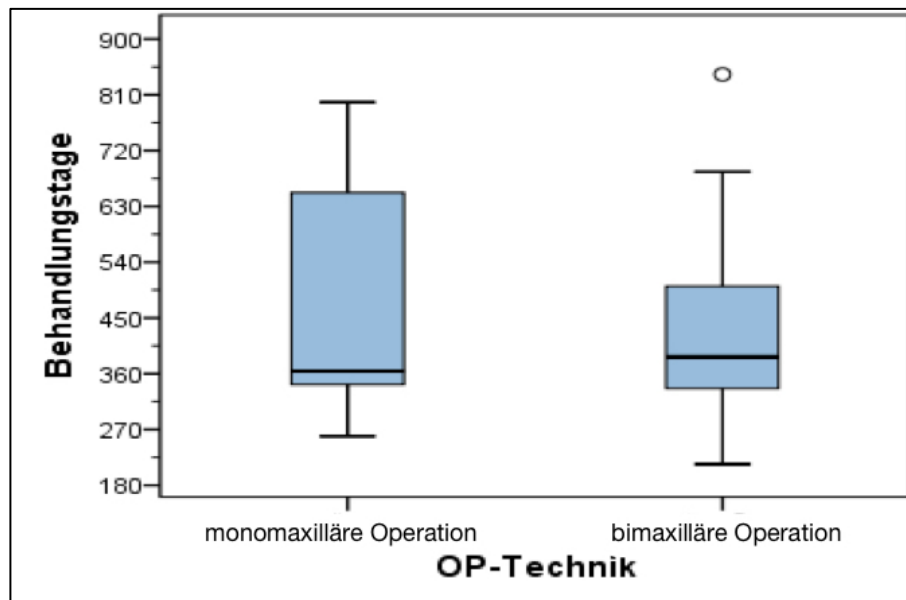


Abbildung 29: Verteilung Behandlungsdauer in Abhängigkeit von der OP-Methode (Whisker-Box-Plot)

## 4.7 Vergleich der Behandlungsdauer in unterschiedlichen skelettalen Klassen

Die Analyse der Behandlungsdauer in Abhängigkeit von der präoperativ bestimmten skelettalen Klasse ergab bei den Klasse I Patienten eine durchschnittliche Behandlungsdauer von 13,75 Monaten (418,50 Tage), bei den Klasse II Patienten 14,5 Monaten (442,67 Tage) und bei den Klasse III Patienten 15,14 Monaten (463,50 Tage, siehe Abbildung 30). Diese Unterschiede waren statistisch nicht signifikant (Kruskal-Wallis-Test,  $p=0,990$ ). Erneut war die Fallzahl gering, sodass die Ergebnisse vorsichtig interpretiert werden müssen.

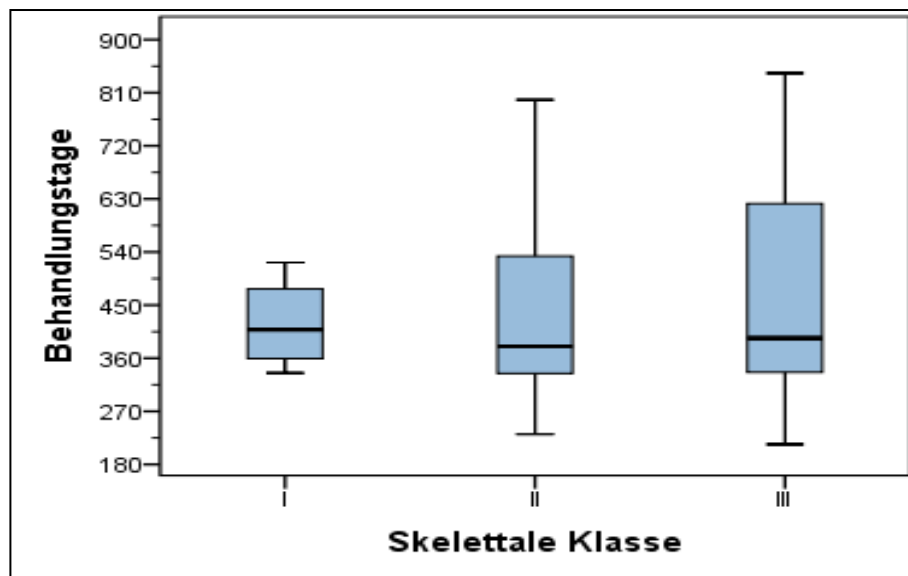


Abbildung 30: Verteilung der Behandlungsdauer bei den Patienten in den skelettalen Klassen I–III (Whisker-Box-Plot)

## 5 Diskussion

### 5.1 Diskussion der Methoden

Die zu befundenden Modellpaare konnten problemlos mit dem Dental Scanner - Orthodontic 3D Scanner R700™ der Firma 3Shape - digitalisiert werden. Dabei konnten die OK- und UK-Modelle in einem nachfolgenden Scan-Vorgang in korrekter Okklusion fixiert oder mit Hilfe eines Bissregistrates entsprechend der gegenwärtigen Lagebeziehung der Kiefer sehr gut artikuliert werden. Die Software *3Shape OrthoAnalyzer™* bot ausreichende Messmöglichkeiten, um alle notwendigen Parameter des PAR-Index zu bestimmen.

Studien von Mayers et al. (2005) und Stevens et al. (2006) belegen, dass der PAR-Index ohne Einschränkungen auch an digitalen Modellen bestimmt werden kann. Die PAR-Index-Werte digitaler, computerunterstützter Modelle liefern valide und reliable Informationen über vorliegende Malokklusionen an Gipsmodellen. Bei der Validierung des PAR-Index in diesem Setting war die interexaminäre Reabilität sogar höher als das von Richmond et al. (1992a) geforderte 95%-Konfidenzintervall. Weil es zwischen klinischen Gipsmodellen und digitalen Modellen keine signifikanten Unterschiede des PAR-Index gibt, sind auch die Diagnosen der digitalen Modelle klinisch nicht von denen der Gipsmodelle zu unterscheiden (Mayers et al. 2005; Andrews 2008).

Folglich sollte der an digitalisierten Modellen erhobene PAR-Index auch für den wissenschaftlichen Vergleich von Behandlungsmethoden geeignet sein.

### 5.2 Diskussion der Ergebnisse

#### 5.2.1 Intraindividuelle Reproduzierbarkeit des PAR-Index/Fehleranalyse

Die Hypothese, dass der manuelle Messablauf (siehe Kapitel 3.1.5) reproduzierbare Ergebnisse liefert, konnte in der vorliegenden Untersuchung gänzlich bestätigt werden. Die intraindividuelle Reproduzierbarkeit muss aufgrund der hervorragenden Messergebnisse beim Methodenfehler nach Dahlberg und beim Zuverlässigkeitskoeffizient nach Houston als ausgesprochen verlässlich betrachtet werden (siehe Kapitel 3.2.1). Dabei war auch in diesem Fall die interexaminäre Reabilität höher als das geforderte 95%-Konfidenzintervall (Richmond et al. 1992a). Auf eine Überprüfung der interindividuellen Reproduzierbarkeit wurde in der vorliegenden Studie verzichtet, da bereits Stevens keine statistisch signifikanten Unterschiede bezüglich der interindividuellen Reproduzierbarkeit an digitalisierten Modellen detektieren konnte (Andrews 2008). Auffällig war, dass die Abweichungen bei den Messwiederholungen ausschließlich beim Parameter Kontaktpunktverlagerung bei den präoperativen Modellen auftraten. Für gewöhnlich treten die größten Abweichungen in den Parametern der bukkalen Okklu-



sion, im Overbite und in der Mittellinienabweichung auf. Ursache bei den letzten beiden Parametern könnten die hohen Wichtungsfaktoren sein (Richmond et al. 1992a; Mayers et al. 2005; Stevens et al. 2006). Die Software 3Shape OrthoAnalyzer™ orientiert sich bei der Abstandsmessung zur Erfassung der Kontaktpunktverlagerung an der Okklusionsebene. Die Festlegung der Kontaktpunkte ist aufgrund von unterschiedlichen Faktoren wie Zoom-Verhalten, Ausrichtung der Modelle im Raum (unterschiedliche Blickwinkel), Zahnstellung und Zahnmorphologie vor allem bei Patienten mit starker Dysgnathie im anterioren Segment nicht immer eindeutig. Mit Abweichungen von 0,0034 PAR-Punkten für Prä-PAR und PAR-Veränderung(abs) bzw. 0,003% für die %-PAR-Veränderung(abs) war der Methodenfehler nach Dahlberg gering, so dass auch hier von einem hohen Maß an Reproduzierbarkeit ausgegangen werden kann. Diese These bestätigt auch der Zuverlässigkeitskoeffizient nach Houston, der mit 0,9998–1 weit oberhalb des von Midtgård et al. (1974) geforderten Werts von  $\geq 0,97$  für eine exakte Messmethode lag. Die Software 3Shape OrthoAnalyzer™ bietet viele Möglichkeiten der Analyse, so dass die Reproduzierbarkeit der Messungen prinzipiell auf einem sehr hohen Niveau liegt. Beispielsweise erleichtern halbautomatische Messinstrumente die Bestimmung von Overbite und Overjet und liefern damit nahezu konstante Werte in den Messwiederholungen. Außerdem konnten durch den Einsatz von Clipping-Ebenen schwer einsehbare Bereiche beispielsweise bei der Bestimmung der buccalen Segmente und der Mittellinienabweichung vermessen werden. Diese Methoden erforderten jedoch einen Zeitaufwand von 15 bis 30 Minuten für jedes Modellpaar. Letztendlich trat auch bei den Modellen, in denen Messabweichungen bei der Kontaktpunktbestimmung zu finden sind, keine Abweichung in der von Richmond et al. (1992b) aufgestellten Einteilung in die Erfolgsklassen „*worse – no difference*“, „*improved*“ und „*greatly improved*“ auf.

### 5.2.2 Prä- und posttherapeutischer PAR-Index

Der Unterschied zwischen prä-PAR und post-PAR war mit einem  $p < 0,001$  hochsignifikant (siehe 5.2.2). Dieser Befund spricht für einen ausgezeichneten Behandlungserfolgs des VSF-Konzepts. Durchschnittlich betrug die Verbesserung für alle 24 Patienten beim PAR-Veränderung(abs) im Mittel 33,67 Punkte und beim %-PAR-Veränderung(abs) 86,42%.

