

Aus der Poliklinik für Kieferorthopädie
der Julius-Maximilians-Universität Würzburg

Direktorin:

Prof. Dr. med. dent. Angelika Stellzig-Eisenhauer

Untersuchung posttherapeutischer Veränderungen bei
Klasse III-Patienten

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde der
Medizinischen Fakultät
der
Julius-Maximilians-Universität Würzburg

vorgelegt von
Ines Groneick
aus Gehrde

Würzburg, November 2014



Referentin: Prof. Dr. med. dent. Angelika Stellzig-Eisenhauer
Korreferent: Priv.-Doz. Dr. Dr. Josip S. Bill
Dekan: Prof. Dr. med. Matthias Frosch

Tag der mündlichen Prüfung: 04. November 2014

Die Promovendin ist Zahnärztin

Für meine liebe Familie

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Einführung.....	1
1.2	Umstellungsosteotomien	11
1.3	Dentale Volumentomographie (DVT).....	12
1.4	Fernröntgenseitenbild (FRS).....	13
1.5	Grauwerte	13
2	Fragestellung und Ziele	15
3	Material und Methoden	16
3.1	Studiendaten	16
3.2	Methode zur Vermessung des PAS im DVT	18
3.2.1	Generierung der 3D-Bilder	18
3.2.2	Festlegung der Schnittebenen	21
3.2.3	Volumenbestimmung	24
3.2.4	Matching und Vergleich der prä- und postoperativen 3D-Modelle.....	25
3.2.5	Analyse des Querschnitts des PAS	28
3.2.6	Untersuchung der Form des PAS	32
3.3	Methode zur kephalometrischen Analyse des FRS	36
3.4	Methodenfehler nach Dahlberg (1940)	42
3.4.1	Reliabilität der Volumenberechnungen	42
3.4.2	Reliabilität der Formbestimmungen	43
3.4.3	Reliabilität der kephalometrischen Messungen	43
3.5	Statistische Auswertung.....	44
4	Ergebnisse.....	45
4.1	Reliabilität.....	45
4.2	Dreidimensionale Untersuchung des PAS	47
4.2.1	Unimaxilläre Osteotomie.....	47
4.2.2	Bimaxilläre Osteotomie.....	50
4.3	Kephalometrische Auswertung	53
4.3.1	Unimaxilläre Osteotomie.....	53
4.3.2	Bimaxilläre Osteotomie.....	54
4.4	Korrelationen zwischen 3D-Werten und FRS-Werten	56
4.4.1	Korrelationen bei unimaxillär operierten Patienten	57
4.4.2	Korrelationen bei bimaxillär operierten Patienten	57

5	Diskussion	60
5.1	Material und Methoden	60
5.1.1	Patientengut.....	60
5.1.2	Bildgebung.....	61
5.1.3	Analyse	63
5.2	Ergebnisse	67
5.2.1	Dreidimensionale Untersuchung	68
5.2.2	Kephalometrische Auswertung.....	73
5.2.3	Fazit.....	74
5.3	Ausblick	77
5.4	Schlussfolgerung.....	80
6	Zusammenfassung	83
7	Literaturverzeichnis	87
8	Abkürzungsverzeichnis	92
9	Abbildungsverzeichnis.....	93
10	Tabellenverzeichnis	94
11	Danksagung	95

1 Einleitung

1.1 Einführung

Bei Patienten der Angle-Klasse III besteht in der Regel eine Disharmonie in der Lagebeziehung von Ober- und Unterkiefer. Gründe dieser Disharmonie können entweder ein zu großer Unterkiefer oder ein zu kleiner Oberkiefer oder beides zugleich sein.

Schon 1907 entwickelte der Amerikaner Edward Hartley Angle (1855 – 1930) eine Nomenklatur, welche immer noch international Verwendung findet, um sagittale Okklusionsabweichungen zu beschreiben und skelettale und dentale Dysgnathien nach Schweregraden einzuteilen. Angle ging davon aus, dass die oberen 6-Jahr-Molaren immer in korrekter Position stehen und entwarf ausgehend von der Beziehung der 6-Jahr-Molaren des Unterkiefers zum Oberkiefer drei Klassifizierungen (Abbildung 1):

Angle-Klasse	I	Neutrale Bisslage
Angle-Klasse	II	Distale Bisslage
	II/1	Distale Bisslage mit Labialstand der Oberkiefer-Frontzähne
	II/2	Distale Bisslage mit Steilstand der Oberkiefer-Frontzähne
Angle-Klasse	III	Mesiale Bisslage

Die römischen Ziffern beschreiben die skelettale, die arabischen Ziffern die dentale Dysgnathie (Labial- oder Steilstand der Oberkiefer-Frontzähne).

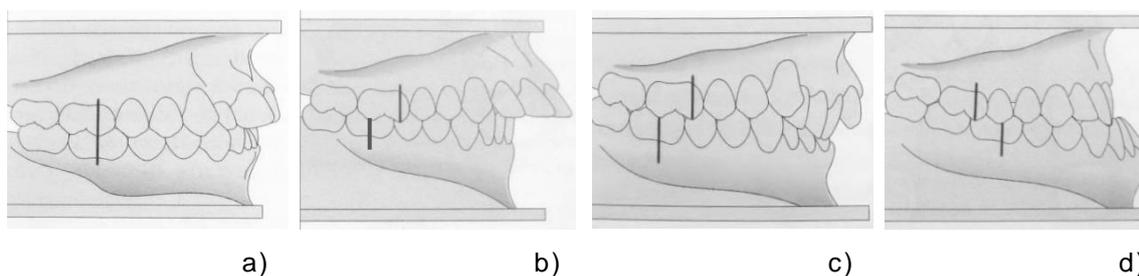


Abbildung 1: Die Angle-Klassen

a) Angle-Klasse I, b) Angle-Klasse II/1, c) Angle-Klasse II/2, d) Angle-Klasse III. (Quelle: Kahl-Nieke 2010, bearbeitet mit der Software Microsoft Word 2010)

Bei Patienten der skelettalen Klasse III liegen die unteren 6-Jahr-Molaren im Gegensatz zur Neutralbisslage weiter mesial (Abbildung 1, d)). Ein typisches Symptom für diese Klasse ist die umgekehrte sagittale Frontzahnstufe. Eine persistierende progene Verzahnung kann aus einer der folgenden vier Anomalien, die nach Bimler (1952) den progenen Formenkreis bilden, entstehen:

- frontaler Kreuzbiss (= umgekehrter Overjet an einem oder mehreren Frontzähnen)
- progener Zwangsbiss (= frontaler Kreuzbiss mit Diskrepanz zwischen Ruheschwebelage und Schlussbissstellung, eine Rückbissmöglichkeit ist vorhanden)
- echte Progenie (= überentwickelter Unterkiefer und normale Oberkiefergröße oder anterior eingebaute Unterkieferbasis)
- Pseudoprogenie (= Mittelgesichtshypoplasie mit unterentwickeltem Oberkiefer)

In einigen Fällen sind rein kieferorthopädische Maßnahmen zur Korrektur der skelettalen Anomalien nicht ausreichend und es kann dann bei Patienten mit abgeschlossenem Wachstum eine kombiniert kieferorthopädisch-kieferchirurgische Therapie in Betracht gezogen werden. Für das operative Vorgehen bei Patienten der Angle-Klasse III gibt es drei Möglichkeiten (Abbildung 2):

1. Unimaxilläre Umstellungsosteotomie im Unterkiefer
Lediglich der Unterkiefer wird durch eine sagittale Unterkiefer-spaltung (zum Beispiel nach Obwegeser-Dal Pont) rückverlagert.
2. Unimaxilläre Umstellungsosteotomie im Oberkiefer
Lediglich der Oberkiefer wird abgetrennt (zum Beispiel mithilfe einer LeFort-I-Osteotomie) und vorverlagert.
3. Bimaxilläre Umstellungsosteotomie
Zusätzlich zur Rückverlagerung des Unterkiefers wird der gesamte Oberkiefer-Zahnbogen (zum Beispiel mithilfe einer LeFort-I-Osteotomie) vorverlagert.

Die Entscheidung, welche chirurgische Therapie durchgeführt wird, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Das Ausmaß der Dysgnathie bestimmt die Art der Therapie, aber auch das zu erwartende Ergebnis. Dabei wird nicht nur ein Augenmerk auf das funktionelle, sondern auch auf das ästhetische Ergebnis gelegt. (Schwenzer und Ehrenfeld 2011a) Mögliche Kriterien für die Therapieplanung könnten die Atmung, der Lippenchluss, ein offener Biss und die Weichteil Anatomie wie zum Beispiel der Nasolabialwinkel sein. Die Indikation einer kombiniert kieferorthopädisch-kieferchirurgischen Therapie wird angegeben als „das Integral aus dem Ausprägungsgrad der Dysgnathie, der Compliance des Patienten und dem skelettalen Wachstumstyp bzw. dem Alter des Patienten“ (Bier und Burkhardt et al. 2007).

Es gibt zur Zeit keine einheitlichen Behandlungsgrundlagen. Aufgrund ihrer Untersuchungen empfehlen Demetriades et al., dass es ab einer erforderlichen Rückverlagerung des Unterkiefers von 5mm generell besser ist, bimaxillär zu operieren, um eine Einengung des PAS zu vermeiden (Demetriades und Chang et al. 2010). Schopf stellt dar, dass „Zur Planung der Operation, insbesondere zur Festlegung des Umfangs der Korrektur im Ober- und/oder Unterkiefer“ die Auswirkungen in einer „Modell-OP“ getestet werden sollten (Schopf 2008). Harzer wiederum ist der Ansicht, dass ab einer Verlagerung von mehr als 7-10mm in sagittaler oder vertikaler Richtung aufgrund von ausbleibender funktio-neller Adaptation die Rezidivgefahr steigt. Somit sollte das Ausmaß der

Verlagerung das Kriterium für die Entscheidung zwischen uni- und bimaxillärer Osteotomie sein (Harzer 2011).

Zwischen der kraniofazialen und weichgewebigen Morphologie des Mund-Kiefer-Gesichts- und Pharynxbereiches und der Dimension des PAS beziehungsweise respiratorischen Schwierigkeiten und dem obstruktiven Schlafapnoesyndrom (OSAS) wird durch mehrere Studien ein signifikanter Zusammenhang belegt:

- Zusammenhang zwischen der kraniofazialen Morphologie des Mund-, Kiefer-, Gesichts- und Pharynxbereiches und der Dimension des PAS (Tourne 1990; Miles und Vig et al. 1996; Joseph und Elbaum et al. 1998; Battagel und Johal et al. 1999; Battagel und Johal et al. 2000; Turnbull und Battagel 2000; Abu Allhaija und Al-Khateeb 2005; de Freitas und Alcazar et al. 2006; Alves und Zhao et al. 2008; Stellzig-Eisenhauer und Meyer-Marcotty 2010; Alves und Franzotti et al. 2012; Lee und Chun et al. 2012).
- Zusammenhang der kraniofazialen Morphologie des Mund-, Kiefer-, Gesichts- und Pharynxbereiches mit respiratorischen Schwierigkeiten und OSAS (Tourne 1990; Athanasiou und Papadopoulos et al. 1994; Miles und Vig et al. 1996; Joseph und Elbaum et al. 1998; Battagel und Johal et al. 2000; Turnbull und Battagel 2000; Riha und Brander et al. 2005).
- Beeinflussung der Dimension des PAS durch die weichgewebige Morphologie des Mund-Kiefer-Gesichts- und Pharynxbereiches (Joseph und Elbaum et al. 1998; Alves und Zhao et al. 2008; Stellzig-Eisenhauer und Meyer-Marcotty 2010).
- Zusammenhang u.a. zwischen der Dimension des PAS mit respiratorischen Schwierigkeiten und OSAS (Athanasiou und Papadopoulos et al. 1994; Battagel und Johal et al. 2000; Turnbull und Battagel 2000; Stellzig-Eisenhauer und Meyer-Marcotty 2010).

Bei einem OSAS führt ein partieller Verschluss der oberen Atemwege zu einer mindestens 10-sekündigen Unterbrechung des Atemflusses für mehr als 5-10 mal pro Schlafstunde. Ursachen können eine übersteigerte Entspannung und Erschlaffung der die Atemwege freihaltenden Mus-

kulatur und/oder eine anatomisch bedingte Verengung der Atemwege sein (Stellzig-Eisenhauer und Meyer-Marcotty 2010).

Zu der kraniofazialen Morphologie zählen die Ausrichtung der vorderen Schädelbasis, die Lage von Maxilla oder Mandibula und ihre Kieferrelation zueinander, die Länge des Mandibularkörpers, die Hyoidposition sowie ein sagittales oder vertikales Wachstumsmuster. Die weichgewebige Morphologie wird bestimmt durch die Ausdehnung des weichen Gaumens, die Zungengröße und die Größe des lymphatischen Gewebes.

Die oben aufgeführten Studien legen allerdings zum Teil unterschiedliche Einflussfaktoren auf die Dimension des PAS dar. Eine anhand von Fernröntgenseitenbilddauswertungen (FRS-Auswertungen) durchgeführte Untersuchung von de Freitas et al. aus dem Jahr 2006 belegt, dass es keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Dimension der oberen Atemwege zwischen Klasse II-Patienten und Klasse I-Patienten - jeweils mit ausgeglichenem Wachstumsmuster und ohne vorherige Behandlung - gibt. Jedoch ist sowohl bei Klasse I-Patienten als auch bei Klasse II-Patienten mit vertikalem Wachstumsmuster der obere Luftweg signifikant schmaler. Alves et al. führten 2008 erstmals anhand von Computertomographien (CT) eine dreidimensionale Untersuchung durch. Das Ergebnis dieser Studie, bei welcher Daten von Patienten der Angle-Klassen II und III mit ausgeglichenem Wachstumsmuster ausgewertet wurden, unterlegt Teile des Ergebnisses von de Freitas et al.: Die Mehrzahl der pharyngealen Messungen zeigt sich unbeeinflusst von dem Typ der Malokklusion. Trotz der engen Lagebeziehung von Kiefer-Gesichtsbereich und Pharynx stellten diese Autoren sowohl retroplattal als auch retroglossal bei gesunden Patienten mit ausgeglichenem Wachstumsmuster keinen Zusammenhang zwischen dem Typ der Malokklusion und der Form des PAS fest. (de Freitas und Alcazar et al. 2006; Alves und Zhao et al. 2008)

Nicht nur kongenitale Disharmonien nehmen Einfluss auf die Form und Größe des PAS. Auch kombiniert kieferorthopädisch-kieferchirurgische Therapien bei Patienten mit skelettalen Anomalien können neben der Verbesserung der Okklusionsverhältnisse, der Kaufunktion und des Ge-

sichtsprofils Änderungen in der Morphologie des pharyngealen Atemweges (pharyngeal airway space, PAS) bewirken (Turnbull und Battagel 2000).

Mandibula, Radix Linguae, Hyoid und Pharynxwand sind durch ihre Muskeln und Ligamente eng miteinander verbunden (Degerliyurt und Ueki et al. 2009; Hong und Park et al. 2011).

Da der Unterkiefer über den Musculus genioglossus mit dem Zungengrund und Musculus geniohyoideus mit dem Hyoid verbunden ist, kann eine Variation in der Anatomie der den Pharynx umgebenden Strukturen auch eine Veränderung der Gestalt des Pharynx bedingen (Chen und Terada et al. 2007; Park und Kim et al. 2012).

Eine zweidimensionale Studie von Battagel et al. belegt, dass sich durch den Zusammenhang des Unterkiefers mit dem Hyoid über dessen Muskelansätze bei einer Vorverlagerung des Unterkiefers Teile des PAS vergrößern (Battagel und Johal et al. 1999). Dieses Verfahren scheint deshalb bei einigen OSAS-Patienten eine geeignete Behandlungsmethode zu sein (Achilleos und Krogstad et al. 2000; Kochel und Meyer-Marcotty et al. 2013).

Achilleos et al. wiesen ebenfalls nach, dass chirurgische Vor- beziehungsweise Rückverlagerungen des Unterkiefers die Weite des PAS beeinflussen können (Achilleos und Krogstad et al. 2000; Achilleos und Krogstad et al. 2000). Zahlreiche weitere Autoren zeigten in zweidimensionalen Studien auf, dass bei einer Unterkieferrückverlagerung durch die damit verbundene Herabsetzung des Hyoids und der resultierenden Verschiebung des Zungengrundes nach dorsal der Pharynx - abgesehen vom Nasopharynx - in anteroposteriorer Richtung eingeengt wird (Greco und Froberg et al. 1990; Samman und Tang et al. 2002; Saitoh 2004; Chen und Terada et al. 2007; Degerliyurt und Ueki et al. 2009).

In einzelnen Fällen kann diese Unterkieferrückverlagerung zu einer erschwerten Atmung, Hypopnoe bis hin zu OSAS führen (Riley und Powell et al. 1987; Greco und Froberg et al. 1990; Hochban und Schurmann et al. 1996; Achilleos und Krogstad et al. 2000; Chen und Terada et al. 2007; Demetriades und Chang et al. 2010; Hasebe und Kobayashi et al. 2011). Das Risiko zur Erlangung eines OSAS scheint umso mehr zu

steigen, je größer die Distanz der alleinigen Rückverlagerung des Unterkiefers ist (Demetriades und Chang et al. 2010; Hasebe und Kobayashi et al. 2011), da eine biologische Adaptation ab einem gewissen Maß nicht mehr ausreichend zu funktionieren scheint (Hasebe und Kobayashi et al. 2011).

Es gibt jedoch unterschiedliche Befunde hinsichtlich des Verhältnisses vom PAS-Volumen zum OSAS.

Turnbull und Battagel belegen, dass durch eine Rückverlagerung des Unterkiefers (UK) sowohl bei uni- (13 Patienten) als auch bei bimaxillärem Verfahren (11 Patienten) eine signifikante Verkleinerung des retrolingualen PAS hervorgerufen wird und durch die Vorverlagerung des UK eine signifikante Vergrößerung. Auf die Schlafqualität (Schnarchen und OSAS) wirkt sich jedoch nur die Vergrößerung des retrolingualen PAS aus. (Turnbull und Battagel 2000)

Die Arbeitsgruppe um Pereira-Filho et al. kommt bei der kephalometrischen Auswertung der Fernröntgenseitenbilder von sieben unimaxillär operierten Klasse-III-Patienten dagegen zu dem Ergebnis, dass die Osteotomie keine signifikanten Änderungen in anteroposteriorer Richtung bewirkt (Pereira-Filho und Castro-Silva et al. 2011).

Zweidimensionale Untersuchungen zur Auswirkung bimaxillärer Umstellungsosteotomien auf den PAS kamen ebenfalls zu unterschiedlichen Ergebnissen:

Samman et al. beschreiben bei 35 untersuchten Patienten eine Verringerung des Oropharynx, während sich Naso- und Hypopharynx nicht signifikant verändern (Samman und Tang et al. 2002). Chen et al. dagegen stellten anhand von 31 Patienten fest, dass sich kurzfristig der Nasopharynx vergrößert und Oro- und Hypopharynx verkleinern (Chen und Terada et al. 2007). Marsan et al. belegten an 53 Patienten, dass sich der Nasopharynx vergrößert (Marsan und Vasfi Kuvat et al. 2009). Pereira et al. bestätigten das Ergebnis von Marsan et al., wobei sich nach ihren Untersuchungen auch der Oropharynx vergrößert, während sich der Hypopharynx verkleinert (Pereira-Filho und Castro-Silva et al. 2011).

Die kontroversen Ergebnisse dieser oben genannten Studien führen zu unterschiedlichen Empfehlungen für das Vorgehen bei der Diagnosestellung und der Therapie:

So empfiehlt Lye generell, bei Patienten der Angle-Klasse III vor einem kieferchirurgischen Eingriff im Rahmen der Anamnese zu überprüfen, ob die gewählte Behandlungsmethode im Hinblick auf das Risiko eines OSAS entsprechend anzupassen oder gegebenenfalls gänzlich zu ändern ist. Dazu sollten extreme Tagesmüdigkeit, Schnarchen, erhöhter BMI und Krankheiten in Zusammenhang mit OSAS in Betracht gezogen und im Zweifelsfall außerdem eine Polysomnographie durchgeführt werden. (Lye 2008)

Auch Alves et al. empfehlen aufgrund der engen Beziehung zwischen skelettalen Strukturen und PAS eine Untersuchung des PAS im Rahmen der kieferorthopädischen Diagnostik durchzuführen (Alves und Franzotti et al. 2012), denn das Wachstum der kraniofazialen Strukturen kann möglicherweise durch ein atypisches Atemmuster (zum Beispiel behinderte Nasenatmung) beeinflusst werden (Aboudara und Nielsen et al. 2009; Stellzig-Eisenhauer und Meyer-Marcotty 2010).

Ein bimaxilläres Operationsverfahren befürworten Chen et al. vor allem dann, wenn Patienten weitere prädisponierende Faktoren für die Entwicklung eines OSAS besitzen, da sich hierbei auch langfristig keine signifikante Verengung des PAS ergibt (Chen und Terada et al. 2007). Auch Jakobson et al. und Hong et al. gehen davon aus, dass ein geringeres Risiko für eine Verengung des oberen Atemweges besteht, wenn bimaxillär operiert wird, da so der UK weniger zurückverlagert wird und somit mehr Platz für die Zunge bleibt (Jakobson und Neimane et al. 2010; Hong und Park et al. 2011). Degerliyurt et al. begründen eine bimaxilläre Osteotomie mit den Ergebnissen ihrer CT-basierten Studie, in der sie eine geringere Verkleinerung sowohl der anteroposterioren und lateralen Ausdehnung als auch der Querschnittsfläche auf verschiedenen Höhen des PAS nachweisen konnten als bei unimaxillärer Osteotomie (Degerliyurt und Ueki et al. 2008).

Pereira-Filho et al. ziehen nach ihren FRS-Auswertungen eine Oberkiefer-Vorverlagerung einer Unterkiefer-Rückverlagerung vor. Sie empfehlen, bei einer notwendigen Unterkiefer-Rückverlagerung möglichst bima-

xillär zu verfahren, um den PAS-minimierenden Effekt einer alleinigen Rückverlagerung zu nivellieren (Pereira-Filho und Castro-Silva et al. 2011).

Die meisten der bislang veröffentlichten Studien beruhen auf 2D-Messverfahren, bei denen der PAS mithilfe von FRS, einem allgemein anerkannten diagnostischen Verfahren, untersucht wurde. Allerdings können die Änderungen des PAS bei diesem Verfahren nicht exakt wiedergegeben werden. Die FRS-Aufnahmen können lediglich in sagittaler Richtung ausgewertet werden und durch Überlagerungen der bilateralen Strukturen können einige Orientierungspunkte unter Umständen ungenauer werden. Außerdem lassen sich von dem PAS als dreidimensionales Objekt nur zweidimensionale Messungen (lineare und Winkelmessungen) durchführen. (Alves und Zhao et al. 2008; Abramson und Susarla et al. 2010; El und Palomo 2010; Alves und Franzotti et al. 2012)

Dreidimensionale (3D) Auswertungen der Form des PAS können unter Zuhilfenahme von CT, MRT (Magnetresonanztomographie) und letztlich auch DVT (digitaler Volumetomographie) durchgeführt werden.

3D-Aufnahmen stellen sowohl in sagittaler als auch in koronaler und axialer Richtung genauere Informationen zu Anatomie und Volumen des sehr variablen PAS zur Verfügung und führen zur Verbesserung der Diagnosestellung. (Aboudara und Nielsen et al. 2009; Lenza und Lenza et al. 2010). So können zum Beispiel neben der anteroposterioren und transversalen Ausdehnung auch die Querschnittsflächen und Volumen in verschiedenen Ebenen Berücksichtigung finden.

Mehrere Arbeitsgruppen belegten, dass die dreidimensionale Auswertung in Form von CT oder DVT große Reliabilität besitzt und genauere Rückschlüsse auf das Volumen und die Form des PAS zulässt (Aboudara und Nielsen et al. 2009; Grauer und Cevitanes et al. 2009; Abramson und Susarla et al. 2010; Jakobson und Neimane et al. 2010; Lenza und Lenza et al. 2010).

Durch die Vorteile einer geringeren Strahlungs-dosis, kürzerer Scanzeiten und geringerer Kosten werden die 3D-Scans mithilfe von Computertomographen inzwischen durch DVT-Aufnahmen abgelöst. Diese bieten

mit herkömmlichen CTs vergleichbare Aufnahmen, da sich luftgefüllte Räume wie der PAS durch die verschiedenen Graustufen eindeutig von weichgewebigen Strukturen abheben (Aboudara und Nielsen et al. 2009; Lenza und Lenza et al. 2010), auch wenn Weichgewebe nicht differenziert beurteilt werden können (Palomo und Rao et al. 2008; EI und Palomo 2010; Park und Kim et al. 2012).

Trotz Anwendung von 3D-Verfahren sind die Volumenauswertungen des PAS nach Umstellungsosteotomien bei Klasse III-Patienten divergent: Während Park et al. (20 Patienten) und Hong et al. (12 Patienten) einhellig von einer Verringerung des totalen Volumens des PAS nach einer unimaxillären OP berichten, werden unterschiedliche Standpunkte zu den Folgen nach bimaxillären Umstellungsosteotomien vertreten. Park et al. (16 Patienten) und Hong et al. (9 Patienten) belegten auch hier eine Verringerung des totalen PAS-Volumens, Jakobson et al. (10 Patienten) stellten im Gegensatz dazu eine Volumenzunahme des gesamten PAS fest. (Jakobson und Neimane et al. 2010; Hong und Park et al. 2011; Park und Kim et al. 2012)

Im Gegensatz zu den oben zitierten Studien berichteten Lee et al. (21 bimaxillär behandelte Patienten) bei der Auswertung ihrer Daten über keine signifikanten Änderungen des totalen PAS-Volumens (Lee und Chun et al. 2012).

In Anbetracht der bisher veröffentlichten, sehr unterschiedlichen Ergebnisse kann vermutet werden, dass weiterführende 3D-Studien mit größeren Probandengruppen zu eindeutigeren Ergebnissen führen (Alves und Zhao et al. 2008; Abramson und Susarla et al. 2010; Jakobson und Neimane et al. 2010). Ein weiterer Grund für die verschiedenen Ergebnisse kann unter anderem das von der Atmung und Kopfhaltung der Patienten abhängige variable Volumen des PAS sein (EI und Palomo 2010).

Zudem legen Lenza et al. dar, dass das Volumen alleine keine genügende Aussage über die PAS-Morphologie macht und vielmehr lineare Messungen, die Fläche und das Volumen zusammen betrachtet werden sollten (Lenza und Lenza et al. 2010).

1.2 Umstellungsosteotomien

Durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Kieferorthopäden und Mund-Kiefer-Gesichtschirurgen ist es möglich, Patienten mit skelettalen Anomalien nach Abschluss des Wachstums zu behandeln, bei denen rein konservative kieferorthopädische Maßnahmen nicht zum gewünschten Erfolg führen. Die skelettale Lagekorrektur wird hierbei durch den Mund-Kiefer-Gesichtschirurgen (vgl. Abbildung 2), die dentoalveolären Fehlstellungen durch den Kieferorthopäden behandelt (Hausamen und Becker et al. 2003). Durch diese Therapiemöglichkeiten können nicht nur Kau-, Sprech- und Abbeißfunktion, sondern auch eine Harmonisierung des Gesichtsprofs erreicht werden (Schwenzer und Ehrenfeld 2011b).

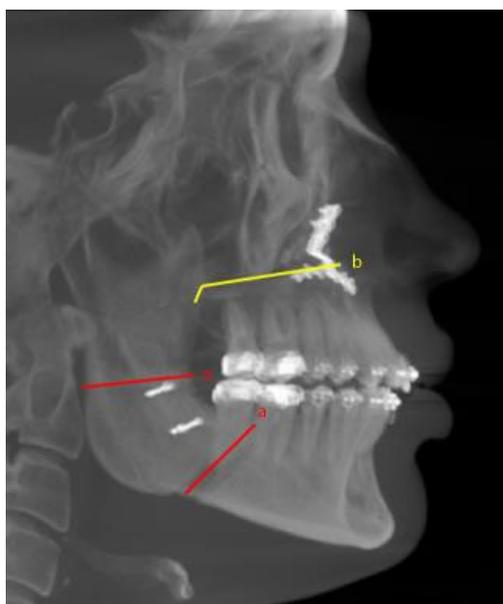


Abbildung 2: Osteotomielinien im FRS

Bei Klasse III-Patienten dieser Studie wurden folgende Osteotomielinien für die Umstellungsosteotomie verwendet:

a) rot: Sagittale UK-Spaltung zur Retrusion des Unterkiefers nach Obwegeser-Dal Pont,

b) gelb: LeFort-I-Osteotomie zur Protrusion des Oberkiefers. (Quelle: Screenshot einer FRS-Darstellung in Mimics Innovation Suite 14.1® aus dem untersuchten Patientengut, bearbeitet mit der Software Microsoft Word 2010)

1.3 Dentale Volumentomographie (DVT)

Durch die dentale Volumentomographie (=DVT oder CBCT=Cone Beam Computed Tomographie; seit 1998 in der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde verwendet (Vent-Mehnert und Heussner 2012)) besteht die Möglichkeit, digitale Bilder des menschlichen Schädels in allen 3 Raumebenen aufzunehmen. Diese Rohdaten können dann zur Rekonstruktion eines dreidimensionalen Datensatzes genutzt werden.

