

Vergleich der konventionell geplanten Oberkieferposition mit der operativ erreichten Oberkieferposition im Rahmen Splint-basierter mund-kiefer-gesichtschirurgischer Umstellungsosteotomien: eine retrospektive 3D-Analyse

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Zahnmedizin (Dr. med. dent.)

vorgelegt

der Medizinischen Fakultät

der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

von Till Niklas Hestermann

Betreuer: Prof. Dr. med. Dr. med. dent. Sven Otto

Gutachter:

- Prof. Dr. med. Dr. med. dent. Robert Fuhrmann, Halle (Saale)
- Prof. Dr. med. Dr. med. dent. Andreas Kolk, Innsbruck

Datum der Verteidigung: 22.01.2024

Meiner Familie

Referat

Um konventionell geplante Umstellungsosteotomien des Oberkiefers in ihrer Umsetzungspräzision zu analysieren, sollten in dieser Studie die in der Modelloperation geplanten Rotationen und Translationen mit den in der tatsächlichen Operation durchgeführten Bewegungen verglichen werden. Dafür wurden Oberflächenscans der Planungsmodelle und digitale Volumentomographien der prä- und postoperativen Gesichtsschädel von 20 Patient:innen gesammelt und retrospektiv dreidimensional untersucht, um die Umsetzungsgenauigkeiten vollumfänglich bestimmen zu können. Die Unterschiede zwischen geplanter und erreichter Oberkieferposition wurden anhand der Eulerschen Winkel in Rotationen und Translationen in allen drei Körperachsen aufgeschlüsselt. Die Daten wurden verschiedenen quantitativ absoluten und relativen statistischen Analysen unterzogen, um klinisch verwertbare Interpretationen zu ermöglichen. Zusätzlich wurde die Auswirkung von Fehlern der Gesichtsbogenübertragung bei Befundung und Planung auf die gesamten Umsetzungenauigkeiten der konventionellen Dysgnathithherapie ermittelt.

Die Ergebnisse dieser Studie zeigten, dass insgesamt Diskrepanzen zwischen geplanter und operativ erreichter Oberkieferposition bestehen. In der Literatur wird ab einer absoluten Abweichung von mehr als 2 mm Translation und 2° Rotation die geplante Oberkieferposition als nicht erfolgreich umgesetzt bewertet. In dieser Studie lagen die Abweichungen im Mittel innerhalb dieser Grenzen. Sie betragen 0,90° beim Yaw, 1,67° beim Pitch, 1,02° beim Roll, 1,63 mm in der Sagittalachse, 0,79 mm in der Transversalachse und 1,92 mm in der Longitudinalachse. Die zu ihrer geplanten Rotation bzw. Translation relativen Abweichungen betragen im Mittel 64% beim Yaw, 110% beim Pitch, 76% beim Roll, 63% in der Sagittalachse, 73% in der Transversalachse und 147% in der Longitudinalachse. Bezogen auf die einzelnen Fälle wurden allerdings nur bei 5 von 20 Fällen alle sechs Umsetzungsparameter gemäß der Planung erfolgreich umgesetzt.

Eine klinisch relevante Auswirkung der Gesichtsbogenübertragung auf die Umsetzungenauigkeiten der Operation konnte im Bereich der Longitudinalachse festgestellt werden.

Hestermann, Till Niklas: Vergleich der konventionell geplanten Oberkieferposition mit der operativ erreichten Oberkieferposition im Rahmen Splint-basierter mund-kiefer-gesichtschirurgischer Umstellungsosteotomien: eine retrospektive 3D-Analyse, Halle (Saale), Martin-Luther-Universität, Medizinische Fakultät, Dissertation, 80 Seiten, 2023

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

1.	Einleitung	1
1.1.	Definition der Dysgnathie	1
1.2.	Geschichtliche Einordnung von Umstellungsosteotomien des Oberkiefers in der Dysgnathiechirurgie	2
1.3.	Ursachen und Einteilung von Dysgnathien	3
1.4.	Therapieplanung	4
1.4.1.	Indikationsstellung und zeitlicher Ablauf.....	4
1.4.2.	Anamnese und Befundung.....	5
1.4.3.	Therapieoptionen und -verfahren	6
1.4.4.	Konventionelle Operationsplanung	9
1.4.5.	Virtuelle Operationsplanung.....	10
2.	Zielstellung	12
2.1.	Primäres Ziel.....	12
2.2.	Sekundäres Ziel	12
3.	Material und Methoden.....	15
3.1.	Patientenrekrutierung.....	15
3.2.	Datengewinnung	16
3.2.1.	Schädel-DVTs.....	16
3.2.2.	Modellscans	17
3.3.	Vorbereitung des Analyse-Workflows im IPS CaseDesigner®	18
3.3.1.	Vor- und Nachteile des IPS CaseDesigners®	18
3.3.2.	Workflow im IPS CaseDesigner®	19
3.4.	Analyse-Workflow in CloudCompare®	21
3.4.1.	Der Überlagerungs-Algorithmus von CloudCompare® und sein Nutzen	21
3.4.2.	Interpretation der Eulerschen Winkel	22
3.4.3.	Ermittlung der in der OP durchgeführten Rotationen und Translationen.....	24
3.4.4.	Ermittlung der in der Modell-OP durchgeführten Rotationen und Translationen	29

3.4.5.	Ermittlung der in der Modell-OP geplanten Rotationen und Translationen übertragen auf den Schädel	34
3.5.	Mehrfache Durchführung des Workflows.....	36
3.6.	Statistische Auswertung.....	37
3.6.1.	Methodenfehler	37
3.6.2.	Quantitative Abweichungsanalyse.....	37
3.6.3.	Relative Abweichungsanalyse	38
3.6.4.	Analyse der Auswirkung des Übertragungsfehlers des Gesichtsbogens auf die Gesamtabweichung zwischen Planung und Ergebnis	38
3.6.5.	Bewertung des individuellen OP-Erfolgs.....	39
4.	Ergebnisse	40
4.1.	Grundlegende Abweichungswerte.....	40
4.2.	Analyse des Methodenfehlers	41
4.3.	Quantitative Abweichungsanalyse.....	42
4.3.1.	Reale Werte.....	42
4.3.2.	Absolute Werte	44
4.3.3.	Richtungsbezogene Werte	46
4.4.	Relative Abweichungsanalyse	47
4.5.	Analyse der Auswirkung des Übertragungsfehlers des Gesichtsbogens auf die Gesamtabweichung zwischen Planung und Ergebnis	52
4.6.	Bewertung des individuellen OP-Erfolgs.....	54
5.	Diskussion.....	56
5.1.	Kritische Auseinandersetzung mit der Methodik.....	56
5.1.1.	Patientengut.....	56
5.1.2.	Modellscan	56
5.1.3.	Ausrichtung nach der NHP	57
5.1.4.	Methodik der Positionserfassung von zwei Objekten	57
5.1.5.	Diskussion über den Methodenfehler	60
5.2.	Analyse der Ergebniswerte	61
5.2.1.	Diskussion der quantitativen Abweichungsanalyse	61
5.2.2.	Vergleich der relativen Abweichungswerte	65
5.2.3.	Diskussion über den individuellen OP-Erfolg	67
5.2.4.	Auswirkung des Gesichtsbogens auf die Abweichungswerte	69

6.	Zusammenfassung	71
6.1.	Klinische Bedeutung.....	72
6.2.	Ausblick	73
7.	Literaturverzeichnis.....	74
8.	Thesen	80

Anhang

Selbstständigkeitserklärung

Danksagungen

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Foto einer konventionellen Modell-Operation im Artikulator	10
Abbildung 2: Beispielhaftes Schema der Planung im Artikulator in einem Koordinatensystem – Eigens angefertigte Grafik.....	13
Abbildung 3: Beispielhaftes Schema der Planung übertragen auf den/die Patient:in bei fehlerhaft einartikulierten Modellen – Eigens angefertigte Grafik.....	13
Abbildung 4: Das fertig gescannte Modell im geschlossenen STL-Format – Screenshot aus der SHINING 3D® Software.....	17
Abbildung 5: Zahnreihe mit abgebildeten Artefakten durch eine Multibandapparatur – Screenshot aus dem IPS CaseDesigner®	18
Abbildung 6: Zahnreihe ohne Artefakte der Multibandapparatur durch überlagerten Modellscan – Screenshot aus dem IPS CaseDesigner®	18
Abbildung 7: Positionierung des Schädels nach der NHP durch angezeigte Referenzlinien – Screenshot aus dem IPS CaseDesigner®	19
Abbildung 8: Referenzpunkte auf den Zahnreihen zur Überlagerung der Modell-Zahnreihe - Screenshot aus dem IPS CaseDesigner®	20
Abbildung 9: Überlagerungsüberprüfung im Schnittbildfenster - Screenshot aus dem IPS CaseDesigner®	20
Abbildung 10: Die Transformationsmatrix in CloudCompare® - Screenshot aus CloudCompare®.....	22
Abbildung 11: Die Eulerschen Winkel und linearen Translationen interpretiert aus der Transformationsmatrix - Screenshot aus CloudCompare®	22
Abbildung 12: Schematische Darstellung des 3D-Koordinatensystems nach den Eulerschen Winkeln – Eigens angefertigte Grafik.....	22
Abbildung 13: Schematische Darstellung des Koordinatensystems nach den in der MKG- Chirurgie gängigen Referenzebenen – Eigens angefertigte Grafik	22
Abbildung 14: Manuelle Überlagerung der Schädel nach den Jochbeinen - Screenshot aus CloudCompare®.....	24
Abbildung 15: Gleich ausgeschnittene Jochbeine nach manueller Vorpositionierung - Screenshot aus CloudCompare®	24
Abbildung 16: Anwendung des Überlagerungs-Algorithmus auf die Jochbeine - Screenshot aus CloudCompare®.....	25

Abbildung 17: Transformationsmatrix des Überlagerungs-Algorithmus für die Jochbeine und Anwendung der Matrix auf den Rest des postoperativen Schädels - Screenshot aus CloudCompare®	25
Abbildung 18: Ausschneiden der präoperativen Zahnreihe aus dem Schädel - Screenshot aus CloudCompare®	26
Abbildung 19: Ausschneiden der postoperativen Zahnreihe aus dem Schädel - Screenshot aus CloudCompare®	26
Abbildung 20: Präoperative und postoperative Zahnreihe so positioniert, dass der Inzisalpunkt der präoperativen Zahnreihe im Nullpunkt des Koordinatensystems liegt - Screenshot aus CloudCompare®	27
Abbildung 21: Präoperative und postoperative Zahnreihe so positioniert, dass die X-Achse (im Bild rot gefärbt) nach anterior zeigt - Screenshot aus CloudCompare®	27
Abbildung 22: Anwendung des Überlagerungs-Algorithmus auf prä- und postoperative Zahnreihe - Screenshot aus CloudCompare®	28
Abbildung 23: Durch den Überlagerungs-Algorithmus errechnete Transformationsmatrix für den Positionsunterschied zwischen prä- und postoperativer Zahnreihe - Screenshot aus CloudCompare®	28
Abbildung 24: Manuelle Vorpositionierung der Modelle nach den Artikulatorplatten - Screenshot aus CloudCompare®	29
Abbildung 25: Anwendung des Überlagerungs-Algorithmus auf die Artikulatorplatten - Screenshot aus CloudCompare®	30
Abbildung 26: Präoperatives Modell, welches noch nicht nach der NHP ausgerichtet ist - Screenshot aus CloudCompare®	30
Abbildung 27: Ausrichtung des Modells in der X-Achse - Screenshot aus CloudCompare®	31
Abbildung 28: Ausrichtung des Modells in der Y-Achse - Screenshot aus CloudCompare®	31
Abbildung 29: Ausrichtung des Modells in der Z-Achse - Screenshot aus CloudCompare®	31
Abbildung 30: Modelle nach der NHP ausgerichtet - Screenshot aus CloudCompare®	31
Abbildung 31: Schematische Darstellung der in der Zahnmedizin gängigen Referenzebenen – Eigens angefertigte Grafik	32
Abbildung 32: Übertragung der +5° Rotation auf die Modell-Zahnreihen - Screenshot aus CloudCompare®	32
Abbildung 33: Anwendung des Überlagerungs-Algorithmus auf die Zahnreihen der Modelle - Screenshot aus CloudCompare®	33

Abbildung 34: Durch den Überlagerungs-Algorithmus errechnete Transformationsmatrix für den Positionsunterschied zwischen prä- und postoperativer Modell-Zahnreihe - Screenshot aus CloudCompare®	33
Abbildung 35: Manuelle Vorpositionierung von präoperativem Schödel und Modell anhand der Zahnreihen - Screenshot aus CloudCompare®	34
Abbildung 36: Anwendung des Überlagerungs-Algorithmus auf die präoperativen Zahnreihen von Modell und Schödel - Screenshot aus CloudCompare®	35
Abbildung 37: Modelle nach der in den Schödel übertragenen Position ausgerichtet - Screenshot aus CloudCompare®	35
Abbildung 38: Anwendung des Überlagerungs-Algorithmus auf die Zahnreihen der Modelle - Screenshot aus CloudCompare®	36
Abbildung 39: Durch den Überlagerungs-Algorithmus errechnete Transformationsmatrix für den Positionsunterschied zwischen prä- und postop. Modell - Screenshot aus CloudCompare®	36
Abbildung 40: Box-Plot der Umsetzungsungenauigkeit der Rotationen	43
Abbildung 41: Box-Plot der Umsetzungsungenauigkeiten der Translationen	43
Abbildung 42: Box-Plot der absoluten Umsetzungsungenauigkeiten der Rotationen	45
Abbildung 43: Box-Plot der absoluten Umsetzungsungenauigkeiten der Translationen	45
Abbildung 44: Box-Plot der relativen Umsetzungsungenauigkeiten der Rotationen	48
Abbildung 45: Box-Plot der relativen Umsetzungsungenauigkeiten der Translationen	48
Abbildung 46: Box-Plot der nach klinischer Relevanz gefilterten relativen Umsetzungsungenauigkeiten der Rotationen	50
Abbildung 47: Box-Plot der nach klinischer Relevanz gefilterten relativen Umsetzungsungenauigkeiten der Translationen	51
Abbildung 48: Box-Plot der Differenzen der Umsetzungsungenauigkeiten der Rotationen ausgehend von der Planung im Artikulator bzw. der in den Schödel übertragenen Planung	53
Abbildung 49: Box-Plot der Differenzen der Umsetzungsungenauigkeiten der Translationen ausgehend von der Planung im Artikulator bzw. der in den Schödel übertragenen Planung	53
Abbildung 50: Säulendiagramm der Ausreißer bei den Umsetzungsungenauigkeiten aufgeschlüsselt in Patientenfälle	55

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Rotations- und Translationsachsen der Eulerschen Winkel und ihr anatomischer bzw. praktischer Bezug mit modifizierten Screenshots aus CloudCompare®	23
Tabelle 2: Gemittelte Ergebnisse der Genauigkeitsanalyse von Planung und Umsetzung für jeden Patientenfall in Form von Abweichungswerten - Fälle mit bignather Umstellungsosteotomie sind kursiv markiert	40
Tabelle 3: Statistische Analyse der quantitativen Abweichung der oberen und unteren Grenzen der Konfidenzintervalle vom Mittelwert.....	41
Tabelle 4: Statistische Analyse der realen Abweichungswerte	42
Tabelle 5: Statistische Analyse der absoluten Abweichungswerte.....	44
Tabelle 6: Statistische Analyse der negativen Abweichungswerte und Fallzahlen.....	46
Tabelle 7: Statistische Analyse der positiven Abweichungswerte und Fallzahlen.....	46
Tabelle 8: Verhältnisse zwischen Planung und postoperativem Ergebnis für jeden Patientenfall - Fälle mit bignather Umstellungsosteotomie sind kursiv markiert.....	47
Tabelle 9: Statistische Analyse der relativen Abweichungswerte	48
Tabelle 10: Verhältnisse zwischen Planung und postoperativem Ergebnis für jedes Parameter mit klinisch relevanten Planungswerten für jeden Patientenfall - Fälle mit bignather Umstellungsosteotomie sind kursiv markiert	49
Tabelle 11: Statistische Analyse der nach klinischer Relevanz gefilterten relativen Abweichungswerte.....	50
Tabelle 12: Quantitativer Vergleich der Umsetzungsungenauigkeiten ausgehend von der Planung im Artikulator und von der in den Schädel übertragenen Planung	52
Tabelle 13: p-Werte des Withney-U-Test zwischen den Umsetzungsungenauigkeiten ausgehend von der Planung im Artikulator bzw. der in den Schädel übertragenen Planung.....	54
Tabelle 14: Anzahl der Ausreißer der bei Umsetzungsungenauigkeiten	54
Tabelle 15: Fallzahl aufgeschlüsselt anhand der Menge der Ausreißer bei den Umsetzungsungenauigkeiten	55
Tabelle 16: Gegenüberstellung der Mittelwerte von absoluter und relativer Analyse der Umsetzungsungenauigkeiten	66

Abkürzungsverzeichnis

3D	dreidimensional
ant.	anterior
CAD/CAM	Computer-aided design and Computer-aided manufacturing
DICOM	Digital Imaging and Communications in Medicine
DVT	Digitale Volumentomographie
FH	Frankfurter Horizontale
mm	Millimeter
MW	Mittelwert
NHP	Natural Head Position
OP	Operation
OK	Oberkiefer
STL	Standard Triangle Language
post.	posterior
postop.	postoperativ
präop.	präoperativ
PSI	Patientenspezifisches Implantat
UK	Unterkiefer
°	Grad
%	Prozent

1. Einleitung

Umstellungsosteotomien der Kiefer sind ein chirurgischer Ansatz zur Behandlung von Fehlbissen und damit meist Teil eines interdisziplinären Behandlungskonzepts in Zusammenarbeit mit der Kieferorthopädie und ggf. anderen medizinischen Fachdisziplinen. Sie sind rein elektive Eingriffe, die meist einer relativ hohen Invasivität unterliegen und eine Intubationsnarkose erfordern. Gerade deshalb ist die Genauigkeit der Umsetzung im Vergleich zum geplanten Therapieziel von großem Interesse und ein möglichst exaktes Ergebnis erstrebenswert. Die etablierteste Planungsmethode ist hier die Durchführung einer Modelloperation, bei der die angestrebten Verlagerungen der Kiefer simuliert und anschließend auf Führungshilfsmittel für die Operation übertragen werden. Diese Simulation kann sowohl für den Ober-, als auch für den Unterkiefer durchgeführt werden. Wie gut diese Planung umgesetzt werden kann, ist ein wichtiges Zeugnis für die Planung selbst, ihre Übertragungsmöglichkeiten auf die Patientensituation und die tatsächliche intraoperative Umsetzung. Daher sind in der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie Genauigkeitsuntersuchungen, die sich mit solchen Dysgnathitherapien befassen, von hoher Bedeutung für die Behandler:innen. Für den Vergleich zwischen Planung und postoperativem Resultat ist insbesondere der Oberkiefer gut geeignet, da der Unterkiefer über das Kiefergelenk beweglich mit dem Schädel verbunden ist. Daher werden auch bei dieser Studie nur die Verlagerungen der Oberkiefer untersucht. Dabei ist das Ziel der vorliegenden Arbeit die Präzision dieser Verlagerungen in allen Dimensionen möglichst überschaubar darzustellen und zu analysieren. Um die Zusammenhänge zwischen Indikationsstellung, Planung, Operation und dem tatsächlichen Ergebnis zu verstehen ist ein Grundwissen über Dysgnathie und Methodik der Umstellungsosteotomien der Kiefer notwendig.

1.1. Definition der Dysgnathie

Das craniomandibuläre System unterliegt einem funktionellen und morphologischem Gleichgewicht der Beziehung der Kiefer und Zähne zueinander, sowie zum Schädel. Bei korrekter Position, Größe und Form der Kiefer, sowie voller Zahnzahl und korrekter Zahnstellung, können sich ungehinderte Okklusion, Artikulation und Gleichgewicht der orofazialen Muskulatur einstellen. In diesem Fall spricht man von Eugathie. Die Dysgnathie (griech.: dys miss-, fehl-; gnáthos Kiefer) hingegen beschreibt die Abweichung von diesen Gegebenheiten.

Im chirurgischen Sinne liegt hier der Schwerpunkt vor allem auf Abweichungen der normgerechten Stellung der Kiefer zueinander bzw. zur Schädelbasis und daraus resultierenden Störungen der Okklusion und Harmonie des Gesichtsschädels.

1.2. Geschichtliche Einordnung von Umstellungsosteotomien des Oberkiefers in der Dysgnathiechirurgie

Von chirurgischen Korrekturen verschiedener Kieferdeformitäten wird schon seit dem 19. Jahrhundert in einzelnen Publikationen berichtet. Der erste dokumentierte Fall wurde 1849 von S.P. Hullihen mit dem Titel „Case of Elongation of the under Jaw and Distortion of the Face and Neck, Caused by a Burn, Successfully Treated“ im American Journal of Dental Science veröffentlicht (Hullihen, 1849). Die Patientin wurde einem dreiphasigen Operationsplan unterzogen, wobei der erste Schritt der Korrektur der skelettalen Deformation entsprach. Hierbei wurde die Prognathie des Unterkiefers im Sinne einer anterioren subapikalen Osteotomie, wie von Kole 1959 beschrieben, behoben (Aziz, 2004). Auch wenn die Trennung des Oberkiefers vom Schädel sich schon zu dieser Zeit zur Entfernung nasopharyngealer und sinunasaler Tumoren zu Nutze gemacht wurde (Sullivan, 2016), sind tatsächliche Dysgnathieoperationen des Oberkiefers erst 1927 von Wassmund und 1934 von Axhausen durchgeführt worden (Mast & Ehrenfeld, 2011, S. 234). Die volle Mobilisation, und damit die Ermöglichung von Korrekturen in jede Richtung, erreichte jedoch erst Schuchardt durch das Abtrennen des Processus pterygoideus als zusätzlichen Operationsschritt (Schuchardt, 1954). Heutzutage hat sich die Le-Fort-1-Osteotomie mit der sog. Down-Fracture etabliert, welche durch die namensgebende Le-Fort-1 Frakturlinie aus der Frakturklassifikation von Rene LeFort (1901) gekennzeichnet ist (Moorhead & Serra, 2022). Die meist angewandte Down-Fracture zur Trennung des Oberkiefers vom Viscerocranium wurde durch Bell entwickelt (Bell et al., 1988). Die parallele Entwicklung kieferorthopädischer Techniken hat auch einen wesentlichen Anteil an der Evolution der Dysgnathiechirurgie (Mast & Ehrenfeld, 2011, S. 234). Festsitzende Apparaturen, darunter vor allem die durch Angle etablierte Brackettherapie (Sonnenberg & Göz, 2002), sind wichtiger Bestandteil des gesamten Therapieplans. Auch die das Aufkommen von Osteosyntheseplatten- und schrauben und ihr Einzug in die kraniofaziale Chirurgie in der 1970ern, bestimmen maßgeblich wie sich die orthopädische Chirurgie bis heute entfalten konnte (Bell, 2018). Im Verlauf der Zeit ist so die Nachfrage nach Verbesserung skelettaler Kieferfehlstellungen immer größer geworden. Laut statistischem Bundesamt wurden 2020 fast 10.000 Dysgnathieoperationen in Deutschland durchgeführt (Statistisches Bundesamt, 2021).

Zudem wird seit dem Voranschreiten moderner Computer- und Softwaretechnologie die konventionelle Gipsmodell-basierte Planungsmethode dieser Operation durch virtuelle Verfahren nach und nach abgelöst.

1.3. Ursachen und Einteilung von Dysgnathien

Wie viele Anomalien des Körpers werden Dysgnathien zunächst in angeboren oder erworben eingeteilt. Angeboren sind diese meist Nebenerscheinungen von Syndromen, was jedoch insgesamt eher selten vorkommt. Erworbene Dysgnathien manifestieren sich oft im Kindesalter durch frühzeitigen Milchzahnverlust, Lutschgewohnheiten oder Mundatmung, können sich aber auch durch erbliche Komponenten oder hormonelle Einflüsse entwickeln (Kübler et al., 2011).

Die weitere Einteilung erfolgt in skelettale und dentoalveoläre Dysgnathien, wobei die Kombination aus beiden häufig ist und die Übergänge fließend sind (Mast & Ehrenfeld, 2011, S. 235). Rein dentoalveoläre Anomalien beschränken sich nur auf den Alveolarfortsatz und sind deshalb meist rein kieferorthopädisch behandelbar.

Die skelettalen Abweichungen lassen sich am besten räumlich in sagittaler, vertikaler und transversaler Richtung, sowie in der Größenabweichung des jeweiligen Kiefers einordnen (Howaldt & Schmelzeisen, 2016, S. 253). Die Benennung sagittaler Störungen erfolgt nach folgendem Prinzip: mandibuläre/maxilläre Pro-/Retrognathie. Vertikale oder transversale Störungen werden folgendermaßen benannt: transversale/vertikale Hypo-/Hyperplasie des Ober-/Unterkiefers. Generelle Größenanomalien der Kiefer in alle anatomischen Richtungen werden als mandibuläre/maxilläre Mikro-/Makrognathie bezeichnet. Zusätzlich gibt es viele weitere Sonderformen innerhalb dieser Benennungsschemata, z.B. wenn zusätzlich die Symmetrie gestört ist.

Die Beziehung der Kiefer zueinander wird auch in transversale, sagittale und vertikale Abweichungen unterteilt. Transversale Abweichungen reichen von bukkaler Nonokklusion über Bukkal-Okklusion, Norm-Okklusion, seitlicher Kopfbiss, seitlicher Kreuzbiss, Lingual-Okklusion bis hin zu lingualer Nonokklusion (Kahl-Nieke, 2010, S. 91). Diese Begriffe können zudem mit ein- oder beidseitig ergänzt werden. In der Sagittalen ist die Klassifikation nach Angle gängig, welche die Bisslage anhand der ersten bleibenden Molaren bestimmt. Diese beinhaltet die Neutralokklusion (Klasse I), die Distalokklusion (Klasse II) mit Unterteilung in Labialstand (II/1) oder Steilstand (II/2) der Oberkiefer-Frontzähne und die Mesialokklusion (Klasse III) (Holtgrave, 1986, S. 20).

In der Vertikalachse wird der Tiefbiss vom offenen Biss unterschieden, wobei letzterer nochmal in frontal, seitlich oder zirkulär unterschieden werden kann (Kahl-Nieke, 2010, S. 93).

1.4. Therapieplanung

1.4.1. Indikationsstellung und zeitlicher Ablauf

In die Therapie von Dysgnathien können verschiedene Fachgebiete involviert sein. Neben den Hauptfeilern Kieferorthopädie und Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie können konservierende Zahnheilkunde und zahnärztliche Prothetik, sowie Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde, Logopädie und Psychologie eine Rolle spielen (Mast & Ehrenfeld, 2011, S. 238). Indikationen für die Behandlung einer Dysgnathie können funktionelle Verbesserungen des craniomandibulären Systems und Prävention sekundärer Folgezustände, wie z.B. parodontale Schäden oder craniomandibuläre Dysfunktion, sein. Aber auch der Wunsch nach subjektiver ästhetischer Korrektur mit einhergehender Verbesserung der psychischen Gesundheit stellen eine Indikation dieser elektiven Therapie dar (Glover et al., 2022). Bei Fällen, die rein kieferorthopädisch nicht mehr therapiert werden können, wird dann die chirurgische Indikation gestellt und ein interdisziplinärer Behandlungsplan erarbeitet. Meist sind dies Patient:innen, bei denen eine skelettale Dysgnathie nicht mehr durch gezielte Wachstumssteuerung der Kiefer ausgeglichen werden kann.

Wenn nach intensivem Beratungsgespräch feststeht, dass neben der orthodontischen Therapie eine Operation erfolgen soll, beginnt in der Regel die Kieferorthopädie mit der prächirurgischen Behandlung. Im Gegensatz zur sonstigen Korrektur des Bisses und der Kieferrelation besteht diese Vorarbeit aus einer Dekompensation der Zahnfehlstellungen. Dies kann dazu führen, dass die Position der Kiefer zum Schädel und die Okklusion zwischen den Zahnreihen noch ungünstiger als beim Ausgangszustand werden (Hausamen et al., 2011, S. 366). Jedoch ermöglicht diese Herangehensweise die direkte chirurgische Korrektur zum gewünschten Ergebnis. Kieferchirurgische Vorbehandlungen sind z.B. die chirurgisch unterstützte Gaumennahterweiterung oder die Extraktion der Weisheitszähne, wenn diese im Bereich der Osteotomielinien liegen (Glover et al., 2022). Die Umstellungsosteotomie selbst erfolgt nach diesen Vorbehandlungen und in der Regel erst nach dem Abschluss der Wachstumsphase. Für den optimalen Zeitpunkt sollte das ungefähre skelettale Alter mit ausführlicher Anamnese und Befunderhebung oder mit einer Handröntgenaufnahme bestimmt werden. Auch die Röntgenstrahlung freie Schätzung des skelettalen Alters ist mittels Ultraschall heutzutage gut

möglich und angemessen präzise (Rachmiel et al., 2017). In seltenen Fällen kann die Operation auch schon vor dem Wachstumsabschluss erfolgen, z.B. bei Beeinträchtigung vitaler Funktionen bei syndromalen Erkrankungen mit kraniofazialen Fehlbildungen (Hausamen et al., 2011, S. 367). Die orthodontische Behandlung ist dann meistens zweitrangig, kann aber auch noch im Anschluss an die chirurgische Therapie erfolgen.

1.4.2. Anamnese und Befundung

Zunächst ist eine spezielle Anamnese durchzuführen, die unter anderem die Ätiologie der Fehlbildung, bereits durchgeführte Behandlungen, sowie Beschwerden und Motivation des/der Patient:in erfragen soll. Auch weitere Erkrankungen müssen abgeklärt werden. So können z.B. immunsupprimierende Erkrankungen oder schwere psychiatrische Erkrankungen eine Kontraindikation für elektive Eingriffe darstellen (Howaldt & Schmelzeisen, 2016, S. 272). Die Kommunikation über Erwartungen und tatsächliche medizinische Möglichkeiten bzw. die gemeinsame Zielformulierung sind ebenfalls ein wichtiger Bestandteil des ersten Patientengesprächs und fördern die Compliance.

Daran schließt sich die klinische Untersuchung mit allgemeiner körperlicher Befundung und intraoralem Status an. Beim Zahnstatus müssen eventuelle kariöse und parodontale Läsionen, sowie intraossäre Pathologien, die eine Behandlung erfordern würden, ausgeschlossen werden. Hierzu ist eine Röntgenuntersuchung z.B. in Form eines Orthopantomogramms unerlässlich (Mast & Ehrenfeld, 2011, S. 238). Da Dysgnathiepatient:innen oft auch an funktionellen Beschwerden leiden ist ein ausführlicher Funktionsstatus ebenfalls durchzuführen, um die eventuellen Störungen von Kaumuskulatur und Kiefergelenken ausfindig zu machen und vor einer Operation zu therapieren.

Danach werden Abformung der Zahnreihen genommen, um damit Situations- bzw. Arbeitsmodelle aus Gips für die Modellanalyse und -planung herzustellen. Zusätzlich ist eine Registrierung der zentrischen Okklusion mit Wachsplatten oder Silikon für die spätere Einordnung der Gipsmodelle im Artikulator nötig. Diese Zentrik ist definiert als diejenige Okklusion, bei der sich die Kondylen in physiologischer Relation kranio-ventral in den Gelenkgruben befinden (Strub et al., 2004, S. 115). Damit verbunden ist ein Gesichtsbogenregistrat für die schädelbezügliche Einordnung der Modelle im Artikulator. Als Bezugsebene wird hier klassischerweise die Frankfurter Horizontale verwendet, welche eine anatomisch gedachte Ebene ist, die durch den tiefsten Punkt des Orbitarandes und durch den

höchsten Punkt des knöchernen Porus acusticus externus verläuft (Lehmann & Hellwig, 2005, S. 49).

Zur speziellen Röntgendiagnostik zählen das schon oben erwähnte Orthopantomogramm und ein Fernröntgenseitenbild. Als Alternative kann eine Digitale Volumentomografieaufnahme des Viscerocraniums die Einzelaufnahmen ersetzen. Der Vorteil der dreidimensionalen Darstellungsmöglichkeit und damit der höheren Aussagekraft wird hier dem Nachteil der etwas höheren Strahlenbelastung aufgewogen (Hausamen et al., 2011, S. 368). Die Bildgebungen werden dann für eine kephalometrische Analyse verwendet. Dafür werden in der MKG-Chirurgie des Universitätsklinikums Halle die Messungen und Normwerte, basierend auf Untersuchungen erwachsener Europäer, von A. M. Schwarz verwendet (Schwarz, 1959). Hierbei werden Kiefergröße und -position in Relation zur Schädelbasis in der Sagittalebene vermessen und mit der Norm verglichen.

Des Weiteren wird standardmäßig ein Fotostatus erstellt, der aus einer Profil- und einer En-Face-Aufnahme, sowie aus intraoralen Fotos besteht. An der MKG-Chirurgie der Uni-Halle beinhaltet die Analyse der Fotos den Profilverlauf nach Brückl (Brückl, 1956) zur Beurteilung des Gesichts in der Sagittalen, die Kollmannschen Proportionen zur Bewertung der frontalen Relation von oberem, mittlerem und unterem Gesichtsdrittel (Kollmann, 1910), sowie das Lippenprofil nach Ricketts, welches ein ergänzendes Mittel zur Beurteilung des Weichgewebsprofils darstellt (Ricketts, 1960).

Die Modellanalyse ist der letzte Schritt der Diagnostik vor der Planung. Hierfür werden Hartgipsmodelle der Kiefer mit Bissregistrat und Gesichtsbogen schädelbezüglich und in korrekter Relation zueinander im Mittelwertartikulator eingeordnet. Dies erlaubt die genaue Beurteilung der Kieferrelation, der Zahnbogenform und -größe, der Einzelzahnstellungen und stellt die vorbereitende Maßnahme für die darauffolgende Modelloperation dar.

1.4.3. Therapieoptionen und -verfahren

Je nach Form der Dysgnathie kann nun eine passende Osteotomiemethode ausgewählt werden. Meistens werden Ober- und Unterkiefer simultan im Sinne einer bignathen Operation korrigiert, da Fehlstellungen eines Kiefers selten allein eine Dysgnathie verursachen (Hausamen et al., 2011, S. 366). Auf die Erläuterung der vielen verschiedenen operativen Techniken zur Dysgnathiekorrektur im Unterkiefer wird hier verzichtet, da in dieser Studie nur der Oberkiefer analysiert wurde.

