

Aus der Poliklinik für Kieferorthopädie
(Prof. Dr. med. dent. P. Meyer-Marcotty)
im Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
der Medizinischen Fakultät der Universität Göttingen

**Dreidimensionale Gegenüberstellung
von Planungszielen und postoperativen
Ergebnissen bei konventioneller und
digitaler Planung von
Umstellungsosteotomien**

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades
für Zahnmedizin
der Medizinischen Fakultät der
Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von

Timon Kahlmeier

aus

Göttingen

Göttingen 2023

Dekan: Prof. Dr. med. W. Brück

Betreuungsausschuss

Betreuer/in: Prof. Dr. med. dent. P. Meyer-Marcotty

Ko-Betreuer/in: Prof. Dr. med. Dr. med. dent. H. Schliephake

Prüfungskommission

Referent/in: Prof. Dr. med. dent. P. Meyer-Marcotty

Ko-Referent/in: Prof. Dr. med. Dr. med. dent. P. Kauffmann

Drittreferent/in: Prof. Dr. med. R. Dressel

Datum der mündlichen Prüfung: 24.10.2023

Hiermit erkläre ich, die Dissertation mit dem Titel "Dreidimensionale Gegenüberstellung von Planungszielen und postoperativen Ergebnissen bei konventioneller und digitaler Planung von Umstellungsosteotomien" eigenständig angefertigt und keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet zu haben.

Göttingen, den

(Unterschrift)

Die Daten, auf denen die vorliegende Arbeit basiert, wurden teilweise publiziert:

Quast A, Santander P, **Kahlmeier T**, Moser N, Schliephake H, Meyer-Marcotty P (2021):
Predictability of maxillary positioning: a 3D comparison of virtual and conventional
orthognathic surgery planning. *Head Face Med* 17, 27

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1 Einleitung.....	1
1.1 Einführung.....	1
1.2 Ablauf einer kieferorthopädisch-kieferchirurgischen Therapie.....	5
1.2.1 Kieferorthopädische Dekompensation	6
1.2.2 Kieferverlagernde Operation	8
1.2.3 Kieferorthopädische Nachbehandlung	12
1.3 Operationsplanung und Fehlerquellen.....	14
1.3.1 Planungsgrundlagen	15
1.3.2 Überblick zur konventionellen Operationsplanung.....	16
1.3.3 Überblick zur digitalen Operationsplanung (DP)	19
1.4 Fragestellungen	24
2 Patienten und Methoden	25
2.1 Studiendesign und Patientenkollektiv	25
2.2 Planungsmethoden und Operationstechnik.....	26
2.2.1 Ablauf der konventionellen Operationsplanung	27
2.2.2 Ablauf der digitalen Operationsplanung	30
2.2.3 Splintbasierte Operationstechnik	34
2.3 Gegenüberstellung von Planung und Operationsergebnis.....	35
2.3.1 Digitalisierung der konventionellen Planung	35
2.3.2 Überlagerung der Planung mit den postoperativen Datensätzen	38
2.3.3 3-D Vergleich durch Kephalometrie	39
2.3.4 3-D Vergleich durch Heatmap.....	44
2.4 Statistik.....	46
2.4.1 Methodenfehler.....	46
2.4.2 Statistik der Gegenüberstellungen	47
3 Ergebnisse.....	48
3.1 Patientendaten.....	48
3.2 Methodenfehler.....	49
3.2.1 Inter- und Intrarater-Agreement.....	51
3.3 Ergebnisse der Gegenüberstellung mittels Kephalometrie.....	53
3.3.1 Kephalometrische Korrelationen	57
3.4 Ergebnisse der Gegenüberstellung mittels Heatmap.....	61

4	Diskussion	62
4.1	Methodenkritik	62
4.1.1	Fehlerquellen durch den Datensatz	62
4.1.2	Operationssimulation der konventionellen Planung	63
4.1.3	Fehlerquellen der Kephalmetrie	64
4.1.4	Limitationen der Heatmap	66
4.1.5	Verschiedene Operateure und Operationstechnik	68
4.1.6	Mangelnde Beurteilung der Mandibula	68
4.2	Diskussion der Ergebnisse	69
4.2.1	Patientenkollektiv	69
4.2.2	Einordnung der kephalometrischen Ergebnisse	70
4.2.3	Bewertung der Heatmap-Ergebnisse	75
4.2.4	Klinische Konsequenz und Ausblick	76
5	Zusammenfassung	78
6	Literaturverzeichnis	80

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Eugnathie	2
Abbildung 2: Klasse II Dysgnathie.....	2
Abbildung 3: Klasse III Dysgnathie.....	3
Abbildung 4: Offener Biss mit einseitigem Kreuzbiss.....	3
Abbildung 5: Ausgangssituation mit zirkulärem Kreuzbiss.....	6
Abbildung 6: Distraktor zur skelettalen Erweiterung des Oberkiefers	7
Abbildung 7: Zustand nach dentaler Dekompensation	8
Abbildung 8: Intraoperative Kondylusfixierung.....	9
Abbildung 9: Sagittale Spaltung nach Obweger-Dal Pont	10
Abbildung 10: Le Fort I Osteotomie mit down fracture	10
Abbildung 11: Anwendung des Oberkiefersplints.....	11
Abbildung 12: Anwendung des Unterkiefer- und Finalsplints	11
Abbildung 13: Kieferorthopädische Nachbehandlung	12
Abbildung 14: Endergebnis nach der kieferorthopädischen Nachbehandlung.....	13
Abbildung 15: Fotoanalyse vor und nach Therapie	15
Abbildung 16: Konventionelle Planungsunterlagen (KP).....	17
Abbildung 17: Fehler der Gesichtsbogenübertragung	18
Abbildung 18: Virtuelle Simulation einer bimaxillären Umstellungsosteotomie.....	19
Abbildung 19: Korrektur von Asymmetrien während der digitalen Planung.....	20
Abbildung 20: Schematischer Ablauf der virtuellen Operationsplanung.....	21
Abbildung 21: Vertikale und sagittale Abweichungen bei DP und KP	23
Abbildung 22: Volumentomograph Orange Dental PaX Zenith 3D.....	27
Abbildung 23: MRI im Artikulator.....	27
Abbildung 24: Konventionelle Herstellung des Zentriksplintes.....	28
Abbildung 25: Konventionelle Herstellung des Oberkiefersplintes	29
Abbildung 26: Konventionelle Herstellung des Unterkiefersplints	29
Abbildung 27: Konventionell erstellte Operationssplinte	30
Abbildung 28: Erstellung eines 3D Schädelmodells (Mimics inPrint)	30
Abbildung 29: Herstellung des <i>Composite Models</i> (ProPlan CMF).....	31
Abbildung 30: Virtuelle Osteotomie der Kiefer	32
Abbildung 31: Durchführung der virtuellen Modelloperation	32
Abbildung 32: Virtuelles Splintdesign und Druckausrichtung.....	33
Abbildung 33: Herstellungsprozess der digital erstellten Splinte.....	34
Abbildung 34: Scannen der Modelle inklusive Artikulators und Splints	36
Abbildung 35: Digitalisierung der konventionellen Planung	37
Abbildung 36: Geplantes und postoperatives Schädelmodell in 3-Matic Research	38
Abbildung 37: N-Punkt Registrierung in 3-Matic Research	38
Abbildung 38: Lineare Messungen der Kephalemetrie	42
Abbildung 39: Winkel der Kephalemetrie	43
Abbildung 40: Überlagerte Modelle und Heatmap in 3-Matic Research.....	45
Abbildung 41: Schematische Darstellung des Heatmap-Logarithmus.....	45

Abbildung 42: Intra- und Inter-Rater Bland-Altman Plots für U1 zu FHP Prä Op	52
Abbildung 43: Vertikale und sagittale Abweichung zwischen Planung und Ergebnis	54
Abbildung 44: Sagittale Abweichung zwischen Planung und Ergebnis	54
Abbildung 45: Pitch-Abweichung	55
Abbildung 46: Zusammenhänge zwischen den gemessenen Abweichungen.....	57
Abbildung 47: Zusammenhänge zwischen Abweichung und Planungsausmaß.....	60
Abbildung 48: Heatmap und entsprechende überlagerte Gipsmodelle	61
Abbildung 49: Geometrischer Einfluss auf die Ergebnisse der Heatmap	67
Abbildung 50: Einfluss des gewählten Referenzpunktes auf die vertikale Verlagerung	72
Abbildung 51: Individualisierte Osteotomieschablonen und Osteosyntheseplatten	77

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Attribute der Stufe 4 und 5 des IOFTN nach Ireland (2014) zur Bestimmung eines erhöhten Behandlungsbedarfs.	4
Tabelle 2: Ergebnisse der Fallzahlberechnung	25
Tabelle 3: Benötigte Planungsunterlagen beider Methoden.....	26
Tabelle 4: Überlagerungsparameter zur globalen Registrierung in 3.Matic Research.....	39
Tabelle 5: Enthaltende Punkte	39
Tabelle 6: Enthaltende Linien.....	40
Tabelle 7: Enthaltende Ebenen	40
Tabelle 8: Enthaltende Messungen zur Einteilung des Patientenkollektivs	41
Tabelle 9: Enthaltene Streckenmessungen zum Vergleich zwischen Planung und Ergebnis	42
Tabelle 10: Enthaltene Winkelmessungen zum Vergleich zwischen Planung und Ergebnis	43
Tabelle 11: Bedeutung der Vorzeichen.....	44
Tabelle 12: Metrische Messungen der Heatmap.....	45
Tabelle 13: Alter und Geschlechterverteilung der Probanden.....	48
Tabelle 14: Durchgeführtes Operationsverfahren innerhalb der Gruppen	48
Tabelle 15: Demographische und klinische Merkmale des Patientenkollektivs.....	49
Tabelle 16: Kreuztabelle der Probanden mit sagittalen Anomalien und erwarteter Anzahl	50
Tabelle 17: Kreuztabelle der Probanden mit vertikalen Anomalien und erwarteter Anzahl	50
Tabelle 18: Kreuztabelle der Probanden mit transversaler Anomalie und erwarteter Anzahl.....	50
Tabelle 19: Mittelwerte, Standardabweichung und Toleranzbereiche der Bland-Altman Plots	51
Tabelle 20: Gegenüberstellung von Planung zu Operationsergebnis mit Wilcoxon-Test...	53
Tabelle 21: Klinische Erfolgsquoten beider Planungsmethoden	56
Tabelle 22: Gegenüberstellung der mittleren Abweichungen beider Planungsmethoden...	56
Tabelle 23: Zusammenhänge zwischen Abweichungen unterschiedlicher Richtungen.....	58
Tabelle 24: Gegenüberstellung der Heatmap-Ergebnisse beider Planungsmethoden.....	61

Abkürzungsverzeichnis

BSSO	Bilaterale sagittale Spaltungsosteotomie, <i>bilateral sagittal split osteotomy</i>
CAD	
CAM	Rechnerunterstützte Gestaltung, <i>computer aided design</i>
DP	Rechnerunterstützte Fertigung, <i>computer aided manufacturing</i> Digitale Planungsmethode
DVT	Digitale Volumetomographie
DICOM	Digitale Bildverarbeitung und Kommunikation in der Medizin, <i>digital imaging and communications in medicine</i>
IOFTN	Index des funktionellen Behandlungsbedarfs orthognather Chirurgie, <i>index of orthognathic functional treatment need</i>
KP	Konventionelle Planungsmethode
LoA	Toleranzbereiche, <i>limits of agreement</i>
MRI	Modell-Repositionierungs-Instrument
RMS	Quadratisches Mittel, <i>root mean square</i>
ROI	Relevanter Messbereich, <i>region of interest</i>
SLA	Stereolithografie
STL	<i>Standard triangle language</i>
UMG	Universitätsmedizin Göttingen

1 Einleitung

1.1 Einführung

„Mundgesundheit hat viele Facetten und umfasst die Fähigkeit zu sprechen, zu lächeln, zu riechen, zu schmecken, zu berühren, zu kauen, zu schlucken und eine Reihe von Emotionen durch Gesichtsausdrücke mit Selbstvertrauen und ohne Schmerzen, Unbehagen und Erkrankungen des kraniofazialen Komplexes zu vermitteln.“ (FDI World Dental Federation, 2016)

Diese im Jahr 2016 entstandene Definition der FDI World Dental Federation, welche als Nichtregierungsorganisation ein offizieller Partner der Weltgesundheitsorganisation WHO ist, verdeutlicht die Vielgestaltigkeit von Mundgesundheit (Glick et al. 2016). So umfasst Mundgesundheit neben den funktionellen Aspekten des stomatognathen Systems auch die Fähigkeit, Emotionen durch Gesichtsausdrücke mit Selbstvertrauen auszudrücken. Gemäß dieser Definition ist anzunehmen, dass die Mundgesundheit bei Patienten mit ausgeprägten skelettalen Kieferfehlstellungen, sogenannten Dysgnathien, eingeschränkt ist (Mtaya et al. 2009).

Von skelettalen Dysgnathien spricht man, wenn die Lage, Größe oder Relation der Kiefer zueinander oder zum Gesichtsschädel ein Ungleichgewicht darstellen, welche sich im Bereich der Zähne im Sinne einer unphysiologischen Verzahnung manifestieren. Die ideale Zuordnung der Kiefer und Zähne, die sogenannte Eugnathie, ist dabei durch eine harmonische Verzahnung im Seitenzahnbereich bei physiologischer Frontzahnstufe sowohl in vertikaler (sog. *Overbite*) als auch in sagittaler Richtung (sog. *Overjet*) gekennzeichnet (Abbildung 1, Seite 2). Zur entsprechenden Beurteilung der Okklusion stellte Andrews (1972) die *six keys to normal occlusion* auf, nachdem er an 120 Patientin mit normaler Verzahnung sechs wiederkehrende signifikante Attribute definierte.



Abbildung 1: Eugnathie Im Seiten- und Frontzahnbereich liegt eine physiologische Verzahnung vor, wobei ein Ein-zu-Zwei-Zahn-Antagonismus mit Höcker-Fossa-Verzahnung und ein funktioneller Überbiss von ca. 2mm vorliegt. Die oberen Zähne liegen dabei zirkulär weiter vestibulär als die unteren und die Verbindungslinie der mittleren Frontzähne zwischen Ober- und Unterkiefer stimmt überein. (Eigene Abbildung)

Liegt eine Kieferfehllage vor, hat diese ihren Ursprung in einer oder mehreren Dimensionen, weshalb man zwischen sagittalen, vertikalen und transversalen Dysgnathien unterscheidet. Liegt eine sagittale Fehlstellung vor, äußert sich diese durch eine vergrößerte Stufe zwischen Ober- und Unterkiefer in Form eines vergrößerten oder umgekehrten Overjets. Wenn der Unterkiefer in Relation zum Oberkiefer dabei zu weit retrahiert liegt, spricht man von einer skelettalen Klasse II (Abbildung 2). Liegt er zu weit anterior, entsteht eine umgekehrte Frontzahnstufe und man spricht von einer skelettalen Klasse III (Abbildung 3, Seite 3).



Abbildung 2: Klasse II Dysgnathie Der vergrößerte Overjet entsteht durch eine sagittale Größendiskrepanz zwischen Ober- und Unterkiefer, wobei der Oberkiefer überwiegt. (Eigene Abbildung)



Abbildung 3: Klasse III Dysgnathie Der umgekehrte Overjet entsteht ebenfalls durch eine sagittale Größendiskrepanz zwischen Ober- und Unterkiefer, wobei der Unterkiefer überwiegt. (Eigene Abbildung)

Im Seitenzahnbereich äußert sich eine sagittale Dysgnathie ebenfalls durch eine unphysiologische Verzahnung, wobei der mesiobukkale Höcker des oberen ersten Molaren vor oder hinter seiner Idealposition liegt, welche nach Angle (1900) die zentrale Fissur des unteren ersten Molaren darstellt. Vertikale Kieferfehllagen entstehen durch eine Abweichung der Kieferneigungen, welche sich im Frontzahnbereich in Form eines offenen oder tiefen Bisses bemerkbar machen (Abbildung 4). Transversale Dysgnathien liegen vor, wenn der Oberkiefer in Relation zum Unterkiefer zu schmal oder zu breit ist und ein Kreuzbiss oder eine bukkale Nonokklusion im Seitenzahnbereich entsteht (ebenfalls Abbildung 4).



Abbildung 4: Offener Biss mit einseitigem Kreuzbiss Kombination aus einem frontalen skelettal offenem Biss und einem linkslateralen Kreuzbiss der Zähne 25 und 35. (Eigene Abbildung)

In vielen Fällen liegt eine Kombination verschiedener Anomalien in unterschiedlicher Ausprägung vor, welche bei Patienten durch ein Zusammenspiel aus funktionellen und ästhetischen Einschränkungen einen erhöhten Leidensdruck verursachen.

Eine adäquate Therapie dieser skelettalen Fehlstellungen stellt im Erwachsenenalter oft nur eine chirurgische Umstellung dar, die sowohl in einem als auch in beiden Kiefern durchgeführt werden kann. Dieser kieferchirurgische Eingriff basiert auf

kieferorthopädischer Planung und Vorarbeit und stellt damit eine interdisziplinäre Behandlung zwischen Kieferorthopädie und Mund-Kiefer- und Gesichtschirurgie dar. Eine enge Zusammenarbeit zwischen den Fachrichtungen lässt sich an der Universitätsmedizin Göttingen (UMG) traditionell seit Jahrzehnten beobachten. Einer besonderen Bedeutung kommt dabei der Erstellung des zukunftsweisenden Konzeptes der gelenkbezüglichen kieferorthopädisch-kieferchirurgischen Therapie in den 1980er Jahren zu, welches in Göttingen entwickelt wurde (Kubein et al. 1987; Luhr 1985, 1986; Schwestka-Polly R. et al. 1998). Heute noch findet die Idee der gelenkprotektiven Dysgnathiechirurgie Anwendung und ist Grundlage moderner Behandlungs-, Planungs- und Operationskonzepte (Chow et al. 2022; Luhr 1989).

Zur Kategorisierung der Behandlungsbedürftigkeit von Dysgnathien bei erwachsenen Patienten haben Ireland et al. (2014) einen Index erstellt, welcher auf funktionellen Aspekten basiert. Dieser Index of Orthognathic Functional Treatment Need (IOFTN) dient generell der Klassifizierung und der Entscheidungsfindung hinsichtlich der Notwendigkeit einer Therapie. Ein erhöhter Behandlungsbedarf liegt bei Stufe 4 und 5 vor, welche durch die in Tabelle 1 aufgezählten Anomalien gekennzeichnet ist.

Tabelle 1: Attribute der Stufe 4 und 5 des IOFTN nach Ireland (2014) zur Bestimmung eines erhöhten Behandlungsbedarfs.

Vergrößerte sagittale Frontzahnstufe > 6 mm
Frontaler Kopfbiss sowie umgekehrte Frontzahnstufe
Inkompetenter Lippenschluss mit > 3 mm sichtbarem Zahnfleisch im Oberkiefer
Offener Biss > 4mm oder < 4mm mit funktionellen Einschränkungen
Tiefer Biss mit Trauma von Zähnen oder Zahnfleisch
Gesichtsasymmetrien mit okklusalen Indifferenzen
Kraniofaziale Anomalien sowie Lippen-Kiefer-Gaumenspalten
Bukkale Nonokklusion eines gesamten Segments mit funktionellem Hindernis oder Trauma
Schlafapnoe, die nicht auf andere Ursachen zurückzuführen ist
Durch Trauma oder anderen Pathologien entstandene skelettale und dentale Abweichungen

Pathologien, die durch diese falsche Lage oder Relation der Kiefer entstehen können, reichen von Einschränkungen der stomatognathen Funktionen wie Abbeißen, Kauen oder Sprechen über Missempfinden im Bereich der Muskulatur und Kiefergelenke bis hin zu Schnarchen und Atembeschwerden (Caprioglio et al. 1999; McNamara et al. 1995; Pietila et al. 2017). Bei erwachsenen Patienten mit unbehandelter Kiefer- und Zahnfehlstellung verschlechtert sich mit zunehmendem Schweregrad der Malokklusion die mundgesundheitsbezogene Lebensqualität und die Kaufunktion (Choi et al. 2016). Darüber hinaus deuten die verfügbaren Daten auf negative Auswirkungen auf das

Selbstwertgefühl, das Selbstvertrauen und die psychische Gesundheit hin (Soh und Narayanan 2013). Wenn Patienten sich für eine Therapie zur chirurgischen Umstellung der Kiefer entscheiden, spielt in erster Linie der Wunsch nach Verbesserung von Aussehen und Funktion (Kauen/ Abbeißen/ Sprache) eine Rolle (Cunningham et al. 1995), wobei sich einige Patienten zusätzlich eine Verbesserung der Aussprache und der Nasenatmung erhoffen (Modig et al. 2006). Weitere Untersuchungen bezüglich der Behandlungsmotivation weisen ebenfalls darauf hin, dass sich die Mehrheit der Patienten vorrangig aus ästhetischen Gründen für eine kieferorthopädisch-kieferchirurgische Therapie entscheidet (Al-Hadi et al. 2019) und durch Verbesserung des Selbstwertgefühls auch psychosoziale Effekte erwartet (Williams et al. 2005). Tatsächlich können Profilveränderungen, die eine Harmonisierung des Gesichtsprofils bewirken, die Lebensqualität der Patienten postoperativ verbessern (Baherimoghaddam et al. 2014). Insgesamt wird deutlich, dass die Erwartungen an eine erfolgreiche Therapie sehr weitreichend sind und über die Mundgesundheit hinaus die generelle Lebensqualität positiv beeinflusst werden soll. Um dieses Ziel zu erreichen, sind die Patienten bereit eine langwierige und aufwändige interdisziplinäre Behandlung auf sich zu nehmen.

1.2 Ablauf einer kieferorthopädisch-kieferchirurgischen Therapie

Vor Behandlungsbeginn ist eine ausführliche Aufklärung der Patienten über den Ablauf und die Risiken der Gesamtbehandlung zwingend notwendig. Da es sich um einen elektiven Eingriff handelt, ist in Hinblick auf mögliche Komplikationen, wie Nervenschädigungen, eine partizipative Entscheidungsfindung anzustreben.