Zur Erstellung des 3D-Datensatzes laufen der Fokus, der ein sich kegelförmig ausbreitendes Strahlenbündel aussendet, und der gegenüberliegende Detektor einmal im Winkel von 360° um den Patientenschädel. Der Kopf des Patienten wird vorher mit einem Laser-Lichtvisier positioniert. Die Expositionszeit beträgt je nach Gerät bis zu 30 Sekunden.

Die effektive Dosis (sie gibt die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Strahlenschäden abhängig vom jeweiligen Organ an) ist zwar 4-20 mal so hoch wie die einer Panoramaschichtaufnahme (OPG = Orthopantomogramm) und die Weichgewebsstruktur wird noch nicht so gut dargestellt wie bei einer Computertomographie, jedoch liegt die Strahlenbelastung 75-80 % unter der effektiven Dosis einer CT und es gibt geringere Artefakte im Gebiet metallischer Restaurationen (Schwenzer und Ehrenfeld 2009). Knöcherne Strukturen (Hartgewebeauflösung) werden sehr genau dargestellt (Schwenzer und Ehrenfeld 2011c).

Aus diesen Gründen wird die DVT heute i.d.R. als prä- und postoperative Standardaufnahmetechnik bei Umstellungsosteotomien genutzt.

Düker (2006) vergleicht die Aufnahmetechniken verschiedener Strahlenbelastungen:

Vier Zahnfilme entsprechen ungefähr einer Panoramaschichtaufnahme (OPG),

vier OPG entsprechen ungefähr einer DVT und

vier DVT führen ungefähr zur gleichen Strahlenbelastung wie eine Dental-CT

(zitiert nach Weber 2010).

1.4 Fernröntgenseitenbild (FRS)

Das FRS nach Hofrath und Broadbent dient seit 1931 vor allem in der Kieferorthopädie (KFO), aber auch in der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie (MKG) der Diagnostik, Therapieplanung, Verlaufs- und Erfolgskontrolle einer Behandlung.

Es stellt eine seitliche Schädelaufnahme dar, bei der der Kopf des Patienten mit der linken Gesichtseite dem Bildträger anliegt und der Fokus-Bildabstand 1,5 – 2m beträgt. Der Strahlengang verläuft von rechts nach links. So werden sowohl die inneren und äußeren knöchernen als auch die Weichteilstrukturen weitgehend dimensionsgetreu abgebildet. Für eine genaue Einstellung des Kopfes dienen eine Stirnstütze und Ohrlöcher in einem Kopfhalter.

Mithilfe eines FRS können für die Diagnostik in der KFO wichtige Daten ausgewertet werden, um die skelettalen Ursachen für die dentalen Befunde zu erkennen. Dazu gehören der Einbau der Kieferbasen, die skelettale Klasse, das Wachstumsmuster beziehungsweise der Gesichtschädelaufbau, die Inklination der Kieferbasen, die Achsenstellung der Schneidezähne, metrische Parameter und der Profilverlauf.

Für die kephalometrische Auswertung in dieser Studie wurden Fernröntgenseitenbilder aus den vorhandenen DVT-Daten generiert, da diese keine signifikanten Unterschiede in Genauigkeit und Reliabilität der linearen und angulären Messungen zu einem konventionell aufgenommenen FRS darstellen (van Vlijmen und Berge et al. 2009; Oz und Orhan et al. 2011; Zamora und Llamas et al. 2011). Somit konnte auf zusätzliche Strahlenbelastung verzichtet werden (Kapitel 5.1.2).

1.5 Grauwerte

Verschiedene Gewebe besitzen verschiedene Dichten. Je nach Dichte eines Gewebes wird die Röntgenstrahlung unterschiedlich stark absorbiert und trifft bei einer DVT-Aufnahme in unterschiedlicher Intensität auf dem dem Strahlenkegel gegenüberliegenden Flachdetektor auf. In

der Bildgebung spiegelt sich das Absorptionsvermögen in unterschiedlichen Grauwerten wieder. Diese so dargestellten Grauwerte können mittels einer Software als dreidimensionaler Datensatz dargestellt werden (Kapitel 3.2). Dieser Datensatz besteht aus kleinsten Volumenelementen (sog. „Voxeln“), wobei jedes Volumenelement einen dem abgebildeten Gewebe entsprechenden Grauwert besitzt. (Schulze 2011)

Die in dieser Studie verwendeten Grauwerte wurden durch die Arbeitsgruppe (Dr. J. Kochel, J. Märker und I. Groneick in der Poliklinik für Kieferorthopädie der Julius-Maximilians-Universität Würzburg) festgelegt: Knochen wurde mit den Grauwerteinheiten 226 bis 3071 und Luft mit -1000 bis -450 dargestellt.

2 Fragestellung und Ziele

Die Lage des Unter- und Oberkiefers spielt in der Diskussion über die Problematik des OSAS im Zusammenhang mit dem Volumen und der Form des PAS eine bedeutende Rolle.

Es ist nicht einheitlich belegt, ob oder welcher operative Eingriff bei Klasse-III-Patienten über eine Modifikation der skelettalen und weichgewebigen Strukturen eine Veränderung in der Morphologie des PAS nach sich zieht, da bisherige Studien unterschiedliche Ergebnisse dokumentieren. Die meisten Untersuchungen wurden bislang auf der Basis zweidimensionaler Daten durchgeführt. Es gibt nur wenige dreidimensionale Analysen, die überdies mit sehr kleinen Patientengruppen durchgeführt wurden. (vgl. Riley und Powell et al. 1987; Greco und Froberg et al. 1990; Hochban und Schurmann et al. 1996; Battagel und Johal et al. 1999; Achilleos und Krogstad et al. 2000; Chen und Terada et al. 2007; Degerliyurt und Ueki et al. 2009; Jakobsone und Neimane et al. 2010; Hong und Park et al. 2011; Lee und Chun et al. 2012; Park und Kim et al. 2012)

Gründe für die unterschiedlichen Untersuchungsergebnisse könnten neben den geringen Gruppengrößen auch die Variabilität der Weichgewebe im Zusammenhang mit der Kopfhaltung und Atmung sein (El und Palomo 2010).

In dieser retrospektiven Arbeit wurden die metrischen und volumetrischen Veränderungen des pharyngealen Atemweges nach uni- und bimaxillärer Umstellungsosteotomie einer großen und homogenen Gruppe von Angle-Klasse III-Patienten (40 unimaxillär, 40 bimaxillär behandelt) mit der Fragestellung untersucht, wie sich das PAS-Volumen durch unterschiedliche Operationsverfahren zur Korrektur ähnlicher Dysgnathien verändert.

3 Material und Methoden

3.1 Studiendaten

In der vorliegenden Arbeit wurden die Standards der Deklaration von Helsinki (revidierte Fassung von 1975 sowie Ergänzungen von 1983, 1989, 1996, 2000, 2002, 2004, 2008 und 2013) sowie die Richtlinien der lokalen Ethikkommission zum Datenschutz eingehalten. Sämtliche Patientendaten wurden anonymisiert ausgewertet. Von 80 kaukasischen Patienten der Angle-Klasse III sind 40 Patienten unimaxillär (= Gruppe 1) und 40 bimaxillär (= Gruppe 2) kombiniert kieferorthopädisch-kieferchirurgisch behandelt worden (Tabelle 1). Ausschlusskriterien waren kraniofaziale Syndrome, Lippenkiefergaumensegelspalten und faciale Asymmetrien. Es wurden nur Daten in die Untersuchung einbezogen, bei denen sich die prä- und postoperativen Bilder eindeutig überlagern ließen und bei denen keine Abweichungen der Halswirbelsäule zwischen dem prä- und postoperativen Bild erkennbar waren.

Zur operativen Planung wurde bei jedem Patienten jeweils eine Woche präoperativ ein DVT generiert und im Durchschnitt 36 bis 41 Tage nach der ersten Aufnahme eine zweite postoperative Kontrollaufnahme angefertigt. Diese Datensätze wurden studienunabhängig in einer kooperierenden kieferchirurgischen Praxis angefertigt und anonymisiert für die vorliegende Untersuchung zur Verfügung gestellt. Die Bildgebung erfolgte in aufrechter Sitzposition und habitueller Interkuspitation, während die Frankfurter Horizontalebene der Patienten mithilfe einer Kopf- und Kinnstütze parallel zum Boden ausgerichtet wurde. Der Gesichtsschädel wurde mit dem KaVo 3D eXam® (KaVo Dental GmbH, Biberach, Deutschland), einer Hochfrequenzröntgenquelle mit konstantem Potential (90–120kVp, 3-8mA (gepulst)), in 8,5s mit einem Aufnahmevolumen von 23x17cm gescannt.

Um die DVT-Daten auszuwerten, wurden aus diesen Daten zunächst dreidimensionale Bilder generiert (Kapitel 3.2.1). Danach wurden

Schnittebenen festgelegt, anhand derer der zu vermessende PAS begrenzt und in zwei Teile gesplittet wurde (Kapitel 3.2.2), um dann Gesamt- und Einzelvolumen zu bestimmen, zu notieren und diese später miteinander zu vergleichen (Kapitel 3.2.3). Zur genauen Beurteilung der Veränderungen des PAS wurden die 3D-Modelle in Anlehnung an die Untersuchungsmethode von Lee et al. übereinandergelegt (= Matching) (Lee und Chun et al. 2012). So konnten die Schnittebenen vom präoperativen Modell für das postoperative übernommen werden (Kapitel 3.2.4).

Zur weiteren Dokumentation wurden auf Höhe dieser drei Schnittebenen die Querschnittsflächen des PAS bestimmt. Um nachverfolgen zu können, ob sich durch die Operation der geringste Querschnitt des Pharynx verändert hat, wurde eine vierte Querschnittsfläche auf Höhe der geringsten anteroposterioren Ausdehnung bestimmt (Kapitel 3.2.5).

Außerdem wurden zur Ermittlung der Formveränderung des PAS die anteroposteriore und laterale Ausdehnung jeweils auf Höhe der ersten drei Schnittebenen ermittelt (Kapitel 3.2.6).

Zusätzlich zum 3D-Verfahren wurden die Patientendaten manuell kephalometrisch anhand des aus dem DVT generierten Fernröntgenseitenbildes untersucht. So konnten Aussagen über das Ausmaß der Operation, den Gesichtsschädelaufbau und mögliche Zusammenhänge mit den Ergebnissen der 3D-Auswertungen gemacht werden (Kapitel 3.3).

Der Methodenfehler (MF) der in der vorliegenden Arbeit angewandten Untersuchungsmethoden wurde nach einer Reliabilitätsprüfung mithilfe der Dahlberg-Formel errechnet (Kapitel 3.4).

Anschließend erfolgte die statistische Auswertung der gewonnenen Daten (Kapitel 3.5).

Die Erhebung aller Daten erfolgte in dieser Studie retrospektiv durch einen Untersucher, um personenbezogene Störvariablen zu vermeiden.

Tabelle 1: Patientengut

Anzahl der Patienten der jeweiligen OP-Verfahren nach Geschlecht mit Durchschnittsalter zu Beginn der Studie, Zeitraum zwischen Anfangs- und Abschlussaufnahme sowie dazugehörige Standardabweichungen.

OP-Technik	Geschlecht	Anzahl	Alter(Jahre)	Zeitraum(Tage)
Unimaxillär	m	19	24,8+/-8,8	32,8+/-12
	w	21	27,9+/-9,7	39,1+/-17,6
	gesamt	40	26,5+/-9,4	36,1+/-15,5
Bimaxillär	m	22	25,4+/-8	41,0+/-14,1
	w	18	20,9+/-3,8	41,4+/-17
	gesamt	40	23,4+/-6,8	41,2+/-15,5

3.2 Methode zur Vermessung des PAS im DVT

Mithilfe der Software Mimics Innovation Suite 14.1® (Materialise, Leuven, Belgien), im Folgenden als „Mimics®“ bezeichnet, wurden die DICOM-Datensätze visualisiert.

In Anlehnung an die Untersuchungsmethoden von Kim et al. (Kim und Hong et al. 2010) wurden Volumen und Querschnitte des PAS vermessen.

3.2.1 Generierung der 3D-Bilder

Um bestimmte Strukturen durch Mimics® dreidimensional darstellen zu können, müssen diese Strukturen zunächst begrenzt werden.

Hierzu wurden die in diesen Aufnahmen für Knochen charakteristischen Graustufen festgelegt (Einheiten 226 bis 3071, Kapitel 1.5), um diese anschließend mit der Funktion „Thresholding“ farblich zu markieren und durch die Funktion „Calculate 3D“ in ein 3D-Bild umzusetzen.

Auf die gleiche Weise wurden die Luftwege markiert (Graustufeneinheiten -1000 bis -450) und umgerechnet. Hierdurch wurde eine sehr präzise Abgrenzung der luftgefüllten Räume von den knöchernen und weichgewebigen Strukturen erreicht (Abbildung 3).

Um die großen Datenmengen und somit die Rechenzeit auf das notwendige Maß einzuschränken, wurde der PAS mit der Funktion „Crop mask“ nach superior (bis zur Höhe des Schnittpunktes der Crop mask mit den Schnittpunkten von Vomer und Os occipitale) eingegrenzt (Abbildung 4). So wurden nur die markierten luftgefüllten Räume dreidimensional visualisiert.

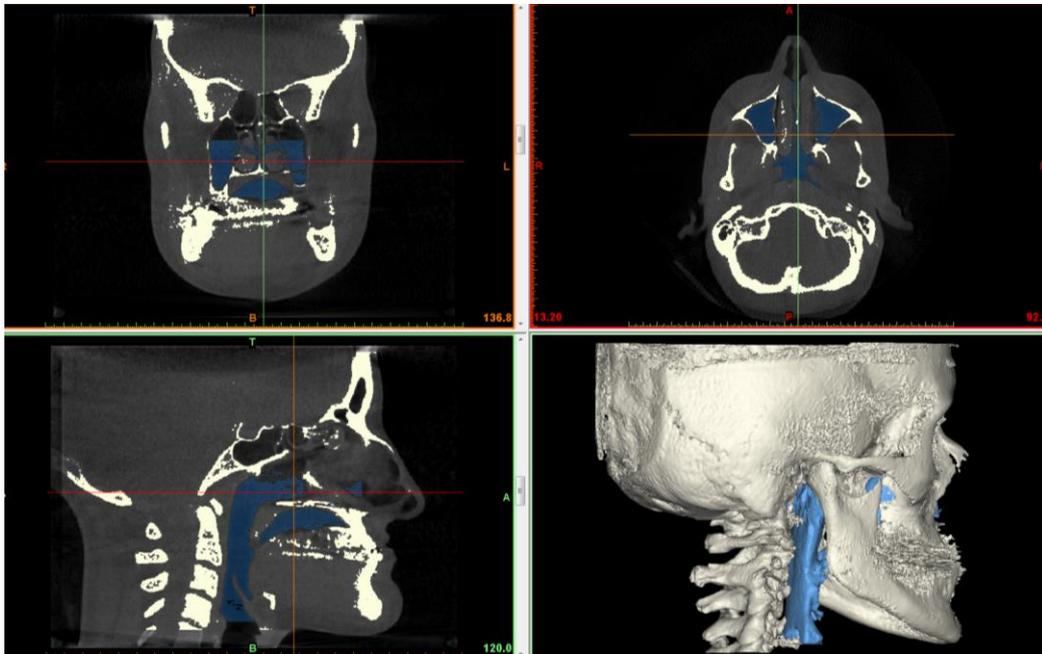


Abbildung 3: 3D-Modelle von Knochen und Luftwegen

Koronale, axiale und sagittale Ebene sowie 3D-Ansicht (von links oben nach rechts unten). Die knöchernen Anteile sind weiß dargestellt, die Luftwege blau.

A=Anterior, vorne; B=Bottom, unten; L=Left, links; P=Posterior, hinten; R=Right, rechts; T=Top, oben.

(Quelle: Screenshot einer DVT- und 3D-Darstellung in Mimics® aus dem untersuchten Patientengut, bearbeitet mit der Software Microsoft Word 2010)

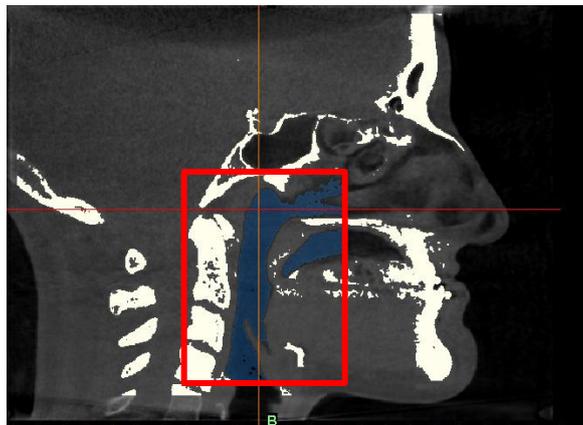


Abbildung 4: Eingrenzung des PAS mit der Crop mask

Mithilfe der Funktion „Crop mask“ wurde der PAS vor der dreidimensionalen Darstellung auf das notwendige Maß begrenzt (rotes Rechteck), um die Größe der darzustellenden luftgefüllten Räume (blau) einzuschränken. Der Schnittpunkt Vomer/Os occipitale bildete den Anhaltspunkt für die Festlegung der superioren Begrenzung. (Quelle: Screenshot einer sagittalen DVT-Ansicht in Mimics® aus dem untersuchten Patientengut, bearbeitet mit der Software Microsoft Word 2010)

3.2.2 Festlegung der Schnittebenen

Nachdem die 3D-Modelle wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben in Mimics® vorbereitet wurden, wurden in dem Schädelmodell folgende Punkte (Abbildung 5, Tabelle 2) festgelegt, die zur Erstellung von Begrenzungen und Schnittebenen (Abbildung 6) des PAS dienen:

- Spina nasalis posterior (PNS)
- Unterrand der linken Orbita (Or)
- Porus acusticus externus links (Po li)
- Porus acusticus externus rechts (Po re)

Zwei weitere Punkte, die nicht im knöchernen 3D-Modell lokalisiert sind, wurden in der DVT-Ansicht festgelegt:

- Kaudaler Rand des weichen Gaumens (SP)
- Spitze der Epiglottis (Ep)

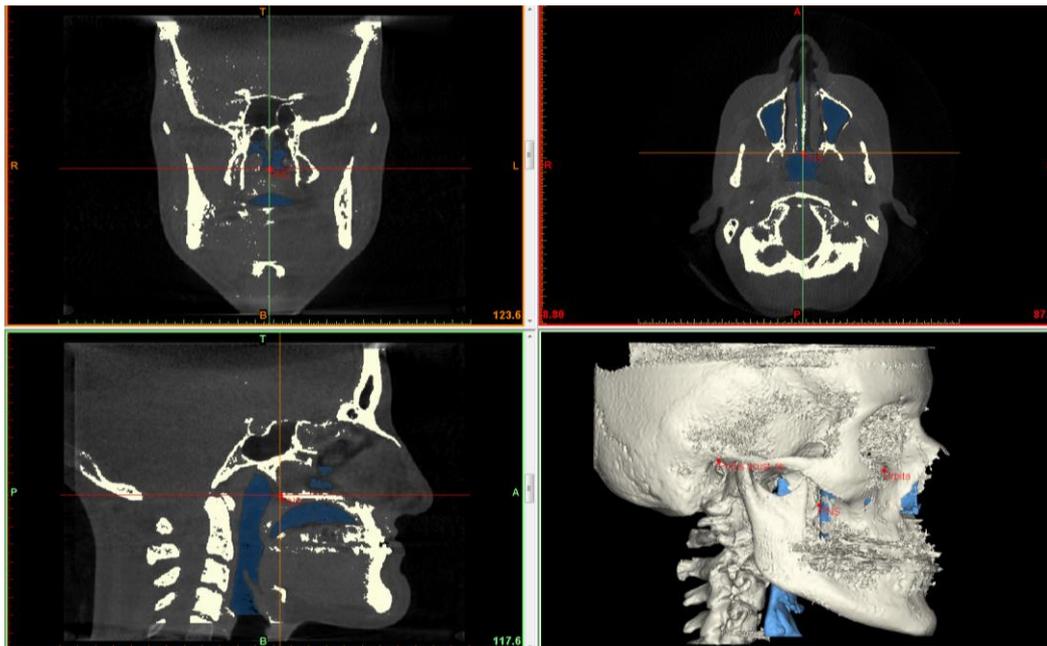


Abbildung 5: Festlegung der Punkte für die Schnittebenen

Anhand der gesetzten Punkte im 3D-Schädelmodell wurden die programmierten Ebenen festgelegt, welche unter anderem als Schnittebenen für den PAS dienen (vgl. Abbildung 6). (Quelle: Screenshot einer DVT- und 3D-Darstellung in Mimics® aus dem untersuchten Patientengut, bearbeitet mit der Software Microsoft Word 2010)

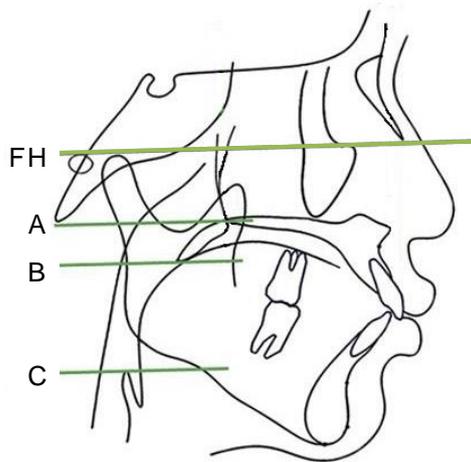
Die gewünschten Ebenen wurden zuvor festgelegt und in Mimics® programmiert.

Erste Ebene war die Frankfurter Horizontale (FH). Diese verläuft durch den Unterrand der Orbita und die beiden Porions und diente als Standardebene, an welcher sich die folgenden Ebenen orientierten:

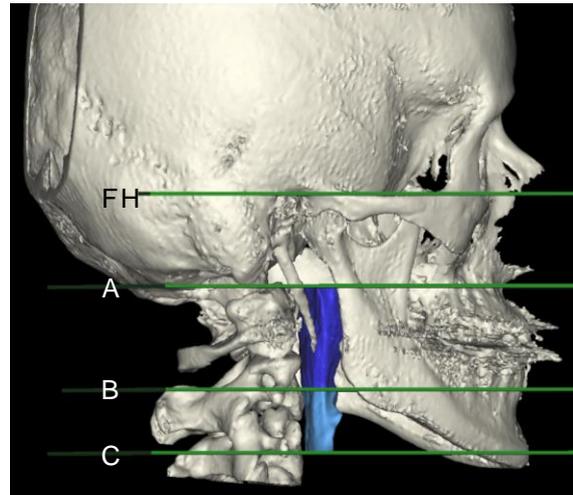
- Ebene A: Obere Begrenzung des superioren Teils des PAS (SAS)
- Ebene B: Zweite Schnittebene zwischen dem superioren und inferioren Teil des PAS (IAS)
- Ebene C: Untere Begrenzung des IAS

Tabelle 2: 3D-Messpunkte und Ebenen

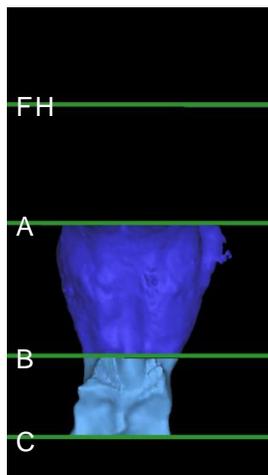
Punkte und Ebenen	Definition
Punkte	
Ba	Basion Posteriorster und inferiorster Punkt des Clivus, entspricht dem vordersten Punkt des Foramen magnum
Ep	Spitze der Epiglottis Der am weitesten kranial gelegener Punkt der Epiglottis
Or	Orbitale Der am weitesten kaudal gelegene Punkt des Orbitarandes
PNS	Spina nasalis posterior (posterior nasal spine) Der am weitesten posterior gelegene Punkt des Palatum durum
Po (re/li)	Porion rechts/links Der am weitesten kranial gelegene Punkt des Meatus acusticus externus
SP	Weicher Gaumen (soft palate) Posteriorster und inferiorster Punkt des Velum palatinum
SF	Sutura frontozygomata Anteriorster und medialster Punkt der Sutura frontozygomata
Ebenen	
FH	Frankfurter Horizontale Wird gebildet durch die beiden Punkte Po rechts und links sowie durch den Punkt Or links
Ebene A	Ebene durch PNS, parallel zur FH
Ebene B	Ebene durch SP, parallel zur FH
Ebene C	Ebene durch Ep, parallel zur FH



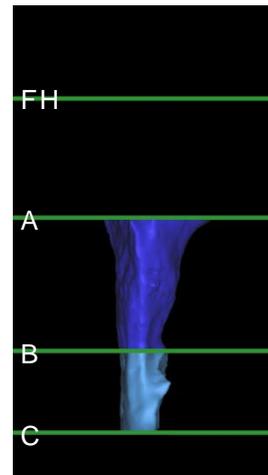
a) Lateralansicht der Ebenen – schematisches FRS am Schädelmodell



b) Lateralansicht der Ebenen am 3D-Modell



c) Frontale Ansicht des PAS-3D-Modells



d) Laterale Ansicht des PAS-3D-Modells von rechts

Abbildung 6: Orientierungs- und Schnittebenen des PAS

FH=Frankfurter Horizontalebene, A=Ebene A, B=Ebene B, C=Ebene C. (Quelle Abb. 6a: Kim und Hong et al. 2010, überarbeitet mit der Software Microsoft Word 2010; Abb. 6b-d: Screenshot von 3D-Darstellungen in Mimics® aus dem untersuchten Patientengut, bearbeitet mit der Software Microsoft Word 2010)

3.2.3 Volumenbestimmung

Mit Hilfe der in Tabelle 2 angegebenen Ebenen konnte nun der PAS wie in Abbildung 7 in zwei Teile gegliedert werden (Funktion „Split“): SAS und IAS.

Die einzelnen Volumen wurden automatisch durch das Programm errechnet, unter dem jeweiligen Informationsbutton zu dem gewählten Teil des PAS in Kubikmillimetern angezeigt und durch den Untersucher abgelesen.

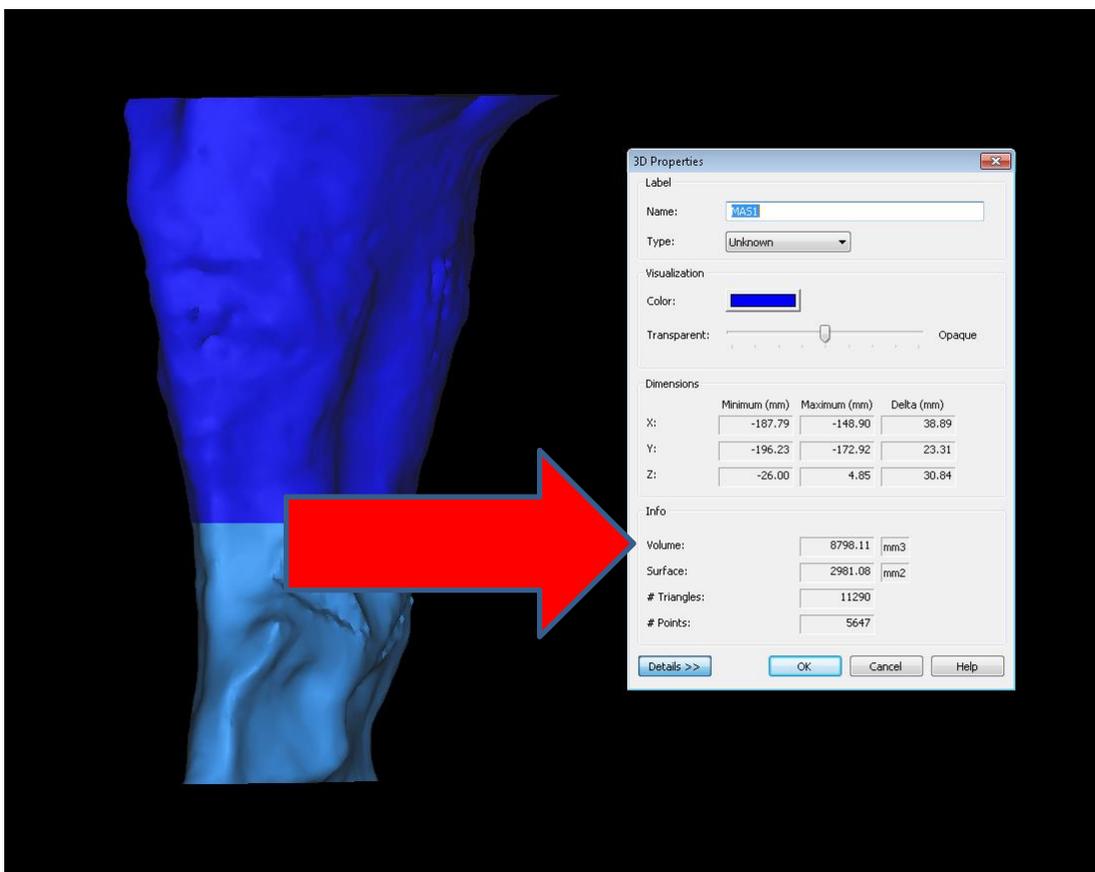


Abbildung 7: Der PAS gesplittet

Dieser Screenshot zeigt den PAS in seine zwei Teile gesplittet (SAS [dunkelblau] und IAS [hellblau]).