Bei Fehlbissen, die sich auf einzelne Abschnitte des Oberkieferzahnbogens beschränken, können diese Bereiche einzeln operiert werden, ohne dass der gesamte Oberkiefer mobilisiert werden muss. Diese Techniken werden bei intramaxillär verlaufender Osteotomielinie als Blockosteotomie und bei basal verlaufender Osteotomielinie als Segmentosteotomie bezeichnet (Mast & Ehrenfeld, 2011, S. 255). Diese Blöcke oder Segmente werden meist bei anterioren Verlagerungen von Eckzahn zu Eckzahn und bei posterioren Verlagerungen vom ersten Prämolaren zum letzten Molaren gebildet.

Die Standardmethode zur Verlagerung des Oberkiefers ist jedoch die LeFort-1-Osteotomie. Bei Mobilisierung entlang der von LeFort beschriebenen Frakturlinie (Moorhead & Serra, 2022) kann der Oberkiefer in allen drei Raumebenen bewegt werden. Eine oszillierende Knochensäge wird basal durch die fazialen Kieferhöhlenwände und lateralen Nasenwände geführt. Anschließend wird das Nasenseptum unten vom knöchernen Nasenboden mit Säge oder Meißel abgetrennt und der Oberkiefer ebenfalls mit einem Meißel vom Pterygoid gelöst. Nun kann die sog. „Down Fracture“ erfolgen. Hierbei wird der Oberkiefer entweder digital oder mit Hilfsinstrumenten z.B. paarige Mobilisationszangen vom Gesichtsschädel abgebrochen (Dabir & Vahanwala, 2021, S. 1524–1526). Zusätzlich zur LeFort-1-Osteotomie kann der Oberkiefer auch segmentiert werden. Bei einer Zweiteilung wird der Kiefer paramedian zur Gaumennaht geteilt. Dies empfiehlt sich, wenn der Oberkiefer transversal erweitert werden muss. Eine Dreiteilung ist ebenfalls gut möglich. Hier wird der Oberkiefer in Y-Form gespalten. Die Trennung erfolgt meist zwischen Eckzahn und erstem Prämolaren oder seitlichem Schneidezahn und Eckzahn. Dies ermöglicht eine chirurgische Nivellierung der Zahnbögen. Um die Verlagerung nun durchzuführen, müssen je nach Verlagerungsrichtung bestimmte Faktoren beachtet werden. Eine sagittale Verlagerung nach anterior ist technisch meist unproblematisch, jedoch in ihrem Ausmaß durch die Dehnung des Gefäß-Nerven-Bündels (A. palatina major und N. palatinus major) begrenzt. Eine sagittale Verlagerung nach posterior ist selten erforderlich und macht eine Einkürzung der Processus pterygoidei erforderlich. Bei Verlagerungen nach kranial muss gemäß der angestrebten Strecke Knochen reduziert und das Nasenseptum eingekürzt werden, um Deviationen zu vermeiden. Im Gegensatz dazu sollte bei größeren Verlagerungen nach kaudal eine autologe Knochentransplantation vor allem im Bereich der Kieferhöhlenwände erfolgen (Mast & Ehrenfeld, 2011, S. 254). Die geplante Verlagerung wird intraoperativ mit Hilfe eines Bissregistrats aus Kunststoff (sog. Splint) übertragen. Es empfiehlt sich, Ober- und Unterkiefer mit eingebrachtem Splint zu verschnüren, um die geplante Relation zu sichern. Wenn der Unterkiefer nun in zentrischer Kondylenposition ist, steht der Oberkiefer in der geplanten Position im Schädel und kann osteosynthetisch befestigt werden. Bei bignathen Operationen ist

das Prinzip ähnlich. Es sollte jedoch beachtet werden, dass für die Verlagerung von Ober- und Unterkiefer jeweils ein Splint notwendig ist. Klassischerweise wird mit dem Oberkiefer begonnen (Kauffmann, 2021; Naran et al., 2018), welcher dann mit dem sog. Zwischensplint eingestellt wird. Dieser Zwischensplint wird in der Modelloperation mit dem nicht operierten Gegenkiefer registriert. Erst bei Verlagerung des Unterkiefers enthält der Zielsplint die definitive Relation der Kiefer. Falls mit der Verlagerung des Unterkiefers begonnen wird, müssen die Splinte umgekehrt angefertigt und in der Operation verwendet werden. Dieses sog. „mandible-first“ Konzept erfreut sich wachsender Beliebtheit, begründet durch verschiedene plausible Theorien. Objektive Genauigkeit und Zuverlässigkeit müssen jedoch noch weiter erforscht werden (Borba et al., 2016).

Nach erfolgter Verlagerung müssen die Kiefer, ähnlich zu traumatologischen Prinzipien, wieder befestigt und ruhiggestellt werden. Früher war die lagestabile Adaption mit Drahtnähten gängig. Zur zuverlässigen Immobilisation musste zusätzlich eine intermaxilläre Verschnürung für sechs bis acht Wochen angelegt werden (Hausamen et al., 2011, S. 376–377). Heutzutage können die Kiefer mit Osteosyntheseplatten aus Titan wieder befestigt werden. Dabei kann eine intermaxilläre Verschnürung weggelassen werden, wodurch der Patientenkomfort erhöht wird (Kauffmann, 2021). In der Mund-, Kiefer- und Plastischen Gesichtschirurgie des Universitätsklinikums Halle wurde hierbei ein Mittelweg gewählt. Die Osteosynthesen wurden mit Miniplatten aus Titan durchgeführt und die Kiefer zusätzlich für ca. drei Wochen intermaxillär mit Gummis verschnürt. Dabei geht zwar der Vorteil des höheren Patientenkomforts teilweise verloren, allerdings bringt die Kombination aus moderner Plattenosteosynthese und Verschnürung eine sehr gute postoperative Stabilität und damit eine bessere Sicherung der erreichten Kieferposition. Bei den Verschnürungen war der finale OP-Splint nicht mehr zwischen die Zahnreihen eingegliedert, außer wenn der Oberkiefer in der OP zusätzlich geteilt wurde.

Perioperativ sollte zudem eine Infektionsprophylaxe mit einem Breitbandantibiotikum durchgeführt werden, da durch den Eingriff große Knochenwundflächen entstehen (Mast & Ehrenfeld, 2011, S. 245). Auch postoperativ wird mit regelmäßigen Chlorhexidin-Mundspülungen infektionsprophylaktisch vorgegangen. Postoperative Schmerzen und eventuelle Schwellungen sollten entsprechend analgetisch und antiphlogistisch therapiert werden (Hausamen et al., 2011, S. 415). Zur Vorbeugung von Schwellungen empfiehlt sich auch eine lokale Kühlung der Kiefer- und Gesichtsregion mit Kühlakkus oder Hilotherapie.

Da die intraoralen Zugänge mit resorbierbarem Nahtmaterial erfolgen, muss keine Nahtentfernung durchgeführt werden, außer der/die Patient:in wünscht dies. Ein

postoperatives DVT wird nach ca. zwei Wochen zur Begutachtung und Dokumentation des Operationsergebnisses angefertigt. Die Osteosyntheseplatten können nach ca. einem Jahr in Intubationsnarkose entfernt werden. An die skelettale Korrektur der Kieferbasen schließt sich die kieferorthopädische Nachbehandlung mit Feinjustierung der Zahnbögen an.

1.4.4. Konventionelle Operationsplanung

Die konventionelle Planung wird im Artikulator (Amann Girschbach Artex® TK) mit den vorbereiteten Gipsmodellen in der Universitätsklinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer- und Plastische Gesichtschirurgie des Universitätsklinikums Halle folgendermaßen durchgeführt.

Um das Modell der präoperativen Situation zu erhalten, werden diese vorher mit Doublersilikon dubliert und daraus Arbeitsmodelle für die Modelloperation erstellt. Je nachdem, ob Ober-, Unter- oder beide Kiefer operiert werden sollen, werden die jeweiligen Modelle parallel zu ihrer Okklusionsebene in der Höhe reduziert und die weggeschliffenen Anteile mit einem kongruenten Gipssockel ersetzt. An die Seiten von Modell und Sockel werden Markierungen gesetzt, die bei der späteren Positionierung des Modells eine metrische Einordnung der Verlagerung erlauben. Nach diesen Vorbereitungen findet die eigentliche OP-Simulation statt.

Im Artikulator befinden sich zunächst das Ausgangsmodell des Unterkiefers und der noch freie Gipssockel für das Oberkiefermodell. Nun wird das Arbeitsmodell des Oberkiefers in die gewünschte Position im Artikulator eingeordnet. Die Positionierung erfolgt hier so, dass die in der Befundung ermittelten Fehlstellungen ausgeglichen werden. Dieser Prozess ist stark von der Erfahrung und Übersicht des/der Ausführenden abhängig. Soll der Oberkiefer intrudiert, also nach kranial verlagert werden, muss der Sockel entsprechend reduziert werden, damit das Oberkiefermodell Platz hat. Befindet sich das Oberkiefermodell in der korrekten Position wird dieses am freien Sockel mit zahntechnischem Modellierwachs fixiert. Wird nur der Oberkiefer operiert, kann nun mit einem durchsichtigen Polymethylmethacrylat der Splint hergestellt werden. Soll der Unterkiefer ebenfalls operiert werden, wird zunächst ein rot gefärbte Zwischensplint erstellt. Danach kann das Ausgangsmodell des Unterkiefers aus dem Artikulator genommen werden und der Sockel für das Unterkiefer-Planungsmodell eingesetzt werden. Nun wird der Unterkiefer in die gewünschte Position gebracht. Idealerweise ist diese in optimaler Okklusion mit dem Oberkiefer. Der Unterkiefer wird dann ebenfalls mit Modellierwachs an seinem Sockel fixiert und der durchsichtige finale Splint zwischen den beiden verschobenen Modellen hergestellt.

Diese Modelloperation sollte am besten von dem/der Behandler:in selbst und nicht von der Zahntechnik durchgeführt werden, damit eventuelle Missverständnisse in der Richtung und Dimension der Kieferbewegungen vermieden werden können.



Abbildung 1: Foto einer konventionellen Modell-Operation im Artikulator

1.4.5. Virtuelle Operationsplanung

Obwohl in dieser Studie nur konventionell geplante Fälle analysiert wurden, soll die virtuelle Operationsplanung kurz erläutert werden, da Dysgnathiechirurgie unterstützende CAD/CAM-Techniken sich in vielen Kliniken, wie auch in der Universitätsklinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer- und Plastische Gesichtschirurgie des Universitätsklinikums Halle, mittlerweile etabliert haben (Bai et al., 2012; Heufelder et al., 2017; Kauffmann, 2021; Zinser et al., 2012). Zudem werden Funktionen eines Programms zur virtuellen Planung auch in dieser Studie für den Analyse-Workflow verwendet.

In solche Computer-Programme kann ein 3D-Röntgen-Datensatz des Gesichtsschädels geladen werden, aus dem dort eine Oberflächendarstellung der knöchernen Strukturen errechnet wird. In diesem virtuellen Modell des Gesichtsschädels können nun Osteotomielinien, wie in der OP selbst simuliert und die Kiefer dreidimensional neu positioniert werden. Die Programme können

die durchgeführt Verlagerung dabei genau quantifizieren. Gleichzeitig ermöglichen sie dem/der Behandler:in die geplante neue Position kephalometrisch zu bewerten. Zudem gibt es Funktionen, die mit einem Gesichtsscan die Weichgewebsänderungen durch die Kieferverlagerung simulieren. Dies ermöglicht den Patient:innen eine ungefähre Vorstellung vom postoperativen Ergebnis zu bekommen, was gerade bei so einem großen elektiven Eingriff von hoher Bedeutung sein kann. Allerdings befinden sich diese Vorhersagen gerade im dreidimensionalen Raum noch im Entwicklungsstadium und sollten mit Vorsicht genossen werden (Aboul-Hosn Centenero & Hernández-Alfaro, 2012; Demirsoy & Kurt, 2022; Elshebiny et al., 2019).

Um die geplante Kieferposition nun intraoperativ zu übertragen, kann im Programm analog zur konventionellen Planungsmethode ein Splint geplant werden, indem Scans der Zahnreihen in den Schädel eingeordnet werden. Die Splinte können dann im 3D-Drucker hergestellt werden. Jedoch ermöglicht die Oberflächendarstellung des Schädels auch sog. Patientenspezifische Implantate (PSI) zu erstellen. Dies sind vorgefertigte Titan-Platten, die in Kombination mit Bohrschablonen die Position, in der der Kiefer wieder befestigt werden soll, in ihrer Form vorgeben. Das hat zum einen den Vorteil, dass im Gegensatz zum Splint die vertikale Verlagerung vorgegeben wird und das Erreichen der Planung in dieser Dimension deutlich vereinfacht (Heufelder et al., 2017) und nicht mehr von der intraoperativen Position des Unterkiefers abhängig ist (Li et al., 2017). Zum anderen können auch Translationen der Kiefer über große Strecken besser positioniert und befestigt werden (Kraeima et al., 2020). Nachteile der PSIs bei Umstellungsosteotomien sind höhere Kosten und längere Anfertigungszeit durch ein zugelassenes Fräszentrum im Vergleich zum 3D-gedruckten Splint (Heufelder et al., 2017). Zudem ist ein Abweichen von der Planung, sollte sich der/die Behandler:in während der OP dazu entscheiden, nur noch schlecht möglich (Karaxha et al., 2021).

2. Zielstellung

2.1. Primäres Ziel

Ziel dieser Studie war es zu ermitteln, wie exakt konventionell geplante splintbasierte Umstellungsosteotomien des Oberkiefers umgesetzt werden. Dabei sollte der volle Umfang des Unterschieds zwischen Planung und Ergebnis möglichst überschaubar quantifiziert werden. Um dies zu erreichen, musste nach zwei Grundsätzen analysiert werden. Erstens musste die Analyse im dreidimensionalen Raum erfolgen. Zweitens sollte der Oberkiefer als Einheit behandelt werden, um nicht mehrere einzelne Messpunkte auf der Zahnreihe auswählen zu müssen.

Viele Studien, die sich ebenfalls mit der Genauigkeit von konventionell geplanten Oberkiefer-Umstellungsosteotomien befassten, analysierten die Umsetzung nur in der Zweidimensionalen (Choi et al., 2009; Govaerts et al., 2018; Park & Posnick, 2013; Sharifi et al., 2008), oder ermittelten die Unterschiede zwischen Planung und Ergebnis eines Patientenfalls in Form mehrerer Vektoren zwischen kongruenten Zahnhöckern- und spitzen oder anderen Referenzpunkten (Dreiseidler & Lentzen et al., 2017; Kwon et al., 2014; Ritto et al., 2018; Schouman et al., 2015).

Um dies zu umgehen, wurde in dieser Studie eine dreidimensionale Analyse durchgeführt und der Unterschied zwischen geplanter und erreichter Oberkieferposition mittels den Eulerschen Winkeln und linearen Translationen in allen drei Raumachsen quantifiziert. Es ergeben sich pro Unterschiedsanalyse also nur drei Rotations- und drei Translationswerte, welche den Positionsunterschied des Oberkiefers, als Ganzes betrachtet, akkurat beschreiben. Diese Methode der Quantifizierung hat sich in modernen Planungsprogrammen für Umstellungsosteotomien (wie z.B. dem IPS CaseDesigner® der Firma KLS Martin) etabliert und wurde auch bereits zur dreidimensionalen Genauigkeitsanalyse von virtuell geplanten (Baan et al., 2016; Rückschloß et al., 2019) als auch konventionell geplanten (Lartzien et al., 2019) Umstellungsosteotomien des Oberkiefers erfolgreich verwendet.

2.2. Sekundäres Ziel

Neben dem recht offensichtlichen Faktor, dass bei der Operation des Oberkiefers die geplante Verlagerung nicht exakt umgesetzt werden kann, gibt es im Prozess der konventionellen Planung eine weitere Fehlerquelle, die sich auf den Unterschied zwischen gewollter und erreichter Oberkieferposition auswirken könnte.

Um die Planungsmodelle in den Artikulator schädelbezüglich einzuordnen, wird ein Gesichtsbogenregistrat angefertigt, welches die Position der Zahnreihen relativ zu einer arbiträren Schädelebene auf die Modelle im Artikulator überträgt. Um eine solche Ebene bei Patient:innen aufzuspannen, werden klassischerweise die Poren und die Glabella verwendet. Da beim Anlegen des Gesichtsbogens an diese Orientierungspunkte Fehler, ausgelöst durch ungenügende Compliance oder nicht sachgemäße Anwendung, passieren können, entspricht die Positionierung der Modellzahnreihen im Artikulator gegebenenfalls nicht exakt der wahrheitsgemäßen Position im Schädel des/der Patient:in. Auch eine ungenaue Übertragung des Gesichtsbogenregistrats auf die Modelle durch die Zahntechnik kann dazu führen, dass die Zahnreihen nicht in realer Position im Artikulator für die Modelloperation eingeordnet sind.

Das Problem, das sich hieraus für die geplanten Verlagerung, und wie diese in der Operation umgesetzt wird, ergibt, soll mit folgendem Beispiel erläutert werden: Bei der Planung im Artikulator wird davon ausgegangen, dass die Modelle korrekt schädelbezüglich positioniert sind. Nun wird beispielsweise die Zahnreihe entlang der Sagittalachse nach anterior verlagert und diese Bewegung auf den OP-Splint übertragen (s. Abbildung 2). Wenn jedoch bei der Gesichtsbogenübertragung eine fälschliche Rotation der Zahnreihe in der Horizontalebene registriert wurde, wird durch den OP-Splint bei der Operation keine reine Verlagerung nach anterior vorgegeben, sondern eine um die fälschliche Rotation verdrehte lineare Verlagerung (s. Abbildung 3).

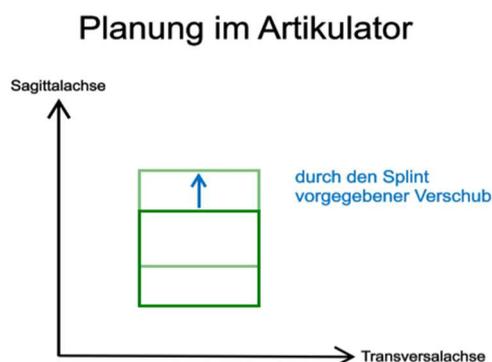


Abbildung 2: Beispielhaftes Schema der Planung im Artikulator in einem Koordinatensystem – Eigens angefertigte Grafik

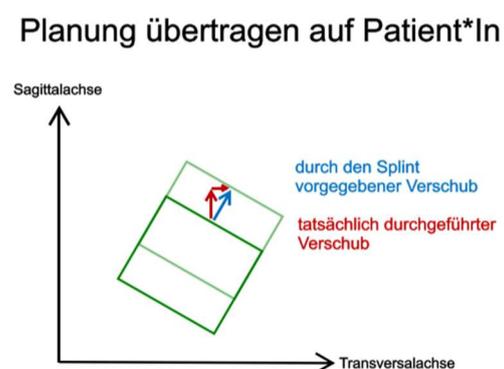


Abbildung 3: Beispielhaftes Schema der Planung übertragen auf den/die Patient:in bei fehlerhaft einartikulierten Modellen – Eigens angefertigte Grafik

Das heißt für die Umsetzungsgenauigkeit der Planung, dass selbst wenn die in der Modelloperation geplante Verlagerung mit dem Splint in der tatsächlichen OP korrekt umgesetzt werden würde, würde die eigentlich gewollte Bewegung im Schädel des/der Patient:in nicht

durchgeführt werden, da ein Übertragungsfehler der Zahnreihenposition relativ zum Patientenschädel stattgefunden hat.

Um die Auswirkung dieses Phänomens auf die Umsetzungsungenauigkeiten zwischen Planung und Ergebnis zu ermitteln, wurde der Unterschied zwischen der auf den Schädel übertragenen Planung und dem OP-Ergebnis zusätzlich ermittelt und mit dem Unterschied zwischen Planung im Artikulator und OP-Ergebnis verglichen. Die Differenzen zwischen diesen Unterschiedsanalysen geben dann Hinweise darauf, inwiefern sich die falsch übertragene Planung auf die gesamte Operation auswirkt.

3. Material und Methoden

3.1. Patientenrekrutierung

Zu Beginn wurden 62 Patientenfälle mit Umstellungsosteotomien der Universitätsklinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer- und Plastische Gesichtschirurgie des Universitätsklinikums Halle aus dem Zeitraum 2018-2021 begutachtet und anhand der folgenden Eignungskriterien für diese Studie gefiltert.

Zunächst wurden 17 Fälle ausgeschlossen, bei denen allein der Unterkiefer operiert wurde. Bei allen anderen Fällen wurde der Oberkiefer isoliert oder im Rahmen einer bimaxillären Operation behandelt. Ein weiteres Einschlusskriterium war, dass die Operationsplanung konventionell mittels Modell-OP stattgefunden haben musste. Acht Fälle entsprachen nicht diesem Kriterium, da beispielsweise virtuell geplant und mit patientenspezifischen Implantaten operiert wurde. Des Weiteren mussten acht Patient:innen ausgeschlossen werden, bei denen der Oberkiefer zusätzlich zwei- oder dreigeteilt wurde. Ein weiteres Einschlusskriterium war das Vorhandensein von prä- und postoperativem DVT in gut analysierbarer Qualität. Bei vier Fällen konnten diese Kriterien nicht erfüllt werden. Analog dazu mussten beide Oberkiefer-Planungsmodelle, sowie ein Unterkiefer-Situationsmodell vorhanden und in gutem Zustand sein. Zudem mussten innerhalb eines Patientenfalls bei den Oberkiefermodellen gleiche Artikulatorplatten verwendet werden, da sonst die Überlagerung dieser im späteren Analyse-Workflow fehlerbehaftet wäre. Drei weitere Patient:innen mussten deswegen ausgeschlossen werden. Ein weiterer Fall wurde nicht miteinbezogen, da die Zahnreihe mit einer Teilprothese komplettiert war. Ein letzter Fall wurde ausgeschlossen, da intraoperativ bewusst von der Modellplanung abgewichen wurde. Keiner der bis hierhin übrig gebliebenen Fälle entsprach einer Operation zur Korrektur eines Rezidivs nach vorangegangener Umstellungsosteotomie.

20 Patientenfälle konnten anhand dieser Ein- und Ausschlusskriterien als analysierbar bezeichnet und in diese retrospektive Studie aufgenommen werden. Bei allen Fällen wurden Therapieplanung und Modelloperation von der gleichen Behandlerin durchgeführt. Die Behandlerin führte die Umstellungsosteotomien ebenfalls selbst durch. Bei 13 der 20 Fälle wurden Ober- und Unterkiefer im Sinne einer bignathen Umstellungsosteotomie operiert. Bei 7 der 20 Fälle wurde eine monognathe Umstellungsosteotomie des Oberkiefers durchgeführt.

Die erhobenen Daten, bestehend aus Röntgenbildern in Form von DICOM-Dateien und physischen Planungsmodellen der Zahnreihen aus Gips, sind Teil des üblichen Ablaufs einer kombiniert kieferorthopädisch-kieferchirurgischen Dysgnathithherapie und lagen zugriffsberechtigt in der Einrichtung bereit. Die Patient:innen mussten also keinen zusätzlichen

Befundungen unterzogen werden. Daher wurde auf eine Aufklärung bzw. eine Einwilligungserklärung verzichtet. Nach der Selektierung wurden alle ausgeschlossenen Daten gelöscht. Die zur Analyse freigegebenen Daten wurden anonymisiert und jedem Patientenfall eine zufällig gewählte zweistellige Nummer zwischen 01-20 zugeteilt. Die Studie wurde von der Ethik-Kommission der Medizinischen Fakultät der Universität Halle-Wittenberg (Bearbeitungsnummer: 2021-090) genehmigt.

3.2. Datengewinnung

3.2.1. Schädel-DVTs

Die knöchernen Gesichtsschädel der Patient:innen wurden mittels digitaler Volumentomographie dreidimensional digitalisiert. Die präoperative Aufnahme wurde maximal 51 Tage und im Mittel 19 Tage vor der Operation durchgeführt. Die postoperative Aufnahme wurde maximal 32 Tage und im Mittel 17 Tage nach der OP durchgeführt. Die beiden Röntgentermine lagen dabei maximal 72 Tage und im Mittel 36 Tage auseinander. In dieser Zeit finden bei jährlich 4% Boneremodelling der Kompakta (Lüllmann-Rauch, 2009, S. 155) keine nennenswerten Änderungen statt, die die digitale Überlagerung der Jochbeine (s. folgende Kapitel) stören könnten. Ähnliches gilt für die Zahnreihen. Die physiologische Zahnwanderung beträgt ca. 5 mm im Laufe des Lebens (Gühning & Barth, 1992, S. 212) und kann über diesen Zeitraum vernachlässigt werden. Zudem wird bei der Mehrheit der Patientenfälle die Zahnreihe nach prächirurgisch erfolgter kieferorthopädischer Dekompensation durch eine Multibandapparatur stabilisiert.

Die DVTs wurden in der Röntgenabteilung der Universitätsklinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer- und Plastische Gesichtschirurgie des Universitätsklinikums Halle am Standort Magdeburger Str. 16 durch ausgebildete medizinisch-technische Radiologieassistent:innen durchgeführt. Die Scans wurden mit dem Gerät „Veraview X800“ (SN X800-90201-501) der Firma J.MORITA MFG CORP. aufgenommen.

Die 3D-Aufnahmen wurden in Form von DICOM-Datensätzen zur weiteren Verarbeitung im Analyse-Workflow exportiert und mit dem IMV Anonymizer® (Version 1.0) der Firma „Imaging Medical Vision“ anonymisiert.

3.2.2. Modellscans

Um die physischen Gipsmodelle der konventionellen Planung für die Umstellungsosteotomien zu digitalisieren, mussten diese gescannt werden. Hierfür wurde der „EinScan-Pro+“ von SHINING 3D® mit zugehöriger Software (Version 3.1.0.4) verwendet. Nach Herstellerangaben bietet dieser eine Scangenauigkeit von 0,05 mm. Der Scanner und zugehörige Hardware wurde freundlicherweise durch das Dorothea-Erxleben-Lernzentrum des Universitätsklinikums Halle bereitgestellt. Es wurde jeweils ein Scan des Oberkiefer-Ausgangsmodells, des Oberkiefer-Planungsmodells und des Unterkiefer-Ausgangsmodells für jeden der 20 Patientenfälle durchgeführt. Da der Scanner die Modelle auf einem Rotationstisch platziert scannt, konnten mit einem Durchlauf nicht direkt alle Flächen gescannt werden. Daher wurden drei Durchläufe durchgeführt, bei denen die Modelle auf verschiedenen Seiten lagen, um dem Scanner die Erfassung aller Seiten zu ermöglichen. Zudem musste für die schwarzen Artikulatorplatten ein weiß mattierendes Scanspray verwendet werden, da die Scannerkameras schwarz-glänzende Flächen schlecht aufnehmen können. Das „3D Mattierungs-Spray“ der Firma R.v.Klier Werkstoffprüftechnik versichert Oberflächendetails kleiner 0,2 mm nicht zu verdecken und wurde vor dem Scan der Artikulatorplatten gemäß der Herstellerangaben aufgetragen. Die aufgenommenen Scans wurden danach automatisch im Programm zu einer Aufnahme übereinandergelegt (s. Abbildung 4). Nach erfolgreichem Scan der Modelle wurden diese als geschlossener STL-Datensatz zur weiteren Verwendung im Analyse-Workflow exportiert.

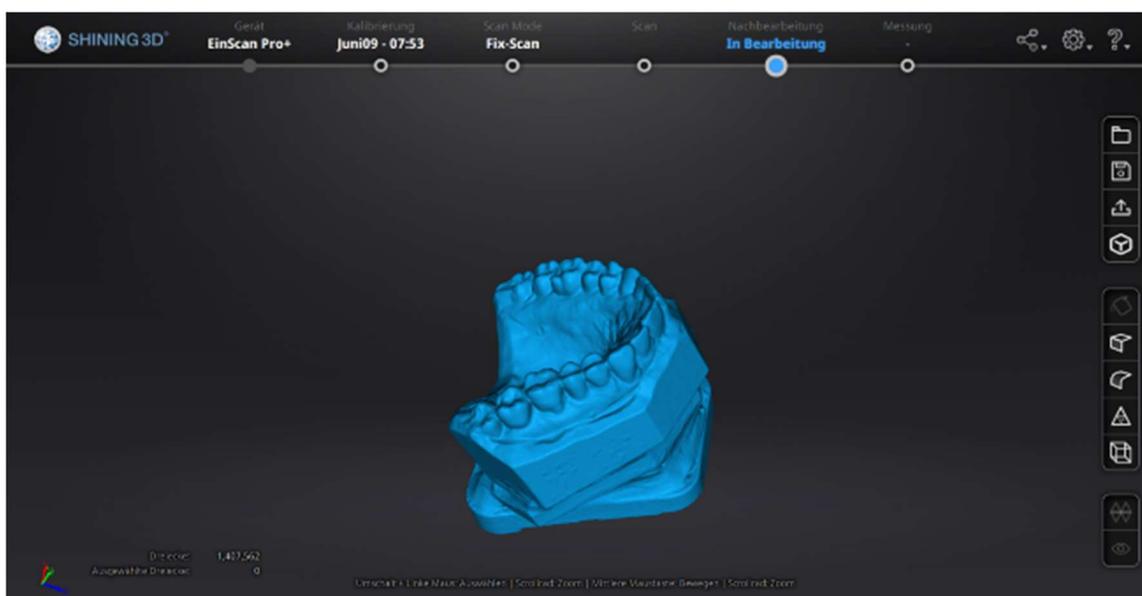


Abbildung 4: Das fertig gescannte Modell im geschlossenen STL-Format – Screenshot aus der SHINING 3D® Software

3.3. Vorbereitung des Analyse-Workflows im IPS CaseDesigner®

Um die DICOM-Datensätze der Schädelaufnahmen für die Analyse brauchbar zu machen, mussten diese in ein digitales 3D-Oberflächenformat konvertiert werden. Analog zu den Modellscans wurde die Konvertierung in das STL-Format durchgeführt. Hierfür wurde der IPS CaseDesigner® Version 2.1 der Firma KLS Martin verwendet.

3.3.1. Vor- und Nachteile des IPS CaseDesigners®

Die Software bietet mehrere ausschlaggebende Vorteile für die Konvertierung der DICOM-Datensätze. Zum einen können die Schädel nochmal im Programm nach der „natural head position“ gemäß der Frankfurter Horizontalen ausgerichtet werden. So ist man nicht auf eine perfekte Ausrichtung des Kopfes während der Röntgenaufnahme angewiesen. Zum anderen ermöglicht die Software das automatisierte Übereinanderlagern der Modell-Zahnreihe auf die Zahnreihe der Röntgenaufnahme. Dies hat den Vorteil, dass Artefakte auf den Zähnen durch z.B. Multibandapparaturen (s. Abbildung 5) herausgefiltert werden können und so ein problemloses Übereinanderlagern der Zahnreihen im späteren Analyse-Workflow ermöglicht wird. Der Nachteil daran ist jedoch, dass beim Übereinanderlegen kleine Positionierungsfehler passieren können, die die Richtigkeit der späteren Ergebnisse kompromittieren.

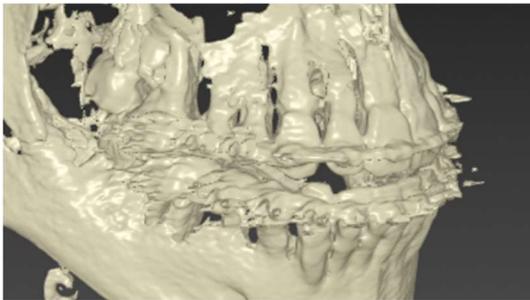


Abbildung 5: Zahnreihe mit abgebildeten Artefakten durch eine Multibandapparatur – Screenshot aus dem IPS CaseDesigner®

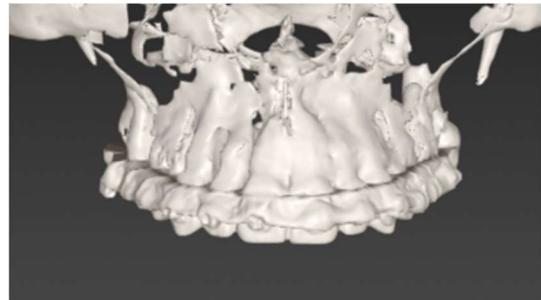


Abbildung 6: Zahnreihe ohne Artefakte der Multibandapparatur durch überlagerten Modellscan – Screenshot aus dem IPS CaseDesigner®

Ein weiterer Nachteil ist, dass beim Export des Schädels in das STL-Format die Auflösung aller Schädelstrukturen mit Ausnahme der Zahnreihen herabgesetzt wird. Dies betrifft also auch die für den späteren Workflow nötige Übereinanderlagerung der Jochbeine, welche durch die herabgesetzte Detailschärfe der Knochenstrukturen ebenfalls in ihrer Genauigkeit leicht herabgesetzt wird. Nach Einschätzung der Untersucher überwogen die Vorteile des IPS CaseDesigner® jedoch die Nachteile.

3.3.2. Workflow im IPS CaseDesigner®

Zunächst wurde einer der präoperativen oder postoperativen DICOM-Datensätze importiert. Zur Oberflächendarstellung der Schichtbilder musste nun ein Threshold zur Interpretation der Bildpixel gewählt werden. Der Threshold wurde so gewählt, dass Jochbeine und Zahnreihen möglichst gut abgebildet werden. Der absolute Wert ist hierbei nicht von Interesse. Wichtig ist nur, dass der präoperative und postoperative DICOM-Datensatz mit dem gleichen Threshold interpretiert werden, damit keine Unterschiede in den Größenverhältnissen der Knochenoberflächen entstehen.

Als nächstes wurde der Schädel nach der „natural head position“, welche der Frankfurter Horizontalen entspricht, ausgerichtet. Hierzu bietet das Programm Referenzlinien und verschiedene Ansichten zur möglichst genauen manuellen Ausrichtung (s. Abbildung 7).