In der Literatur finden sich nur wenige Studien, die den PAR-Index zur Kontrolle des Behandlungserfolgs von kombiniert kieferorthopädisch-kieferchirurgischen Therapien verwendet haben. Die aktuellen Untersuchungen verzichteten dabei auf eine Behandlungsplanung nach dem SF-Konzept, sondern verwendeten eine konventionelle modellbasierte Planung (siehe Tabelle 4). Die in diesen Untersuchungen bestimmten PAR-Index-Veränderungen liegen alle deutlich niedriger als die Verbesserungen in der vorliegenden Studie (O'Brien (2009): 29,9/72%, Arad et al. (2011): 32,95/77,01%; Ponduri et al. (2011): 28/74%).

Da der PAR-Index zur Bewertung von Behandlungsergebnissen geeignet ist und sich aus der Veränderung des PAR-Index nach der Therapie die Qualität einer Therapiestrategie ableiten lässt, zeigen die deutlich besseren Resultate dieser Studie die Überlegenheit des VSF-Konzeptes gegenüber den konventionellen modellbasierten Methoden. Das SF-Konzept macht sich zunutze, dass orthodontische Zahnbewegungen leichter durchzuführen sind, wenn die Kiefer und die umgebenden Weichgewebe in eine anatomisch-physiologische und funktionelle Beziehung gebracht wurden. Durch die vorübergehende nach der OP auftretende Malokklusion (Angle-Klasse I) können die unmittelbar folgenden Zahnbewegungen der postchirurgischen Phase besser durchgeführt werden, weil sie nicht gegen die Adaptionsmechanismen der skelettalen Dysgnathie korrigiert werden müssen (Brachvogel et al. 1991a). Außerdem kann vor allem bei stärker ausgeprägten Dysgnathien direkt nach der OP eine skelettale Verankerung genutzt werden, um die möglichen Zahnbewegungen, die von Proffit et al. (2003) in „*Envelope of Discrepancy*“ beschrieben wurden, zu erweitern. Letztendlich lassen sich durch diese Maßnahmen auch bei großen Diskrepanzen harmonischere Behandlungsergebnisse erzielen, die sich in einem niedrigeren post-PAR-Index niederschlagen. Ein weiterer Vorteil der skelettalen Verankerung, der den post-PAR-Index positiv beeinflussen kann, ist die Möglichkeit, bei einer starken Rezidivtendenz oder im Falle einer nicht planmäßig durchführbaren Chirurgie schneller eingreifen zu können (Nagasaka et al. 2009; Sugawara et al. 2010). Die zeitliche Reduzierung der gesamten Behandlungsdauer bei dem SF-Konzept durch die Eliminierung der prächirurgischen Phase und der Nutzung des RAP trägt vermutlich indirekt zu harmonischen Gebissverhältnissen und größeren PAR-Index-Verbesserungen bei. Dabei wirkt sich die frühzeitige Verbesserung von Funktion und Ästhetik positiv auf die Compliance des Patienten aus (Lee 1994). Bei einer besseren Compliance der Patienten in der postchirurgischen Phase ist beispielsweise ein verlässlicherer Gebrauch von Gummizügen zu erwarten. Außerdem verringert sich wahrscheinlich die Häufigkeit von Komplikationen wie gingivalen Rezessionen und Wurzelresorptionen (Baek et al. 2010).

Der PAR-Index zeigt bei VSF-Konzepten deutlich größere Verbesserungen als bei der Verwendung von konventionellen modellbasierten Behandlungsmethoden. Die bei den konventionellen modellbasierten Behandlungsmethoden auftretenden Ungenauigkeiten bei der Verwendung von 2D-Bildmaterial durch Projektionsfehler und Verzerrungen, die zu Planungsfehlern führen, wurden in zahlreichen Veröffentlichungen thematisiert (Gateno et al. 2011b; Xia et al. 1999; Troulis et al. 2002; Swennen et al. 2007; Villegas et al. 2010b). Dabei kommen Planungsfehler vor allem bei asymmetrischen Dysgnathieverhältnissen deutlich häufiger vor (Huang et al. 2005).

Des Weiteren kann eine ganze Reihe von Fehlern während der Modell-OP auftreten, da kein direktes Bindeglied zwischen den 2D-Aufnahmen und dem artikulierten Modell existiert. Hinzu

kommt, dass Rotationen und Translationen der Segmente am Gipsmodell nicht exakt kontrolliert werden können (Anwar & Harris 1990; Ellis 1990; Omura et al. 1995; Schwestka-Polly et al. 1998; Olszewski & Reyhler 2004; Olszewski 2009; Akram et al. 2011).

Außerdem ist die fehlende Wiedergabe der umliegenden Knochenanatomie an Gipsmodellen problematisch, da Knochenüberlagerungen erst während der OP erkannt werden und eine planmäßige Umsetzung verhindern (Santler 2000; Gateno et al. 2003b). Durch die Verwendung von virtuellen Planungsmethoden kann dieses Problem gelöst werden. Bei der virtuellen Planung kann zusätzlich das peridentale Knochenangebot analysiert werden. Dieses Angebot stellt vor allem bei der Dehnung von Zahnbögen bei Engständen oder transversalen Defiziten in der postchirurgischen Phase einen limitierenden Faktor dar.

Für die Qualität der Übertragung der Planung konnten signifikante Unterschiede zwischen OP-Splinten, die auf konventionelle Art und Weise hergestellt wurden, und CAD/CAM-gefertigten Splinten nachgewiesen werden. Außerdem besteht eine hohe Übereinstimmung der CAD/CAM-gefertigten Splinte im OP-Raum. Somit muss das virtuelle Vorgehen als valide und reliable Technik der Splintherstellung angesehen werden (Aboul-Hosn Centenero & Hernández-Alfaro 2012).

### **5.2.3 PAR-Index bei mono- und bimaxillärer OP-Methode**

Die Hypothese, dass bimaxilläre Behandlungsmethoden zu einer größeren PAR-Veränderung führen als monomaxilläre Methoden, kann in der vorliegenden Untersuchung bestätigt werden. Jedoch waren die Unterschiede von 3,13 PAR-Punkten verglichen mit den Unterschieden nach einer monomaxillären OP an der Maxilla (32 Punkte) und von 2,53 Punkten an der Mandibula (34,53) nicht groß. Aufgrund der geringen Unterschiede und der geringen Fallzahl von 24 (17 Patienten wurden mit einer bimaxillären OP-Methode behandelt, die restlichen Patienten verteilten sich auf die monomaxilläre Maxilla- und Mandibula-Gruppe) konnte für den Unterschied keine statistische Signifikanz nachgewiesen werden ( $p=0,832$ ). Zusätzlich wurden die prozentualen PAR-Veränderungen miteinander verglichen. Die Mittelwerte der prozentualen PAR-Veränderungen betragen bei der monomaxillären OP-Methode an der Maxilla 83,20%, bei der monomaxillären OP-Methode an der Mandibula 92% und bei der bimaxillären OP-Methode 86,71%. Auch diese Unterschiede waren statistisch nicht signifikant ( $p=0,832$ ). Bei dem Ergebnis muss auch berücksichtigt werden, dass die Patienten, die mit einer bimaxillären Methode behandelt wurden, durchschnittlich einen wesentlich höheren prä-PAR-Index von 40,41 zeigten als Patienten mit monomaxillären OP-Methoden (Maxilla: 36,25; Mandibula: 25,25). Bedingt durch eine stärkere Dysgnathie im OK und UK bergen diese höheren prä-PAR-Ausgangswerte auch ein höheres Potenzial, größere Verbesserungen zu erzielen. Diese Zusammenhänge

werden durch die Befunde verdeutlicht, dass absolut die bimaxilläre Methode die größte Veränderung bewirkte, prozentual aber die monomaxilläre OP-Methode an der Mandibula.

Ähnliche Ergebnisse erzielte Arad et al. (2011) mit 63 Patienten. Die bimaxilläre OP-Methode erbrachte eine durchschnittliche PAR-Veränderung von 35,17 Punkten bei einem prä-PAR von 44,07 Punkten. Auch in dieser Studie wurden überproportional häufig bimaxilläre OPs durchgeführt, monomaxilläre OPs an der Maxilla bildeten dagegen die Ausnahme. Die Behandlungsplanung wurde nach der konventionellen modellbasierten Methode durchgeführt. Ein signifikanter Unterschied bezüglich der PAR-Veränderungen konnte zwischen den Gruppen nicht festgestellt werden.

In zukünftigen Studien sollte untersucht werden, ob eine bimaxilläre Methode unter VSF zu harmonischeren Gebissverhältnissen führt, da sowohl geringere Zahnbewegungen in den einzelnen Kiefern durchzuführen sind als auch das RAP in der postchirurgischen Phase im OK und UK gleichzeitig aktiv ist. Dazu müssen größere Fallzahlen untersucht werden, deren Ausgangsbefunde bezüglich bestehender Dysgnathien detailliert charakterisiert werden sollten.

#### **5.2.4 PAR-Index in unterschiedlichen skelettalen Klassen**

Die durchschnittliche absolute PAR-Veränderung war mit 39 Punkten in der skelettalen Klasse I am größten, gefolgt von Klasse III mit 33 Punkten und Klasse II mit 31,67 Punkten (siehe Kapitel 3.2.4). Die Gruppen unterschieden sich jedoch nicht signifikant bezüglich dieses Merkmals ( $p=0,218$ ).

Bei der Auswertung der prozentualen PAR-Veränderung lagen die Werte mit 88,25% bei der skelettalen Klasse I, 88,33% bei der Klasse II und 85,07% bei der Klasse III sehr eng beieinander. Auch hier bestand keine statistische Signifikanz zwischen den Gruppen ( $p=0,919$ ).

Die nach skelettalen Klassen getrennte Analyse der PAR-Index-Veränderungen sollte eruieren, ob in einer bestimmten skelettalen Klasse besonders gute Voraussetzungen für die Durchführung eines VSF-Konzeptes bestehen. Derzeit gibt es keine veröffentlichte Studie, die sich mit dieser Thematik befasst. Bei einer Studie mit 161 konventionell modellbasierten Planungen konnte ein Zusammenhang zwischen dem SNB-(Sella-Nasion-B-Punkt)-Winkel und den skelettalen Klassen hergestellt werden. Dabei hatte das Ausmaß der prächirurgischen Diskrepanz zur Norm des ANB-Winkels einen Effekt auf den Behandlungserfolg, weil bei größeren Diskrepanzen auch komplexere Behandlungen erforderlich werden. Es konnte jedoch kein Zusammenhang der Behandlungsergebnisse zur Art der prächirurgischen Diskrepanz (Klasse I, Klasse II und Klasse III) hergestellt werden. Nach O'Brien et al. (2009) gibt es keine wirklichen Unterschiede bezüglich des realisierbaren Behandlungserfolgs in den einzelnen skelettalen Klas-

sen. Zu beachten ist aber, dass die Patienten in dieser Studie weder mit dem SF noch mit dem VSF behandelt wurden.