Hinsichtlich des Zeitpunktes der operativen Umstellung im Verlauf der Gesamttherapie wird zwischen zwei Konzepten unterschieden. Während beim klassischen Ansatz eine kieferorthopädische Vorbehandlung vorgesehen ist (sog. *orthodontic first*), beruht das zweite Konzept auf der Idee, das Skelett zu Beginn der interdisziplinären Behandlung chirurgisch zu harmonisieren und anschließend orthodontische Korrekturen vorzunehmen (sog. *surgery first*). Das *surgery-first*-Konzept gewinnt in den letzten Jahren, nicht zuletzt wegen einer verkürzten Behandlungsdauer und einem sofortigen positiven psychologischen Effekt, deutlich an Beliebtheit, wird aber hinsichtlich langfristiger Stabilität kontrovers diskutiert (Hernandez-Alfaro et al. 2014; Kim et al. 2014; Pelo et al. 2017). Da zudem eine strenge Indikationsstellung vorliegt und das Prinzip ein hohes Maß an Erfahrung vom Behandlungsteam erfordert, konnte sich das Konzept zum jetzigen Zeitpunkt gegenüber dem klassischen Therapieansatz nicht durchsetzen (Hernandez-Alfaro et al. 2014). Vielmehr kristallisieren sich differenzierte Indikationen für die unterschiedlichen Therapieregime heraus. Da sich die vorliegende Arbeit primär mit Aspekten der Therapie mit kieferorthopädischer Vorbehandlung befasst, soll der Ablauf einer *orthodontic-first*-Behandlung nachfolgend detailliert

anhand eines Fallbeispiels dargestellt werden. Die Gesamttherapie des Konzeptes gliedert sich grob in drei Abschnitte:

1. Kieferorthopädische Dekompensation
2. Kieververlagernde Operation
3. Kieferorthopädische Nachbehandlung

1.2.1 Kieferorthopädische Dekompensation

Nach Erstellung der Anfangsdiagnostik und Anfertigung einer ausführlichen Planung (Abbildung 5), folgt ein erster kieferorthopädischer Behandlungsabschnitt mittels festsitzender Multibracket-Apparatur zur dentalen Dekompensation und Vorbereitung der Zahnbögen auf die anschließende Kieferumstellung.



Abbildung 5: Ausgangssituation mit zirkulärem Kreuzbiss Eine Patientin stellte sich mit folgender Ausgangssituation vor. Intraoral imponiert ein zirkulärer Kreuzbiss mit ausgeprägter Mittenabweichung zwischen Ober- und Unterkiefer. Von extraoral wird ein konkaves Profil sowie eine Kinnabweichung nach rechts deutlich. Aufgrund des zu schmalen Oberkiefers sah die Planung neben einer kombiniert kieferorthopädisch-kieferchirurgische Therapie eine zusätzliche chirurgisch unterstützte Gaumennahterweiterung vor. (Eigene Abbildung)

Sollte zudem eine skelettale transversale Diskrepanz zwischen Ober- und Unterkiefer in deren finaler Zuordnung bestehen, so muss diese initial durch eine chirurgische Gaumennahterweiterung behoben werden. Bei dem vorgestellten Patientenfall wurde hierfür nach chirurgischer Spaltung der Sutura palatina mediana ein Distraktor beidseits am harten Gaumen verschraubt, welcher durch eigenständiges Drehen seitens der Patientin zur Erweiterung des Oberkiefers führte (Abbildung 6).



Abbildung 6: Distraktor zur skelettalen Erweiterung des Oberkiefers Nach chirurgischer Spaltung der Sutura palatina mediana des initial zu schmalen Oberkiefers (a) wurde ein Distraktor zur transversalen Erweiterung des Oberkiefers genutzt (b). (Eigene Abbildung)

Die dentale Dekompensation erfolgt mit dem Ziel, die Zähne so auf den Kiefern zu positionieren, dass sie nach der Kieferumstellung eine stabile und möglichst ideale Verzahnung erreichen (Grubb und Evans 2007). Die Notwendigkeit dafür ergibt sich aus dem Phänomen, dass bei unbehandelten Kieferfehlstellungen eine natürliche Kompensation der skelettalen Diskrepanz durch Kippungen und Wanderungen der Zähne entsteht und diese damit außerhalb der Idealposition des jeweiligen Kiefers stehen. Um ein korrektes Verhältnis zwischen Zahn- und Kieferzuordnung zu erreichen, ist es daher nötig diese natürliche Camouflage aufzuheben. Eine mangelhafte Durchführung dieses Behandlungsschrittes kann bereits ein limitierender Faktor für ein optimales Behandlungsergebnis sein, welcher oft von den behandelnden Kieferorthopäden nicht ausreichend berücksichtigt wird (Quast et al. 2021). Diese erste kieferorthopädische Behandlungsphase dauert ungefähr zwölf bis 24 Monate und stellt zunächst eine Verschlechterung der Ausgangssituation dar, welche wiederum prätherapeutische psychosoziale Probleme verstärken kann (Esperao et al. 2010; Luther et al. 2003) (Abbildung 7, Seite 8).



Abbildung 7: Zustand nach dentaler Dekompensation Im Rahmen der kieferorthopädischen Vorbehandlung fand eine Dekompensation der Ausgangslage statt. Dabei wurden die Zähne gerade auf den jeweiligen Kiefern positioniert, wodurch der frontale Kreuzbiss verstärkt und die Verzahnung zunächst verschlechtert wurde. (Eigene Abbildung)

1.2.2 Kieferverlagernde Operation

Der chirurgische Eingriff findet im Rahmen einer mehrtägigen stationären Aufnahme statt und ist für die Patienten mit erheblichen Missempfindungen verbunden. Besonders belastend ist dabei das postoperative Verschnüren der Kiefer durch Gummizüge sowie die Schwellung mit einhergehenden Bewegungseinschränkungen (Tamme et al. 2017).

Die an der UMG durchgeführte Kieferumstellung basiert auf Grundlage des Göttinger Konzeptes, mit der Idee die zentrische Position des Kiefergelenks intraoperativ zu fixieren, um postoperativ die Verzahnung und das Kiefergelenk in ihrer idealen biomechanisch begründeten Zuordnung zu vereinen (Kubein et al. 1987; Luhr 1985, 1986). So kann das Kiefergelenk als distalster Punkt der Okklusion betrachtet werden, wobei der Kondylus im Idealfall bei maximaler Interkuspitation am Übergang der Fossa temporalis zur Protuberantia articularis positioniert ist (Kubein-Meesenburg 1985; Rinchuse und Kandasamy 2006). Ist der Kondylus des Kiefergelenks intraoperativ nicht korrekt ausgerichtet, kann dies postoperativ zu einer Abweichung der Bisslage führen oder pathologische Veränderungen im Sinne von Kondylusresorptionen verursachen (Hwang et al. 2000). Für die Fixierung des Kiefergelenks in einer zuvor ermittelten Idealposition spricht dabei, dass eine manuelle Einstellung der Kiefergelenksposition intraoperativ, wegen der Lagerung und Muskelrelaxation der Patienten unter Vollnarkose, erschwert wird (Quast et al. 2020; Sharifi et al. 2008). Zusätzlich würde ein beweglicher Unterkiefer, der in Kombination mit einem Operationssplint die geplante Strecke der Oberkieferverlagerung definiert, die postoperative Position des Oberkiefers beeinflussen. In der aktuellen Literatur wird die intraoperative Fixierung der Kondylen

jedoch kontrovers diskutiert und in einer Literaturübersicht von Costa F et al. (2008) in Hinblick auf postoperative Stabilität und Kiefergelenksdysfunktionen zusammenfassend als nicht generell notwendig beschrieben. Eine freihändige intraoperative Einstellung der zentrischen Kondylenposition erfordert jedoch einen erfahrenen Chirurgen sowie große Sorgfalt und birgt bei falscher Positionierung das Risiko eines Absinkens des Kondylus nach Aufhebung der intermaxillären Fixierung (Epker und Wessberg 1982). Diese als *condylar sag* bezeichnete Komplikation führt zu einer postoperativen Unterkieferabweichung und kann dadurch eine operative Korrektur erforderlich machen (Reyneke und Ferretti 2002).

In der Praxis findet das Göttinger Konzept durch die Verwendung von starren Osteosyntheseplatten Anwendung, die das Kiefergelenk während der Umstellung der Zahntragenden Segmente mit dem unbewegten Jochbogen verbinden (Luhr 1985) (Abbildung 8).

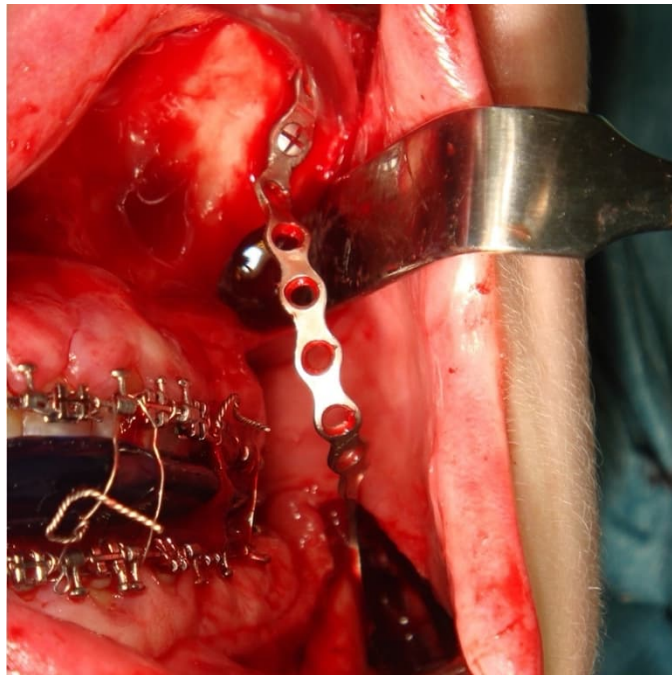


Abbildung 8: Intraoperative Kondylusfixierung Eine starre Verbindung zwischen den gelenktragenden Anteilen des Unterkiefers und dem Jochbogen dient der Fixierung der Kiefergelenke während der Durchführung einer gelenkbezüglichen kieferorthopädischen Therapie. Die zentrische Position der Kiefergelenke wird dabei durch den Zentriksplint (blau) gehalten. (Abbildung mit freundlicher Genehmigung von der Abteilung für Mund-, -Kiefer- und Gesichtschirurgie der UMG)

Nach erfolgter Fixierung der Kiefergelenke, beinhaltet die Operation die Osteotomie des Ober- und Unterkieferknochens an dafür geeigneten Positionen. Eine gängige Methode im Unterkiefer stellt dabei die sagittale Spaltung nach Obwegeser-Dal Pont dar, welche durch die spezielle stufenförmige Osteotomielinie unter maximaler Schonung des Nervus alveolaris inferior erfolgt und gleichzeitig eine große Knochenanlagerungsfläche für die

anschließende Stabilisierung und Heilung bietet (Dal Pont 1961; Luhr 1985; Trauner und Obwegeser 1957) (Abbildung 9).

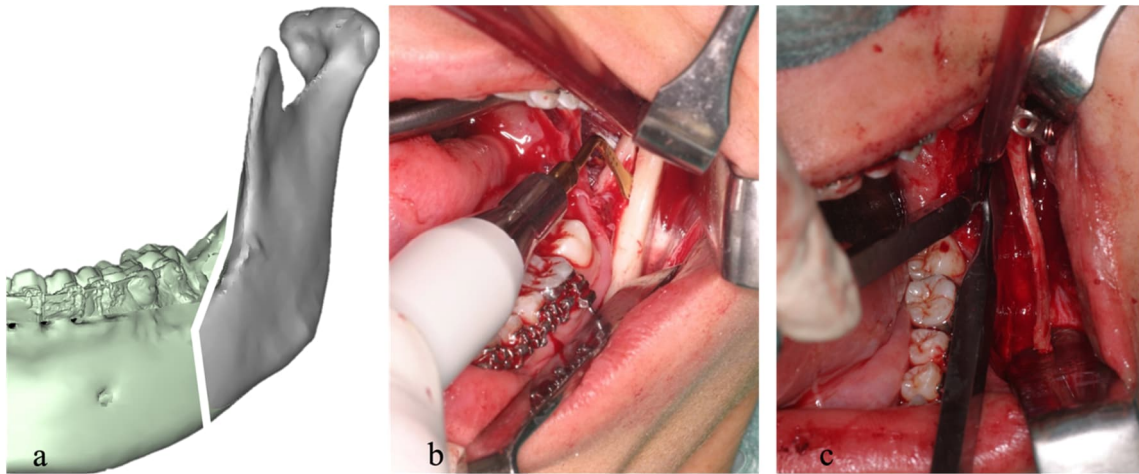


Abbildung 9: Sagittale Spaltung nach Obwegeser-Dal Pont Durch die spezielle stufenförmige Schnittführung (a,b) bleibt der Nervus alveolaris inferior intakt und der zahntragende Anteil des Unterkiefers ist frei beweglich (c) (Dal Pont 1961; Trauner und Obwegeser 1957). (Abbildung mit freundlicher Genehmigung von der Abteilung für Mund-, -Kiefer- und Gesichtschirurgie der UMG)

Im Oberkiefer hat sich die Osteotomie auf Le Fort 1 Ebene mit anschließender Absetzung am Flügelfortsatz (sog. *down fracture*) durchgesetzt. Diese ermöglicht eine Verlagerung und Rotation der Maxilla in alle Richtungen, während eine ausreichende Vaskularisierung über eine palatinale Schleimhautbrücke gewährleistet wird (Bell et al. 1975; Luhr und Kubein-Meesenburg 1989; Obwegeser 1965; Wassmund 1935) (Abbildung 10).

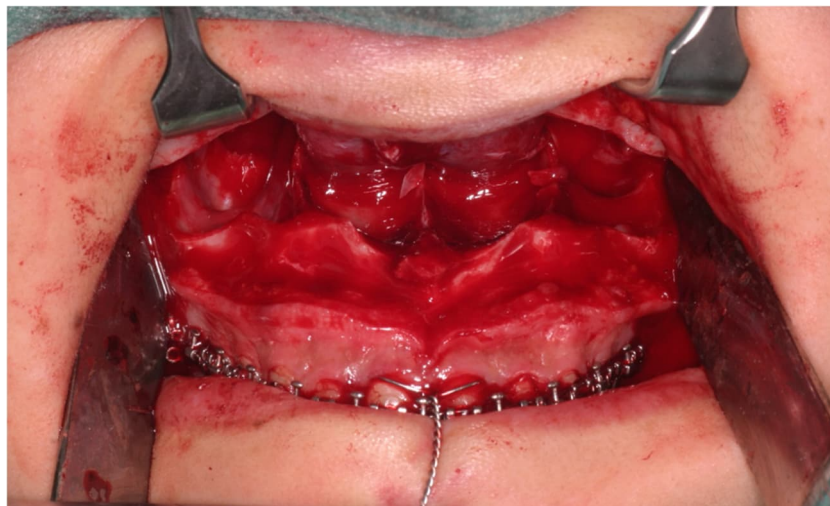


Abbildung 10: Le Fort I Osteotomie mit down fracture Durch diese Art der Osteotomie wird eine Bewegung des Oberkiefers in alle Richtungen ermöglicht, während die Innervation durch die Arteria palatina und Nn. palatini bestehen bleibt. (Abbildung mit freundlicher Genehmigung von der Abteilung für Mund-, -Kiefer- und Gesichtschirurgie der UMG)

Zur exakten Verlagerung der Kiefer im Rahmen des Göttinger Konzeptes bedient sich der Chirurg an einer splintbasierten Operationstechnik. Ein Operationssplint stellt eine Hilfestellung dar, welche als Schablone den Zahnbögen von Ober- und Unterkiefer angepasst ist und in ihrer Dimension die zuvor geplanten Operationsstrecken beinhaltet. Prinzipiell sind intraoperativ mehrere Operationssplinte notwendig, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten Anwendung finden. Während der Zentriksplint die präoperative Situation unter zentrischer Kondylenposition darstellt und während der Fixierung der Gelenke eingegliedert ist, beinhalten der Ober- und der Unterkiefersplint die Informationen zu den jeweiligen räumlichen Verlagerungen der Kiefer (Abbildung 11 und Abbildung 12). Der Finalsplint stellt abschließend ein möglichst dünnes und graziles Übungsgerät dar und soll dem Patienten eine Hilfestellung zum Erreichen der neuen Verzahnung geben, was wiederum die muskuläre Adaptation beschleunigt (Abbildung 12b). Zusätzlich dient er der Stabilisierung während der Knochenheilung und kann bei der anschließenden kieferorthopädischen Behandlung für Zahnbewegungen genutzt werden.

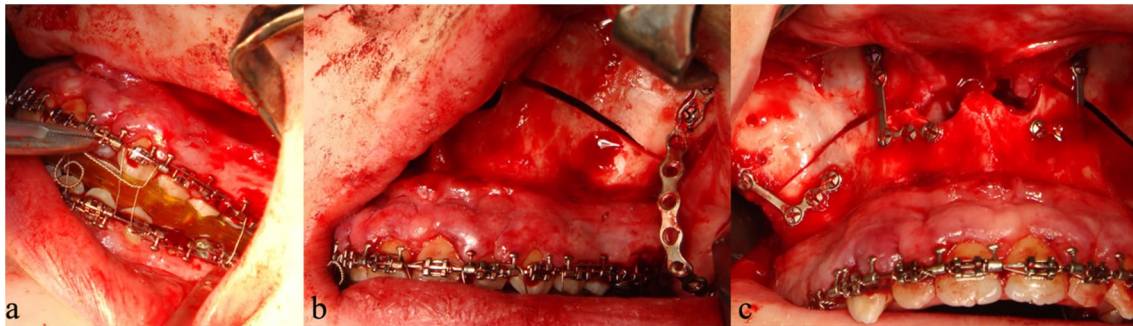


Abbildung 11: Anwendung des Oberkiefersplints Der Splint zur Verlagerung des Oberkiefers (gelb) wird intermaxillär fixiert (a) und der Oberkiefer unter Erhalt der fixierten zentrischen Kondylenposition (b) in der Zielposition verschraubt (c). (Abbildung mit freundlicher Genehmigung von der Abteilung für Mund-, -Kiefer- und Gesichtschirurgie der UMG)

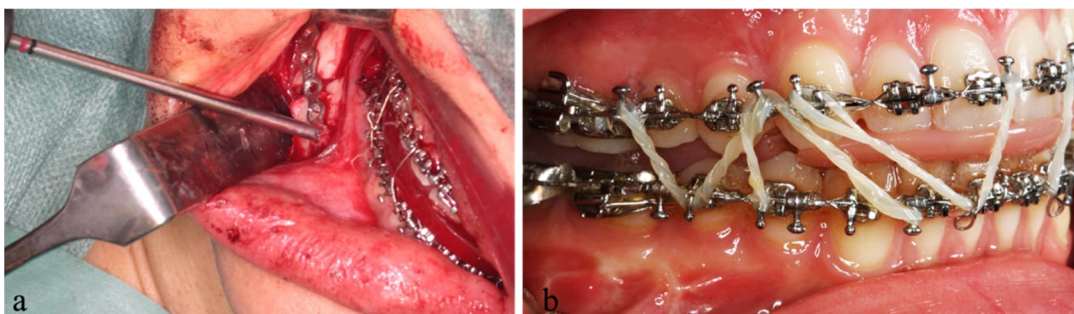


Abbildung 12: Anwendung des Unterkiefer- und Finalsplints Zur Verlagerung und Osteosynthese des zahntragenden Anteils des Unterkiefers dient der dritte Operationssplint (rot) (a). Abschließend wird der Finalsplint eingegliedert und die Kiefer über Gummizüge verschraubt (b). (Abbildung mit freundlicher Genehmigung von der Abteilung für Mund-, -Kiefer- und Gesichtschirurgie der UMG)

Bei bimaxillärer Kieferumstellung entsteht dadurch folgender operativer Ablauf:

1. Eingliederung des Zentriksplints während der starren Fixierung der Kiefergelenke am Jochbogen
2. Anwendung des Oberkiefersplints zur Verlagerung und Fixierung des mobilisierten Oberkiefers
3. Analoge Anwendung des Unterkiefersplints
4. Eingliederung des Finalsplints zur Verschnürung in Zielokklusion

Zur Stabilisierung der ausgerichteten Kiefer dient die Osteosynthese mittels Titanplatten, welche eine starre Verbindung darstellt und damit Stabilität während der Knochenheilung gewährleistet. Eine physiologische Stabilität des Kieferknochens ist dadurch nach ungefähr drei bis vier Monaten zu erwarten. Die Notwendigkeit zur Entfernung des Osteosynthesematerials im Anschluss an die vollständige Ausheilung stellt ein viel diskutiertes Thema dar, ist aber wegen möglicher Komplikationen, die noch nach über fünf Jahren gehäuft auftreten können, für jeden Patienten in Betracht zu ziehen (Sukegawa et al. 2018).

1.2.3 Kieferorthopädische Nachbehandlung

Im Anschluss an die Operation erfolgt eine abschließende kieferorthopädische Behandlungsphase mit dem Ziel, eine optimale Verzahnung einzustellen (Abbildung 13).



Abbildung 13: Kieferorthopädische Nachbehandlung Nach erfolgter Kieferumstellung wird die festsitzende kieferorthopädische Apparatur zur Harmonisierung der Zahnbögen und Optimierung der Verzahnung genutzt. (Eigene Abbildung)

Häufig sind bei präziser Operationsdurchführung nach erfolgreicher Dekompensation nur noch kleine Feineinstellung im Sinne eines *Settlings* notwendig. Die gesteigerte Aktivität des Knochenstoffwechsels im Anschluss an die Kieferumstellung (sog. *regional acceleratory phenomenon*) sorgt in den ersten drei Monaten nach der Operation für eine beschleunigte Zahnbewegung (Zingler et al. 2017). Damit dieser Effekt genutzt werden kann, wird die Weiterbehandlung zum frühestmöglichen Zeitpunkt nach der Operation begonnen. Um die Zufriedenheit und die psychologische Auswirkung der Gesamtbehandlung nicht zu beeinträchtigen, sollte die zweite kieferorthopädische Phase nicht mehr als neun Monate anhalten (Kiyak et al. 1982). Dieser Aspekt verdeutlicht die Relevanz eines exakten Operationsergebnisses. Im Anschluss an die Entfernung der festen Apparatur (Abbildung 14) erfolgt eine Phase der Retention, welcher aufgrund der Gefahr von Rezidiven eine große Bedeutung zukommt.



Abbildung 14: Endergebnis nach der kieferorthopädischen Nachbehandlung Das Endergebnis in der Retentionsphase. Der zirkuläre Kreuzbiss wurde überstellt und es zeigte sich eine stabile Verzahnung bei stimmiger Mitteneinstellung. Von extraoral wurde das Gesichtprofil begradigt und die Kinnabweichung behoben. (Eigene Abbildung)

Insgesamt müssen sich Patienten, die sich für eine kieferorthopädisch-kieferchirurgische Therapie nach dem *orthodontic-first* Konzept entscheiden, auf eine Behandlungsdauer von 21,8 bis 27,8 Monaten einstellen (Dowling et al. 1999; Slavnic und Marcusson 2010). Die Erwartungen und Strapazen, die im Zusammenhang mit der Therapie stehen, demonstrieren, wie wichtig ein zufriedenstellendes Ergebnis der Gesamtbehandlung ist.