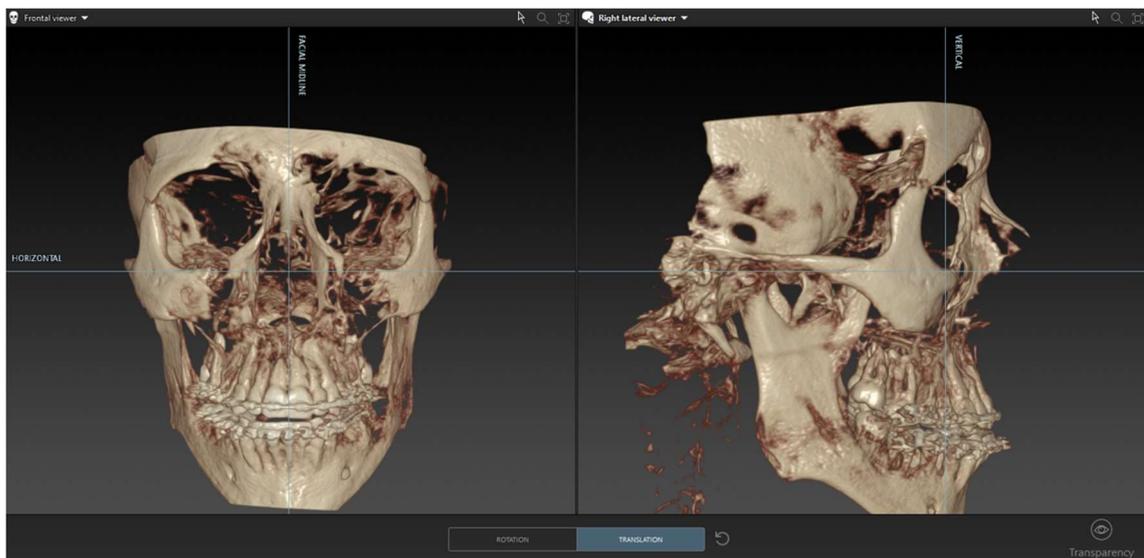


Abbildung 7: Positionierung des Schädels nach der NHP durch angezeigte Referenzlinien – Screenshot aus dem IPS CaseDesigner®

Als nächstes wurde das präoperative/postoperative Oberkiefermodell und das Unterkiefermodell in das Programm importiert. Hierzu sei erwähnt, dass das Unterkiefermodell eigentlich keine Relevanz für die Studie besitzt, jedoch in die Software geladen werden muss, damit die weitere Bearbeitung möglich ist. Die Zahnreihen der Modelle wurden nun über die Zahnreihen der Röntgenaufnahme gelegt. Hierzu bietet der IPS CaseDesigner® einen Algorithmus, der dies automatisch durchführt. Allerdings funktionierte dieser nicht bei allen Patientenfällen. Um die Kongruenz zwischen allen Fallanalysen zu erhalten, wurde deshalb bei jedem/jeder Patient:in die Funktion verwendet, bei der Referenzpunkte zwischen den zu übereinanderlegenden Zahnreihen manuell ausgewählt werden (s. Abbildung 8). Hierfür wurden die Höcker- und Eckzahnspitzen bzw. inizisale Ecken identischer Zähne verwendet, da diese die

am besten reproduzierbare Auswahl mittels Mausklick ermöglichen. Für jeden Fall wurde ein Minimum von acht Referenzpunkten, verteilt auf die gesamte Zahnreihe des Oberkiefers, zur Überlagerung verwendet. Die Übereinanderlagerung konnte in einem darauf folgenden Fenster mittels überlagerten Schnittbildern von DVT und Modell überprüft werden (s. Abbildung 9).

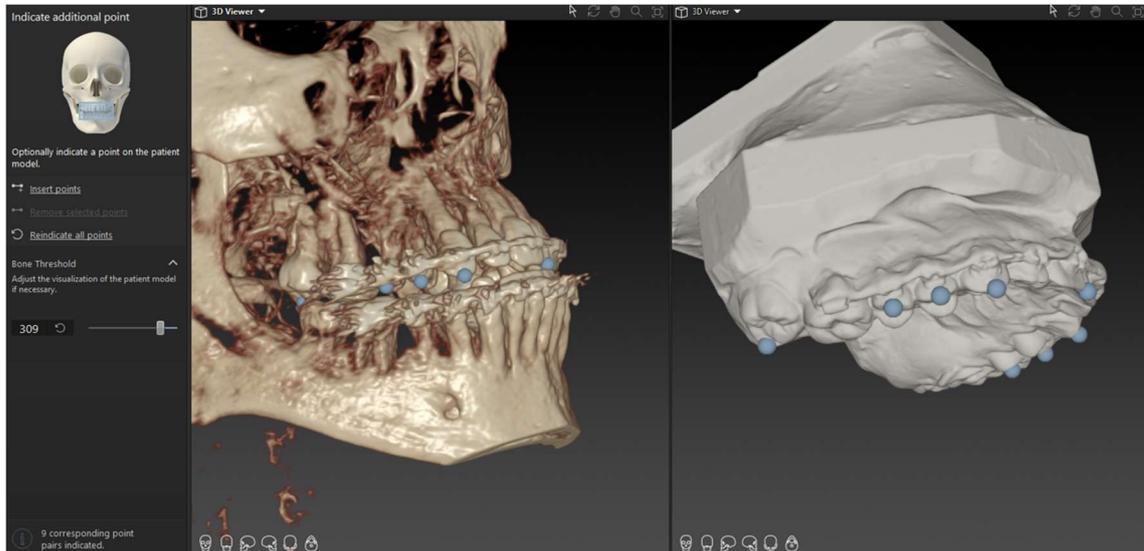


Abbildung 8: Referenzpunkte auf den Zahnreihen zur Überlagerung der Modell-Zahnreihe - Screenshot aus dem IPS CaseDesigner®

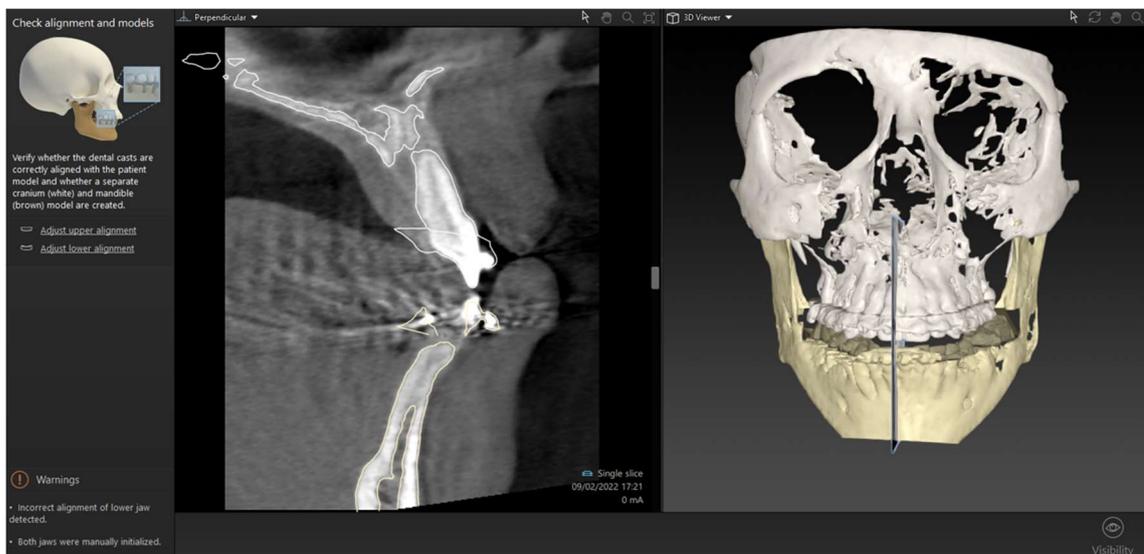


Abbildung 9: Überlagerungsüberprüfung im Schnittbildfenster - Screenshot aus dem IPS CaseDesigner®

Danach konnte eine Exportierung des Schädels mit gut abgebildeter Zahnreihe erfolgen. Die STL-Datei beinhaltet dabei den Schädel ohne Unterkiefer, da dieser nicht relevant für die weitere Analyse ist. Der Schädel ist in dieser 3D-Datei korrekt nach der NHP bzw. Frankfurter Horizontalen ausgerichtet.

3.4. Analyse-Workflow in CloudCompare®

Da nun alle Dateien vorlagen, die für die Ermittlung der Umsetzungsungenauigkeit von Planung zu postoperativem Ergebnis benötigt wurden, konnte der eigentliche Analyse-Workflow der Patientenfälle beginnen. Hierfür wurde das Open Source Project CloudCompare® Version 2.11 als Analyse-Programm verwendet, welches sich im Bereich der Genauigkeitsuntersuchungen zu digital geplanten Umstellungsosteotomien von Oberkiefern schon bewährt hat (Rückschloß et al., 2019). Zu Beginn des Workflows wurden die STL-Dateien der präoperativen und postoperativen Schädel, sowie Oberkiefer-Ausgangsmodell und Oberkiefer-Planungsmodell, welche fortan als präoperatives und postoperatives Modell bezeichnet werden, in CloudCompare® importiert.

3.4.1. Der Überlagerungs-Algorithmus von CloudCompare® und sein Nutzen

CloudCompare® beinhaltet die Funktion zwei Objekte anhand ihrer Oberflächen übereinander zu legen, indem es mit einem Algorithmus die Position der Objekte berechnet, bei der deren Oberflächenpunkte am nächsten beieinander sind. Für diesen Vorgang werden auf den Oberflächen der Objekte jeweils 50.000 vergleichbare Punkte errechnet. Dies ermöglicht die bestmögliche Überlagerung zweier fast identischer Strukturen, wie in diesem Fall die Scans der Jochbeine, Zahnreihen und Artikulatorplatten.

Das Programm bietet ergänzend zum Algorithmus die Möglichkeit die Bewegung bei dieser Überlagerung zu quantifizieren und auch auf andere Objekte anzuwenden. Dafür wird nach der Anwendung des Überlagerungs-Algorithmus eine Transformationsmatrix (s. Abbildung 10) generiert, die der durch den Algorithmus durchgeführten Verlagerung entspricht. Diese Matrix kann danach in die Eulerschen Winkel interpretiert werden, welche die Bewegung eines Objekts als Rotationen um x-, y- und z-Achse im dreidimensionalen Raum beschreiben. Ergänzend dazu werden die linearen Translationen dieser Achsen angegeben (s. Abbildung 11).

Damit das Programm die richtigen Winkel mit Hilfe der Transformationsmatrix ermitteln kann ist noch wichtig, dass ein bestimmter Punkt auf der Zahnreihe gewählt wird, um den diese Rotationen stattfinden. In dieser Studie wurde dafür der Inzisalpunkt bestimmt, da er einen markanten Mittelpunkt in der Zahnreihe darstellt und heutzutage auch bei der virtuellen Umstellungsosteotomieplanung, wie z.B. im IPS CaseDesigner® für die Planung der Rotationen, verwendet wird.

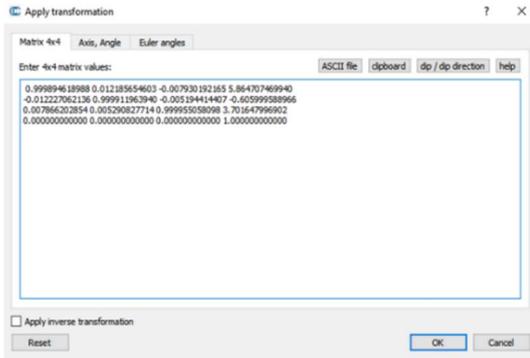


Abbildung 10: Die Transformationsmatrix in CloudCompare® - Screenshot aus CloudCompare®

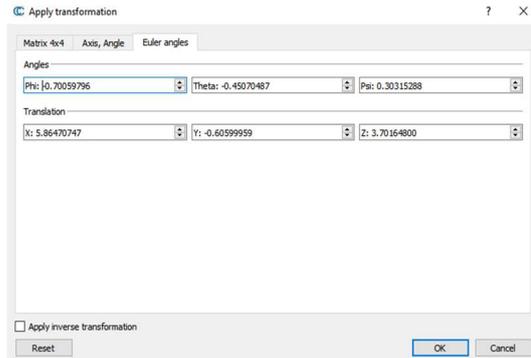


Abbildung 11: Die Eulerschen Winkel und linearen Translationen interpretiert aus der Transformationsmatrix - Screenshot aus CloudCompare®

3.4.2. Interpretation der Eulerschen Winkel

Die Eulerschen Winkel können analog zu den in der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie etablierten Yaw, Pitch und Roll verwendet und X-, Y- und Z-Achse in Sagittal-, Transversal- und Longitudinalachse uminterpretiert werden (s. Abbildung 12, Abbildung 13, Tabelle 1).

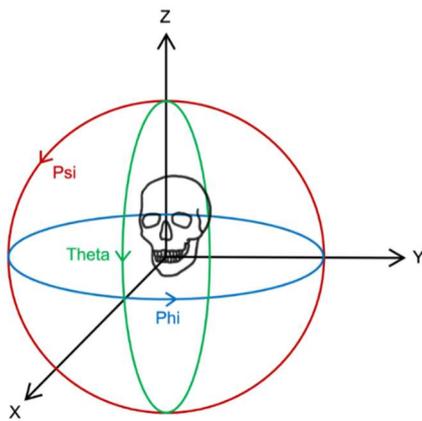


Abbildung 12: Schematische Darstellung des 3D-Koordinatensystems nach den Eulerschen Winkeln – Eigens angefertigte Grafik

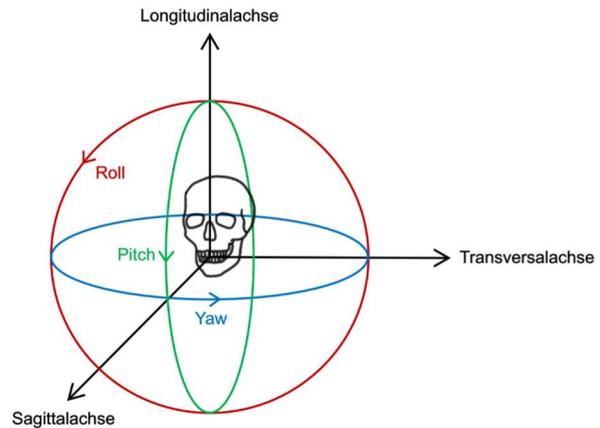
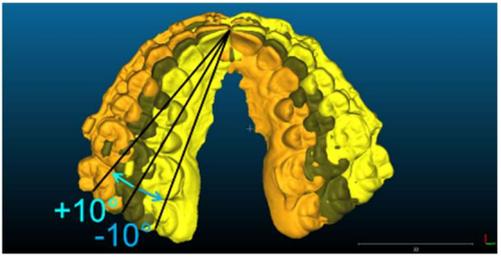
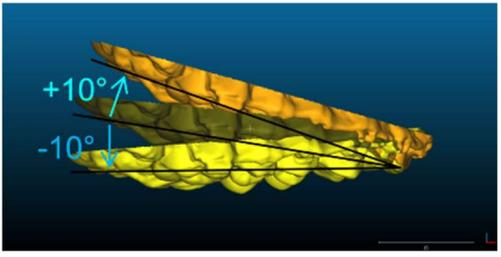
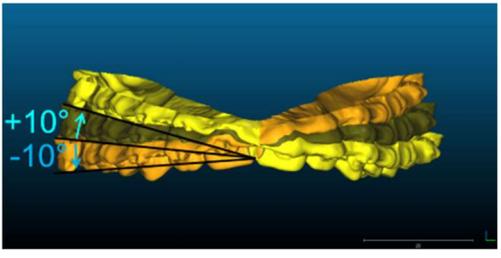
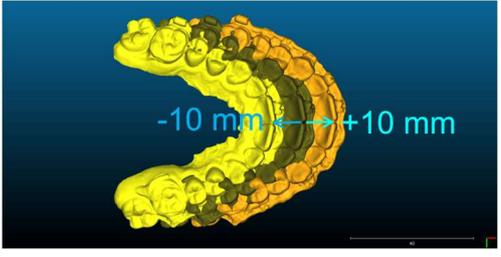
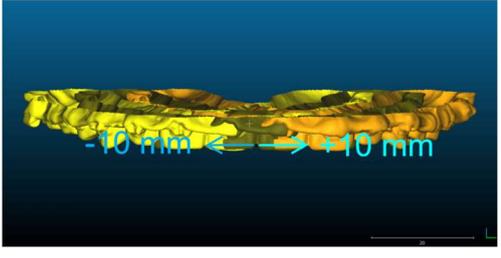
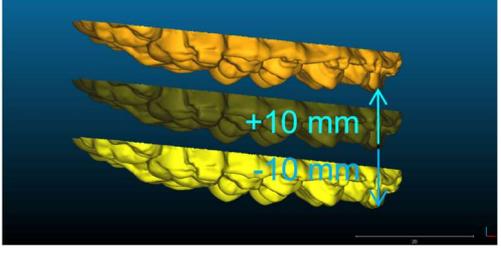


Abbildung 13: Schematische Darstellung des Koordinatensystems nach den in der MKG-Chirurgie gängigen Referenzebenen – Eigens angefertigte Grafik

Tabelle 1: Rotations- und Translationsachsen der Eulerschen Winkel und ihr anatomischer bzw. praktischer Bezug mit modifizierten Screenshots aus CloudCompare®

Eulersche Winkel	Anatomischer Bezug	Praktische Beispiele
Phi	Yaw (Rotation um Longitudinalachse)	
Theta	Pitch (Rotation um Transversalachse)	
Psi	Roll (Rotation um Sagittalachse)	
X-Achse	Sagittalachse (anterior/posterior)	
Y-Achse	Transversalachse (links/rechts)	
Z-Achse	Longitudinalachse (kranial/kaudal)	

3.4.3. Ermittlung der in der OP durchgeführten Rotationen und Translationen

Zunächst mussten die Jochbeine von prä- und postoperativem Schädel übereinandergelegt werden. Um dem Algorithmus die Arbeit zu erleichtern und die Jochbeine möglichst identisch auszuschneiden, wurden diese zuerst manuell möglichst gut übereinander vorpositioniert (s. Abbildung 14). Danach wurden beide Jochbeine gleichzeitig mit denselben Schnittlinien herausgeschnitten, um annähernd identische Schnittkanten zu setzen (s. Abbildung 15).

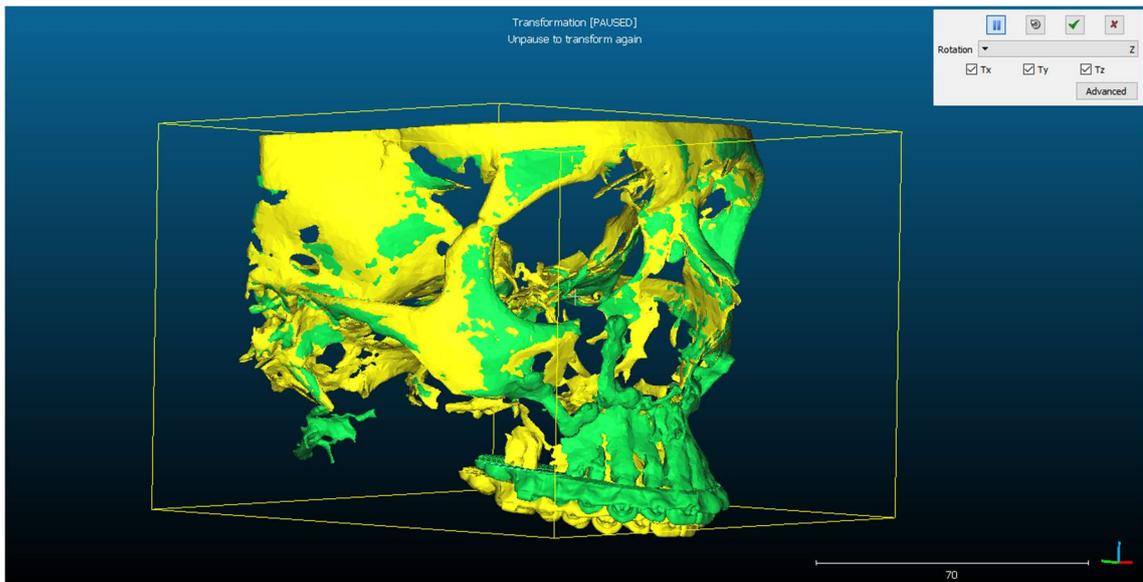


Abbildung 14: Manuelle Überlagerung der Schädel nach den Jochbeinen - Screenshot aus CloudCompare®

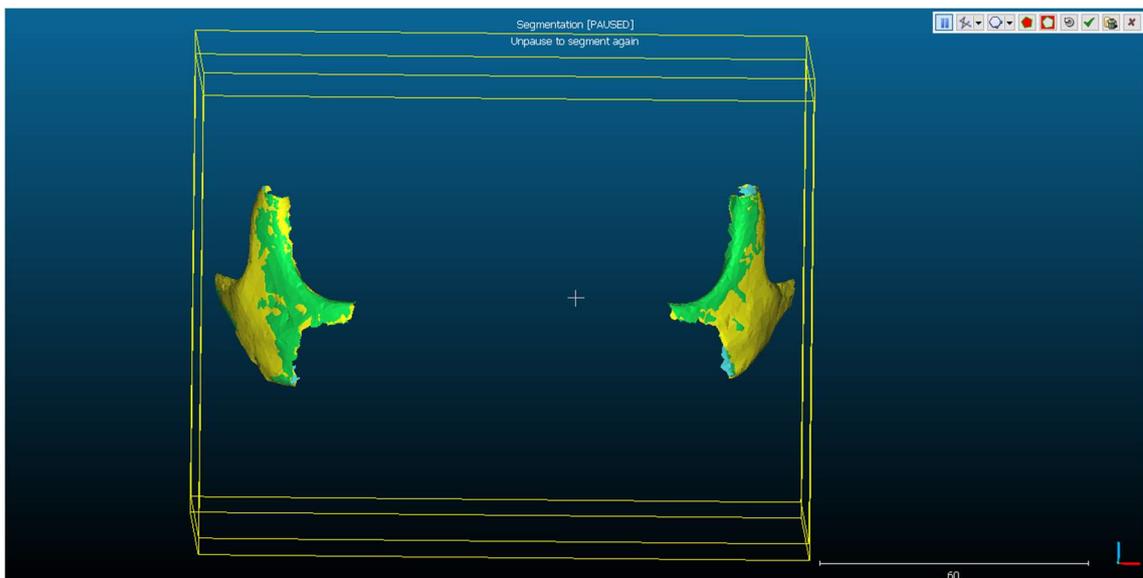


Abbildung 15: Gleich ausgeschnittene Jochbeine nach manueller Vorpositionierung - Screenshot aus CloudCompare®

Jetzt konnte der Algorithmus auf die Jochbeine für die bestmögliche Überlagerung angewandt werden. Dabei wurden die Jochbeine des postoperativen Schädels in die Jochbeine des präoperativen Schädels mit entsprechenden Rotationen und Translationen verlagert (s. Abbildung 16). Diese Verlagerung gibt CloudCompare® nach dem Vorgang in der oben beschriebenen Transformationsmatrix an. Die Matrix musste nun auf den Rest des postoperativen Schädels angewandt werden, damit auch die Zahnreihen wieder an der richtigen Position zueinanderstehen (s. Abbildung 17). Zwar ist dies bei guter manueller Vorpositionierung nur noch eine kleine Korrektur, dennoch ist sie notwendig für eine möglichst akkurate Analyse.

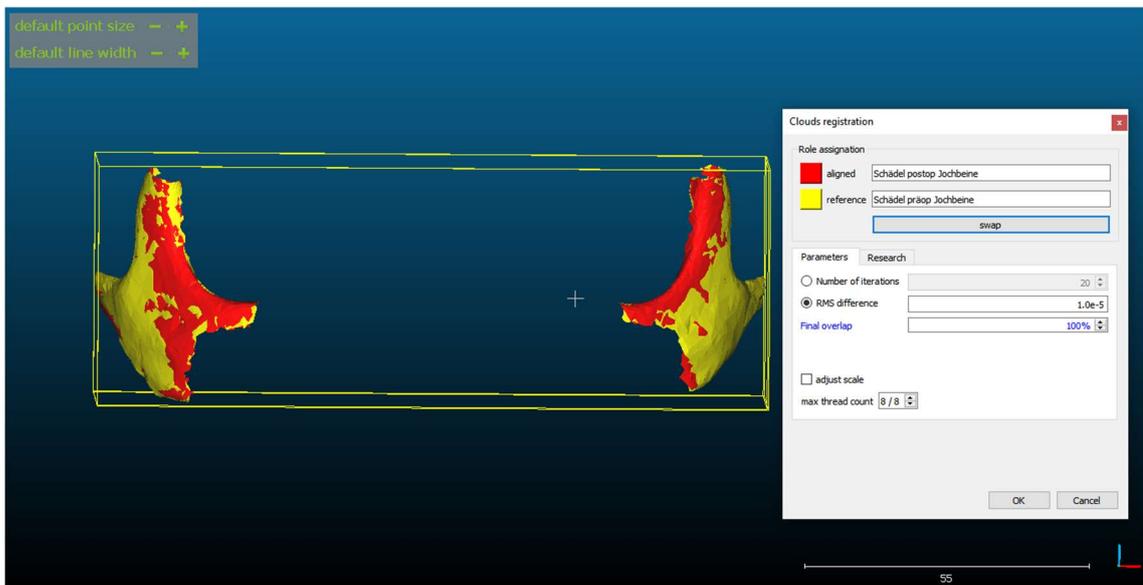


Abbildung 16: Anwendung des Überlagerungs-Algorithmus auf die Jochbeine - Screenshot aus CloudCompare®

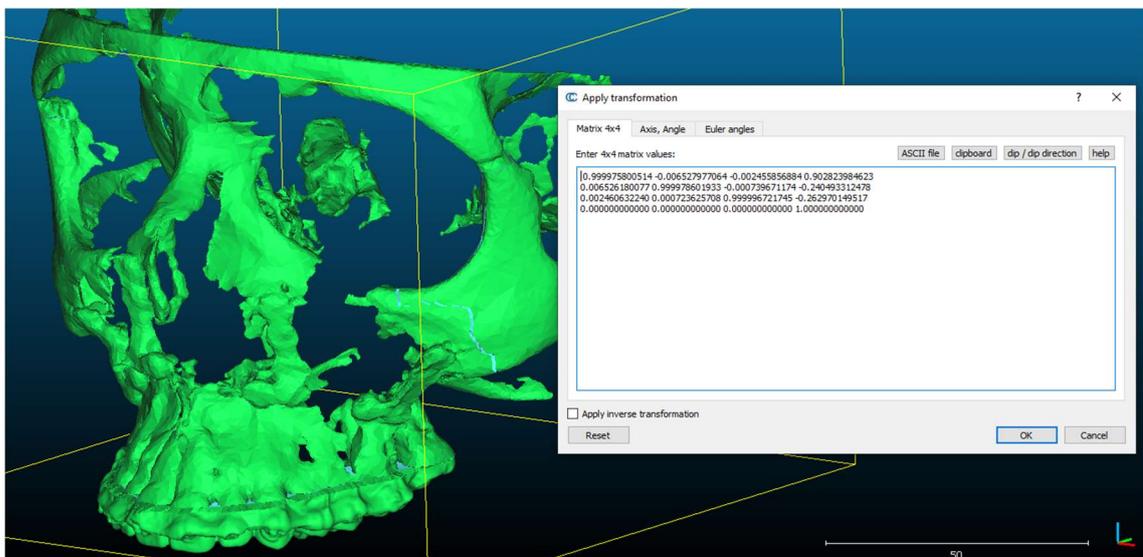


Abbildung 17: Transformationsmatrix des Überlagerungs-Algorithmus für die Jochbeine und Anwendung der Matrix auf den Rest des postoperativen Schädels - Screenshot aus CloudCompare®

Da nun präoperative und postoperative Zahnreihe in korrekter Relation zueinander im dreidimensionalen Raum standen, war die in der Operation durchgeführte Verlagerung sichtbar und konnte quantifiziert werden. Dafür wurde ebenfalls der Überlagerungs-Algorithmus verwendet. Allerdings wurden die Zahnreihen nicht manuell vorpositioniert, damit die Transformationsmatrix der OP-Verlagerung entspricht und in die Eulerschen Winkel interpretiert werden kann. Daher mussten die Zahnreihen separat vom Schädel abgeschnitten werden. Um trotzdem möglichst gleiche Schnitte zu setzen, wurde sich an gleichen Punkten auf den Zahnreihen orientiert und aus dem gleichen Blickwinkel geschnitten (s. Abbildung 18, Abbildung 19).

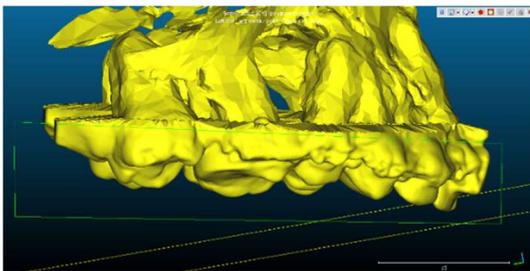


Abbildung 18: Ausschneiden der präoperativen Zahnreihe aus dem Schädel - Screenshot aus CloudCompare®

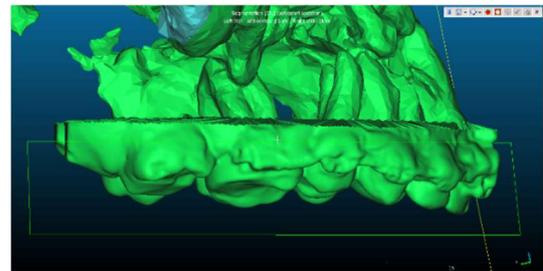


Abbildung 19: Ausschneiden der postoperativen Zahnreihe aus dem Schädel - Screenshot aus CloudCompare®

Damit die Rotationsunterschiede der nun isolierten Zahnreihen von CloudCompare® richtig ausgegeben werden, mussten die Zahnreihen vor der Anwendung des Überlagerungs-Algorithmus, wie oben beschrieben, so positioniert werden, dass der Inzisalpunkt der präoperativen Zahnreihe im Nullpunkt des dreidimensionalen Koordinatensystems von CloudCompare® steht (s. Abbildung 20). Die präoperative Zahnreihe wurde dafür gewählt, da der Überlagerungs-Algorithmus die Rotationen vor den Translationen an das andere Objekt (in diesem Fall die postoperative Zahnreihe) anpasst und daher das Objekt, welches in das andere eingelagert werden soll (in diesem Fall die präoperative Zahnreihe), im Nullpunkt stehen muss. Zusätzlich mussten beide Zahnreihen 90° um die Z-Achse gedreht werden, damit diese in der X-Achse nach anterior ausgerichtet sind (s. Abbildung 21). Dieser Schritt wird dadurch bedingt, dass CloudCompare® und der IPS CaseDesigner® die STL-Dateien der Schädel um 90° verdreht unterschiedlich anzeigen.

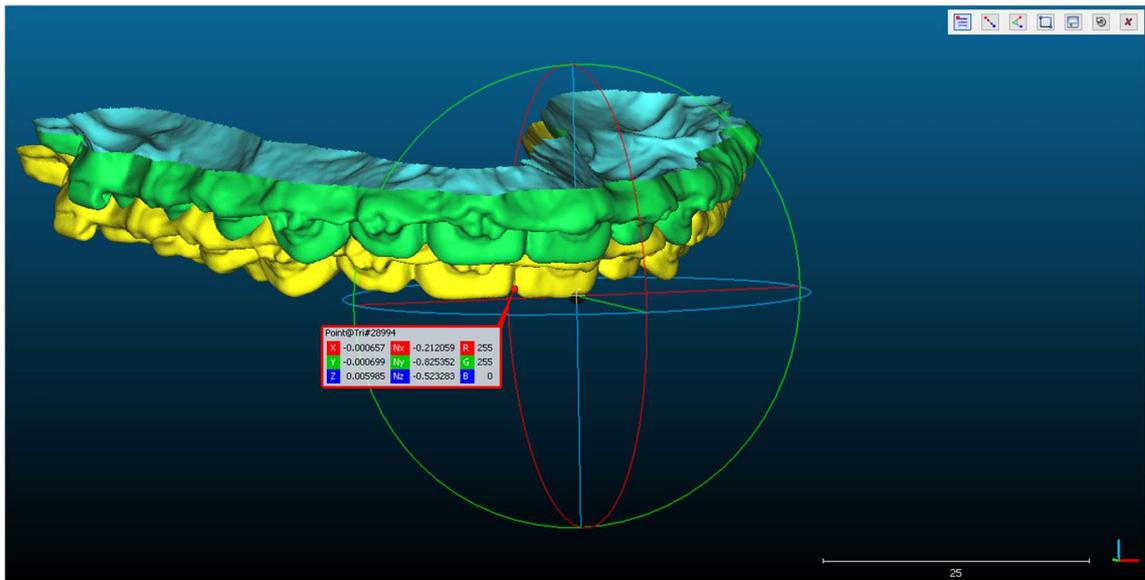


Abbildung 20: Präoperative und postoperative Zahnreihe so positioniert, dass der Inzispunkt der präoperativen Zahnreihe im Nullpunkt des Koordinatensystems liegt - Screenshot aus CloudCompare®

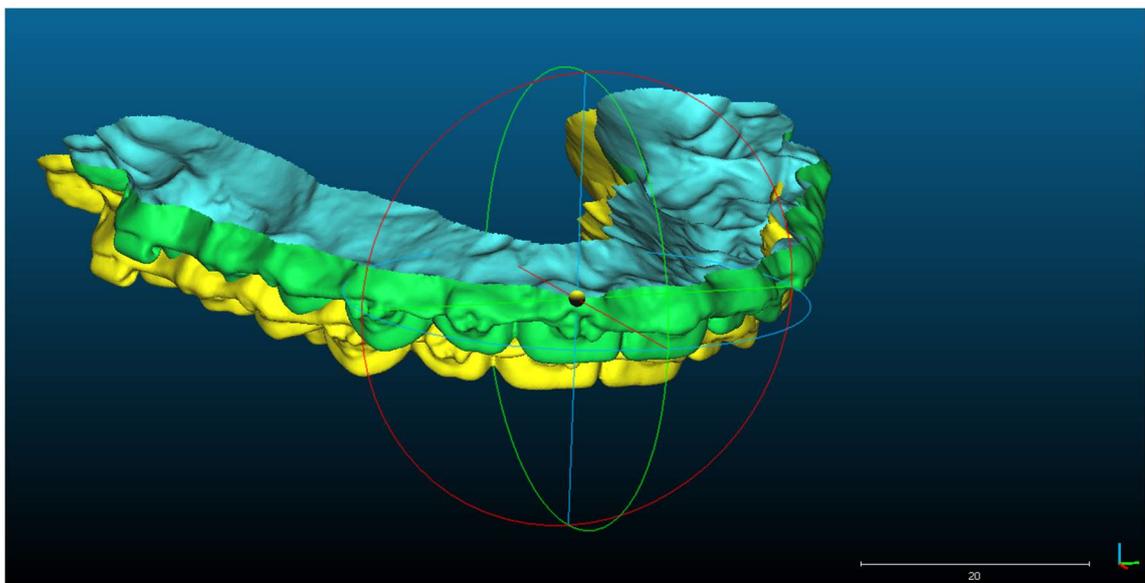


Abbildung 21: Präoperative und postoperative Zahnreihe so positioniert, dass die X-Achse (im Bild rot gefärbt) nach anterior zeigt - Screenshot aus CloudCompare®

Nun konnte der Überlagerungs-Algorithmus angewendet werden, wobei die postoperative Zahnreihe als Referenz galt, damit der Algorithmus mit der präoperativen Zahnreihe die in der Operation durchgeführte Verlagerung nachahmt (s. Abbildung 22). Die danach ausgegebene Transformationsmatrix (s. Abbildung 23) konnte analog zur tabellarischen Erläuterung (s. Tabelle 1) in Yaw, Pitch und Roll, sowie lineare Translationen in alle anatomischen Richtungen interpretiert werden.