Der rote Pfeil zeigt auf das abzulesende Volumen. In diesem Fall sind es 8798,11 mm³ für den dunkelblauen Bereich, also für den SAS. (Quelle: Screenshot einer 3D-Darstellung in Mimics® aus dem untersuchten Patientengut, bearbeitet mit der Software Microsoft Word 2010)

3.2.4 Matching und Vergleich der prä- und postoperativen 3D-Modelle

Zum Matching wurden zunächst analog dem präoperativen Datensatz aus den postoperativen DVT-Daten 3D-Modelle konstruiert (Kapitel 3.2.1).

Zur präzisen Überlagerung benötigt das Programm Mimics® mindestens drei vom Untersucher festgelegte Punkte. Diese werden in beiden Datensätzen parallel mit der Funktion „Image Registration“ definiert.

Hierfür stehen alle drei Ebenen des DVTs (sagittal, axial, koronal) zur Verfügung (Abbildung 8).

Als Punkte wurden für diese Studie gewählt:

- Basion (Ba)
- Sutura frontozygomata links (SF)
- Sutura frontozygomata rechts (SF)

(vgl. Tabelle 2)

Diese Punkte erscheinen am besten geeignet, da sie starr und ortsfest sind und auch durch die Umstellungsosteotomie in ihrer Position nicht verändert werden. Zusätzlich sind sie im DVT in allen drei Schnittebenen gut zu erkennen und liegen in allen drei Raumebenen möglichst weit auseinander, um Rotationen zu umgehen.

Es wurde darauf geachtet, dass sich die zervikalen Wirbel der prä- und postoperativen Bilder nach dem Matching im Sagittalschnitt in der Medianebene überschneiden (Abbildung 9). War dies nicht der Fall, wurden diese Patientendaten aufgrund der unterschiedlichen Kopfhaltung und der dadurch möglichen Beeinflussung des PAS von der Studie ausgeschlossen.

Im Anschluss daran konnte das postoperative 3D-Modell des Pharynx mithilfe der identischen Ebenen des präoperativen Modells gesplittet und alle Volumen wie in Kapitel 3.2.3 beschrieben ausgelesen werden.

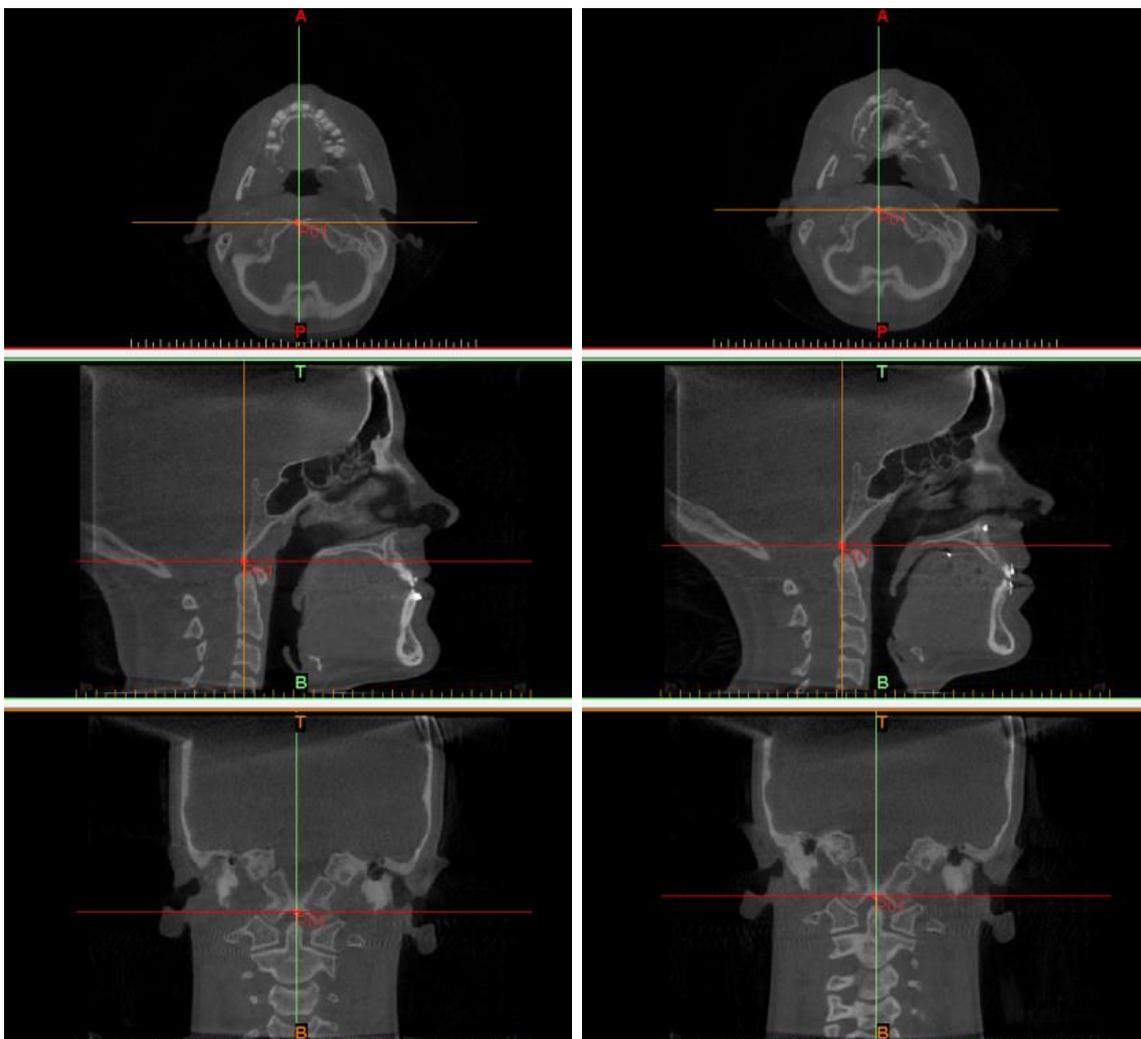


Abbildung 8: DVT-Ansicht der korrespondierenden prä- und postoperativen Datenpaare

In dem Programmteil „Image Registration“ wurden in einem Fenster die jeweils korrespondierenden prä- und postoperativen Datenpaare als DVT-Ansicht nebeneinander dargestellt. Dataset 1: links, prä-OP, Dataset 2: rechts, post-OP. So konnten die drei Punkte, die zum Matching notwendig sind, eindeutig festgelegt werden. Oben: Axialebene, Mitte: Sagittalebene, Unten: Koronalebene.

(Quelle: Screenshot einer DVT-Ansicht in Mimics® aus dem untersuchten Patientengut, bearbeitet mit der Software Microsoft Word 2010)

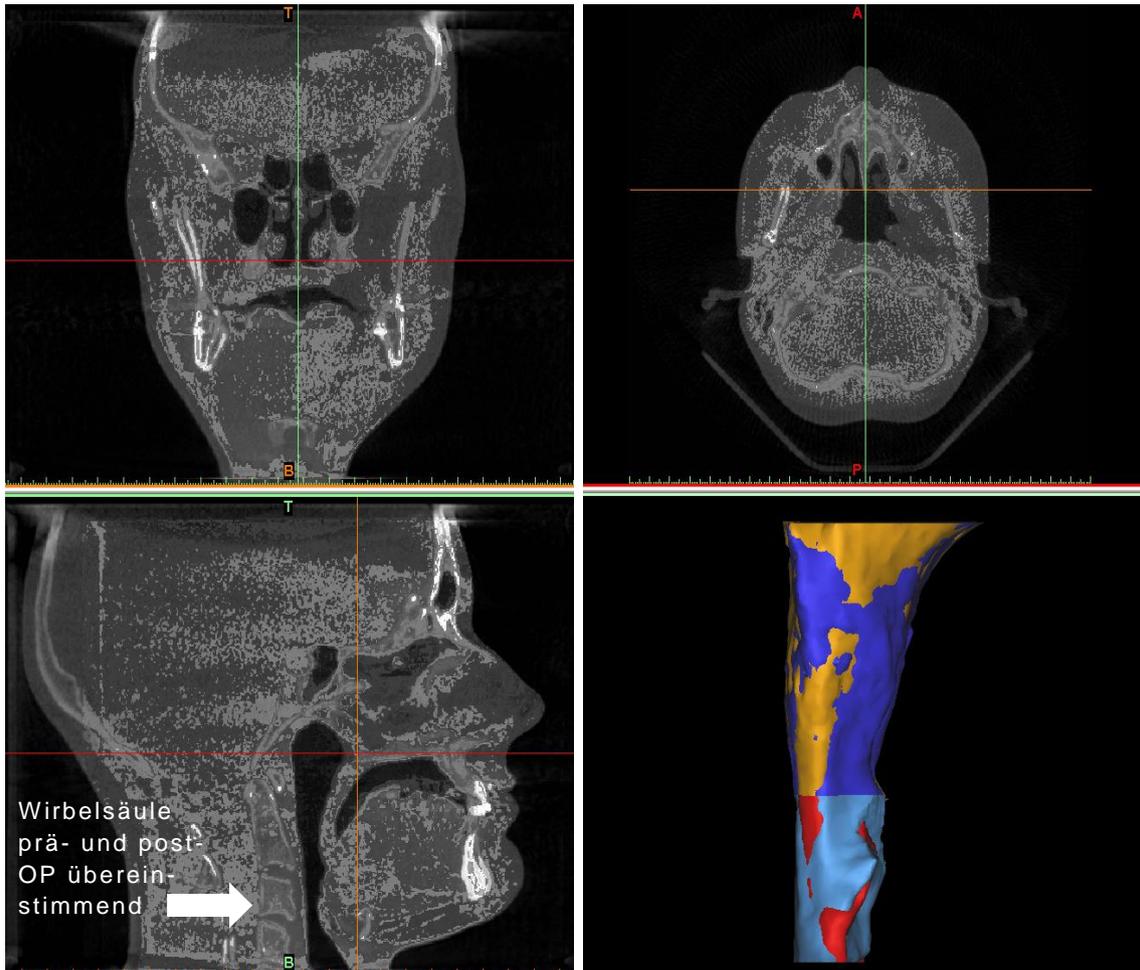


Abbildung 9: Prä- und postoperativer Datensatz nach dem Matching

Nachdem beide Datensätze übereinandergelegt und gesplittet waren, waren schon in der 3D-Darstellung Unterschiede sichtbar. Hier zeigt sich zum Beispiel die Diskrepanz zwischen dem inferioren PAS vor und nach der OP: Post-OP [rot] geringfügig kleineres Volumen als prä-OP [hellblau].

In dem sagittalen Fenster (unten links) ist in diesem Beispiel die Dorsalverlagerung des UK gut erkennbar.

(Quelle: Screenshot einer überlagerten DVT- und 3D-Darstellung in Mimics® aus dem untersuchten Patientengut, bearbeitet mit der Software Microsoft Word 2010)

3.2.5 Analyse des Querschnitts des PAS

Die Querschnittsflächen (cross-sectional area = CSA, smallest cross-sectional area = SCSA) des PAS wurden auf Höhe der drei Schnittebenen und zusätzlich auf Höhe der geringsten anteroposterioren Ausdehnung bestimmt:

- A: CSA_A
- B: CSA_B
- C: CSA_C
(Tabelle 3 und Abbildung 6)
- SCSA (Tabelle 3 und Abbildung 12)

Die Werte von $CSA_{A,B}$ und C wurden mit Hilfe des Programmteils „3 Matic“ aus dem Programm Mimics® gewonnen, indem die 3D-Bilder des oberen und unteren Teils des PAS in das Programm 3 Matic eingelesen wurden. Die Schnittflächen wurden ausgewählt und die „Surface area“ abgelesen. Die Maßeinheit wurde in mm^2 dargestellt. (Abbildung 10)

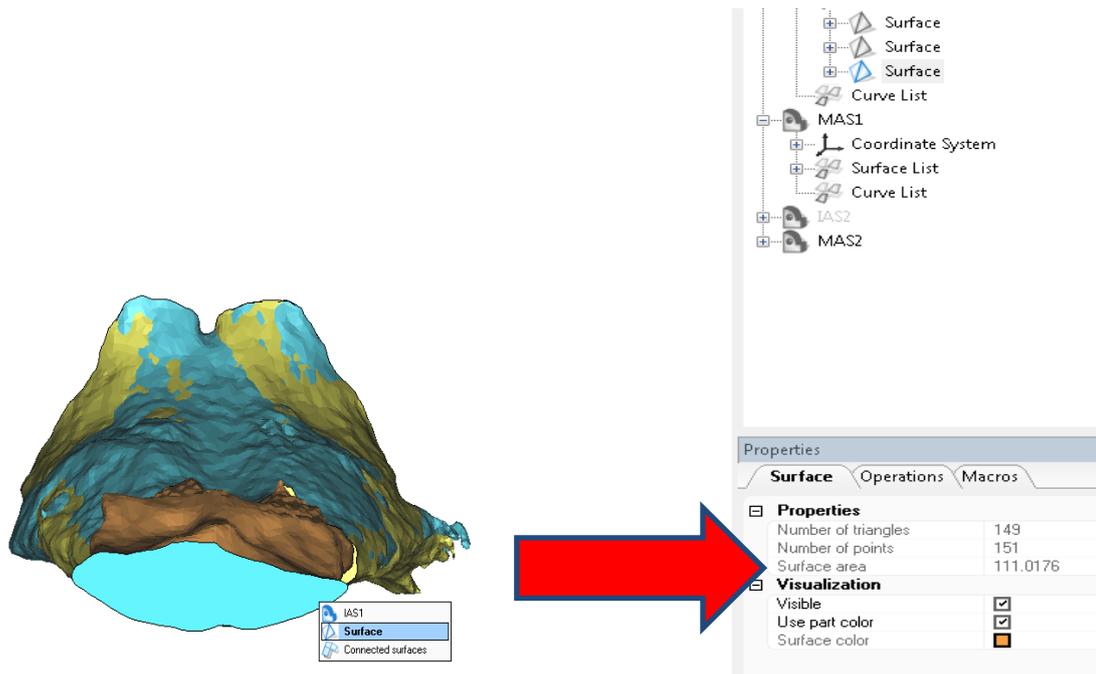


Abbildung 10: Ablesen der Oberfläche im Programmteil 3 Matic

Die Maßeinheit ist mm^2 . Durch Rechtsklick auf der Computermouse wurde die gewünschte Fläche markiert, dessen Oberfläche sodann im rechten Fenster als „Surface area“ abgelesen werden konnte. (Quelle: Screenshot einer 3D-Darstellung in Mimics® aus dem untersuchten Patientengut, bearbeitet mit der Software Microsoft Word 2010)

Zur Bestimmung der vierten Querschnittsfläche, SCSA, diente die im sagittalen Fenster der DVT-Ansicht geringste Ausdehnung des Pharynx in anteroposteriorer Richtung zwischen der Spitze der Epiglottis und dem kaudalen Rand des Velum palatinum.

Es wurde darauf geachtet, hierfür streng in der Medianebene zu bleiben. Mit den Funktionen „Crop mask“ und „Region growing“ konnte die dünnstmögliche Schicht ausgeschnitten und dreidimensional dargestellt werden, um dann wie in Abbildung 12 in der Informationszeile die Oberfläche („Surface“) ablesen zu können.

Da Mimics® hier die gesamte Oberfläche der „Scheibe“ angibt (Abbildung 11 und Abbildung 12), also die Ober- und Unterfläche sowie

die Mantelfläche, wurde der abgelesene Wert durch 2 dividiert, um einen einzelnen Wert für die Oberfläche zu erhalten. Dieses ist möglich, da die Manteloberfläche einen vernachlässigbaren Anteil an der Gesamtoberfläche darstellt, wie der folgende Beweis zeigt:

Oberflächenberechnung am Beispiel eines Kreiszylinders:

h=Höhe des Zylinders

r=Grundflächenradius

G=Grundfläche= πr^2

U=Umfang= $2\pi r$

M=Mantelfläche= $2\pi r * h = U * h$

O=Gesamtoberfläche= $M + 2 * G = 2\pi r * h + 2\pi r^2$

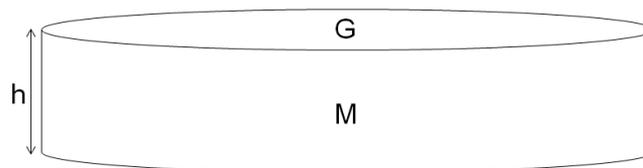


Abbildung 11: Kreiszylinder

Der Kreiszylinder als Modell für den PAS-Abschnitt auf Höhe der geringsten anteroposterioren Ausdehnung (SCSA).

(Quelle: eigene Abbildung, erstellt mit der Software Microsoft Word 2010)

Die gesamte Oberfläche eines Zylinders ist beschrieben durch:

$$O = M + 2 * G$$

Zu beweisen ist, dass die halbe Oberfläche gleich der Grundfläche des Zylinders ist:

$$\begin{aligned} \frac{O}{2} &= \frac{M + 2 * G}{2} \\ \frac{O}{2} &= \frac{U * h + 2 * G}{2} \\ \frac{O}{2} &= \frac{U * h}{2} + \frac{2 * G}{2} \end{aligned}$$

Solange der zweite Term wesentlich größer ist als der erste, kann angenommen werden, dass die halbe Oberfläche gleich der Grundfläche ist. Unter Verwendung der Definitionen für Umfang und Grundfläche (s.o.) muss gelten:

$$G \gg \frac{U * h}{2}$$

$$\pi * r^2 = \frac{2 * \pi * r * h}{2}$$

$$r \gg h$$

Unterstellt man, dass die durchschnittlich gemessene Gesamtoberfläche beider Datengruppen (Gruppe 1 und Gruppe 2, 491,6mm²) einem Zylinder entstammt, dessen Höhe der durchschnittlich gemessenen Höhe (0,2mm) entspricht, so ergibt sich:

$$O = 2 * \pi * r * h + 2 * \pi * r^2$$

Und, unter Verwendung der P-Q-Formel, als Lösung für r:

$$r_1 = -\frac{h}{2} + \sqrt{\left(\frac{h}{2}\right)^2 + \frac{O}{2 * \pi}} = 8,75mm$$

$$r_2 = -\frac{h}{2} - \sqrt{\left(\frac{h}{2}\right)^2 + \frac{O}{2 * \pi}} = -8,95mm$$

Dabei stellt r_1 mit positivem Wert das einzig sinnvolle Ergebnis dar. Somit wird $r \gg h$ als gegeben angenommen, da 8,75mm \gg 0,02mm ist (Faktor 437,5 mal größer, da 8,75mm/0,02mm=437,5).

Somit darf angenommen werden, dass die Grundfläche gleich der halben Oberfläche ist.

$$\frac{O}{2} \approx G$$

Dieses Verfahren wurde zur Berechnung der Querschnittsfläche von SCSA angewandt, da die Lage der geringsten anteroposterioren Ausdehnung interindividuell und auch zwischen prä- und postoperativer Aufnahme variieren kann und deshalb keine Schnittebene festlegbar war.

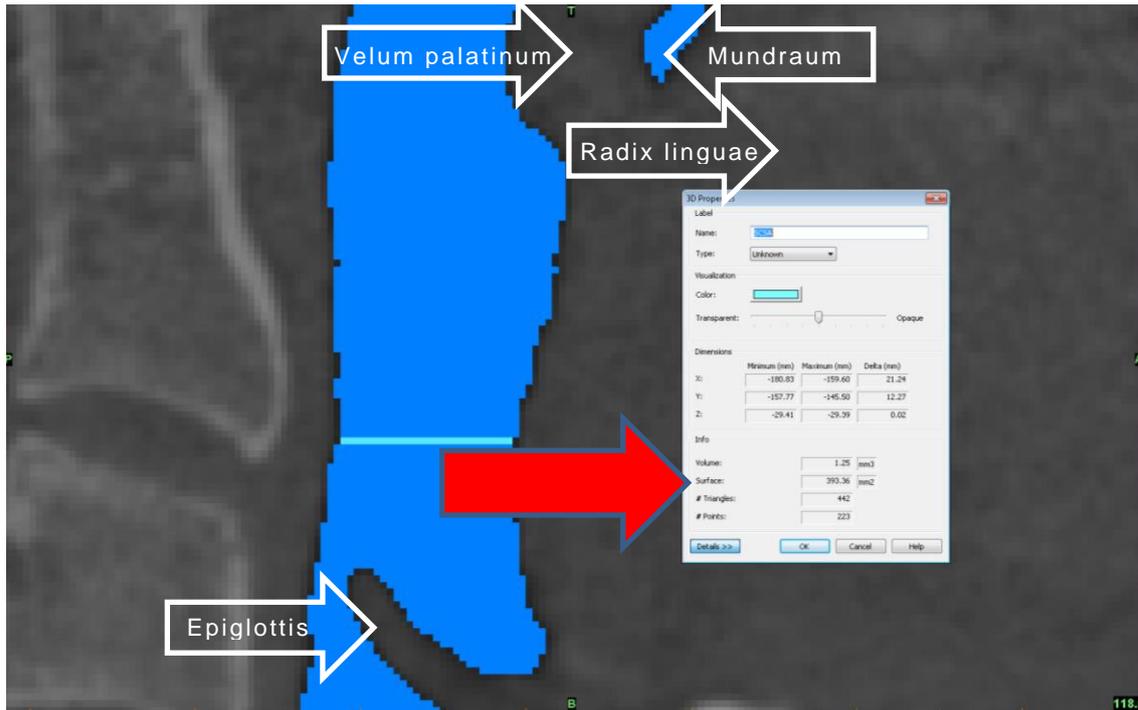


Abbildung 12: Ablesen der Querschnittsfläche auf Höhe der geringsten anteroposterioren Pharynxausdehnung

Der abgelesene Wert stellte die Oberfläche des in 3D konvertierten Bereiches dar (cyan). Dieser Wert musste noch durch 2 dividiert werden, um nur die Oberfläche einer Seite zu erhalten. Bsp.: $393,36\text{mm}^2/2=196,68\text{mm}^2$. Blau=luftgefüllter Raum. (Quelle: Screenshot einer DVT-Darstellung in Mimics® aus dem untersuchten Patientengut, bearbeitet mit der Software Microsoft Word 2010)

3.2.6 Untersuchung der Form des PAS

Das Verhältnis (LAR) von der größten lateralen Ausdehnung (LA) zur medianen anteroposterioren Ausdehnung (AP) des Pharynx wurde auf Höhe der 3 Schnittebenen

- Ebene A: LAR_A
- Ebene B: LAR_B
- Ebene C: LAR_C

(Tabelle 3 und Abbildung 6)

berechnet:

$$LAR = \frac{LA}{AP}$$

LA: Laterale Ausdehnung

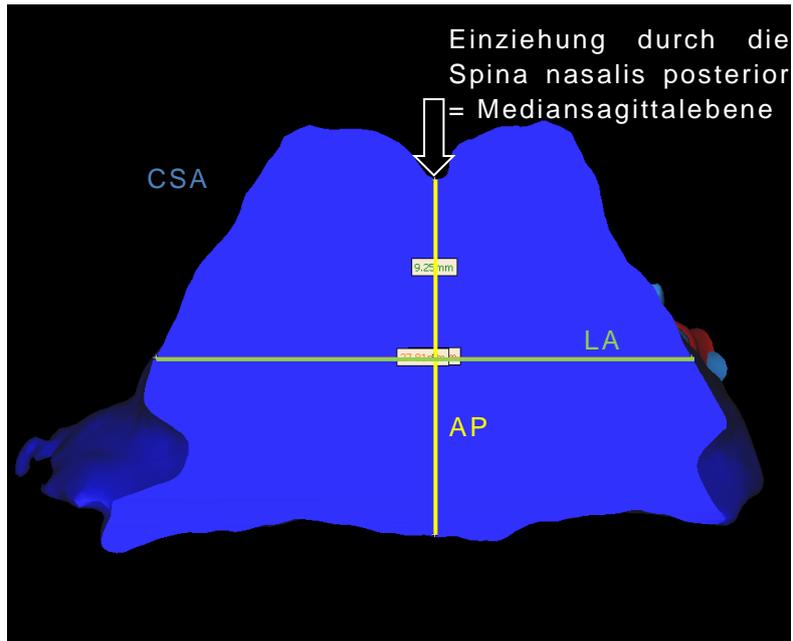
AP: Anteroposteriore Ausdehnung

LAR: Lateral-Anteroposterior Ratio = Verhältnis von LA zu AP

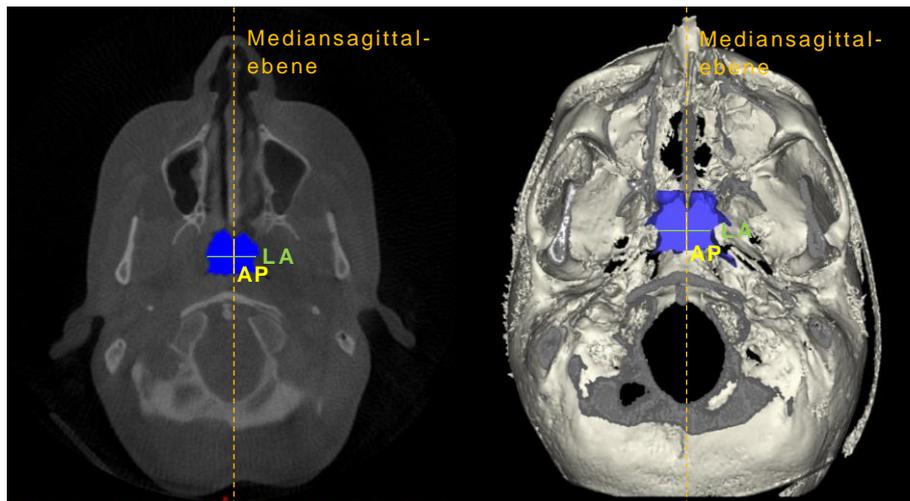
Auch hier wurde das 3D-Modell herangezogen, um mit der Funktion „Measurements“ zuerst die AP und dann auf ihrer Mittelsenkrechten die LA zu messen (Abbildung 13).

Da die Wirbelsäule eine beständige Einziehung des posterioren Anteils des PAS vorgibt, wurde zuerst die AP mit Orientierung an der stärksten Einziehung in der Mediansagittalebene, vorgegeben durch die Spina nasalis posterior, gemessen und daraufhin die LA auf Höhe ihrer Mittelsenkrechten bestimmt.

Zur Vermeidung von Messfehlern wurden jeweils die prä- und postoperativen Modelle eines Patienten überlagert und die Messpunkte verglichen.



a)



b)

c)

Abbildung 13: Messung der Form des PAS

a) Am Beispiel der CSA_A : Zuerst wurde die anteroposteriore Ausdehnung an der Stelle der größten Einziehung posterior auf der Mediansagittalebene gemessen, um daraufhin die Mittelsenkrechte einzuzichnen und die laterale Ausdehnung zu bestimmen. b) Einordnung der CSA_A in der axialen Ansicht. c) Einordnung der CSA_A im 3D-Modell. (Quelle: Screenshots von 3D- und DVT-Darstellungen in Mimics® aus dem untersuchten Patientengut, bearbeitet mit der Software Microsoft Word 2010)

Tabelle 3: Parameter der 3D-Analyse des PAS

Parameter	Definition
Volumen (mm³)	
PAS	Posterior airway space Gesamtvolumen des pharyngealen Atemwegs zwischen Ebene A und Ebene C
SAS	Superior airway space Volumen des oberen Teils des PAS, begrenzt durch die Ebenen A und B
IAS	Inferior airway space Volumen des unteren Teils des PAS, begrenzt durch die Ebenen B und C
Querschnitt (mm³)	
CSA _A	Cross-sectional area A Querschnittsfläche des PAS auf Höhe der Ebene A
CSA _B	Cross-sectional area B Querschnittsfläche des PAS auf Höhe der Ebene B
CSA _C	Cross-sectional area C Querschnittsfläche des PAS auf Höhe der Ebene C
SCSA	Smallest cross-sectional area Querschnittsfläche des PAS auf Höhe der schmalsten Stelle des PAS zwischen Ebene A und Ebene C parallel zur FH
Durchmesser	
Anteroposterior (mm)	
AP _A	Anteroposteriore Strecke entlang der Mediansagittalebene auf Höhe der Ebene A
AP _B	Anteroposteriore Strecke entlang der Mediansagittalebene auf Höhe der Ebene B
AP _C	Anteroposteriore Strecke entlang der Mediansagittalebene auf Höhe der Ebene C
Lateral (mm)	
LA _A	Transversale Breite entlang der Mittelsenkrechten auf AP auf Höhe der Ebene A
LA _B	Transversale Breite entlang der Mittelsenkrechten auf AP auf Höhe der Ebene B
LA _C	Transversale Breite entlang der Mittelsenkrechten auf AP auf Höhe der Ebene C
Ratio	
LAR _A	Verhältnis von lateralem zu sagittalem Durchmesser auf Ebene A
LAR _B	Verhältnis von lateralem zu sagittalem Durchmesser auf Ebene B
LAR _C	Verhältnis von lateralem zu sagittalem Durchmesser auf Ebene C

3.3 Methode zur kephalometrischen Analyse des FRS

In dieser Studie wurden die Fernröntgenseitenbilder unter Verwendung des Programmes Mimics® aus dem DVT rekonstruiert. Durch Drücken von „F5“ auf der Computer-Tastatur bei geöffnetem DVT-Ansichtsfenster besteht die Möglichkeit, ein FRS aus einer DVT-Aufnahme erstellen zu lassen (Abbildung 14). Dieses wurde vom prä- und postoperativen DVT-Bild jedes Patienten als Screenshot gespeichert, nummeriert und für die manuelle Vermessung mit dem Drucker HP Color Laserjet CP 2025 der Firma Hewlett Packard® ausgedruckt.