Der chirurgische Eingriff als basale Komponente der Therapie ist für den Behandlungserfolg von entscheidender Bedeutung. Ungenauigkeiten zwischen der vorausgegangen Operationsplanung und dem Operationsergebnis sollten daher möglichst gering sein und in einem klinisch akzeptablen Bereich liegen. Zur Definition der klinischen Akzeptanz kann auf eine Untersuchung von Beyer und Lindauer (1998) verwiesen werden. Sie stellten im Rahmen einer Befragung fest, dass die dentale Oberkiefermitte 2,2 mm von der Gesichtsmitte abweichen kann und dennoch als ästhetisch akzeptabel gilt. Ähnliche Ergebnisse erzielte die Arbeitsgruppe von Zhang et al. (2010) mit 2,4 mm Abweichung zur Gesichtsmitte. Hinsichtlich kippender Abweichungen des Oberkiefers sind 90 % der Beobachter in der Lage, ein einseitiges Hängen der Okklusionsebene von 4 ° zur Horizontalebene zu erkennen (Padwa et al. 1997). Zur Beurteilung des Operationserfolges können entsprechende Werte von 2 mm für lineare Abweichungen und 4 ° für kippende Abweichungen herangezogen werden und stellen damit die Grundlage für eine zentrale Fragestellung dieser Studie dar (Kapitel 1.4).

1.3 Operationsplanung und Fehlerquellen

Die Operationsplanung und damit die Splinterstellung findet im Rahmen einer Modelloperation an virtuellen oder haptischen Zahnkranzmodellen statt und entscheidet über die finale Platzierung der Kiefer. Trotz präziser Durchführung kann die gewählte Planungstechnik eine Fehlerquelle darstellen und damit Abweichungen zur gewünschten Kieferposition erzeugen. Da es unterschiedliche Möglichkeiten der Operationsplanung gibt und diese sich durch technischen Fortschritt fortlaufend im Wandel befinden, ist eine ständige Überprüfung auf Genauigkeit obligat. Die vorliegende Studie beschäftigt sich daher mit der Gegenüberstellung zweier geläufiger Operationsplanungen, die auf Grundlage des Göttinger Konzepts zwischen 2016 und 2019 in der UMG angewendet wurden.

Im Folgenden wird ein Überblick über die Durchführung, Limitationen und Vorteile verschiedener Operationsplanungen gegeben. Die Operationsplanung in der orthognathen Chirurgie hat das Ziel, die gewünschte postoperative Situation zu eruieren und dem Operateur intraoperativ eine Hilfestellung zur exakten Positionierung der Kiefer zu bieten. Die Herausforderung besteht dabei in der Erstellung eines Systems, das in der Lage ist, die geplante Bewegung der Kiefer in den sechs Freiheitsgraden im freien Raum zu simulieren. Die Modelloperation muss die Kiefer translatorisch entlang der drei lotrechten Achsen vor/zurück, links/rechts, oben/unten und durch Rotationen um die Längsachse (engl. *roll*), die Querachse (engl. *pitch*) und die Hochachse (engl. *yaw*) frei bewegen können. Die erreichte Zielposition wird anschließend fixiert und die Splinte zur Übertragung der Bewegung auf die Patientensituation werden erstellt (2.2.1).

Die Idee einen solchen Operationssplint zu erstellen, der die geplanten Bewegungen der Kiefer beinhaltet, ist bereits im Jahr 1897 von dem Kieferorthopäden Rodrigues Ottolengui (1861-1937) beschrieben worden (Naini et al. 2017). Heute stehen dem kieferorthopädisch-kieferchirurgischen Behandler-Team zur Erstellung der Operationssplinte eine Vielzahl verschiedener Planungsmethoden zur Verfügung. Grundlegend lassen sich die Methoden in konventionelle (KP) und digitale Operationsplanungen (DP) aufteilen, was auf die Einführung von dreidimensionaler Bildgebung und der Entwicklung von Programmen zur computerunterstützten Planung zurückgeht. In der UMG findet zum jetzigen Zeitpunkt (Stand 2022) ausschließlich die DP Anwendung, nachdem zwischen 2016 und 2019 ein gradueller Übergang von der KP zur DP stattgefunden hat.

1.3.1 Planungsgrundlagen

Grundlage für eine erfolgreiche Operationsplanung stellt eine umfangreiche interdisziplinäre Diagnostik dar. Der alleinige Wert der zweidimensionalen Kephalemtrie im Fernröntgenseitenbild (FRS) zur Planung einer Kieferverlagerung wird von verschiedenen Autoren als nicht ausreichend beschrieben, weshalb eine klinische Untersuchung sowie Betrachtung intra- und extraoraler Fotos zusätzlich erforderlich ist (Jacobson A 1990; Jager et al. 1994; Wallen und Bloomquist 1986). Im Rahmen der klinischen Untersuchung der Dental-, Skeletal- und Weichteilsituation werden Asymmetrien im Bereich des Lächelns, der Gesichtsproportionen oder des Profils notiert. Die Kompetenz des Lippenschlusses wird zudem in Hinblick auf die Notwendigkeit einer funktionellen Genioplastik bewertet. Anamnestisch werden planungsrelevante Hinweise wie Schnarchen oder eine eingeschränkte Nasenatmung erfragt. Unregelmäßigkeiten können durch die Gesamtheit der Diagnostik erkannt und bei der anschließenden Planung berücksichtigt werden (Abbildung 15).

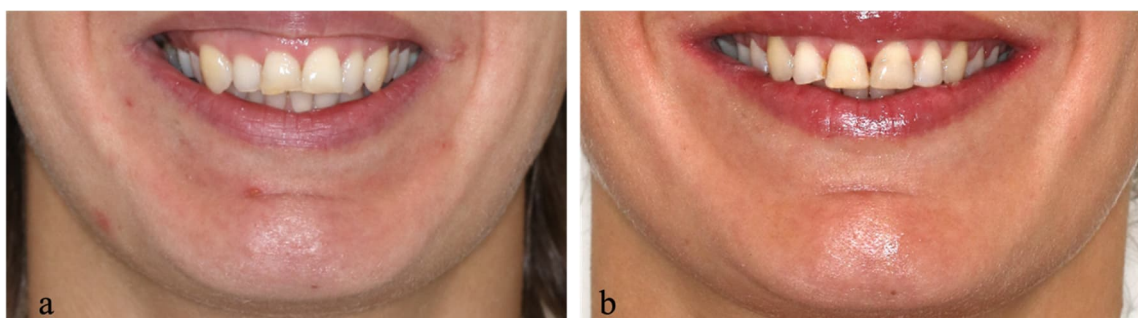


Abbildung 15: Fotoanalyse vor und nach Therapie Während bei der Patientin im Vorfeld an eine kieferorthopädisch-kieferchirurgische Therapie zu viel Zahnfleisch bei rechtsseitig hängender Okklusionsebene mit der Folge einer trockenen Gingiva und daraus resultierenden permanenten Gingivitis sichtbar war (a), zeigte das Behandlungsergebnis eine deutliche Verbesserung der Ästhetik und Reduktion der Gingivitis (b). (Eigene Abbildung)

Anhand der Diagnostik trifft der Behandler zunächst eine Wahl hinsichtlich der zu operierenden Kiefer, wobei es zwischen monomaxillären Umstellungsosteotomien im Ober- oder Unterkiefer und einer bimaxillären Umstellungsosteotomie beider Kiefer zu unterscheiden gilt. Während monomaxilläre Verlagerungen im Bereich der zuvor definierten Zielokklusion begrenzt sind, ermöglicht ein bimaxillärer Eingriff eine vollständige translatorische und rotatorische Bewegung des in Zielokklusion befindlichen Kieferkomplexes.

Um während der Planung die optimale Position der zu operierenden Kiefer festzulegen, stehen dem Behandler eine Vielzahl verschiedener Richtlinien zur Verfügung (Hernandez-Alfaro und Guijarro-Martinez 2013; Xia et al. 2015). Eine Arbeitsgruppe von Resnick et al. (2018) fand heraus, dass die sagittale Position des Oberkiefers von ästhetisch akzeptablen Operationsergebnissen, welche nach unterschiedlichen Planungskonzepten operiert wurden, für Frauen am Ehesten mit dem zweiten Element der *Six Elements of Orofacial HarmonyTM* nach Andrews (2015) übereinstimmte. Das Element besagt, dass sich die optimale sagittale Position der Maxilla an einer zur Stirn konstruierten Linie (GALL – *Goal Anterior Limit Line*) definieren lässt. Die Maxilla operierter Männer entsprach in ihrer sagittalen Position weitestgehend der McNamara Analyse, wobei der Normwert zwischen dem A-Punkt der Maxilla und einer vertikalen Linie auf Höhe des skelettalen Nasions 1 mm beträgt (McNamara 1984). Ein Faktor zur Festlegung des Operationszieles stellen zudem die maximalen Verlagerungsstrecken dar, welche von Schweska-Polly et al. (2004) mit 7 mm für sagittale und 5 mm für vertikale Verlagerungen angegeben werden. Zur Rezidivprophylaxe und dem Erreichen einer langfristigen Stabilität stellt die „Hierarchie der Stabilität“ von Proffit et al. (1996) eine weitere relevante Planungsgrundlage dar.

1.3.2 Überblick zur konventionellen Operationsplanung

Die konventionelle Operationsplanung, die in vielen Zentren für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde noch den Goldstandard darstellt, basiert auf zweidimensionalen Röntgenbildern und Fotos sowie Gipsmodellen in Artikulatoren, d. h. zahntechnischen Geräten zur Simulation der statischen und dynamischen Kieferstellungen zueinander und zum Schädel (Ritto et al. 2018) (Abbildung 16, Seite 17).

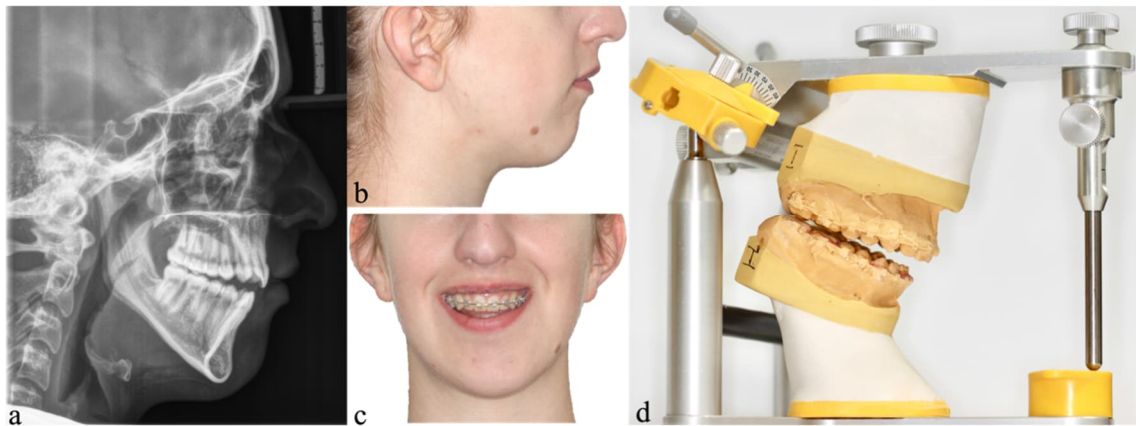


Abbildung 16: Konventionelle Planungsunterlagen (KP) Grundlage der KP stellt neben zweidimensionalen Röntgen- und Fotoaufnahmen (a,b,c) ein Artikulator dar (d), welcher die Relation der Kiefer zueinander und zur Schädelbasis simuliert. (Eigene Abbildung)

Für das Lösen und anschließende Platzieren sowie Fixieren der Modelle im Artikulator werden für die konventionelle Splinterstellung verschiedene Techniken genutzt. Diese Art der Planung beinhaltet eine Vielzahl von Arbeitsschritten und wird in der Literatur bezüglich Präzision und Effizienz kontrovers evaluiert. So zeigt sich in älteren und neueren Studien bei einer modellbasierten Planung eine schwierige Vorhersagbarkeit für Oberkieferverlagerungen besonders in der vertikalen, aber auch in der horizontalen und transversalen Dimension (Ferguson und Luyk 1992; Hanafy et al. 2020; Kretschmer et al. 2009; Polido et al. 1991). Abweichungen von bis zu 15 mm zwischen der bei der Modelloperation eingestellten und der tatsächlich operativ erreichten Position wurden berichtet (McCance et al. 1992).

Als Gründe für die Abweichung werden in der Literatur neben chirurgischen Ungenauigkeiten die Arbeitsschritte der konventionellen Planung genannt. Die beschränkte Möglichkeit die Bewegung des Kiefergelenks als Kombination aus Translation und Rotation durch einen teiljustierbaren Artikulator zu simulieren, äußert sich in einer Diskrepanz zur wahren Scharnierachse (Lotzmann 1990). Da der konventionellen Planung eine Sperrung lediglich durch Unterkieferrotation vorhergeht, kann die fehlende Translation einen Fehler in der anschließenden Planung der Ober- und Unterkieferverlagerung verursachen (Sharifi et al. 2008). Zusätzliche Ungenauigkeiten entstehen durch die fehlende direkte Verbindung zwischen der Operationssimulation am Gipsmodell und der kephalometrischen Analyse (Olszewski und Reyhler 2004). Fehlerquellen ergeben sich zudem während der Gesichtsbogenübertragung (Abbildung 17, Seite 18), als Vorbereitung zur eigentlich Modelloperation, durch Abweichungen, die sich auf die Planung auswirken (Ellis et al. 1992; Gateno et al. 2001; O'Malley und Milosevic 2000; Quast et al. 2019). Mit Hilfe der Gesichtsbogenübertragung soll der Oberkiefer in der korrekten schädelbezogenen räumlichen Lage im Artikulator positioniert werden und damit eine realistische Planung ermöglichen. Versuche haben jedoch gezeigt, dass der Oberkiefer dadurch tendenziell zu steil ausgerichtet wird (Quast

et al. 2019) (Abbildung 17b). Es werden Ungenauigkeiten bis zu 20° beschrieben (Walker et al. 2008), die während einer geplanten Vorwärtsbewegung des Oberkiefers von 10 mm zu einer zusätzlichen Abwärtsbewegung von 3,3 mm führen würden (Barbenel et al. 2010).

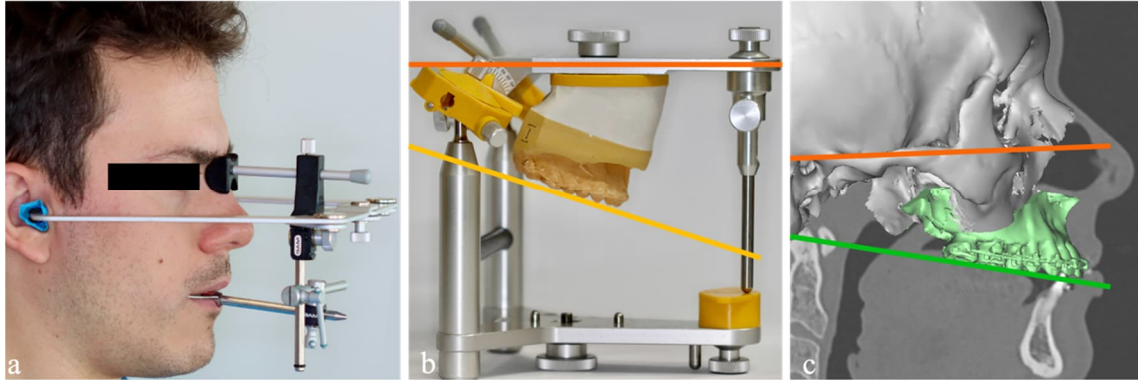


Abbildung 17: Fehler der Gesichtsbogenübertragung Die Gesichtsbogenentnahme (a) dient der Übertragung des Oberkiefermodells in den Artikulator (b) unter Berücksichtigung der korrekten Inklination zur Frankfurter Horizontale. Oft besteht jedoch eine Abweichung zur tatsächlichen Inklination, welche am digitalen Schädelmodell gemessen werden kann (c). (Eigene Abbildung)

Wegen der bekannten vertikalen Ungenauigkeiten dient intraoperativ eine Messung an internen oder externen Referenzpunkten der Kontrolle über die vertikale Bewegung der Maxilla, schützt aber nicht immer vor Abweichungen zur geplanten Position und erfordert eine große Sorgfalt des Operateurs. Die Titanplatten zur Kondylusfixierung sind wegen der plastischen Verformbarkeit zur alleinigen vertikalen Kontrolle nicht ausreichend. Es konnte durch akkurate intraoperative Referenzmessungen an externen Referenzpunkten, wie beispielsweise einer Titanschraube im Bereich des Weichteilnasions eine signifikante Verbesserung der vertikalen Operationspräzision erreicht werden (Ferguson und Luyk 1992; Polido et al. 1991). Dadurch wird deutlich, dass unabhängig von der Planungsmethode, die Operationstechnik- und Sorgfalt einen signifikanten Einfluss auf die Genauigkeit des postoperativen Ergebnisses hat. Die Autoren von älteren Studien waren sich allerdings einig, dass eine überarbeitete Planung notwendig ist, um das Operationsergebnis besser hervorsagen zu können (Ferguson und Luyk 1992).

Mit der Einführung des Göttinger Konzeptes und der Verwendung des in Göttingen entwickelten Modell-Repositionierungs-Instruments (MRI, SAM Präzisionstechnik GmbH, Gauting, Deutschland), war es erstmals während einer Modelloperation möglich, die Zahnbögen von Ober- und Unterkiefer räumlich und unter Erhalt der zentrischen Kondylenposition einzustellen (Schwestka et al. 1991; Schwestka-Polly R. et al. 1993). Das MRI richtet die mittels Gesichtsbogenübertragung und Zentrikregistrat einartikulierten Kiefermodelle in mehreren Schritten zueinander aus und ermöglicht so die Herstellung der Operationssplinte (Kapitel 2.3.1). Zur vertikalen Kontrolle bei Oberkieferverlagerungen im Rahmen des Göttinger Konzeptes ist die Verwendung eines

intraoperativen Gesichtsbogens vorgesehen, welche als eine Form der externen Referenzkontrolle angesehen werden kann. Zweidimensionale Gegenüberstellungen von Planung und Ergebnis zeigten maximale Abweichungen von 1,5 mm in der vertikalen und 1,7 mm in der sagittalen Dimension und damit eine gesteigerte Präzision des Göttinger Konzeptes gegenüber anderen Planungsmethoden (Schwestka-Polly R. et al. 1999). Die KP nach dem Göttinger Konzept fand an der UMG zuletzt jedoch ohne intraoperativen Gesichtsbogen, sondern mit internen Referenzpunkten Anwendung, bevor sie 2020 vollständig von der digitalen Operationsplanung (DP) ersetzt wurde.

1.3.3 Überblick zur digitalen Operationsplanung (DP)

Bei der DP wird aus den Datensätzen einer digitaltomographischen (DVT) oder computertomographischen (CT) Aufnahme ein virtuelles dreidimensionales Schädelmodell erstellt und anschließend unter Anwendung spezieller Computerprogramme die Kieferumstellung simuliert (Abbildung 18a und b). Durch dreidimensionale Fotoaufnahmen ist es zudem möglich, eine Simulation der postoperativen Weichgewebe durchzuführen und die Planung auf dessen Grundlage zu optimieren (Abbildung 18 c).

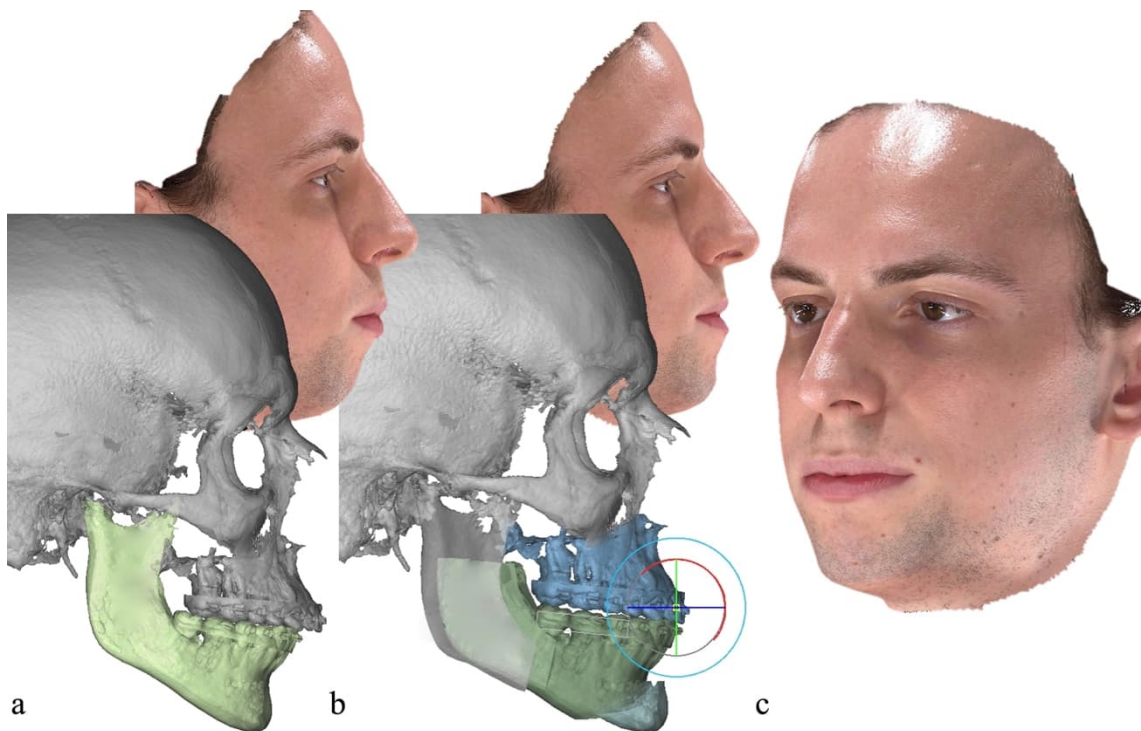


Abbildung 18: Virtuelle Simulation einer bimaxillären Umstellungsosteotomie Aus den Datensätzen einer DVT-Aufnahme kann ein virtuelles Schädelmodell erstellt (a) und anschließend zur digitalen Planung und Operationssimulation genutzt werden (b). Ein 3D Foto kann zudem das Weichgewebe simulieren (c). (Eigene Abbildung, die Verwendung der Bilder erfolgt mit schriftlichem Einverständnis des Patienten)

Durch die DP entfallen viele der bei der konventionellen Planung erforderlichen Laborschritte. Es besteht keine Notwendigkeit, die korrekte Beziehung zwischen dem

Schädel des Patienten und der Okklusionsebene durch einen Gesichtsbogen-Transfer zu replizieren. Zudem entfallen analoge Messungen an Gipsmodellen, die zu Fehlern führen können. Ein zusätzlicher Vorteil, der durch die digitale Visualisierung entsteht, ist, dass anatomische Besonderheiten erkannt und bei der Planung berücksichtigt werden können. Besonders dreidimensionale Bewegungen zur Herstellung symmetrischer skelettaler Verhältnisse sowie Mittellinienkorrekturen können so besser geplant werden (Abbildung 19). Nach einer ersten virtuellen Simulation der geplanten Operationsstrecken findet zu 93 % eine Anpassung der Planung zur Verbesserung der Symmetrie statt (Ho et al. 2017). Da diese Anpassung bei der konventionellen Planung nicht stattgefunden hätte, ist davon auszugehen, dass sich die Planung entsprechend verbessert. Zudem konnten Resnick et al. (2016) herausfinden, dass sich die digitale Planung inklusive Splinterstellung signifikant schneller und kostengünstiger gestaltet als die konventionelle Planung.