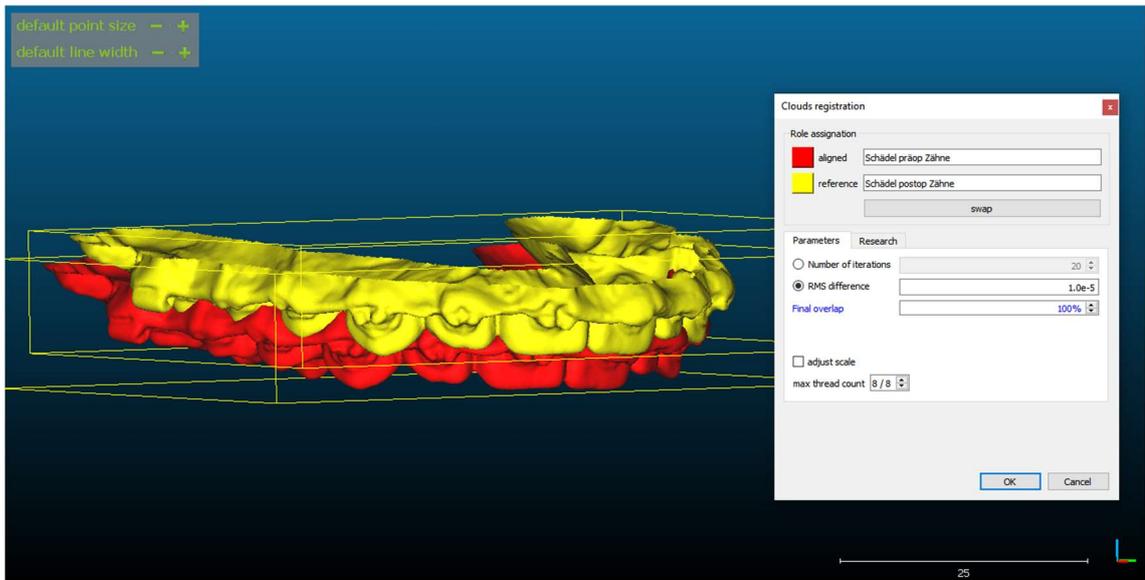


Abbildung 22: Anwendung des Überlagerungs-Algorithmus auf prä- und postoperative Zahnreihe - Screenshot aus CloudCompare®

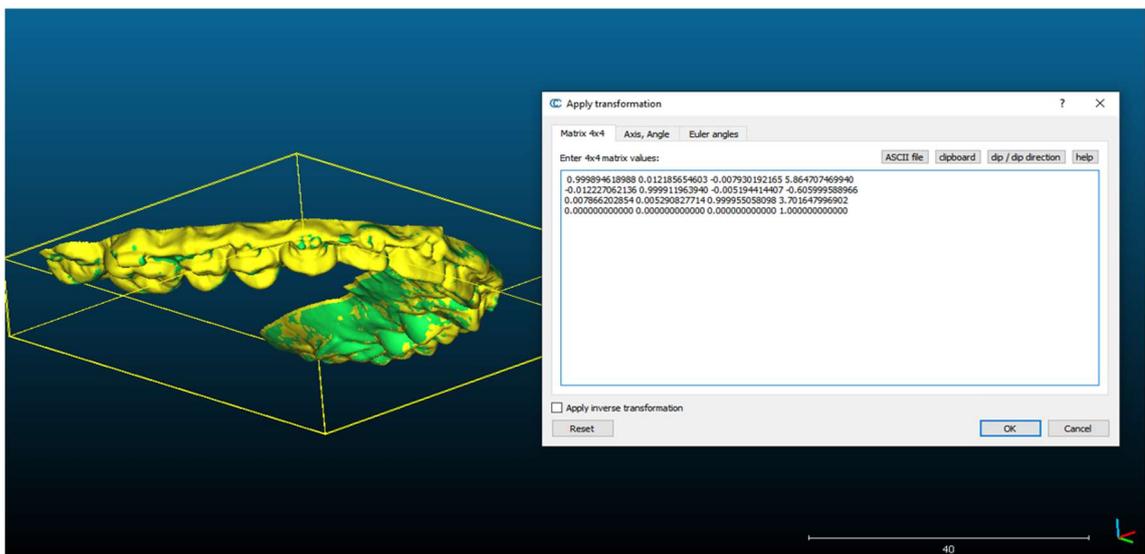


Abbildung 23: Durch den Überlagerungs-Algorithmus errechnete Transformationsmatrix für den Positionsunterschied zwischen prä- und postoperativer Zahnreihe - Screenshot aus CloudCompare®

3.4.4. Ermittlung der in der Modell-OP durchgeführten Rotationen und Translationen

Um die im Artikulator durchgeführte Verlagerung der Zahnreihen von prä- und postoperativem Modell zu ermitteln, mussten diese ebenfalls in korrekter Relation zueinander im dreidimensionalen Koordinatensystem von CloudCompare® ausgerichtet werden. Analog zu den Jochbeinen der Schädel konnten bei den Modellen die Artikulatorplatten als Referenz genutzt werden, da diese immer an gleicher Stelle im Artikulator sitzen. Zum Ausschneiden der Platten von den Modellen wurden diese wieder zuvor manuell ineinander vorpositioniert, um möglichst identische Schnitte setzen zu können (s. Abbildung 24). Zusätzlich dazu wurden Bereiche der Platten ausgeschnitten, die nicht identisch sind, wie z.B. Gipsabflusslöcher oder Magnetplättchen. Diese machen jedoch keinen entscheidenden Teil der Oberfläche der STL-Datei aus, sodass der Überlagerungs-Algorithmus weiterhin verwendet werden konnte. Dieser wurde danach auf die Artikulatorplatten angewandt (s. Abbildung 25) und mit der ausgegebenen Transformationsmatrix der Rest des postoperativen Modells um den gleichen Betrag bewegt, damit die Zahnreihen in korrekter Relation zueinanderstehen.

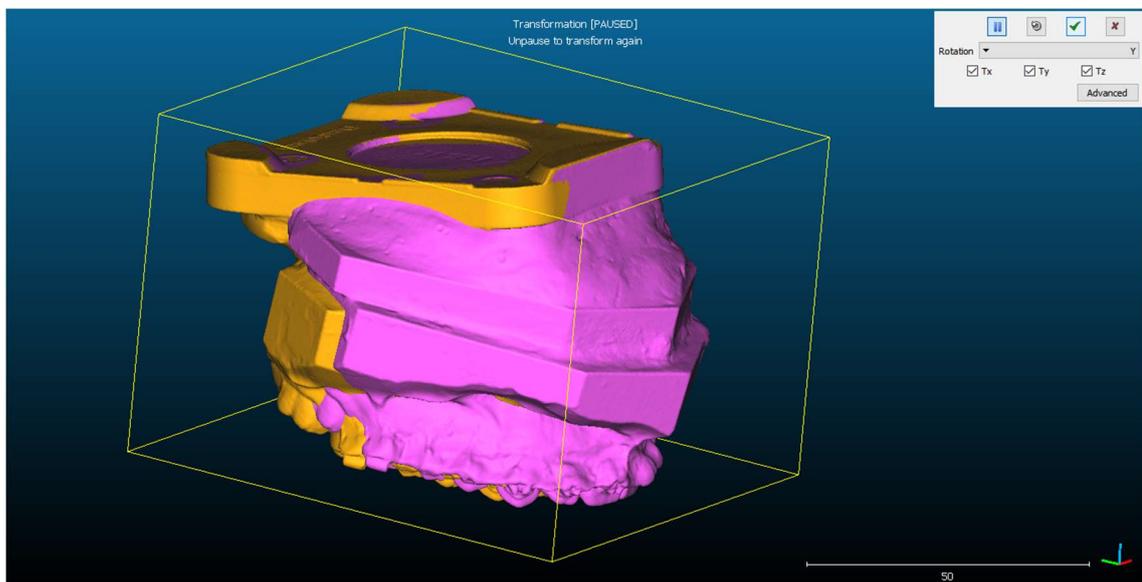


Abbildung 24: Manuelle Vorpositionierung der Modelle nach den Artikulatorplatten - Screenshot aus CloudCompare®

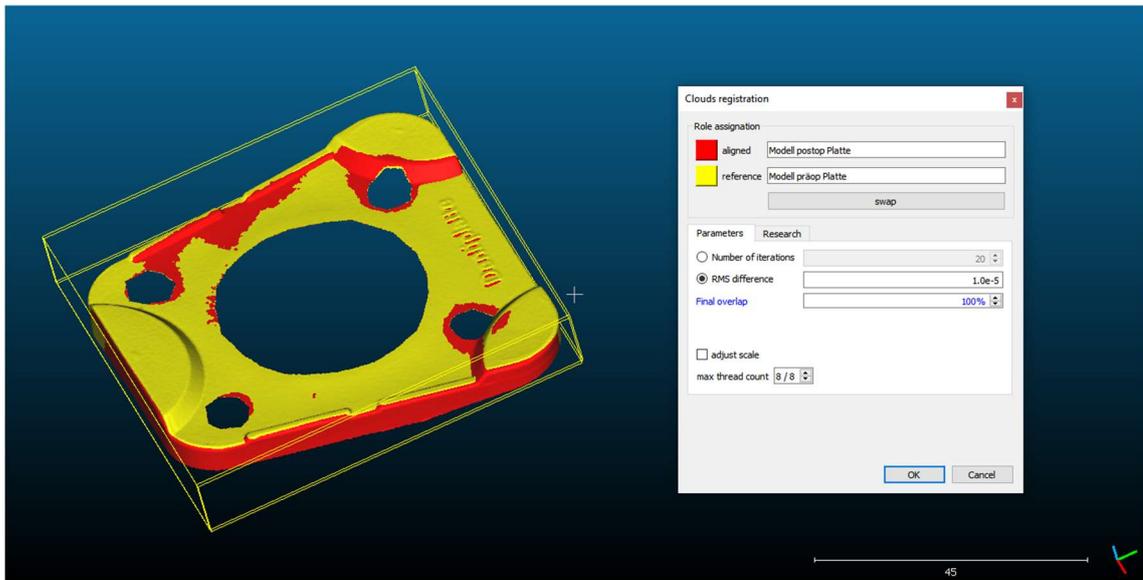


Abbildung 25: Anwendung des Überlagerungs-Algorithmus auf die Artikulatorplatten - Screenshot aus CloudCompare®

Danach schloss sich ein zusätzlicher Schritt an. Da die Modelle nicht wie der Schädel im IPS CaseDesigner® nach der NHP bzw. Frankfurter Horizontale ausgerichtet wurden, musste dies in CloudCompare® vorgenommen werden. Das Programm bietet keine extra Funktion hierfür, jedoch kann man sich die Achsen des Koordinatensystems im Bild anzeigen lassen, welche der NHP entsprechen (s. Abbildung 26).

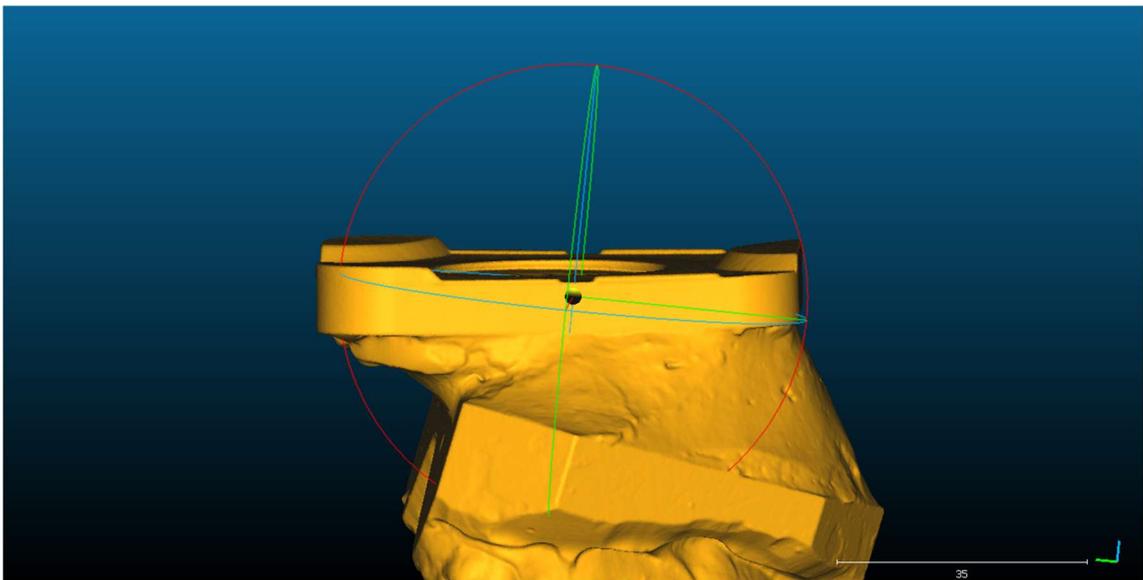


Abbildung 26: Präoperatives Modell, welches noch nicht nach der NHP ausgerichtet ist - Screenshot aus CloudCompare®

Mit manueller Rotation wurde ein Modell nach X-, Y- und Z-Achse gemäß der NHP ausgerichtet und die gleichen Rotationen mit Hilfe der Transformationsmatrix auf das andere Modell übertragen, um eine weiterhin korrekte Relation der Zahnreihen zu gewährleisten (s. Abbildung 27, Abbildung 28, Abbildung 29, Abbildung 30).

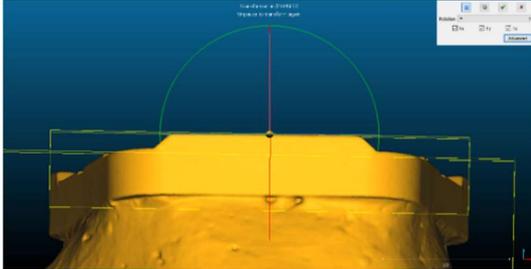


Abbildung 27: Ausrichtung des Modells in der X-Achse - Screenshot aus CloudCompare®

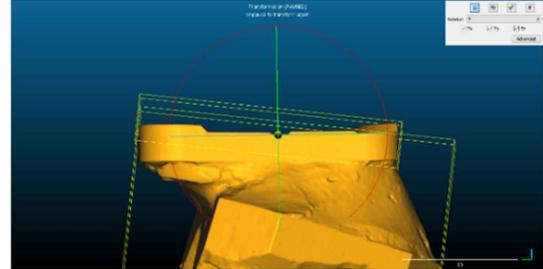


Abbildung 28: Ausrichtung des Modells in der Y-Achse - Screenshot aus CloudCompare®

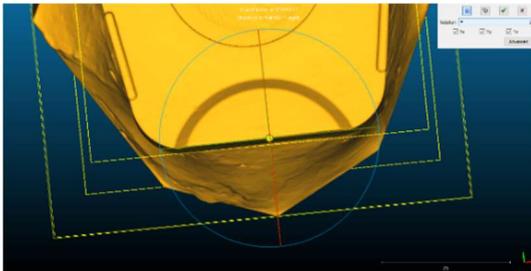


Abbildung 29: Ausrichtung des Modells in der Z-Achse - Screenshot aus CloudCompare®

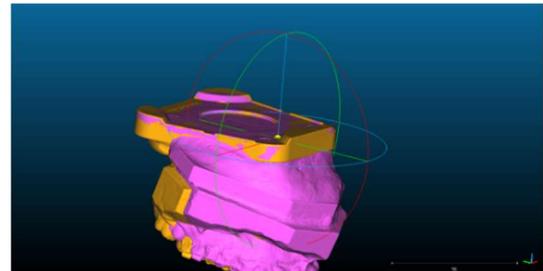


Abbildung 30: Modelle nach der NHP ausgerichtet - Screenshot aus CloudCompare®

Die Modelle standen nun wie auch die Schädel nach NHP bzw. Frankfurter Horizontale im Koordinatensystem und konnten analog zur Analyse der in der OP durchgeführten Verlagerung weiterbehandelt werden.

Jedoch war vor der Anwendung des Überlagerungs-Algorithmus ein weiterer Schritt nötig. Dieser wurde dadurch bedingt, dass die Universitätsklinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer- und Plastische Gesichtschirurgie des Universitätsklinikums Halle für die Modell-Operationen Artikulatoren des Artex®-Systems der Amann Girrbach verwendet (s. Kapitel 1.4.4). In diese werden die Modelle nicht nach Frankfurter Horizontale eingeordnet (sog. Einartikulieren), sondern nach der sog. „Patienten-Horizontale“. Diese ist eine gedachte Linie in der Sagittalebene ohne knöchernen Referenzpunkte und stellt einen Mittelwert zwischen Frankfurter Horizontalen und Camper-Ebene dar (Oliver Ahlers, 1998, S. 126) (s. Abbildung 31). Sie unterscheidet sich von der FH um eine +5° Rotation um die Transversalachse (Oliver Ahlers, 1998, S. 127).

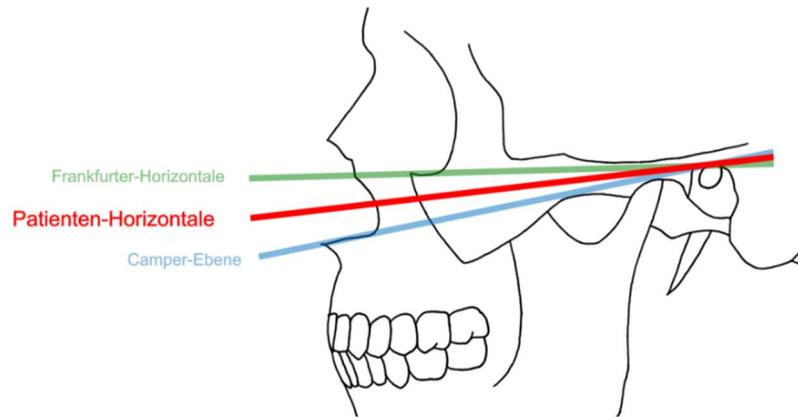


Abbildung 31: Schematische Darstellung der in der Zahnmedizin gängigen Referenzebenen – Eigens angefertigte Grafik

Da die Position der Modelle bei der Planung im Artikulator nach dieser Ebene ausgerichtet ist, und die Verlagerung dieser Planung weiterhin relativ zur Frankfurter Horizontalen analysiert werden soll, musste eine Rotation um $+5^\circ$ auf die Zahnreihen angewandt werden, damit diese genauso wie die Zahnreihen der Schädel in der NHP mit Hilfe des Überlagerungs-Algorithmus analysiert werden. Dies konnte erneut mit Hilfe der Transformationsmatrix durchgeführt werden. Vorher mussten die Zahnreihen allerdings wieder ausgeschnitten und in den Nullpunkt des Koordinatensystems von CloudCompare® verlagert und nach der X-Achse ausgerichtet werden. Der Inzisalpunkt der präoperativen Zahnreihe wurde hierfür verwendet, damit alle Rotationen definiert um diesen stattfinden. Die Zahnreihen mussten danach ebenfalls so gedreht werden, dass die X-Achse nach anterior zeigt. Nach diesen Schritten konnte die $+5^\circ$ Rotation über den Theta-Wert des Transformations-Tools auf beide Modelle angewandt werden (s. Abbildung 32).

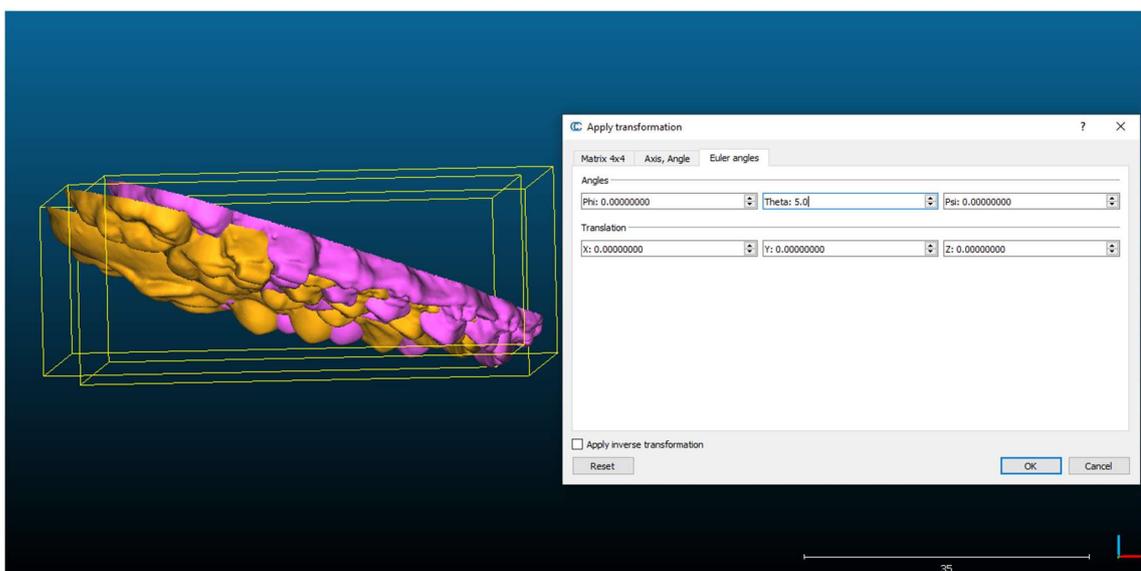


Abbildung 32: Übertragung der $+5^\circ$ Rotation auf die Modell-Zahnreihen - Screenshot aus CloudCompare®

Durch diese Vorarbeit konnten nun die in der Modell-OP durchgeführten Rotationen und Translationen mit dem Überlagerungs-Algorithmus nachgeahmt werden, wobei die Zahnreihe des postoperativen Modells als Referenz galt (s. Abbildung 33). Mit der danach angegebenen Transformationsmatrix (s. Abbildung 34) konnte die ermittelte Verlagerung wieder in anatomisch nachvollziehbare Werte uminterpretiert werden.

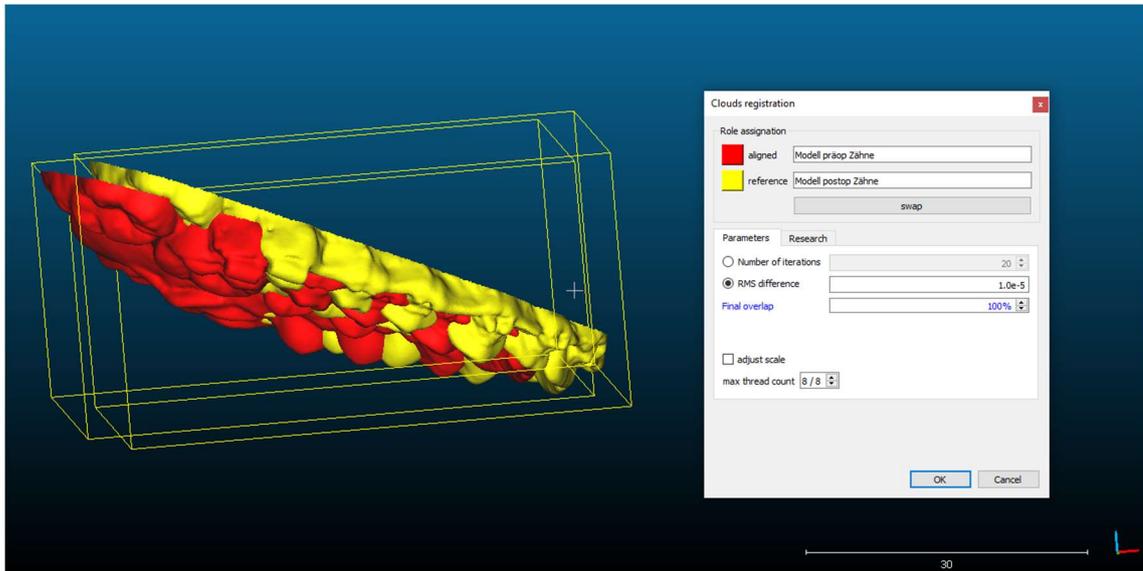


Abbildung 33: Anwendung des Überlagerungs-Algorithmus auf die Zahnreihen der Modelle - Screenshot aus CloudCompare®

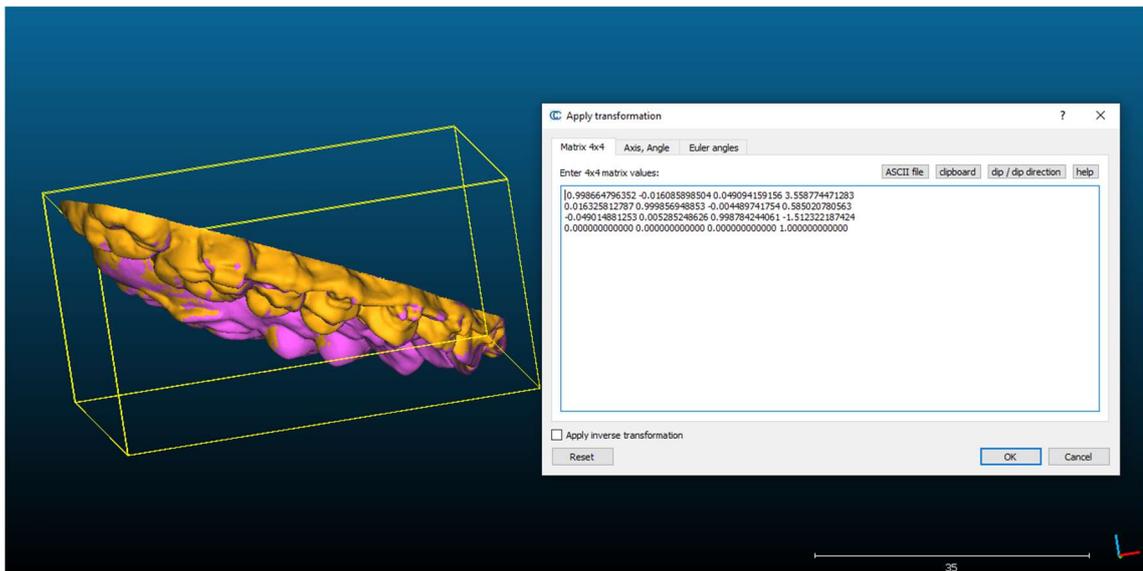


Abbildung 34: Durch den Überlagerungs-Algorithmus errechnete Transformationsmatrix für den Positionsunterschied zwischen prä- und postoperativer Modell-Zahnreihe - Screenshot aus CloudCompare®

3.4.5. Ermittlung der in der Modell-OP geplanten Rotationen und Translationen übertragen auf den Schädel

Damit ermittelt werden konnte, welche Verlagerung, auf den Schädel übertragen, bei der Modell-OP geplant wurde, mussten die Modelle in korrekter Relation zueinander im Schädel angeordnet werden. Um den richtigen Bezug zum Schädel herzustellen, wurden die Zahnreihen als Referenz verwendet.

Als erstes wurden die Zahnreihen von präoperativem Schädel und präoperativem Modell manuell übereinandergelegt (s. Abbildung 35), damit wieder das möglichst gleiche Ausschneiden dieser erleichtert wird. Auf die isolierten Zahnreihen konnte nun erneut der Überlagerungs-Algorithmus angewandt werden, wobei die Zahnreihe des präoperativen Modells in die Zahnreihe des präoperativen Schädels bewegt wurde (s. Abbildung 36). Mit der ausgegebenen Transformationsmatrix wurde der Rest des präoperativen Modells dazu analog verlagert, damit Zahnreihe und Artikulatorplatte in korrekter Relation zueinander im Schädel stehen.

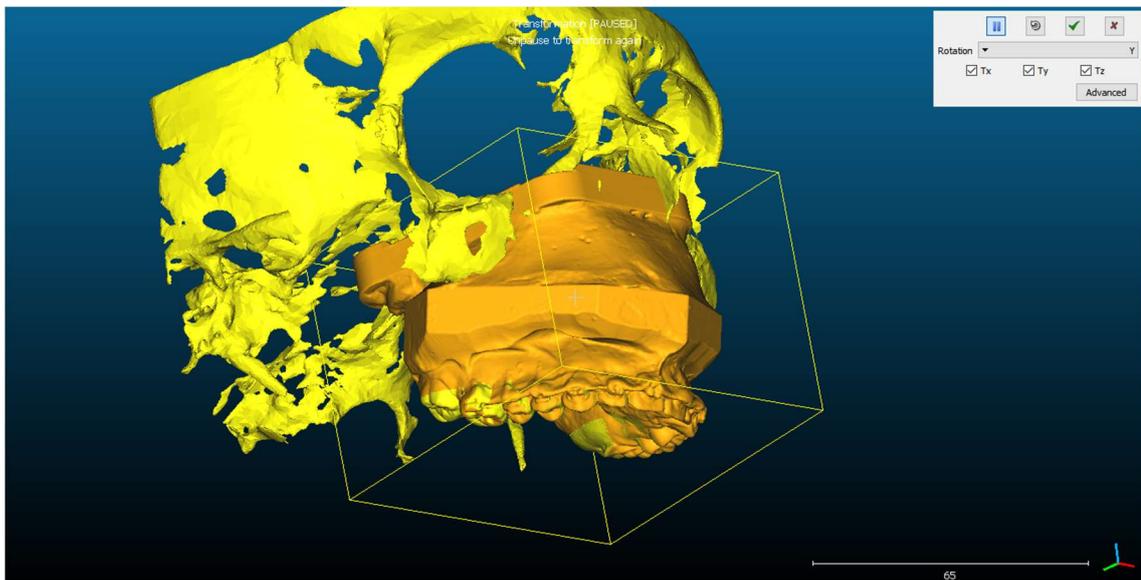


Abbildung 35: Manuelle Vorpositionierung von präoperativem Schädel und Modell anhand der Zahnreihen - Screenshot aus CloudCompare®

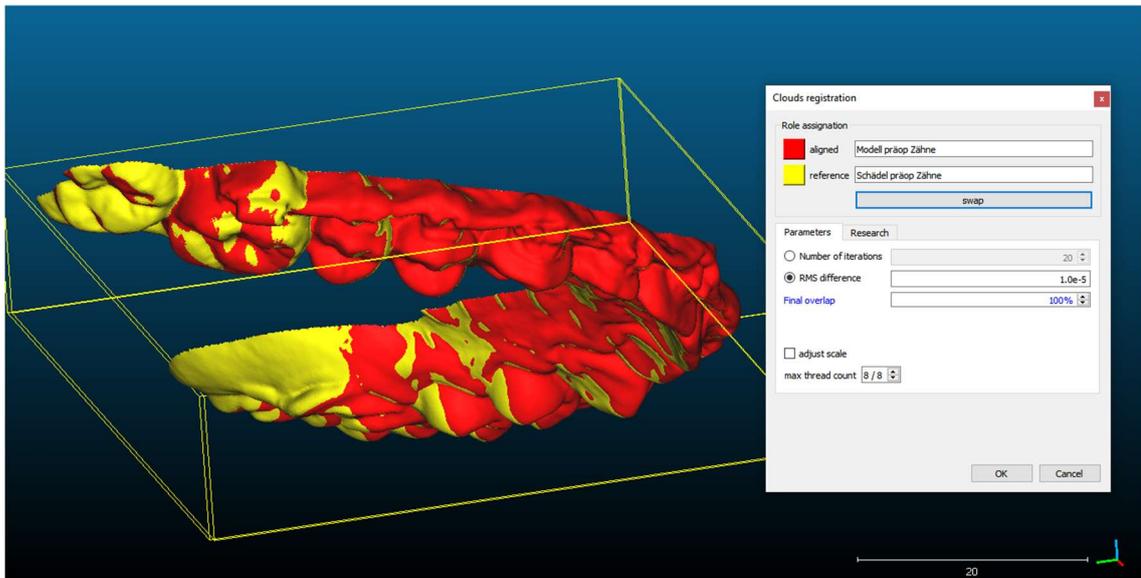


Abbildung 36: Anwendung des Überlagerungs-Algorithmus auf die präoperativen Zahnreihen von Modell und Schädel - Screenshot aus CloudCompare®

Um nun die Zahnreihen von prä- und postoperativem Modell wieder in korrekte Relation zu bringen, wurden, wie schon beschrieben (s. Kapitel 3.4.4), die Artikulatorplatten manuell vorpositioniert, ausgeschnitten, der Überlagerungs-Algorithmus angewandt und mit der Transformationsmatrix der Rest des postoperativen Modells in die gleiche Position gebracht.