Nach Kim et al. (2012) sind grundsätzlich alle skelettalen Klassen für ein SF-Konzept geeignet. Besonders treten die Vorteile dieses Konzeptes jedoch bei der Klasse III in den Vordergrund. In dieser Klasse kommt es in der prächirurgischen kieferorthopädischen Phase zu einer Dekompensation der UK-Frontzähne, was einen anterioren Kreuzbiss sowie eine Verstärkung des progeneren Lippenprofils zur Folge hat. Diese Veränderungen decken sich nicht mit den ästhetischen Ansprüchen der Patienten, was zum Abbruch der Therapie führen kann. Durch das SF-Konzept wird durch Rückverlagerung der Mandibula die skelettale Klasse III in eine Klasse II überführt, was sich mit sofortiger Wirkung im Patientenprofil zeigt. Durch die schnelle Verbesserung zu Beginn der Therapie steigt die Motivation des Patienten bei Überführung in Klasse II. Darüber hinaus läuft die Dekompensation und die Achseinstellung der Front in der postchirurgischen Phase effizienter ab, weil der wieder erhöhte Muskeltonus der Oberlippe sich positiv auf die Ausformung beider Zahnbögen auswirkt (Nagasaka et al. 2009). Ähnliche Vorteile bietet die SF-Behandlung den Patienten mit skelettaler Klasse II mit tiefem Einbiss bei bestehendem kurzen Untergesicht und ausgeprägter Speekurve. Dabei entsteht durch die Überführung in eine Klasse III Relation zwar kurz nach der OP eine Art Kopfbiss, dennoch kommt es sofort zu einer Erhöhung des Untergesichts sowie zu einer Verbesserung des Patientenprofils. Des Weiteren entsteht Platz für eine Abflachung der Speekurve und die neue Kieferrelation ermöglicht durch einen erhöhten Tonus der Unterlippe die Ausformung beider Zahnbögen (Sugawara et al. 2010).

Um die Frage zu klären, ob Patienten einer bestimmten skelettalen Klasse besonders vom VSF-Konzept profitieren, bedarf es weiterer Studien mit größeren Fallzahlen und detaillierteren Ausgangsbefunden der bestehenden Dysgnathien.

### **5.2.5 Behandlungsdauer bei Patienten mit VSF**

Im Mittel konnte in der vorliegenden Studie mit dem VSF-Konzept eine Behandlungsdauer von 14,8 Monaten (450,8 Tage) erzielt werden (siehe Kapitel 3.2.5). Die kürzeste Behandlungsdauer betrug 7,03 Monate (214 Tage), die längste 26,22 Monate (798 Tage). Dabei wurde die aktive Behandlungszeit vom Tag der OP bis zu dem Tag, an dem die Abformungen für die dauerhafte Retention genommen wurden, erfasst. Bei der Bewertung der benötigten Behandlungszeiten sollte berücksichtigt werden, dass in der vorliegenden Studie ein ausgezeichneter Behandlungserfolg mit einer absoluten PAR-Veränderung im Mittel von 33,67 Punkten bzw. einer prozentualen PAR-Veränderung von durchschnittlich 86,42% erzielt wurde. Der Behandlungserfolg kann bei 91,67% (22 Patienten) der Patienten als „*greatly improved*“ und bei 8,33% (2 Patienten) als „*improved*“ eingestuft werden. Außerdem wurden kaum Einschränkungen bei

der Auswahl des Patientenguts vorgenommen und auch komplexere asymmetrische Dysgnathien erfolgreich behandelt. Lediglich Patienten mit kongenitalen Defekten, posttraumatischen Rekonstruktionen, Lippen-Kiefer-Gaumenspalten und deren Abstufungen, Patienten mit schweren Engständen, bei denen Extraktionen notwendig waren, und Patienten, bei denen aufgrund einer schweren transversalen Unterentwicklung eine chirurgische Gaumennahterweiterung im Vorfeld durchgeführt werden musste, wurden aus der Studie ausgeschlossen.

Die durchschnittlichen Behandlungszeiten in Studien ohne SF-Konzept liegen zwischen 30,6 und 33,8 Monaten (O'Brien et al. 2009; Arad et al. 2011; Ponduri et al. 2011). Der Vergleich mit den vorliegenden Daten ergibt eine Zeitersparnis von 15,8 bis 19 Monaten bzw. 51,6 bis 56,2% durch die Verwendung des VSF-Konzepts. Eine norwegische Studie ohne SF-Konzept kam bei 315 durchgeführten Behandlungen lediglich auf eine durchschnittliche Behandlungsdauer von 21,9 Monaten, wobei die prächirurgische Phase 15,4 Monate und die postchirurgische Phase 5,9 Monate in Anspruch nahmen (Dowling et al. 1999). Im Vergleich zu dieser Studie betrug die Zeitersparnis durch das hier angewendete VSF-Konzept durchschnittlich 7,1 Monate bzw. 32,4%.

Die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Behandlungsdauer sind nach Luther et al. (2003) vor allem der Behandler und dessen Routiniertheit, zumindest bei Anwendung derselben Methode. Einen geringeren Einfluss haben stattdessen das Alter und das Geschlecht des Patienten. Auch Dowling et al. (1999) konnten nachweisen, dass sich die Behandlungsdauer signifikant verkürzte, wenn der Kieferorthopäde eine größere Anzahl am Stück behandelte. Diese Befunde lassen vermuten, dass bei kombiniert kieferorthopädisch-kieferchirurgischen Behandlungen ein eingespielter Workflow sowie eine gute Kommunikation zwischen Kieferorthopäden und Kieferchirurgen wichtige Faktoren für die Dauer der Behandlungen darstellen.

Die Behandlungsdauer hängt auch vom Schweregrad der dento-alveolären Dysgnathie, der angewandten chirurgischen Technik, der postoperativ verwendeten Apparaturen, der individuellen biologischen Resonanz des Patienten sowie vom Anspruch des Patienten und des Behandlers an den Therapieerfolg ab (O'Brien et al. 2009). In allen Studien ohne SF-Konzept fällt auf, dass die prächirurgische Behandlung einen größeren Zeitraum einnimmt als die gesamte Behandlungsdauer in der vorliegenden Studie zum VSF-Konzept. Unter der Berücksichtigung, dass die Patienten bezüglich der zu erwartenden ästhetischen und funktionellen Ergebnisse gut informiert sind (Cunningham et al. 1996) und ein großer Anteil der Patienten die prächirurgische Phase aufgrund der Sichtbarkeit der verwendeten Apparaturen, der auftretenden Schmerzen, der langen Dauer und der vorübergehenden fazialen Verschlechterung als unangenehmsten Teil der Therapie empfinden (Nurminen et al. 1999), stellt das SF-Konzept eine gute Alternative gegenüber der konventionellen Vorgehensweise dar. Als Grund für die Zeitersparnis bei dem SF-Konzept gilt neben der Eliminierung der prächirurgischen Phase auch das

RAP in der postchirurgischen Phase (Frost 1983; Frost 1989a; Frost 1989b; Hajji 2000; Wilcko et al. 2001). Umfangreiche Zahnbewegungen wie die Dekompensation, Nivellierung und achs-gerechte Einstellung der Zähne und die Harmonisierung der Zahnbögen erfordern in der prä-chirurgischen Phase mehr Zeit als in der postchirurgischen Phase, weil es dort nicht zu den erhöhten Knochenumbauraten kommt.

Durch die zunehmende Akzeptanz der VSF- und SF-Konzepte wurde in den letzten Jahren über viele Behandlungsfälle mit spektakulär kurzen Behandlungsdauern berichtet. Bei der Verwendungen von skelettalen Verankerungssystemen konnte ein Therapieende nach zwölf Monaten bei einem Patienten mit skelettaler Klasse III (Nagasaka et al. 2009) und nach neun Monaten bei einem Patienten mit skelettaler Klasse II (Sugawara et al. 2010) erzielt werden. Baek et al. (2010) benötigten Behandlungszeiten von neun bis zwölf Monaten bei Patienten skelettaler Klasse II und III. Villegas et al. (2010b) berichteten über einen Behandlungszeitraum von sieben Monaten bei der Behandlung einer Patientin mit einer skelettalen Klasse III sowie einer ausgeprägten mandibulären Asymmetrie. In einem Fall von skelettaler Klasse III betrug die Behandlungsdauer sogar nur vier Monate (Yu et al. 2010). Bei diesen Studien handelt es sich um Einzelfälle. Daher sind diese nur eingeschränkt mit den Daten der vorliegenden Studie vergleichbar. Eine mögliche Ursache für die längere Behandlungsdauer in der vorliegenden Studie könnte die unterschiedliche Komplexität der zu behandelnden Dysgnathien sein. In zehn der 24 Fälle wurden auch in der vorliegenden Studie Behandlungszeiten von unter zwölf Monaten erreicht. Ein Patient mit einer ausgeprägten skelettalen Klasse III konnte nach 7,03 Monaten/214 Tagen und ein weiterer mit einer asymmetrischen Dysgnathie nach 7,59 Monaten/231 Tagen die Behandlung beenden. In einer umfassenderen Studie wurden 20 Patienten mit skelettaler Klasse III und offenem Biss mittels SF in nur 11,24 Monaten erfolgreich therapiert (Liao et al. 2010). Möglicherweise erklärt die eingeschränkte Patientenauswahl den Zeitunterschied von 3,56 Monaten in der Behandlungsdauer im Vergleich zur vorliegenden Studie.

Im Vergleich zur zeitaufwendigen Modellchirurgie ermöglicht eine moderne Planungssoftware wie die hier verwendete SimPlant Pro OMS Software (Materialise Dental, Leuven, Belgien) weitere Zeiteinsparungen. Neben einer exakten Planung von Osteotomien und der Vorhersage des Weichteilprofils erlaubt sie auch die Fertigung von CAD/CAM-OP-Splinten. Dabei ergibt sich eine Zeitersparnis für den Kieferorthopäden, da er keine Osteotomien an einem speziell für diesen Zweck hergestellten Planungsmodell durchführen muss. Weiter entfällt der Prozess der Splintherstellung im Dentallabor. Der eigentliche Vorteil bezüglich der Behandlungsdauer ergibt sich jedoch aus der erleichterten Kommunikation zwischen Kieferorthopäden und Kieferchirurgen, die per E-Mail miteinander kommunizieren können. Zusätzlich kann es einen zeitlichen Vorteil bringen, dass der Kieferorthopäde die gesamte Planung, einschließlich der Osteo-

tomien, selbst erstellt, wodurch die virtuelle chirurgische Planung sowie die Planung der postchirurgischen Phase aufeinander abgestimmt werden können.