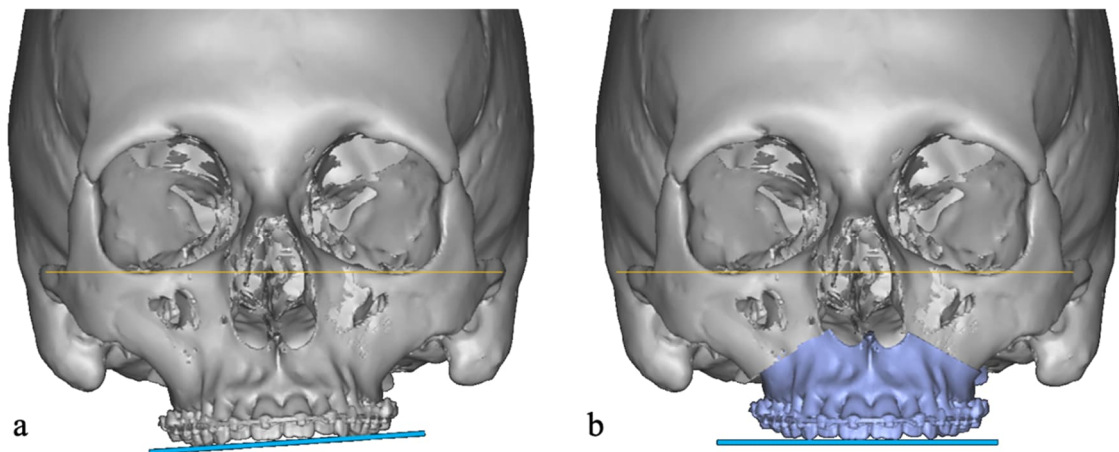


Abbildung 19: Korrektur von Asymmetrien während der digitalen Planung Während der virtuellen Planung können Kieferasymmetrien erkannt und therapiert werden. In diesem Fall wurde das Hängen der Kauebene auf der rechten Seite durch eine Rotation innerhalb der Frontalebene (Roll) korrigiert. (Eigene Abbildung)

Die Grundlage für die Durchführung der DP in der UMG stellt die Schritt-für-Schritt Anleitung von Swennen (2017) dar (Abbildung 20, Seite 21). Dabei dienen horizontale und vertikale Linien der Orientierung und als Hilfestellung zur Korrektur von Asymmetrien. An zuvor definierten Messpunkten können die späteren Verlagerungsstrecken abgelesen und überprüft werden.

1. Schritt	• Ausrichtung der Okklusionsebene bei frontaler Ansicht (Roll)
2. Schritt	• Ausrichtung der Oberkiefermitte zur Gesichtsmitte
3. Schritt	• Überprüfung auf generelle Asymmetrien
4. Schritt	• Ausrichtung des Komplexes bei kaudaler Ansicht (Yaw)
5. Schritt	• Ausrichtung der vertikalen Position der Oberkieferinzisiven
6. Schritt	• Ausrichtung der sagittalen Position der Oberkieferinzisiven
7. Schritt	• Beurteilung des Profils und Ausrichtung des Komplexes bei lateraler Ansicht (Pitch)
8. Schritt	• 3D Kinnausrichtung
9. Schritt	• Präsentation des individualisierten Behandlungsplanes und Kommunikation mit dem Patienten
10. Schritt	• Finale Anpassungen

Abbildung 20: Schematischer Ablauf der virtuellen Operationsplanung Der Ablauf der virtuellen Operationsplanung erfolgte nach dem von Swennen (2017) erstellten Schema „10 step-by-step“. (Eigene Abbildung)

Die Herstellung der Operationssplinte basiert auf computerunterstütztem Konstruieren (*computer aided design - CAD*) und Fertigen (*computer aided manufacturing - CAM*) mittels biokompatiblen 3D-Drucker und hat sich bezüglich Passgenauigkeit und Zufriedenheit seitens der Chirurgen bewährt (Baker et al. 2012). Die zur Planung verwendeten DVT-Aufnahmen können durchgeführt werden, während der Patient ein Registrat trägt, welches die zuvor ermittelte zentrische Kondylenposition definiert. Dadurch kann gewährleistet werden, dass sich das Kiefergelenk während der Planung in der gewünschten Position befindet und damit während der oben beschriebenen Operationsmethode fixiert werden kann.

Durch die verschiedenen Möglichkeiten der digitalen Planung und anschließenden operativen Durchführung ist eine generelle Aussage hinsichtlich der Genauigkeit von virtuellen Planungsmethoden nicht aussagekräftig und nur bedingt zum Vergleich mit der konventionellen splintbasierten Planung zu verwenden. Hinzu kommt eine große Variation hinsichtlich der Messungen zur Beurteilung der Abweichungen zwischen Planung und Ergebnis (Stokbro et al. 2014). Bei Betrachtung der bisher veröffentlichten Studien zur Präzision der digitalen Planung ist jedoch von einer hohen Genauigkeit auszugehen (Hanafy et al. 2020; Li B et al. 2013; Sun et al. 2013; Zhang N et al. 2016).

Bei bisherigen direkten dreidimensionalen Gegenüberstellungen von konventionellen und digitalen Planungsmethoden bei gleicher Operationstechnik und ohne digitale Splintmodifikation wurden für beide Planungsmethoden ähnliche Ergebnisse erzielt

(Kwon et al. 2014; Ritto et al. 2018) (Abbildung 21, Seite 23). Die Gegenüberstellung von Ritto et al. (2018) verzichtete dabei auf die Erstellung von dreidimensionalen Winkeln und zeigte bezüglich linearer Messungen keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Planungsmethoden. Ähnliche Ergebnisse zeigte Kwon et al. (2014) bei seinem Vergleich, wobei jedoch statt eines dreidimensionalen Datensatzes zwei zweidimensionale Bildgebungen zur Bewertung der erreichten Position der Maxilla verwendet wurden. Beide Studien limitierten sich zudem durch die Tatsache, dass keine dreidimensionale Kontrolle der Strecke vorgenommen wurde, welche tatsächlich in den konventionellen Splinten enthalten war. Es wurde davon ausgegangen, dass die eingestellte Strecke exakt den Vorgaben des Behandlers entsprach.

Um der Problematik der intraoperativen Ungenauigkeiten entgegenzuwirken, modifizieren neueste digitale Planungsmethoden die Erstellung der Operationssplinte und nutzen die Möglichkeit, dreidimensionale Operationsschablonen digital zu erstellen, welche im Bereich der Kieferknochen die Verlagerung vorgeben. Zusätzlich kann dem Chirurgen eine Hilfestellung zur Durchführung der Osteotomie an der gewünschten Position erstellt werden (sog. *cutting-guides*). Individualisierte Titanplatten zur anschließenden Osteosynthese beinhalten die exakte Verlagerung und geben so die postoperative Kieferstellung vor. Durch diese innovative Planungs- und Operationstechnik wurden besonders in vertikaler und anteroposteriorer Richtung signifikant präzisere Operationsergebnisse erzielt als mit den klassischen Operationssplinten (Hanafy et al. 2020; Zinser et al. 2013) (Abbildung 21, Seite 23). Zudem ist es durch die einfachere Operationstechnik auch unerfahrenen Chirurgen möglich, ein genaues Operationsergebnis in kürzerer Zeit zu erreichen. Lediglich die erhöhten Kosten dieser Methode stellen einen limitierenden Faktor dar. Da durch die individualisierten Operationssplinte von Hanafy et al. (2020) und Zinser et al. (2013) unterschiedliche Operationstechniken entstehen und diese einen Einfluss auf die Ergebnisse haben, lassen die Studien keine Aussage über die alleinige Auswirkung der Planung auf die Genauigkeit zu.

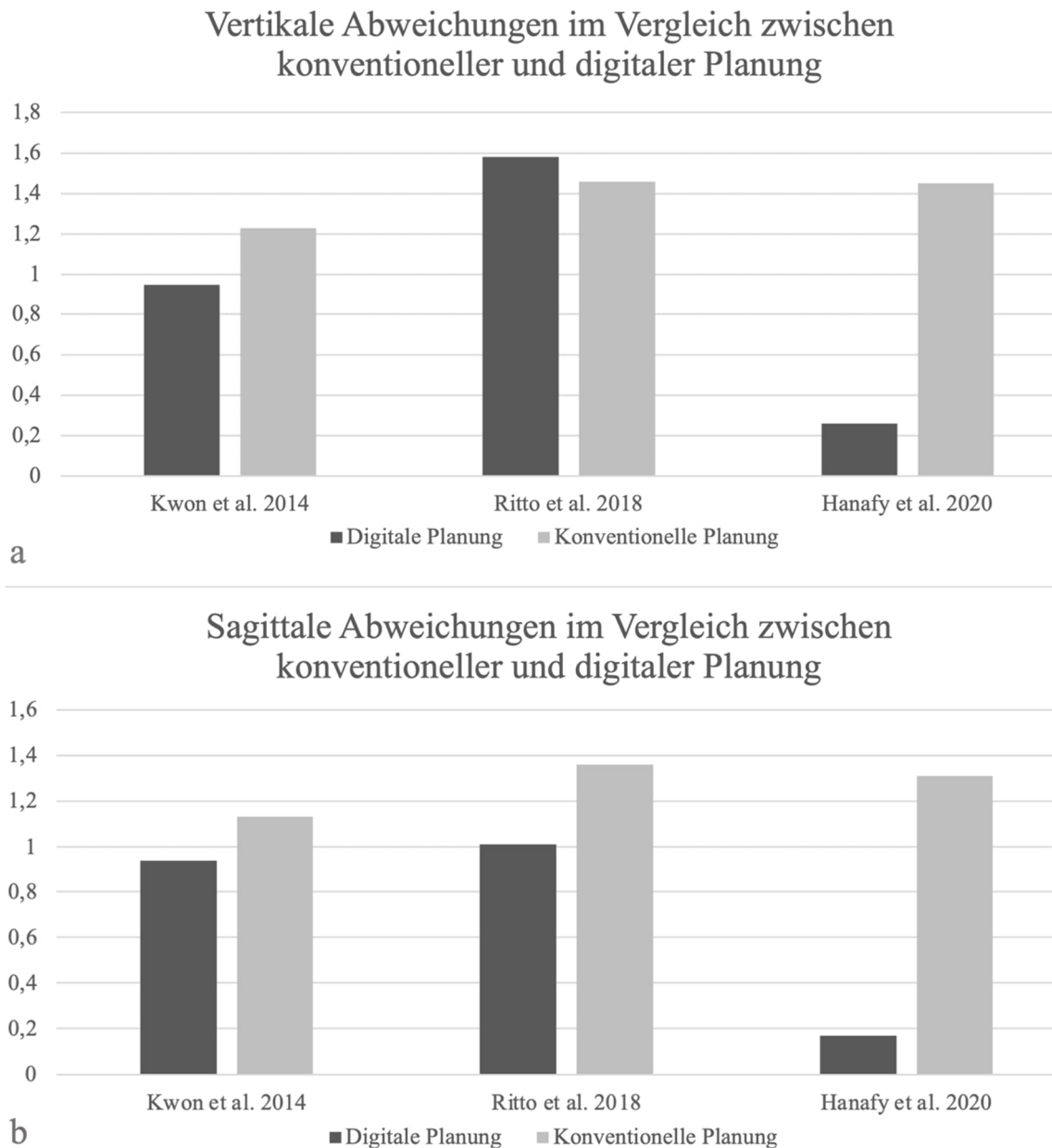


Abbildung 21: Vertikale und sagittale Abweichungen bei DP und KP Durchschnittliche vertikale (a) und sagittale (b) absolute Abweichungen bisheriger Studien bei digitaler und konventioneller Planungsmethode im Vergleich zum Operationsergebnis in Millimetern (Hanafy et al. 2020; Kwon et al. 2014; Ritto et al. 2018). Signifikante Verbesserungen konnten durch CAD/CAM erstellte individualisierte Operationshilfen von Hanafy et al. (2020) erreicht werden. (Eigene Abbildung)

1.4 Fragestellungen

Ein vollständiger dreidimensionaler und zudem digitalisierter Vergleich zwischen KP und DP, der auf identischer Operationstechnik basiert, hat bisher nicht stattgefunden und soll im Rahmen dieser Studie untersucht werden. Grundlage für diese Forschungsarbeit stellt die im Jahr 2016 begonnene Implementierung des digitalen Planungsverfahrens inklusive Weichteilsimulation und computerbasierter Splinterstellung in der UMG dar. Zu Beginn der schrittweisen Umstellung wurde die KP durch dreidimensionale volumetomographische und stereofotogrammetrische Aufnahmen ergänzt, bis eine vollständige Substituierung durch die DP bis hin zum In-House-Splintdruck folgte. Die wissenschaftliche Begleitung dieser interdisziplinären Digitalisierung erlaubte einen dreidimensionalen Vergleich beider Methoden und konnte so die Effizienz und den Erfolg der kieferorthopädisch-kieferchirurgischen Therapie überprüfen und eventuelles Optimierungspotenzial erkennen. Dabei ließen sich folgende Fragestellungen formulieren:

- Hat die Wahl der Planungsmethode einen signifikanten Einfluss auf die dreidimensionale Operationspräzision?
- Äußert sich die Elimination technischer Arbeitsschritte, wie beispielsweise der Verwendung des Gesichtsbogens, in besseren vertikalen Ergebnissen?
- Stellt die DP in Hinblick auf die klinischen Erfolgsquoten eine geeignete Alternative zur KP dar?
- Bestehen für beide Planungsmethoden dreidimensionale Zusammenhänge bei vertikalen, transversalen und sagittalen Abweichungen?

2 Patienten und Methoden

2.1 Studiendesign und Patientenkollektiv

Gegenstand der hier vorgestellten zweiarmigen, retrospektiven Beobachtungsstudie ist die Gegenüberstellung der an der Universitätsmedizin Göttingen durchgeführten digitalen sowie konventionellen Planungsmethode bei Dysgnathie-Operationen. Anhand von dreidimensionalen DVT-Datensätzen wurden die Abweichungen zwischen der geplanten und der postoperativ erreichten Position der Maxilla untersucht und zwischen den Planungsmethoden verglichen.

Zunächst fand eine Fallzahlberechnung unter Berücksichtigung vertikaler Abweichungen statt (G*Power, Düsseldorf), da hier laut vorausgegangenen Studien die größte Abweichung zu erwarten ist (McCance et al. 1992). Die Parameter wurden so gewählt, dass mit der Probandenanzahl eine mögliche Differenz von 1 mm zwischen beiden Planungsmethoden in der vertikalen Oberkieferverlagerung mit einer Wahrscheinlichkeit von 85 % erwiesen werden würde. Das Signifikanzlevel wurde auf 0,05 festgelegt. Als Grundlage diente dabei die Studie von Ritto et al. (2018), in der eine mittlere Abweichung von 1,3 mm (SD 1,15) für vertikale Messungen zwischen KP und dem Operationsergebnis beschrieben wurde. Die Berechnung ergab eine Stichprobengröße von 52 (Tabelle 2). Entsprechend wurden je Planungsmethode 26 zwischen 2016 und 2019 geplante und durchgeführte Operationen berücksichtigt.

Tabelle 2: Ergebnisse der Fallzahlberechnung

Signifikanzniveau α	0,05
Effektgröße d	0,87*
Stichprobengröße N	52
Power $1-\beta$	0,85

*Die Effektgröße d wurde rechnerisch auf Grundlage von vorherigen Studien ermittelt.

Die Auswahl erfolgte in chronologischer Reihenfolge und für die in die Studie aufgenommenen Probanden galten folgende Einschlusskriterien: Erwachsene Patienten, Indikation zur kieferorthopädisch-kieferchirurgischen Therapie, bimaxilläre oder reine maxilläre Verlagerung auf Le Fort I Ebene, prä- und post OP DVT vorliegend, Planungsunterlagen vollständig, schriftliches Einverständnis zur Teilnahme.

Patienten mit folgenden Ausschlusskriterien wurden nicht in die Studie aufgenommen: Syndrome oder Lippen-Kiefer-Gaumen-Spalten, isolierte Unterkieferverlagerung, bereits erfolgte Umstellungsosteotomie, unvollständige Planungsunterlagen oder fehlendes schriftliches Einverständnis, fehlerhafte DVT-Datensätze.

Die präoperativen DVT-Aufnahmen wurden vier bis acht Wochen vor und die postoperativen innerhalb von einer Woche nach dem Eingriff erstellt. Durch die Durchführung der Studie entstand keine Belastung für die Patienten, die über den gängigen Ablauf einer Dysgnathie Therapie hinausging und alle untersuchten Patienten hatten zuvor ihr schriftliches Einverständnis zur Nutzung der Aufnahmen erteilt. Darüber hinaus hat die Ethikkommission der Universitätsmedizin Göttingen der Verwendung der DVT-Aufnahmen unter dem Aktenzeichen 7/1/16 zugestimmt.

2.2 Planungsmethoden und Operationstechnik

Während sich die Vorbereitungen auf die Operationsplanung und die Durchführung der Operation für beide Planungsmethoden nicht unterschieden, war der Ablauf der eigentlichen Modelloperation für beide Planungsmethoden verschieden. So fand die konventionelle Planung nach Rücksprache mit dem Behandler durch einen Zahn techniker statt, während die virtuelle Planung durch die Behandler selbst durchgeführt und die Splinte anschließend durch 3D-Druck hergestellt wurden. Im folgenden Abschnitt werden die beiden Varianten in ihrer Durchführung beschrieben, um anschließend den erfolgten Vergleich darzustellen.

Im Rahmen der Planungsvorbereitung wurden vier bis acht Wochen vor der Operation alle hierfür benötigten Unterlagen erstellt (Tabelle 3).

Tabelle 3: Benötigte Planungsunterlagen beider Methoden

Konventionelle Planung (KP)	Digitale Planung (DP)
Alginatabformung (Tetrachrom, Kaniedenta, Herford, Deutschland)	Alginatabformung (Tetrachrom, Kaniedenta, Herford, Deutschland)
Zentrikregistrator (Weitur Press Standard, Johannes Weithas GmbH & Co.KG, Lütjenburg, Deutschland)	Zentrikregistrator (Primobyte, Primodent, Bad Homburg, Deutschland)
DVT-Aufnahme (PaX Zenith 3D, OrangeDental, Biberbach an der Riss, Deutschland)	DVT-Aufnahme (PaX Zenith 3D, OrangeDental, Biberbach an der Riss, Deutschland)
Gesichtsbogenentnahme (Transferbogen Axioquick, SAM Präzisionstechnik GmbH, Gauting, Deutschland; Impression Compound rot, KERR GmbH, Biberbach, Deutschland)	

Das Volumen der DVT-Aufnahme lag zwischen 16 x 14 cm und 24 x 19 cm bei einer Röhrenspannung von 120 KV und einer Stromstärke von 6 mA. Die Voxelgröße lag bei 300 µm und die Aufnahmedauer bei 24 Sekunden. Die Aufnahme fand im Sitzen statt

und die Patienten trugen während der präoperativen Aufnahme das zuvor erstellte Zentrikregistrat (Abbildung 22).



Abbildung 22: Volumentomograph Orange Dental PaX Zenith 3D Hier wurden die Probanden gemäß den Herstellerangaben positioniert und die Aufnahme mit den oben genannten Einstellungen durchgeführt. (Eigene Abbildung)

2.2.1 Ablauf der konventionellen Operationsplanung

Die konventionelle Operationsplanung fand nach dem Göttinger Konzept unter Anwendung des Modell-Repositionierungs-Instruments statt (MRI, SAM Präzisionstechnik GmbH, Gauting, Deutschland) (Kapitel 1.3 und Abbildung 23).



Abbildung 23: MRI im Artikulator Nach der Platzierung des MRI anstelle des Stützstiftes im Artikulator, kann mit Hilfe der drei Messspitzen die Verlagerung von Ober- und Unterkiefer räumlich durchgeführt und vermessen werden. (Eigene Abbildung)

Zunächst fand die Übertragung der Gipsmodelle (Pico-crema soft, Picodent Dental-Produktions- und Vertriebs-GmbH, Wipperfürth, Deutschland) in den Artikulator (SAM 3, SAM Präzisionstechnik GmbH, Gauting, Deutschland) mittels Gesichtsbogen, Montageplatte (ebenfalls SAM Präzisionstechnik GmbH), Zentrikregistrat und Artikulationsgips (Pico-Arti Speed, Picodent Dental-Produktions- und Vertriebs-GmbH, Wipperfürth, Deutschland) statt (Abbildung 24a). Im nächsten Schritt konnte bereits der erste Operationssplint, der Zentriksplint, hergestellt werden (Weitur Press Standard, Johannes Weithas GmbH & Co.KG, Lütjenburg, Deutschland) (Abbildung 24b). Sollte eine Sperrung des Unterkiefers zur anschließenden Bewegung des Oberkiefers erforderlich gewesen sein, konnte diese zu diesem Zeitpunkt durch entsprechende Veränderungen am Stützstift in den Zentriksplint eingearbeitet und nach Abschluss der Modelloperation wieder rückgängig gemacht werden.