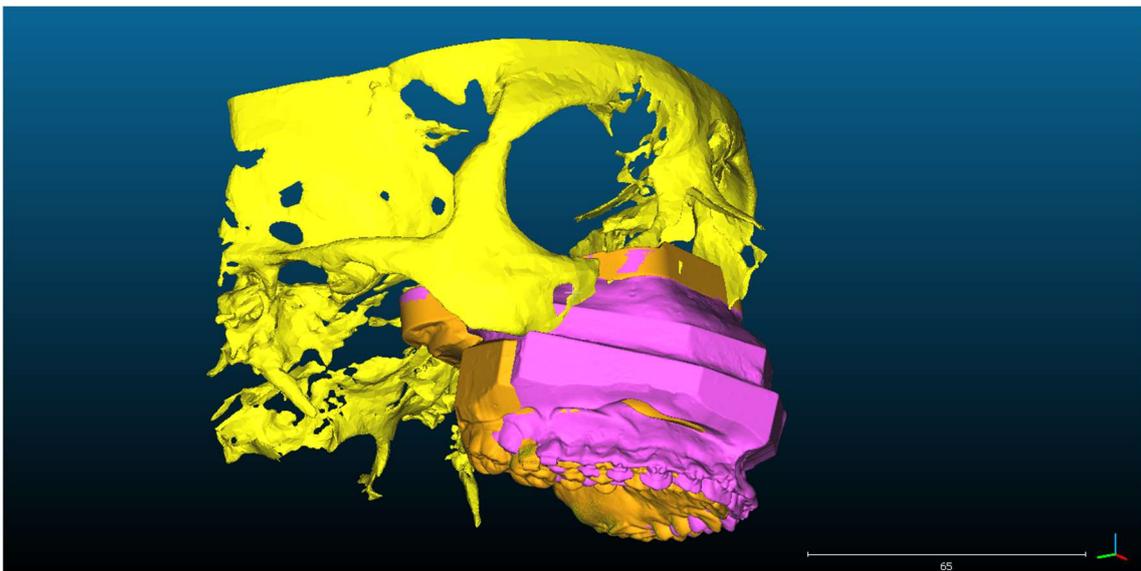


Abbildung 37: Modelle nach der in den Schädel übertragenen Position ausgerichtet - Screenshot aus CloudCompare®

Danach konnte die nun auf den Schädel übertragene, in der Modell-OP geplante Verlagerung mit dem schon beschriebenen Workflow ermittelt werden (s. Kapitel 3.4.3). Die Zahnreihen von prä- und postoperativem Modell wurden wieder ausgeschnitten, in den Nullpunkt mit dem Inzisalpunkt der präoperativen Zahnreihe als Referenzpunkt bewegt und mit der X-Achse nach anterior im Koordinatensystem positioniert. Eine $+5^\circ$ Rotation um die Y-Achse wurde danach jedoch nicht durchgeführt, da die Zahnreihen schon gemäß ihrer Position im Schädel ausgerichtet sind und eine Ausrichtung nach der Patientenebene hier irrelevant ist. Zuletzt wurde der Überlagerungs-Algorithmus wieder angewandt (s. Abbildung 38) und mit Hilfe der Transformationsmatrix (s. Abbildung 39) die auf den Schädel übertragenen geplanten Rotationen und Translationen ermittelt.

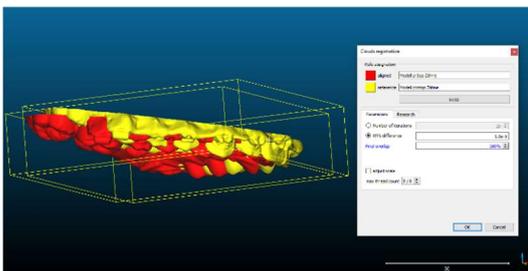


Abbildung 38: Anwendung des Überlagerungs-Algorithmus auf die Zahnreihen der Modelle - Screenshot aus CloudCompare®

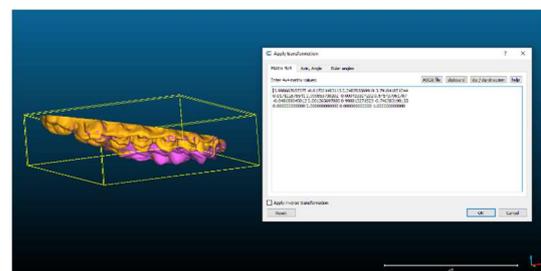


Abbildung 39: Durch den Überlagerungs-Algorithmus errechnete Transformationsmatrix für den Positionsunterschied zwischen prä- und postop. Modell - Screenshot aus CloudCompare®

3.5. Mehrfache Durchführung des Workflows

Da bei jedem Überlagerungsvorgang Ungenauigkeiten entstehen können und damit die Ergebnisse nicht exakt der Realität entsprechen, wurde der Workflow ab der Vorbereitung der Schädel-Dateien im IPS CaseDesigner dreimal an unterschiedlichen Tagen durchgeführt. Dies ermöglichte die Ergebnisse aus den drei Analyserunden für aussagekräftigere Werte zu mitteln und zudem eine selbstkritische Genauigkeitsanalyse des eigenen Workflows durchzuführen. Die Anzahl von drei wurde als Kompromiss zwischen Aussagekraft des Mittelwerts und erforderlicher Zeit eines Analyse-Workflows gewählt. Vor diesen drei Analyserunden wurde der Workflow bei jedem Fall im Sinne einer Proberunde durchgeführt, um die Eignung für die Analyse zu bestätigen. Die Ergebnisse aus dieser Proberunde wurden nicht mit in die statistische Auswertung einbezogen und verworfen.

3.6. Statistische Auswertung

Die Ergebnisdaten dieser deskriptiv-explorativen Studie wurden mit Excel (Microsoft® Excel® für Microsoft 365 MSO (Version 2207 Build 16.0.15427.20182) 64 Bit) erfasst und statistisch ausgewertet. Für jeden Fall wurde aus den Daten der drei Auswertungsrunden Mittelwerte für jeden der sechs Eulerschen Werte zur weiteren Analyse gebildet. Die Abweichung von Modellplanung zum postoperativen Endergebnis wurde durch Subtraktion der durchgeführten Verlagerung mit der im Artikulator simulierten Verlagerung errechnet.

3.6.1. Methodenfehler

Da die Ermittlungspräzision durch z.B. unterschiedliche Qualität der DVTs oder menschliche Ungenauigkeiten im Workflow von Fall zu Fall unterschiedlich sein kann, wurden für jeden Patientenfall mit seinen drei Auswertungsrunden separate Konfidenzintervalle von 90% bestimmt. Dadurch kann die Reliabilität, also die Schwankung zwischen den drei Analyserunden, bestimmt werden, um so eine Vorstellung über die Präzision des Analyseworkflows zu schaffen. Um eine kompakte Darstellung dieser Analyse zu ermöglichen, wurde die Differenz der oberen und unteren Grenzen des Konfidenzintervalls zum Mittelwert jedes Abweichungswertes ermittelt und aus allen 20 Fällen Mittelwerte, Minima und Maxima dieser Differenzen für jeden der sechs Eulerschen Parameter errechnet.

3.6.2. Quantitative Abweichungsanalyse

Aus den errechneten Gesamtabweichungen pro Fall wurde nun ein gesamter Mittelwert gebildet. Da die Abweichung sowohl positiv als auch negativ sein können, gleichen sich die Werte der Fälle gegenseitig aus. Um dies zu umgehen wurde ein Mittelwert aus den absoluten Abweichungswerten ermittelt. Außerdem wurden jeweils positive und negative Abweichungen separat gemittelt und ausgewertet, um einen Vergleich zwischen diesen zu ermöglichen. In tabellarischer Ausführung wurden neben diesen Mittelwerten Median, Minimal- und Maximalwert, erstes und drittes Quartil, sowie der Interquartilsabstand angegeben. Diese Parameter wurden zusätzlich mittels Box-Plot graphisch visualisiert. Darüber hinaus wurden die Mittelwerte der absoluten Abweichungswerte aus monognathen und bignathen Operationen separat ermittelt.

3.6.3. Relative Abweichungsanalyse

Wenn in der Planung eine Verlagerung über eine große Strecke geplant wird, hat die absolute Abweichung dieser Planung eine weniger große Auswirkung auf das Ergebnis, wie wenn die geplante Strecke relativ gesehen kleiner zu der gleichen Abweichung ist. Deshalb wurde für jeden Fall und für jeden der sechs Eulerschen Parameter ein Verhältnis aus geplanter Verlagerung und Abweichung von dieser Planung errechnet und aus allen Fällen ein Mittelwert gebildet. Auch hier wurden neben den Mittelwerten Median, Minimal- und Maximalwert, erstes und drittes Quartil, sowie Interquartilsabstand errechnet und graphisch in einem Box-Plot dargestellt. Gleichermaßen wurden wieder die Mittelwerte der monognathen und bignathen Operationen separat bestimmt.

Auch wenn eine relative Analyse eine andere Sicht auf die Ergebnisse erlaubt, können bei den errechneten Prozentwerten Anschaulichkeitsprobleme entstehen. Beispielhaft ist hier ein Fall, bei dem nahezu keine Verlagerung in der Modelloperation geplant wurde. Es reicht nun schon eine absolut gesehen kleine Umsetzungsungenauigkeit, um den Prozentwert des Verhältnisses sehr in die Höhe schießen zu lassen. Dieser Wert ist dann zwar wahrheitsgemäß, aber klinisch schlecht interpretierbar. Daher wurde zusätzlich eine relative Abweichungsanalyse durchgeführt, bei der alle Rotationen und Translationen herausgefiltert wurden, die in der Planung in ihrem Ausmaß keine klinische Relevanz hatten. Die Grenze wurde dabei auf $< 0,5 \text{ mm/}^\circ$ gesetzt und ist im Einklang mit der allgemeinen Studienlage zur orthopädischen Kieferchirurgie (Baan et al., 2016; Bell et al., 2003; Rückschloß et al., 2019; Schendel et al., 2013).

3.6.4. Analyse der Auswirkung des Übertragungsfehlers des Gesichtsbogens auf die Gesamtabweichung zwischen Planung und Ergebnis

Die Abweichung, die entsteht, wenn man die Planung nicht im Artikulator, sondern in den Schädel übertragen betrachtet, wurde ebenfalls mit dem Ergebnis verglichen und eine Differenz errechnet. Der Vergleich der Abweichungswerte bei Planung im Artikulator und übertragener Planung in den Schädel erlaubt eine Bewertung dessen, wie sich Fehler bei der Abnahme der Patienten-Horizontale und Übertragung in den Artikulator auf die Gesamtabweichung von der eigentlich gewollten Planung im Artikulator bis zum Ergebnis auswirken. Dazu wurde zwischen den beiden Abweichungswerten eine Differenz gebildet und mit der Gesamtabweichung verglichen. Auch ein Withney-U-Test wurde zwischen den beiden Abweichungen durchgeführt und ein p-Wert errechnet.

3.6.5. Bewertung des individuellen OP-Erfolgs

Als klinisch akzeptable Resultate zwischen Planung und Umsetzung bei Umstellungsosteotomien geben die meisten Autoren eine Grenze von 2 mm bzw. 2° an (Govaerts et al., 2018; Kaipatur et al., 2009; Proffit et al., 2007; Rückschloß et al., 2019). Es wurde für jeden der sechs Parameter gezählt, wie viele Fälle diese Grenze überschreiten. Dabei wurde auch zwischen positiver und negativer überschreitender Abweichung unterschieden. Zudem wurde ermittelt, wie viele überschreitende Abweichungen jeweils pro Fall vorkommen und für eine bis sechs mögliche Überschreitungen die Summe der Fälle errechnet.

4. Ergebnisse

4.1. Grundlegende Abweichungswerte

Für jeden Fall wurde aus allen drei Durchgängen für jeden der sechs Eulerschen Werte ein Mittelwert gebildet. Dieser stellt quantitativ dar, wie das Operationsergebnis von der Modellplanung im Artikulator abweicht. Die Rotationswerte von Phi (Yaw), Theta (Pitch) und Psi (Roll) sind in Grad (°) angegeben. Die Translationswerte von X-Achse (anterior/posterior), Y-Achse (links-rechts) und Z-Achse (kranial/kaudal) sind in Millimetern (mm) angegeben.

Tabelle 2: Gemittelte Ergebnisse der Genauigkeitsanalyse von Planung und Umsetzung für jeden Patientenfall in Form von Abweichungswerten - Fälle mit bignather Umstellungsosteotomie sind kursiv markiert

Fall	Phi (Yaw)	Theta (Pitch)	Psi (Roll)	X (ant./post.)	Y (links/rechts)	Z (kranial/kaudal)
1	-0,94	-0,30	-2,55	1,43	-0,82	2,52
2	-1,88	-1,13	0,41	1,27	-0,56	3,10
3	-1,45	-3,34	0,03	2,25	-1,06	5,35
4	0,01	0,06	1,34	0,94	0,89	-1,18
5	1,20	3,17	1,47	-3,12	1,51	-2,44
6	-0,25	-3,00	0,02	1,01	-0,88	3,99
7	-0,15	-0,71	0,31	0,24	0,38	-1,28
8	-0,46	0,70	0,51	-1,34	-0,58	2,13
9	0,31	0,09	-0,16	-2,71	0,20	0,95
10	-0,67	2,50	0,59	-2,59	0,03	-3,44
11	1,01	0,25	-1,22	1,56	2,12	0,36
12	-2,60	-3,21	-2,51	-0,97	-2,55	1,42
13	0,07	-0,20	0,11	-0,21	-0,02	2,27
14	0,92	0,89	-1,52	-1,87	-0,40	-1,88
15	0,90	3,76	2,25	-0,70	0,29	-0,94
16	-0,41	3,91	-1,68	-0,71	-0,24	0,06
17	-2,50	2,59	-1,83	-3,15	-0,30	-1,31
18	0,40	1,68	-1,17	-1,87	-0,29	-0,86
19	-0,92	0,13	0,16	-3,59	-1,31	-1,68
20	0,98	1,86	0,55	-1,00	1,43	-1,29
MW	-0,32	0,49	-0,25	-0,76	-0,11	0,29
Absoluter MW	0,90	1,67	1,02	1,63	0,79	1,92

4.2. Analyse des Methodenfehlers

Da der Analyseworkflow Ungenauigkeiten besitzt und so eine Differenz zwischen ermittelter Abweichung und realer Abweichung besteht, wurden für jeden Patientenfall mit seinen drei Auswertungsrunden separate Konfidenzintervalle von 90% bestimmt. Um eine kompakte Darstellung dieser Analyse für dieses Kapitel zu ermöglichen, wurde die Differenz der oberen und unteren Grenzen des Konfidenzintervalls zum Mittelwert jedes Abweichungswertes errechnet. In der folgenden Tabelle sind die Mittelwerte, Minima und Maxima dieser Differenzen aus allen 20 Fällen angegeben. Da die Differenzwerte von oberer und unterer Grenze des Konfidenzintervalls zum Mittelwert identisch sind, wurden sie zudem in einer Tabelle zusammengefasst.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Ungenauigkeiten im Workflow innerhalb jedes Patientenfalls höhere Werte einnehmen können. Im Schnitt weichen obere und untere Grenze des 90%igen Konfidenzintervalls bei Pitch und Roll deutlich höher vom Abweichungsmittelwert ab als beim Yaw. Bei den Translationen sind die Werte quantitativ etwas besser. Die Ermittlung der Abweichungswerte in der Longitudinalachse zeigt hier die höchsten Ungenauigkeiten.

Tabelle 3: Statistische Analyse der quantitativen Abweichung der oberen und unteren Grenzen der Konfidenzintervalle vom Mittelwert

	Phi (Yaw)	Theta (Pitch)	Psi (Roll)	X (ant./post.)	Y (links/rechts)	Z (kranial/kaudal)
Minimum	+/- 0,02	+/- 0,06	+/- 0,05	+/- 0,00	+/- 0,03	+/- 0,02
Mittelwert	+/- 0,15	+/- 0,37	+/- 0,30	+/- 0,09	+/- 0,12	+/- 0,15
Maximum	+/- 0,51	+/- 1,43	+/- 1,76	+/- 0,19	+/- 0,29	+/- 0,49

Bei 8 Werten innerhalb von 5 Patientenfällen wurde die Grenze der klinischen Relevanz von +/- 0,5 mm/° (Baan et al., 2016; Bell et al., 2003; Rückschloß et al., 2019; Schendel et al., 2013) überschritten. Davon waren 1 im Bereich des Yaws, 4 im Bereich des Pitches und 3 im Bereich des Rolls.

4.3. Quantitative Abweichungsanalyse

4.3.1. Reale Werte

Mit den sechs Eulerschen Werten aus allen 20 Fällen konnte die Verteilung der Abweichungen analysiert werden. Allerdings ist die Aussagekraft eingeschränkt, da positive und negative Werte sich gegenseitig aufheben.

Im Bereich der Rotationen gab es beim Pitch, gemessen am Interquartilsabstand von 2,43°, die größten Variationen in der Planungsumsetzung und quantitativ die größten Abweichungen, gemessen am Minimum von -3,34° und Maximum von 3,91°. Roll und Yaw zeigen präzisere Ergebnisse und weniger Heterogenität zwischen den verschiedenen Patientenfällen.

Bei den Translationen wurde vor allem in der Y-Achse mit wenig Unterschied zwischen den Fällen operiert mit einem Interquartilsabstand von 0,95 mm. Auch die quantitative Präzision mit einem Minimum von -2,55 mm und einem Maximum von 2,12 mm ist hier höher als in X- und Z-Achse. Bei der Y-Achse gab es zwei Fälle mit einem aus dem Mittel der anderen Fälle ausreißendem Wert (s. Abbildung 41). X- und Z-Achse weisen keine Ausreißer auf, haben jedoch deutlich größere Heterogenität zwischen den Fällen mit Interquartilsabständen von 3,01 mm bei der X-Achse und 3,46 mm bei der Z-Achse.

Tabelle 4: Statistische Analyse der realen Abweichungswerte

	Phi (Yaw)	Theta (Pitch)	Psi (Roll)	X (ant./post.)	Y (links/rechts)	Z (kranial/kaudal)
Mittelwert	-0,32	0,49	-0,25	-0,76	-0,11	0,29
Minimum	-2,60	-3,34	-2,55	-3,59	-2,55	-3,44
1. Quartil	-0,92	-0,40	-1,30	-2,05	-0,64	-1,30
Median	-0,20	0,19	0,07	-0,84	-0,26	-0,40
3. Quartil	0,52	2,02	0,52	0,96	0,31	2,16
Maximum	1,20	3,91	2,25	2,25	2,12	5,35
Interquartilsabstand	1,45	2,43	1,81	3,01	0,95	3,46

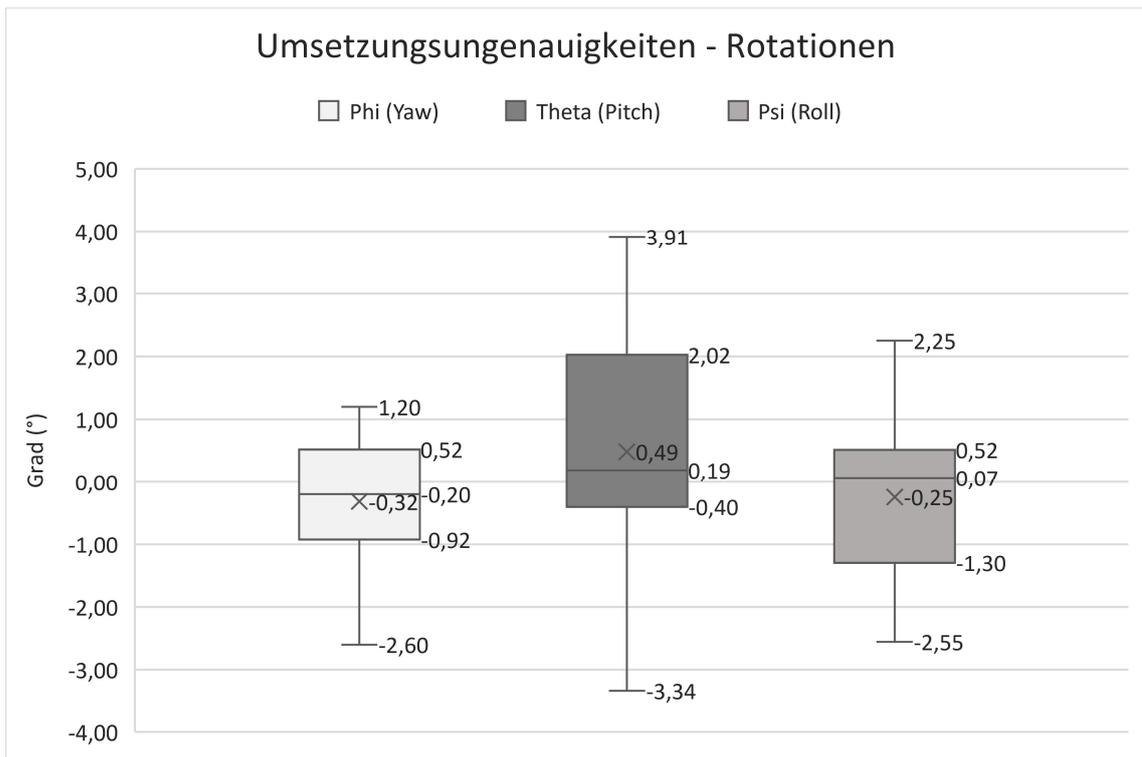


Abbildung 40: Box-Plot der Umsetzungsungenauigkeit der Rotationen

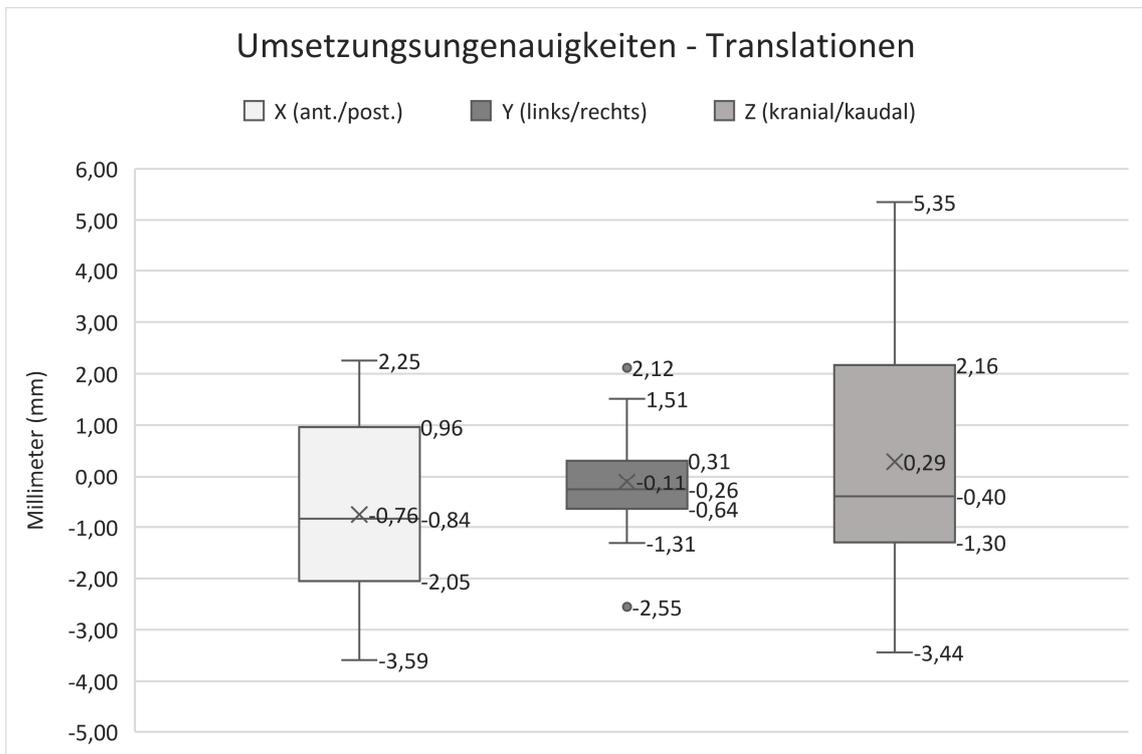


Abbildung 41: Box-Plot der Umsetzungsungenauigkeiten der Translationen

4.3.2. Absolute Werte

Der Mittelwert aus den absoluten Werten der Abweichung zwischen Planung und Umsetzung erlaubt einen besseren Vergleich der Präzisionen zwischen den verschiedenen Rotations- bzw. Translationsachsen. Allerdings sind diese Daten nun nicht mehr richtungsbezogen und dürfen dafür nicht zur Interpretation genutzt werden.

An den Mittelwerten sieht man, dass bei den Rotationen der Yaw mit durchschnittlichen $0,90^\circ$ die kleinsten und der Pitch mit durchschnittlichen $1,67^\circ$ die größten Abweichungen zwischen Planung und Ergebnis zeigt. Bei den linearen Bewegungen hat die Y-Achse (links/rechts) mit 0,79 mm die kleinsten und die Z-Achse (kranial/kaudal) mit 1,92 mm die größten Abweichungen, wobei die X-Achse (anterior/posterior) mit durchschnittlichen 1,63 mm quantitativ nicht weit hinter der Z-Achse liegt.

Die Minimalwerte zeigen, dass es bei fast allen Achsen Fälle mit sehr präziser Umsetzung der Planung bei Werten von $< 0,1^\circ/\text{mm}$ gibt. Nur die X-Achse steht diesen mit 0,21 mm im Minimum nach.

Bei den Maximalwerten der Rotation gibt es beim Pitch die größte Abweichung mit $3,91^\circ$. Yaw und Roll folgen mit $2,60^\circ$ bzw. $2,55^\circ$. Bei den linearen Bewegungen hat die Z-Achse den Fall mit der größten Abweichung mit 5,35 mm. Im Mittelfeld liegt ein Fall der X-Achse mit 3,59 mm. Das kleinste Abweichungsmaximum hat hier die Y-Achse mit 2,55 mm.

Tabelle 5: Statistische Analyse der absoluten Abweichungswerte

	Phi (Yaw)	Theta (Pitch)	Psi (Roll)	X (ant./post.)	Y (links/rechts)	Z (kranial/kaudal)
Mittelwert	0,90	1,67	1,02	1,63	0,79	1,92
Minimum	0,01	0,06	0,02	0,21	0,02	0,06
1. Quartil	0,38	0,29	0,27	0,96	0,29	1,12
Median	0,91	1,40	0,88	1,38	0,57	1,55
3. Quartil	1,06	3,04	1,56	2,34	1,12	2,46
Maximum	2,60	3,91	2,55	3,59	2,55	5,35
Interquartilsabstand	0,68	2,76	1,29	1,38	0,83	1,33
MW monognath	0,46	1,27	0,90	1,26	0,58	1,23
MW bignath	1,14	1,89	1,09	1,83	0,91	2,29

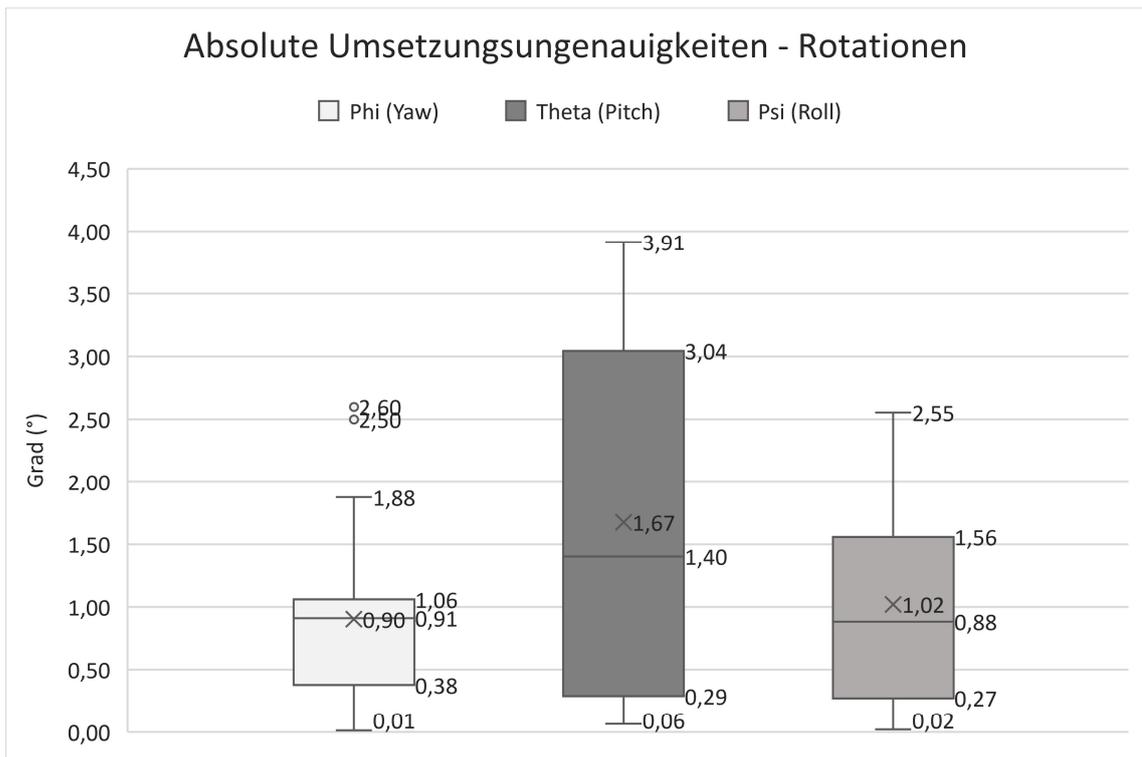


Abbildung 42: Box-Plot der absoluten Umsetzungsungenauigkeiten der Rotationen

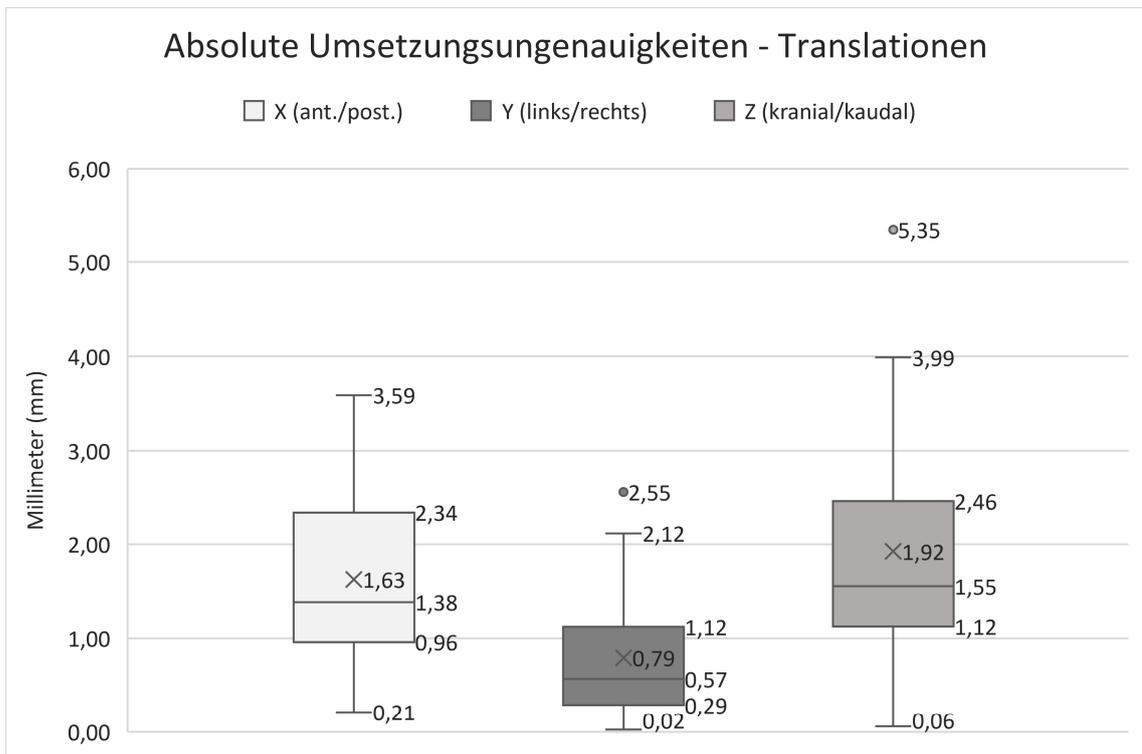


Abbildung 43: Box-Plot der absoluten Umsetzungsungenauigkeiten der Translationen

4.3.3. Richtungsbezogene Werte

Um eine noch detailliertere Einsicht in die Ergebnisse zu ermöglichen, wurden die negativen bzw. positiven Werte zusätzlich unter sich statistisch ausgewertet. Dies ermöglicht die isolierte Betrachtung der Umsetzungsungenauigkeiten einer bestimmten Richtung. Zudem wurden die Fälle mit Abweichungen in eine Richtung gezählt. Der anschließende statistische Vergleich beider Richtungen wurde hier jedoch nicht durchgeführt, da dafür die Fallzahl von 20 zu niedrig ist.

Negative Werte

Tabelle 6: Statistische Analyse der negativen Abweichungswerte und Fallzahlen

	Phi (Yaw)	Theta (Pitch)	Psi (Roll)	X (ant./post.)	Y (links/rechts)	Z (kranial/kaudal)
Mittelwert	-1,11	-1,70	-1,58	-1,83	-0,75	-1,63
Minimum	-2,60	-3,34	-2,55	-3,59	-2,55	-3,44
1. Quartil	-1,66	-3,10	-2,00	-2,71	-0,92	-1,83
Median	-0,92	-1,13	-1,60	-1,87	-0,57	-1,30
3. Quartil	-0,44	-0,51	-1,21	-0,97	-0,30	-1,21
Maximum	-0,15	-0,20	-0,16	-0,21	-0,02	-0,86
Interquartilsabstand	1,23	2,60	0,79	1,74	0,62	0,62
Anzahl der Fälle mit negativen Abweichungen	11	7	8	13	12	10

Positive Werte

Tabelle 7: Statistische Analyse der positiven Abweichungswerte und Fallzahlen

	Phi (Yaw)	Theta (Pitch)	Psi (Roll)	X (ant./post.)	Y (links/rechts)	Z (kranial/kaudal)
Mittelwert	0,65	1,66	0,65	1,24	0,86	2,22
Minimum	0,01	0,06	0,02	0,24	0,03	0,06
1. Quartil	0,31	0,25	0,14	0,98	0,26	1,07
Median	0,90	1,68	0,46	1,27	0,64	2,20
3. Quartil	0,98	2,59	0,78	1,49	1,45	2,96
Maximum	1,20	3,91	2,25	2,25	2,12	5,35
Interquartilsabstand	0,66	2,34	0,63	0,51	1,19	1,89
Anzahl der Fälle mit positiven Abweichungen	9	13	12	7	8	10

4.4. Relative Abweichungsanalyse

Die Betrachtung der relativen Abweichungen von Planung zum postoperativen Ergebnis erlaubt eine andere Sichtweise auf die Ergebnisse. Die größeren Umsetzungsungenauigkeiten fallen bei größeren geplanten Verlagerungen nicht so sehr ins Gewicht. Die Relationen zwischen Planung und Abweichung von der Planung werden in Prozent (%) angegeben.