Der gesamte Ablauf eines VSF-Konzeptes an einer größeren Patientengruppe wurde bei 45 Patienten mit symmetrischen Dysgnathien dokumentiert (Hernández-Alfaro et al. 2014). Die durchschnittliche Behandlungsdauer betrug 8,69 Monate/265 Tage. Die in dieser Studie erzielten Behandlungsergebnisse liegen damit deutlich unter denen der vorliegenden Arbeit. Als mögliche Ursachen kommen unterschiedliche prätherapeutische Situationen (Verzicht auf komplexere asymmetrische Dysgnathien bei Hernández-Alfaro et al.) und ein unterschiedliches Vorgehen in der postoperativen Phase in Frage. Die Autoren der Vergleichsstudie setzten die ersten Bögen bereits zwei bis drei Wochen nach der OP ein. Im Fall der vorliegenden Arbeit wurden die ersten Bögen erst nach ca. sechs Wochen einligiert. Ein frühzeitiges Einsetzen der Bögen nutzt das direkt postoperativ eintretende RAP vermutlich besser. Am wahrscheinlichsten ist aber, dass die von Hernández-Alfaro et al. routinemäßig verwendeten Minischrauben und Miniplatten als skelettale Verankerung zur Retention und anschließender Kraftübertragung entscheidend zu den hervorragenden Behandlungszeiten beigetragen haben.

### **5.2.6 Vergleich der Behandlungsdauer bei mono- und bimaxillärer OP-Methode**

Die Ergebnisse bei dem Vergleich der Behandlungsdauer zwischen der mono- und bimaxillären OP-Methode deuten, wie erwartet, auf einen zeitlichen Vorteil der bimaxillären Methode gegenüber der monomaxillären Vorgehensweise hin (siehe Kapitel 3.2.6). Zahnbewegungen laufen in der postchirurgischen Phase schneller ab, wenn in beiden Kiefern Osteotomien durchgeführt werden, weil das RAP zum selben Zeitpunkt wirkt. Weiter verteilen sich die angestrebten Osteotomien auf beide Kiefer. Bimaxilläre Eingriffe führen außerdem zu stabileren Gebissverhältnissen und haben einen größeren Einfluss auf die faziale Ästhetik. Jedoch muss bei diesem Vorgehen auch eine wesentlich komplexere Planung in Kauf genommen werden (Sun et al. 2013). In der vorliegenden Studie nahm die Behandlung der sieben Patienten mit monomaxillärer OP-Methode durchschnittlich 16 Monate (487,1 Tage) und die der 17 Patienten mit bimaxillärer OP-Methode 14,2 Monate (435,8 Tage) in Anspruch. Der Unterschied zwischen bimaxillärer und monomaxillärer Methode betrug durchschnittlich 1,8 Monate (51,3 Tage). Dieser Unterschied war jedoch nicht signifikant ( $p=0,852$ ). Aufgrund der geringen Fallzahlen in den Subgruppen müssen Unterschiede in den Behandlungszeiten mit Vorsicht betrachtet werden. Die große Streubreite der benötigten Behandlungszeiten besonders in der monomaxillären Gruppe (siehe Abbildung 29) belegt die Individualität der einzelnen Behandlungsfälle. In einer Studie mit 63 Behandlungsfällen ohne SF-Konzept konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen dem mono- und bimaxillären Vorgehen bezüglich der Behandlungsdauer detektiert werden (Arad et al. 2011). Ein tendenzieller zeitlicher Vorteil wurde für die Patienten,



die monomaxillär an der Maxilla behandelt wurden, gefunden (25,4 Monate vs. monomaxillär/Mandibula: 32,4 Monate vs. bimaxillär: 30,4 Monate).

Bei den vorliegenden Ergebnissen sollte auch berücksichtigt werden, dass die prä-PAR-Werte in der Subgruppe mit bimaxillärer OP mit 40,41 Punkten deutlich höher lagen als in den beiden Subgruppen mit monomaxillärer OP (Maxilla: 36,25 Punkte, Mandibula: 25,25 Punkte). Trotz schlechterer Ausgangslage erreichte die Gruppe mit bimaxillärer OP tendenziell schneller das Behandlungsziel. Dieser Befund stützt die These der Überlegenheit eines bimaxillären Vorgehens. Studien mit größeren Fallzahlen sowie einer detaillierteren Untergliederung der Subgruppen entsprechend der Ausgangsbefunde der bestehenden Dysgnathien müssen folgen, um diese Hinweise statistisch abzusichern oder zu verwerfen.

### **5.2.7 Vergleich der Behandlungsdauer in unterschiedlichen skelettalen Klassen**

Bei der Betrachtung der durchschnittlichen Behandlungsdauer in Abhängigkeit der skelettalen Klassen konnte kein signifikanter Unterschied ( $p=0,990$ ) festgestellt werden (Klasse I Patienten 13,75 Monate (418,50 Tage), Klasse II Patienten 14,5 Monate (442,67 Tage), Klasse III Patienten 15,14 Monate (463,50 Tage), siehe Kapitel 3.2.7).

Grund sind auch hier wieder möglicherweise die geringen Fallzahlen sowie die große individuelle Variabilität bezüglich der Komplexität der Dysgnathien.

Auch hier müssen Studien folgen, um die Frage zu klären, ob das prätherapeutische Ausmaß der Dysgnathien Einfluss auf die Behandlungsdauer nimmt.

## **5.3 Schlussfolgerungen**

Die vorliegende Studie hat gezeigt, dass das VSF-Konzept geeignet ist, Patienten mit schweren Dysgnathien erfolgreich zu behandeln. Die verwendete Methode zeichnete sich durch hervorragende Behandlungszeiten und Ergebnisse (PAR-Index-Verbesserungen) aus. Die Untersuchungen verschiedener Subgruppen (skelettale Klassen, mono- und bimaxilläre OP-Methoden) ergaben aufgrund der kleinen Fallzahlen und der großen Streubreite innerhalb der Subgruppen keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Behandlungsdauer und des Behandlungserfolges. Zur Evaluation des Einflusses der skelettalen Klassen und der OP-Methode müssen Studien mit größeren Patientengruppen mit definierter Ausgangssituation bezüglich der Dysgnathie folgen. Es ist davon auszugehen, dass sich die VSF-Methode aufgrund der Zeitersparnis und ihres Potenzials im Hinblick auf die faciale Ästhetik in Zukunft in den Praxen etablieren wird.

## 6 Literaturverzeichnis

- Aboul-Hosn Centenero S & Hernández-Alfaro F (2012) 3D planning in orthognathic surgery: CAD/CAM surgical splints and prediction of the soft and hard tissues results – our experience in 16 cases. *J Craniomaxillofac Surg* 40: 162–168.
- Adenwalla ST, Kronman JH & Attarzadeh F (1988) Porion and condyle as cephalometric landmarks – an error study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 94: 411–415.
- Akram A, Collin J, Postlethwaite K & Sweeney G (2011) Planned to perfection? Use of the Model Repositioning Instrument to plan maxillary movements for orthognathic surgery. *Orthodontics (Chic)* 12: 130–133.
- Andrews CK (2008) Validity and Reliability of Peer Assessment Rating Index Scores of Digital and Plaster Models. (Masterarbeit)  
[https://etd.ohiolink.edu/!etd.send\\_file?accession=osu1208136018&disposition=inline](https://etd.ohiolink.edu/!etd.send_file?accession=osu1208136018&disposition=inline) (letzter Zugriff am 23.06.2015) ((bitte um Überprüfung))
- Angle EH (1898) Double resection of the lower maxilla. *Dent Cosmos* 40: 635–538.
- Anwar M & Harris M 1990. Model surgery for orthognathic planning. *B J Oral Maxillofac Surg* 28: 393–397.
- Arad I, Jandu J, Bassett P & Fleming PS (2011) Influence of single-jaw surgery vs bimaxillary surgery on the outcome and duration of combined orthodontic-surgical treatment. *Angle Orthod* 81: 983–987.
- Aragon SB & Van Sickels JE (1987) Mandibular range of motion with rigid/nonrigid fixation. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 63: 408–411.
- Axhausen G (1937) Über die korrigierende Osteotomie am Oberkiefer. *Deutsche Zeitschrift für Chirurgie*, 248: 515–522.
- Ayoub AF, Xiao Y, Khambay B, Siebert JP & Hadley D (2007) Towards building a photo-realistic virtual human face for craniomaxillofacial diagnosis and treatment planning. *Int J Oral Maxillofac Surg* 36: 423–428.
- Babcock WW (1909) The surgical treatment of certain deformities of the jaw associated with malocclusion of the teeth. *JAMA* LIII: 833–839.
- Baek SH, Ahn HW, Kwon YH & Choi JY (2010) Surgery-first approach in skeletal class III malocclusion treated with 2-jaw surgery: evaluation of surgical movement and postoperative orthodontic treatment. *J Craniofac Surg* 21: 332–338.

- Baumgaertel S, Razavi MR & Hans MG (2008) Mini-implant anchorage for the orthodontic practitioner. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 133: 621–627.
- Baumgaertel S & Hans MG (2009) Buccal cortical bone thickness for mini-implant placement. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 136: 230–235.
- Behrman SJ & Behrman DA (1988) Oral surgeons' considerations in surgical orthodontic treatment. *Dent Clin North Am* 32: 481–507.
- Bell WH (1973) Biologic basis for maxillary osteotomies. *Am J Phys Anthropol* 38: 279–289.
- Bell, W.H., Proffit, W.R., Jacobs, J.D. (1980) Maxillary and midface deformity. in: W.H. Bell, W.R. Proffit, R.P. White (Eds.) Surgical correction of dentofacial deformities. W. B. Saunders Company, Philadelphia:442–610
- Bell WH. (1992) Modern Practice in Orthognathic and Reconstructive Surgery. Vol. 3. Philadelphia, Pa: WB Saunders:2110-70
- Bergström K & Halling A (1997) Comparison of three indices in evaluation of orthodontic treatment outcome. *Acta Odontol Scand* 55: 36–43.
- Birkeland K, Bøe OE & Wisth PJ (1997a) Subjective assessment of dental and psychosocial effects of orthodontic treatment. *J Orofac Orthop* 58: 45–61.
- Birkeland K, Furevik J, Bøe OE & Wisth PJ (1997b) Evaluation of treatment and post-treatment changes by the PAR Index. *Europ J Orthod* 19: 279–288.
- Birkeland K, Katle A, Løvgreen S, Bøe OE & Wisth PJ (1999) Factors influencing the decision about orthodontic treatment. A longitudinal study among 11- and 15-year olds and their parents. *J Orofac Orthop* 60: 292–307.
- Blair VP (1907) Operations on the jaw-bone and face. *Surg Gynecol Obstet*: 4:67.
- Bogoch E, Gschwend N, Rahn B, Moran E & Perren S (1993a) Healing of cancellous bone osteotomy in rabbits--Part I: Regulation of bone volume and the regional acceleratory phenomenon in normal bone. *J Orthop Res* 11: 285–291.
- Bogoch E, Gschwend N, Rahn B, Moran E & Perren S (1993b) Healing of cancellous bone osteotomy in rabbits--Part II: Local reversal of arthritis-induced osteopenia after osteotomy. *J Orthop Res* 11: 292–298.
- Bouwman JPB, Tuinzing DB & Kostense PJ (1994) A comparative in vitro study on fixation of sagittal split osteotomies with Würzburg® screws, Champy miniplates, and Biofix (bio-degradable) rods. *Int J Oral Maxillofac Surg* 23: 46–48.