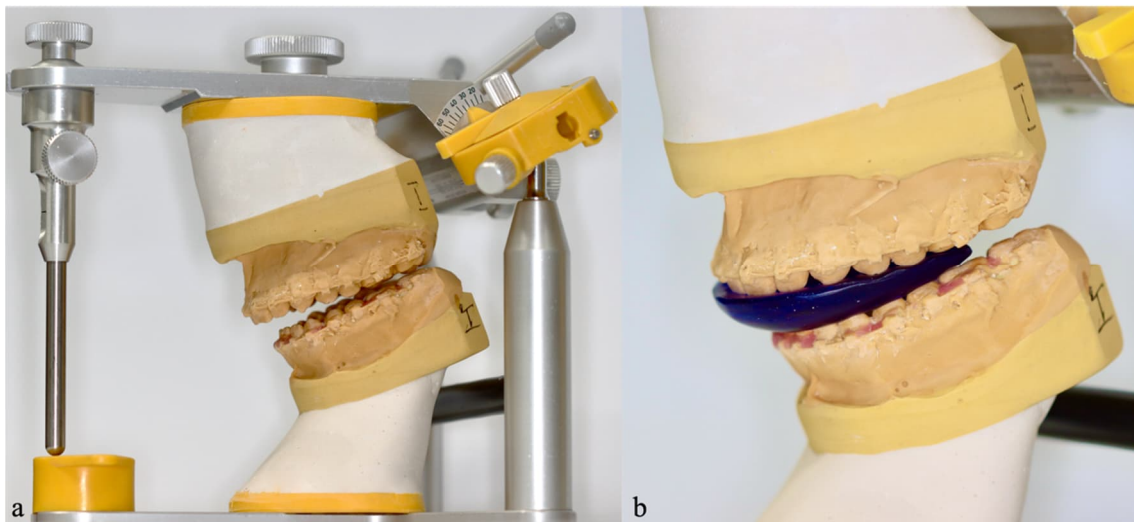


Abbildung 24: Konventionelle Herstellung des Zentriksplintes Nachdem die Modelle von Ober- und Unterkiefermodell einartikuliert wurden (a), folgte die Herstellung des ersten Operationssplintes (b). (Eigene Abbildung)

Zur Verlagerung des Oberkiefers wurde das MRI an Stelle des Stützstiftes im Artikulator befestigt und das Oberkiefermodell mit drei Kunststoffdübeln (SAM Präzisionstechnik GmbH) im Bereich der Zähne 11, 16 und 26 versehen, um es damit für die drei Messspitzen des MRIs vorzubereiten (Abbildung 25a, Seite 29). Im Folgenden konnte das Oberkiefermodell vom Sockel gelöst und vom MRI getragen werden (Abbildung 25b, Seite 29). Jetzt war es möglich die relativen Verlagerungstrecken entsprechend der Planung am MRI einzustellen, den Oberkiefer zu fixieren und den zweiten Splint herzustellen (Abbildung 25c, Seite 29). Dieser zweite Splint beinhaltete demnach die Verlagerungstrecken des Oberkiefers.

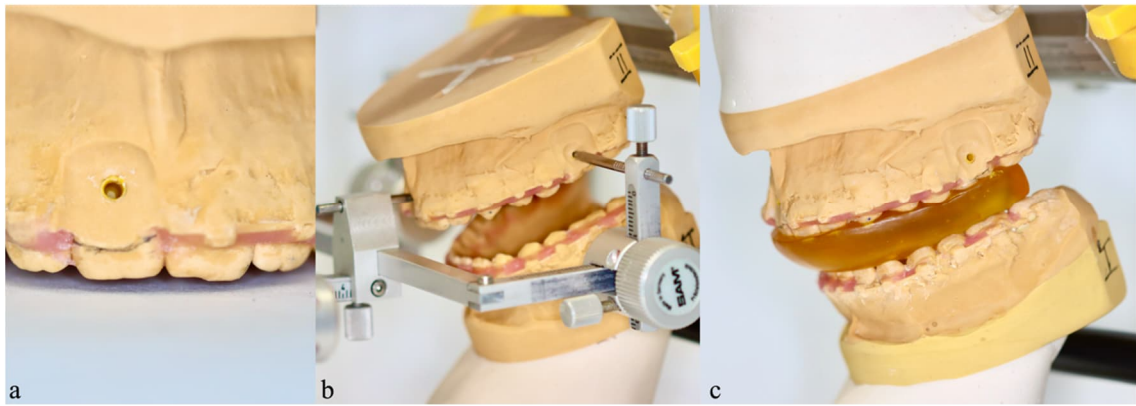


Abbildung 25: Konventionelle Herstellung des Oberkiefersplintes Nachdem insgesamt drei Dübel im Bereich der Oberkiefer Zähne gesetzt wurden (a), fand die Verlagerung mittels MRI nach den vorgegebenen Strecken statt (b). Nach der Befestigung des Modells wurde der gelbe Splint zur Verlagerung des Oberkiefers hergestellt (c). (Eigene Abbildung)

Für die Planung einer bimaxillären Verlagerung wurde das Unterkiefermodell wie bei der Oberkieferverlagerung mit drei Dübeln an den Zähnen 36, 41 und 46 versehen, um durch das MRI mittels Markierungsstift die Ausgangssituation zu registrieren. Nach der Entfernung des Sockels richtete sich die eingestellte Unterkieferverlagerung nach der Zielokklusion (Abbildung 26a). Der anschließend erstellte Operationssplint enthält demnach die Idealverzahnung mit eventueller präoperativ eingestellter Unterkiefersperrung (Abbildung 26b). Zur Überprüfung und Kommunikation mit dem Chirurgen konnten die Operationsstrecken anschließend am MRI abgelesen werden (Abbildung 26c).

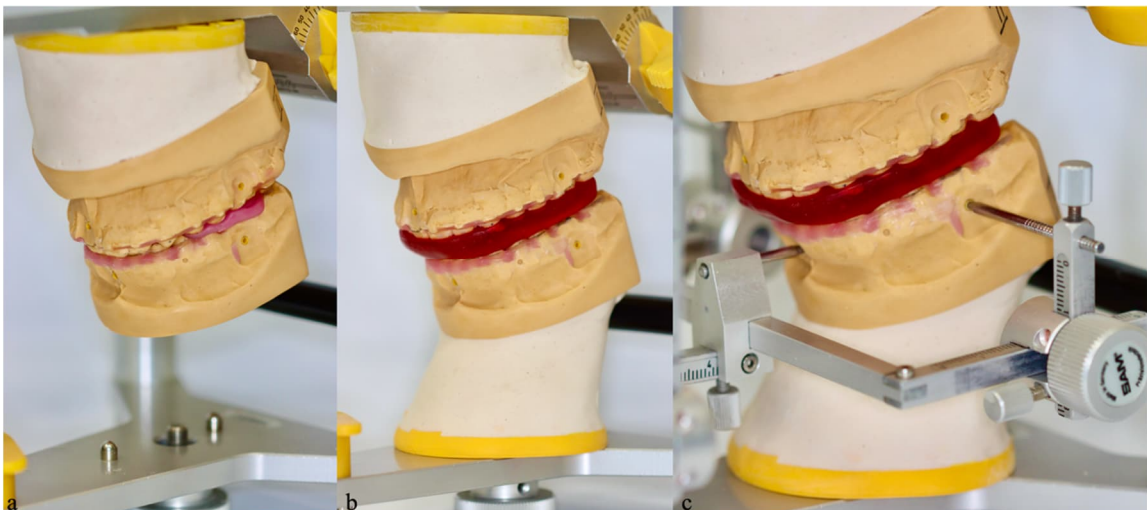


Abbildung 26: Konventionelle Herstellung des Unterkiefersplintes Das Unterkiefermodell wurde hierfür ebenfalls mit drei Dübeln versehen und in der Zielokklusion festgewacht (a). Anschließend wurde dieselbe Sperrung wie zu Beginn der Planung an dem Stützstift eingestellt, um den Unterkiefersplint zu erstellen (b) und die Operationsstrecken über das MRI abzulesen (c). (Eigene Abbildung)

Nach Absenken der Sperrung konnten nun der letzte, sogenannte Übungssplint erstellt werden. Um eine intraoperative Verwechslung der Splinte zu vermeiden, wurden diese nach einem Schema eingefärbt. Der Zentriksplint wurde blau, der Splint zur Oberkieferverlagerung gelb, der Splint zur Unterkieferverlagerung rot und der finale Übungssplint rosa gefärbt (Abbildung 27). Die fertig ausgearbeiteten Splinte konnten im Rahmen der stationären Aufnahme am Patienten anprobiert und gegebenenfalls durch minimales Einschleifen nachbearbeitet werden.

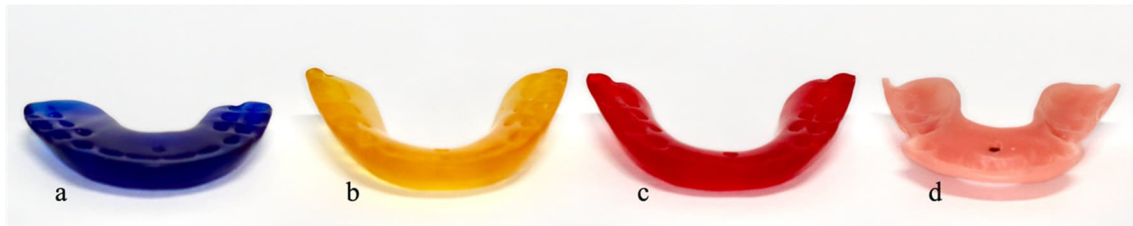


Abbildung 27: Konventionell erstellte Operationssplinte Die Splinte sind sortiert nach der Operationsreihenfolge beginnend mit dem blauen Zentriksplint (a) über den gelben Oberkiefer- (b) und den roten Unterkiefersplint (c) bis hin zum rosafarbenen Übungssplint (d). (Eigene Abbildung)

2.2.2 Ablauf der digitalen Operationsplanung

Die digitale Operationsplanung fand an einer dreidimensionalen digitalen Schädelrekonstruktion aus der DVT-Aufnahme statt, welche im Rahmen der Operationsvorbereitung angefertigt wurde.

Um dieses virtuelle Schädelmodell zu erstellen, wurde die Aufnahme im *Digital Imaging and Communications in Medicine* Format (DICOM-Format) gespeichert und in das Programm Mimics® inPrint Version 3.0.0.249 (Materialise NV, Leuven, Belgien) exportiert. Dieses Programm erlaubte die Herstellung eines dreidimensionalen Schädelmodells im *Standard Triangle Language* (STL) Format, wobei sich die Mandibula vom Rest des Schädels isolieren lässt (Abbildung 28).

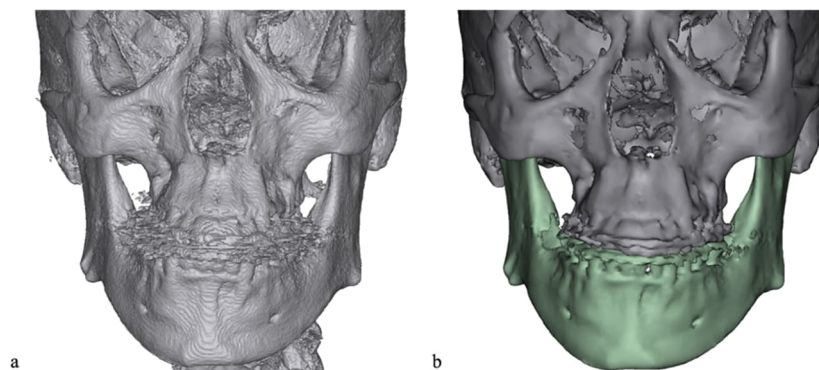


Abbildung 28: Erstellung eines 3D Schädelmodells (Mimics inPrint) Nachdem die Zähne aufgrund von Artefakten (a) einen gesonderten Schwellenwert erhielten, konnte die Mandibula von der Maxilla und dem Cranium isoliert und beide Modelle abschließend geglättet werden (b). (Eigene Abbildung)

Da die Qualität des STL-Modells im Bereich der Zähne wegen Artefakten und allgemeinen Ungenauigkeiten nicht ausreicht, um die Operation zu planen und Splinte zu erstellen, mussten die fehlenden Informationen im Bereich der Zahnkränze durch lichtoptisch erfasste Gipsmodelle ergänzt werden, welche im Rahmen der Operationsvorbereitung hergestellt wurden (Abbildung 29a) (Kapitel 2.2). Zur Überlagerung der gescannten Gipsmodelle mit der dreidimensionalen DVT-Rekonstruktion wurden die STL-Dateien in die Planungssoftware ProPlan CMF Version 3.0.15x64 (Materialise NV, Leuven, Belgien) importiert. Das Programm errechnet die durch Punkteüberlagerung registrierte Position und setzt das gescannte Gipsmodell in die entsprechende Position (Abbildung 29b und c). Bevor das Programm die Zähne durch das virtuelle Gipsmodell ersetzt und das fertige *Composite Model* erstellt, wurde anhand der zweidimensionalen DVT-Bilder die Genauigkeit der Überlagerung in sagittaler und frontaler Dimension überprüft.

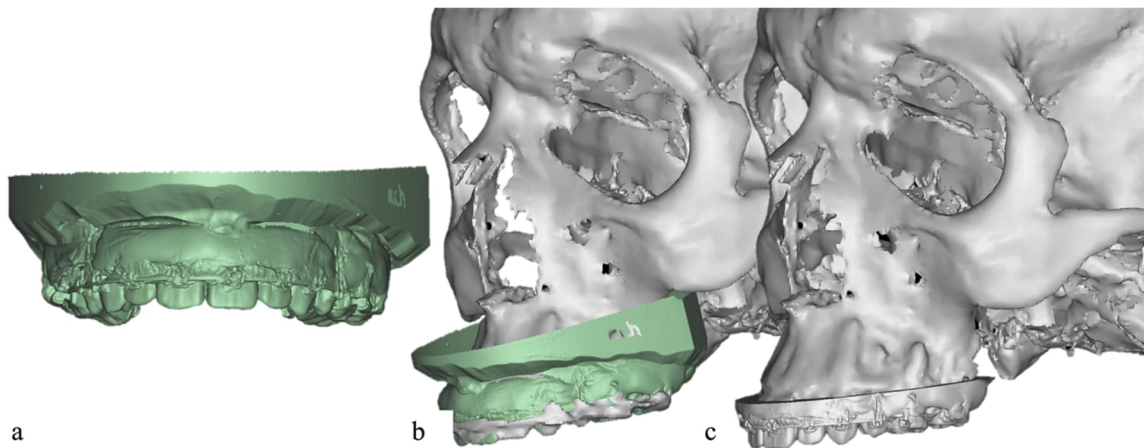


Abbildung 29: Herstellung des *Composite Models* (ProPlan CMF) Das eingescannte Gipsmodell des Oberkiefers (a) konnte über das DVT gelegt werden (b) um die undeutlich dargestellten Zähne zu ersetzen (c). (Eigene Abbildung)

Um anschließend die Verlagerung der Kiefer zu planen, mussten diese zunächst virtuell vom restlichen Schädel getrennt werden. Entsprechend der späteren Operation fand die Osteotomie im Oberkiefer auf Le Fort I Ebene und im Unterkiefer durch bilaterale sagittale Spaltung (BSSO) statt (Kapitel 1.2.2). Das Programm gab dafür pro Kiefer vier Punkte vor, die durch Verschiebung angepasst werden konnten und schließlich die Osteotomieebenen definierten (Abbildung 30a, Seite 32). Zur anschließenden Komplexbildung der Kiefer diente zunächst die geplante Zielokklusion, welche anhand von Gipsmodellen definiert und ebenfalls durch lichtoptische Erfassung digitalisiert wurde (Abbildung 30b, Seite 32). Bei bimaxillärer Umstellung blieb der Oberkiefer dabei zunächst unbewegt und der zahntragende Teil des Unterkiefers wurde entsprechend der Zielokklusion in Relation zum Oberkiefer verschoben (Abbildung 30c, Seite 32).

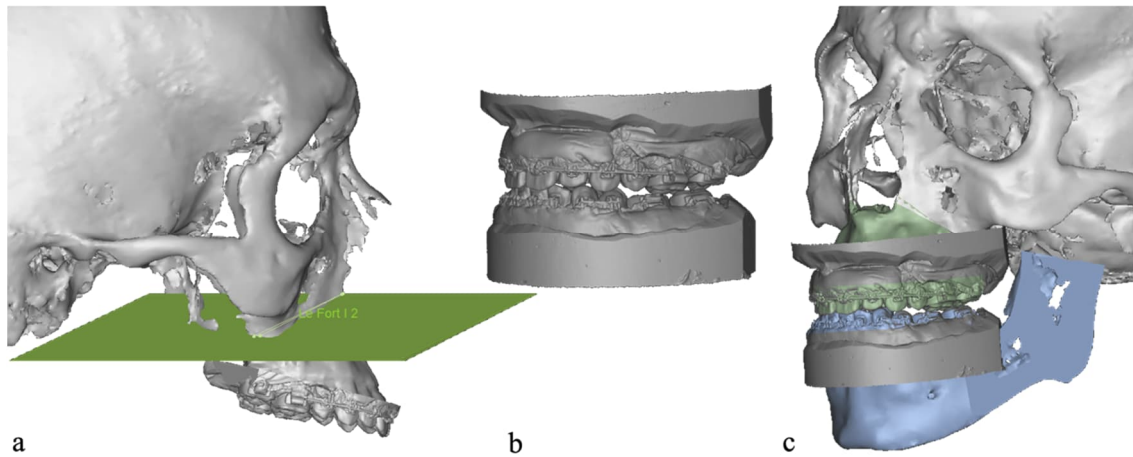


Abbildung 30: Virtuelle Osteotomie der Kiefer Zunächst wurden die Kiefer entsprechend den späteren Operationslinien getrennt (a) um auf Grundlage der eingescannten Zielokklusion (b) durch Unterkieferverlagerung einen Komplex aus mobilisiertem Ober- und Unterkiefer zu erstellen (c). (Eigene Abbildung)

Dadurch entstand ein maxillo-mandibulärer Komplex, welcher die gewünschte postoperative Verzahnung beinhaltete und entsprechend der Planung durch Translation und Rotation räumlich zum restlichen Schädel ausgerichtet werden konnte, während sich der gelenktragende Anteil des Unterkiefers weiterhin in zentrischer Kondylenposition befand (Abbildung 31).

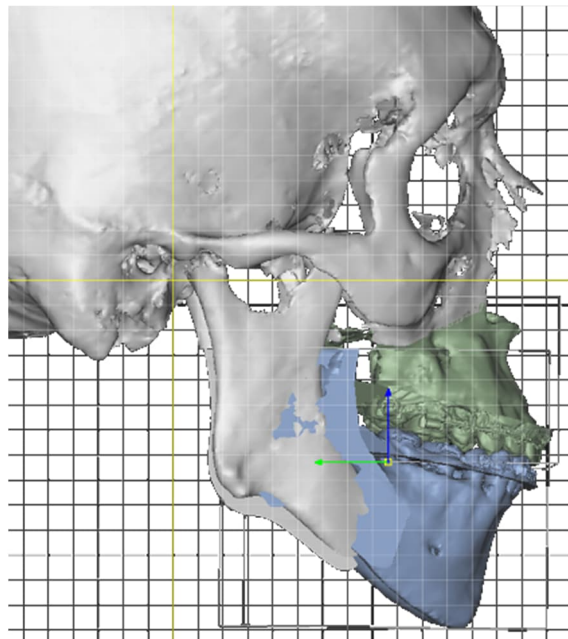


Abbildung 31: Durchführung der virtuellen Modelloperation Der in Zielokklusion ausgerichtete Komplex aus Ober- und Unterkiefer konnte durch translatorische sowie rotierende Bewegungen frei im Raum verschoben werden. Hilfslinien dienten dabei zur Orientierung. (Eigene Abbildung)

Nach Abschluss der Planung wurden die Operationssplinte erstellt, wobei vier Splinte bei bi- und drei Splinte bei monomaxillärer Umstellung notwendig waren. Die Erstellung des Zentriksplints erfolgte an den Kiefern in der Ausgangsposition. Auch hier konnte, falls

notwendig, eine Sperrung durch Rotation des Unterkiefers eingearbeitet werden. Es wurden Punkte an den Zähnen festgelegt, welche die spätere Begrenzung der Splinte darstellten und das Programm berechnete das finale Design des Splintes (Abbildung 32a). Der Splint für die Oberkieferverlagerung wurde unter der Ausgangssituation des Unter- und geplanter Situation des Oberkiefers erstellt. Bei bimaxillärer Umstellung folgte dann ein weiterer Splint zur Unterkieferverlagerung, während sich der Oberkiefer in der postoperativen Position befand. Ein finaler Übungssplint unter Zielokklusion wurde abschließend sowohl für bi- als auch für monomaxilläre Umstellung konstruiert. Im Anschluss an das virtuelle Modellieren der Splinte, konnten diese im STL-Format zur Druckvorbereitung in das Programm Preform Version (Formlabs GmbH, Berlin, Deutschland) exportiert werden. Hier wurden die Splinte für den Druck ausgerichtet und mit Stützstrukturen versehen, welche ein Verformen oder Ablösen während des Druckprozesses vermeiden sollten (Abbildung 32b).