Tabelle 8: Verhältnisse zwischen Planung und postoperativem Ergebnis für jeden Patientenfall - Fälle mit bignather Umstellungsosteotomie sind kursiv markiert

Fall	Phi (Yaw)	Theta (Pitch)	Psi (Roll)	X (ant./post.)	Y (links/rechts)	Z (kranial/kaudal)
1	695%	332%	370%	208%	230%	185%
2	96%	59%	151%	33%	41%	247%
3	155%	119%	11%	63%	183%	352%
4	1%	2%	339%	43%	53%	188%
5	45%	233%	46%	22%	89%	73%
6	13%	329%	2%	15%	43%	317%
7	10%	12%	16%	11%	40%	222%
8	6%	76%	37%	18%	17%	77%
9	26%	4%	10%	67%	16%	134%
10	89%	97%	62%	49%	16%	2582%
11	24%	122%	87%	260%	142%	26%
12	222%	47%	525%	107%	342%	39%
13	2%	18%	3%	9%	2%	145%
14	149%	21%	104%	57%	64%	119%
15	95%	204%	487%	30%	22%	42%
16	796%	11280%	776%	11%	60%	3%
17	61%	384%	183%	51%	11%	137%
18	38%	793%	65%	28%	23%	68%
19	513%	2%	12%	142%	314%	268%
20	50%	150%	65%	30%	86%	266%
MW	154%	714%	168%	63%	90%	275%

Bei Betrachtung der Werte fällt auf, dass Zahlen im hohen dreistelligen und sogar fünfstelligen Prozentbereich existieren (Maximum 11280%). Diese Ergebnisse entsprechen von statistisch-theoretischer Seite der Realität. Jedoch sind diese schlecht interpretierbar und stören die Auswertung (s. Tabelle 9) und Visualisierung (s. Abbildung 44, Abbildung 45) der Werte in ihrer Anschaulichkeit. Daher wird hier, wie in Kapitel 3.6.3 erläutert, nicht weiter auf diese Resultate eingegangen.

Tabelle 9: Statistische Analyse der relativen Abweichungswerte

	Phi (Yaw)	Theta (Pitch)	Psi (Roll)	X (ant./post.)	Y (links/rechts)	Z (kranial/kaudal)
Mittelwert	154%	714%	168%	63%	90%	275%
Min	1%	2%	2%	9%	2%	3%
Q1	21%	20%	15%	21%	21%	72%
Median	55%	108%	65%	38%	48%	141%
Q3	151%	257%	222%	64%	102%	252%
Max	796%	11280%	776%	260%	342%	2582%
Interquartilsabstand	129%	237%	207%	43%	81%	180%
MW monognath	32%	177%	146%	32%	37%	142%
MW bignath	220%	1003%	179%	79%	118%	346%

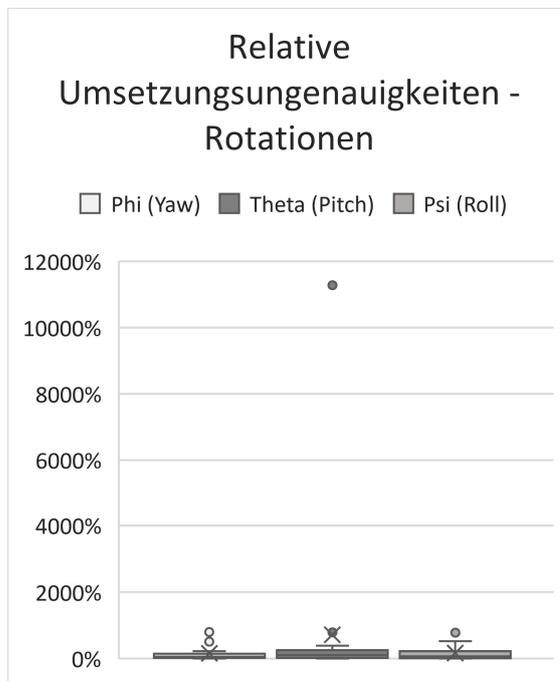


Abbildung 44: Box-Plot der relativen Umsetzungenauigkeiten der Rotationen

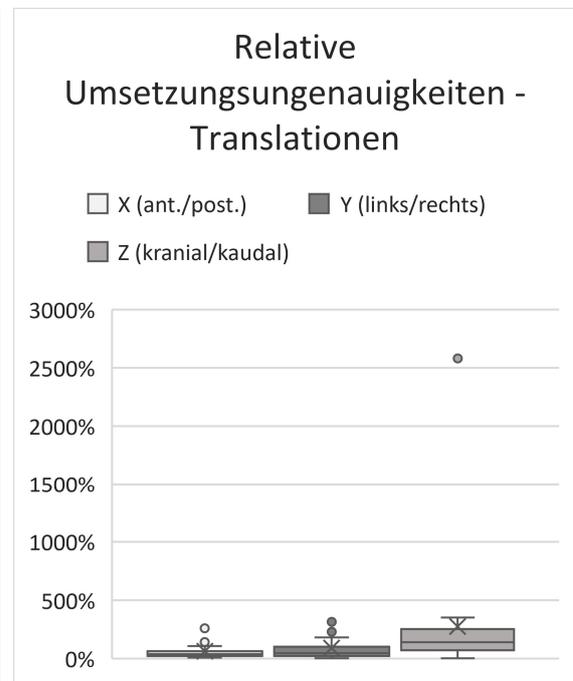


Abbildung 45: Box-Plot der relativen Umsetzungenauigkeiten der Translationen

Um eine klinisch besser interpretierbare relative Analyse zu ermöglichen, wurden wie in der statistischen Methodik (Kapitel 3.6.3) beschrieben alle Werte aus der Statistik gefiltert, für die eine Planung von $< 0,5 \text{ mm/}^\circ$ stattgefunden hat (die entsprechenden Werte sind in Tabelle 10 nicht mehr vorhanden). Die Anschaulichkeit der statistischen Auswertung und Box-Plots ist hierdurch deutlich verbessert. Es existieren keine die Statistik störenden Ausreißer mehr, wie auch an den Maximalwerten (Maximum 384%) zu sehen ist.

Tabelle 10: Verhältnisse zwischen Planung und postoperativem Ergebnis für jedes Parameter mit klinisch relevanten Planungswerten für jeden Patientenfall - Fälle mit bignather Umstellungsosteotomie sind kursiv markiert

Fall	Phi (Yaw)	Theta (Pitch)	Psi (Roll)	X (ant./post.)	Y (links/rechts)	Z (kranial/kaudal)
1			370%	208%		185%
2	96%	59%		33%	41%	247%
3	155%	119%		63%	183%	352%
4	1%	2%		43%	53%	188%
5	45%	233%	46%	22%	89%	73%
6	13%	329%	2%	15%	43%	317%
7	10%	12%	16%	11%	40%	222%
8	6%	76%	37%	18%	17%	77%
9	26%	4%	10%	67%	16%	134%
10	89%	97%	62%	49%		
11	24%		87%	260%	142%	26%
12	222%	47%		107%	342%	39%
13	2%	18%	3%	9%	2%	145%
14	149%	21%	104%	57%	64%	119%
15	95%	204%		30%	22%	42%
16				11%		3%
17	61%	384%	183%	51%	11%	137%
18	38%		65%	28%	23%	68%
19		2%	12%	142%		268%
20	50%	150%	65%	30%	86%	
MW	64%	110%	76%	63%	73%	147%

Gemessen an den Mittelwerten zeigen die relativen Ergebnisse bei den Rotationen beim Yaw und Roll bessere Umsetzungsgenauigkeiten als beim Pitch. Bei den Translationen wurden die Verlagerungen in der X- und Y-Achse besser umgesetzt als in der Z-Achse.

Tabelle 11: Statistische Analyse der nach klinischer Relevanz gefilterten relativen Abweichungswerte

	Phi (Yaw)	Theta (Pitch)	Psi (Roll)	X (ant./post.)	Y (links/rechts)	Z (kranial/kaudal)
Mittelwert	64%	110%	76%	63%	73%	147%
Min	1%	2%	2%	9%	2%	3%
Q1	13%	16%	13%	21%	21%	69%
Median	45%	67%	54%	38%	42%	135%
Q3	95%	164%	82%	64%	86%	214%
Max	222%	384%	370%	260%	342%	352%
Interquartilsabstand	82%	148%	69%	43%	65%	144%
MW monognath	32%	75%	39%	32%	37%	122%
MW bignath	86%	131%	97%	79%	102%	159%

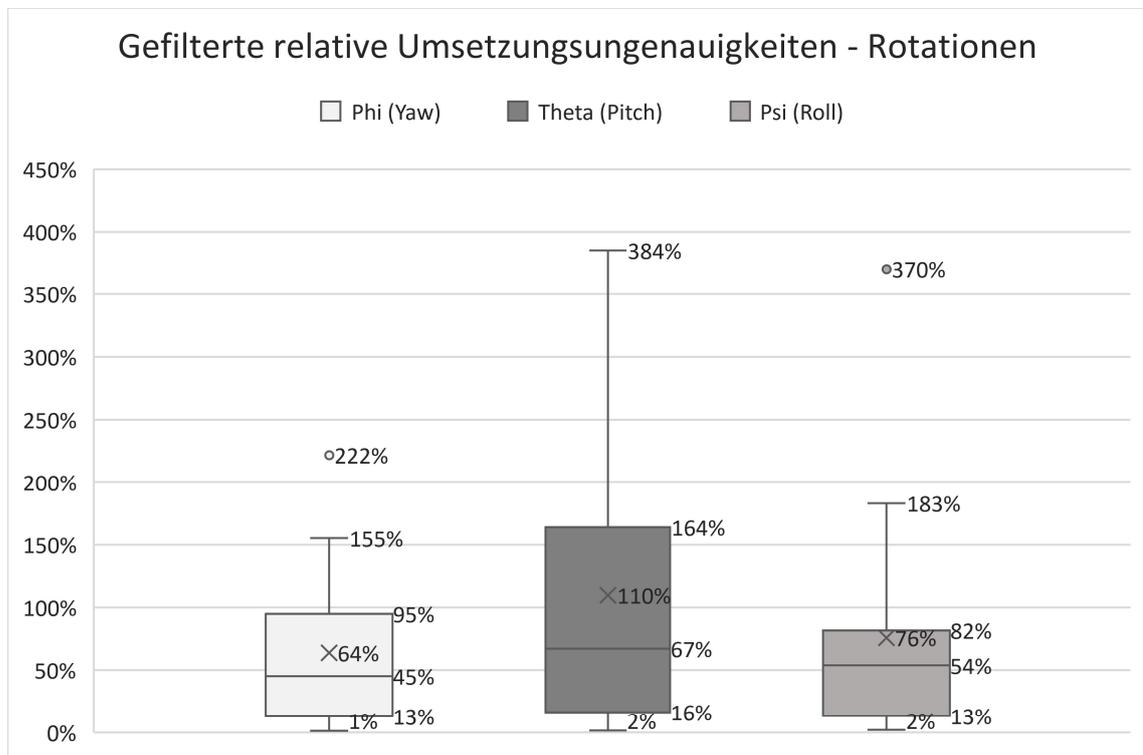


Abbildung 46: Box-Plot der nach klinischer Relevanz gefilterten relativen Umsetzungsgenauigkeiten der Rotationen

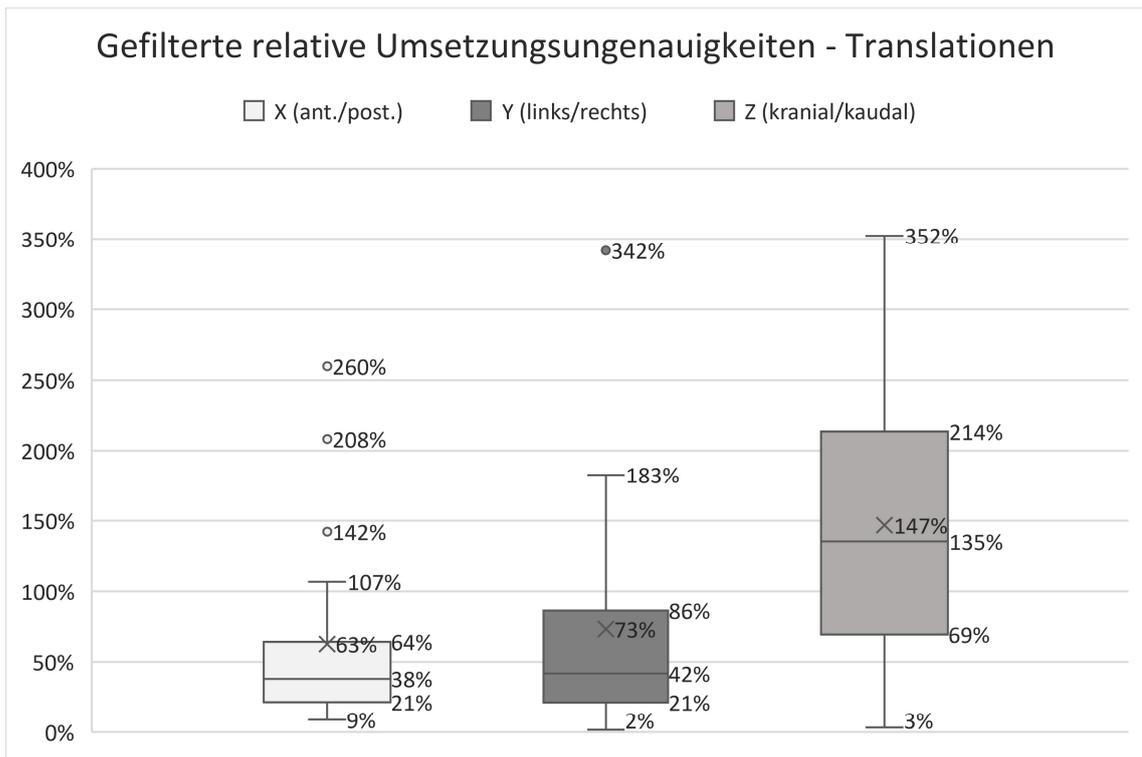


Abbildung 47: Box-Plot der nach klinischer Relevanz gefilterten relativen Umsetzungenauigkeiten der Translationen

4.5. Analyse der Auswirkung des Übertragungsfehlers des Gesichtsbogens auf die Gesamtabweichung zwischen Planung und Ergebnis

Mit den separat analysierten Rotationen und Translationen der im Patientenschädel übertragenen Planung wurden analog zu der eigentlich gewollten Planung eine Differenz zur tatsächlichen Durchführung errechnet und so für jeden Fall eine Umsetzungsungenauigkeit von der in den Schädel übertragenen Planung ausgehend bestimmt. Aus allen Fällen wurde für jeden der sechs Eulerschen Werte wieder ein Mittelwert gebildet, der den direkten Vergleich mit dem Mittelwert der Abweichung zwischen Planung im Artikulator und Durchführung erlaubt.

Bei den Rotationen ist die Differenz der Umsetzungsungenauigkeiten ausgehend von den verschiedenen übertragenen Planungen beim Roll mit $-0,16^\circ$ quantitativ am größten. Bei Yaw und Pitch sind die Differenzen verglichen dazu klein mit $0,03^\circ$ und $-0,02^\circ$.

Bei den Translationen ist die Differenz der Z-Achse mit 0,53 mm quantitativ gesehen recht hoch. Bei X- und Y-Achse sind die Differenzen dagegen sehr klein mit 0,03 mm und 0,01 mm.

Tabelle 12: Quantitativer Vergleich der Umsetzungsungenauigkeiten ausgehend von der Planung im Artikulator und von der in den Schädel übertragenen Planung

Mittelwerte der Abweichungen	Phi (Yaw)	Theta (Pitch)	Psi (Roll)	X (ant./post.)	Y (links/rechts)	Z (kranial/kaudal)
Ausgehend von Planung im Artikulator	-0,32	0,49	-0,25	-0,76	-0,11	0,29
Ausgehend von in Schädel übertragener Planung	-0,35	0,51	-0,09	-0,79	-0,10	-0,24
Differenz	0,03	-0,02	-0,16	0,03	0,01	0,53

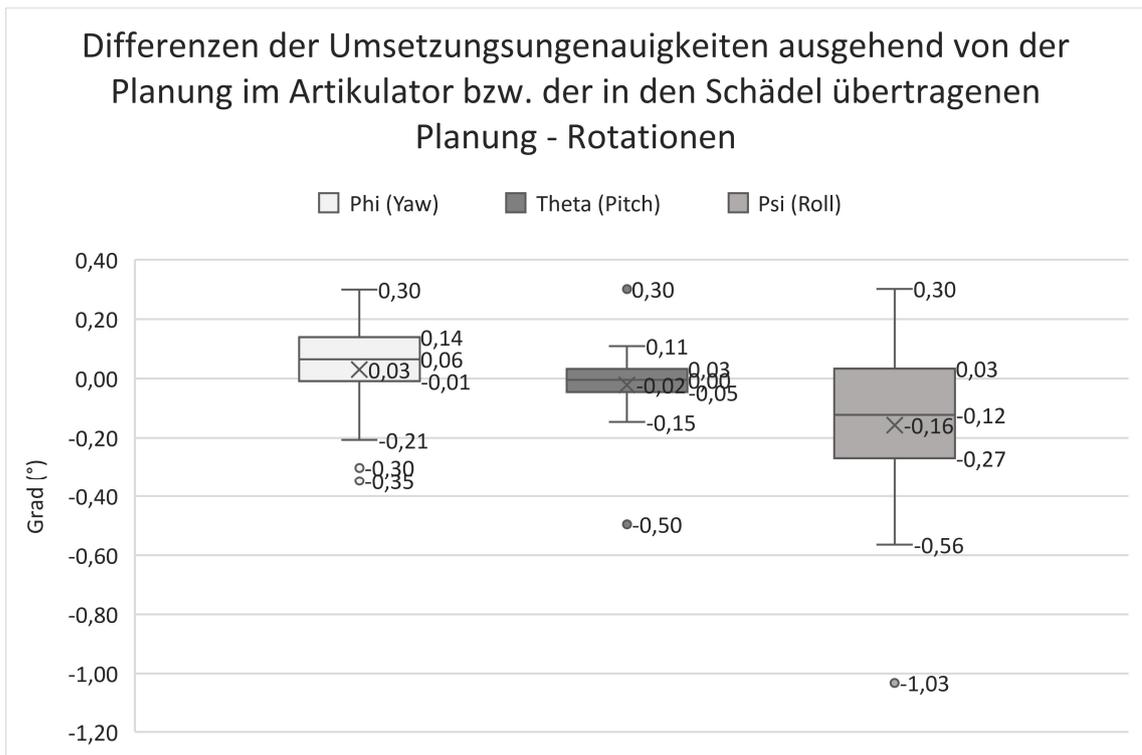


Abbildung 48: Box-Plot der Differenzen der Umsetzungenauigkeiten der Rotationen ausgehend von der Planung im Artikulator bzw. der in den Schädel übertragenen Planung

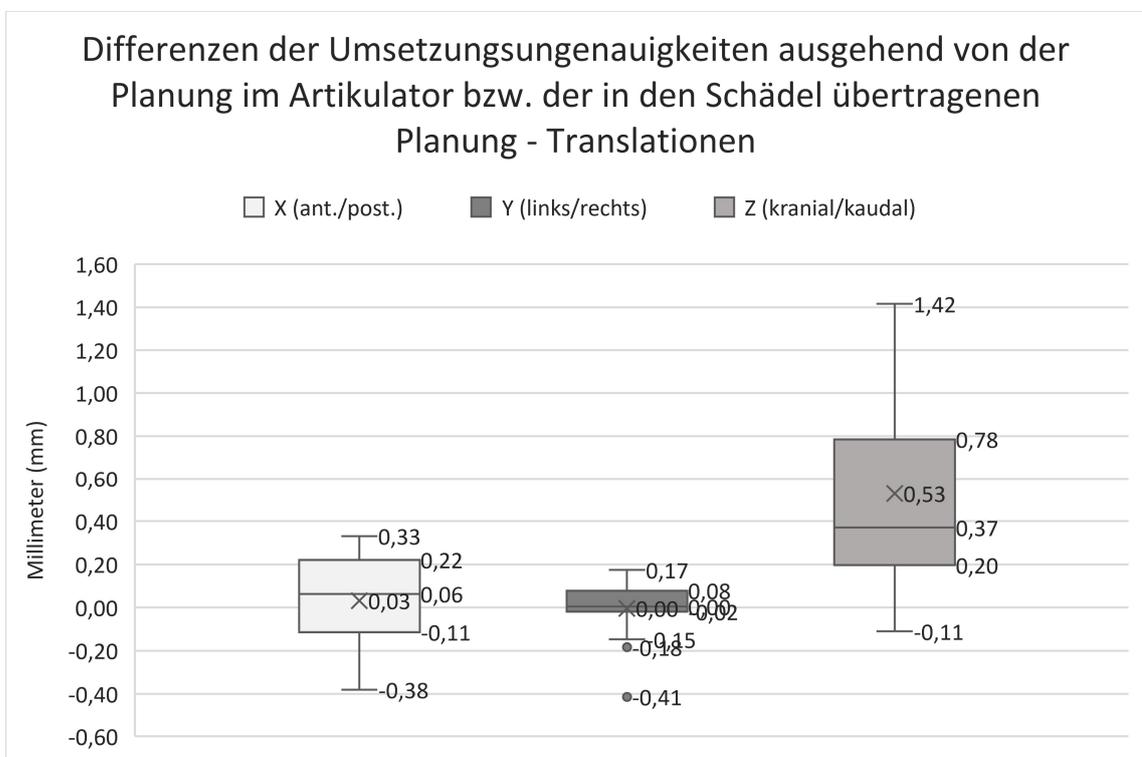


Abbildung 49: Box-Plot der Differenzen der Umsetzungenauigkeiten der Translationen ausgehend von der Planung im Artikulator bzw. der in den Schädel übertragenen Planung

Die weitere statistische Analyse mit einem Withney-U-Test erlaubt mit Errechnung der p-Werte, ausgehend von Ranglisten der 20 Patientenfälle, eine objektivere Einschätzung der Unterschiede zwischen den Umsetzungsungenauigkeiten der verschiedenen übertragenen Planungen. Je kleiner der p-Wert, desto unterschiedlicher sind die Abweichungen zwischen Planung und Durchführung.

Tabelle 13: p-Werte des Withney-U-Test zwischen den Umsetzungsungenauigkeiten ausgehend von der Planung im Artikulator bzw. der in den Schädel übertragenen Planung

	Phi (Yaw)	Theta (Pitch)	Psi (Roll)	X (ant./post.)	Y (links/rechts)	Z (kranial/kaudal)
p-Wert	0,79	0,98	0,63	0,98	0,98	0,32

4.6. Bewertung des individuellen OP-Erfolgs

Um den individuellen OP-Erfolg zu bestimmen, wurde die Grenze der akzeptablen Abweichung von Rotation und Translation auf 2° bzw. 2 mm gesetzt. Diese Grenzen wurden oft in der Literatur zu Umstellungsosteotomien des Oberkiefers verwendet (Govaerts et al., 2018; Kaipatur et al., 2009; Proffit et al., 2007; Rückschloß et al., 2019).

Die meisten Ausreißer bei den Rotationen gab es beim Pitch mit einer Anzahl von 8. Davon waren 5 im positiven Bereich mit > 2°. Yaw und Roll hatten deutlich weniger Ausreißer mit 2 bzw. 3 Fällen.

Bei den Translationen gab es die meisten Ausreißer bei der Z-Achse mit einer Anzahl von 8. Davon waren 6 im positiven Bereich mit > 2 mm. Bei der X-Achse gab es mit 6 Ausreißern nicht viel weniger. Nur die Y-Achse liegt mit 2 Überschreitungen deutlich darunter.

Tabelle 14: Anzahl der Ausreißer der bei Umsetzungsungenauigkeiten

	Phi (Yaw)	Theta (Pitch)	Psi (Roll)	X (ant./post.)	Y (links/rechts)	Z (kranial/kaudal)
< -2	2	3	2	5	1	2
> 2	0	5	1	1	1	6
gesamt	2	8	3	6	2	8

Da innerhalb eines Patientenfalls mehrere dieser Ausreißer vorhanden sein können, wurden diese für jeden Fall separat gezählt und am Ende zusammengezählt, bei wie vielen Fällen wie viele dieser Ausreißer vorkommen.

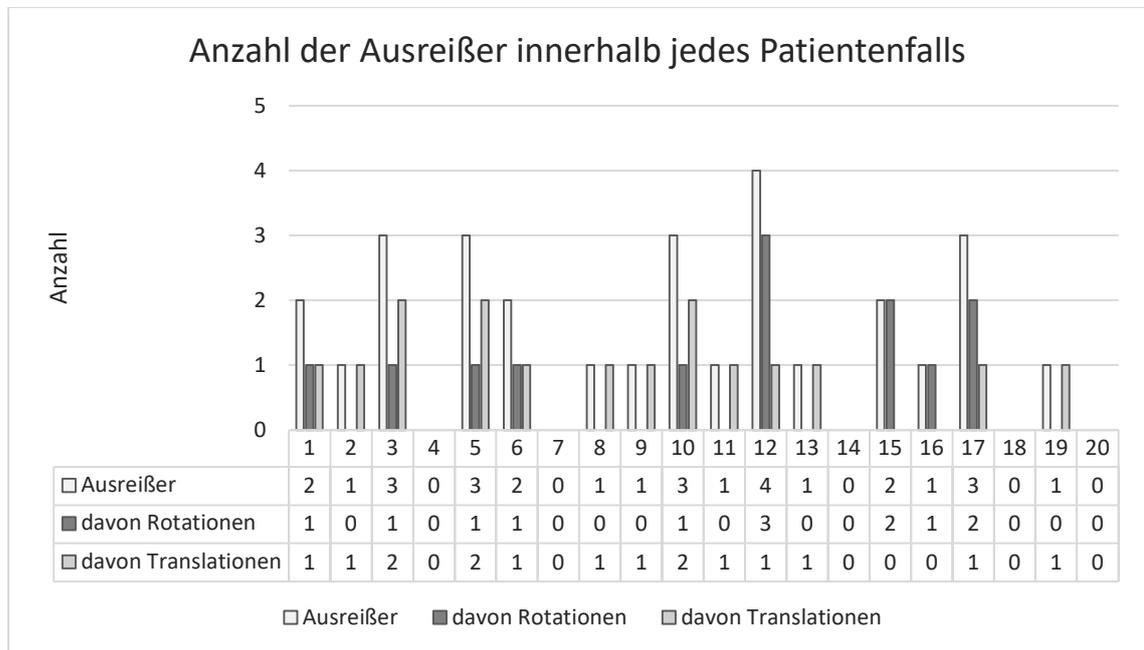


Abbildung 50: Säulendiagramm der Ausreißer bei den Umsetzungenauigkeiten aufgeschlüsselt in Patientenfälle

Keine Ausreißer innerhalb eines Patientenfalls gab es bei 5 Fällen. Bei 7 Patientenfällen kam nur 1 Ausreißer vor. 2 Ausreißer kamen bei 3 Patientenfällen und 3 Ausreißer bei 4 Patientenfällen vor. Bei einem Fall kam es sogar zu 4 Ausreißern, was jedoch das Maximum ist.

11-mal kamen keine Rotations-Ausreißer und 7-mal keine Translations-Ausreißer innerhalb eines Patientenfalls vor.

Tabelle 15: Fallzahl aufgeschlüsselt anhand der Menge der Ausreißer bei den Umsetzungenauigkeiten

Menge der Ausreißer	Fallzahl	davon Rotationen	davon Translationen	Ausreißer bei Rotationen	Ausreißer bei Translationen
0	5	0	0	11	7
1	7	1	6	6	10
2	3	4	2	2	3
3	4	5	7	1	0
4	1	3	1	0	0
5	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0

5. Diskussion

5.1. Kritische Auseinandersetzung mit der Methodik

5.1.1. Patientengut

Die in dieser Studie untersuchte Fallzahl von 20 sollte in der medizinischen Wissenschaft als relativ gering angesehen werden. Eine größere Menge würde mit Sicherheit die Qualität der quantitativen Ergebnisse dieser Arbeit erhöhen und eine inhaltsreichere Statistik erlauben. Trotzdem ist nach Kenntnisstand des Autors ein Pool von 20 +/- 10 Patient:innen bei Untersuchungen von konventionell geplanten Umstellungsosteotomien nicht unüblich (Bouchard & Landry, 2013; Kwon et al., 2014; Lartizien et al., 2019; Park & Posnick, 2013; Ritto et al., 2018; Schneider et al., 2005; Song & Baek, 2009). Trotzdem gibt es Studien, die diese Zahlen deutlich überbieten, z.B. Dreiseidler et al. mit 92 Fällen (Dreiseidler & Lentzen et al., 2017), oder Sharifi et al. mit 46 Fällen (Sharifi et al., 2008). Zwar wurden in einem 3-Jahreszeitraum an der Universitätsklinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer- und Plastische Gesichtschirurgie des Universitätsklinikums Halle 62 Umstellungsosteotomien durchgeführt, jedoch musste diese Zahl für diese Untersuchung durch die Einschlusskriterien deutlich reduziert werden. Daher wurde für diese Studie entschieden das Patientengut nicht noch weiter in Untergruppen aufzuteilen. Dies hätte zwar ermöglicht Präzisionsunterschiede zwischen verschiedenen Operationsplänen zu vergleichen, die Aussagekraft innerhalb dieser Subgruppen wäre aber denkbar gering gewesen.

5.1.2. Modellscan

Da die Scans der Gipsmodelle der Zahnreihen mit einer Schärfe von 0,05 mm durchgeführt wurden, ist eine große Auswirkung auf die Ergebnisse der Genauigkeitsanalyse äußerst unwahrscheinlich. Lediglich bei den Artikulatorplatten musste hinsichtlich der Scanpräzision ein kleiner Abstrich mit dem Scanspray hingenommen werden. Doch auch hier wird die Verschlechterung der Detailschärfe durch die Feinlörnigkeit des Sprays äußerst klein sein. Zudem besitzen die Artikulatorplatten keine nennenswerten kleinen Strukturen, wie die Zahnreihen der Gipsmodelle, die durch eine Pulverschicht verdeckt werden könnten.

5.1.3. Ausrichtung nach der NHP

Die im IPS CaseDesigner® durchgeführte Ausrichtung des virtuellen Schädels nach der „natural head position“ bestimmt, wie die Translationen und Rotationen im dreidimensionalen Koordinatensystem interpretiert werden. Dabei kann eine abweichende Ausrichtung zu Verzerrungen in der Quantifizierung der Bewegungen führen. Da es keine zuverlässige Möglichkeit gibt diese Position untersucherunabhängig durch den Computer bestimmen zu lassen, musste die Positionierung händisch erfolgen und unterliegt so einer gewissen Ungenauigkeit. Zudem können Artefakte der Röntgenaufnahme oder Asymmetrien (z.B. bei der Höhe der Porien) die Untersuchenden vor Probleme stellen, die NHP möglichst korrekt einzustellen (Heufelder et al., 2017). Trotzdem sollte die Positionierung mit Referenzlinien am knöchernen Schädel eine gut beurteilbare Ausrichtung der Volumendateien ermöglichen und hebt die Abhängigkeit einer richtigen Positionierung des/der Patient:in während des DVT-Scans auf.

5.1.4. Methodik der Positionserfassung von zwei Objekten

Positionserfassung und -vergleich zweier Objekte innerhalb eines Koordinatensystems ist zentraler Bestandteil des Workflows dieser Studie und ermöglicht sowohl das Übereinanderlagern dieser Objekte als auch die Quantifizierung des Positionsunterschiedes. Die Genauigkeit dieser Übereinanderlagerungen bzw. Positionsvergleiche bestimmt dabei wesentlich die Wahrheit der Ergebnisse und hat damit hohe klinische Relevanz (Titiz et al., 2012). In der Literatur zu Genauigkeitsuntersuchungen haben sich mehrere Ansätze zur genaueren Positionserfassung etabliert. Am weitesten verbreitet sind nach Kenntnis des Autors das Auswählen von Referenzpunkten sowie oberflächenbasierte und voxel-basierte Registrierung. In dieser Studie wurde in verschiedenen Schritten des Workflows sowohl mit Referenzpunkten als auch mit oberflächenbasierter Registrierung gearbeitet.

Übereinanderlagerung mit Referenzpunkten im IPS CaseDesigner®

Im IPS CaseDesigner wurden die Zahnreihen mit Artefakten aus den DVT-Scans mit den Zahnreihen aus den deutlich besser abbildenden Modellscans ersetzt. Da der Überlagerungs-Algorithmus des Programms wegen der Artefakte nicht immer funktionierte, wurde dies mit min. acht manuell ausgewählten Referenzpunkten auf der Zahnreihe durchgeführt.

Die Methode des manuellen Auswählens reproduzierbarer skelettaler Punkte, um zwei Strukturen übereinanderzulagern oder zu vergleichen ist in der Literatur zur Genauigkeit von Umstellungsosteotomien sowohl bei zweidimensionalen (Govaerts et al., 2018; Park & Posnick, 2013; Sharifi et al., 2008), als auch bei dreidimensionalen (Baan et al., 2016; Kwon et al., 2014; Ritto et al., 2018; Schouman et al., 2015; Song & Baek, 2009) Untersuchungen etabliert. Allerdings ist die Genauigkeit dieser Methodik von mehreren Faktoren abhängig.

Zum einen ist durch das manuelle Auswählen der Punkte ein menschlicher Fehler zu beachten, der auch stark von der Erfahrung des/der Untersucher:in abhängig ist. Das wiederholte markieren gleicher Referenzpunkte am Schädel in dreidimensionalen Röntgenbildern wurde von Titiz et al. genauer untersucht. Dabei wurden gleiche Referenzpunkte mit einer Genauigkeit im Bereich von 0,14 bis 3,32 mm und einem Median von 0,52 mm bestimmt (Titiz et al., 2012). Die klinisch relevante Fehlergrenze von 0,5 mm (Baan et al., 2016) kann dabei leicht überschritten werden. Man kann sich damit gut vorstellen, dass die Ergebnisse dieser Studie, variierend von 0,01 bis 5,35 mm, durch solch einen Fehler maßgeblich beeinflusst werden könnten. Um dies zu umgehen wurde in der Literatur u.a. das automatische bestimmen der Referenzpunkte durch Programme vorgeschlagen (Makram & Kamel, 2014; Shahidi et al., 2014). Allerdings befand sich die Genauigkeit der algorithmisch bestimmten Punkte in ähnlichen Bereichen von 0,3 bis 2,8 mm (Makram & Kamel, 2014). Wie auch im IPS CaseDesigner® stören Artefakte der Scandaten die Algorithmen zu sehr, um zuverlässige Ergebnisse zu generieren (Rückschloß et al., 2019). Ein weiterer Punkt in der Genauigkeit der Referenzpunktbestimmung kann die Erfahrung der Untersuchenden (Jonas, 1976) bzw. die Auswahl der geeigneten Strukturen sein. So bestimmten schon Baumrind und Frantz (1971) anhand von lateralen Cephalogrammen, dass prominente anatomische Strukturen besser zu lokalisieren sind, als solche, die Rundungen oder Übergänge darstellen (Baumrind & Frantz, 1971). In dieser Studie wurde daher für das Übereinanderlagern der Zahnreihen klar herausstehende Strukturen verwendet, wie Höckerspitzen auf (Prä-) Molaren, die Eckzahnschmelzspitzen und inzisale Ecken der Frontzähne. Diese Punkte haben zudem den Vorteil, dass sie meist nicht von Artefakten durch Multibandapparaturen betroffen sind, da diese kranialer bzw. cervikaler von den Spitzen aus an den Zähnen des Oberkiefers befestigt werden.