- Brachvogel P, Berten JL & Hausamen JE (1991a) [Surgery before orthodontic treatment: a concept for timing the combined therapy of skeletal dysgnathias]. *Dtsch Zahn Mund Kieferheilkd Zentralbl* 79: 557–563.
- Brachvogel P, Berten JL, Hessling KH & Tränkmann J (1991b) [The possibilities for surgical correction of dentoalveolar adaptations within skeletal repositioning osteotomy] *Fortschr Kieferorthop* 52: 21-25.
- Braumann B, Keilig L, Bourauel C & Jäger A (2002) Three-dimensional analysis of morphological changes in the maxilla of patients with cleft lip and palate. *Cleft Palate Craniofac J* 39: 1–11.
- Bremke M et al. (2009) Digital volume tomography in the diagnosis of nasal bone fractures. *Rhinology* 47: 126-131.
- Buchanan IB, Shaw WC, Richmond S, O'Brien KD & Andrews M (1993) A comparison of the reliability and validity of the PAR Index and Summers' Occlusal Index. *Europ J Orthod* 15: 27–31.
- Buckley MJ, Tulloch JF, White RP Jr & Tucker MR (1988) Complications of orthognathic surgery: a comparison between wire fixation and rigid internal fixation. *Int J Adult Orthodon Orthognath Surg* 4: 69-74.
- Bumann A et al. (2009) Moderne röntgenologische Verfahren im Rahmen der kieferorthopädischen Behandlungsplanung. In Baxmann M (Hrsg): Festsitzende Apparaturen zur Klasse-II-Therapie. Bewährte Methoden und neueste Entwicklungen. *Quintessenz-Verlag*, Berlin, 25-46.
- Burk DL Jr, Mears DC, Cooperstein LA, Herman GT & Udupa JK (1986) Acetabular fractures: three-dimensional computed tomographic imaging and interactive surgical planning. *J Comput Tomogr* 10: 1–10.
- Caldwell JB & Letterman G (1954) Vertical osteotomy in the mandibular ramus for correction of prognathism. *J Oral Surg (Chic)* 12: 185–202.
- Cevidanes LH et al. (2005) Superimposition of 3D cone-beam CT models of orthognathic surgery patients. *Dentomaxillofac Radiol* 34: 369–375.
- Cevidanes LH, Styner MA & Proffit WR (2006) Image analysis and superimposition of 3-dimensional cone-beam computed tomography models. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 129: 611–618.

- Chirani RA, Jacq JJ, Meriot P & Roux C (2004) Temporomandibular joint: a methodology of magnetic resonance imaging 3-D reconstruction. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 97: 756–761.
- Converse JM & Horowitz SL (1969) The surgical-orthodontic approach to the treatment of dentofacial deformities. *Am J Orthodont* 55: 217–243.
- Cunningham G. (1894) Methode sofortiger Regulierung von anomalen Zahnstellungen. *Oesterreichisch-Ungarische Vierteljahrsschrift für Zahnheilkunde*;10:455-457.
- Cunningham SJ, Hunt NP & Feinmann C (1996) Perceptions of outcome following orthognathic surgery. *Br J Oral Maxillofac Surg* 34: 210–213.
- Dahlberg G (1940) Statistical methods for medical and biological students. *Interscience Publication*, New York.
- Dal Pont G (1961) Retromolar osteotomy for the correction of prognathism. *J Oral Surg Anesth Hosp Dent Serv* 19: 42–47.
- Davies J, Johnson B & Drage NA (2014) Effective doses from cone beam CT investigation of the jaws. *Dentomaxillofac Radiol* 41: 30–36.
- DeGuzman L et al. (1995) The validation of the Peer Assessment Rating index for malocclusion severity and treatment difficulty. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 107: 172–176.
- Dowling PA, Espeland L, Krogstad O, Stenvik A & Kelly A (1999) Duration of orthodontic treatment involving orthognathic surgery. *Int J Orthodont Orthognath Surg* 14: 146–152.
- Drommer RB (1986) The history of the "Le Fort I osteotomy". *J Maxillofac Surg* 14: 119–122.
- Eckhardt CE & Cunningham SJ (2004) How predictable is orthognathic surgery? *Europ J Orthod* 26: 303–309.
- Ellis E 3rd (1990) Accuracy of model surgery: evaluation of an old technique and introduction of a new one. *J Oral Maxillofac Surg* 48: 1167-1167.
- Ellis E 3rd, Tharanon W & Gambrell K (1992) Accuracy of face-bow transfer: effect on surgical prediction and postsurgical result. *J Oral Maxillofac Surg* 50: 562–567.
- Ellis E 3rd (1999) Bimaxillary surgery using an intermediate splint to position the maxilla. *J Oral Maxillofac Surg* 57: 53–56.
- Everett PC, Seldin EB, Troulis M, Kaban LB & Kikinis R (2000) A 3-D system for planning and simulating minimally-invasive distraction osteogenesis of the facial skeleton. *Int Conf Med Image Comput Comput Assist Interv* 3: 1029–1039.

- Firestone AR et al. (2002) Evaluation of the peer assessment rating (PAR) index as an index of orthodontic treatment need. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 122: 463–469.
- Fleming PS, Marinho V & Johal A (2011) Orthodontic measurements on digital study models compared with plaster models: a systematic review. *Orthodont Craniofac Res* 14: 1–16.
- Frost HM (1983) The regional acceleratory phenomenon: a review. *Henry Ford Hosp Med J* 31: 3–9.
- Frost HM (1989a) The biology of fracture healing: An overview for clinicians. Part II. *Clin Orthop Relat* 248: 294–309.
- Frost HM (1989b) The biology of fracture healing: An overview for clinicians. Part I. *Clin Orthop Relat* 248: 283–293.
- Fuhrmann R, Feifel H, Schnappauf A & Diedrich P (1996) Integration of three-dimensional cephalometry and 3D-skull models in combined orthodontic/surgical treatment planning. *J Orofac Orthop* 57: 32–45.
- Gateno J, Teichgraeber JF & Xia JJ (2003a). Three-Dimensional Surgical Planning for Maxillary and Midface Distraction Osteogenesis. *J Craniofac Surg* 14: 833–839
- Gateno J, Xia J, Teichgraeber JF & Rosen A (2003b) A new technique for the creation of a computerized composite skull model. *J Oral Maxillofac Surg* 61: 222–227.
- Gateno J, Xia J, Teichgraeber JF, Rosen A, Hultgren B & Vadnais T (2003c) The precision of computer-generated surgical splints. *J Oral Maxillofac Surg* 61: 814–817.
- Gateno J et al. (2007) Clinical feasibility of computer-aided surgical simulation (CASS) in the treatment of complex cranio-maxillofacial deformities. *J Oral Maxillofac Surg* 65: 248–254.
- Gateno J, Xia JJ & Teichgraeber JF (2011a) Effect of facial asymmetry on 2-dimensional and 3-dimensional cephalometric measurements. *J Oral Maxillofac Surg* 69: 655–662.
- Gateno J, Xia JJ & Teichgraeber JF (2011b) New 3-Dimensional Cephalometric Analysis for Orthognathic Surgery. *J Oral Maxillofac Surg* 69: 606–622.
- Grünheid T, Kolbeck Schieck JR, Pliska BT, Ahmad M & Larson BE (2012) Dosimetry of a cone-beam computed tomography machine compared with a digital x-ray machine in orthodontic imaging. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 141: 436–443.
- Guijarro-Martínez R & Swennen GRJ (2011) Cone-beam computerized tomography imaging and analysis of the upper airway: a systematic review of the literature. *Int J Oral Maxillofac Surg* 40: 1227–1237.

- Haers PE & Sailer HF (1998) Biodegradable self-reinforced poly-L/DL-lactide plates and screws in bimaxillary orthognathic surgery: short term skeletal stability and material related failures. *J Craniomaxillofac Surg* 26: 363–372.
- Hajji, S.S.(2000) The influence of accelerated osteogenic response on mandibular decrowding [thesis]. Saint Louis University, St Louis
- Hernández-Alfaro F, Guijarro-Martínez R, Molina-Coral A & Badia-Escriche C (2011) “Surgery first” in bimaxillary orthognathic surgery. *J Oral Maxillofac Surg*. 69:e201-e207.
- Hernández-Alfaro F & Guijarro-Martínez R (2013) New protocol for three-dimensional surgical planning and CAD/CAM splint generation in orthognathic surgery: an in vitro and in vivo study. *Int J Oral Maxillofac Surg* 42: 1547–1556.
- Hernández-Alfaro F, Guijarro-Martínez R & Peiró-Guijarro MA (2014) Surgery first in orthognathic surgery: what have we learned? A comprehensive workflow based on 45 consecutive cases. *J Oral Maxillofac Surg*. 72: 376–390.
- Houston WJ (1983) The analysis of errors in orthodontic measurements. *Am J Orthod* 83: 382–390.
- Hsu SS et al (2013) Accuracy of a computer-aided surgical simulation protocol for orthognathic surgery: A prospective multicenter study. *J Oral Maxillofac Surg* 71: 128–142.
- Huang J, Bumann A & Mah J (2005) Three-dimensional radiographic analysis in orthodontics. *J Clinl Orthod* 39: 421–428.
- Kawai T, Natsume N, Shibata H & Yamamoto T (1990) Three-dimensional analysis of facial morphology using moiré stripes. Part I. Method. *Int J Oral Maxillofac Surg* 19: 356–358.
- Kärcher H (1992) Three-dimensional craniofacial surgery: transfer from a three-dimensional model (Endoplan) to clinical surgery: a new technique (Graz). *J Craniomaxillofac Surg* 20: 125–131
- Kim JH, Mahdavia NN & Evans CA (2012) Orthodontics - Basic Aspects and Clinical Considerations - Chapter 12 Guidelines for “Surgery First” Orthodontic Treatment. 265–300.
- Ko EW et al. (2011) Comparison of progressive cephalometric changes and postsurgical stability of skeletal Class III correction with and without presurgical orthodontic treatment. *J Craniomaxillofac Surg* 69: 1469–1477.
- Koole R & Egyedi P (1990) The case for postoperative orthodontics in orthognathic surgery. *J Craniomaxillofac Surg* 18: 293–296.