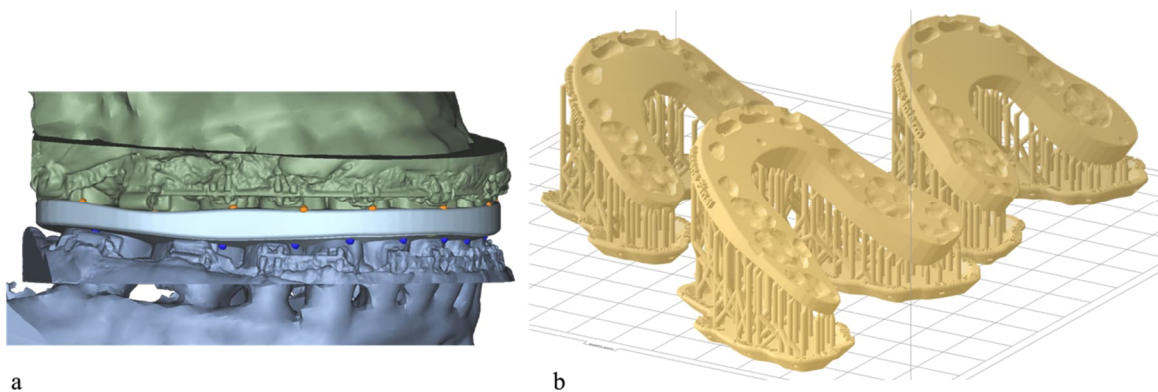


Abbildung 32: Virtuelles Splintdesign und Druckausrichtung Nach der virtuellen Konstruktion der Splinte (a), konnten diese für den 3D-Druck exportiert und ausgerichtet werden (b). (Eigene Abbildung)

Der anschließende Druck der Operationssplinte erfolgte unter Verwendung eines Stereolithografie (SLA) 3D-Druckers (Form 2, Formlabs Inc., Sommerville, Massachusetts), der durch einen Laser das Kunstharz belichtete und aushärtete (Abbildung 33a, Seite 34). Für den Übungssplint wurde wegen der erhöhten Verweildauer im Patientenmund ein Material mit langanhaltender Biokompatibilität (Dental LT, ebenfalls Formlabs Inc.) verwendet, während die Splinte zur Verlagerung aus einem besonders bruchsicheren Kunstharz bestanden (Dental SG, ebenfalls Formlabs Inc.). Nach Abschluss des Drucks wurden die Splinte innerhalb weniger Stunden aus dem Drucker entfernt und nach Angaben des Herstellers mit Isopropanol (Chemsolute, Th. Geyer GmbH & Co., Renningen, Deutschland) in einem Ultraschallbad (Formwash, ebenfalls Formlabs Inc.) gewaschen (Abbildung 33b, Seite 34) und anschließend in einem Lichtofen (Formcure, ebenfalls Formlabs Inc.) endgültig ausgehärtet. Die gedruckten Splinte wurden einen Tag präoperativ ebenfalls auf exakte, rotations- und schaukelfreie Passung am Patienten überprüft und bei Bedarf nachbearbeitet (Abbildung 33d, Seite 34).



Abbildung 33: Herstellungsprozess der digital erstellten Splinte Nach Abschluss des Druckprozesses (a) wurden die Splinte gesäubert (b) und ausgehärtet. Nach Entfernung der Stützstrukturen (c) konnten die Splinte geglättet und bei Bedarf an den Zahnkranz angepasst werden (d). (Eigene Abbildung)

2.2.3 Splintbasierte Operationstechnik

Alle Operationen fanden in der Universitätsmedizin Göttingen statt und wurden durch das Operationsteam der Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie unter ständiger Supervision eines zuständigen Oberarztes durchgeführt. Die Patienten befanden sich während des Eingriffes in Vollnarkose mit nasotrachealer Intubation und wurden auf dem Rücken gelagert. Die Operationstechnik fand unabhängig von der Art der Splinterstellung für alle Patienten nach dem gleichen Schema statt.

Zur Verlagerung des Oberkiefers wurden zunächst die aufsteigende Unterkieferäste freigelegt, um sie anschließend temporär unter Verwendung des Zentriksplints am unbewegten Processus zygomaticus des Oberkiefers durch Osteosyntheseplatten und Titanschrauben zu fixieren (Kapitel 1.2.2). Zum Erhalt der vertikalen Position des Unterkiefers, während der anschließenden Oberkieververlagerung, wurde eine interne Referenzmessung zwischen einem Bracket im Unterkiefer und einem Bohrloch am Jochbogen durchgeführt. Diese sollte nach abgeschlossener Umstellung des Oberkiefers konstant sein.

Bevor der Operationssplint zur Umstellung und anschließenden Befestigung des Oberkiefers eingesetzt wurde, wurde das maxilläre Segment vom Schädel getrennt (Kapitel 1.2.2) und bei geplanter Verlagerung nach kranial im oberen Bereich

entsprechend gekürzt. Nach erfolgter interner Referenzmessung konnten unter Verwendung des Splints zwei L-förmige Titanplatten zur Befestigung an den paranasalen unbewegten Abschnitten der Maxilla verwendet werden. Falls eine alleinige Umstellung des Oberkiefers geplant war, konnte nun die Fixierung der Kiefergelenke aufgehoben und der finale Übungssplint unter elastischer intermaxillärer Verschnürung eingesetzt werden.

Bei zusätzlicher Unterkieferverlagerung wurde vor der Eingliederung des Übungssplintes die sagittale Spaltung der Mandibula vorgenommen (Kapitel 1.2.2) und der zahntragende Anteil mit dem dritten Operationssplint in die Zielposition bewegt. Die Osteosynthese der Segmente erfolgte von lateral durch je eine Titanplatte im Bereich der Kieferwinkel.

2.3 Gegenüberstellung von Planung und Operationsergebnis

Zum Vergleich zwischen geplanter und operativ erreichter Position der Maxilla dienten für beide Planungsmethoden die virtuellen 3D-Schädelmodelle, welche aus den prä- und postoperativen DVT-Aufnahmen generiert wurden. Eine exakte räumliche Gegenüberstellung war bei der KP jedoch nur möglich, indem die geplanten Operationsstrecken digitalisiert und am präoperativen Schädelmodell simuliert wurden. Anschließend konnten die postoperativen Schädelmodelle mit den Modellen, an denen die Planung durchgeführt beziehungsweise simuliert wurde, an unbewegten Abschnitten der Schädel überlagert werden. Die anschließende Analyse erfolgte durch dreidimensionale Kephalemetrie und Oberflächenanalyse, welche die Position der präoperativen, der geplanten und der postoperativen Maxilla verglichen.

2.3.1 Digitalisierung der konventionellen Planung

Um eine digitale und dreidimensionale Gegenüberstellung der KP mit dem Operationsergebnis zu ermöglichen, wurde eine Methode entwickelt, welche die KP durch eine virtuelle Operationssimulation digitalisiert. Hierfür wurden Schädelmodelle aus den präoperativ erzeugten DVT-Datensätzen der konventionell operierten Patienten entsprechend Kapitel 2.2.2 erstellt und in das Programm ProPlan CMF exportiert. Anschließend mussten die für die konventionelle Operationsplanung verwendeten Gipsmodelle gescannt, digitalisiert und importiert werden (Scanner S300, Zirkozahn GmbH, Gais, Italien). Neben dem Scan der einzelnen Modelle wurde zudem die Situation inklusive der intraoperativ verwendeten Operationssplinte digitalisiert (Abbildung 34, Seite 36). So ergaben sich zwei Modelpaare, wobei die räumliche Zuordnung des einen Paares durch den Zentriksplint (Splint 1, blau) und des anderen durch den Splint für die Oberkieferverlagerung (Splint 2, gelb) festgelegt war.

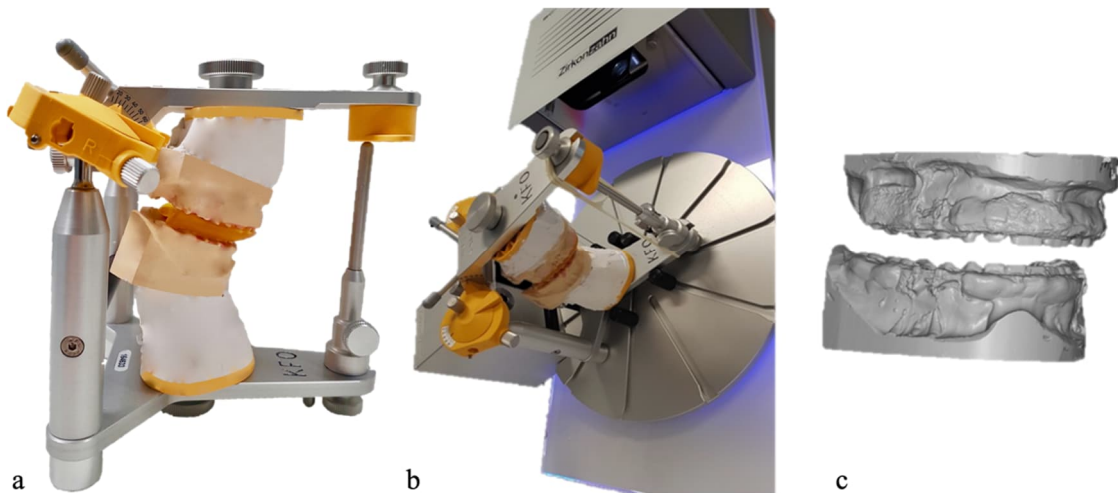


Abbildung 34: Scannen der Modelle inklusive Artikulators und Splints Durch eine Vorrichtung (b) war es möglich einen Artikulator inklusive der Modelle und Splinte (a) zu scannen, wodurch die durch den Splint vorgegebene räumliche Relation übernommen werden konnte (c). (Eigene Abbildung)

Da das Programm die virtuellen Gipsmodelle und deren räumliche Relation zur Ausrichtung ganzer Kiefer nutzen kann (siehe Kapitel 2.2.2), konnte die geplante Kieferverlagerung auf Grundlage der Scans simuliert werden. Der Oberkiefer wurde zunächst als fixierte und der Unterkiefer als bewegliche Komponente ausgewählt. Anschließend wurden beide Kiefer mit dem Scan, der die Informationen aus Splint 1 enthielt, überlagert (Abbildung 35a und b, Seite 37). Nun wurde der Unterkiefer entsprechend dem Scan ausgerichtet und befand sich in der durch Splint 1 definierten zentralen Position (Abbildung 35c, Seite 37). Um den Oberkiefer in die durch Splint 2 definierte Position zu bringen, wurde dieser zunächst virtuell osteotomiert (siehe Kapitel 2.2.2). Im Anschluss diente der Scan mit Splint 2 zur Ausrichtung des Oberkiefers, wobei der Unterkiefer unbewegt blieb (Abbildung 35d und e, Seite 37). Bei der resultierenden Bewegung bewegte sich der Oberkiefer so in die durch Splint 2 definierte und damit konventionell geplante Zielposition (Abbildung 35f und g, Seite 37). Das Ergebnis war ein virtuelles dreidimensionales Schädelmodell, welches die konventionell geplanten Operationsstrecken für Ober- und Unterkiefer enthielt.

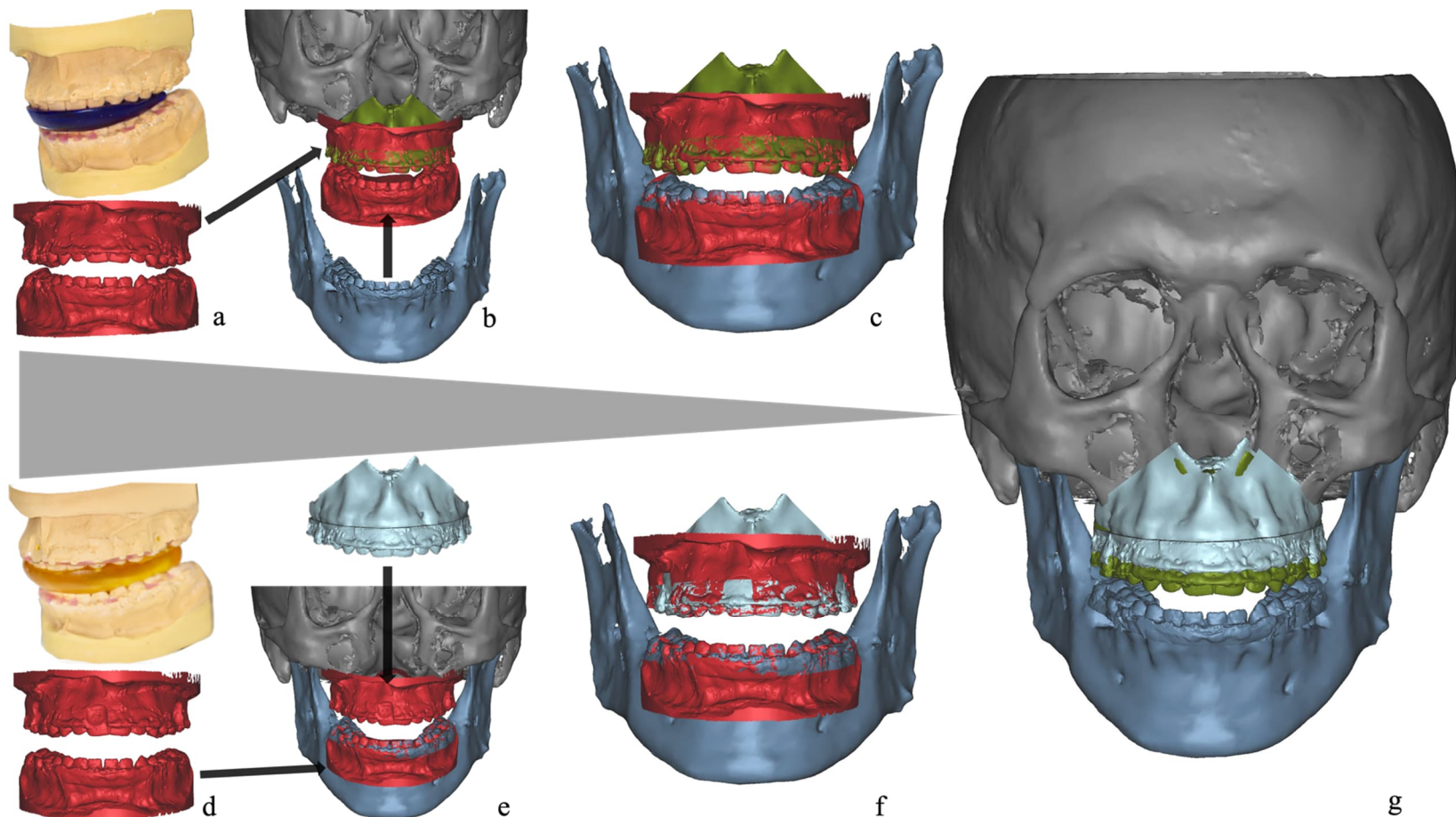


Abbildung 35: Digitalisierung der konventionellen Planung Die durch den Zentriksplint festgelegte räumliche Anordnung von Ober- und Unterkiefermodell (rote Modelle oben) (a) wird mit dem Oberkiefer der Präoperativen DVT-Aufnahme überlagert (b), um den Unterkiefer in die festgelegte Zentrik zu bewegen (c). Anschließend wurden die mit dem Oberkiefersplint gescannten Modelle (rote Modelle unten) (d) auf die neue Unterkieferposition gelegt (e), um den virtuell osteotomierten Oberkiefer zu verlagern (f). Damit befand sich der Oberkiefer in der konventionell geplanten Position (hellblau), welche kranial der Ausgangslage lag (grün) (g). (Eigene Abbildung)

2.3.2 Überlagerung der Planung mit den postoperativen Datensätzen

Nach der Digitalisierung der KP war es möglich, die Überlagerung der Planung mit der postoperativen Situation für beide Planungsmethoden mittels gleicher Vorgehensweise durchzuführen. Hierfür wurde ein Modell von Maxilla mit Cranium aus den postoperativen DVT-Datensätzen aller Patienten erstellt (ebenfalls Mimics inPrint) und in das Programm ProPlan CMF importiert (Kapitel 2.2.2). Die durch Artefakte undeutlich dargestellten Zähne wurden durch das gleiche Gipsmodell wie bei der Planung ersetzt (Kapitel 2.2.2). Anschließend wurden die Schädel der geplanten sowie der postoperativen Situation zur Überlagerung in das Programm 3-matic Research 13.0 (Materialise NV, Leuven, Belgien) exportiert (Abbildung 36).

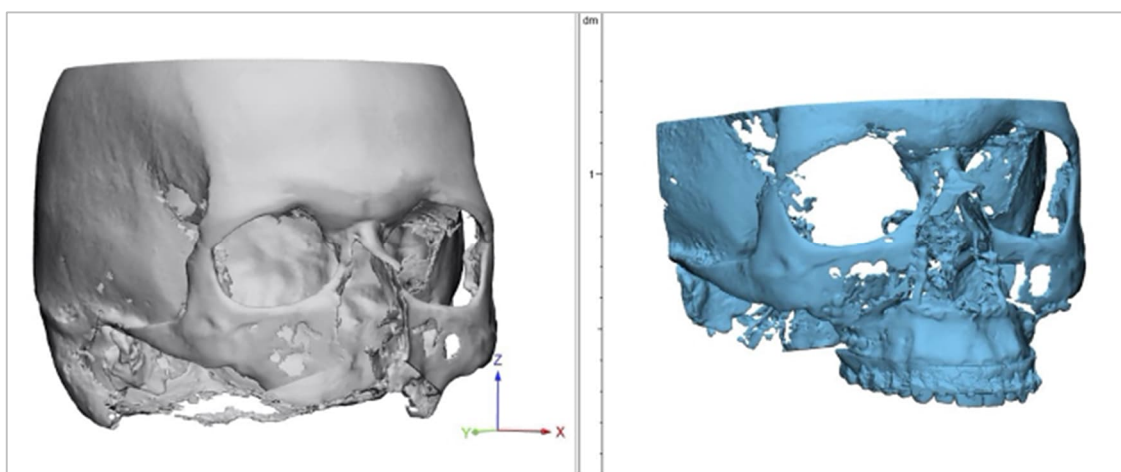


Abbildung 36: Geplantes und postoperatives Schädelmodell in 3-Matic Research Sowohl der Schädel der DP, beziehungsweise digital simulierten KP (links), als auch der Schädel der postoperativen DVT-Aufnahme (rechts) wurden in das Programm 3-Matic Research importiert. (Eigene Abbildung)

Hier wurden die Schädel zunächst durch eine N-Punkt Registrierung basierend auf drei ausgewählten korrespondierenden Punkten überlagert (Abbildung 37).

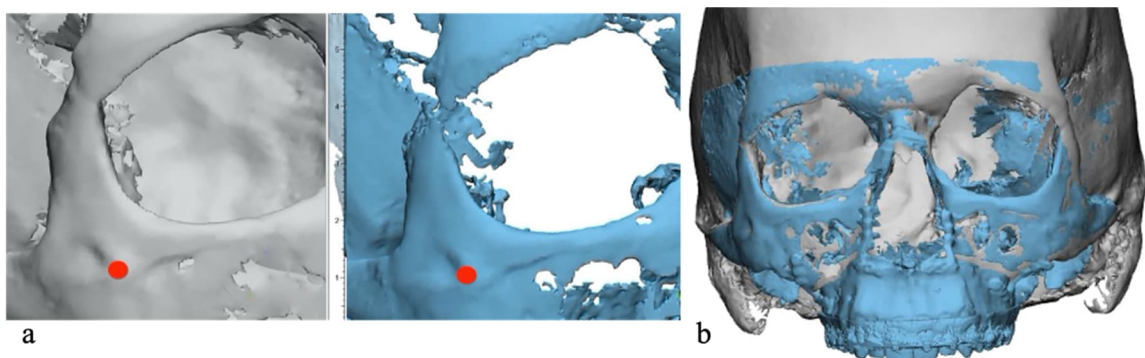


Abbildung 37: N-Punkt Registrierung in 3-Matic Research Durch eine N-Punkt Registrierung (*N-Point Registration*) an markanten korrespondierenden Punkten an beiden Schädelmodellen (a) errechnet die Software zunächst eine erste, grobe Überlagerung (b). (Eigene Abbildung)

Im Anschluss fand eine globale Registrierung im Sinne einer voxelbasierten Überlagerung statt, die durch die Einstellung der Parameter *Distance Threshold*, *Number Of Iterations* und *Subsample Percentage* darauf abzielte, Abweichungsfehler möglichst gering zu halten (Tabelle 4).

Tabelle 4: Überlagerungsparameter zur globalen Registrierung in 3.Matic Research

Parameter	Bedeutung	Gewählte Einstellung
<i>Number of Iterations</i>	Häufigkeit der Anwendung des Algorithmus zur Überlagerung der Modelle	10 Wiederholungen
<i>Subsample Percentage</i>	Prozentualer Anteil der Punkte der Modelle die in die Registrierung aufgenommen wurden	15 Prozent
<i>Distance Threshold</i>	Abstand der zwei Schädelmodelle die in die Registrierung aufgenommen werden	Jeweils drei Durchführungen bei: 5mm, 2mm, 1mm, 0,5mm und 0,3mm

Bei beiden Tools wurde der Schädel des präoperativen DVT-Datensatzes als unbewegte und der Schädel des postoperativen DVT-Datensatzes als bewegte Einheit definiert. Der durchschnittliche Fehler lag nach Anwendung der gesamten globalen Registrierung für 15 Prozent der Punkte, die im Abstand von 0,3 mm zwischen beiden Modellen lagen bei 0,193 bis 0,223 mm (M= 0,2167 SD= 0,0848).

2.3.3 3-D Vergleich durch Kephalometrie

Für die vorliegende Studie wurde im Programm ProPlan CMF eine dreidimensionale Kephalometrie entwickelt. Zur Darstellung der Abweichung zwischen geplanter und postoperativer Position der Maxilla sowie zur Einteilung des Patientenkollektivs beinhaltete die Analyse sowohl zwei- als auch dreidimensionale Winkel und Strecken. Alle Messungen basierten auf Punkten, Linien und Ebenen (Tabelle 5 bis Tabelle 7).