Für die dreidimensionale Überlagerung der Zahnreihen waren mindestens drei Referenzpunkte nötig. Es wurde sich dazu entschieden diese Zahl zu erhöhen, um den Effekt einzelner vielleicht schlechter ausgewählter Punkte zu mindern. Dabei wurden bei jeweils 8-12 Punkte auf der Zahnreihe ausgewählt, als Kompromiss zwischen Maximierung der sichereren

Übereinanderlagerung, gut reproduzierbaren auswählbaren Stellen auf den Zähnen und dem zeitlichen Aufwand des Workflows.

Ein weiterer zu beachtender Faktor ist die Auflösung bzw. Schichtstärke der Röntgenaufnahmen. Dieser Faktor beeinflusst andere Überlagerungsmethoden jedoch genauso, ist also kein direkter Nachteil der manuellen Referenzpunktbestimmung. Eine Schichtstärke von 0,4 mm erlaubt nach Titiz et al. eine genaue Oberflächendarstellung der Knochenstrukturen, um Referenzpunkte zuverlässig auswählen zu können (Titiz et al., 2012). Stratemann et al. untersuchten die Genauigkeit von DVT-Scans noch gründlicher, indem sie Strecken im Scan mit den realen Strecken verglichen. Dabei zeigten die Ergebnisse 0,19 mm +/- 1,56 % bzw. 0,01 mm +/- 0,06 % Streckenunterschied bei den zwei untersuchten DVT-Geräten, woraus schlussgefolgert wurde, dass hier akkurate Darstellungen der untersuchten Schädel stattgefunden haben. Die Auflösung dieser Geräte betrug 0,376 mm³ bzw. 0,3 mm³ (Stratemann et al., 2008). In der hier vorliegenden Studie befanden sich die Schichtstärken der präoperativen und postoperativen DICOM-Datensätze zwischen 0,25 bis 0,32 mm. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Oberflächendarstellung der Strukturen als geeignet für die Untersuchung bzw. den Workflow zu betrachten sind.

Übereinanderlagerung mit Algorithmen in CloudCompare®

Algorithmen zur Übereinanderlagerung zweier gleicher Strukturen haben den Vorteil, dass ein menschlicher Fehler bis auf das Bestimmen der zu übereinanderlegenden Bereiche ausgeschlossen werden kann. Referenzpunkte müssen nicht mehr manuell bestimmt werden, lediglich die Bereiche, die übereinander gelagert werden sollen, werden ausgewählt. Solche Methoden wurden schon in mehreren Studien erfolgreich verwendet, um präoperative und postoperative Strukturen kongruent zueinander in einem dreidimensionalen Koordinatensystem zu positionieren (Dreiseidler & Lentzen et al., 2017; Heufelder et al., 2017; Karanxha et al., 2021; Rückschloß et al., 2019; Schouman et al., 2015; Tucker et al., 2010).

In dieser Studie wurde der Algorithmus von CloudCompare® oberflächenbasiert auf STL-Dateien verwendet, wobei der Algorithmus wie schon in Kapitel 3 beschrieben, 50.000 zu vergleichende Punkte auf den Oberflächen der Objekte bestimmt und anhand dieser die Übereinanderlagerung stattfindet.

Die Alternative dazu ist eine voxelbasierte Überlagerungsmethode, d.h. zwei Strukturen werden anhand von Volumendateien bestehend aus dreidimensionalen Pixeln und nicht nur anhand ihrer Oberfläche übereinander gelagert. Diese zwei ähnlichen Methoden wurden von Almkhthar

et al. angewandt auf die Dysgnathiechirurgie verglichen. Dabei konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Herangehensweisen festgestellt werden, wobei die voxelbasierte Übereinanderlagerung trotzdem mehr Homogenität in den Ergebnissen durch eine kleinere Standardabweichung zeigte (Almukhtar et al., 2014). Nichtsdestotrotz wurde sich für die oberflächenbasierten Methode entschieden, da es zwei workflowassoziierte Gründe gab, die die etwas größere Heterogenität im Vergleich zur voxelbasierten Methode überwogen. Dazu gehört zum einen, dass ein Volumenscan der Modelle wesentlich aufwändiger und unpräziser, als der Oberflächenscan gewesen wäre. Zum anderen, ermöglicht der IPS CaseDesigner® nur einen Export des Schädels als STL-Datei. Eine voxelbasierte Übereinanderlagerung hätte den Workflow in diesem Fall also sehr verkompliziert, weshalb aus Sicht der Untersuchenden eine Abkehr von der einfacheren oberflächenbasierten Übereinanderlagerung in CloudCompare® keinen entscheidenden Vorteil erbracht hätte. Auch die letztendliche Quantifizierung des Unterschieds zwischen postoperativem Ergebnis und der Planung wäre deutlich erschwert worden, bzw. hätten in Volumendateien wieder manuelle Referenzpunkte gewählt werden müssen.

5.1.5. Diskussion über den Methodenfehler

Da die Akkumulierung all der beschriebenen Fehlerquellen eine sichere Analyse des realen Ergebnisses nicht mit akzeptabler Sicherheit zulässt, wurde der Workflow pro Patientenfall dreimal durchgeführt. Um die Reliabilität dieser Vorgehensweise einschätzen zu können, wurde innerhalb jedes Patientenfalls ein Konfidenzintervall von 90% ausgehend vom Mittelwert errechnet. Im Schnitt wichen obere und untere Grenze dieser Konfidenzintervalle um $\pm 0,15^\circ$ beim Yaw, $\pm 0,37^\circ$ beim Pitch, $\pm 0,30^\circ$ beim Roll, $\pm 0,09$ mm in der Sagittalachse, $\pm 0,12$ mm in der Transversalachse und $\pm 0,15$ mm in der Longitudinalachse von ihren Mittelwerten ab. Gemessen an der Grenze der klinischen Relevanz von $0,5 \text{ mm}/^\circ$ (Baan et al., 2016; Bell et al., 2003; Rückschloß et al., 2019; Schendel et al., 2013) erfreut sich der Workflow dieser Studie insgesamt also akzeptabler Präzision. Allerdings gab es im Bereich von Yaw, Pitch und Roll acht Werte, die diese Vorgabe überschritten haben. Um die Datenlage nicht zu manipulieren, wurden diese Werte nicht aus den weiteren statistischen Analysen herausgenommen, auch wenn dadurch nicht mit hinreichender Sicherheit die Richtigkeit der entsprechenden Abweichungswerte gewährleistet werden konnte. Um diese Sicherheit zu erhöhen, hätte der Workflow öfter als dreimal durchgeführt werden müssen. Da die Reliabilität gemessen an den Mittelwerten allerdings ein akzeptables Level erreicht hat und der Zeitaufwand durch jede

weiter Analyserunde erheblich erhöht werden würde, wurde sich gegen die Durchführung zusätzlicher Durchgänge entschieden.

5.2. Analyse der Ergebniswerte

5.2.1. Diskussion der quantitativen Abweichungsanalyse

Die Ergebnisse dieser Studie sollen im Folgenden mit den Ergebnissen anderer Studien zur Genauigkeit von konventionell geplanten Umstellungsosteotomien verglichen und Ursachen und Begründungen für die beobachteten Abweichungen diskutiert werden.

Rotationen

Die quantitative Analyse der Rotationen legt nahe, dass der Pitch am unpräzisesten operiert wird. Dies ist einerseits an dem Interquartilsabstand der realen Abweichungswerte von $2,43^\circ$, als auch am Mittelwert der absoluten Abweichungswerte von $1,67^\circ$ zu sehen. Beide Werte übertreffen hier die der anderen Rotationsachsen (Yaw $1,45^\circ$ bzw. $0,90^\circ$ und Roll $1,81^\circ$ bzw. $1,02^\circ$).

Dieses Ergebnis bestätigt sich durch andere Studien. Lartzien et al. analysierten mit einem physischen Navigationsgerät konventionell geplante und splintbasierte Umstellungsosteotomien des Oberkiefers (Lartzien et al., 2019). Bei der Analyse wurde der Kiefer als Ganzes betrachtet und keine einzelnen Referenzpunkte gewählt, was diese Studie sehr gut mit der hier vorliegenden Arbeit vergleichbar macht. Lartzien et al. gaben hier mehrere Gründe für die geringere Präzision bei Rotationen in der Sagittalen an. Zum einen ist der Pitch intraoperativ schlecht visuell durch den/die Operateur:in kontrollierbar. Zum anderen ist die splintbasierte Positionierung des Oberkiefers stark davon abhängig, dass der Unterkiefer in der richtigen Position steht, was ebenfalls während der Operation schwer kontrollierbar (Lartzien et al., 2019). Dreiseidler et al. vertieften diesen Ansatz mit der Begründung, dass gerade bei Verlagerungen des Oberkiefers nach anterior der mit dem Splint verschnürte Unterkiefer durch das Weichgewebe nach retral gezogen wird und so nicht mehr in zentraler Kondylenposition steht (Dreiseidler & Lentzen et al., 2017). Ein weiterer Grund für die intraoperativ falsche Position des Unterkiefers könnte sein, dass dieser in Allgemeinanästhesie eine größere Bewegungsfreiheit besitzt und die Patient:innen zusätzlich auf dem Rücken liegen. Boucher und Jacoby beschrieben schon 1961 größere Bewegungsfreiheit des Kiefers nach posterior in solchen Situationen (Boucher & Jacoby, 1961). Zudem berichtete McMillen von einem um mittelwertige

2,43 mm nach vertikal versetzten Unterkiefer in der Vollnarkose (McMillen, 1972). Diese Faktoren könnten sich darauf auswirken, dass der/die Behandler:in die Zentrik in der OP nicht genau so einstellen, wie bei der Bissnahme für die Modellplanung. Eine weitere sich auf den Pitch auswirkende Fehlerquelle könnte im speziellen bei Extrusionen, also Verlagerungen der Oberkiefers nach kaudal, auftreten. Diese durch Kwon et al. beschriebene Situation führt dazu, dass bei Extrusion der Unterkiefer ebenfalls nach kaudal geschoben wird, dadurch aber durch sein Scharnierachsendgelenk eine Autorotation vollführt und so eine unbeabsichtigte Rotation für den Oberkiefer vorgibt. Zwar wird dies bei der Modellplanung durch die Achse des Artikulator imitiert, jedoch ist dieser Effekt durch die mittelwertige Einstellung dieser Achse nicht exakt individuell rekreierbar (Kwon et al., 2014).

All diese Annahmen, dass vor allem die intraoperativ ungenau eingestellte Zentrik des Unterkiefers zu den Umsetzungsungenauigkeiten der Oberkiefer-Umstellungsosteotomie führt, wird durch eine Studie von Marmulla und Mühling unterstützt. Hier wurde mit Hilfe eines Positionierungsgerät untersucht, inwiefern die Operateur:innen es schaffen die gleiche Kondylenposition zu erreichen, wie die vor der OP registrierte Position. Dabei stellte sich heraus, dass die Positionen im Schnitt insgesamt um 2,4 mm (Vektor aus allen drei Ebenen) und in den einzelnen Achsen um 1,2 mm sagittal, 1,6 mm vertikal und 1,0 mm transversal differieren (Marmulla & Mühling, 2007). Da alle Bewegungen der Drehscharniergelenke des Unterkiefers auch in Rotationen des Corpus resultieren, ist eine Auswirkung auf die Umsetzung der Umstellungsosteotomien hinsichtlich der Rotationen des Oberkiefers sehr gut vorstellbar.

Yaw und Roll sind, wie schon oben erwähnt, nicht so stark von Ungenauigkeiten in der Umsetzung betroffen wie der Roll. Dies könnte zum einen daran liegen, dass diese von einem/einer von frontal schauenden Behandler:in besser eingesehen und kontrolliert werden können. Zudem ist eine in der Horizontalen oder Transversalen falsch positionierte Mandibula nur durch Laterotrusion möglich. D.h. eine dadurch fälschlich vorgegebene Rotation in der Transversalen oder Horizontalen ist schwerer zu verursachen.

Translationen

Bei der quantitativen Analyse fällt klar auf, dass Translationen in der Sagittal- und Longitudinalachse unpräziser sind als die in der Transversalachse. Dies ist anhand der Interquartilsabstände bei den realen Werten (Sagittal: 3,01 mm; Transversal: 0,95 mm; Longitudinal: 3,46 mm) und anhand der Mittelwerte bei den absoluten Werten (Sagittal: 1,63 mm; Transversal: 0,79 mm; Longitudinal: 1,92 mm) gut zu sehen.

Der Vergleich mit der schon oben erwähnten, gut vergleichbaren Studie von Lartzien et al. bestätigt diese Tendenzen ebenfalls. Misserfolge bei den Translationen kamen in dieser Untersuchung in sagittaler (5-mal) und in vertikaler (4-mal) Richtung häufiger vor als in der Transversalen (2-mal). Die Gründe hierfür werden wie auch bei den Rotationen in der schlechten Einsehbarkeit der Sagittalebene und der fehlenden Kontrolle über die Referenzposition des beweglichen Unterkiefers gesucht (Lartzien et al., 2019). Choi et al. untersuchten die Genauigkeit von konventionell geplanten Umstellungsosteotomien zwar nur zweidimensional mit Fernröntgenseitenbildern, kamen aber auf quantitativ ähnliche Ergebnisse mit Umsetzungsungenauigkeiten von bis zu 2,00 mm nach posterior oder kranial. In der Longitudinalachse werden die Abweichungen mit fehlenden Referenzen und damit schlechter metrischer Positionierung des Oberkiefers begründet. Für die Einstellung in der Sagittalachse werden mehrere mögliche Hindernisse aufgeführt. Dazu gehören die Processus pterygoidei, die Tubera maxillae oder schlecht verlaufende Bruchlinien im schwer einsehbaren hinteren Bereich der Maxilla (Choi et al., 2009). Bei der ebenfalls zweidimensionalen Studie von Govaerts et al. sind die Umsetzungsungenauigkeiten etwas besser mit durchschnittlichen 1,4 mm bei anterior/posterioren und 0,9 - 1,1 mm (Messung an zwei verschiedenen Referenzpunkten) bei kranial/kaudalen Translationen. Zudem ist erkennbar, dass die Ergebnisse nicht wie in dieser Studie in der Longitudinalachse etwas besser ausfallen als in der Sagittalachse. Dieser Sachverhalt ist noch eindeutiger in der dreidimensional untersuchenden Studie von Dreiseidler et al., die einen weiteren quantitativen Vergleich erlaubt, auch wenn hier die Mittelwerte der Ungenauigkeiten separat zwischen uni-/multidimensionalen Operationen und mit/ohne Rotation aufgeführt werden. In der Sagittalen variieren die Umsetzungsungenauigkeiten von 1,18 - 1,75 mm, im Gegensatz zu nur 1,02 – 1,24 mm in der Longitudinalachse und 1,00 -1,12 mm in der Transversalachse (Dreiseidler & Lentzen et al., 2017). Insgesamt sind die Ergebnisse hier ebenfalls quantitativ etwas besser. Vielmehr ist interessant, dass die Positionierung in der Vertikalen noch präziser ausfällt als die in der Sagittalen. D.h. durch Dreiseidler et al. wird bestätigt, dass eine Einstellung des Oberkiefers nach anterior/posterior nicht so akkurat wie bei den anderen Achsen realisierbar ist, im Gegensatz zu den Ergebnissen der vorliegenden Studie. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass bei den Umstellungsosteotomien keine speziellen Hilfsmittel für die vertikale Positionierung verwendet wurden und die eingestellte Höhe von korrekter zentrischer Unterkiefereinstellung und visueller Kontrolle abhängig war. Trotzdem fallen die Ergebnisse für die rechts/links Bewegungen bei Govaerts et al. wie auch in dieser Studie am besten aus (Govaerts et al., 2018). Dies ist am ehesten durch die gute frontale Einsicht und die damit einfach kontrollierbare Einstellung der Gesichtssymmetrie erklärbar.

Bei Betrachtung der achsenbezogenen Werte mit 1,2 mm sagittal, 1,6 mm vertikal und 1,0 mm transversal in der Studie von Marmulla und Mühling wird der Trend, der am besten gelingenden transversalen Umsetzung bestätigt, aber die sagittale und vertikale Genauigkeit sind im Vergleich zu den bisher behandelten Studien umgekehrt. Allerdings ist zu bedenken, dass in der Studie nur sechs Fälle untersucht werden und die zur Analyse verwendete Positionierungshilfe eine Ungenauigkeit von ca. 0,7 mm (Vektor aller drei Ebenen) besitzt (Marmulla & Mühling, 2007). Hinzu kommt auch hier, dass Bewegungen der Kondylen durch die Konfiguration des Kiefergelenks nicht kongruent zu daraus resultierenden Corpusbewegungen sind. Trotzdem wird die schon oft erwähnte Annahme, dass die falsch eingestellte Unterkieferposition sich auch auf die Umsetzungsgenauigkeit der Oberkiefertranslationen auswirkt, unterstützt.

Richtungsbezogene Werte

Um Tendenzen in bestimmte Richtungen der Rotationen festzustellen, kann man einerseits auf die Mittelwerte der realen Abweichungswerte, aber auch auf die Anzahl von Fällen mit einer bestimmten Richtungsabweichung schauen. Die Mittelwerte decken sich mit der Fallzahl bei Yaw (-0,32° und 11/20 negative Fälle), Pitch (0,49° und 13/20 positive Fälle), Sagittalachse (-0,76 mm und 13/20 negative Fälle) und Transversalachse (-0,11 mm und 12/20 negative Fälle). Jedoch bei Roll (-0,25° und 8/20 negative Fälle) und Longitudinalachse (0,29 mm und 10/20 positive Fälle) passen die ermittelten Ergebnisse zur Richtungsuntersuchung nicht direkt zusammen. Zudem ist insgesamt keine Proportionalität zwischen Höhe des Mittelwerts und Anzahl der Fälle in eine bestimmte Richtung gegeben, was vor allem bei Betrachtung der Werte von z.B. Transversal- und Longitudinalachse sichtbar ist. Diese offensichtlichen Unstimmigkeiten führen dazu, dass bei dieser Studie auf Basis der Ergebnisse keine klare Aussage zu einer Richtungstendenz bei den verschiedenen Rotations- oder Translationsrichtungen gemacht werden kann.

Trotzdem sind bestimmte Ergebnisse im Einklang mit anderen Untersuchungen zu konventionell geplanten Umstellungsosteotomien. Die schon oben erwähnte Studie von Choi et al. bestätigt die niedrigere Genauigkeitsraten und höhere Abweichungen von der Planung bei Verlagerungen der Kiefer nach posterior und kranial im Vergleich zu Verlagerungen nach anterior bzw. kaudal (Choi et al., 2009). Die Tendenz, den Oberkiefer weiter posterior einzustellen als geplant, bestätigen Sharifi et al. ebenfalls. Laut deren Ergebnissen wird bei geplanten Rückverlagerungen häufiger überkorrigiert als unterkorrigiert und bei geplanten Vorverlagerungen häufiger unterkorrigiert als überkorrigiert (Sharifi et al., 2008). Dies wird damit begründet, dass bei der

Bissregistrierung für die Modelle der Unterkiefer im Sitzen weiter anterior im Vergleich zum Oberkiefer liegt als intraoperativ beim liegenden Patienten in Allgemeinanästhesie. Govaerts et al. konnten die Richtungsneigungen der Umsetzungsungenauigkeiten nicht bestätigen. Die am Inzispunkt gemessenen sagittalen Translationen waren zufällig über- bzw. unterkorrigierend und die am oberen ersten Molaren gemessenen vertikalen Bewegungen waren sowohl bei Intrusionen als auch bei Extrusionen häufiger unter- als überkorrigierend (Govaerts et al., 2018).

Mittelwerte der monognathen und bignathen Operationen

Da Umfang und Aufwand zwischen monognathen und bignathen Umstellungsosteotomien allgemein unterschiedlich sind und beide Verfahren in diese Studie miteinbezogen wurden, sollte am Rande der Unterschied hinsichtlich der Umsetzungsungenauigkeiten zwischen diesen Gruppen ermittelt werden. Allerdings musste dafür die schon kleine Fallzahl von 20 weiter runtergebrochen werden, was die Aussagekraft weiter verringert. Zusätzlich kommt hinzu, dass die Populationen von monognather und bignather Gruppe unterschiedlich groß sind im Pool dieser Studie (s. Kapitel 3.1). Diese Probleme führen dazu, dass eine Unterschiedsanalyse innerhalb dieser Untersuchung schwierig ist und daher davon abgesehen wird.

Allerdings sind die Mittelwerte bei einfacher Betrachtung auffällig. Die absoluten Umsetzungsungenauigkeiten sind bei den monognathen Operationen in allen Parametern geringer als bei den bignathen Operationen. Das lässt darauf schließen, dass eine genauere Untersuchung dieser Unterschiede mit größeren Fallzahlen und möglichst gleich großen Gruppen sinnvoll wäre.

5.2.2. Vergleich der relativen Abweichungswerte

Eine relative Analyse der Umsetzungsungenauigkeiten hat, wie schon in der statistischen Methodik (Kapitel 3.6.3) beschrieben, in der Theorie ihre Vorteile und Nachteile für die Untersuchung der Ergebnisse. Die ungefilterten Prozentwerte nehmen zwar wahrheitsgemäße, aber schlecht greifbare Höhen an. Der nun angewandte Filter für die klinisch relevante Grenze von $0,5 \text{ mm/}^\circ$ (Baan et al., 2016; Bell et al., 2003; Rückschloß et al., 2019; Schendel et al., 2013) zeigt hinsichtlich dessen Wirkung. Die Theorie, dass große, nicht sachdienliche Prozentwerte entstehen, wenn keine nennenswerte Änderung in einer Achse geplant, aber trotzdem eine Abweichung davon umgesetzt wurde, ist demnach bei dieser Studie anwendbar und lässt die hier vorgenommene statistische Filterung der Werte als sinnvoll erscheinen.

Die überarbeiteten relativen Umsetzungenauigkeiten zeigen dabei interessante Unterschiede zu den absoluten Ergebniswerten.

Tabelle 16: Gegenüberstellung der Mittelwerte von absoluter und relativer Analyse der Umsetzungenauigkeiten

	Phi (Yaw)	Theta (Pitch)	Psi (Roll)	X (ant./post.)	Y (links/rechts)	Z (kranial/kaudal)
Absolut	0,90°	1,67°	1,02°	1,63 mm	0,79 mm	1,92 mm
Relativ	64%	110%	76%	63%	73%	147%

Bei den Rotationen wird das Muster bestätigt, dass der Pitch die höchsten und der Yaw die niedrigsten Umsetzungenauigkeiten aufweist. Jedoch wurden bei den Translationen nach der relativen Analyse in der Sagittalachse die niedrigsten Abweichungen von der Planung umgesetzt und heben sich in ihrem Prozentwert deutlich von den Abweichungen der Longitudinalachse ab im Gegensatz zu der Werten der absoluten Analyse. Daraus kann man für die in dieser Studie untersuchten Fälle schließen, dass die absoluten Umsetzungenauigkeiten vor allem in der Sagittalachse durch größere Translationen in der Planung beeinflusst werden und im Vergleich mit den anderen linearen Achsen als zu schlecht erscheinen. Dagegen kann diese Theorie nicht auf die Abweichungen in der Longitudinalachse angewendet werden, da sowohl in der absoluten als auch in der relativen Analyse diese Achse die schlechtesten Werte aufweist. Dasselbe gilt auch für den Pitch.

Diese Sachverhalte der Ergebnisse könnten folgendermaßen erklärbar sein. Da bei den Umstellungsosteotomien, die in dieser Studie untersucht wurden, intraoperativ keine Hilfsmittel zur vertikalen Positionierung verwendet wurden, leidet besonders die Präzision der Parameter, die davon profitieren würden. Das sind vor allem der Pitch und die Longitudinalachse, da diese wesentlich von der Öffnungsweite des Unterkiefers beeinflusst werden. Diese Annahme deckt sich auch mit der Ergebnislage und erklärt die schlechteren vertikalen Ergebnisse dieser Untersuchung verglichen mit anderen Studien zu konventionell geplanten Umstellungsosteotomien (Dreiseidler & Lentzen et al., 2017; Govaerts et al., 2018).

Bei den Umsetzungenauigkeiten in der Sagittalachse gibt es dagegen mehr Diskussionsbedarf. Zwar decken sich die Ergebnisse der absoluten Analyse mit denen anderer Studien (s. Kapitel 5.2.1), jedoch zeigt die relative Analyse dieser Untersuchung, dass diese Ergebnisse nicht im Einklang mit der geplanten Verlagerung betrachtet werden. Leider gibt es nach Kenntnisstand des Autors nur eine weitere gut vergleichbare Studie, die die streckenabhängige Präzision von LeFort-1-Umstellungsosteotomien untersucht hat.

Dreiseidler et al. fanden in einer ergänzenden Untersuchung zu der schon erwähnten Studie heraus, dass die größte Korrelation zwischen geplanter Translation und Abweichung von dieser ebenfalls bei sagittalen Verlagerungen existiert (Dreiseidler & Ritter et al., 2017).

Nichtsdestotrotz kann man absolute und relative Ergebnisse im Einklang begründen. Vor allem die Theorie, dass ein Zug durch Weichteile und Muskulatur den neu eingestellten Oberkiefer verschiebt, passt hier gut, da die zurückziehenden Kräfte der Gewebe mit der Verlagerungsstrecke größer werden. Auch bei Translationen des Oberkiefers nach posterior kann eine relative Abhängigkeit zur geplanten Strecke entstehen, wenn der Processus pterygoideus ein Hindernis darstellt. Die Erklärung, dass ein falsch eingestellter Unterkiefer ursächlich für sagittale Umsetzungsungenauigkeiten ist, passt jedoch nicht zur relativen Analyse, da diese Einstellung vor der Verlagerung des Oberkiefers erfolgt und nicht mit der geplanten Strecke zusammenhängt. Eine Ausnahme davon wäre eine mandible-first surgery. Hier könnte der Weichteilzug auf den Unterkiefer eine darauffolgende falsche Einstellung des Oberkiefers verursachen. Trotzdem wäre hier die Präzision der Oberkieferverlagerung nur von der Strecke der Unterkieferverlagerung relativ abhängig und nicht von der eigenen geplanten Translation.

Abschließend zeigt die relative Analyse also, dass es eher schwer sein könnte bei splintbasierten Oberkieferumstellungsosteotomien die sagittale Präzision zu verbessern, da das Problem des Weichteil- und Muskelzugs schwer lösbar ist. Dagegen könnte sich gegen vertikale Abweichungen mit externen Positionierungs- und Messhilfsmitteln beholfen werden, was durch verschiedene Autoren auch schon empfohlen wurde (Baan et al., 2016; Kretschmer et al., 2009).

Die separaten Mittelwerte der relativen Umsetzungsungenauigkeiten von monognathen und bignathen Operationen bestätigen die Tendenz der absoluten Werte (s. Kapitel 5.2.1). Auch hier sind die relativen Abweichungen der monognathen Eingriffe in allen Parametern geringer, was die Notwendigkeit, diesen Sachverhalt in einer dafür designten Studie zu untersuchen, untermauert.

5.2.3. Diskussion über den individuellen OP-Erfolg

Die verschiedenen Rotationen und Translationen der Umstellungsosteotomien des Oberkiefers mit Erfolgs- bzw. Misserfolgsgrenzen zu bewerten ist eine sehr direkte Methode, um eine Vorstellung der Präzision der Operationstechnik zu bekommen.

Dabei decken sich die Ergebnisse dieser Analyse sowohl mit den absoluten als auch mit den realen Werten. Das heißt bei den Parametern mit den meisten Überschreitungen der 2 mm/°

Grenze gab es auch die quantitativ höchsten Mittelwerte der Umsetzungsungenauigkeit. Genauso stimmen die in positiv oder negativ unterteilten Ausreißer mit den Tendenzen der realen Mittelwerte überein. Beispielsweise bestätigt die Analyse des OP-Erfolgs bei der Sagittalachse mit fünf negativen und einer positiven Überschreitungen von 2 mm die quantitative Analyse, dass eine Tendenz zur Abweichung in die posteriore Translationsrichtung bestand (Mittelwert -0,76 mm). Auch die richtungsbezogenen Werte stimmen bis auf die schon erwähnten Unstimmigkeiten bei Roll und Longitudinalachse (s. Kapitel 5.2.1) überein.

Wichtiger ist jedoch ein Vergleich mit Studien, die auch Erfolgsbewertungen der ausgewerteten Fälle unternommen haben.

Die mit der hier vorliegenden Untersuchung gut vergleichbare Studie von Lartizien et al. (s. Kapitel 5.2.1) führte eine solche Fehleranalyse mit 30 Proband:innen durch. Bei den Translationen gab es insgesamt 9 vertikale, 13 sagittale und 7 transversale Überschreitungen von 2 mm (Lartizien et al., 2019). Der Vergleich mit den Ergebnissen dieser Studie zeigt keine direkte Übereinstimmung mit diesen Werten von Lartizien et al., da Abweichungen in der Longitudinalachse (8 Fälle) häufiger als in der Sagittalachse (6 Fälle) waren. Auch transversale Überschreitungen (2 Fälle) sind im Vergleich zu den anderen Achsen etwas seltener. Die Rotationen lassen sich schlechter gegenüberstellen, da Lartizien et al. eine Grenze von 4° verwendeten. Die Tendenz, dass der Pitch am unpräzisesten umgesetzt wird, wird jedoch auch hier deutlich bei 8 Pitch-, 3 Roll- und 0 Yaw-Überschreitungen (Lartizien et al., 2019).

Andere Studien untersuchten nur zweidimensional die Translationen hinsichtlich ihrer Erfolgsquoten. Bei Govaerts et al. sind die am Inzisalpunkt gemessenen Verlagerungen kleiner 2 mm mit 79% in der Horizontalen nicht so erfolgreich wie in der Vertikalen mit 89% (Govaerts et al., 2018). Choi et al. setzten die Grenze zwar auf 1 mm, aber ermittelten auch eine Richtungsabhängigkeit. In der Sagittalen wurde nach anterior zu 87,5% und nach posterior nur zu 69,2% erfolgreich operiert. Die Tendenz zur Überkorrektur nach posterior bestätigt die Ergebnisse der hier vorliegenden Studie (1 Überschreitungen > 2 mm und 5 Überschreitungen < -2 mm). Auch in der Vertikalen gleichen sich die Werte von Choi et al. bei Erfolgsquoten von 69,0% nach kranial und 83,3% nach kaudal mit den eigenen Ergebnissen (6 Überschreitungen > 2 mm und 2 Überschreitungen < -2 mm) (Choi et al., 2009).

Die zusätzliche Analyse zum OP-Erfolg bei der die Fallzahlen anhand der Menge der Ausreißer aufgeschlüsselt wurden (s. Tabelle 16), sollte aufzeigen, inwiefern die Überschreitungen auf einzelne Fälle akkumulieren können und dabei zwischen Rotationen und Translationen unterscheiden. Das nur 5/20 Operationen nach den 2 mm/2° Kriterium in allen Parametern erfolgreich waren, deckt sich mit der Studie von Lartizien et al. mit 22/30 nicht die

Erfolgskriterien erfüllenden Operationen, auch wenn den Rotationen hier etwas mehr Spielraum gelassen wurde (Lartzien et al., 2019). Weiterhin zeigt die Analyse, dass bis zu drei Überschreitungen innerhalb eines Falls keine Seltenheit sind (4/20 Fällen). Dabei scheint es jedoch keine Tendenz hin zu Rotationen oder Translationen zu geben.

5.2.4. Auswirkung des Gesichtsbogens auf die Abweichungswerte

Mit dem Vergleich der Umsetzungenauigkeiten, ausgehend von der Planung im Artikulator und der in den Schädel übertragenen Planung, konnte die Auswirkung einer ungenauen Abnahme des Gesichtsbogens und anschließender Artikulation der Modelle auf das gesamte Operationsergebnis untersucht werden.

Ein quantitativer Einfluss auf die tatsächliche Umsetzung der Planung konnte vor allem für die Longitudinalachse (0,53 mm Differenz) festgestellt werden. Auch der Wert vom Roll (0,16° Differenz) ist auffällig, erreicht jedoch nicht die schon verwendete klinisch relevante Grenze von 0,5 mm/° (Baan et al., 2016; Bell et al., 2003; Rückschloß et al., 2019; Schendel et al., 2013). Die Ergebnisse bestätigen, dass durch den Gesichtsbogentransfer Diskrepanzen zwischen der Referenzebenen im Artikulator und der realen Referenzebene bestehen können und sich auf die Umsetzung der Umstellungsosteotomie auswirken.

Die Diskrepanzen zwischen den Referenzebenen wurden auch schon mehrfach untersucht. Ellis et al. untersuchte den Winkel zwischen Okklusalebene und Frankfurter Horizontale im FRS und verglich diesen mit dem entsprechenden Winkel im Artikulator. Dabei wurde eine mittelwertige Differenz von 6,8° ermittelt (Ellis et al., 1992). Eine ähnliche Studie von Zizelmann kam auf übereinstimmende Ergebnisse mit 7,7° im Schnitt bei einem Umfang der Werte von 1,2-18,9° (Zizelmann et al., 2012). Dass diese Unstimmigkeiten in der Planung der Operation Abweichungen im Gesamtergebnis begründen können, ist schon oft erwähnt worden (Dreiseidler & Lentzen et al., 2017; Kwon et al., 2014; Sharifi et al., 2008). Konkretere Untersuchungen, wie genau sich eine fälschliche Rotation auf Translationen auswirkt, wurden von Barbenel et al. fotografisch untersucht. Bei dieser mathematischen Analyse wurden Bewegungen des Oberkiefers in der Sagittalebene mit Modellen im Artikulator simuliert. Die Messungen und Rechnungen zeigten, dass eine Translation von 10 mm bei einem um 20° falsch eingestellten Pitch mit einem Fehler von ca. 4 mm in der zur Translation orthogonalen Achse enden kann. Kongruent dazu kann bei 10° Diskrepanz ein Fehler von ca. 2 mm entstehen (Barbenel et al., 2010). Mit diesen Erkenntnissen lässt sich die hohe Differenz in der Longitudinalachse dieser Studie gut erklären. Wenn z.B. eine Translation nach anterior oder posterior geplant wurde, diese jedoch durch ein

ungenaueres Gesichtsbogenregistrat mit einem Pitch umgesetzt wird, resultiert dies in einer zusätzlichen vertikalen Translation.