- Krekmanov L (1989) Orthognathic surgery without the use of postoperative intermaxillary fixation. A clinical and cephalometric evaluation of surgical correction of mandibular and maxillary deformities. *Swed Dent J Suppl* 61: 8–62.
- Kuroda S et al. (2007) Root proximity is a major factor for screw failure in orthodontic anchorage. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 131: S63–S73.
- Lambrecht JT et al. (1995) Individual model fabrication in maxillofacial radiology. *Dentomaxillofac Radiol* 24: 147–154.
- Lange S & Bender R (2007) [Quantiles, cumulative distribution function and box plot]. *Dtsch Med Wochenschr.* 132:e3–4.
- Lee RT (1994) The benefits of post-surgical orthodontic treatment. *Br J Orthodont* 21: 265–274.
- Leelasinjaroen P et al. (2012) Surgery first orthognathic approach for skeletal class III malocclusion corrections - a literature review. *J Med Assoc Thai* 95: S172–S80.
- Liao YF, Chiu YT, Huang CS, Ko EW & Chen YR (2010) Presurgical orthodontics versus no presurgical orthodontics: treatment outcome of surgical-orthodontic correction for skeletal class III open bite. *Plast Reconstr Surg* 126: 2074–2083.
- Liou EJ et al. (2011a) Surgery-first accelerated orthognathic surgery: postoperative rapid orthodontic tooth movement. *J Oral Maxillofac Surg* 69: 781–785.
- Liou, EJ et al. (2011b) Surgery-first accelerated orthognathic surgery: orthodontic guidelines and setup for model surgery. *J Oral Maxillofac Surg* 69: 771–780.
- Loubele M et al. (2009) Comparison between effective radiation dose of CBCT and MSCT scanners for dentomaxillofacial applications. *Eur J Radiol* 71: 461–468.
- Ludlow JB & Ivanovic M (2008) Comparative dosimetry of dental CBCT devices and 64-slice CT for oral and maxillofacial radiology. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 106: 106–114.
- Ludlow JB (2014) A manufacturer's role in reducing the dose of cone beam computed tomography examinations: effect of beam filtration. *Dentomaxillofac Radiol* 40: 115–122.
- Luhr HG (1985) Skelettverlagernde Operationen zur Harmonisierung des Gesichtsprofils – Probleme der stabilen Fixation von Osteotomiesegmenten. In: Pfeifer G (Hrsg) *Die Ästhetik von Form und Funktion in der Plastischen und Wiederherstellungschirurgie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 87–92.
- Luhr HG, Schauer W, Jäger A & Kubein-Meesenburg (1986) [Changes in the shape of the mandible by orthodontic surgical technics with stable fixation of the segments]. *Fortschr Kieferorthop* 47: 39–47.



- Luhr HG (1989) The significance of condylar position using rigid fixation in orthognathic surgery. *Clin Plast Surg* 16: 147–156.
- Luhr HG (2000) [The development of modern osteosynthesis]. *Mund Kiefer Gesichtschir* 4: S84–S90.
- Luther F, Morris, DO & Hart C (2003) Orthodontic preparation for orthognathic surgery: how long does it take and why? A retrospective study. *Br J Oral Maxillofac Surg* 41: 401–406.
- Luther F, Morris DO & Karnerzi (2007) Orthodontic Treatment Following Orthognathic Surgery: How Long Does It Take and Why? A Retrospective Study. *J Oral Maxillofac Surg* 65: 1969–1976.
- Mah J & Bumann A (2001) Technology to create the three-dimensional patient record. *Seminars in Orthodontics*, 7: 251–257.
- Mah JK, Danforth RA, Bumann A & Hatcher D (2003) Radiation absorbed in maxillofacial imaging with a new dental computed tomography device. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 96: 508–513.
- Mayers M, Firestone AR, Rashid R & Vig KW (2005) Comparison of peer assessment rating (PAR) index scores of plaster and computer-based digital models. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 128: 431–434.
- McMullan RE, Doubleday B & Muir JD (2003) Development of a treatment outcome standard as a result of a clinical audit of the outcome of fixed appliance therapy undertaken by hospital-based consultant orthodontists in the UK. *Br Dent J* 25: 81–84.
- Metzger MC et al. (2008) Manufacturing splints for orthognathic surgery using a three-dimensional printer. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 105: e1–7.
- Midtgård J, Björk G & Linder-Aronson S (1974) Reproducibility of cephalometric landmarks and errors of measurements of cephalometric cranial distances. *Angle Orthod* 44: 56–61.
- Monsour PA & Dudhia R (2008) Implant radiography and radiology. *Aust Dent J* 53: S11–S25.
- Moos KF & Ayoub AF (2011) The surgical correction of dentofacial deformities, past, present and future. *Egyptian Association of Oral Maxillofacial Surgery* 1–6.
- Mozzo P, Procacci C, Tacconi A, Martini PT & Andreis IA (1998) A new volumetric CT machine for dental imaging based on the cone-beam technique: preliminary results. *Eur Radiol* 8: 1558–1564.
- Nagasaka H, Sugawara J, Kawamura H & Nanda R (2009) “Surgery first” skeletal Class III correction using the Skeletal Anchorage System. *Journal of clinical orthodontics* 43: 97–105.

- Nanjappa M et al. (2011) "Transport distraction osteogenesis for reconstruction of mandibular defects": our experience. *J Maxillofac Oral Surg* 10: 93–100.
- Nkenke E et al. (2004) Fusion of computed tomography data and optical 3D images of the dentition for streak artefact correction in the simulation of orthognathic surgery. *Dentomaxillofac Radiol* 33: 226–232.
- Noh H, Nabha W, Cho JH & Hwang HS (2011) Registration accuracy in the integration of laser-scanned dental images into maxillofacial cone-beam computed tomography images. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 140: 585–591.
- Nurminen L, Pietilä T & Vinkka-Puhakka H (1999) Motivation for and satisfaction with orthodontic-surgical treatment: a retrospective study of 28 patients. *Eur J Orthod* 21: 79–87.
- O'Brien KD, Shaw WC & Roberts CT (1993) The use of occlusal indices in assessing the provision of orthodontic treatment by the hospital orthodontic service of England and Wales. *Br J Orthodont* 20: 25–35.
- O'Brien K, Wright J, Conboy F, Appelbe P, Bearn D, Caldwell S, et al. (2009) Prospective, multi-center study of the effectiveness of orthodontic/orthognathic surgery care in the United Kingdom. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 135:709-14.
- Obwegeser H & Trauner R (1955) Zur Operationstechnik bei der Progenie und anderen Unterkieferanomalien. *Dtsch Zahn Mund Kieferheilkd* 23: 1–16.
- Obwegeser H (1970) [The one time forward movement of the maxilla and backward movement of the mandible for the correction of extreme prognathism]. *SSO Schweiz Monatsschr Zahnheilkd* 80: 547–556.
- Obwegeser JA (1994) Osteosynthesis using biodegradable poly-p-dioxanon (PDS II) in Le Fort I-osteotomy without postoperative intermaxillary fixation. *J Craniomaxillofac Surg* 22: 129–137.
- Olszewski R & Reychler H (2004) [Limitations of orthognathic model surgery: theoretical and practical implications]. *Rev Stomatol Chir Maxillofac* 105: 165–169.
- Olszewski R (2009) Re: How accurate is model planning for orthognathic surgery? Sharifi A, Jones R, Ayoub A, Moos K, Walker F, Khambay B, McHugh S. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2008;37:1089-1093. *J Oral Maxillofac Surg* 38: 1009–1010.
- Omura T, Glickman RS & Super S (1995) Method to verify the accuracy of model surgery and prediction tracing. *Int J Adult Orthodon Orthognath Surg* 11: 265–270.
- Pauwels R et al. (2012) Effective dose range for dental cone beam computed tomography scanners. *Eur J Radiol* 81: 267–271.

- Plooij JM et al. (2011) Digital three-dimensional image fusion processes for planning and evaluating orthodontics and orthognathic surgery. A systematic review. *Int J Oral Maxillofac Surg* 40: 341–352.
- Ponduri S, Pringle A, Illing H & Brennan PA (2011) Peer Assessment Rating (PAR) index outcomes for orthodontic and orthognathic surgery patients. *Br J Oral Maxillofac Surg* 49: 217–220.
- Proffit WR, White RP & Sarver DM (2003) Contemporary treatment of dentofacial deformity. St Louis: Mosby; 2003. p. 164-170.
- Rangel FA, Maal TJ, Bergé SJ & Kuipers-Jagtman AM (2012) Integration of digital dental casts in cone-beam computed tomography scans. *ISRN Dent* 2012:949086.
- Reuther J (2013) [Orthognathic surgery: correction of bone malformation]. *Mund Kiefer Gesichtschir* 4: S237–S248.
- Richmond S et al. (1992a) The development of the PAR Index (Peer Assessment Rating): reliability and validity. *Eur J Orthod* 14: 125–139.
- Richmond S, Shaw WC, Roberts CT & Andrews M (1992b) The PAR Index (Peer Assessment Rating): methods to determine outcome of orthodontic treatment in terms of improvement and standards. *Eur J Orthod* 14: 180–187.
- Richmond S & Andrews M (1993) Orthodontic treatment standards in Norway. *Eur J Orthod* 15: 7–15.
- Richmond S et al. (1993) Orthodontics in the general dental service of England and Wales: a critical assessment of standards. *Br Dent J* 174: 315–329.
- Richmond S & Daniels CP (1998a) International comparisons of professional assessments in orthodontics: part 1- treatment need. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 113: 180–185.
- Richmond S & Daniels CP (1998b) International comparisons of professional assessments in orthodontics: part 2 - treatment outcome. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 113: 324–328.
- Riedman DT & Berg R (1999) Retrospective evaluation of the outcome of orthodontic treatment in adults. *J Orofac Orthop* 60: 108–123.
- Riedmann T, Georg T & Berg R (1999) [Adult patients' view of orthodontic treatment outcome compared to professional assessments]. *J Orofac Orthop* 60: 308–320.
- Roberts JA, Drage NA, Davies J & Thomas DW (2009) Effective dose from cone beam computed tomography examinations in dentistry. *Br J Radiol* 82: 35–40.