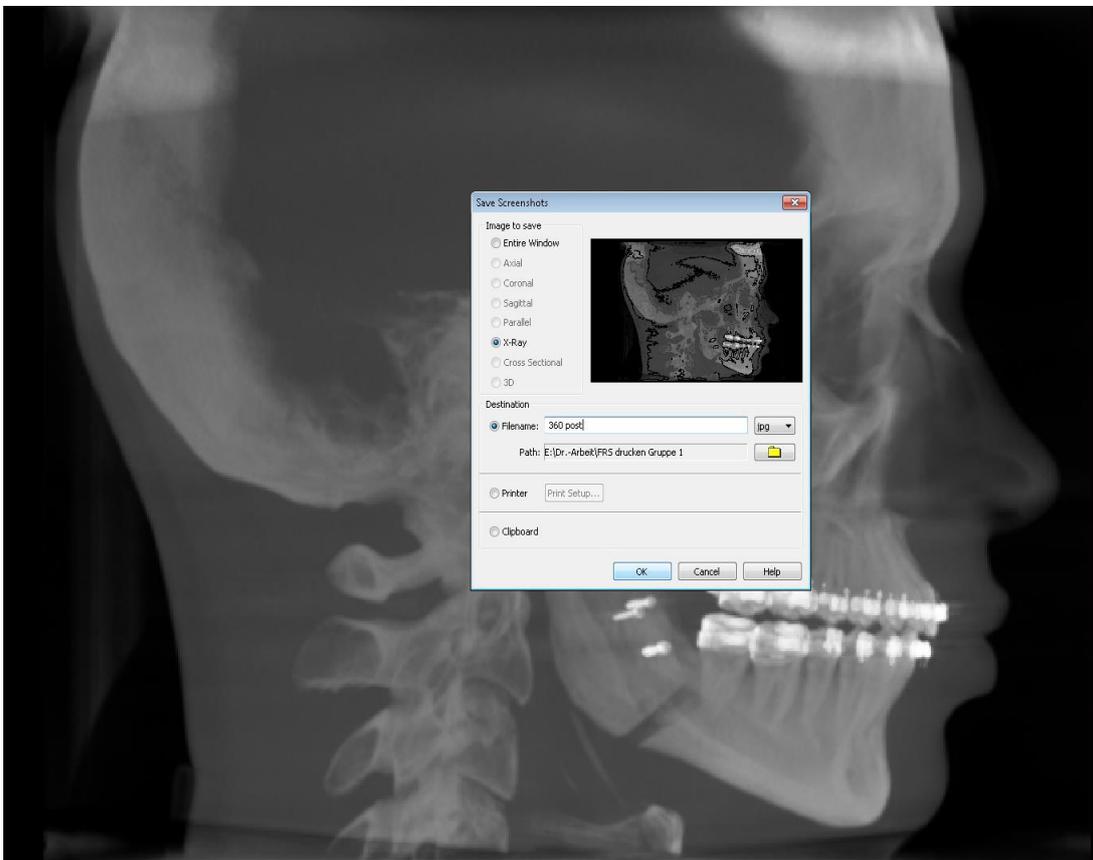


Abbildung 14: Aus Mimics® generiertes FRS

Beispiel eines unimaxillär operierten Patienten.
(Quelle: Screenshot einer FRS-Darstellung in Mimics® aus dem untersuchten Patientengut, bearbeitet mit der Software Microsoft Word 2010)

Um Abbildungen in übereinstimmenden Größen und mit Beschriftung zu drucken, eignete sich für diese Studie die Software iview430g, Version 4.30 (Irfan View, Irfan Skiljan, Wien, Österreich).

Auch die kephalometrischen Messungen erfolgten jeweils manuell durch einen Untersucher. Für jeden Patienten wurden ein präoperatives und ein postoperatives Bild hergestellt und ausgewertet. Zur Durchzeichnung wurde Acetatfolie verwendet, zur Vermessung ein handelsübliches Geodreieck. Die 11 gesetzten kephalometrischen Bezugspunkte orientierten sich an den präoperativen Aufnahmen. Auf ihrer Basis wurden zwei Winkel zur Analyse des Einbaus der Kieferbasen, drei Werte zur Zuordnung in eine skelettale Klasse, drei Messungen zur Bestimmung des Gesichtsschädelaufbaus und zwei Strecken zur Analyse des OP-Ausmaßes ermittelt. Eine Übersicht über die Messpunkte zeigen Tabelle 4 und Abbildung 15, die durchgeführten Messungen und die für diese Messungen verwendeten Bezugspunkte und Ebenen werden in Tabelle 5 aufgezeigt. Um ein Maß für den Einbau der Kieferbasen und ihre Lagebeziehung zueinander zu erhalten, wurden zunächst die Winkel SNA und SNB ermittelt. SNA liegt im Durchschnitt bei 81° , ein um mehr als $3,5^\circ$ vergrößerter Winkel zeigt eine maxilläre Prognathie an, ein um diesen Betrag verkleinerter Winkel eine maxilläre Retrognathie. Der SNB-Winkel beträgt durchschnittlich $78^\circ \pm 3^\circ$, vergrößert bedeutet dies eine mandibuläre Progenie, verkleinert eine mandibuläre Retrogenie.

Zur Einordnung in eine skelettale Klasse wurden die Werte des ANB-Winkels, ANB-iANB und des Wits-Wertes herangezogen. Wenn der gemessene ANB-Winkel gegenüber dem Durchschnitt von 2° um mehr als 2° nach oben abweicht, gilt die Zuordnung zur skelettalen Klasse II, bei kleineren Werten als 0° zur skelettalen Klasse III. Da der ANB durch den Prognathiegrad des Oberkiefers, die Rotation der Kiefer und die Höhe des Mittel- und Untergesichts beeinflusst wird, wurde dieser zusätzlich mit dem individualisierten ANB-Winkel verglichen (ANB-iANB). Bei einer Abweichung von mehr als $+1^\circ$ besteht eine distale, bei mehr als -1° eine mesiale Kieferrelation. Der Wits-Wert liegt im Mittel bei $0\text{mm} \pm 2\text{mm}$. Werte über 2mm deuten auf eine skelettale Klasse II, Werte kleiner als -2mm auf eine skelettale Klasse III hin.

Die folgenden vertikalen Strukturmerkmale wurden zur Darstellung des Gesichtsschädelaufbaus verwendet: ML-NL ($\emptyset 26,5^\circ \pm 5^\circ$) zeigt einen skelettal offenen (vergrößerte Werte) oder tiefen Biss (verkleinerte Werte), ML-NSL ($\emptyset 33,5^\circ \pm 5^\circ$) bei größeren Maßen eine vertikale oder umgekehrt eine horizontale Neigung des UK und NL-NSL ($\emptyset 7^\circ \pm 3^\circ$) eine Retro- (mehr als 10°) beziehungsweise Anteinklination (weniger als 4°) des Oberkiefers.

Um das Ausmaß der operativen Verlagerung der Kiefer bestimmen zu können, wurden die Werte NSL-per-A und NSL-per-B herangezogen. Ausgehend von einer Senkrechten, die in N auf die vordere Schädelbasis eingezeichnet wurde, wurden jeweils die Abstände vom A-Punkt und B-Punkt zu NSL im rechten Winkel gemessen.

Tabelle 4: Kephalometrische Messpunkte

Auf der Basis folgender Bezugspunkte wurden die kephalometrischen Messungen zur zweidimensionalen Analyse vorgenommen.

Definitionen laut Poliklinik für Kieferorthopädie der Universität Würzburg. Bei Doppelkonturen wurde interpoliert.

Kephalometrische Messpunkte		Definition
A	A-Punkt	Der am weitesten posterior gelegene Punkt an der äußeren Kurvatur des Proc. alveolaris maxillae zwischen den Punkten Spina nasalis anterior und Prosthion
B	B-Punkt	Die am weitesten posterior gelegene Einziehung der äußeren Kurvatur des Proc. alveolaris mandibulae
Go	Gonion	Schnittpunkt des Mandibularplanums (MeP1) und einer Tangente an den aufsteigenden Ast des UK (ArP2)
hPOcP		Hinterer Bezugspunkt des Okklusalplanums; der distalste Berührungspunkt der letzten in Okklusion stehenden Molaren
Inc OK1/UK1	Incision OK1/UK1	Spitze der Inzisalkante des am weitesten anterior gelegenen oberen/unteren mittleren Schneidezahnes
Me	Menton	Kaudalster Punkt an der äußeren Kontur der Symphyse
N	Nasion	Ventro-kraniales Ende der Sutura nasofrontalis in der Mediansagittalebene
P₁		Kaudalster Punkt der äußeren Kurvatur des UK-Körpers im Bereich der Protuberantia masseterica
S	Sella	Mittelpunkt der Fossa hypophysialis
Spa	Spina nasalis anterior	Die am weitesten anterior gelegene Spitze der Spina nasalis anterior
Spp	Spina nasalis posterior	Dorsale Begrenzung der Maxilla; Schnittpunkt der vorderen Wand der Fossa pterygopalatina mit dem Nasenboden

Tabelle 5: Kephalemtrische Messungen

Die kephalemtrischen Messungen und ihre jeweils verwendeten Bezugspunkte und –linien.

Definitionen laut Poliklinik für Kieferorthopädie der Universität Würzburg.

Kephalemtrische Messungen	Einheit	Bezugspunkte/-linien	Definition
SNA-Winkel	°	SN ^a , A	Anterior-posteriore Lage des A-Punktes in Beziehung zur vorderen Schädelbasis ^a
SNB-Winkel	°	SN ^a , B	Anterior-posteriore Lage des B-Punktes in Beziehung zur vorderen Schädelbasis ^a
ANB-Winkel	°	A, N, B	Skelettale Klasse als Ausdruck der gegenseitigen Beziehungen der Kieferbasen
ANB-iANB^b-Differenz	°	A, N, B	Differenz zwischen ANB und individuellem (errechnetem) ANB ^b
Wits-Wert (Jacobsen)	mm	A, B, OcP ^c	Jeweils Lot vom A-Punkt und B-Punkt auf das Okklusplanum ^c , Abstand der Schnittpunkte
ML-NL, Basiswinkel, SpP-MeGo	°	SpP ^e , Me, Go	Winkel zwischen Mandibularplanum ^d und Spinaplanum ^e
ML-NSL, Unterkieferneigung, SN-MeGo	°	SN ^a , Me, Go	Winkel zwischen Mandibularplanum ^d und vorderer Schädelbasis ^a
NL-NSL, Oberkieferneigung, SN-SpP	°	SN ^a , SpP ^e	Winkel zwischen Spinaplanum ^e und vorderer Schädelbasis ^a
NSL-per-A	mm	SN ^a -A	Abstand A-Punkt zur Senkrechten in N auf die vordere Schädelbasis, im rechten Winkel gemessen
NSL-per-B	mm	SN ^a -B	Abstand B-Punkt zur Senkrechten in N auf die vordere Schädelbasis, im rechten Winkel gemessen

^a SN = NSL, vordere Schädelbasis, Linie zwischen S und N

^b iANB = $-35,16+0,4 \times \text{SNA}+0,2 \times (\text{ML-NSL})$ = individualisierter ANB; ANB in Abhängigkeit von Prognathiegrad des Oberkiefers, Rotation der Kiefer und Höhe des Mittel- und Untergesichts

^c OcP = Okklusplanum; Linie zwischen der halbierenden des frontalen Überbisses und dem Punkt hPOcP

^d MeP₁ = ML, Mandibularplanum, Unterkiefergrundebene; Linie zwischen dem Punkt Me und P₁

^e SpP = NL, Spinaplanum, Oberkiefergrundebene; Linie zwischen Spa und Spp

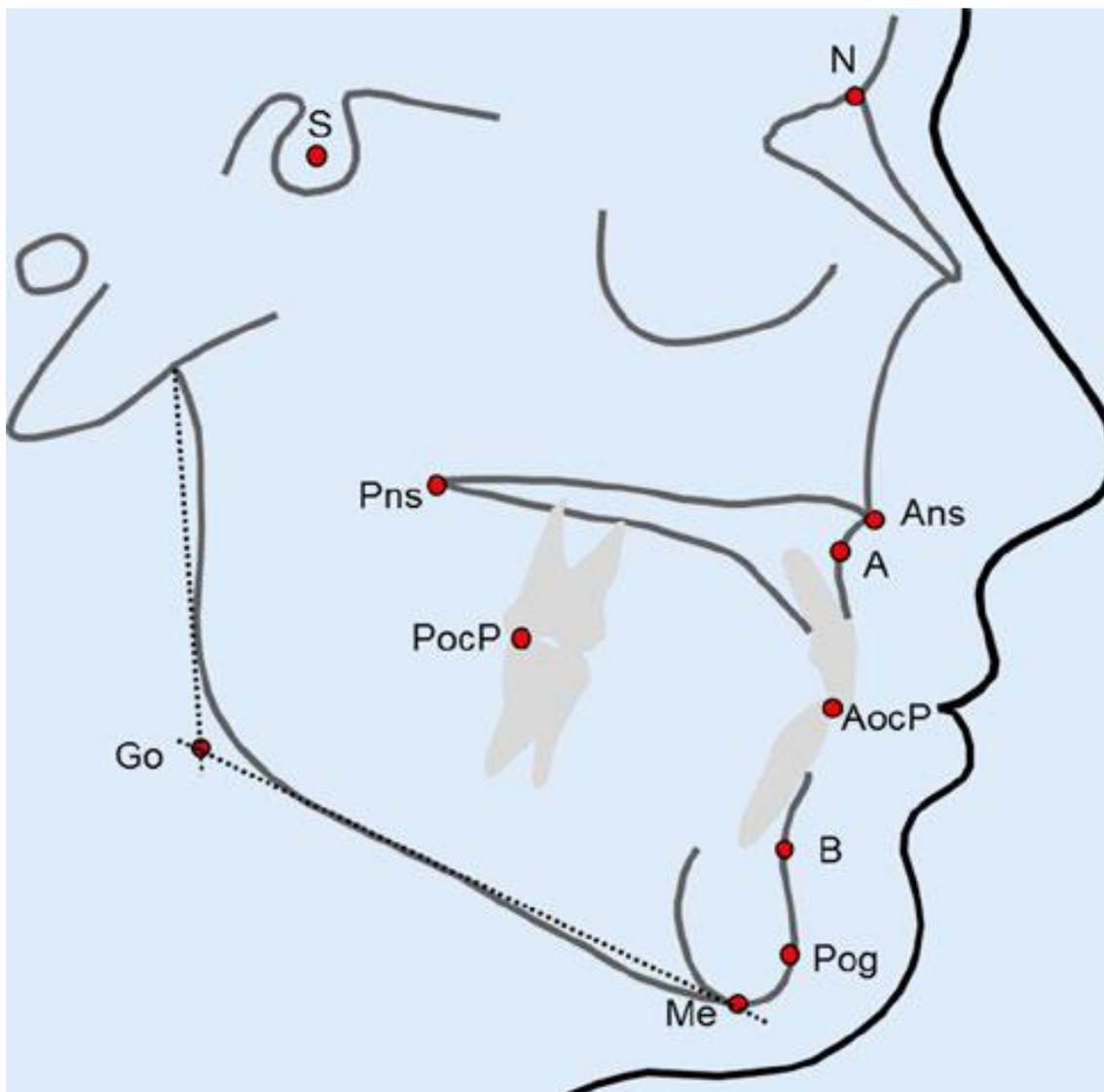


Abbildung 15: Kephalmetrische Messpunkte

A-Punkt (A), B-Punkt (B), Spina nasalis anterior (Ans), Spina nasalis posterior (Pns), anteriorer Punkt des Okklusalplanums (AocP), posteriorer Punkt des Okklusalplanums (PocP), Gonion (Go), Menton (Me), Nasion (N), Pogonion (Pog), Sella (S). (Quelle: Kochel und Meyer-Marcotty et al. 2013)

3.4 Methodenfehler nach Dahlberg (1940)

Um die Größe der bei der Auswertung der verschiedenen Daten aufgetretenen Fehler abzuschätzen, wurde im Vorhinein eine Untersuchung vorgenommen, bei der zweimal in einem Mindestabstand von 10 Tagen die gleichen Messungen durchgeführt wurden. Mithilfe der Differenzen zwischen den Mittelwerten aus der ersten und zweiten Messung konnte der Methodenfehler nach Dahlberg anhand der Dahlberg-Formel errechnet werden.

Dahlberg-Formel (1940):

$$MF = \sqrt{\frac{\sum d^2}{2n}}$$

MF: Methodenfehler

d: Differenz zwischen Messung 1 und Messung 2

n: Anzahl der Messungen

Der jeweils errechnete Wert wurde zur Normierung in % des Durchschnittsmessergebnisses angegeben. Je kleiner der Prozentwert, desto genauer war die Messung. Im Idealfall liegt der Wert bei 0.

3.4.1 Reliabilität der Volumenberechnungen

Für die Reliabilitätsprüfung und somit zur Bestimmung der intraindividuellen Fehler der Volumenberechnungen wurden die Daten von 20 zufällig ausgewählten Patienten des gesamten Datenpools der Klasse III-Patienten ausgewertet (12 %). 10 Tage später wurde die Messung wiederholt.

3.4.2 Reliabilität der Formbestimmungen

Entsprechend der Reliabilitätsprüfung zu den Volumenberechnungen wurde ebenfalls der Methodenfehler für die Formbestimmungen überprüft.

Hierzu wurden die postoperativen Daten von 20 randomisiert ausgewählten Patienten der Klasse III zwei Monate nach den Berechnungen erneut ausgewertet. Da durch das Matching dieser Daten mit den präoperativen Daten (Kapitel 3.2.4) zusätzlich Ungenauigkeiten auftreten könnten, wurden nur die postoperativen Daten zur Kontrolle neu vermessen (19,4 %) und mit dem ebenfalls neu vermessenen präoperativen 3D-Bild wie in Kapitel 3.2.4 beschrieben gematcht, um anschließend die Schnittflächen (CSA_A , CSA_B , CSA_C und $SCSA_4$ (Kapitel 3.2.5)) und das jeweilige Verhältnis ($LAR = \frac{LA}{AP}$) der drei Schnittebenen (LAR_A , LAR_B , LAR_C (Kapitel 3.2.6)) zu bestimmen.

Mittels der Dahlberg-Formel (Kapitel 3.4.1) wurde auch hier der Methodenfehler berechnet.

3.4.3 Reliabilität der kephalometrischen Messungen

Für die kephalometrischen Messungen wurde ebenfalls eine Reliabilitätsprüfung durchgeführt. Sowohl aus den prä- als auch aus den postoperativen aus DVT-Daten generierten FRS-Aufnahmen wurden insgesamt 20 willkürlich ausgewählte FRS-Bilder nach zwei Monaten erneut vermessen (9,7%).

Überprüft wurden alle kephalometrischen Messungen: SNA-Winkel, SNB-Winkel, Wits-Wert nach Jacobsen, Basiswinkel (ML-NL), Unterkieferneigung (ML-NSL) und die OP-Ausmaße NSL-per-A und NSL-per-B.

Wie in den beiden vorangegangenen Messungen wurde der Methodenfehler mithilfe der Dahlberg-Formel (Kapitel 3.4.1) bestimmt.

3.5 Statistische Auswertung

Zur statistischen Analyse wurden die gewonnenen Daten in das Programm Microsoft Excel 2010© (Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA) eingegeben und mittels der Software SPSS für Windows® Version 19 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) ausgewertet.

Für die gemessenen 3D- und kephalometrischen Parameter wurden Mittelwerte und Standardabweichungen (SD) der jeweils prä- und postoperativen Modelle berechnet und verglichen.

Der Shapiro-Wilk-Test diente als Test auf Normalverteilung der Ausgangsvariablen und Variablendifferenzen. Anhand erster Untersuchungen der Daten bimaxillär operierter Patienten erwies sich der Test bei 11 von 26 Variablen als signifikant ($p < 0,05$).

Somit konnte bei 11 Variablen (= 42%) nicht von einer Normalverteilung ausgegangen werden. Der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test für verbundene Stichproben als nichtparametrischer Test wurde aus Gründen der Vereinheitlichung für alle Datenpaare angewendet, um die Größe der Veränderungen zu untersuchen und ihre Signifikanz festzustellen. Das Signifikanzniveau α wurde auf 5% festgelegt: *: $p < 0,05$ =signifikant; **: $p < 0,01$ =hochsignifikant; ***: $p < 0,001$ =höchst signifikant.

Um Zusammenhänge zwischen den 3D-Variablen und den kephalometrischen Werten zu ermitteln, diente aufgrund signifikanter Testergebnisse bei 12 von 26 Datenpaaren (= 46%) mit $\alpha = 5\%$ nach Shapiro-Wilk der Test nach Spearman für bivariate Korrelationen zur Vereinheitlichung für alle Datenpaare.

Als klinisch relevant galt ein Korrelationskoeffizient $r_s^2 > 0,49$, also $r_s > 0,7$; $p < 0,05$ zeigt einen Zusammenhang von Variablen in der Grundgesamtheit.

4 Ergebnisse

4.1 Reliabilität

Der Methodenfehler (MF) für die dreidimensionalen Messungen (Volumen und Form des PAS) ist Tabelle 6 und Tabelle 7 zu entnehmen, für die kephalometrischen Messungen Tabelle 8.

Er lag für die volumetrischen Messungen zwischen $34,3\text{mm}^3$ (SAS) und $167,7\text{mm}^3$ (IAS), was 0,25% beziehungsweise 2,7% des jeweiligen Durchschnittsmessergebnisses entsprach.

Für die Oberflächenbestimmung ergaben Werte zwischen $0,21\text{mm}^2$ (CSA_C) und $4,6\text{mm}^2$ (SCSA) 0,07% und 1,55% des Durchschnittsmessergebnisses, während es zwischen 0,17% (LAR_A) und 3,11% (LAR_C) für die Berechnungen des Verhältnisses von lateraler zu anteroposteriorer Ausdehnung waren.

In der Kephalmetrie lag der Methodenfehler zwischen $0,2^\circ$ (SNB) und $2,5^\circ$ (ML-NL) und unter 0,71 mm (Abstand B-Punkt zu NSL). Aufgrund der kleinen Beträge ergab dies zwischen 0% (NSL-per-A) und 16,8 % (NSL-per-B) des durchschnittlichen Messergebnisses.

Nach eigenen Erfahrungswerten und im Vergleich der Werte untereinander kann insgesamt von einem hohen Genauigkeitsgrad der angewandten Untersuchungsmethoden ausgegangen werden.

Tabelle 6: Ergebnisse der Reliabilitätsprüfung Volumen

d: Differenz zwischen Messung 1 und Messung 2

MF: Methodenfehler = Ergebnis der Dahlberg-Formel

	SAS	IAS	PAS gesamt
d	217mm ³	1060mm ³	2699mm ³
MF	34,3mm ³	167,7mm ³	426,8mm ³
Ø-Messergebnis 2. Messung	13920,4mm ³	6289,8mm ³	26256,8mm ³
MF in % des jeweiligen Ø-Mess- ergebnisses	0,25	2,67	0,66

Tabelle 7: Ergebnisse der Reliabilitätsprüfung Form

d: Differenz zwischen Messung 1 und Messung 2

MF: Methodenfehler = Ergebnis der Dahlberg-Formel

	CSA _A	CSA _B	CSA _C	SCSA	LAR _A	LAR _B	LAR _C
d	-23,47mm ²	-3,98mm ²	1,36mm ²	-29,08mm ²	0,02	0,45	-0,19
MF	3,712mm ²	0,629mm ²	0,214mm ²	4,598mm ²	0,003	0,071	0,029
Ø-Messergebnis 2. Messung	567,05mm ²	347,41mm ²	319,34mm ²	295,86mm ²	1,43	2,3	2,34
MF in % des jeweiligen Ø-Mess- ergebnisses	0,66	0,18	0,07	1,55	0,17	3,11	1,25

Tabelle 8: Ergebnisse der Reliabilitätsprüfung Kephalometrie

d: Differenz zwischen Messung 1 und Messung 2

MF: Methodenfehler = Ergebnis der Dahlberg-Formel

	SNA	SNB	Wits	ML-NL	ML-NSL	NSL-per-B	NSL-per-A
d	2°	1,5°	-1mm	15,5°	10°	-4,5mm	0mm
MF	0,316°	0,237°	0,158mm	2,451°	1,581°	0,712mm	0mm
Ø-Messergebnis 2. Messung	79,5°	78,7°	-3,35mm	24,8°	34,4°	-4,2mm	3,4mm
MF in % des jeweiligen Ø-Mess- ergebnisses	0,4	0,3	4,7	9,9	4,6	16,8	0

4.2 Dreidimensionale Untersuchung des PAS

Zur Analyse der 3D-Daten diente der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test für verbundene Stichproben.

Abbildung 16 und Abbildung 17 zeigen die postoperativen Veränderungen des PAS im Vergleich mit der präoperativen Situation am Beispiel jeweils eines uni- beziehungsweise bimaxillär operierten Patienten.

4.2.1 Unimaxilläre Osteotomie

In Tabelle 9 werden die prä- und postoperativen Mittelwerte der dreidimensionalen Analysen, die Differenzen der Mittelwerte sowie die Standardabweichungen der Ergebnisse und p-Werte für Gruppe 1 (unimaxillär operiert) dargestellt und aufgezeigt, dass die OP nicht zu signifikanten Unterschieden zwischen prä- und postoperativen PAS-Volumen führte. Im Gegensatz zu Gruppe 2 (bimaxillär operiert), vgl. Kapitel 4.2.2, verringerten sich sowohl das Gesamtvolumen des PAS als auch die beiden Einzelvolumen (PAS: -6,9%, SAS: -5,23%, IAS: -9,88%) nur unbedeutend.

Im Querschnitt zeigten sich für Gruppe 1 gering- bis mittelmäßig signifikante Unterschiede in fast allen Ebenen (CSA_A : +25,53%, CSA_B : -12,88%, $SCSA$: -13,76%), ausgenommen Ebene C (CSA_C : -10,3%).

Für den anteroposterioren Durchmesser waren signifikante Änderungen in Ebene A und B (AP_A : +5,34%, AP_B : -7,87%), im lateralen Durchmesser in Ebene B und C (LA_B : -4,36%, LA_C : -6,19%) und im Verhältnis in Ebene A (LAR_A : -4,55%) zu erkennen.

Die übrigen Änderungen der Formparameter blieben ohne Signifikanz (AP_C : -6,17%, LA_A : +1,7%, LAR_B : +7,05%, LAR_C : +6,43%).