Tabelle 5: Enthaltende Punkte

Punkte	Beschreibung
OrR*	Orbitale rechts - inferiorster Punkt entlang des rechten Infraorbitalrandes
PoR*	Porion rechts - cranialster Punkt des Porus acusticus externus rechts
PoL*	Porion links - cranialster Punkt des Porus acusticus externus links
N*	Nasion - anteriorster Punkt der Sutura nasofrontalis
Se*	Sella - Zentrum der knöchernen Krypte der Sella turcica
U1	Upper 1 - inzisalster Mittelpunkt der oberen mittleren Inzisivi

Punkte	Beschreibung
U6R	Upper 6 rechts - mesiobukkale Höckerspitze des 16
U6L	Upper 6 links - mesiobukkale Höckerspitze des 26
A	A Punkt - tiefster Punkt der anterioren Kontur des Oberkieferalveolarfortsatzes
B	B Punkt - tiefster Punkt der anterioren Kontur des Unterkieferalveolarfortsatzes
Spa	Spina nasalis anterior - anteriorster Punkt der knöchernen Spina nasalis
Spp	Spina nasalis posterior - posteriorster Punkt der knöchernen Spina nasalis
Me	Menton - anteriorster und inferiorster Punkt der knöchernen Symphysis mandibulae

*Fixpunkte, diese bleiben während der Gegenüberstellung unverändert

Tabelle 6: Enthaltende Linien

Linien	Beschreibung
NL*	Nasallinie - definiert durch die Punkte Spina nasalis posterior (Spp) und Spina nasalis anterior (Spa)
NSL*	Nasion-Sella-Linie - definiert durch die Punkte Nasion (N) und Sella (S)
ML*	Mandibularlinie - definiert durch Menton (Me) und die mittlere Höhe der kaudalsten Punkte beider Rami mandibulae

*projiziert auf die Sagittalebene (SAG)

Tabelle 7: Enthaltende Ebenen

Ebenen	Beschreibung
FHP*	Frankfurter Horizontalebene - errechnet aus den Punkten Orbitale rechts (OrR), Porion links (PoL) und Porion rechts (PoR)
FRONT*	Frontalebene - senkrecht zur Frankfurter Horizontalebene (FHP), beinhaltet zudem die Punkte Porion links (PoL) und Porion rechts (PoR)
SAG*	Sagittalebene - geht durch Nasion (N) und ist senkrecht zur Frankfurter Horizontalebene (FHP) und Frontalebene (FRONT)
FRONT-OK	Frontalebene des Oberkiefers - definiert durch die Punkte U6R und U6L und ist senkrecht zur Frankfurter Horizontalebene (FHP)
OKKL-OK	Okklusionsebene des Oberkiefers - definiert durch die Punkte U1, U6R, U6L
SAG-OK	Sagittalebene des Oberkiefers - geht durch den Punkt U1 und liegt senkrecht zur Frontalebene des Oberkiefers (FRONT-OK) sowie zur Frankfurter Horizontalebene (FHP)

*Bezugsebenen, diese bleiben während der Gegenüberstellung unverändert

Die konstruierten Ebenen unterteilten sich in Bezugsebenen mit Fixpunkten außerhalb der osteotomierten und bewegten Kieferanteile sowie Ebenen, die sich im Rahmen der Operation verändern. Die Bezugsebenen und die Fixpunkte wurden an dem Schädelmodell der präoperativen DVT-Datensätze definiert, während die bewegten Punkte jeweils an der präoperativen, der geplanten und der postoperativen Maxilla markiert wurden. Damit die bewegten Punkte für alle Modelle initial an der gleichen Stelle lagen, wurde die präoperative Maxilla zunächst zweimal dupliziert und in *Maxilla Prä*, *Maxilla Planung* und *Maxilla Post* umbenannt. Nach der Punktsetzung konnten die Modelle durch erneutes Überlagern mit der tatsächlich geplanten, beziehungsweise der postoperativen Maxilla, an ihre definitive Position bewegt werden. Die Überlagerung erfolgte nach der gleichen Art und Weise wie bereits in Kapitel 2.2.2 beschrieben.

Die gewählten Messungen zur Einteilung des Patientenkollektivs stellten mit dem Interbasenwinkel ML-NL in der vertikalen und dem Wits-Wert in der sagittalen Dimension gängige Analysen der kieferorthopädischen Diagnostik dar (Jacobson A 1975). Zur Einteilung der transversalen mandibulären Asymmetrie wurde auf die Ermittlung der Mentonabweichung zur Sagittalebene des Schädels (Me-Sag) zurückgegriffen (Tabelle 8). Differenzen über 4 mm wurden als Asymmetrien dokumentiert (Thiesen et al. 2015).

Tabelle 8: Enthaltende Messungen zur Einteilung des Patientenkollektivs

Winkel	Beschreibung
ML-NL	Winkel zwischen Mandibularlinie (ML) und Nasallinie (NL) projiziert auf die Sagittalebene (SAG) zum Ausdruck der vertikalen Divergenz zwischen Maxilla und Mandibula
WITS	Strecke zwischen den senkrecht auf die Oberkieferokklusionsebene (OKKL-OK) projizierten Punkten A-Punkt (A) und B-Punkt (B) zum Ausdruck der sagittalen basalen Kieferrelation (Jacobson A 1975)
Me-SAG	Lotstrecke zwischen Menton (Me) und der Sagittalebene (SAG) zum Ausdruck der transversalen Abweichung der Mandibula

Die translatorischen Messungen zur Gegenüberstellung zwischen Planung und Ergebnis sind in Tabelle 9 sowie Abbildung 38 dargestellt und berücksichtigen die Lage der oberen Schneidezähne in allen Dimensionen.

Tabelle 9: Enthaltene Streckenmessungen zum Vergleich zwischen Planung und Ergebnis

Strecke	Beschreibung
U1-X	Lotstrecke zwischen dem Inzisalpunkt (U1) der Oberkieferinzisivi und der Frontalebene (FRONT) zum Ausdruck der sagittalen Lage der Maxilla
U1-Y	Lotstrecke zwischen dem Inzisalpunkt (U1) der Oberkieferinzisivi und der Sagittalebene (SAG) zum Ausdruck der transversalen Lage der Maxilla
U1-Z	Lotstrecke zwischen dem Inzisalpunkt (U1) der Oberkieferinzisivi und der Frankfurter Horizontalebene (FHP) zum Ausdruck der vertikalen Lage der Maxilla

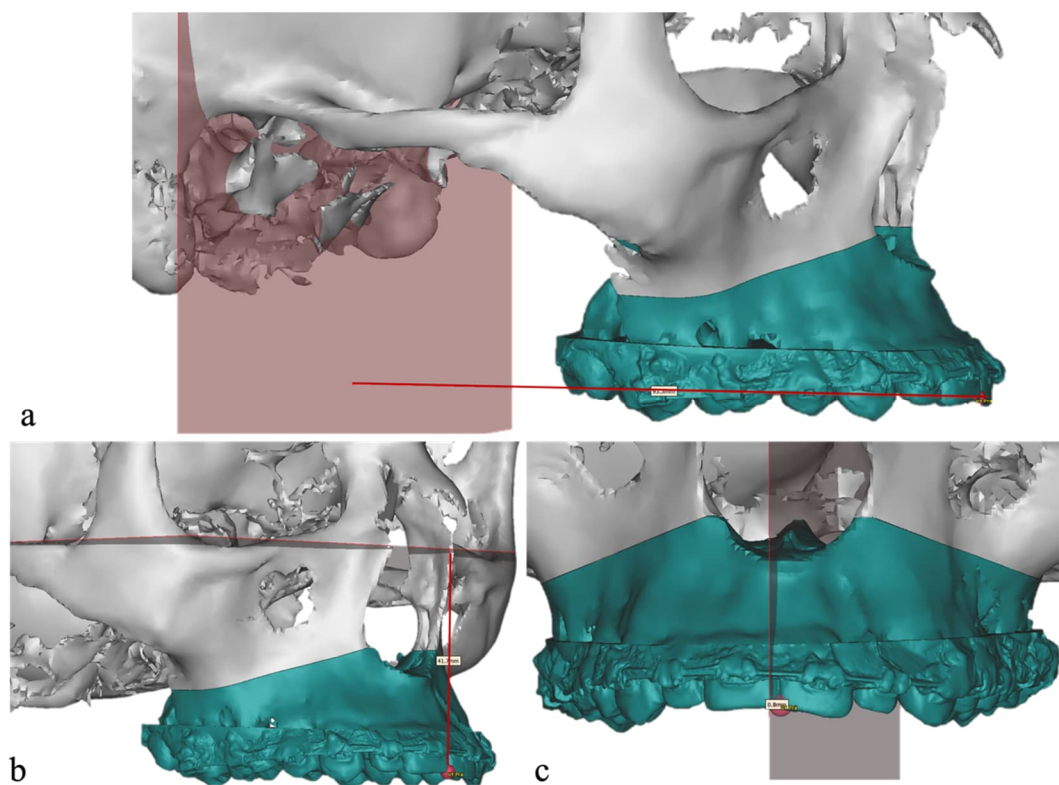


Abbildung 38: Lineare Messungen der Kephalemtrie Darstellung der drei Messungen U1-X (a), U1-Z (b) und U1-Y (c). (Eigene Abbildung)

Die Winkel zur Gegenüberstellung beinhalteten eigens definierte Roll-Nick-Gier Winkel (im Folgenden werden die engl. Begriffe *Roll-Pitch-Yaw* verwendet), welche zur Beschreibung der dreidimensionalen Ausrichtung der Maxilla im Raum genutzt wurden (Tabelle 10, Abbildung 39).

Tabelle 10: Enthaltene Winkelmessungen zum Vergleich zwischen Planung und Ergebnis

Strecke	Beschreibung
ROLL (Roll)	Winkel zwischen der Oberkieferokklusionsebene (OKKL-OK) und der Frankfurter Horizontalebene (FHP) projiziert auf die Frontalebene (FRONT) zum Ausdruck der Neigung der Maxilla in der Frontalebene
PITCH (Nick)	Winkel zwischen der Oberkieferokklusionsebene (OKKL-OK) und der Frankfurter Horizontalebene (FHP) projiziert auf die Sagittalebene (SAG) zum Ausdruck der Neigung der Maxilla in der Sagittalebene
YAW (Gier)	Winkel zwischen der Oberkiefersagittalebene (SAG-OK) und der Sagittalebene (SAG) projiziert auf der Frankfurter Horizontalebene (FHP) zum Ausdruck der Neigung der Maxilla in der Transversalebene

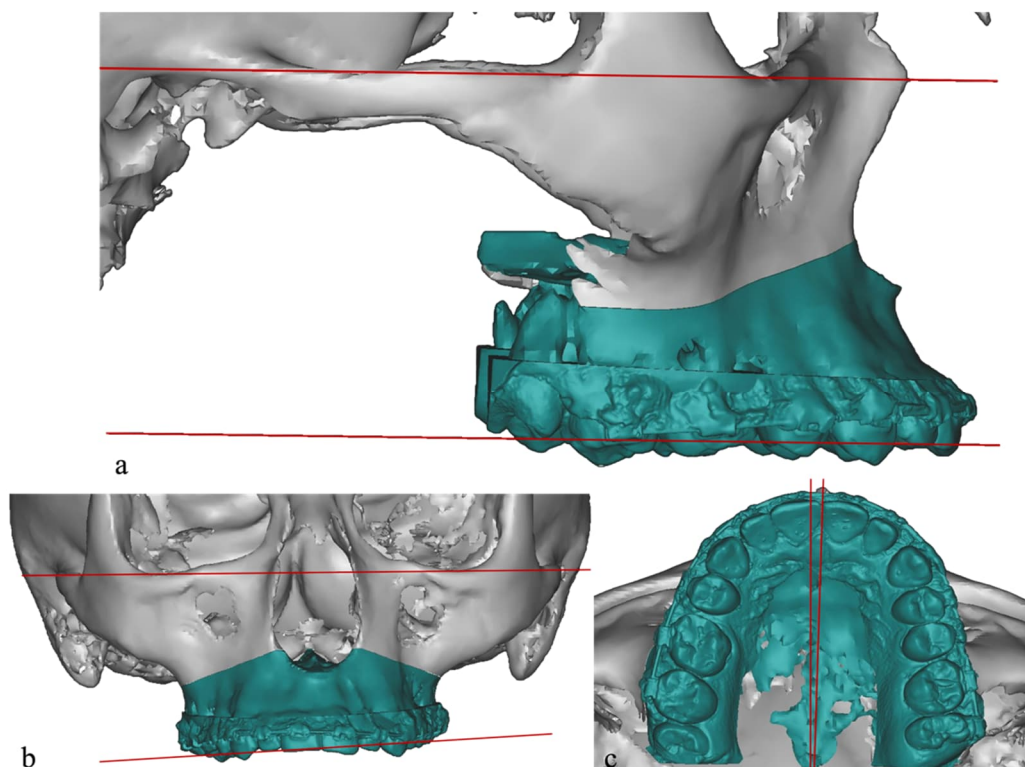


Abbildung 39: Winkel der Kephalometrie Die Winkel PITCH (a), ROLL (b) und YAW (c) wurden durch Projektion auf die entsprechende Ebene als zweidimensionale Winkel dargestellt. (Eigene Abbildung)

Da zur Bewertung der Operationsgenauigkeit die Abweichungen zwischen der geplanten und der tatsächlich erreichten Verlagerungsstrecken benötigt wurden, mussten diese durch Subtraktion für alle Messungen errechnet werden. Zusätzlich war es für die Fragestellung von Bedeutung, welche Verlagerung geplant war. Folgende Formeln fanden daher Anwendung:

Messung Planung – Messung Prä OP = Geplante Verlagerung

Messung Post OP – Messung Planung = Abweichung zum Operationsziel

Die Ergebnisse wurden anschließend als Betrag sowie als absoluter Betrag notiert und statistisch ausgewertet. Der Median der absoluten Beträge zeigt dabei unverfälscht die durchschnittliche Ungenauigkeit, während der Median der eigentlichen Beträge durch das Vorzeichen zu erkennen gibt, in welcher Richtung die mittlere Abweichung liegt. Die Bedeutung eines negativen Vorzeichens ist dabei Tabelle 10 zu entnehmen.

Tabelle 11: Bedeutung der Vorzeichen

Messung	Richtung der Abweichung bei negativem Vorzeichen
U1-X	Abweichung U1 nach posterior
U1-Y	Abweichung U1 nach rechts
U1-Z	Abweichung U1 nach kranial
ROLL	Hängen der Kauebene rechts
PITCH	Hängen der Kauebene posterior
YAW	Schwenkung der Maxilla nach rechts

2.3.4 3-D Vergleich durch Heatmap

Ergänzend zur kephalometrischen Analyse wurde eine Heatmap erstellt, die neben einer visuellen Darstellung der Abweichung zusätzliche metrische Daten zur Gegenüberstellung bietet. Hierfür wurde zunächst das virtuelle Gipsmodell, welches zur Planung verwendet wurde, zweimal dupliziert. So wurde sichergestellt, dass die zur Gegenüberstellung verwendeten Modelle die gleiche Größe hatten, was die Auswertung der späteren Heatmap erleichterte. Anschließend wurden auch diese Modelle nach dem bekannten Schema aus Kapitel 2.2.2 an die eigentliche postoperative oder geplante Position bewegt und im STL-Format in das Programm 3-Matic Research exportiert (Abbildung 40a, Seite 45). Unter dem Tool *Create Part Comparison Analysis* konnte nun die Heatmap erstellt werden, wobei das Modell *OK-Planung* als Start- und das Modell *OK-Post* als Zieleinheit definiert wurde (Abbildung 40b, Seite 45).

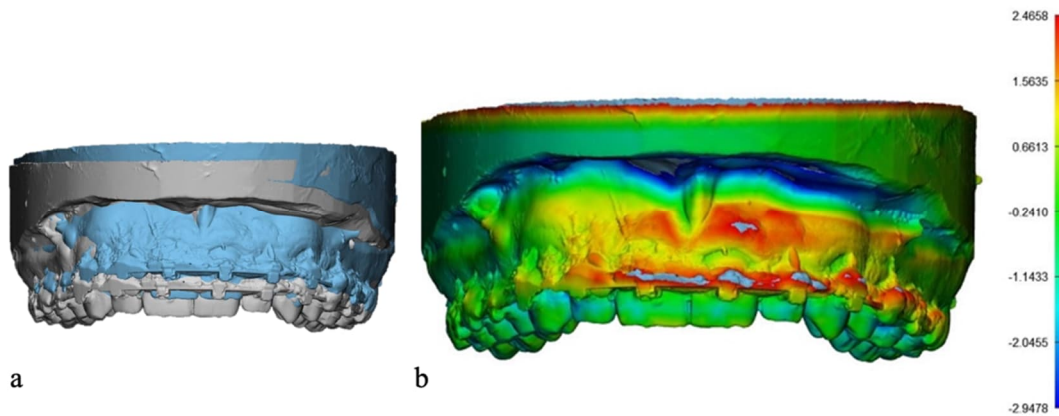


Abbildung 40: Überlagerte Modelle und Heatmap in 3-Matic Research Nachdem die Modelle *OK-Planung* und *OK-Post* importiert wurden (a), konnte die Abweichung über eine Heatmap visualisiert werden (b). (Eigene Abbildung)

Die resultierenden metrischen Ergebnisse ergaben sich aus einem Logarithmus, welcher für jeden Punkt des einen Modells den kürzesten Abstand zu einem Punkt des anderen Modells errechnete. Dabei wurden nicht nur die Abweichungen erfasst, sondern auch Bereiche, die sich weiterhin auf derselben Position wie das zu vergleichende Modell befanden (Abbildung 41).

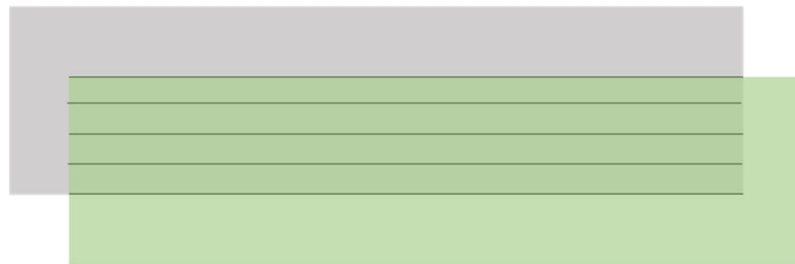


Abbildung 41: Schematische Darstellung des Heatmap-Logarithmus In dem durch Linien markierten Bereich ging der Logarithmus von einer vollständigen Übereinstimmung aus. (Eigene Abbildung)

Zur anschließenden Erfassung und Analyse der Ergebnisse wurden die in Tabelle 12 beschriebenen Messungen gewählt.

Tabelle 12: Metrische Messungen der Heatmap

Wert	Beschreibung
Heatmap Maximum	Größter Abstand zwischen den Modellen
Mittelwert	Mittelwert aller Abstände
RMS	Quadratisches Mittel (engl. <i>Root Mean Square</i>) aller Abstände

2.4 Statistik

Für die statistischen Auswertungen wurden die Messungen der kephalometrischen Analyse und der Heatmap gesammelt (Excel, Microsoft Corp., Redmond, WA, USA) und in das Programm IBM SPSS Statistics Version 26.0.0.0 (IBM Corp., Armonk, USA) importiert.

2.4.1 Methodenfehler

Sowohl zwei- als auch dreidimensionale Kephalmetriemessungen beinhalten das Risiko, dass ein inkorrektes oder subjektives Definieren der Punkte zu Fehlern führen kann (Lagravere et al. 2010). Um einzuschätzen, ob Messfehler vorlagen und diese einen Einfluss auf die Ergebnisse der Studie hatten, wurde die Interrater- und Intrarater-Reliabilität der Kephalmetrie überprüft. Dafür wurden die Messungen sechs Monate nach der ersten Datenerhebung bei zehn zufällig gewählten Probanden durch denselben Beurteiler (Intrarater) und bei zehn anderen zufällig gewählten Probanden durch einen weiteren Beurteiler (Interrater) wiederholt. Da sich die Messwerte durch Verlagerung der anfangs definierten präoperativen Messpunkte ergeben (siehe Kapitel 2.3.3), wurde die erneute Messung nur am präoperativen Schädelmodell durchgeführt.

Zur Reliabilitätsanalyse wurden Bland-Altman-Diagramme verwendet, welche eine visuelle Darstellung der Übereinstimmungen ermöglichen. Dabei handelt es sich um ein spezielles Punktediagramm, welches darstellt, ob die Messdifferenzen innerhalb eines akzeptablen Bereiches liegen. Hierfür mussten sowohl für die Intra- als auch die Interrater-Reliabilität die Differenzen aller Messungen der zehn Probanden errechnet und mittels Histogramms auf Normalverteilung überprüft werden. Nur bei Vorliegen von normalverteilten Differenzen ist eine Analyse mittels Bland-Altman-Plot möglich (Bland und Altman 1986). Anschließend wurde der Mittelwert sowie die Standardabweichung der Differenzen errechnet und notiert. Mit der Annahme, dass bei einer Normalverteilung 95% aller Werte innerhalb des 1,96-fachen der Standardabweichung vom Mittelwert liegen, wurde durch folgende Rechnungen der Toleranzbereich definiert:

Oberer Toleranzbereich: $\text{Mittelwert} + 1,96 \times \text{Standardabweichung}$

Unterer Toleranzbereich: $\text{Mittelwert} - 1,96 \times \text{Standardabweichung}$

Im Diagramm erschienen schließlich der Mittelwert sowie die beiden Toleranzbereiche als Linien und die gemessenen Differenzen als Punkte. Um von einer Übereinstimmung der Messungen auszugehen, musste der Mittelwert der Differenz möglichst gering sein und der Toleranzbereich innerhalb zuvor definierter Werte liegen. Um eine klinische Auswirkung der Messfehler auf die Studie auszuschließen, wurden Toleranzlinien im Bereich von ± 2 mm als akzeptabel angenommen. Je kleiner der Abstand zwischen den Toleranzlinien, desto größer ist die Reliabilität der jeweiligen Messung.

Um sicherzugehen, dass es keinen signifikanten Zusammenhang zwischen den beiden Planungsmethoden und der Art der skelettalen Anomalien gab, wurde ein Pearson-Chi-Quadrat-Test (χ^2 -Test) als Unabhängigkeitstest durchgeführt. Zur Einteilung der skelettalen Dysgnathien dienten sagittale (Wits), vertikale (ML-NL) und transversale (Me-SAG) Messungen.

2.4.2 Statistik der Gegenüberstellungen

Nachdem die Daten als nicht normalverteilt angenommen wurden, fand zunächst eine deskriptive Analyse statt, wobei für alle Messungen der Median und der Interquartilabstand ermittelt wurde.

Der Wilcoxon Test überprüfte als nichtparametrischer Test einer Stichprobe die Signifikanz der ermittelten absoluten Abweichungen zwischen Planung und Operationsergebnis zum hypothetisch erreichbaren Wert von 0 °/ mm.

Um die Differenzen zwischen den geplanten und postoperativ erreichten Strecken hinsichtlich der zwei Planungsmethoden zu analysieren, wurde der Mann-Whitney U-Test als nichtparametrischer Test für unabhängige Stichproben gewählt.

Zur Beurteilung der klinischen Erfolgsquoten beider Planungsmethoden wurden die Abweichungen in Relation zu den in Kapitel 1.2.3 beschriebenen Werten von 2 mm für translatorische Messungen und 4 ° für Winkel betrachtet und der prozentuale Anteil, der innerhalb dieser Werte liegt, notiert.

Ebenfalls Teil der statistischen Analyse war eine Überprüfung auf Zusammenhänge der Abweichungen in sagittaler, transversaler und vertikaler Richtung sowie auf Zusammenhänge zwischen der Größe der geplanten Operationsstrecken und den entstandenen Ungenauigkeiten. Hierfür wurden Streudiagramme erstellt, welche bei linearer Verteilung auf einen Zusammenhang hindeuteten. Um die Zusammenhänge zwischen den Richtungen der Abweichungen auf Signifikanz zu überprüfen, wurde zusätzlich der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman angewendet. Je näher der Korrelationskoeffizient dabei an 1 beziehungsweise -1 kommt, desto größer ist der entweder negative oder positive Zusammenhang. Zur genaueren Interpretation der Werte wurden dabei die Richtlinien nach Cohen verwendet, welcher bei einem Korrelationskoeffizienten unter 0,3 von einer schwachen, zwischen 0,3 und 0,5 von einer mittleren und ab 0,5 von einer starken Korrelation spricht (Cohen 1988).