- Sachs L & Hedderich J (2009) *Angewandte Statistik*. 12. Auflage, Springer Verlag, Heidelberg New York
- Santler G (1998) The Graz hemisphere splint: a new precise, non-invasive method of replacing the dental arch of 3D-models by plaster models. *J Craniomaxillofac Surg* 26: 169–173.
- Santler G, Kärcher H & Ruda C (1998) Indications and limitations of three-dimensional models in cranio-maxillofacial surgery. *J Craniomaxillofac Surg*. 26: 11–16.
- Santler G (2000) 3-D COSMOS: a new 3-D model based computerised operation simulation and navigation system. *J Craniomaxillofac Surg* 28: 287–293.
- Schulze D, Heiland M, Thurmann H & Adam G (2014) Radiation exposure during midfacial imaging using 4- and 16-slice computed tomography, cone beam computed tomography systems and conventional radiography. *Dentomaxillofac Radiol* 33: 83–86.
- Schutyser F, Van Cleynenbreugel J, Ferrant M, Schoenaers J & Suetens P (2000) Image-Based 3D Planning of Maxillofacial Distraction Procedures Including Soft Tissue Implications. In: Delp SL, DiGioia AM, Jaramaz B (Hrsg) *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI (2000) Lecture Notes in Computer Science*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 999–1007.
- Schutyser F, Swennen G & Suetens P (2005) Robust visualization of the dental occlusion by a double scan procedure. *Med Image Comput Comput Assist Interv* 8: 368–374.
- Schweska-Polly R, Kubein-Meesenburg D & Luhr H (1998) Techniques for achieving three-dimensional positioning of the maxilla applied in conjunction with the Göttingen concept. *Int J Orthodont Orthognath Surg* 13: 248–258.
- Sharma, V. K., Yadav, K., & Tandon, P. (2015). An overview of surgery-first approach: Recent advances in orthognathic surgery. *Journal of Orthodontic Science*, 4(1), 9–12. doi:10.4103/2278-0203.149609
- Shaw WC, Richmond S, O'Brien KD, Brook P & Stephens CD (1991) Quality control in orthodontics: indices of treatment need and treatment standards. *Br Dent J* 170: 107–112.
- Silva MAG et al. (2008) Cone-beam computed tomography for routine orthodontic treatment planning: A radiation dose evaluation. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 133: 640.e1–640.e5.
- Steinhauser EW (1973) Midline splitting of the maxilla for correction of malocclusion. *J Oral Surg* 30: 413–422.

- Stevens DR et al. (2006) Validity, reliability, and reproducibility of plaster vs digital study models: Comparison of peer assessment rating and Bolton analysis and their constituent measurements. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 129: 794–803.
- Sugawara J, Aymach Z, Nagasaka DH, Kawamura H & Nanda R (2010) “Surgery first” orthognathics to correct a skeletal class II malocclusion with an impinging bite. *J Clin Orthod* 44: 429–438.
- Sun Y, Luebbers HT & Politis C (2013) Three-dimensional virtual model surgery to fabricate the digital intermediate splint. *J Craniofac Surg* 24: 563–565.
- Swennen GR et al. (2007) The use of a wax bite wafer and a double computed tomography scan procedure to obtain a three-dimensional augmented virtual skull model. *J Craniofac Surg* 18: 533–539.
- Swennen GR et al. (2009a) A cone-beam computed tomography triple scan procedure to obtain a three-dimensional augmented virtual skull model appropriate for orthognathic surgery planning. *J Craniofac Surg* 20: 297–307.
- Swennen GR et al. (2009b) A cone-beam CT based technique to augment the 3D virtual skull model with a detailed dental surface. *Int J Oral Maxillofac Surg* 38: 48–57.
- Templeton KM, Powell R, Moore MB, Williams AC & Sandy JR (2006) Are the Peer Assessment Rating Index and the Index of Treatment Complexity, Outcome, and Need suitable measures for orthognathic outcomes? *Eur J Orthod* 28: 462–466.
- Terai H, Shimahara M, Sakinaga Y & Tajima S (1999) Accuracy of integration of dental casts in three-dimensional models. *J Oral Maxillofac Surg* 57: 662–665.
- Teuscher U, Marxer H & Hadjianghelou O (1983) [Cephalometric study of the problem of relapse after sagittal splitting of ramus for correction of skeletal open bite]. *Inf Orthod Kieferorthop* 15: 245–254, 257–261.
- To EWH et al. (2014) The use of stereotactic navigation guidance in minimally invasive transnasal nasopharyngectomy: a comparison with the conventional open transfacial approach. *Br J Radiol* 75: 345–350.
- Trauner R (1967) [A new surgical technique in prognathism] *Dtsch Zahn Mund Kieferheilkd. Zentralbl Gesamte* 49: 77–87.
- Troulis MJ, Everett P, Seldin EB, Kikinis R & Kaban LB (2002) Development of a three-dimensional treatment planning system based on computed tomographic data. *Int J Oral Maxillofac Surg* 31: 349–357.

- Tsiklakis K et al. (2005) Dose reduction in maxillofacial imaging using low dose Cone Beam CT. *Eur J Radiol* 56: 413–417.
- Tsuroda H & Miyamoto Y (2003) None or minimum pre-operative orthodontic treatment for orthognathic surgery in answer to patient's request of immediate facial aspect change. *Journal of Japan Society of Aesthetic Plastic Surgery*. ((habe ich nicht gefunden))
- Uechi J et al. (2006) A novel method for the 3-dimensional simulation of orthognathic surgery by using a multimodal image-fusion technique. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 130: 786–798.
- Vercellotti T & Podesta A (2007) Orthodontic microsurgery: a new surgically guided technique for dental movement. *Int J Periodontics Restorative Dent* 27: 325–331.
- Villegas C, Oberti G, Jimenez I, Franchi L & Baccetti T (2010a) Early orthognathic surgery in growing Class III patients. *J Clin Orthod* 44: 651–664.
- Villegas C, Uribe F, et al. (2010b) Expedited correction of significant dentofacial asymmetry using a “surgery first” approach. *J Clin Orthod* 44: 97–103. ((siehe auch Swennen et al. 2010))Wang YC, Ko EW, Huang CS, Chen YR & Takano-Yamamoto T (2010) Comparison of transverse dimensional changes in surgical skeletal Class III patients with and without presurgical orthodontics. *J Oral Maxillofac Surg* 68: 1807–1812.
- Wassmund M (1935) Lehrbuch der Praktischen Chirurgie des Mundes und der Kiefer. *Meusser-Verlag, Bd. 1, Meusser, Leipzig*
- Wilcko WM, Wilcko T, Bouquot JE & Ferguson DJ (2001) Rapid orthodontics with alveolar re-shaping: two case reports of decrowding. *Int J Periodontics Restorative Dent*, 21: 9–19.
- Xia J et al. (1999) Three-dimensional virtual reality surgical planning and simulation workbench for orthognathic surgery. *Int J Adult Orthodon Orthognath Surg* 15: 26–282.
- Xia J et al. (2000a) Computer-assisted three-dimensional surgical planning and simulation: 3D virtual osteotomy. *Int J Oral Maxillofac Surg* 29: 11–17.
- Xia et al. (2000b) Three-dimensional virtual reality surgical planning and simulation workbench for orthognathic surgery. *Int J Orthodont Orthognath Surg* 15: 265–282.
- Xia JJ, Gateno J & Teichgraeber JF (2005) Three-dimensional computer-aided surgical simulation for maxillofacial surgery. *Atlas Oral Maxillofac Surg Clin North Am* 13: 25–39.
- Xia JJ et al. (2007) Accuracy of the Computer-Aided Surgical Simulation (CASS) System in the Treatment of Patients With Complex Craniomaxillofacial Deformity: A Pilot Study. *J Oral Maxillofac Surg* 65: 248–254.

- Xia JJ, J Gateno JF & Teichgraeber JF (2009) New Clinical Protocol to Evaluate Craniomaxillofacial Deformity and Plan Surgical Correction. *J Oral Maxillofac Surg* 67: 2093–2106.
- Xia JJ, Chang YB, Gateno J, Xiong Z & Zho X (2010) Automated Digital Dental Articulation. *Med Image Comput Comput Assist Interv* 13: 278–286.
- Xia JJ et al. (2011a) A new method to orient 3-dimensional computed tomography models to the natural head position: a clinical feasibility study. *J Oral Maxillofac Surg* 69: 584–591. ((siehe auch Swennen et al. (2011))
- Xia JJ et al. (2011b) Outcome study of computer-aided surgical simulation in the treatment of patients with craniomaxillofacial deformities. *J Oral Maxillofac Surg* 69: 2014–2024.
- Yaffe A, Fine N & Binderman I (1994) Regional accelerated phenomenon in the mandible following mucoperiosteal flap surgery. *J Periodontol* 65: 79–83.
- Yu CC, Chen PH, Liou EJ, Huang CS & Chen CR (2010) A Surgery-first approach in surgical-orthodontic treatment of mandibular prognathism--a case report. *Chang Gung Med J* 33: 699–705.
- Zachow S, Gladilin E, Zeilhofer HF & Sader R (2001) Improved 3D Osteotomy Planning in Cranio-maxillofacial Surgery. In: Niessen W, Viergever M (Hrsg.) *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI (2001) Lecture Notes in Computer Science*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 473–481.
- Zarrinkelk HM, Throckmorton GS, Ellis E 3rd, & Sinn DP (1996) Functional and morphologic changes after combined maxillary intrusion and mandibular advancement surgery. *J Oral Maxillofac Surg* 54: 828–837.