Ähnliche Szenarien sind auch bei anderen Translationen oder Rotationen vorstellbar, konnten jedoch durch die Ergebnisse dieser Studie nicht bestätigt werden. Größere Fallzahlen und getrennte Analysen der Fälle je nach geplanter Bewegung wären hierfür zielführend.

6. Zusammenfassung

In dieser retrospektiven Analyse wurde bei 20 ausgewählten Fällen die konventionell geplante Oberkieferposition mit der erreichten Oberkieferposition bei Splint-basierten Umstellungsosteotomien des Oberkiefers untersucht. Die Basis hierfür wurde durch prä- und postoperative DVTs der Gesichtsschädel und Oberflächenscans der Ausgang- bzw. Planungsmodelle gelegt. Dabei konnten mit dreidimensionalen Überlagerungsvorgängen alle Rotations- und Translationsungenauigkeiten ermittelt und als Eulersche Werte kompakt und anschaulich wiedergegeben werden. Zusätzlich wurde die Auswirkung von Fehlern bei der Gesichtsbogenübertragung auf die intraoperative Umsetzung der Planung untersucht.

Die selbstkritische Auswertung des Analyse-Workflows zeigte hinreichende Genauigkeit, um Umsetzungsungenauigkeiten der Oberkieferumstellungsosteotomien zu ermitteln.

Die quantitativen und relativen statistischen Analysen zeigten in sich kongruente Ergebnisse und sind gut vergleichbar mit Ergebnissen anderer Studien zu konventionell geplanten Umstellungsosteotomien der Oberkiefer. Im Mittel betragen die absoluten Abweichungen der einzelnen Eulerschen Werte $0,90^\circ$ beim Yaw, $1,67^\circ$ beim Pitch, $1,02^\circ$ beim Roll, $1,63$ mm in der Sagittalachse, $0,79$ mm in der Transversalachse und $1,92$ mm in der Longitudinalachse. Richtungstendenzen konnten hier v.a. hin zu einem zu positiven Pitch und zu posteriorer Einstellung des Oberkiefers festgestellt werden, konnten jedoch nicht aussagekräftig bewiesen werden.

Die zu ihrer Planung relativen Abweichungen betragen im Mittelwert 64% beim Yaw, 110% beim Pitch, 76% beim Roll, 63% in der Sagittalachse, 73% in der Transversalachse und 147% in der Longitudinalachse.

Ab einer Abweichung von mehr als 2 mm Translation und 2° Rotation wurde eine Umsetzung der geplanten Oberkieferposition als nicht erfolgreich bewertet. Bei den einzelnen Parametern war dies 2-mal beim Yaw, 8-mal beim Pitch, 3-mal beim Roll, 6-mal in der Sagittalachse, 2-mal in der Transversalachse und 8-mal in der Longitudinalachse der Fall. Insgesamt gab es 5 Fälle ohne klinisch relevante Abweichung, 7 Fälle mit einer, 3 Fälle mit zwei, 4 Fälle mit drei und 1 Fall mit vier klinisch relevanten Abweichungen innerhalb einer Operation.

Eine klinisch relevante Auswirkung von Ungenauigkeiten der Gesichtsbogenübertragung auf die Umsetzungsungenauigkeiten der Planung auf die Patientensituation konnte nur im Bereich der Longitudinalachse festgestellt werden, was zu den vergleichsweise hohen absoluten und relativen Abweichungswerten passt.

6.1. Klinische Bedeutung

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen eindeutig, dass die Umsetzungsgenauigkeit von konventionell geplanten Umstellungsosteotomien des Oberkiefers bei bestimmten Rotations- bzw. Translationsrichtungen größere Defizite aufzeigt. Vor allem Pitch, Sagittal- und Longitudinalachse sind in der quantitativen Analyse auffällig und werden häufiger ohne klinisch bewerteten Erfolg umgesetzt als die anderen Eulerschen Parameter. Da sich diese Tendenzen auch in anderen Studien bestätigen (s. Kapitel 5.2), sollte die konventionelle Planung und splintbasierte Umsetzung der Oberkieferumstellungsosteotomien überdacht werden.

Zum einen ist die Übertragung der Kieferposition im Schädel mit Hilfe eines Gesichtsbogens als kritisch zu betrachten. Da die Einstellung einer knöchernen Referenzebene über bewegliche Haut an Nasion und Porion erfolgen muss, ist hier schon mit Ungenauigkeiten zu rechnen. Zudem können Probleme bei der Compliance, oder anatomische Besonderheiten und Asymmetrien die korrekte Abnahme der Frankfurter Horizontalen oder Patientenebene erschweren. Die Ergebnisse zeigen zudem, dass sich diese Fehler auf die Umsetzungsgenauigkeit der Planung auswirken können und erreichen bei der Longitudinalachse sogar quantitativ klinische Relevanz. Eine genaue Anwendung der Apparatur nach Herstellerangaben durch sowohl Behandler:in, als auch Zahntechniker:in ist hier essenziell, um diese Fehlerquelle möglichst weit im Workflow einer Dysgnathieherapie zu minimieren. Mit einer softwaregestützten digitalen Dysgnathieplanung können die durch den Gesichtsbogen bedingten Abweichungen ausgeschlossen werden.

Am ehesten jedoch sind Ungenauigkeiten beim Ergebnis einer Umstellungsosteotomie Folge einer nicht kongruenten Übertragung der im Artikulator geplanten Translationen und Rotationen auf die Patientensituation. Selbst bei erfahrenen Operateur:innen scheint die grundlegende konventionelle Übertragungsmethode mittels Splints und manuell eingestellter zentrischer Kondylenposition des Unterkiefers einer klinisch akzeptablen Präzision in bestimmten Achsen nicht gerecht zu werden. Bei Festhalten an der Verwendung eines Splints könnte es daher förderlich sein, zusätzliche Hilfsmittel zu verwenden, um den mit dem Unterkiefer verschnürten Oberkiefer korrekter zu positionieren. Verschiedene Techniken und Apparaturen wurden hierfür schon vorgeschlagen und getestet. Eine beliebte und relativ einfache Unterstützung zur Positionierung können externe Referenzpunkte bieten, zu denen dann interoperativ die entsprechenden Distanzen eingestellt werden. Beispiele hierfür sind am Nasion befestigte Schrauben (Kretschmer et al., 2009) oder die Orientierung am medialen Kanthus des Auges (Gil et al., 2011).

Allerdings können diese Methoden schlecht bei der Einstellung des posterioren Bereichs des Oberkiefers unterstützen. Markierung interner Referenzpunkte an den freigelegten Knochenflächen wäre hier möglich, erfüllen laut Polido et al. jedoch nicht den Genauigkeitsanspruch (Polido et al., 1991). Sharifi et al. forderten daher die Entwicklung einer Apparatur, die den Splint in korrekter Position zur gewählten Referenzebene positioniert (Sharifi et al., 2008). Passend zu diesem Ansatz wurden schon viele Navigationssysteme verschiedener Art getestet (Lartzien et al., 2019; Marmulla & Mühling, 2007; Santler, 2000). Diese können vor allem bei der Einstellung von Pitch und Translationen in der Longitudinalachse helfen, erfordern aber finanzielle Investitionen und größeren Aufwand während der Operation. Das Verhältnis zwischen Vor- und Nachteilen wird hier in der Literatur sehr heterogen bewertet.

Für Einstellungshilfen in der Sagittalachse wird es etwas schwieriger. Die relative Analyse dieser Studie hat gezeigt, dass Ungenauigkeiten hier vor allem von der Verlagerungsstrecke abhängig sind. Auch wenn Abweichungen Resultat von Ungenauigkeiten anderer Parameter sein können (z.B. Gesichtsbogen s. Kapitel 5.2.4), ist hier wahrscheinlich vor allem der Zug des Weichgewebes die prägende Ursache. Diesen Zug auf den Oberkiefer kann man schlecht reduzieren, ohne eine gute postoperative Rehabilitation zu gefährden. Die sichere, nicht vom Weichgewebeszug beeinflusste intraoperative Einstellung des Oberkiefers in der Sagittalen und eine stabile Plattenosteosynthese sind also essenziell für ein präzises postoperatives Ergebnis. Hierbei könnten digital geplante Osteotomieschablonen und patientenspezifische Implantate helfen, die wenig Spielraum bei der Positionierung des Oberkiefers lassen und sich sowieso in allen Achsen hoher Umsetzungsgenauigkeit erfreuen (Heufelder et al., 2017). Nachteile sind hier allerdings hohe Fertigungskosten, lange Anfertigungsdauer und fehlende intraoperative Flexibilität und Anpassungsmöglichkeiten (Rückschloß et al., 2019).

6.2. Ausblick

Trotz messbarer Abweichungen von der Planung und ihrer rein quantitativen Einteilung in klinischen Erfolg und Misserfolg sollte das Ergebnis einer chirurgischen Dysgnathithherapie viel mehr über der Zufriedenheit der/des Patient:in beurteilt werden. Wie glücklich die Behandelten mit der Ästhetik und Funktion der neuen Situation sind, ist die eigentlich wichtigste Frage bei solchen elektiven Eingriffen. Ein wissenschaftlicher Vergleich dieser subjektiven Beurteilung mit einer objektiv quantitativen Ungenauigkeitsanalyse würde in zukünftigen Untersuchungen wertvolle zusätzliche Erkenntnisse bringen.

7. Literaturverzeichnis

- Aboul-Hosn Centenero, S. & Hernández-Alfaro, F. (2012) „3D planning in orthognathic surgery: CAD/CAM surgical splints and prediction of the soft and hard tissues results - our experience in 16 cases“, *Journal of cranio-maxillo-facial surgery : official publication of the European Association for Cranio-Maxillo-Facial Surgery*, Vol. 40, No. 2, S. 162–168.
- Almukhtar, A., Ju, X., Khambay, B., McDonald, J. & Ayoub, A. (2014) „Comparison of the accuracy of voxel based registration and surface based registration for 3D assessment of surgical change following orthognathic surgery“, *PloS one*, Vol. 9, No. 4, e93402.
- Aziz, S. R. (2004) „Simon P. Hullihen and the origin of orthognathic surgery“, *Journal of oral and maxillofacial surgery : official journal of the American Association of Oral and Maxillofacial Surgeons*, Vol. 62, No. 10, S. 1303–1307.
- Baan, F., Liebrechts, J., Xi, T., Schreurs, R., Koning, M. de, Bergé, S. & Maal, T. (2016) „A New 3D Tool for Assessing the Accuracy of Bimaxillary Surgery: The OrthoGnathicAnalyser“, *PloS one*, Vol. 11, No. 2, e0149625.
- Bai, S., Shang, H., Liu, Y., Zhao, J. & Zhao, Y. (2012) „Computer-aided design and computer-aided manufacturing locating guides accompanied with prebent titanium plates in orthognathic surgery“, *Journal of oral and maxillofacial surgery : official journal of the American Association of Oral and Maxillofacial Surgeons*, Vol. 70, No. 10, S. 2419–2426.
- Barbenel, J. C., Paul, P. E., Khambay, B. S., Walker, F. S., Moos, K. F. & Ayoub, A. F. (2010) „Errors in orthognathic surgery planning: the effect of inaccurate study model orientation“, *International journal of oral and maxillofacial surgery*, Vol. 39, No. 11, S. 1103–1108.
- Baumrind, S. & Frantz, R. C. (1971) „The reliability of head film measurements“, *American Journal of Orthodontics*, Vol. 60, No. 2, S. 111–127.
- Bell, A., Ayoub, A. F. & Siebert, P. (2003) „Assessment of the accuracy of a three-dimensional imaging system for archiving dental study models“, *Journal of orthodontics*, Vol. 30, No. 3, S. 219–223 [Online]. DOI: 10.1093/ortho/30.3.219.
- Bell, R. B. (2018) „A History of Orthognathic Surgery in North America“, *Journal of oral and maxillofacial surgery : official journal of the American Association of Oral and Maxillofacial Surgeons*, Vol. 76, No. 12, S. 2466–2481.
- Bell, W. H., Mannai, C. & Luhr, H. G. (1988) „Art and science of the Le Fort I down fracture“, *The International journal of adult orthodontics and orthognathic surgery*, Vol. 3, No. 1, S. 23–52.
- Borba, A. M., Borges, A. H., Cé, P. S., Venturi, B. A., Naclério-Homem, M. G. & Miloro, M. (2016) „Mandible-first sequence in bimaxillary orthognathic surgery: a systematic review“, *International journal of oral and maxillofacial surgery*, Vol. 45, No. 4, S. 472–475.
- Bouchard, C. & Landry, P.-É. (2013) „Precision of maxillary repositioning during orthognathic surgery: a prospective study“, *International journal of oral and maxillofacial surgery*, Vol. 42, No. 5, S. 592–596.
- Boucher, L. & Jacoby, J. (1961) „Posterior border movements of the human mandible“, *The Journal of Prosthetic Dentistry*, Vol. 11, No. 5, S. 836–841.
- Brückl, H. (1956) „Zur schematischen Darstellung und Klassifizierung der Einlagerungsmöglichkeiten des Gebisses im Schädel nach dem Verfahren von A. M. Schwarz“, *Fortschritte der Kieferorthopadie*, Vol. 17, No. 4, S. 283–290.

- Choi, J.-Y., Choi, J.-P. & Baek, S.-H. (2009) „Surgical accuracy of maxillary repositioning according to type of surgical movement in two-jaw surgery“, *The Angle orthodontist*, Vol. 79, No. 2, S. 306–311.
- Dabir, A. & Vahanwala, J. (2021) „Orthognathic Surgery for the Maxilla-LeFort I and Anterior Maxillary Osteotomy“, in Bonanthaya, K., Panneerselvam, E., Manuel, S., Kumar, V. V. & Rai, A. (Hg.) *Oral and Maxillofacial Surgery for the Clinician*, Singapore, Springer Nature Singapore, S. 1513–1548.
- Demirsoy, K. K. & Kurt, G. (2022) „Accuracy of 3 Soft Tissue Prediction Methods After Double-Jaw Orthognathic Surgery in Class III Patients“, *Annals of plastic surgery*, Vol. 88, No. 3, S. 323–329.
- Dreiseidler, T., Lentzen, M.-P., Zirk, M., Safi, A.-F., Zoeller, J. E. & Kreppel, M. (2017) „Systematic three-dimensional analysis of wafer-based maxillary repositioning procedures in orthognathic surgery“, *Journal of cranio-maxillo-facial surgery : official publication of the European Association for Cranio-Maxillo-Facial Surgery*, Vol. 45, No. 11, S. 1828–1834.
- Dreiseidler, T., Ritter, L., Zirk, M., Kreppel, M., Richter, D. F. & Zoeller, J. E. (2017) „Distance-dependent accuracy in Le Fort I maxillary repositioning procedures“, *The British journal of oral & maxillofacial surgery*, Vol. 55, No. 8, S. 815–821.
- Ellis, E., Tharanon, W. & Gambrell, K. (1992) „Accuracy of face-bow transfer: Effect on surgical prediction and postsurgical result“, *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, Vol. 50, No. 6, S. 562–567.
- Elshebiny, T., Morcos, S., Mohammad, A., Quereshy, F. & Valiathan, M. (2019) „Accuracy of Three-Dimensional Soft Tissue Prediction in Orthognathic Cases Using Dolphin Three-Dimensional Software“, *The Journal of craniofacial surgery*, Vol. 30, No. 2, S. 525–528.
- Gil, J. N., Campos, F. E. B., Claus, J. D. P., Gil, L. F., Marin, C. & Freitas, S. F. T. de (2011) „Medial canthal region as an external reference point in orthognathic surgery“, *Journal of oral and maxillofacial surgery : official journal of the American Association of Oral and Maxillofacial Surgeons*, Vol. 69, No. 2, S. 352–355.
- Glover, A., Coenen, F., Bartz, J., Knap, I., Modabber, A., Hölzle, F. & Wolf, M. (2022) „Aktueller Stand und Entwicklung in der Dysgnathieherapie“, *Der MKG-Chirurg*, Vol. 15, No. 1, S. 14–22.
- Govaerts, D., Shaheen, E., Coopman, R., Mol, A. de, Sun, Y. & Politis, C. (2018) „Accuracy of Le Fort I osteotomy in bimaxillary splint-based orthognathic surgery: focus on posterior maxillary movements“, *International journal of oral and maxillofacial surgery*, Vol. 47, No. 11, S. 1398–1404.
- Gühring, W. & Barth, J. (1992) *Anatomie: Spezielle Biologie des Kausystems*, München, Verl. Neuer Merkur.
- Hausamen, J-E, Machtens, E, Reuther J., Eufinger, H, Kübler, A & Schliephake, H (Hg.) (2011) *Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie: Operationslehre und -atlas*, 4. Aufl., Berlin, Springer Medizin.
- Heufelder, M., Wilde, F., Pietzka, S., Mascha, F., Winter, K., Schramm, A. & Rana, M. (2017) „Clinical accuracy of waferless maxillary positioning using customized surgical guides and patient specific osteosynthesis in bimaxillary orthognathic surgery“, *Journal of cranio-maxillo-facial surgery : official publication of the European Association for Cranio-Maxillo-Facial Surgery*, Vol. 45, No. 9, S. 1578–1585.
- Holtgrave, E. A. (1986) „Kieferorthopädie“, in Krüger, E. (Hg.) *Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde - Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie: Für Medizinstudenten und Ärzte entsprechend dem*

- Gegenstandskatalog für den zweiten Abschnitt der ärztlichen Prüfung ; 183 Abbildungen und Tabellen*, Stuttgart, Fischer, S. 3–36.
- Howaldt, H.-P. & Schmelzeisen, R. (2016) *Einführung in die Mund-, Kiefer-, Gesichtschirurgie: Für Studium, Examen und Weiterbildung*, 2. Aufl., Köln, Deutscher Zahnärzte Verlag.
- Hullihen, S. P. (1849) „Case of Elongation of the under Jaw and Distortion of the Face and Neck, Caused by a Burn, Successfully Treated“, *The American Journal of Dental Science*, Vol. 9, No. 2, S. 157–165.
- Jonas, I. (1976) „Die Auswirkungen des Übungseffektes auf die Genauigkeit röntgenkephalometrischer Durchzeichnungen in der Kieferorthopädie“, *Der Radiologe*, Vol. 16, No. 10, S. 427–431.
- Kahl-Nieke, B. (2010) *Einführung in die Kieferorthopädie: Diagnostik, Behandlungsplanung, Therapie ; mit 10 Tabellen*, 3. Aufl., Köln, Dt. Ärzte-Verl. Dt. Zahnärzte-Verl.
- Kaipatur, N., Al-Thomali, Y. & Flores-Mir, C. (2009) „Accuracy of computer programs in predicting orthognathic surgery hard tissue response“, *Journal of oral and maxillofacial surgery : official journal of the American Association of Oral and Maxillofacial Surgeons*, Vol. 67, No. 8, S. 1628–1639.
- Karaxha, L., Rossi, D., Hamanaka, R., Gianni, A. B., Baj, A., Moon, W., Del Fabbro, M. & Romano, M. (2021) „Accuracy of splint vs splintless technique for virtually planned orthognathic surgery: A voxel-based three-dimensional analysis“, *Journal of cranio-maxillo-facial surgery : official publication of the European Association for Cranio-Maxillo-Facial Surgery*, Vol. 49, No. 1, S. 1–8.
- Kauffmann, P. (2021) „Aktuelle Konzepte in der Dysgnathie-Chirurgie“, *Der Freie Zahnarzt*, Vol. 65, No. 6, S. 66–75.
- Kollmann, J. K. E. (1910) „Plastische anatomie des menschlichen körpers für künstler und freunde der kunst“ [Online]. Verfügbar unter <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsbas&AN=edsbas.ACDO2510&lang=de&site=eds-live&scope=site>.
- Kraeima, J., Schepers, R. H., Spijkervet, F. K. L., Maal, T. J. J., Baan, F., Witjes, M. J. H. & Jansma, J. (2020) „Splintless surgery using patient-specific osteosynthesis in Le Fort I osteotomies: a randomized controlled multi-centre trial“, *International journal of oral and maxillofacial surgery*, Vol. 49, No. 4, S. 454–460.
- Kretschmer, W. B., Zoder, W., Baciut, G., Bacuit, M. & Wangerin, K. (2009) „Accuracy of maxillary positioning in bimaxillary surgery“, *The British journal of oral & maxillofacial surgery*, Vol. 47, No. 6, S. 446–449.
- Kübler, A., Reuther, T., Michel, C. & Reuther J. (2011) „Orthopädische Chirurgie des Gesichtsschädels“, in Hausamen, J.-E., Machtens, E., Reuther J., Eufinger, H., Kübler, A. & Schliephake, H. (Hg.) *Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie: Operationslehre und -atlas*, 4. Aufl., Berlin, Springer Medizin, S. 354–416.
- Kwon, T.-G., Choi, J.-W., Kyung, H.-M. & Park, H.-S. (2014) „Accuracy of maxillary repositioning in two-jaw surgery with conventional articulator model surgery versus virtual model surgery“, *International journal of oral and maxillofacial surgery*, Vol. 43, No. 6, S. 732–738.
- Lartzien, R., Zaccaria, I., Noyelles, L. & Bettega, G. (2019) „Quantification of the inaccuracy of conventional articulator model surgery in Le Fort 1 osteotomy: evaluation of 30 patients controlled by the Orthopilot® navigation system“, *The British journal of oral & maxillofacial surgery*, Vol. 57, No. 7, S. 672–677.

- Lehmann, K. M. & Hellwig, E. (2005) *Zahnärztliche Propädeutik*, 10. Aufl., München, Elsevier Urban & Fischer.
- Li, B., Shen, S., Jiang, W., Li, J., Jiang, T., Xia, J. J., Shen, S. G. & Wang, X. (2017) „A new approach of splint-less orthognathic surgery using a personalized orthognathic surgical guide system: A preliminary study“, *International journal of oral and maxillofacial surgery*, Vol. 46, No. 10, S. 1298–1305.
- Lüllmann-Rauch, R. (2009) *Taschenlehrbuch Histologie: 10 Tabellen* [Online], 3. Aufl., Stuttgart, Thieme. Verfügbar unter <https://swbplus.bsz-bw.de/bsz30606894xidx.htm>.
- Makram, M. & Kamel, H. (2014) „Reeb Graph for Automatic 3D Cephalometry“, *International Journal of Image Processing (IJIP)*, Vol. 8, No. 2, S. 17–29 [Online]. Verfügbar unter <https://www.cscjournals.org/library/manuscriptinfo.php?mc=IJIP-825#MCAI>.
- Marmulla, R. & Mühling, J. (2007) „Computer-assisted condyle positioning in orthognathic surgery“, *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, Vol. 65, No. 10, S. 1963–1968.
- Mast, G. & Ehrenfeld, M. (2011) „Chirurgische Kieferorthopädie“, in Schwenzer, N. & Ehrenfeld, M. (Hg.) *Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie: 48 Tabellen*, 4. Aufl., Stuttgart, New York, NY, Thieme, S. 234–261.
- McMillen, L. B. (1972) „Border movements of the human mandible“, *The Journal of Prosthetic Dentistry*, Vol. 27, No. 5, S. 524–532.
- Moorhead, A. & Serra, M. (2022) *Le Fort Osteotomy* [Online], Treasure Island (FL), StatPearls. Verfügbar unter https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK564372/#_NBK564372_pubdet_ (Abgerufen am 2 Mai 2022).
- Naran, S., Steinbacher, D. M. & Taylor, J. A. (2018) „Current Concepts in Orthognathic Surgery“, *Plastic and reconstructive surgery*, Vol. 141, No. 6, 925e-936e.
- Oliver Ahlers, M. (1998) *Restaurative Zahnheilkunde mit dem Artex-System: Einsatz von Gesichtsbogen, Kieferrelationsbestimmung und Artikulator zur individualisierten Therapie*, 2. Aufl., Hamburg, DentaConcept.
- Park, N. & Posnick, J. C. (2013) „Accuracy of analytic model planning in bimaxillary surgery“, *International journal of oral and maxillofacial surgery*, Vol. 42, No. 7, S. 807–813.
- Polido, W. D., Ellis, E. & Sinn, D. P. (1991) „An assessment of the predictability of maxillary repositioning“, *International journal of oral and maxillofacial surgery*, Vol. 20, No. 6, S. 349–352.
- Proffit, W. R., Turvey, T. A. & Phillips, C. (2007) „The hierarchy of stability and predictability in orthognathic surgery with rigid fixation: an update and extension“, *Head & face medicine*, Vol. 3, S. 21.
- Rachmiel, M., Naugolni, L., Mazor-Aronovitch, K., Koren-Morag, N. & Bistritzer, T. (2017) „Bone Age Assessments by Quantitative Ultrasound (SonicBone) and Hand X-ray Based Methods are Comparable“, *The Israel Medical Association journal : IMAJ*, Vol. 19, No. 9, S. 533–538.
- Ricketts, R. M. (1960) „A foundation for cephalometric communication“, *American Journal of Orthodontics*, Vol. 46, No. 5, S. 330–357.
- Ritto, F. G., Schmitt, A. R. M., Pimentel, T., Canellas, J. V. & Medeiros, P. J. (2018) „Comparison of the accuracy of maxillary position between conventional model surgery and virtual surgical planning“, *International journal of oral and maxillofacial surgery*, Vol. 47, No. 2, S. 160–166.

- Rückschloß, T., Ristow, O., Müller, M., Kühle, R., Zingler, S., Engel, M., Hoffmann, J. & Freudlsperger, C. (2019) „Accuracy of patient-specific implants and additive-manufactured surgical splints in orthognathic surgery - A three-dimensional retrospective study“, *Journal of cranio-maxillo-facial surgery : official publication of the European Association for Cranio-Maxillo-Facial Surgery*, Vol. 47, No. 6, S. 847–853.
- Santler, G. (2000) „3-D COSMOS: a new 3-D model based computerised operation simulation and navigation system“, *Journal of cranio-maxillo-facial surgery : official publication of the European Association for Cranio-Maxillo-Facial Surgery*, Vol. 28, No. 5, S. 287–293.
- Schendel, S. A., Jacobson, R. & Khalessi, S. (2013) „3-dimensional facial simulation in orthognathic surgery: is it accurate?“, *Journal of oral and maxillofacial surgery : official journal of the American Association of Oral and Maxillofacial Surgeons*, Vol. 71, No. 8, S. 1406–1414.
- Schneider, M., Tzscharnke, O., Pilling, E., Lauer, G. & Eckelt, U. (2005) „Comparison of the predicted surgical results following virtual planning with those actually achieved following bimaxillary operation of dysgnathia“, *Journal of cranio-maxillo-facial surgery : official publication of the European Association for Cranio-Maxillo-Facial Surgery*, Vol. 33, No. 1, S. 8–12.
- Schouman, T., Rouch, P., Imholz, B., Fasel, J., Courvoisier, D. & Scolozzi, P. (2015) „Accuracy evaluation of CAD/CAM generated splints in orthognathic surgery: a cadaveric study“, *Head & face medicine*, Vol. 11, S. 24.
- Schuchardt, K. (1954) „Die Chirurgie als Helferin der Kieferorthopädie“, *Fortschritte der Kieferorthopädie*, Vol. 15, No. 1, S. 1–25.
- Schwarz, A. M. (1959) „Die Bedeutung des Fernröntgenbildes für die kieferorthopädische Praxis“, *Fortschritte der Kieferorthopädie*, Vol. 20, No. 1, S. 22–38.
- Shahidi, S., Bahrampour, E., Soltanimehr, E., Zamani, A., Oshagh, M., Moattari, M. & Mehdizadeh, A. (2014) „The accuracy of a designed software for automated localization of craniofacial landmarks on CBCT images“, *BMC medical imaging*, Vol. 14, S. 32.
- Sharifi, A., Jones, R., Ayoub, A., Moos, K., Walker, F., Khambay, B. & McHugh, S. (2008) „How accurate is model planning for orthognathic surgery?“, *International journal of oral and maxillofacial surgery*, Vol. 37, No. 12, S. 1089–1093.
- Song, K.-G. & Baek, S.-H. (2009) „Comparison of the accuracy of the three-dimensional virtual method and the conventional manual method for model surgery and intermediate wafer fabrication“, *Oral surgery, oral medicine, oral pathology, oral radiology, and endodontics*, Vol. 107, No. 1, S. 13–21.
- Sonnenberg, B. & Göz, G. (2002) „Die Entwicklung der festsitzenden Apparatur: Teil 2 - Historischer Überblick 1906 bis 1980“, *Zahnärztliche Mitteilungen*, Vol. 92, No. 13, S. 84–86.
- Statistisches Bundesamt (2021) *Fallpauschalenbezogene Krankenhausstatistik (DRG-Statistik) Operationen und Prozeduren der vollstationären Patientinnen und Patienten in Krankenhäusern (4-Steller) - 2020* [Online], Wiesbaden. Verfügbar unter https://www.statistischebibliothek.de/mir/receive/DEHeft_mods_00136766 (Abgerufen am 28 Juni 2022).
- Stratemann, S. A., Huang, J. C., Maki, K., Miller, A. J. & Hatcher, D. C. (2008) „Comparison of cone beam computed tomography imaging with physical measures“, *Dento maxillo facial radiology*, Vol. 37, No. 2, S. 80–93.

- Strub, J. R., Türp, J. C., Witkowski, S., Hürzeler, M. B. & Kern, M. (2004) *Curriculum Prothetik: Band 1*, 3. Aufl., Berlin, Quintessenz-Verl.
- Sullivan, S. M. (2016) „Le Fort I Osteotomy“, *Atlas of the oral and maxillofacial surgery clinics of North America*, Vol. 24, No. 1, S. 1–13.
- Titiz, I., Laubinger, M., Keller, T., Hertrich, K. & Hirschfelder, U. (2012) „Repeatability and reproducibility of landmarks--a three-dimensional computed tomography study“, *European journal of orthodontics*, Vol. 34, No. 3, S. 276–286.
- Tucker, S., Cevidanes, L. H. S., Styner, M., Kim, H., Reyes, M., Proffit, W. & Turvey, T. (2010) „Comparison of actual surgical outcomes and 3-dimensional surgical simulations“, *Journal of oral and maxillofacial surgery : official journal of the American Association of Oral and Maxillofacial Surgeons*, Vol. 68, No. 10, S. 2412–2421.
- Zinser, M. J., Mischkowski, R. A., Sailer, H. F. & Zöller, J. E. (2012) „Computer-assisted orthognathic surgery: feasibility study using multiple CAD/CAM surgical splints“, *Oral surgery, oral medicine, oral pathology and oral radiology*, Vol. 113, No. 5, S. 673–687.
- Zizelmann, C., Hammer, B., Gellrich, N.-C., Schwestka-Polly, R., Rana, M. & Bucher, P. (2012) „An evaluation of face-bow transfer for the planning of orthognathic surgery“, *Journal of oral and maxillofacial surgery : official journal of the American Association of Oral and Maxillofacial Surgeons*, Vol. 70, No. 8, S. 1944–1950.

8. Thesen

1. Dreidimensionale digitale Übereinanderlagerung von STL-Datensätzen ist eine adäquate Methode für die Ermittlung der Umsetzungsgenauigkeit von konventionell geplanten Umstellungsosteotomien des Oberkiefers und ist in dieser Studie, hinsichtlich der Präzision, insgesamt im Einklang mit der klinisch relevanten Analysegrenze.
2. Die quantitative Analyse der Umsetzungenauigkeiten zeigt bei den Rotationen beim Pitch die höchsten Abweichungen von der Planung und bei den Translationen bei Sagittal- und Longitudinalachse die größten Differenzen im Vergleich zu den anderen Eulerschen Werten.
3. Die Ergebnisse weisen gewisse Richtungstendenzen der Umsetzungenauigkeiten, hin zu einem zu positiven Pitch und zu posteriorer sagittaler Einstellung, auf. Sie sind jedoch aufgrund der geringen Fallzahl kritisch zu betrachten.
4. Die relative Analyse der Umsetzungenauigkeiten zeigt, dass vor allem Translationen in der Sagittalachse von der Verlagerungsstrecke abhängig sind. Diese Abhängigkeit ist bei den anderen Eulerschen Werten nicht in diesem Maße sichtbar.
5. Die Auswertung der Ergebnisse über den OP-Erfolg zeigt, dass konventionell geplante Umstellungsosteotomien sehr viel häufiger mit klinisch relevanten Abweichungen (> 2 mm/° oder $< -2^\circ$ /mm) als ohne relevante Ungenauigkeiten umgesetzt werden. Dabei kommen oft Überschreitungen mehrerer Eulerscher Werte innerhalb eines Falls vor.
6. Eine insgesamt klinisch relevante Auswirkung auf das Operationsergebnis, der nicht realitätsgetreuen Positionierung der Planungsmodelle im Artikulator, konnte nur in der Longitudinalachse festgestellt werden.

Anhang

Materialien

Digitale Volumentomographie der präoperativen Gesichtsschädel als DICOM-Datei

Digitale Volumentomographie der postoperativen Gesichtsschädel als DICOM-Datei

Einartikuliertes Gipsmodell der Ausgangssituation der Oberkiefer-Zahnreihe

Einartikuliertes Gipsmodell der Planung der Oberkiefer-Zahnreihe

Gipsmodell der Unterkiefer-Zahnreihe

3D Mattierungs-Spray der Firma R.v.Klier

Geräte

EinScan-Pro+

SHINING 3D®

Veraview X800 (SN X800-90201-501)

J.MORITA MFG CORP.

Software

EinScan-Pro Series (Version 3.1.0.4)

SHINING 3D®

IPS CaseDesigner® (Version 2.1)

KLS Martin

CloudCompare® (Version 2.11)

Open-Source Project

IMV Anonymizer® (Version 1.0)

Imaging Medical Vision

Excel® für Microsoft 365 MSO

Microsoft®

(Version 2207 Build 16.0.15427.20182) 64 Bit)

Selbstständigkeitserklärung

(1) Ich erkläre, dass ich mich an keiner anderen Hochschule einem Promotionsverfahren unterzogen bzw. eine Promotion begonnen habe.

(2) Ich erkläre, die Angaben wahrheitsgemäß gemacht und die wissenschaftliche Arbeit an keiner anderen wissenschaftlichen Einrichtung zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht zu haben.

(3) Ich erkläre an Eides statt, dass ich die Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe. Alle Regeln der guten wissenschaftlichen Praxis wurden eingehalten; es wurden keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht.

Datum, Unterschrift

Danksagungen

Die Danksagungen wurden aus Gründen des Datenschutzes entfernt.