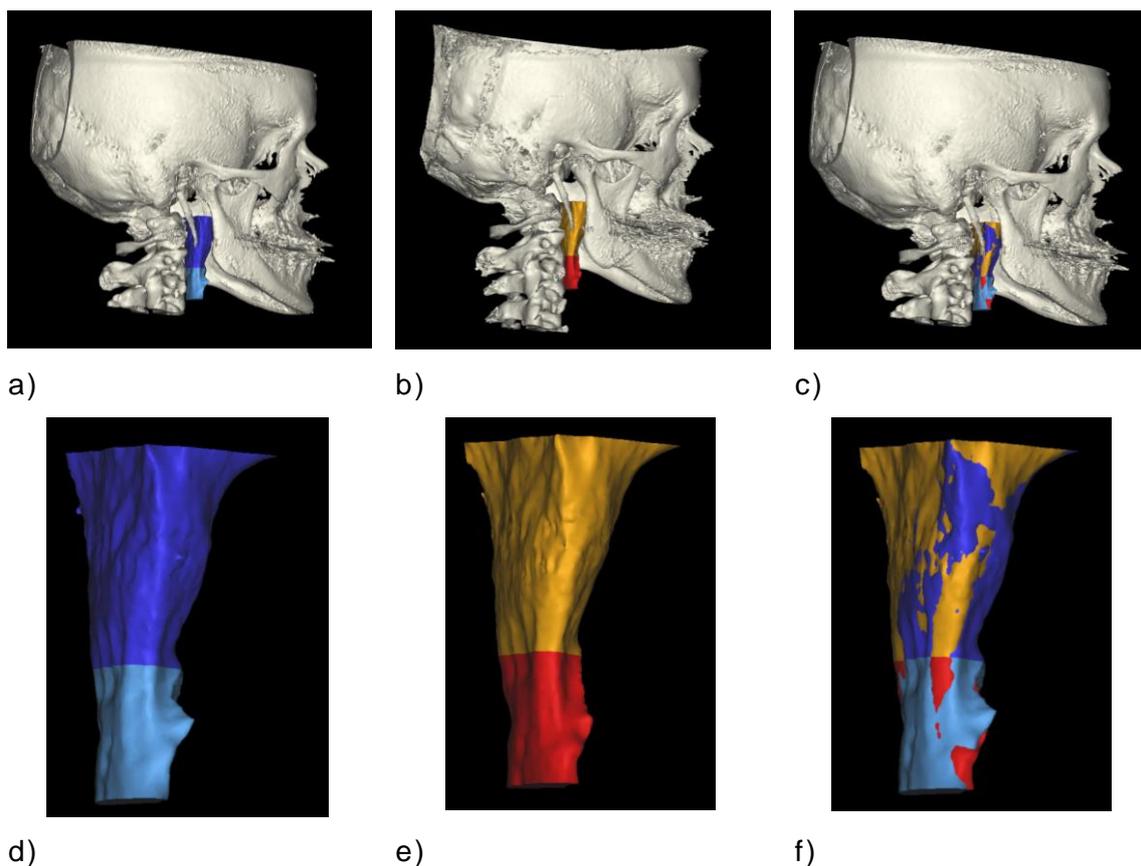


Abbildung 16: 3D-Ansicht des Schädels und PAS eines unimaxillär operierten Patienten

- a) 3D-PAS im Schädelmodell präoperativ,
 - b) postoperativ,
 - c) PAS-Modelle prä- und postoperativ überlagert,
 - d) 3D-PAS-Modell ohne Schädel präoperativ,
 - e) 3D-PAS-Modell postoperativ,
 - f) 3D-PAS-Modelle prä- und postoperativ überlagert.
- (Quelle: Screenshots von 3D-Darstellungen in Mimics® aus dem untersuchten Patientengut, bearbeitet mit der Software Microsoft Word 2010)

Tabelle 9: Ergebnisse der 3D-Messungen unimaxillär operierter Patienten

Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test für verbundene Stichproben zum Vergleich der prä- und postoperativen Werte.

SD = Standardabweichung

p = p-Wert

*: p<0,05=signifikant;

*: p<0,01=hochsignifikant; ***: p<0,001=höchst signifikant

Zur Erläuterung der 3D-Werte siehe Kapitel 3.2.2, 3.2.5 und 3.2.6.

Wert	Prä-OP		Post-OP		Differenz			Signifikanz
	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD	Mittelwert	%	SD	P
Volumen (mm ³)								
PAS	14832,10	5690,12	13809,07	5709,83	-1023,03	-6,90	3647,81	0,064 n.s.
SAS	9523,47	3622,27	9025,12	3717,15	-498,36	-5,23	2223,76	0,179 n.s.
IAS	5308,63	2857,62	4783,96	2926,27	-524,67	-9,88	2125,91	0,116 n.s.
Querschnitt (mm ²)								
CSA _A	456,33	107,26	481,86	107,63	25,53	5,59	61,73	0,003 **
CSA _B	299,55	140,74	260,97	127,80	-38,58	-12,88	87,27	0,012 *
CSA _C	286,39	117,87	256,90	137,56	-29,49	-10,30	102,07	0,058 n.s.
SCSA	263,96	109,80	227,64	117,20	-36,33	-13,76	105,54	0,050 *
Form								
Anteroposteriorer Durchmesser (mm)								
AP _A	17,03	3,32	17,94	2,95	0,91	5,34	1,92	<0,001 ***
AP _B	11,69	3,82	10,77	3,70	-0,93	-7,87	2,63	0,049 *
AP _C	12,00	3,96	11,26	4,55	-0,74	-6,17	3,47	0,147 n.s.
Lateraler Durchmesser (mm)								
LA _A	25,32	3,61	25,75	3,48	0,44	1,70	1,86	0,074 n.s.
LA _B	23,86	5,72	22,82	5,95	-1,05	-4,36	3,90	0,028 *
LA _C	27,64	5,31	25,93	5,77	-1,72	-6,19	3,53	0,004 **
Verhältnis LAT/AP								
LAR _A	1,54	0,36	1,47	0,31	-0,07	-4,55	0,20	0,020 *
LAR _B	2,27	0,89	2,43	1,28	0,16	7,05	1,07	0,577 n.s.
LAR _C	2,49	0,70	2,65	1,20	0,16	6,43	1,12	0,783 n.s.

4.2.2 Bimaxilläre Osteotomie

Bei den Patienten der Gruppe 2 (Tabelle 10) führte die OP zu geringen Vergrößerungen des Gesamt- und Einzelvolumens des SAS (PAS: +0,79%, SAS: +3,96%), während sich der IAS ein wenig verkleinerte (IAS: -5,04%). Analog vergrößerte sich die Querschnittsfläche der obersten Ebene, CSA_A (+4,21%), während sich die Querschnittsflächen der restlichen Ebenen verringerten (CSA_B : -3,7%, CSA_C : -5,86%, SCSA: -3,97%).

Es konnte belegt werden, dass das PAS-Volumen durch die bimaxilläre Umstellungsosteotomie nicht signifikant verändert wurde.

In den Messungen der Querschnittsflächen veränderten sich signifikant lediglich der anteroposteriore Durchmesser in Ebene A und das Verhältnis LAR in Ebene A und C (AP_A : +13,82%, LAR_A : -13,25%, LAR_C : +11,36%), wobei der p-Wert für LAR_C auf der niedrigsten Stufe lag. In allen anderen Messungen zur Bestimmung der anteroposterioren und lateralen Ausdehnung des PAS gab es nach der bimaxillären Osteotomie keine signifikanten Unterschiede (AP_B : -2,13%, AP_C : -7,5%, LA_A : +1,64%, LA_B : +0,73%, LA_C : -0,17%, LAR_C : +13,21%).

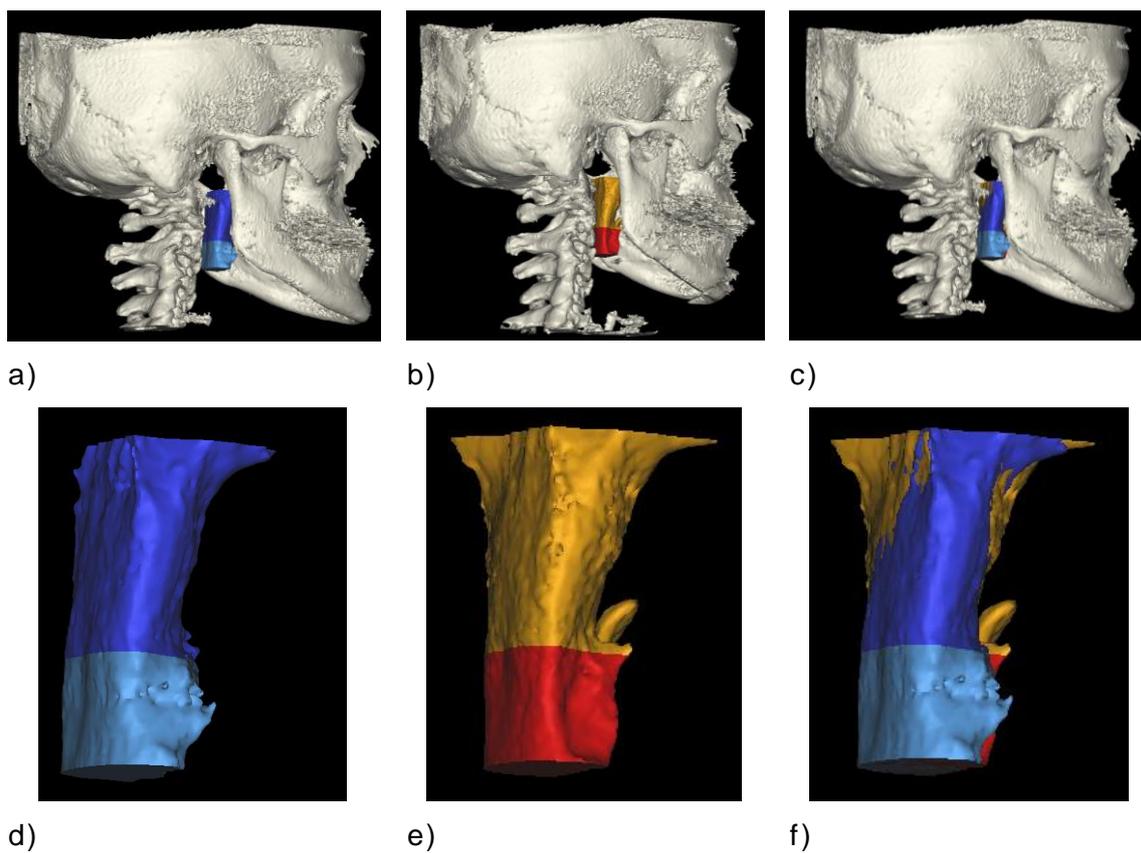


Abbildung 17: 3D-Ansicht des Schädels und PAS eines bimaxillär operierten Patienten

- a) 3D-PAS im Schädelmodell präoperativ,
 - b) postoperativ,
 - c) PAS-Modelle prä- und postoperativ überlagert
 - d) 3D-PAS-Modell ohne Schädel präoperativ,
 - e) 3D-PAS-Modell postoperativ,
 - f) 3D-PAS-Modelle prä- und postoperativ überlagert.
- (Quelle: Screenshots von 3D-Darstellungen in Mimics® aus dem untersuchten Patientengut, bearbeitet mit der Software Microsoft Word 2010)

Tabelle 10: Ergebnisse der 3D-Messungen bimaxillär operierter Patienten

Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test für verbundene Stichproben zum Vergleich der prä- und postoperativen Werte.

SD = Standardabweichung

p = p-Wert

*: p<0,05=signifikant;

** : p<0,01=hochsignifikant; ***: p<0,001=höchst signifikant

Zur Erläuterung der 3D-Werte siehe Kapitel 3.2.2, 3.2.5 und 3.2.6.

Wert	Prä-OP		Post-OP		Differenz			Signifikanz
	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD	Mittelwert	%	SD	P
Volumen (mm ³)								
PAS	17930,41	7681,89	18072,38	7409,26	141,97	0,79	3920,34	0,405 n.s.
SAS	11621,97	5637,71	12082,18	5058,29	460,21	3,96	2819,33	0,064 n.s.
IAS	6308,44	3104,30	5990,20	3098,98	-318,24	-5,04	1643,27	0,677 n.s.
Querschnitt (mm ²)								
CSA _A	461,20	161,45	480,60	148,14	19,40	4,21	108,27	0,083 n.s.
CSA _B	340,61	140,95	328,02	152,13	-12,60	-3,70	85,82	0,628 n.s.
CSA _C	338,04	124,39	318,23	127,71	-19,82	-5,86	85,84	0,192 n.s.
SCSA	309,44	128,95	297,17	137,10	-12,27	-3,97	88,13	0,979 n.s.
Form								
Anteroposteriorer Durchmesser (mm)								
AP _A	16,72	4,41	19,03	3,58	2,31	13,82	2,56	<0,001 ***
AP _B	12,66	3,48	12,39	4,64	-0,27	-2,13	3,24	0,614 n.s.
AP _C	13,73	3,44	12,70	3,85	-1,04	-7,50	2,97	0,074 n.s.
Lateraler Durchmesser (mm)								
LA _A	26,25	5,27	26,68	3,70	0,43	1,64	2,86	0,919 n.s.
LA _B	24,79	6,72	24,97	6,49	0,18	0,73	5,04	0,672 n.s.
LA _C	28,85	4,61	28,80	5,12	-0,06	-0,17	3,77	0,614 n.s.
Verhältnis LAT/AP								
LAR _A	1,66	0,52	1,44	0,27	-0,22	-13,25	0,36	<0,001 ***
LAR _B	2,12	0,83	2,40	1,42	0,29	13,21	1,01	0,148 n.s.
LAR _C	2,20	0,51	2,45	0,81	0,26	11,36	0,67	0,014 *

4.3 Kephalometrische Auswertung

Zur Analyse der kephalometrisch ermittelten Daten diente der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test für verbundene Stichproben. Durch diesen Test konnten die jeweiligen prä- und postoperativen Mittelwerte der 10 im FRS vermessenen Parameter, die Differenzen der Mittelwerte sowie die Standardabweichungen der Ergebnisse und p-Werte dargestellt werden.

4.3.1 Unimaxilläre Osteotomie

Während der unimaxillären Umstellungsosteotomie betrug die mandibuläre Dorsalverlagerung durchschnittlich $4,25\text{mm} \pm 2,68\text{mm}$ (NSL-per-B) mit einem maximalen Wert von 10mm.

Die Auswertung der Fernröntgenseitenbilder von Gruppe 1, aufgeschlüsselt in prä- und postoperative Mittelwerte sowie die Differenz der Mittelwerte mit den jeweiligen Standardabweichungen und dem p-Wert ist in Tabelle 11 aufgeführt.

Anhand der ermittelten Daten für den Einbau der Kiefer und die skelettale Klasse wurden die Patienten präoperativ aus folgenden Gründen der skelettalen Klasse III zugeordnet: ANB war mit $-0,89^\circ \pm 2,27^\circ$ verkleinert, ebenso ANB-iANB ($-4,15^\circ \pm 1,99^\circ$), der Wits-Wert zeigte negative Werte ($-5,46\text{mm} \pm 2,84\text{mm}$). Der Oberkiefer war in Relation zur Schädelbasis durchschnittlich orthognath eingebaut (SNA: $79,46^\circ \pm 3,75^\circ$) und zeigte mit seiner Neigung zur Schädelbasis eine Normoinklination (NL-NSL: $9,45 \pm 2,90$); auch der Unterkiefer war orthognath, tendenziell prognath ($80,35^\circ \pm 3,82^\circ$) eingebaut und kennzeichnete mit seiner Neigung zur Schädelbasis und dem Basiswinkel einen ausgeglichenen Gesichtsschädelaufbau (ML-NSL: $33,18^\circ \pm 6,33^\circ$, ML-NL: $23,73^\circ \pm 6,33^\circ$).

Die Umstellungsosteotomie des UK brachte eine postoperative Einstufung dieser Patienten in die skelettale Klasse I mit sich: SNB verringerte sich um durchschnittlich $2,28^\circ \pm 1,66^\circ$, ANB stieg um $2,28^\circ \pm 1,66^\circ$ auf positive Maße, ANB-iANB um $2,52^\circ \pm 1,55^\circ$ und der Wits-Wert um $4,33\text{mm} \pm 2,38\text{mm}$ ebenfalls.

Trotz dieser signifikanten Veränderungen kennzeichneten die Inklination des UK, welche sich um $1,21^\circ \pm 2,65^\circ$ verringerte (ML-NSL: $31,96^\circ \pm 6,37^\circ$) und der Basiswinkel, der um $1,21^\circ \pm 2,65^\circ$ verkleinert wurde (ML-NL: $22,51^\circ \pm 6,48^\circ$), auch nach der Operation einen ausgeglichenen Gesichtschädelaufbau.

Zur Übersicht der Ergebnisse siehe Tabelle 11.

Tabelle 11: Ergebnisse der kephalometrischen Messungen unimaxillär operierter Patienten

Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test für verbundene Stichproben

SD = Standardabweichung

p = p-Wert

*: $p < 0,05$ = signifikant;

** : $p < 0,01$ = hochsignifikant; ***: $p < 0,001$ = höchst signifikant

Zur Erläuterung der kephalometrischen Werte siehe Kapitel 3.3.

Wert	Prä-OP		Post-OP		Differenz			Signifikanz
	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD	Mittelwert	%	SD	P
SNA (°)	79,46	3,75	79,46	3,75	0	0,00	0,00	1,000 n.s.
SNB (°)	80,35	3,82	78,08	3,28	-2,28	-2,83	1,66	<0,001 ***
ANB (°)	-0,89	2,27	1,39	1,79	2,28	256,18	1,66	<0,001 ***
ANB-iANB (°)	-4,15	1,99	-1,63	1,57	2,52	60,72	1,55	<0,001 ***
Wits (mm)	-5,64	2,84	-1,31	2,12	4,33	76,77	2,38	<0,001 ***
ML-NL (°)	23,73	6,33	22,51	6,48	-1,21	-5,14	2,65	0,007 **
ML-NSL (°)	33,18	6,33	31,96	6,37	-1,21	-3,68	2,65	0,007 **
NL-NSL (°)	9,45	2,90	9,45	2,90	0	0,00	0,00	1,000 n.s.
NSL-per-A (mm)	3,34	3,48	3,34	3,48	0	0,00	0,00	1,000 n.s.
NSL-per-B (mm)	7,58	5,14	3,38	5,13	-4,25	-55,41	2,68	<0,001 ***

4.3.2 Bimaxilläre Osteotomie

Mit der bimaxillären Umstellungsosteotomie zur chirurgischen Behandlung der Klasse III-Patienten wurde die Maxilla um durchschnittlich $4,59\text{mm} \pm 1,72\text{mm}$ (NSL-per-A) nach anterior verlagert. Das größte OP-Ausmaß betrug 8mm. Die mandibuläre Dorsalverlagerung betrug durch-

schnittlich $4,96\text{mm} \pm 3,66\text{mm}$ (NSL-per-B). Die größte Verlagerungsdistanz waren hier 12mm.

Aus Tabelle 12 ist ersichtlich, dass auch Gruppe 2 anhand der Kieferrelation präoperativ der skelettalen Klasse III zuzuordnen war: Der Oberkiefer war in Relation zur vorderen Schädelbasis vor der Umstellungsosteotomie im Mittel orthognath, tendenziell retrognath eingebaut (SNA: $78,56^\circ \pm 4,38^\circ$), die Lage des Unterkiefers prognath (SNB: $82,31^\circ \pm 5,02^\circ$). ANB betrug im Durchschnitt $-3,75^\circ \pm 2,87^\circ$, ANB-iANB $-6,50^\circ \pm 2,65^\circ$ und der Wits-Wert $-9,26\text{mm} \pm 3,86\text{mm}$.

Die Neigung des Oberkiefers zur Schädelbasis war präoperativ normoinkliniert (NL-NSL: $9,63^\circ \pm 3,52^\circ$), der Basiswinkel (ML-NL: $23,06^\circ \pm 7,27^\circ$) und die Neigung des UK zur Schädelbasis (ML-NSL: $32,43^\circ \pm 7,28^\circ$) zeigten ebenso wie bei Gruppe 1, vgl. Kapitel 4.3.1, einheitlich einen ausgeglichenen Gesichtsschädelaufbau.

Signifikante Veränderungen ergaben sich für Gruppe 2 nach dem chirurgischen Eingriff sowohl für die Parameter zum Einbau der Kieferbasen als auch zur Bestimmung der skelettalen Klasse: Auch diese Patienten gehörten nach der OP zur skelettalen Klasse I: SNA vergrößerte sich um $4,31^\circ \pm 1,81^\circ$, SNB verringerte sich um $-2,98^\circ \pm 2,20^\circ$, ebenso dezimierte sich der Wits-Wert um $8,21\text{mm} \pm 3,50\text{mm}$. ANB und ANB-iANB verschoben sich um $7,29^\circ \pm 2,52^\circ$ beziehungsweise $5,72^\circ \pm 2,23^\circ$ auf positive Werte.

Mit einer signifikanten Vergrößerung von NL-NSL um $1,9^\circ \pm 2,88^\circ$ war der OK postoperativ retroinkliniert, während sich der Basiswinkel ML-NL um $2,7^\circ \pm 5,19^\circ$ zu einem skelettal tiefen Biss verkleinerte.

Die Unterkieferneigung in Relation zur Schädelbasis als Parameter für den Gesichtsschädelaufbau war von signifikanten Änderungen unberührt.

Die Ergebnisse der kephalometrischen Messungen bimaxillär operierter Patienten sind in Tabelle 12 aufgeführt.

Tabelle 12: Ergebnisse der kephalometrischen Messungen bimaxillär operierter Patienten

Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test für verbundene Stichproben zum Vergleich der prä- und postoperativen Werte.

SD = Standardabweichung

p = p-Wert

*: p<0,05=signifikant;

** : p<0,01=hochsignifikant; ***: p<0,001=höchst signifikant

Zur Erläuterung der kephalometrischen Werte siehe Kapitel 3.3.

Wert	Prä-OP		Post-OP		Differenz			Signifikanz
	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD	Mittelwert	%	SD	P
SNA (°)	78,56	4,38	82,88	4,67	4,31	5,50	1,81	<0,001 ***
SNB (°)	82,31	5,02	79,34	4,10	-2,98	-3,61	2,20	<0,001 ***
ANB (°)	-3,75	2,87	3,54	2,07	7,29	194,40	2,52	<0,001 ***
ANB-iANB (°)	-6,50	2,65	-0,78	1,81	5,72	88,00	2,23	<0,001 ***
Wits (mm)	-9,26	3,86	-1,05	2,60	8,21	88,66	3,50	<0,001 ***
ML-NL (°)	23,06	7,27	20,36	5,82	-2,7	-11,71	5,19	0,004 **
ML-NSL (°)	32,43	7,28	31,64	6,15	-0,79	-2,44	3,87	0,342 n.s.
NL-NSL (°)	9,63	3,52	11,53	3,54	1,9	19,73	2,88	<0,001 ***
NSL-per-A (mm)	2,34	3,81	6,93	3,77	4,59	196,15	1,72	<0,001 ***
NSL-per-B (mm)	10,49	8,27	5,53	6,33	-4,96	-47,28	3,66	<0,001 ***

4.4 Korrelationen zwischen 3D-Werten und FRS-Werten

Zur Darstellung der Zusammenhänge zwischen den Änderungen der 16 3D-Parameter und der 7 (Gruppe 1) bzw. 10 (Gruppe 2) FRS-Parameter diente für die beiden untersuchten Gruppen der Test nach Spearman für bivariate Korrelationen. Es wurden 112 Datenpaare für Gruppe 1 und 160 Datenpaare für Gruppe 2 auf klinisch relevante Korrelationen untersucht.

4.4.1 Korrelationen bei unimaxillär operierten Patienten

Keines der Wertepaare von Gruppe 1 in Tabelle 13 zeigt klinisch relevante Korrelationen zwischen den Parametern aus der FRS-Auswertung für die skelettalen Befunde des Gesichtsschädels und den Parametern aus der 3D-Auswertung für die Veränderungen der Form des PAS.

Bei 30 von 112 Datenpaaren (27%) zeigte sich ein p-Wert $<0,05$. Das bedeutet, dass in der Grundgesamtheit, also in der Gesamtheit aller Patienten, die sich einer solchen OP unterzogen, zwischen diesen Werten ein echter Zusammenhang existierte. Dieser war allerdings zu klein, um für den klinischen Alltag eine Bedeutung zu haben. Die Paare waren SNB, ANB, ANB-iANB und Wits jeweils mit PAS, SAS, CSA_B, CSA_C und SCSA. Außerdem ML-NL und ML-NSL mit LAR_B.

4.4.2 Korrelationen bei bimaxillär operierten Patienten

Auch bei den bimaxillär therapierten Patienten korrelierten die Änderungen der Parameter aus der FRS- und 3D-Analyse nicht klinisch relevant (Tabelle 14).

Hier zeigte sich bei 15 von 160 Datenpaaren (9,5%) ein p-Wert $<0,05$. Wie in Kapitel 4.4.1 beschrieben, wies dieses Ergebnis zwar auch auf einen echten Zusammenhang in der Grundgesamtheit zwischen diesen Parametern hin, welcher allerdings ebenfalls zu klein war, um für den klinischen Alltag eine Bedeutung zu haben.

Die Variablenpaare mit einem signifikanten Zusammenhang waren SNA mit LA_C und LAR_A, SNB mit LAR_C, ANB und ANB-iANB mit LAR_A, Wits mit CSA_B, AP_B, LA_A und LAR_A, ML-NSL mit CSA_B und LAR_B, NSL-per-A mit LA_B, LAC und LAR_A und NSL-per-B mit LAR_C.

Tabelle 13: Korrelationen zwischen 3D-Werten und FRS-Werten unimaxillär operierter Patienten

Spearman-Test für bivariate Korrelationen

r_s = Korrelationskoeffizient; als klinisch relevant gilt ein Korrelationskoeffizient $r_s^2 > 0,49$, also $r_s > 0,7$

p = p-Wert *: $p < 0,05$ =signifikant; **: $p < 0,01$ =hochsignifikant; ***: $p < 0,001$ =höchst signifikant

		PAS	SAS	IAS	CSA _A	CSA _B	CSA _C	SCSA	AP _A	AP _B	AP _C	LA _A	LA _B	LA _C	LAR _A	LAR _B	LAR _C
SNB	r_s	,419	,505	,284	,251	,404	,319	,340	,193	-,066	,056	,119	,141	,101	-,082	-,162	-,167
	p	,007 **	,001 ***	,076 n.s.	,118 n.s.	,010 **	,045 *	,032 *	,232 n.s.	,685 n.s.	,733 n.s.	,465 n.s.	,385 n.s.	,537 n.s.	,617 n.s.	,318 n.s.	,304 n.s.
ANB	r_s	-,419	-,505	-,284	-,251	-,404	-,319	-,340	-,193	,066	-,056	-,119	-,141	-,101	,082	,162	,167
	p	,007 **	,001 ***	,076 n.s.	,118 n.s.	,010 **	,045 *	,032 *	,232 n.s.	,685 n.s.	,733 n.s.	,465 n.s.	,385 n.s.	,537 n.s.	,617 n.s.	,318 n.s.	,304 n.s.
ANB-iANB	r_s	-,491	-,555	-,313	-,247	-,433	-,363	-,391	-,189	,085	-,072	-,093	-,115	-,107	,089	,085	,141
	p	,001 ***	<001 ***	,049 *	,124 n.s.	,005 **	,021 *	,013 *	,242 n.s.	,601 n.s.	,658 n.s.	,565 n.s.	,481 n.s.	,510 n.s.	,585 n.s.	,601 n.s.	,385 n.s.
Wits	r_s	-,396	-,424	-,328	-,231	-,393	-,379	-,388	-,138	,056	-,064	-,090	-,190	-,065	,114	,126	,157
	p	,011 *	,006 **	,039 *	,151 n.s.	,012 *	,016 *	,031 *	,394 n.s.	,733 n.s.	,693 n.s.	,580 n.s.	,240 n.s.	,691 n.s.	,483 n.s.	,440 n.s.	,335 n.s.
ML-NL	r_s	-,038	,014	-,214	-,113	-,121	-,205	-,147	-,107	-,100	,082	-,251	-,100	,102	-,085	,321	,304
	p	,818 n.s.	,930 n.s.	,184 n.s.	,486 n.s.	,458 n.s.	,204 n.s.	,365 n.s.	,509 n.s.	,540 n.s.	,616 n.s.	,119 n.s.	,541 n.s.	,532 n.s.	,602 n.s.	,043 *	,057 n.s.
ML-NSL	r_s	-,038	,014	-,214	-,113	-,121	-,205	-,147	-,107	-,100	,082	-,251	-,100	,102	-,085	,321	,304
	p	,818 n.s.	,930 n.s.	,184 n.s.	,486 n.s.	,458 n.s.	,204 n.s.	,365 n.s.	,509 n.s.	,540 n.s.	,616 n.s.	,119 n.s.	,541 n.s.	,532 n.s.	,602 n.s.	,043 *	,057 n.s.
NSL-per-B	r_s	,496	,547	,385	,207	,502	,427	,446	,155	-,126	,045	,103	,111	,042	-,073	-,156	-,200
	p	,001 ***	<001 ***	,014 *	,200 n.s.	,001 ***	,006 **	,004 **	,339 n.s.	,440 n.s.	,785 n.s.	,527 n.s.	,494 n.s.	,795 n.s.	,652 n.s.	,335 n.s.	,217 n.s.