## 7 Abkürzungsverzeichnis

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
Abb.	Abbildung
AOO	accelerated osteogenic orthodontics
BSSO	Bilaterale Sagittale Split-Osteotomie
CAD	computer-aided design
CAM	computer-aided manufacturing
CASS	computer-aided surgical simulation
CBCT	Cone-Beam Computed Tomography
CCD	charge-coupled Device
cd/m <sup>2</sup>	Candela pro Quadratmeter
cm	Zentimeter
CT	Computertomografie
DGZMK	Deutschen Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
DICOM	Digital Imaging and Communications in Medicine
DIN	Deutsche Institut für Normung
DVT	Digitale Volumetomografie
FOV	Field of View
ICP	iterative closest point
ICTP	C-terminales Telozeptid des Typ I Kollagens
mA	Milliampere
mm	Millimeter
MRT	Magnetresonanztomografie
MTDLD	monocortical tooth dislocation and ligament distraction
NHD	neutral head position
OK	Oberkiefer
OP	Operation
PAR-Index	peer assessment rating index
Pb	Prämolar
post-PAR	postoperativer PAR
prä-PAR	präoperativer PAR
RAP	regional acceleratory phenomen
s	Sekunde
SAS	skeletal anchorage system
SF	“Surgery First”



---

SPSS	Statistical Package of Social Science
STL	stereolithography
Sv / $\mu$ Sv	Sievert / Microsievert
UK	Unterkiefer
V / kV	Volt / Kilovolt
VSF	“Virtual Surgery First”
z.B.	zum Beispiel

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: DVT-Gerät „MESANTIS® line“ .....	33
Abbildung 2: Klinisches Beispiel der Reorientierung des 3D-Datensatzes in Sagittal-, Koronal- und Axialebene über den Referenzpunkt Nasion (N) .....	35
Abbildung 3: Klinisches Beispiel für die Festlegung der spezifischen Orientierungspunkte auf knöchernen und dentalen Strukturen zur Ermittlung von kieferorthopädischen Parametern für die Behandlungsplanung mit Koordinatenangabe in Sagittal-, Koronal- und Axialebene (grün).....	35
Abbildung 4: Klinisches Beispiel für die tabellarische Darstellung der Koordinatenangaben der im 3D-Datensatz festgelegten spezifischen Orientierungspunkte in Sagittal-, Koronal- und Axialebene .....	36
Abbildung 5: Klinisches Beispiel für die Analyse des peridental Knochenangebotes in der Software Invivo 5.1.6. ....	36
Abbildung 6: Klinisches Beispiel für die Darstellung digitalisierter Gipsmodelle durch den Oberflächenscanner - Orthodontic 3D Scanner R700™ der Firma 3Shape .....	37
Abbildung 7: Klinisches Beispiel für die Fusion des DICOM-Datensatzes des Schädels mit den STL-Datensätzen der dentalen Strukturen (OK und UK) in der Software SimPlant Pro OMS.....	37
Abbildung 8: Klinisches Beispiel für Segmentierung der Kieferbasen und Darstellung der Osteotomielinien in der Software SimPlant Pro OMS .....	38
Abbildung 9: Darstellung der Benutzeroberfläche für die translatorische und rotatorische Verschiebung der virtuellen Kiefersegmente in der Software SimPlant Pro OMS .....	38
Abbildung 10: Klinisches Beispiel des finalen Planungsreports aus dem 3D-Röntgeninstitut MESANTIS® Berlin mit numerischen Angaben der virtuell geplanten Positionsänderungen der einzelnen Segmente im OK und UK .....	39
Abbildung 11: Klinisches Beispiel der virtuellen Positionsänderungen der dento-alveolären Strukturen im Bezug auf das Kranium in fronto-lateraler (oben links) und lateraler Ansticht (oben rechts) sowie Änderung der isolierten Zahnbögen (unten links) und des virtuell berechneten Weichteilprofils in lateraler und fronto-lateraler Ansicht (unten rechts).....	40
Abbildung 12: CAD/CAM-gefertigte OP-Splinte für eine bimaxillär geplante orthognathe Chirurgie.....	41
Abbildung 13: Außenansicht des Dental Scanners - Orthodontic 3D Scanner R700™ der Firma 3Shape.....	46
Abbildung 14: Grafische Darstellung der Arbeitsweise des Dental Scanners - Orthodontic 3D Scanner R700™ der Firma 3Shape nach dem Prinzip des Laserschnittverfahrens in Kombination mit zwei hochauflösenden Kameras .....	46
Abbildung 15: Darstellung der Messung der Kontaktpunktverlagerung mit der kieferorthopädischen Software 3Shape OrthoAnalyzer™ .....	47
Abbildung 16: Messmethode der bukkalen Okklusion in der sagittalen Ebene mit der kieferorthopädischen Software 3Shape OrthoAnalyzer™ .....	48
Abbildung 17: Messmethode der bukkalen Okklusion in der vertikalen Ebene mit der kieferorthopädischen Software 3Shape OrthoAnalyzer™ .....	49

Abbildung 18: Messmethode der bukkalen Okklusion in der vertikalen Ebene mit der kieferorthopädischen Software 3Shape OrthoAnalyzer™ .....	50
Abbildung 19: Messmethode des horizontalen Überbisses (Overjet) mit der kieferorthopädischen Software 3Shape OrthoAnalyzer™ .....	51
Abbildung 20: Messmethode des vertikalen Überbisses (Overbite) mit der kieferorthopädischen Software 3Shape OrthoAnalyzer™ .....	51
Abbildung 21: Messmethode der Mittellinienabweichung mit der kieferorthopädischen Software 3Shape OrthoAnalyzer™ .....	52
Abbildung 22: Aufbau eines Whisker-Box-Plots.....	57
Abbildung 23: Verteilung der gewichteten prä- und post-PAR-Werte im Gesamtkollektiv (Whisker-Box-Plot).....	59
Abbildung 24: Gewichtete prä- und post-PAR-Werte der Patienten des Gesamtkollektivs (n=24, Scatter-Plot).....	60
Abbildung 25: Verteilung des PAR-Veränderung(abs) in den Subgruppen mit monomaxillärer Operationen an der Maxilla oder Mandibula sowie mit bimaxillären Operationen (Whisker-Box-Plot) ) (monomax. Maxilla: n=5; monomax. Mandibula: n=2; bimax. OP: n= 17) .....	61
Abbildung 26: Verteilung des %-PAR-Veränderung(abs) in den Subgruppen mit monomaxillärer Operationen an der Maxilla oder Mandibula sowie mit bimaxillären Operationen (Whisker-Box-Plot) (monomax. Maxilla: n=5; monomax. Mandibula: n=2; bimax. OP: n= 17) .....	62
Abbildung 27: Verteilung des %-PAR-Veränderung(abs) in den skelettalen Klassen I–III (Whisker-Box-Plot) (skel. Klasse I: n=4; skel. Klasse II: n= 6; skel. Klasse III: n=14).....	63
Abbildung 28: Verteilung des %-PAR-Veränderung(abs) in den skelettalen Klassen I–III (Whisker-Box-Plot) (skel. Klasse I: n=4; skel. Klasse II: n= 6; skel. Klasse III: n=14).....	63
Abbildung 29: Verteilung Behandlungsdauer in Abhängigkeit von der OP-Methode (Whisker-Box-Plot).....	65
Abbildung 30: Verteilung der Behandlungsdauer bei den Patienten in den skelettalen Klassen I–III (Whisker-Box-Plot) .....	66

## 9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Tabellarische Gegenüberstellung von Behandlungszeiten von konventionell an Gipsmodellen durchgeführten OPs mit SF und ohne SF/VSF .....	12
Tabelle 2:	Tabellarische Darstellung der einzelnen Komponenten des PAR-Index.....	24
Tabelle 3:	Tabellarische Darstellung unterschiedlicher Wichtungsfaktoren der einzelnen PAR-Komponenten nach Richmond und DeGuzman .....	25
Tabelle 4:	Tabellarische Darstellung von PAR-Index-Parametern aus Studien mit Patienten mit skelettalen Kieferfehlstellungen .....	26
Tabelle 5:	Charakterisierung des Patientengutes nach Geschlecht und Alter .....	30
Tabelle 6:	Ermittlung der skelettalen Klasse über den Wits-Wert .....	31
Tabelle 7:	Übersicht über die skelettalen Klassen und durchgeführten OP-Methoden.....	32
Tabelle 8:	Technische Angaben der für die virtuelle Planung des Patientenguts verwendeten DVT-Geräte .....	33
Tabelle 9:	Technische Informationen des verwendeten Befundungsmonitors.....	42
Tabelle 10:	Auflistung der Punkteverteilung der Kompaktpunktverlagerung im PAR-Index .....	42
Tabelle 11:	Auflistung der Punktwertverteilung der bukkalen Okklusion im PAR-Index in der sagittalen, vertikalen und transversalen Ebene .....	43
Tabelle 12:	Auflistung der Punktwertverteilung des sagittalen Überbisses (Overjet) im PAR-Index.....	43
Tabelle 13:	Auflistung der Punktwertverteilung des vertikalen Überbisses (Overbite) im PAR-Index.....	44
Tabelle 14:	Auflistung der Punktwertverteilung des vertikalen Überbisses (Overbite) im PAR-Index.....	44
Tabelle 15:	Komponenten des prä- und post-PAR-Index zur Ermittlung der absoluten bzw. absolut/prozentualen PAR-Veränderung .....	53
Tabelle 16:	r Methodenfehler nach Dahlberg und Zuverlässigkeitskoeffizienten nach Hosten bei der Überprüfung der intraindividuellen Reproduzierbarkeit des PAR-Index.....	58
Tabelle 17:	Gewichtete prä- und post-PAR-Werte der Patienten des Gesamtkollektivs.....	59
Tabelle 18:	Absolute und prozentuale Veränderung des PAR-Wertes der Patienten des Gesamtkollektivs .....	60
Tabelle 19:	Individuelle Behandlungsdauer der Patienten .....	64

## 10 Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Christian Flechsig versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: „Untersuchungen zu Behandlungserfolgen und Behandlungszeiten mit dem Konzept „*Virtual Surgery First*“ bei kombinierten kieferorthopädisch/kieferchirurgischen Therapien“, selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung (siehe „Uniform Requirements for Manuscripts (URM)“ des ICMJE -[www.icmje.org](http://www.icmje.org)) kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

Meine Anteile an etwaigen Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem/der Betreuer/in, angegeben sind. Sämtliche Publikationen, die aus dieser Dissertation hervorgegangen sind und bei denen ich Autor bin, entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer un- wahren eidesstattlichen Versicherung (§156,161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.“

Datum

Unterschrift

### Anteilerklärung an etwaigen erfolgten Publikationen

- keine Publikation

Unterschrift, Datum und Stempel des betreuenden Hochschullehrers/der betreuenden Hochschullehrerin

Unterschrift des Doktoranden/der Doktorandin

Berlin, den

---

Christian Flechsig

Berlin, den

---

Prof. Dr. Axel Bumann

## **Lebenslauf**

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

## Danksagung

Ich danke den Menschen, die mich mit Liebe und Vertrauen in der Zeit, in der diese Arbeit entstanden ist, unterstützt haben...

Victoria Schölzel

Clemens Finkelstein & Steffen Schmid

Meine Eltern

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr. Axel Bumann für die Überlassung des Promotionsthemas, das entgegengebrachte Vertrauen und die zielführende, unkomplizierte Betreuung über die gesamte Zeit hinweg.

Danke auch an sämtlichen Mitarbeiter von MESANTIS, für die Unterstützung bei Aufbau und Inbetriebnahme der Meßplätze.

Ulrike von Hehn gilt ein Dank für die statistische Beratung sowie ihre Unterstützung bei der Auswertung der Messdaten.