Tabelle 14: Korrelationen zwischen 3D-Werten und FRS-Werten bimaxillär operierter Patienten

Spearman-Test für bivariate Korrelationen

r_s = Korrelationskoeffizient; als klinisch relevant gilt ein Korrelationskoeffizient $r_s^2 > 0,49$, also $r_s > 0,7$

p = p-Wert *: $p < 0,05$ =signifikant; **: $p < 0,01$ =hochsignifikant; ***: $p < 0,001$ =höchst signifikant

		PAS	SAS	IAS	CSA _A	CSA _B	CSA _C	SCSA	AP _A	AP _B	AP _C	LA _A	LA _B	LA _C	LAR _A	LAR _B	LAR _C
SNA	r_s	,092	,107	,075	,073	-,067	,033	,027	,198	-,032	-,005	-,190	,302	,381	-,338	,254	,199
	p	,571 n.s.	,510 n.s.	,646 n.s.	,654 n.s.	,683 n.s.	,842 n.s.	,867 n.s.	,221 n.s.	,874 n.s.	,976 n.s.	,241 n.s.	,058 n.s.	,015 *	,033 *	,114 n.s.	,217 n.s.
SNB	r_s	,044	,088	,019	,010	,107	-,233	-,117	-,179	,046	-,280	-,032	,100	,210	,145	,042	,457
	p	,787 n.s.	,590 n.s.	,908 n.s.	,951 n.s.	,510 n.s.	,148 n.s.	,472 n.s.	,269 n.s.	,777 n.s.	,080 n.s.	,845 n.s.	,538 n.s.	,193 n.s.	,372 n.s.	,797 n.s.	,003 **
ANB	r_s	-,019	-,047	-,003	-,013	-,132	,219	,128	,248	-,093	,197	-,195	,125	,096	-,369	,168	-,215
	p	,908 n.s.	,774 n.s.	,985 n.s.	,935 n.s.	,418 n.s.	,147 n.s.	,432 n.s.	,123 n.s.	,568 n.s.	,222 n.s.	,228 n.s.	,443 n.s.	,557 n.s.	,019 *	,301 n.s.	,183 n.s.
ANB-iANB	r_s	-,120	-,153	-,085	-,067	-,236	,210	-,083	,199	-,178	,206	-,223	,063	,067	-,323	,233	-,208
	p	,463 n.s.	,344 n.s.	,601 n.s.	,683 n.s.	,143 n.s.	,193 n.s.	,611 n.s.	,219 n.s.	,272 n.s.	,203 n.s.	,167 n.s.	,698 n.s.	,680 n.s.	,042 *	,148 n.s.	,198 n.s.
Wits	r_s	-,202	-,188	-,228	-,135	-,334	-,061	-,109	,106	-,313	,009	-,341	-,116	-,074	-,335	,253	-,063
	p	,212 n.s.	,246 n.s.	,157 n.s.	,408 n.s.	,035 *	,710 n.s.	,502 n.s.	,514 n.s.	,049 *	,956 n.s.	,032 *	,477 n.s.	,649 n.s.	,035 *	,115 n.s.	,698 n.s.
ML-NL	r_s	,120	,212	,012	,138	,260	-,106	-,014	,014	,252	-,091	,126	-,029	-,266	,085	-,260	-,075
	p	,462 n.s.	,189 n.s.	,940 n.s.	,397 n.s.	,106 n.s.	,516 n.s.	,933 n.s.	,929 n.s.	,117 n.s.	,578 n.s.	,440 n.s.	,859 n.s.	,097 n.s.	,601 n.s.	,104 n.s.	,646 n.s.
ML-NSL	r_s	,250	,288	,155	,221	,343	,035	,106	,076	,295	,067	,108	,025	-,247	,048	-,333	-,245
	p	,120 n.s.	,071 n.s.	,340 n.s.	,172 n.s.	,030 *	,831 n.s.	,515 n.s.	,640 n.s.	,064 n.s.	,680 n.s.	,505 n.s.	,880 n.s.	,125 n.s.	,766 n.s.	,036 *	,127 n.s.
NL-NSL	r_s	,087	-,034	,157	-,010	-,029	,212	,158	,058	-,048	,197	-,023	,025	,057	-,007	-,018	-,196
	p	,595 n.s.	,835 n.s.	,334 n.s.	,952 n.s.	,859 n.s.	,189 n.s.	,330 n.s.	,724 n.s.	,770 n.s.	,223 n.s.	,888 n.s.	,879 n.s.	,728 n.s.	,965 n.s.	,913 n.s.	,225 n.s.
NSL-per-A	r_s	,216	,225	,199	,201	,016	,203	,209	,304	,007	,128	-,143	,314	,447	-,394	,191	,079
	p	,181 n.s.	,164 n.s.	,219 n.s.	,212 n.s.	,921 n.s.	,210 n.s.	,195 n.s.	,056 n.s.	,964 n.s.	,431 n.s.	,377 n.s.	,049 *	,004 **	,012 *	,238 n.s.	,626 n.s.
NSL-per -B	r_s	,138	,165	,116	,080	,202	-,140	,012	-,144	,101	-,233	,133	,212	,246	,141	-,002	,406
	p	,397 n.s.	,308 n.s.	,477 n.s.	,624 n.s.	,211 n.s.	,389 n.s.	,940 n.s.	,377 n.s.	,353 n.s.	,167 n.s.	,412 n.s.	,189 n.s.	,126 n.s.	,384 n.s.	,989 n.s.	,009 **

5 Diskussion

5.1 Material und Methoden

In dieser retrospektiven Studie wurde mithilfe eines 3D-Verfahrens der pharyngeale Atemweg auf Form- und Volumenänderungen an einer größeren Patientengruppe von insgesamt 80 Männern und Frauen mit Dysgnathien der Angle-Klasse III untersucht und mit Veränderungen der ossären Gesichtsstrukturen nach uni- oder bimaxillärer Umstellungsosteotomie in Zusammenhang gebracht.

Die Probanden wurden hinsichtlich der Operationsart in 2 Kategorien mit prä- und postoperativen DVT-Aufnahmen von jeweils 40 Patienten unterteilt: Patienten, bei denen eine unimaxilläre Osteotomie durchgeführt wurde (Gruppe 1) und Patienten, bei denen eine bimaxilläre Osteotomie durchgeführt wurde (Gruppe 2).

Die vorliegende Studie sollte klären, wie sich das PAS-Volumen bei bimaxillärer bzw. unimaxillärer Umstellungsosteotomie verändert.

5.1.1 Patientengut

Es konnte eine große und ausgeglichene Zahl an Probanden mit Dysgnathien der Angle-Klasse III verglichen werden. Ausgewählt wurden nur Patienten, bei denen kraniofaziale Syndrome, Lippenkiefergaumenspalten und faciale Asymmetrien ausgeschlossen werden konnten. Es wurde bereits belegt, dass Änderungen in der kranio-zervikalen Inklination Änderungen der PAS-Morphologie nach sich ziehen (Muto und Takeda et al. 2002). Aus diesem Grund wurde die Überlagerung der Wirbelsäule nach dem Matching des prä- und postoperativen Bildes für diese Studie zur Orientierung gewählt. Bei nicht eindeutiger Überlagerung der prä- und postoperativen Aufnahmen wurden auch diese Daten von der Studie ausgeschlossen.

5.1.2 Bildgebung

Zur Untersuchung des PAS als räumliches Objekt wurden dreidimensionale Bilder aus den vorliegenden DVT-Daten generiert.

Die digitale Volumetomographie ist in der Hals-, Nasen-, Ohrenheilkunde, in der Mund-, Kiefer-, Gesichtschirurgie sowie in der Kieferorthopädie und in der Zahnmedizin mittlerweile weit verbreitet.

Die Vorteile im Vergleich mit dem konventionellen Computertomografen (CT) sind sowohl eine geringere Strahlungs dosis verbunden mit einer kürzeren Scanzeit als auch geringere Kosten für qualitativ hochwertige Bilder (Mah und Danforth et al. 2003; Ludlow und Davies-Ludlow et al. 2006; Palomo und Rao et al. 2008).

Aus diesen Gründen war die Generierung der 3D-Modelle aus den vorhandenen DVT-Scans für diese Studie ein geeignetes Mittel. Zudem gilt die dreidimensionale PAS-Analyse anhand von DVT mittlerweile als eine sehr präzise und zuverlässige Untersuchungsmethode (Tso und Lee et al. 2009; El und Palomo 2010; Guijarro-Martinez und Swennen 2011).

Die hohe Reliabilität und Genauigkeit der dreidimensionalen Darstellung des PAS wurde bereits durch mehrere Studien belegt:

Ein den Weichgeweben ähnliches Phantommodell diente zum Vergleich von Messungen an Luft, Wasser und Weichgeweben eines DVTs mit denen eines Mehrschicht-CTs. Eine erhebliche Übereinstimmung mit dem tatsächlichen PAS-Volumen zugunsten des DVTs wurde festgestellt (Yamashina und Tanimoto et al. 2008).

Ein luftgefülltes Acrylmodell des PAS wurde von Ghoneima und Kula mittels einer Pipette mit Wasser aus einem Messbecher gefüllt und das Volumen dadurch manuell ausgemessen. Nach Positionierung dieses Modells in ein Skelettmodell des menschlichen Schädels und zusätzlicher Volumenmessung mittels DVT konnten die manuell gemessenen Werte mit denen des DVTs verglichen werden.

Manuelle und DVT-Messungen an einem von Wasser umgebenden und von Luft gefüllten Kunststoff-PAS-Modell führten Schendel und Hatcher durch.

Die Messergebnisse im jeweiligen Vergleich waren in beiden Fällen nahezu identisch. (Schendel und Hatcher 2010; Ghoneima und Kula 2011)

Trotz der Vorteile der ethischen Unbedenklichkeit und der Durchführbarkeit der Untersuchung bereits vorhandener Daten sowie des Kostenfaktors weisen retrospektive Studien auch Nachteile auf. So wurden zum Beispiel während der DVT-Aufnahme die Patienten nicht explizit auf die wiederholt gleiche Haltung des Kopfes und eine korrekte entspannte Lage der Zunge hingewiesen. Muto et al. zeigten bereits im Jahr 2002 auf, dass die Kopfhaltung starken Einfluss auf die Form des PAS hat (Muto und Takeda et al. 2002).

Der potentielle Einfluss der Kopfhaltung auf die Untersuchungsergebnisse konnte für diese Studie mittels einheitlicher Ausrichtung des Patientenkopfes durch die Kopfstütze, das Überlagern der 3D-Bilder und die Kontrolle der überlagerten Wirbel in der sagittalen DVT-Ansicht maßgeblich beeinflusst werden. Nach Vergleich der prä- und postoperativen Bilder wurden Probanden mit ungenauer Kopfhaltung und ungenau matchbaren Bildern von der Studie ausgeschlossen. (vgl. Kapitel 3.2.4)

Während der DVT-Aufnahme verweilen Patienten nicht in einer Phase der In- oder Expiration, sondern setzen ihre Atmung stetig fort. Das PAS-Modell, an dem die Untersuchungen durchgeführt wurden, war nur eine Momentaufnahme eines sich während der verschiedenen Atemphasen dynamisch bewegenden PAS (Bhattacharyya und Blake et al. 2000; Abbott und Donnelly et al. 2004; Kyung und Park et al. 2005). Weil in der Scan-Zeit von 8,5s sowohl Inspiration als auch Expiration stattfinden, können die Volumen der prä- und postoperativen Aufnahmen jeweils als Durchschnittswert angenommen werden (Hernandez-Alfaro und Guijarro-Martinez et al. 2011).

Für die kephalometrische Auswertung wurden Fernröntgenseitenbilder aus den vorhandenen DVT-Daten generiert. Dass diese keine signifikanten Unterschiede in Genauigkeit und Reliabilität der linearen und angularen Messungen zu einem konventionell aufgenommenen FRS darstellen, wurde bereits durch mehrere Studien bewiesen. Van Vlijmen et al. verwendeten hierzu menschliche Schädelmodelle, während Oz et al. und Zamora et al. die linearen Strecken und Winkel anhand konventioneller

2D-FRS-Aufnahmen und rekonstruierter Bilder aus 3D-DVT-Aufnahmen von Patienten verglichen. Beide Methoden zeigten keine signifikanten Unterschiede auf; van Vlijmen et al. belegten sogar eine bessere Reproduzierbarkeit der DVT-basierten Bilder als bei den konventionell erstellten FRS-Bildern. (van Vlijmen und Berge et al. 2009; Oz und Orhan et al. 2011; Zamora und Llamas et al. 2011)

Aufgrund dieser Ergebnisse konnte auf unnötige Strahlenexposition durch weitere separate bildgebende Verfahren verzichtet werden.

5.1.3 Analyse

Mit einer für diese Studie durchgeführten Reliabilitätsprüfung und Ermittlung des Methodenfehlers nach Dahlberg, bei der im Vergleich aller Ergebnisse aus dieser Studie sowohl für das Volumen als auch für die Form und die Kephalometrie eine hohe Reliabilität belegt wurde, konnte sich mit den in Kapitel 5.1.2 aufgeführten Ergebnissen den sehr genauen Messergebnissen von Yamashina et al., Schendel und Hatcher und Ghoneima und Kula angeschlossen werden (Yamashina und Tanimoto et al. 2008; Schendel und Hatcher 2010; Ghoneima und Kula 2011).

Eine hohe Reliabilität für das Matching zeigen Tabelle 6 und Tabelle 7: Die Methodenfehler der Reliabilitätsprüfungen für alle dreidimensionalen Messungen beruhen primär auf den manuell bestimmten Schnittebenen und dem Matching und sind überwiegend deutlich kleiner als 3,2% des Durchschnittsmessergebnisses, welches wie folgt generiert wurde:

Zur Vermessung von Form und Volumen des PAS wurde das präoperative Modell zunächst in Anlehnung an die von Kim et al. beschriebenen Begrenzungen in 2 Teile (SAS und IAS) gegliedert (Kim und Hong et al. 2010) und daraufhin mit dem postoperativen Modell überlagert (=Matching), um die Schnittebenen auf die überlagerten Modelle zu übertragen. Zum Matching dienten drei definierte, in allen drei Raumebenen möglichst weit voneinander entfernte Markierungspunkte: Basion, Sutura frontozygomata links und Sutura frontozygomata rechts, welche in von der OP nicht veränderten knöchernen Abschnitten liegen. Diese vom Programm mindestens benötigte Anzahl von drei Markie-

zungspunkten wurde nicht erhöht, da das System bei Ungenauigkeiten selbstständig zwischen den manuell gesetzten Punkten ausmittelt. In eigenen Pilotstudien zeigten sich ungenauere Ergebnisse, je mehr Punkte bestimmt wurden.

Als Orientierungspunkte für die Höhe der Schnittebenen, welche parallel zur Frankfurter Horizontale verlaufen, dienten die Spina nasalis posterior (PNS) als oberer Markierungspunkt für die Begrenzungsebene des PAS, der posteriorste und inferiorste Punkt des Velum palatinum (SP) als Kennzeichnung für die Schnittebene zwischen SAS und IAS und die Spitze der Epiglottis (Ep) als unterer Orientierungspunkt für die Begrenzung.

Obgleich der Punkt PNS durch die LeFort-I-Osteotomie bei einer bimaxillären Umstellungsosteotomie zwischen prä- und postoperativer Höhe variieren kann und auch in der kephalometrischen Analyse eine signifikante Veränderung der Oberkieferneigung festgestellt wurde, konnte diese als Orientierungspunkt genutzt werden. Durch das präzise Matching der Aufnahmen konnten die Schnittebenen von den präoperativen für die postoperativen PAS-Modelle übernommen werden.

Ebenso wurden Variationen der Schnittebenen durch die Mobilität des weichen Gaumens und der Epiglottis mithilfe dieses Verfahrens umgangen.

Unter zu Hilfenahme der Querschnittsflächen auf Höhe definierter und zwischen prä- und postoperativen Bildern in Übereinstimmung gebrachter Schnittebenen im 3D-Modell wurde ein fundierter Vergleich der Volumen- und Formveränderungen ermöglicht.

Im Gegensatz zu Kim et al. wurde in dieser Arbeit der PAS unterhalb der Ebene A (Höhe der Spina nasalis posterior) beurteilt, da eigene Pilotstudien ein gehäuftes Auftreten von differierendem Volumen im kranialsten Teil des PAS (oberhalb des Punktes PNS bis zum Dach des PAS) zwischen prä- und postoperativen Aufnahmen sowohl an unimaxillär als auch an bimaxillär operierten Modellen zeigten. In vielen Fällen – sowohl prä- als auch postoperativ – wurden die luftgefüllten Räume in den

Recessi pharyngei (hinter dem Torus tubarius) durch das Programm nicht korrekt dargestellt (Abbildung 18).

Um Messfehler und ungenaue Ergebnisse durch unklare Abgrenzungen in den komplexen Bereichen der Recessi pharyngei auszuschließen, wurde der von Kim et al. „superior pharyngeal airway“ genannte Teil in der vorliegenden Studie unberücksichtigt gelassen. Die Messungen beziehen sich auf die unteren Segmente des PAS, welche dem „middle“ und „inferior pharyngeal airway“ von Kim et al. entsprechen, hier SAS und IAS. (Kim und Hong et al. 2010)

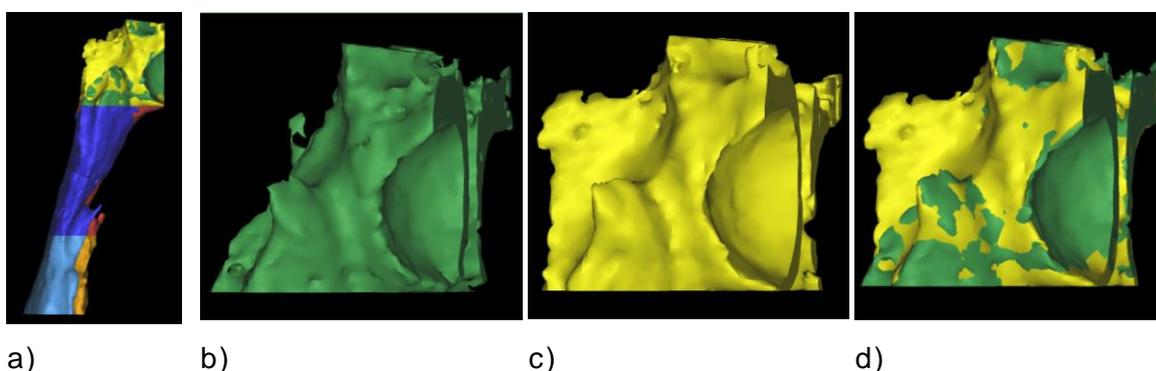


Abbildung 18: Differenzen in der Darstellung der Recessi pharyngei

Beispiel eines durch das Programm unterschiedlich identifizierten und dargestellten luftgefüllten Raumes in den Recessi pharyngei. a) gesamtes PAS-Modell prä- und postoperativ überlagert (grün, dunkel- und hellblau=prä-OP; gelb, orange und rot=post-OP); b) prä-operativer Ausschnitt des oberen PAS oberhalb der Spina nasalis posterior, c) post-operativer Ausschnitt des PAS, d) prä- und postoperativer Ausschnitt des PAS überlagert.

(Quelle: Screenshots von 3D-Darstellungen in Mimics® aus dem untersuchten Patientengut, bearbeitet mit der Software Microsoft Word 2010)

Alves et al. untersuchten in einer Studie die Genauigkeit der Darstellung des PAS. Sie belegten, dass das abgebildete Volumen des PAS stark abhängig ist von den Grenzwerten, die für das „Thresholding“ (= farblisches Markieren festgelegter Grauwerte, um diesen Teil des DVT in ein 3D-Modell umrechnen zu lassen und von den umgebenden Strukturen segmentieren zu können) verwendet wurden. Sie zeigten auf, dass durch

höhere Grenzwerte das Volumen des PAS in andere Regionen übergang, deren Graustufen nicht sehr weit von denen der Luft abweichen. (Alves und Baratieri et al. 2012) Auch El und Palomo belegten in einer Studie zum Vergleich der Reliabilität und Genauigkeit von drei verschiedenen DICOM-Geräten zur dreidimensionalen Vermessung des pharyngealen Atemweges diese Schwierigkeiten durch Thresholding vor allem im nasopharyngealen Teil (El und Palomo 2010).

In der Studie von Alves et al. wurde mit verschiedenen Threshold-Einstellungen an einem Modell aus Kunststoffharz der luftgefüllte Raum gemessen und manuelle Kontrollen mit einer Mikropipette und Wasser durchgeführt. Sie schlussfolgerten, dass eine standardisierte Einstellung für eine Software festgelegt werden sollte, da verschiedene Thresholds unterschiedliche Ergebnisse für das Volumen hervorrufen können und somit der Vergleich verschiedener Studien - obwohl der PAS in ein und derselben Weise abgegrenzt wurde - wertlos sei. (Alves und Baratieri et al. 2012)

Auch zweifelte die Arbeitsgruppe um Alves et al. die Art der Segmentierung an. Durch automatische Segmentierungsvorgänge, die nicht Schicht für Schicht durchgeführt wurden wie bei der manuellen Segmentierung, sei die komplexe Anatomie des PAS mit seinen gewundenen Gängen und schmalen Recessi pharyngei nicht so korrekt abzugrenzen wie bei manueller Handhabung. (Alves und Baratieri et al. 2012)

Eine höhere Aufnahmequalität könnte laut El und Palomo eine deutlich exaktere Abgrenzung ermöglichen. Dies würde für den Patienten allerdings eine erhöhte Strahlenbelastung bedeuten oder für den Forscher bei einer manuellen Segmentation einen stark erhöhten Zeitaufwand (ca. 12x länger) und wäre für den alltäglichen klinischen Gebrauch und für Studien mit großen Testgruppen zu langwierig (El und Palomo 2010).

Jakobsone et al. stellten in ihrer (CT-basierten) Studie, bei der sie sich an der Einteilung von Lowe et al. orientierten fest, dass sie trotz der gleichen Wahl der PAS-Einteilung signifikant unterschiedliche Ergebnisse für das Volumen des PAS erhielten. Sie begründen die Diskrepanzen ebenfalls mit der Art der Segmentierung, da sie die Grenzen automatisch errechnen ließen, während Lowe et al. alle Grenzen manuell fest-

gelegt hatten. (Lowe und Fleetham et al. 1995; Jakobsone und Neimane et al. 2010)

Für die kephalometrischen Parameter ML-NL und NSL-per-B lassen sich die relativ hoch erscheinenden Abweichungen des Messfehlers in Höhe von 9% beziehungsweise 16,8% des Durchschnittsmessergebnisses im Vergleich zu den anderen ermittelten Messfehlern mit der relativ kleinen Gesamtdistanz erklären. Ein Methodenfehler von 0,7mm der Strecke NSL-per-B hat betragsmäßig bei einer relativ kleineren Distanz (durchschnittliche Gesamtdistanz 4,2mm) höhere Auswirkungen als bei einer längeren Gesamtdistanz (ML-NSL: MF = 1,5mm = 4,6% des Durchschnittsmessergebnisses von 34,4mm), (Tabelle 8).

Diese Fehler spielten in den kephalometrischen Auswertungen der vorliegenden Studie eine eher untergeordnete Rolle, da zur Vermessung der Diskrepanzen zwischen prä- und postoperativem Bild die Acetatfolien übereinandergelegt und die gesetzten Punkte durch einen Untersucher manuell kontrolliert und angeglichen wurden. Im Gegensatz zur Reliabilitätsprüfung für die Kephalmetrie, bei der zwei separate Messungen durchgeführt wurden, konnten die durch diese Art der Messung entstandenen Fehlerwerte in den Untersuchungen vermieden werden.

5.2 Ergebnisse

Trotz des geringen Methodenfehlers und Anlehnung der Messmethoden an vorherige Untersuchungen sind die Ergebnisse dieser Studie zur Beurteilung der oberen Atemwege mit denen anderer Autoren nur eingeschränkt vergleichbar (vgl. Kim und Hong et al. 2010).

Bislang gibt es keine Normen zur Vereinheitlichung der Gliederung des PAS. So teilten Grauer et al. den gesamten oberen Atemweg in nur 2 Abschnitte, Jakobsone et al. teilten den PAS in 3 Bereiche (Naso-, Oro- und Hypopharynx) und Lenza et al. teilten ihn in 5 Segmente. Abramson et al. und Alves et al. befundeten den PAS erst ab unterhalb des Punktes Spina nasalis posterior. (Grauer und Cevidanes et al. 2009;

Abramson und Susarla et al. 2010; Jakobson und Neimane et al. 2010; Lenza und Lenza et al. 2010; Alves und Franzotti et al. 2012)

Die vorliegende Studie orientierte sich an den Vorgaben von Kim et al., da die von ihnen gewählten Punkte für die Orientierung der Schnittebenen am eindeutigsten zu reproduzieren sind (vgl. Kapitel 5.2.1). Dabei wurden jedoch nur zwei Bereiche des PAS in die Auswertung einbezogen (SAS unterhalb des Punktes Spina nasalis posterior und IAS zwischen dem weichen Gaumen und der Epiglottisspitze) anstatt der vier Bereiche von Kim et al. (Nasal airway, superior, middle und inferior pharyngeal airway). (Kim und Hong et al. 2010)

Weiterhin gibt es Unterschiede durch die Lagerung des Patienten während der Aufnahme des zu analysierenden Bildes. In Rückenlage scheint der PAS generell schmaler zu sein. Battagel et al. begründen dieses mit der Schwerkraft, welche die den PAS umgebenden weichgewebigen Strukturen (v.a. den weichen Gaumen und die Zunge) nach dorsal fallen lasse (Battagel und Johal et al. 2002). Kim et al. sahen allerdings einen Vorteil in der liegenden Position zur Diagnostik des obstruktiven Schlafapnoesyndroms, da diese Position der Schlafposition am ehesten gleicht (Kim und Hong et al. 2010).

So erschwerte zusätzlich der Unterschied zwischen CT-Aufnahmen, die am liegenden Patienten durchgeführt wurden und DVT-Bildern von Patienten in aufrechter Position eine direkte Gegenüberstellung (vgl. Jakobson und Neimane et al. 2010; Hong und Park et al. 2011; Park und Kim et al. 2012).

5.2.1 Dreidimensionale Untersuchung

Bei dem unimaxillären Operationsverfahren wurde die Mandibula nach dorsal verlagert, während die Maxilla in ihrer Position nicht verändert wurde. Dennoch war der anteroposteriore Durchmesser auf Höhe der Spina nasalis posterior (AP_A) nach der OP bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,1% höchstsignifikant größer. Ebenso zeigte die Querschnittsfläche in dieser Ebene mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von

5% eine signifikante Vergrößerung. Mit einer leichten Vergrößerung der lateralen Ausdehnung zeichnete sich eine signifikante Erhöhung des Verhältnisses von lateralem zu sagittalem Durchmesser auf Höhe der Spina nasalis posterior (LAR_A) ab. Die vorliegenden Studienergebnisse stehen im Kontrast zu Resultaten der Untersuchung von Park und Kim et al., welche anhand der Daten von 20 Patienten Verringerungen auf allen Ebenen sowohl in der Größe des Querschnitts als auch in der anteroposterioren und lateralen Ausdehnung aufzeigten (Park und Kim et al. 2012).

Die weiteren Resultate dieser Studie stehen im Einklang mit früheren 3D-Untersuchungen anderer. Diese schilderten überwiegend signifikante Abnahmen der anteroposterioren und lateralen Ausdehnungen und der Querschnittsflächen, gemessen inferior der Spina nasalis posterior auf Höhe des weichen Gaumens beziehungsweise des Atlaswirbels und kaudalwärts (Kawamata und Fujishita et al. 2000; Degerliyurt und Ueki et al. 2008; Park und Kim et al. 2012). Ebenso verringerte sich der Querschnitt auf Höhe der geringsten anteroposterioren Ausdehnung (SCSA). Diese Reduktion kann das Resultat nachlassender Spannung der Gewebe durch Rückverlagerung des Unterkiefers sein, da Mandibula, Radix Linguae, Hyoid und Pharynxwand durch ihre Muskeln und Ligamente eng miteinander verbunden sind (Degerliyurt und Ueki et al. 2009; Hong und Park et al. 2011). Der Zug an der Pharynxwand und damit dessen Aufspannung können vermindert werden.

Die volumetrische Analyse des PAS in dieser Studie ergab zwar eine Abnahme des Gesamtvolumens des PAS. Trotzdem zeigten weder Gesamtvolumen noch die Einzelvolumen eine Signifikanz in der Volumenänderung. Park und Kim et al. ermittelten im Vergleich eine signifikante Reduktion sowohl des totalen als auch der Einzelvolumen des von ihnen beurteilten Oro- und Hypopharynx (Park und Kim et al. 2012).

Nach der bimaxillären Umstellungsosteotomie, bei der die Maxilla vorverlagert und die Mandibula zurückverlagert wurde, konnte eine statistisch signifikante Vergrößerung der anteroposterioren Weite des PAS auf Höhe der Spina nasalis posterior (AP_A) mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% festgestellt werden. Dieses Ergebnis deckt sich mit den

Resultaten bereits vorhandener Studien, welche mit anderen Untersuchungsmethoden wie der reinen zweidimensionalen Auswertung am FRS oder dreidimensional CT-basiert durchgeführt wurden (Turnbull und Battagel 2000; Samman und Tang et al. 2002; Chen und Terada et al. 2007; Jakobsone und Neimane et al. 2010). Lee und Chun et al. belegten allerdings in ihrer dreidimensionalen Studie an DVT-Daten auf keiner der kontrollierten Ebenen statistisch signifikante Änderungen in der anteroposterioren oder lateralen Ausdehnung (Lee und Chun et al. 2012).

Der anteroposteriore Durchmesser auf Höhe des kaudalen Randes des Velum palatinum (AP_B) zeigte nahezu keine Veränderungen, während sich der anteroposteriore Durchmesser auf Höhe der Epiglottisspitze (AP_C) verringerte. Allerdings blieb die Differenz knapp unterhalb des Signifikanzniveaus. Der laterale Durchmesser veränderte sich in allen Ebenen nicht signifikant. Das Verhältnis der größten lateralen Ausdehnung zur medianen anteroposterioren Ausdehnung (LAR) veränderte sich in Dependenz zur anteroposterioren Umformung: LAR zeigte auf Höhe der Spina nasalis posterior (LAR_A) eine signifikante Verringerung, auf Höhe der Epiglottisspitze (LAR_C) eine signifikante Vergrößerung und blieb auf Höhe des kaudalen Randes des Velum palatinum (LAR_B) annähernd konstant. Auch andere Arbeitsgruppen belegten in vorhergehenden Studien, dass die Formveränderungen des PAS nach bimaxillären Osteotomien hauptsächlich auf Änderungen in anteroposteriorer Richtung beruhten und sich die laterale Ausdehnung kaum veränderte. (Degerliyurt und Ueki et al. 2008; Degerliyurt und Ueki et al. 2009; Lee und Chun et al. 2012)

Der Pharynx ist ein Muskelschlauch. Durch die bimaxilläre Osteotomie wurden der Querschnitt und die anteroposteriore Ausdehnung des Pharynx auf Höhe der Spina nasalis posterior (Ebene A) signifikant verändert. Obwohl bei einer unimaxillären Rückverlagerung des Unterkiefers auf Höhe der Spina nasalis posterior keine operativen Maßnahmen stattgefunden haben, vergrößerten sich der Querschnitt und die laterale Ausdehnung des Pharynx in dieser Ebene postoperativ ebenfalls signifikant. Es ist anzunehmen, dass das Gewebe, welches sich weiter kaudal

auf Höhe des Unterkiefers befindet, durch dessen Rückverlagerung verdrängt wird. Der PAS kann sich aufgrund des umgebenden Muskelgewebes sowie der Wirbelsäule schwer ausdehnen. Auf Höhe der Spina nasalis posterior befindet der weiche Gaumen und der Mundraum, das Gewebe kann hier nach anterior ausweichen.

Wenngleich die Querschnittsfläche bei den bimaxillär operierten Patienten auf Höhe der Spina nasalis posterior (Ebene A) zunahm und auf Höhe der Epiglottisspitze (Ebene C) abnahm, während die Fläche auf Höhe des kaudalen Randes des Velum palatinum (Ebene B) und auf Höhe der geringsten anteroposterioren Ausdehnung (SCSA) praktisch keine Modifikation aufwies, zeigten diese Ergebnisse in Übereinstimmung mit weiteren Studien keine Signifikanz (Degerliyurt und Ueki et al. 2008; Jakobson und Neimane et al. 2010).

Die Auswertung des Gesamtvolumens des PAS der bimaxillär behandelten Patienten ergab keine signifikanten Änderungen zwischen der ersten und der zweiten Aufnahme, obwohl ein deutlicher, aber nichtsignifikanter Anstieg des oberen Teils des PAS (SAS) gemessen wurde. Der inferiore Teil des PAS (IAS) zeigt nur eine geringe Volumenminderung. Jakobson et al. stellten ebenfalls im Gesamtbild keine signifikante Volumenänderung dar. Jedoch ermittelten sie in ihrer Untersuchung in dem der vorliegenden Studie entsprechenden oberen und unteren Teil, Jakobsones mittleren Part des PAS (Oropharynx, zwischen Spina nasalis posterior und Epiglottisspitze) eine signifikante Volumenzunahme. (Jakobson und Neimane et al. 2010) Lee et al. dokumentierten eine signifikante Abnahme in deren unteren Teil (zwischen anteriorstem und inferiorstem Punkt der Wirbel C1 und C3), während das Gesamtvolumen stabil blieb (Lee und Chun et al. 2012). Park et al. belegten dagegen eine signifikante Abnahme des mittleren Pharynxvolumens, welches in etwa dem in dieser Studie verwendeten SAS entspricht. Sie gingen davon aus, dass sich der weiche Gaumen ausgedehnt und die Zunge den Oropharynx verlegt haben könnte, um damit die oropharyngeale Abdichtung zu erhalten (Park und Kim et al. 2012 zitiert nach Schendel und Oeschlaeger et al. 1979).

Ein Grund für unterschiedliche Studienergebnisse kann das Ausmaß des mandibulären Advancements und des maxillären Setbacks sein. Lee et al. und Park et al. beschrieben in ihren Studien eine deutlich größere Strecke der Unterkieferrückverlagerung ($9,2\pm 4,6\text{mm}$ und $7,18\pm 3,42\text{mm}$), während der Oberkiefer um durchschnittlich $2,05\pm 2,07$ und $4,21\pm 1,72$ vorverlagert wurde (Lee und Chun et al. 2012; Park und Kim et al. 2012). Auch Jakobson et al. belegten, dass die Unterkieferrückverlagerung größer war als die Oberkiefervorverlagerung ($6,3\pm 3,5\text{mm}$ zu $4,6\pm 1,1\text{mm}$) (Jakobson und Neimane et al. 2010). Unterdessen konnten in der vorliegenden Untersuchung beinahe übereinstimmende Verlagerungsdistanzen beider Kiefer verzeichnet werden. Die Maxilla wurde um durchschnittlich $4,59\pm 1,72\text{mm}$ verlagert, die Mandibula um $4,96\pm 3,66\text{mm}$.

Ein Vergleich verschiedener Studien mit der vorliegenden sollte nicht unberücksichtigt lassen, dass die Anzahl der ausgewerteten Probanden (in der vorliegenden Studie wurden 40, in den Studien von Jakobson und Neimane et al. (2010) 10, Park und Kim et al. (2012) 16 und Lee und Chun et al. (2012) 21 bimaxillär therapierte Patientendaten untersucht) und die Festlegung der Grenzen zur Einteilung des PAS eine große Rolle spielen. Je kleiner die Probandenzahl, desto mehr Gewicht bekommen Ausreißer in der Auswertung. Für die Schnittebenen war in der vorliegenden Studie die obere Grenze auf Höhe der Spina nasalis posterior gelegt, der kaudale Rand des Velum palatinum gab den Schnittpunkt zwischen dem superioren und inferioren Teil des PAS vor, der untere Abschnitt endete auf Höhe der Epiglottisspitze. Bei Jakobson et al. dagegen reichte der mittlere Teil des PAS von der Spina nasalis posterior bis zur Epiglottisspitze, entsprechend dem gesamten PAS in der vorliegenden Studie (Jakobson und Neimane et al. 2010). Lee et al. und Park et al. nutzten als charakteristische Punkte für die Schnittebenen die oberen Wirbel der Halswirbelsäule, sodass etwa der anteriorste und inferiorste Punkt des Atlas die Obergrenze des Oropharynx bestimmte (Lee und Chun et al. 2012; Park und Kim et al. 2012). Dadurch konnte das Velum palatinum sowohl in den oberen als auch in den mittleren PAS-Abschnitt ragen und zu Messfehlern führen. Für die vorlie-

gende Studie wurde entschieden, die Ebenen anhand eindeutiger, unter physiologischen Bedingungen nicht veränderbarer Parameter einzuteilen, weil bei Orientierung anhand von Wirbelvorsprüngen die Möglichkeit besteht, dass diese durch leichte Drehung oder Beugung des Patientenhalses während der Aufnahme in nicht vergleichbarer Position liegen (vgl. Kapitel 3.2.4).

5.2.2 Kephalemtrische Auswertung

Zur Darstellung des operativen Ausmaßes der Verlagerung des Unterkiefers beziehungsweise des Ober- und Unterkiefers wurden prä- und postoperative kephalemtrische Auswertungen verglichen.

Bei einer durchschnittlichen Rückverlagerung des Unterkiefers um 4,3mm während der unimaxillären Operationsverfahren wurde mit einer Verkleinerung des SNB von 2,3° im Schnitt eine Vergrößerung des ANB um durchschnittlich 2,3°, des ANB-iANB um 2,5° und des Wits-Wertes um 4,3mm erreicht. In dieser Patientengruppe ist eine signifikante Minderung der Unterkieferneigung um $1,21 \pm 2,65^\circ$ nach dem Eingriff erkennbar, mit der ebenfalls der Basiswinkel um $1,21 \pm 2,65^\circ$ verringert wurde.

Bei einer durchschnittlichen Anteriorverlagerung des Oberkiefers um 4,6mm und Posteriorverlagerung des Unterkiefers um 5,0mm während einer bimaxillären Umstellungsosteotomie vergrößerte sich SNA um durchschnittlich 4,3°, SNB verringerte sich im Mittel um 3°. Somit konnte eine durchschnittliche Zunahme des ANB um 7,3°, des ANB-iANB um 5,7° und des Wits-Wertes um 8,2mm verzeichnet werden.

Lee et al. gaben an, dass neben den sagittalen Veränderungen auch die vertikalen Veränderungen wie zum Beispiel die Inklination der Kieferbasen eine weitere entscheidende Rolle für die metrischen und volumetrischen Veränderungen des PAS spielen. Sie führten eine stufenweise multiple Regressionsanalyse durch und stellten fest, dass der inferiore Teil des PAS-Volumens umso mehr abnahm, je weiter die Spina nasalis

posterior nach kranial verlagert wurde. In ihrer Studie war eine deutliche kraniale Verschiebung der Spina nasalis posterior von durchschnittlich $5,27 \pm 2,58$ mm ersichtlich (Lee und Chun et al. 2012), während in der vorliegenden Studie eine etwas geringere, dennoch signifikante Zunahme der Inklination des Oberkiefers in Relation zur Schädelbasis durch die bimaxilläre Osteotomie festgestellt wurde ($NL-NSL=1,9^\circ \pm 2,88^\circ$, Retroinklination). Die Unterkieferneigung in Relation zur Schädelbasis (ML-NL) nahm um durchschnittlich $2,7 \pm 5,19^\circ$ signifikant ab. Ebenfalls verkleinerte sich der Basiswinkel (ML-NSL) um $0,79 \pm 3,87^\circ$, blieb jedoch unterhalb des Signifikanzniveaus.

Trotz einiger o.g. signifikanter Veränderungen konnten mittels Spearman-Test für bivariate Korrelationen keine klinisch relevanten Korrelationen zwischen Veränderungen der vertikalen Parameter des Gesichtschädels und den prä- und postoperativen metrischen und volumetrischen Größenunterschieden des PAS nachgewiesen werden. Auch die sagittalen Parameter erreichten den Korrelationskoeffizienten $r_s > 0,7$ nicht, obwohl positive Korrelationen, ebenso wie in der Studie von Kawamata et al. über Zusammenhänge der Unterkieferrückverlagerung mit der Morphologie des PAS bei unimaxillären Osteotomien, festgestellt wurden (Kawamata und Fujishita et al. 2000).

Im Vergleich der vorliegenden Studie mit der Studie von Lee und Chun et al. (2012), bei der die Daten von 21 Patienten untersucht wurden, könnten demnach also auch die Anzahl der Probanden und das Ausmaß der Operation starken Einfluss auf das Untersuchungsergebnis genommen haben. Je kleiner die randomisiert ausgewählte Patientengruppe, desto größer die Möglichkeit eines deutlich größeren oder kleineren OP-Ausmaßes sowohl in sagittaler als auch in vertikaler Richtung und die Beeinflussung der Ergebnisse durch Ausreißer.

5.2.3 Fazit

Diese Studie unterstützt die Theorie von Samman et al., Chen et al. und Degerliyurt et al., dass sich durch eine bimaxilläre Umstellungsosteoto-

mie die pharyngealen Maße (anteroposteriorer Durchmesser, transversale Breite und Querschnittsfläche) weniger verändern als bei einem unimaxillären Verfahren, da sich der Effekt der Rückverlagerung des Unterkiefers bei gleichzeitiger Vorverlagerung des Oberkiefers auf den PAS mindert (Samman und Tang et al. 2002; Chen und Terada et al. 2007; Degerliyurt und Ueki et al. 2008). In der Gruppe bimaxillär operierter Patienten (Gruppe 2) sind signifikante Änderungen in Volumen, anteroposteriorem Durchmesser, transversaler Breite und Querschnittsfläche nur im Zusammenhang mit der Vergrößerung der anteroposterioren Ausdehnung auf Höhe der Spina nasalis posterior (Ebene A) zu verzeichnen, während sich in der Gruppe unimaxillär operierter Patienten (Gruppe 1) nicht nur die Querschnittsfläche und der anteroposteriore Durchmesser auf Höhe der Spina nasalis posterior (Ebene A) vergrößern, sondern auch die Querschnittsfläche (CSA_B), der anteroposteriore Durchmesser (AP_B) und die transversale Breite (LA_B) auf Höhe des kaudalen Randes des Velum palatinum sowie die laterale Breite (LA_C) auf Höhe der Epiglottisspitze signifikant verkleinern. Das Gesamtvolumen des PAS in Gruppe 1 nahm deutlich, wenn auch nicht signifikant ab. Besonders herauszustellen ist, dass sich in dieser Gruppe auch der Querschnitt auf Höhe der geringsten anteroposterioren Ausdehnung (SCSA) signifikant verkleinerte. Es kann also aufgrund der Verkleinerung der engsten Stelle des PAS, die die Luft bei der Atmung passieren muss, ebenso wie Samman et al. dokumentieren, angenommen werden, dass das Risiko zur Entstehung eines OSAS bei einer unimaxillären Behandlung gegenüber der bimaxillären Osteotomie (ohne signifikante Veränderungen der geringsten anteroposterioren Ausdehnung) erhöht ist (Samman und Tang et al. 2002). Somit können diese Ergebnisse dieser Studie die Empfehlung der Forschungsgruppen um Chen et al. und Degerliyurt et al. unterstützen, dem unimaxillären Verfahren ein bimaxilläres vorzuziehen (Chen und Terada et al. 2007; Degerliyurt und Ueki et al. 2008).

Ob der Vorteil einer bimaxillären Umstellungsosteotomie gegenüber einer unimaxillären Behandlung die größeren Risiken und Belastungen einer bimaxillären Osteotomie kompensiert, kann zu diesem Zeitpunkt

und mit den vorliegenden Untersuchungsergebnissen nicht beurteilt werden.

Als Risiken sollten zum Beispiel ein erweitertes OP-Feld mit größeren Wundflächen und erhöhter Infektionsgefahr, größerer Gefahr einer Nervenschädigung, längerer Operationsdauer und somit Narkosezeit, unter anderem verbunden mit einer höheren Belastung für Herz, Lungen und Nieren, in Betracht gezogen werden. Es kann durch den Vergleich mit anderen Studien (Jakobson und Neimane et al. 2010; Lee und Chun et al. 2012; Park und Kim et al. 2012) angenommen werden, dass die Dimensionen der Oberkieferverlagerung im Verhältnis zur Unterkieferverlagerung die Änderungen der metrischen und volumetrischen Parameter des PAS maßgeblich beeinflussen.

Signifikante Ergebnisse einiger Variablenpaare zeigen sowohl in Gruppe 1 - unimaxillär operierte Patienten - als auch in Gruppe 2 - bimaxillär operierte Patienten - (Kapitel 4.4), dass mit hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden kann, dass es bei diesen Paaren in der Grundgesamtheit einen Zusammenhang gibt, dieser aber für die klinische Forschung keine Auswirkung zu haben scheint. Ein Signifikanztest ist stark von der Größe der Stichproben abhängig. Je kleiner die Stichprobe, desto größer muss eine Korrelation sein, um eine Signifikanz aufzuweisen. Es fällt auf, dass in Gruppe 1 doppelt so viele Variablenpaare (30 von 112 = 27%) einen Zusammenhang zwischen 3D- und FRS-Daten aufweisen wie in Gruppe 2 (15 von 160 = 9,5%). Das könnte auf geringere Zusammenhänge des dreidimensionalen PAS mit den kephalometrischen Parametern, also den operativen Veränderungen in Gruppe 2, hinweisen.

Für OSAS können als Ursache zu kleine oder zu stark zurückliegende Ober-/Unterkiefer angeführt werden oder auch eine übersteigerte Entspannung und Erschlaffung der die Atemwege freihaltenden Muskulatur (Stellzig-Eisenhauer und Meyer-Marcotty 2010), welche wiederum bedingt sein kann durch die engen strukturellen Zusammenhänge von Mandibula, Radix Linguae, Hyoid und Pharynxwand durch ihre Muskeln und Ligamente (Degerliyurt und Ueki et al. 2009; Hong und Park et al. 2011). Es kann angenommen werden, dass ein bimaxilläres Verfahren

geringere Risiken für ein OSAS bedeutet. Allerdings sollten als Ursachen für einen Verschluss der oberen Atemwege und somit für die Entscheidung zu einer Therapieform weitere anatomisch bedingte Verengungen der oberen Atemwege in Betracht gezogen werden. Dies sind zum Beispiel hypertrophe Adenoide und Tonsillen, chronische oder allergische Rhinitis, Infektionen, kongenitale Nasendeformationen, Nasentraumen, Polypen, Tumore, sehr große Zungen, viel eingelagertes Fett- oder Bindegewebe in der Region des Atemeingangs. (Stellzig-Eisenhauer und Meyer-Marcotty 2010)

Samman et al. dokumentierten in ihren Untersuchungsergebnissen auch bei unimaxillär operierten Patienten keine klinischen Auswirkungen des Operationsverfahrens auf den PAS. Sie vermuten, dass aufgrund von kompensatorischen Änderungen des weichen Gaumens bei unimaxillär behandelten Patienten selten OSAS auftritt. (Samman und Tang et al. 2002)

Es ist abzuwarten, ob einheitliche Untersuchungsmethoden und Langzeitstudien in dieser Hinsicht Aufschluss geben können.

5.3 Ausblick

Bei dieser retrospektiven Studie konnte kein Einfluss auf den Zeitpunkt der DVT-Aufnahmen genommen werden. Die postoperative Kontrollaufnahme wurde im Schnitt zwischen 5-6 Wochen nach der ersten Aufnahme, also etwa 4-5 Wochen nach der Operation angefertigt. Zu diesem Zeitpunkt sind Schwellungen, Hämatome oder operationsbedingte Weichgewebsirritationen nicht mehr zu erwarten (Li und Riley et al. 2000). Somit konnten die Veränderungen des PAS und der den PAS umgebenden Strukturen einwandfrei beurteilt werden. Trotzdem sollten der Untersuchungszeitraum und die Langzeitstabilität zur Analyse von Studienergebnissen mit in die Betrachtung einfließen.

Wie Lee et al. zeigten, können sich noch ein halbes Jahr postoperativ signifikante Volumenänderungen des PAS ergeben, welche 3 Monate

zuvor noch unterhalb des Signifikanzniveaus lagen. Sie berufen sich auf zurückliegende Erkenntnisse von Athanasiou et al., bei denen sich die Luftwege zunächst verkleinerten und schließlich wieder zunahmen und gingen von einer steten physiologischen Adaptation der Luftwege aus. (Athanasiou und Toutountzakis et al. 1991; Lee und Chun et al. 2012) Andere Autoren hingegen berichteten in ihren - meist zweidimensionalen - Studien von einer langfristigen Stabilität des postoperativen Volumens des PAS: Greco et al. untersuchten den Hypopharynx von 11 unimaxillär operierten Patienten anhand deren FRS bis zu 6 Jahren postoperativ und ermittelten eine dauerhafte Abnahme der Pharynxausdehnung. Auch Chen et al. stellten nur im ersten Untersuchungszeitraum (bis 6 Monate postoperativ) anhand von FRS signifikante Volumenminderungen der Atemwege unimaxillär behandelter Patienten fest, welche sich im weiteren Verlauf der Studie (bis zu 2 Jahre postoperativ) bestätigten. Zusätzlich nahmen sie Analysen an Daten bimaxillär operierter Patienten vor und registrierten nur kurzfristige Änderungen im ersten Untersuchungsintervall (bis 6 Monate postoperativ). In der Langzeitbetrachtung (bis 2 Jahre postoperativ) zeigten sich jedoch keine signifikanten Änderungen mehr. Park et al. beobachteten ebenfalls uni- und bimaxillär operierte Patientengruppen. Allerdings beurteilten sie die Veränderungen anhand von dreidimensionalen DVT-Daten während eines Zeitraums von durchschnittlich 1,4 Jahren. Das Ergebnis deckt sich mit denen der zuvor genannten Autoren: Langfristig konnten sich die verkleinerten Atemwege nicht erholen (Greco und Froberg et al. 1990; Chen und Terada et al. 2007; Park und Kim et al. 2012).

Zusätzlich zu den bereits diskutierten Unterschieden des OP-Ausmaßes, der untersuchten Patientenzahlen und Auswertungsverfahren (s.o.) kommen in den Langzeituntersuchungen Unterschiede der beobachteten Zeiträume zwischen den Aufnahmen hinzu. Es fiel auf, dass die Forschungsgruppe um Lee et al. mit der größten dokumentierten Datenmenge (21 Patienten) und der im Durchschnitt höchsten UK-Rückverlagerungsdistanz bei kleiner OK-Vorverlagerung (UK Ø 9,2mm, OK Ø 2,05mm nach anterior) nach 3 Monaten bei dreidimensionaler Auswertung einen Anstieg des Pharynxvolumens messen konnte, während die Volumen in den anderen Arbeitsgruppen nach diesem Zeitraum

unverändert blieben (Verlagerungsdistanzen: Park et al.: Ø 7,2mm mandibuläres Setback und Ø 4,2mm Maxilläres Advancement, Greco et al. im FRS bei unimaxillärem Verfahren Ø 5,1mm mandibuläres Setback). (Greco und Froberg et al. 1990; Lee und Chun et al. 2012; Park und Kim et al. 2012)

Aufgrund der Strahlenbelastung waren weitere DVT-Aufnahmen zur Langzeituntersuchung nicht vertretbar. Stattdessen könnte für zukünftige Analysen prä- und postoperativ auch mit Polysomnographen gearbeitet werden. Vor allem für Patienten mit vorliegendem obstruktiven Schlafapnoesyndrom (OSAS) dürfte dies eine geeignete Methode sein, um Auswirkungen von Umstellungsosteotomien auf die Schlafqualität herauszufinden.

Die Gewebespannung nimmt im Allgemeinen mit dem Alter ab und somit nehmen das Risiko des Schnarchens und die Gefahr des Erlangens eines OSAS zu. In diesem Zusammenhang könnten vor allem postoperativ Studien nach 10, 20 und 40 Jahren von Interesse sein. Aufgrund der momentan noch relativ hohen Strahlenbelastung liegt eine hinreichende Dokumentation wohl noch in der Zukunft. Zwar besteht die Möglichkeit, weitere Daten von bereits untersuchten Patienten in einigen Jahren zum Beispiel aufgrund von Implantatplanungen mittels DVT zu bekommen, jedoch ist die Chance, diese Daten beurteilen zu können, als eher gering einzustufen, weil genaue Untersuchungshinweise etwa auf OSAS noch nicht formuliert sind.

Stattdessen könnte die Polysomnographie zukünftig in den Vordergrund treten. Im Schlaflabor werden unter physiologischen Bedingungen, also am liegenden Patienten, unter anderem Daten zum Atemfluss erhoben. Allerdings ergeben diese Untersuchungen keinen genauen Aufschluss über die Anatomie des PAS und deren Veränderung.

OSAS und seine Therapiemöglichkeiten sollten zukünftig aus folgendem Grund große Beachtung finden: Sinkt der Sauerstoffgehalt bei einer obstruktiven Schlafapnoe im Blut ab, reagiert das Atemzentrum des Gehirns und löst eine kurze Aufweckreaktion aus, ein sogenanntes „Arousal“. Das führt dazu, dass die Muskeln wieder angespannt und so-

mit die Atemwege geöffnet werden. Folgen dieser gestörten Sauerstoffaufnahme sind nicht nur die mit den Arousals einhergehenden Unterbrechungen der Tiefschlafphasen, sondern dadurch u.a. bedingte erhöhte Tagesschläfrigkeit, Konzentrationsstörungen mit Leistungseinschränkungen sowohl im Alltag als auch im Beruf bis hin zu Depressionen. Ferner versucht der Körper, Sauerstoffmangel durch eine gesteigerte Arbeit des Herzens mit konsekutivem Anstieg des Blutdrucks auszugleichen. Durch diesen Mechanismus steigt das Risiko für einen dauerhaft erhöhten Blutdruck, Herzrhythmusstörungen bis hin zum Herzinfarkt oder Schlaganfall.

Da neben den skelettalen Strukturen für ein OSAS unter anderem auch Übergewicht, neuromuskuläre Störungen und vor allem bei Kindern auch adenotonsilläre Hypertrophie eine Rolle spielen (Stellzig-Eisenhauer und Meyer-Marcotty 2010), sollten diese Symptome bei zukünftigen Untersuchungen, welche den PAS betreffen, möglichst mit berücksichtigt werden.

5.4 Schlussfolgerung

Im Vergleich aller in dieser Studie überprüften Messungen für Volumen, Form und Kephalometrie und in Übereinstimmung mit bereits vorhandenen Studien kann die Analyse des PAS und die Gegenüberstellung jeweils zweier Aufnahmen (prä- und postoperativ) als eine zuverlässige Methode angenommen werden (Yamashina und Tanimoto et al. 2008; Tso und Lee et al. 2009; van Vlijmen und Berge et al. 2009; El und Palomo 2010; Schendel und Hatcher 2010; Ghoneima und Kula 2011; Guijarro-Martinez und Swennen 2011; Oz und Orhan et al. 2011; Zamora und Llamas et al. 2011).

Die für diese Studie erhobenen Daten und die Bestimmung des Dahlberg-Fehlers in der Reliabilitätsprüfung für die Formparameter zwischen 0,07 und 3,11% des jeweiligen Durchschnittsmessergebnisses zeigen, dass das Matching eine präzise Grundlage für einen sehr genauen Vergleich zwischen den Maßen der prä- und postoperativen Bilder darstellt.

Obwohl die Methoden zur dreidimensionalen Analyse mit Fortschritten in der Geräteentwicklung immer genauer werden dürften, sind Vergleiche mit bereits durchgeführten anderen Studien aufgrund unterschiedlicher Parameter nur zum Teil brauchbar. Für Vergleiche müsste in Zukunft nach festgelegten Normen gearbeitet werden, welche die Vorgaben für die Patienten während der Aufnahme (sitzend oder liegend, Lage der Zunge am Gaumen oder auf dem Mundboden, evtl. Atmung oder keine Atmung), die Programmauswahl zur Durchführung der Analyse, die Graustufen zur Segmentierung und die Anzahl und Orientierung der Schnittebenen vorgeben. Zusätzlich müsste das OP-Ausmaß vergleichbare Dimensionen haben beziehungsweise sollten die Patientenzahlen so groß sein, dass Ausreißer weder in die eine noch in die andere Richtung den Mittelwert beeinflussen.

Aufgrund des filigranen Raumes, den die Recessi pharyngei bilden, konnte das Programm Mimics® in dieser Ebene nicht genau zwischen dem luftgefüllten Raum des Pharynx und den umgebenden Strukturen differenzieren. Daher wurde der oberste Teil des PAS oberhalb von PNS nicht in die Analysen einbezogen.

Forschungsbedarf besteht nicht nur hinsichtlich der Abgrenzung des obersten Teils des PAS oberhalb der Spina nasalis posterior, sondern auch hinsichtlich von Langzeitergebnissen. Aufgrund von Anpassungsvorgängen (Samman und Tang et al. 2002) und mit dem Älterwerden nachlassender Gewebespannung sollten in mehreren Abständen (etwa nach 10, 20 und 40 Jahren) weiterführende Diagnostikmethoden zur Kontrolle der möglichen Entstehung eines OSAS, zum Beispiel auf der Basis eines Polysomnographen, durchgeführt werden.

In der Gruppe der unimaxillär operierten Patienten der vorliegenden Studie nahmen nicht nur die Querschnittsfläche und der anteroposteriore Durchmesser auf Höhe der Spina nasalis posterior (CSA_A und AP_A) signifikant zu, sondern demgegenüber nahmen die Querschnittsfläche, der anteroposteriore Durchmesser und die transversale Breite auf Höhe des kaudalen Randes des Velum palatinum (CSA_B , AP_B und LA_B) sowie die transversale Breite auf Höhe der Epiglottisspitze (LA_C) und vor allem

der Querschnitt auf Höhe der geringsten anteroposterioren Ausdehnung, SCSA, ab. Im Vergleich dazu waren signifikante Änderungen des PAS in der Gruppe der bimaxillär operierten Patienten nur im Hinblick auf die Vergrößerung des anteroposterioren Ausmaßes auf Höhe der Spina nasalis posterior (AP_A) zu verzeichnen.

Es zeigt sich also, dass bei mittleren Verlagerungsdistanzen von \varnothing 4,59mm im Oberkiefer nach anterior und \varnothing 4,96mm im Unterkiefer nach posterior nach bimaxillärer und einer Verlagerungsdistanz von \varnothing 4,25mm im Unterkiefer nach unimaxillärer Osteotomie und Daten von jeweils 40 Patienten in dieser Analyse das unimaxilläre Verfahren im Gegensatz zum bimaxillären deutliche Auswirkungen auf den PAS hatte. Vor allem im Zusammenhang mit der kleinsten Querschnittsfläche, die die Luft beim Atmen passieren muss, scheint das Risiko zur Entstehung von OSAS in dieser Gruppe erhöht.

Es ist aber zu berücksichtigen, dass sich in früheren Studien mit anderen OP-Ausmaßen und anderen Untersuchungsparametern teilweise andere Ergebnisse nach bimaxillärer OP ergaben (Degerliyurt und Ueki et al. 2008; Degerliyurt und Ueki et al. 2009; Jakobson und Neimane et al. 2010; Lee und Chun et al. 2012). Es kann vermutet werden, dass Form- und Volumenänderungen abhängig vom OP-Ausmaß sein dürften. Trotzdem zeigen sich in der Analyse mittels des Spearman-Tests für bivariate Korrelationen keine klinisch relevanten Zusammenhänge zwischen den skelettalen Änderungen und denen des PAS. Aufgrund der vorliegenden Untersuchungsergebnisse kann keine konkrete und bindende Aussage darüber gemacht werden, ob der Nutzen einer bimaxillären Operation (mit dem Ziel der Vermeidung eines OSAS) gegenüber einer unimaxillären Osteotomie die größeren Risiken in Zukunft kompensiert.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie deuten allerdings darauf hin, dass das Volumen des PAS bei der bimaxillären Umstellungsosteotomie im Vergleich zur unimaxillären Operation vergrößert wird.

6 Zusammenfassung

Ziel

Ziel dieser retrospektiven vergleichenden Studie war die Untersuchung der metrischen und volumetrischen Veränderungen des pharyngealen Atemweges („posterior airway space“, PAS) nach uni- und bimaxillärer Umstellungsosteotomie einer großen Patientengruppe mit einer Dysgnathie der Angle-Klasse III anhand von Daten der digitalen Volumentomographie (DVT). Mit diesen Ergebnissen sollten Beziehungen zwischen den Veränderungen der dreidimensionalen Parameter und kephalometrisch ermittelten operativ bedingten sagittalen und vertikalen Veränderungen des Gesichtsskeletts hergestellt werden. Dadurch sollte aufgezeigt werden, ob eine unimaxilläre Rückverlagerung des Unterkiefers hinsichtlich der Erlangung eines obstruktiven Schlafapnoesyndroms (OSAS) risikobehafteter ist als eine bimaxilläre Osteotomie und ob Form- und Volumenänderungen des PAS abhängig vom OP-Ausmaß sind. Weiterhin sollte die Frage geklärt werden, ob der Nutzen einer bimaxillären Umstellungsosteotomie hinsichtlich des geringeren Risikos zur Erlangung eines OSAS im Vergleich zu einer unimaxillären Umstellungsosteotomie die größeren Risiken durch ein erweitertes Operationsfeld bei bimaxillärem Verfahren kompensiert.

Methodik

In dieser Arbeit wurden prä- und postoperative DVT-Daten (1 Woche vor der OP und 4-5 Wochen nach der OP erstellt) von insgesamt 80 nach Abschluss des Wachstums kombiniert kieferorthopädisch-kieferchirurgisch behandelten Patienten der Angle-Klasse III (40 unimaxillär, 40 bimaxillär therapiert) mittels der Software Mimics Innovation Suite 14.1® (Materialise, Leuven, Belgien) dreidimensional visualisiert und analysiert. Ausgeschlossen waren Patienten mit kraniofazialen Syndromen, Lippenkiefergaumensegelspalten und fazialen Asymmetrien.

Nach kephalometrischer Auswertung von aus den DVT-Daten generierten Fernröntgenseitenbildern (= FRS) konnten Korrelationen zwischen dreidimensionalen PAS-Parametern und sagittalen Parametern des Gesichtsskeletts hergestellt werden. Zur statistischen Auswertung diente die Software Microsoft Excel 2010© (Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA) und SPSS für Windows® Version 19 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA).

Die Reliabilität wurde anhand des Dahlberg-Koeffizienten berechnet.

Ergebnisse

Der für die Volumen-, Form- und kephalometrischen Messungen bestimmte Methodenfehler nach Dahlberg lässt insgesamt auf eine hohe Reliabilität der angewandten Untersuchungsmethoden schließen. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass sowohl eine uni- als auch eine bimaxilläre Umstellungsosteotomie das Volumen des pharyngealen Atemweges nicht signifikant beeinflussen.

Während die bimaxilläre Umstellungsosteotomie (maxilläre Vorverlagerung, mandibuläre Rückverlagerung) keine signifikanten Verkleinerungen im Querschnitt und im anteroposterioren und lateralen Durchmesser in allen untersuchten Ebenen und in den ermittelten Volumina aufzeigte, im oberen Abschnitt dagegen eine signifikante Vergrößerung des anteroposterioren Durchmessers, fielen bei der unimaxillären Osteotomie mehrere signifikante Veränderungen auf. Obwohl die Maxilla in diesem OP-Verfahren nicht verlagert wurde, vergrößerte sich die Querschnittsfläche auf Höhe der Spina nasalis posterior (Ebene A) signifikant, während sich der mittlere Querschnitt (Ebene b, Höhe des kaudalen Randes des Velum palatinum) und der Querschnitt auf Höhe der geringsten anteroposterioren Ausdehnung nach der mandibulären Rückverlagerung signifikant verkleinerten. Mit diesen Ergebnissen einhergehend nahm der anteroposteriore Durchmesser in Ebene A signifikant zu. Der anteroposteriore und laterale Durchmesser auf Höhe der Ebene B und der laterale Durchmesser in Ebene C (Epiglottisspitze) zeigten eine signifikante Abnahme.

Anhand der kephalometrischen Auswertung konnten beide Patientengruppen postoperativ in die skelettale Klasse I eingestuft werden, nachdem sie präoperativ der skelettalen Klasse III zuzuordnen waren. Alle Durchschnittswerte zeigten einen ausgeglichenen Gesichtsschädelaufbau.

Die operationsbedingten dreidimensionalen Veränderungen des PAS (Form und Volumen) zeigten in beiden Gruppen keine klinisch relevanten Korrelationen zu den skelettalen Veränderungen aus den kephalometrischen Auswertungen.

Schlussfolgerung

Durch eine bimaxilläre Umstellungsosteotomie verändern sich die pharyngealen Maße anteroposteriorer Durchmesser (AP), transversale Breite (LA) und Querschnittsfläche (CSA) weniger als nach einer unimaxillären Osteotomie. Durch die signifikante Verkleinerung des kleinsten PAS-Querschnitts auf Höhe der geringsten anteroposterioren Ausdehnung nach alleiniger Unterkieferrückverlagerung verringert sich die engste Stelle der Luftpassage. Das bedeutet, dass dieses Verfahren im Vergleich zur bimaxillären Osteotomie hinsichtlich der Entstehung eines OSAS risikobehafteter ist, während es im bimaxillären Verfahren gleich bleibt. Dass Form- und Volumenänderungen des PAS abhängig vom OP-Ausmaß sind, lässt sich zwar aus dem Vergleich mit ähnlichen Studien vermuten, jedoch aufgrund von unterschiedlichen Analysemethoden nicht direkt vergleichen. Eine klinisch relevante Korrelation zwischen Veränderungen der skelettalen Parameter und metrischen beziehungsweise volumetrischen Ergebnissen zeigte sich in dieser Studie nicht. Es kann vermutet werden, jedoch konnte anhand dieser Ergebnisse nicht eindeutig belegt werden, dass der Nutzen einer bimaxillären Umstellungsosteotomie – eine geringere Gefahr zur Erlangung eines OSAS im Gegensatz zum unimaxillären Vorgehen - die damit verbundenen größeren Risiken durch ein erweitertes Operationsfeld kompensiert. Langzeitstudien hinsichtlich der Auswirkungen des uni- beziehungsweise bimaxillären Operationsverfahrens müssten folgen.

Weitere Studien mit untereinander vergleichbaren OP- und Analysemethoden sowie größeren Probandengruppen sind wünschenswert. Die in dieser Studie festgelegten Standards zur Vermessung des PAS, zur kephalometrischen Auswertung und die von der Würzburger Gruppe festgelegten Grauwerte sollten für die Vergleichbarkeit verwendet werden. Langzeituntersuchungen könnten die Vorhersagbarkeit der Entstehung eines OSAS durch Umstellungsosteotomien erhöhen.

7 Literaturverzeichnis

- Abbott, M. B., Donnelly, L. F., et al. (2004). "Obstructive sleep apnea: MR imaging volume segmentation analysis." Radiology **232**(3): 889-895.
- Aboudara, C., Nielsen, I., et al. (2009). "Comparison of airway space with conventional lateral headfilms and 3-dimensional reconstruction from cone-beam computed tomography." Am J Orthod Dentofacial Orthop **135**(4): 468-479.
- Abramson, Z. R., Susarla, S., et al. (2010). "Three-dimensional computed tomographic analysis of airway anatomy." J Oral Maxillofac Surg **68**(2): 363-371.
- Abu Allhaja, E. S. und Al-Khateeb, S. N. (2005). "Uvulo-glossopharyngeal dimensions in different anteroposterior skeletal patterns." Angle Orthod **75**(6): 1012-1018.
- Achilleos, S., Krogstad, O., et al. (2000). "Surgical mandibular advancement and changes in uvuloglossopharyngeal morphology and head posture: a short- and long-term cephalometric study in males." Eur J Orthod **22**(4): 367-381.
- Achilleos, S., Krogstad, O., et al. (2000). "Surgical mandibular setback and changes in uvuloglossopharyngeal morphology and head posture: a short- and long-term cephalometric study in males." Eur J Orthod **22**(4): 383-394.
- Alves, M., Jr., Baratieri, C., et al. (2012). "Is the airway volume being correctly analyzed?" Am J Orthod Dentofacial Orthop **141**(5): 657-661.
- Alves, M., Jr., Franzotti, E. S., et al. (2012). "Evaluation of pharyngeal airway space amongst different skeletal patterns." Int J Oral Maxillofac Surg.
- Alves, P. V., Zhao, L., et al. (2008). "Three-dimensional cephalometric study of upper airway space in skeletal class II and III healthy patients." J Craniofac Surg **19**(6): 1497-1507.
- Athanasiou, A. E., Papadopoulos, M. A., et al. (1994). "Cephalometric evaluation of pharynx, soft palate, adenoid tissue, tongue, and hyoid bone following the use of a mandibular repositioning appliance in obstructive sleep apnea patients." Int J Adult Orthodon Orthognath Surg **9**(4): 273-283.
- Athanasiou, A. E., Toutountzakis, N., et al. (1991). "Alterations of hyoid bone position and pharyngeal depth and their relationship after surgical correction of mandibular prognathism." Am J Orthod Dentofacial Orthop **100**(3): 259-265.
- Battagel, J. M., Johal, A., et al. (2000). "A cephalometric comparison of subjects with snoring and obstructive sleep apnoea." Eur J Orthod **22**(4): 353-365.
- Battagel, J. M., Johal, A., et al. (1999). "Changes in airway and hyoid position in response to mandibular protrusion in subjects with obstructive sleep apnoea (OSA)." Eur J Orthod **21**(4): 363-376.
- Battagel, J. M., Johal, A., et al. (2002). "Postural variation in oropharyngeal dimensions in subjects with sleep disordered breathing: a cephalometric study." Eur J Orthod **24**(3): 263-276.

- Bhattacharyya, N., Blake, S. P., et al. (2000). "Assessment of the airway in obstructive sleep apnea syndrome with 3-dimensional airway computed tomography." Otolaryngol Head Neck Surg **123**(4): 444-449.
- Bier, J., Burkhardt, A., et al. (2007). Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie. München, Elsevier GmbH: 555.
- Bimler, H. P. (1952). "[Treatment of prognathism with braces]." Zahnärztl Welt **7**(24): 549-555.
- Chen, F., Terada, K., et al. (2007). "Effects of bimaxillary surgery and mandibular setback surgery on pharyngeal airway measurements in patients with Class III skeletal deformities." Am J Orthod Dentofacial Orthop **131**(3): 372-377.
- de Freitas, M. R., Alcazar, N. M., et al. (2006). "Upper and lower pharyngeal airways in subjects with Class I and Class II malocclusions and different growth patterns." Am J Orthod Dentofacial Orthop **130**(6): 742-745.
- Degerliyurt, K., Ueki, K., et al. (2008). "A comparative CT evaluation of pharyngeal airway changes in class III patients receiving bimaxillary surgery or mandibular setback surgery." Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod **105**(4): 495-502.
- Degerliyurt, K., Ueki, K., et al. (2009). "The effect of mandibular setback or two-jaws surgery on pharyngeal airway among different genders." Int J Oral Maxillofac Surg **38**(6): 647-652.
- Demetriades, N., Chang, D. J., et al. (2010). "Effects of mandibular repositioning, with or without maxillary advancement, on the oro-naso-pharyngeal airway and development of sleep-related breathing disorders." J Oral Maxillofac Surg **68**(10): 2431-2436.
- El, H. und Palomo, J. M. (2010). "Measuring the airway in 3 dimensions: a reliability and accuracy study." Am J Orthod Dentofacial Orthop **137**(4 Suppl): S50 e51-59; discussion S50-52.
- Ghoneima, A. und Kula, K. (2011). "Accuracy and reliability of cone-beam computed tomography for airway volume analysis." Eur J Orthod.
- Grauer, D., Cevidanes, L. S., et al. (2009). "Pharyngeal airway volume and shape from cone-beam computed tomography: relationship to facial morphology." Am J Orthod Dentofacial Orthop **136**(6): 805-814.
- Greco, J. M., Froberg, U., et al. (1990). "Long-term airway space changes after mandibular setback using bilateral sagittal split osteotomy." Int J Oral Maxillofac Surg **19**(2): 103-105.
- Guijarro-Martinez, R. und Swennen, G. R. (2011). "Cone-beam computerized tomography imaging and analysis of the upper airway: a systematic review of the literature." Int J Oral Maxillofac Surg **40**(11): 1227-1237.
- Harzer, W. (2011). Kieferorthopädie. Stuttgart, Georg Thieme Verlag KG: 355.
- Hasebe, D., Kobayashi, T., et al. (2011). "Changes in oropharyngeal airway and respiratory function during sleep after orthognathic surgery in patients with mandibular prognathism." Int J Oral Maxillofac Surg **40**(6): 584-592.
- Hausamen, J.-E., Becker, J., et al. (2003). Curriculum Mund-Kiefer- und Gesichtschirurgie. Berlin, Quintessenz-Verlags-GmbH: 207.

- Hernandez-Alfaro, F., Guijarro-Martinez, R., et al. (2011). "Effect of mono- and bimaxillary advancement on pharyngeal airway volume: cone-beam computed tomography evaluation." J Oral Maxillofac Surg **69**(11): e395-400.
- Hochban, W., Schurmann, R., et al. (1996). "Mandibular setback for surgical correction of mandibular hyperplasia--does it provoke sleep-related breathing disorders?" Int J Oral Maxillofac Surg **25**(5): 333-338.
- Hong, J. S., Park, Y. H., et al. (2011). "Three-dimensional changes in pharyngeal airway in skeletal class III patients undergoing orthognathic surgery." J Oral Maxillofac Surg **69**(11): e401-408.
- Jakobson, G., Neimane, L., et al. (2010). "Two- and three-dimensional evaluation of the upper airway after bimaxillary correction of Class III malocclusion." Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod **110**(2): 234-242.
- Joseph, A. A., Elbaum, J., et al. (1998). "A cephalometric comparative study of the soft tissue airway dimensions in persons with hyperdivergent and normodivergent facial patterns." J Oral Maxillofac Surg **56**(2): 135-139; discussion 139-140.
- Kahl-Nieke, B. (2010). Einführung in die Kieferorthopädie. Köln, Deutscher Zahnärzte Verlag: 7.
- Kawamata, A., Fujishita, M., et al. (2000). "Three-dimensional computed tomographic evaluation of morphologic airway changes after mandibular setback osteotomy for prognathism." Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod **89**(3): 278-287.
- Kim, Y. J., Hong, J. S., et al. (2010). "Three-dimensional analysis of pharyngeal airway in preadolescent children with different anteroposterior skeletal patterns." Am J Orthod Dentofacial Orthop **137**(3): 306 e301-311; discussion 306-307.
- Kochel, J., Meyer-Marcotty, P., et al. (2013). "Short-term pharyngeal airway changes after mandibular advancement surgery in adult Class II-Patients--a three-dimensional retrospective study." J Orofac Orthop **74**(2): 137-152.
- Kyung, S. H., Park, Y. C., et al. (2005). "Obstructive sleep apnea patients with the oral appliance experience pharyngeal size and shape changes in three dimensions." Angle Orthod **75**(1): 15-22.
- Lee, Y., Chun, Y. S., et al. (2012). "Volumetric Changes in the Upper Airway After Bimaxillary Surgery for Skeletal Class III Malocclusions: A Case Series Study Using 3-Dimensional Cone-Beam Computed Tomography." J Oral Maxillofac Surg.
- Lenza, M. G., Lenza, M. M., et al. (2010). "An analysis of different approaches to the assessment of upper airway morphology: a CBCT study." Orthod Craniofac Res **13**(2): 96-105.
- Li, K. K., Riley, R. W., et al. (2000). "Postoperative airway findings after maxillomandibular advancement for obstructive sleep apnea syndrome." Laryngoscope **110**(2 Pt 1): 325-327.
- Lowe, A. A., Fleetham, J. A., et al. (1995). "Cephalometric and computed tomographic predictors of obstructive sleep apnea severity." Am J Orthod Dentofacial Orthop **107**(6): 589-595.
- Ludlow, J. B., Davies-Ludlow, L. E., et al. (2006). "Dosimetry of 3 CBCT devices for oral and maxillofacial radiology: CB Mercuray, NewTom 3G and i-CAT." Dentomaxillofac Radiol **35**(4): 219-226.

- Lye, K. W. (2008). "Effect of orthognathic surgery on the posterior airway space (PAS)." Ann Acad Med Singapore **37**(8): 677-682.
- Mah, J. K., Danforth, R. A., et al. (2003). "Radiation absorbed in maxillofacial imaging with a new dental computed tomography device." Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod **96**(4): 508-513.
- Marsan, G., Vasfi Kuvat, S., et al. (2009). "Oropharyngeal airway changes following bimaxillary surgery in Class III female adults." J Craniomaxillofac Surg **37**(2): 69-73.
- Miles, P. G., Vig, P. S., et al. (1996). "Craniofacial structure and obstructive sleep apnea syndrome--a qualitative analysis and meta-analysis of the literature." Am J Orthod Dentofacial Orthop **109**(2): 163-172.
- Muto, T., Takeda, S., et al. (2002). "The effect of head posture on the pharyngeal airway space (PAS)." Int J Oral Maxillofac Surg **31**(6): 579-583.
- Oz, U., Orhan, K., et al. (2011). "Comparison of linear and angular measurements using two-dimensional conventional methods and three-dimensional cone beam CT images reconstructed from a volumetric rendering program in vivo." Dentomaxillofac Radiol **40**(8): 492-500.
- Palomo, J. M., Rao, P. S., et al. (2008). "Influence of CBCT exposure conditions on radiation dose." Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod **105**(6): 773-782.
- Park, S. B., Kim, Y. I., et al. (2012). "Cone-beam computed tomography evaluation of short- and long-term airway change and stability after orthognathic surgery in patients with Class III skeletal deformities: bimaxillary surgery and mandibular setback surgery." Int J Oral Maxillofac Surg **41**(1): 87-93.
- Pereira-Filho, V. A., Castro-Silva, L. M., et al. (2011). "Cephalometric evaluation of pharyngeal airway space changes in class III patients undergoing orthognathic surgery." J Oral Maxillofac Surg **69**(11): e409-415.
- Riha, R. L., Brander, P., et al. (2005). "A cephalometric comparison of patients with the sleep apnea/hypopnea syndrome and their siblings." Sleep **28**(3): 315-320.
- Riley, R. W., Powell, N. B., et al. (1987). "Obstructive sleep apnea syndrome following surgery for mandibular prognathism." J Oral Maxillofac Surg **45**(5): 450-452.
- Saitoh, K. (2004). "Long-term changes in pharyngeal airway morphology after mandibular setback surgery." Am J Orthod Dentofacial Orthop **125**(5): 556-561.
- Samman, N., Tang, S. S., et al. (2002). "Cephalometric study of the upper airway in surgically corrected class III skeletal deformity." Int J Adult Orthodon Orthognath Surg **17**(3): 180-190.
- Schendel, S. A. und Hatcher, D. (2010). "Automated 3-dimensional airway analysis from cone-beam computed tomography data." J Oral Maxillofac Surg **68**(3): 696-701.
- Schopf, P. (2008). Curriculum Kieferorthopädie. Berlin, Quintessenz Verlags-GmbH: 771.
- Schulze, R. (2011) "DVT-Diagnostik in der Implantologie: Grundlagen - Fallstricke." ZMK Zahnheilkunde, Management, Kultur **2011**.

- Schwenzer, N. und Ehrenfeld, M. (2009). Zahnärztliche Chirurgie. Stuttgart, Georg Thieme Verlag KG: 250.
- Schwenzer, N. und Ehrenfeld, M. (2011a). Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie. Stuttgart, Georg Thieme Verlag KG: 257.
- Schwenzer, N. und Ehrenfeld, M. (2011b). Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie Stuttgart, Georg Thieme Verlag KG: 260.
- Schwenzer, N. und Ehrenfeld, M. (2011c). Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie. Stuttgart, Georg Thieme Verlag KG: 63.
- Stellzig-Eisenhauer, A. und Meyer-Marcotty, P. (2010). "Interaction between otorhinolaryngology and orthodontics: correlation between the nasopharyngeal airway and the craniofacial complex." GMS Curr Top Otorhinolaryngol Head Neck Surg **9**: Doc04.
- Tourne, L. P. (1990). "The long face syndrome and impairment of the nasopharyngeal airway." Angle Orthod **60**(3): 167-176.
- Tso, H. H., Lee, J. S., et al. (2009). "Evaluation of the human airway using cone-beam computerized tomography." Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod **108**(5): 768-776.
- Turnbull, N. R. und Battagel, J. M. (2000). "The effects of orthognathic surgery on pharyngeal airway dimensions and quality of sleep." J Orthod **27**(3): 235-247.
- van Vlijmen, O. J., Berge, S. J., et al. (2009). "Comparison of cephalometric radiographs obtained from cone-beam computed tomography scans and conventional radiographs." J Oral Maxillofac Surg **67**(1): 92-97.
- Vent-Mehnert, H. und Heussner, S. (2012) "Einsatzbereiche der dentalen Volumentomografie (DVT) in der Kieferorthopädie." **6**(5), 475-489 DOI: 10.1055/s-0032-1324833.
- Weber, T. (2010). Memorix Zahnmedizin. Stuttgart, Georg Thieme Verlag KG: 227.
- Yamashina, A., Tanimoto, K., et al. (2008). "The reliability of computed tomography (CT) values and dimensional measurements of the oropharyngeal region using cone beam CT: comparison with multidetector CT." Dentomaxillofac Radiol **37**(5): 245-251.
- Zamora, N., Llamas, J. M., et al. (2011). "Cephalometric measurements from 3D reconstructed images compared with conventional 2D images." Angle Orthod **81**(5): 856-864.

8 Abkürzungsverzeichnis

3D	dreidimensional
Advancement	Vorverlagerung
AP	anteroposteriore Ausdehnung des PAS
CPAP	countinuous positive airway pressure
CSA	cross sectional area (Durchflussfläche)
CT	Computertomographie
DVT	digitale Volumentomographie
DICOM	Digital Imaging and Communications in Medicine: ein offener Standard zur Speicherung von Informationen im medizinischen Bilddatenmanagement
FH	Frankfurter Horizontale
FRS	Fernröntgenseitenbild
IAS	inferior airway space
KFO	Kieferorthopädie
Klasse II	skelettale Klasse II
Klasse III	skelettale Klasse III
Klasse III-Patienten	Patienten der Angle-Klasse III
LA	laterale Ausdehnung des PAS
LAR	lateral-anteroposterior ratio = Verhältnis von LA zu AP
MKG	Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie
MRT	Magnetresonanztomographie
ms	Millisekunde
mSV	Millisievert
OK	Oberkiefer
OP	Operation
OPG	Orthopantomogramm
OSA	obstruktive Schlafapnoe
OSAS	obstruktives Schlafapnoesyndrom
PAS	pharyngeal airway space, pharyngealer Atemweg
post-OP	postoperativ
prä-OP	präoperativ
SAS	superior airway space, superiorer Teil des PAS
SD	Standardabweichung (standard deviation)
setback	Rückverlagerung
UK	Unterkiefer

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Die Angle-Klassen.....	2
Abbildung 2:	Osteotomielinien im FRS.....	11
Abbildung 3:	3D-Modelle von Knochen und Luftwegen.....	19
Abbildung 4:	Eingrenzung des PAS mit der Crop mask	20
Abbildung 5:	Festlegung der Punkte für die Schnittebenen	21
Abbildung 6:	Orientierungs- und Schnittebenen des PAS.....	23
Abbildung 7:	Der PAS gesplittet.....	24
Abbildung 8:	DVT-Ansicht der korrespondierenden prä- und postoperativen Datenpaare	26
Abbildung 9:	Prä- und postoperativer Datensatz nach dem Matching	27
Abbildung 10:	AbleSEN der Oberfläche im Programmteil 3 Matic.....	29
Abbildung 11:	Kreiszyylinder	30
Abbildung 12:	AbleSEN der Querschnittsfläche auf Höhe der geringsten anteroposterioren Pharynxausdehnung	32
Abbildung 13:	Messung der Form des PAS	34
Abbildung 14:	Aus Mimics® generiertes FRS	36
Abbildung 15:	Kephalometrische Messpunkte.....	41
Abbildung 16:	3D-Ansicht des Schädels und PAS eines unimaxillär operierten Patienten.....	48
Abbildung 17:	3D-Ansicht des Schädels und PAS eines bimaxillär operierten Patienten.....	51
Abbildung 18:	Differenzen in der Darstellung der Recessi pharyngei	65

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Patientengut	18
Tabelle 2:	3D-Messpunkte und Ebenen	22
Tabelle 3:	Parameter der 3D-Analyse des PAS	35
Tabelle 4:	Kephalometrische Messpunkte.....	39
Tabelle 5:	Kephalometrische Messungen	40
Tabelle 6:	Ergebnisse der Reliabilitätsprüfung Volumen	46
Tabelle 7:	Ergebnisse der Reliabilitätsprüfung Form	46
Tabelle 8:	Ergebnisse der Reliabilitätsprüfung Kephalometrie	46
Tabelle 9:	Ergebnisse der 3D-Messungen unimaxillär operierter Patienten	49
Tabelle 10:	Ergebnisse der 3D-Messungen bimaxillär operierter Patienten	52
Tabelle 11:	Ergebnisse der kephalometrischen Messungen unimaxillär operierter Patienten	54
Tabelle 12:	Ergebnisse der kephalometrischen Messungen bimaxillär operierter Patienten.....	56
Tabelle 13:	Korrelationen zwischen 3D-Werten und FRS-Werten unimaxillär operierter Patienten	58
Tabelle 14:	Korrelationen zwischen 3D-Werten und FRS-Werten bimaxillär operierter Patienten.....	59

11 Danksagung

Ein herzlicher Dank richtet sich an jene, die mich bei der Erstellung dieser Dissertation fürsorglich, geduldig und freundlich unterstützt haben.

Insbesondere bedanke ich mich bei Frau Dr. Janka Kochel, die mir jederzeit mit Rat und Tat zur Seite stand, für die vielfältige und sehr gute Betreuung bei der Bearbeitung dieses interessanten Themas, die mich stets motiviert hat und immer da war, wenn ich ihre Hilfe brauchte.

Herrn Priv.-Doz. Dr. Dr. Josip S. Bill danke ich für die Übernahme des Korreferates.

Frau Professor Dr. med. dent. Angelika Stellzig-Eisenhauer danke ich für die freundliche Überlassung des Themas und die Übernahme des Referats und besonders dafür, dass die Vorlesungen der Poliklinik für Kieferorthopädie so interessant und facettenreich gestaltet waren.

Der Julius-Maximilians-Universität Würzburg danke ich für ein abwechslungsreiches Studium und dafür, dass ich mit so vielfältigen Erfahrungen ins Berufsleben starten durfte.

Ich bedanke mich auch bei denen, die ich hier nicht explizit erwähnt habe und die trotzdem für mich da waren, wenn ich Trost oder Ansporn brauchte.

Danke an alle, ohne deren Hilfe diese Arbeit nicht entstanden wäre.