Das Signifikanzniveau wurde für alle Tests auf $p < 0,05$ festgelegt. Jedoch erhöht sich mit steigender Anzahl von Tests eines einzelnen Datensatzes die Menge der p-Werte und damit die Wahrscheinlichkeit zu Falschannahmen von Hypothesen (Bender und Lange 2001). Zur Neutralisierung der Alpha-Fehler-Kumulierung wurden allen ermittelten p-Werte mittels Bonferroni-Holm Korrektur korrigiert (Holm 1979).

3 Ergebnisse

3.1 Patientendaten

Unter den insgesamt 52 untersuchten erwachsenen Probanden waren 32 weibliche und 20 männliche Patienten im Alter zwischen 18 und 44 Jahren ($M = 24,4$; $SD = 6,2$) (Tabelle 13).

Tabelle 13: Alter und Geschlechterverteilung der Probanden

Patientenkollektiv	N = 52
Gruppe KP	n = 26
Davon männlich	n = 7
Davon weiblich	n = 19
Gruppe DP	n = 26
Davon männlich	n = 13
Davon weiblich	n = 13
Alter des Patientenkollektivs	M = 24,4; SD = 6,2
Alter der Gruppe KP	M = 22,9; SD = 4,8
Alter der Gruppe DP	M = 25,9; SD = 7,1

Alle digital geplanten Probanden erhielten eine bimaxilläre Umstellungsosteotomie mit Verlagerung von Ober- und Unterkiefer. Unter den konventionell geplanten Probanden erhielten 24 Patienten ebenfalls eine bimaxilläre und vier Patienten eine monomaxilläre Umstellungsosteotomie im Sinne einer alleinigen Le Fort I Osteotomie (Tabelle 14).

Tabelle 14: Durchgeführtes Operationsverfahren innerhalb der Gruppen

Art der Operationen in Gruppe KP	
Le Fort I und BSSO	n = 22
Le Fort I	n = 4
Art der Operation in Gruppe DP	
Le Fort I und BSSO	n = 26
Le Fort I	n = 0

Die Einteilung der Probanden nach der skelettalen Ausgangssituation in sagittaler, vertikaler und transversaler Dimension ist für die Gruppen KP und DP in Tabelle 15 (Seite 49) dargestellt.

Tabelle 15: Demographische und klinische Merkmale des Patientenkollektivs

Skelettale Klassen in Gruppe KP	
Skelettale Klasse I (Wits = [-2; 2 mm])	n = 3 (M = 0.5; SD = 1.1)
Skelettale Klasse II (Wits > 2 mm)	n = 4 (M = 6.1; SD = 3.8)
Skelettale Klasse III (Wits < 2 mm)	n = 19 (M = -8.4; SD = 4.6)
Skelettale Klassen in Gruppe DP	
Skelettale Klasse I (Wits = [-2; 2 mm])	n = 0
Skelettale Klasse II (Wits > 2 mm)	n = 7 (M = 3.9; SD = 1.9)
Skelettale Klasse III (Wits < 2 mm)	n = 19 (M = -8.6; SD = 4.5)
Vertikale Relation in Gruppe KP	
Offene Relation (ML-NL > 26,5 °)	n = 12 (M = 34.4; SD = 5.0)
Neutrale Relation (ML-NL = [20,5; 26,5 °])	n = 10 (M = 25.1; SD = 1.2)
Tiefe Relation (ML-NL < 20,5 °)	n = 4 (M = 19.0; SD = 0.6)
Vertikale Relation in Gruppe DP	
Offene Relation (ML-NL > 26,5 °)	n = 15 (M = 35.2; SD = 5.5)
Neutrale Relation (ML-NL = [20,5; 26,5 °])	n = 6 (M = 24.2; SD = 2.2)
Tiefe Relation (ML-NL < 20,5 °)	n = 5 (M = 16.3; SD = 2.3)
Asymmetrien in Gruppe KP	
Mentonabweichung > 4 mm	n = 10 (M = 6,3; SD = 2,2)
Asymmetrien in Gruppe DP	
Mentonabweichung > 4 mm	n = 10 (M = 7,1; SD = 2,3)

3.2 Methodenfehler

Der Chi-Quadrat Test zeigte, dass sich die skelettalen Charakteristika zwischen der Gruppe DP und KP statistisch nicht signifikant unterschieden (skelettale Klasse: $p = 0,148$; Vertikale: $p = 0,486$; Transversale: $p = 1,0$).

In den Tabelle 16 bis Tabelle 18 (Seite 50) ist neben der tatsächlichen Anzahl die statistisch erwartete Anzahl der Probanden mit den jeweiligen Attributen pro Gruppe aufgelistet. Diese unterscheidet sich nur leicht bei den sagittalen und vertikalen Anomalien (Tabelle 16, Tabelle 17), während die Anzahl der Patienten mit transversalen Abweichungen der Erwartung der jeweils anderen Gruppe entspricht (Tabelle 18).

Tabelle 16: Kreuztabelle der Probanden mit sagittalen Anomalien und erwarteter Anzahl

Methode		Klasse I	Klasse II	Klasse III	Gesamt
Konventionell	Anzahl	0	7	19	26
	Erwartete Anzahl	1,5	5,5	19	26
Digital	Anzahl	3	4	19	26
	Erwartete Anzahl	1,5	5,5	19	26

Tabelle 17: Kreuztabelle der Probanden mit vertikalen Anomalien und erwarteter Anzahl

Methode		Neutral	Offen	Tief	Gesamt
Konventionell	Anzahl	10	12	4	26
	Erwartete Anzahl	8	13,5	4,5	26
Digital	Anzahl	6	15	5	26
	Erwartete Anzahl	8	13,5	4,5	26

Tabelle 18: Kreuztabelle der Probanden mit transversaler Anomalie und erwarteter Anzahl

Methode		Mentonabweichung	Keine Mentonabweichung	Gesamt
Konventionell	Anzahl	10	16	26
	Erwartete Anzahl	10	16	26
Digital	Anzahl	10	16	26
	Erwartete Anzahl	10	16	26

3.2.1 Inter- und Intrarater-Agreement

Die Übereinstimmung (*engl. agreement*) der Inter- und Intrarater Reliabilität ist in Tabelle 19 aufgeführt.

Tabelle 19: Mittelwerte, Standardabweichung und Toleranzbereiche der Bland-Altman Plots

Messung	Reliabilität	M	SD	LoA+	LoA-
ML-NL (°)	Inter	-0,2	0,7	1,2	-1,6
	Intra	-0,3	0,7	1	-1,6
WITS (mm)	Inter	0,1	0,4	0,9	-0,7
	Intra	-0,1	0,5	1	-1,1
Me-SAG (mm)	Inter	-0,7	0,8	0,9	-2,2
	Intra	0,4	0,8	2	-1,3
U1-X (mm)	Inter	-0,2	0,4	0,6	-1
	Intra	0	0,4	0,8	-0,7
U1-Y (mm)	Inter	-0,2	0,7	1,2	-1,5
	Intra	-0,2	0,5	0,8	-1,1
U1-Z (mm)	Inter	0,4	0,6	1,6	-0,8
	Intra	0	0,3	0,5	-0,6
ROLL (°)	Inter	0,2	0,6	1,4	-1
	Intra	0	0,2	0,4	-0,4
PITCH (°)	Inter	-0,1	0,7	1,3	-1,5
	Intra	-0,1	0,2	0,4	-0,5
YAW (°)	Inter	-0,4	0,7	0,9	-1,7
	Intra	-0,4	0,3	0,3	-1

Sowohl die positiven als auch die negativen Toleranzbereiche (LoA) (*engl. limits of agreement*) liegen in einem niedrigen Bereich und bis auf eine Messung innerhalb des angestrebten Wertes von ± 2 mm. Da für die abweichende Messung (Me_SAG) die Relevanz zur Einteilung der Mentonabweichung auf 4 mm festgelegt ist, ist dieser höhere Toleranzbereich von 2,2 mm akzeptabel. Die Mittelwerte der Differenzen liegen beim Intrarater-Agreement für alle Messungen bei $< 0,5$ mm bzw. $< 0,5$ °. Beim Interrater-Agreement liegt wiederum nur ein Wert (Me_SAG) mit $-0,7$ mm außerhalb von $\pm 0,5$ mm.

Die graphische Darstellung der Reliabilität erfolgte für jede Messung mittels spezieller Bland-Altman-Streudiagramme, welche die hohe Übereinstimmung veranschaulichen. Erwartungsgemäß zeigt die Intra-Rater Wiederholbarkeit (Abbildung 42a, Seite 52) bei den meisten Messungen eine größere Übereinstimmung als bei der Betrachtung der Differenzen zwischen den Werten zweier messender Personen (Abbildung 42b, Seite 52).

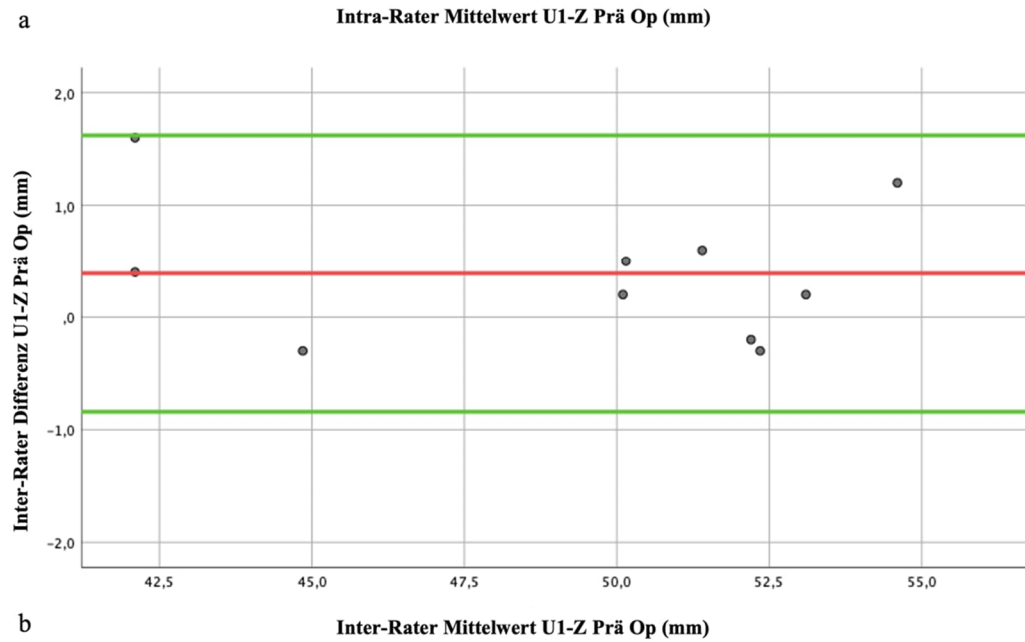
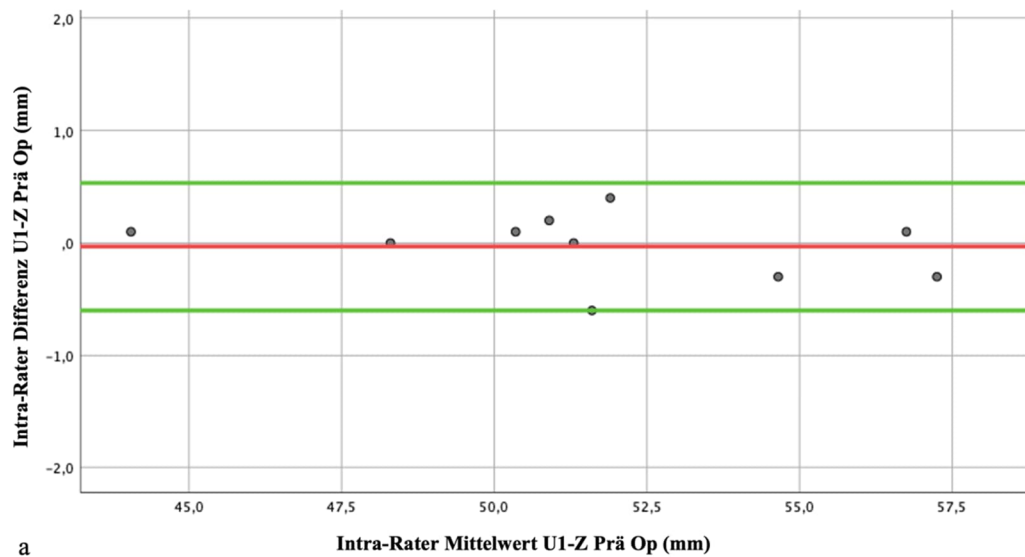


Abbildung 42: Intra- und Inter-Rater Bland-Altman Plots für U1 zu FHP Prä Op

Veranschaulichung der Reliabilität der Messung U1-Z Prä Op, nachdem diese durch denselben (a) und zwei verschiedene Beobachter (b) im Abstand von sechs Monaten durchgeführt wurde. Die X-Achse stellt den Mittelwert und die Y-Achse die Differenz beider Messungen dar. Die rote Linie liegt im Bereich der durchschnittlichen Differenz und die beiden grünen Linien präsentieren den Bereich, der bei Normalverteilung mindestens 95 % aller Differenzen beinhalten sollte. (Eigene Abbildung)

3.3 Ergebnisse der Gegenüberstellung mittels Kephalemetrie

Die deskriptive Statistik der kephalometrischen Gegenüberstellung zwischen der geplanten und der postoperativ erreichten Position der Maxilla ist für beide Planungsmethoden in Tabelle 20 dargestellt. Bei der Annahme, dass die Position der Maxilla postoperativ exakt der Position der Operationsplanung entsprach, ging man in Hinblick auf die kephalometrischen Messungen von hypothetisch erreichbaren Werten von 0 ° beziehungsweise 0 mm aus. Es hat sich jedoch nach Durchführung des Wilcoxon-Tests gezeigt, dass die postoperative Position der Maxilla, unabhängig von der Planungsmethode, in allen Dimensionen signifikant von der geplanten Position abwich.

Tabelle 20: Gegenüberstellung von Planung zu Operationsergebnis mit Wilcoxon-Test

Messung	Mittlere Abweichung zwischen Planung und Operationsergebnis als Median (IQR)			
	Betrag	Absoluter Betrag	p-Wert	Korrigierter p-Wert ¹
KP (n=26)				
U1-X (mm)	- 0,7 (2,3)	1,2 (1,1)	<0,001	0,012*
U1-Y (mm)	- 0,2 (1,7)	0,7 (1,1)	<0,001	0,012*
U1-Z (mm)	1,4 (1,6)	1,6 (1,3)	<0,001	0,012*
ROLL (°)	0,3 (1,4)	0,9 (1)	<0,001	0,012*
PITCH (°)	0,3 (3,3)	1,6 (1,8)	<0,001	0,012*
YAW (°)	- 0,4 (1,5)	0,7 (0,9)	<0,001	0,012*
DP (n=26)				
U1-X (mm)	- 0,7 (1,6)	1 (1)	<0,001	0,012*
U1-Y (mm)	- 0,1 (2,7)	1,3 (1,5)	<0,001	0,012*
U1-Z (mm)	2,1 (2,9)	2,2 (2,2)	<0,001	0,012*
ROLL (°)	0,2 (2,0)	1 (1)	<0,001	0,012*
PITCH (°)	- 0,2 (3,9)	1,9 (2,7)	<0,001	0,012*
YAW (°)	0,3 (2,0)	0,9 (1,2)	<0,001	0,012*

¹ Angepasst nach Bonferroni-Holm

*signifikant

So zeigte sich die größte absolute Abweichung für translatorische Bewegungen für beide Planungsmethoden in der vertikalen Dimension (U1-Z) (KP: 1,6 mm; DP: 2,2 mm). Der Median der Beträge zeigte für die vertikale Translation ebenfalls den größten Wert, wobei dieser für beide Methoden positiv war (KP: 1,4 mm; DP: 2,1 mm). Dadurch wurde deutlich, dass die Maxilla postoperativ tendenziell weiter kaudal lag als es die Planung vorgesehen hatte (Abbildung 43). Bei beiden Werten war die größere Abweichung bei der digitalen Planung zu verzeichnen.

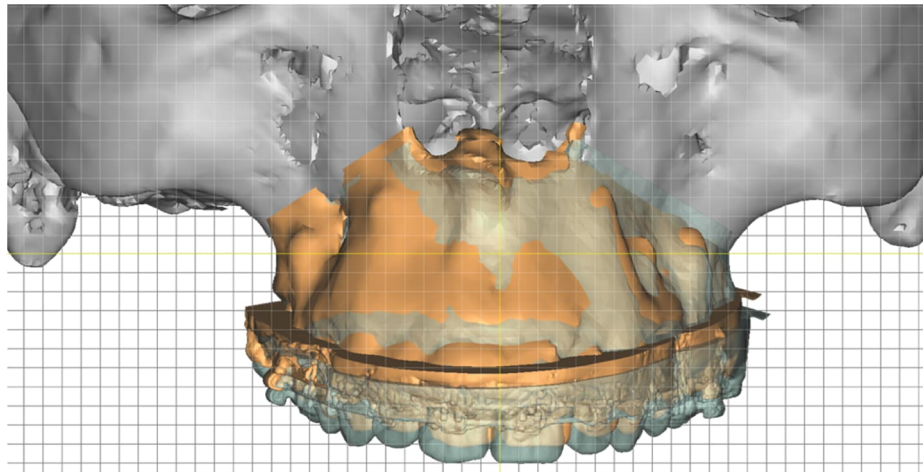


Abbildung 43: Vertikale und sagittale Abweichung zwischen Planung und Ergebnis Im Vergleich zur Planung (orange) lag die operativ fixierte Maxilla im Bereich des Inzisalpunktes zu weit kaudal und zu weit rechts (blau). (Eigene Abbildung)

Die zweitgrößte mittlere absolute Abweichung der translatorischen Bewegungen lag bei der konventionellen Planung in der sagittalen (U1-X) (KP: 1,2 mm; DP: 1 mm) (Abbildung 44) und bei der digitalen Planung in der transversalen Dimension (U1-Y) (KP: 0,7 mm; DP: 1,3 mm).

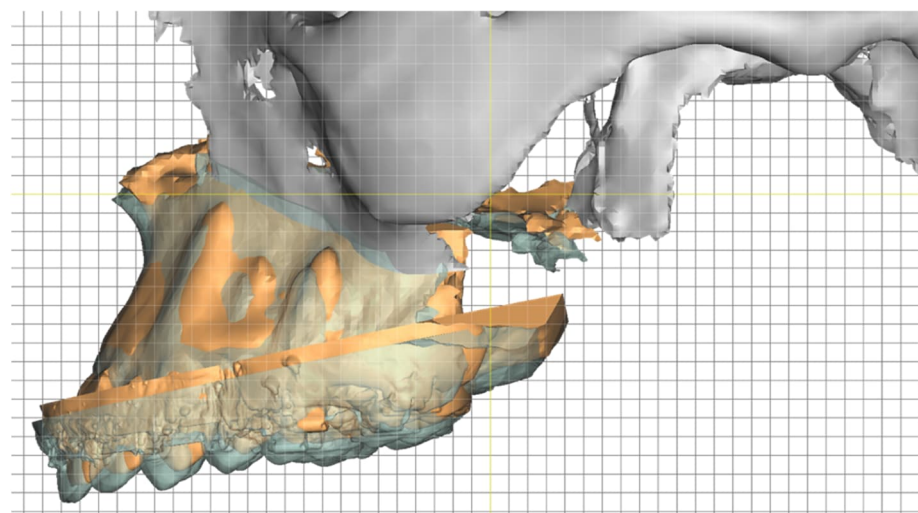


Abbildung 44: Sagittale Abweichung zwischen Planung und Ergebnis Die Maxilla lag postoperativ weiter anterior (blau), als es die Planung vorgesehen hatte (orange). (Eigene Abbildung)

Bei den rotierenden Bewegungen verzeichnete der Pitch den größten absoluten Fehler für beide Methoden (KP: 1,6 °; DP: 1,9 °) (Abbildung 45). Allerdings ließ der Median der eigentlichen Beträge nicht auf eine generelle Richtung der Abweichung schließen (KP: 0,3°; DP: -0,2°). Die zweitgrößte mittlere absolute Diskrepanz zeigte sich bei beiden Planungsmethoden beim Roll (KP: 0,9 °; DP: 1 °), gefolgt vom Yaw (KP: 0,7 °; DP: 0,9 °).

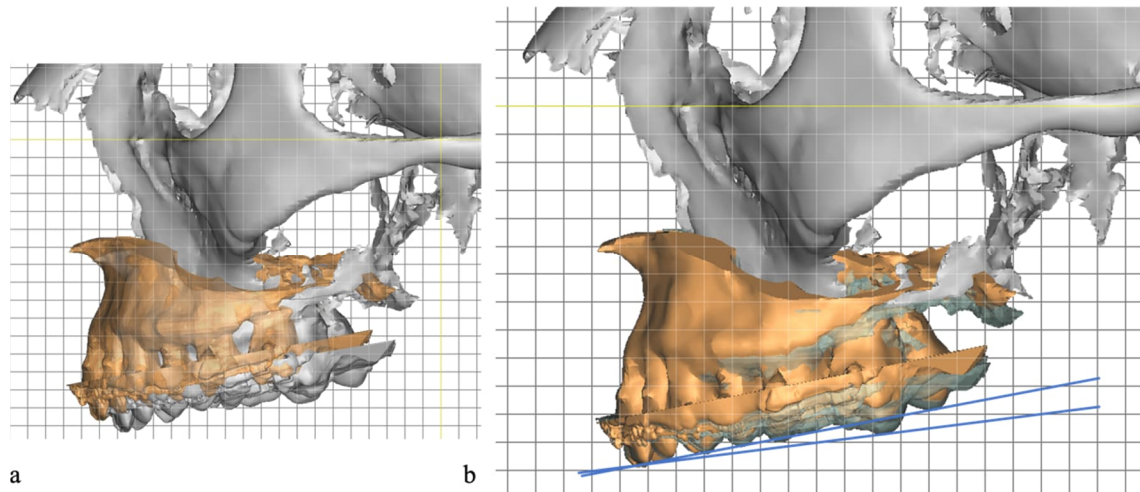


Abbildung 45: Pitch-Abweichung Während die Planung (orange) gegenüber der präoperativen Situation (grau) vorgesehen hatte die Maxilla vollständig anzuheben und nach anterior zu verlagern (a), scheint das Operationsergebnis (blau) die Impaktion im posterioren Bereich nicht vollständig erreicht zu haben (b). Das Ergebnis stellt eine Abweichung im Sinne eines Pitch dar. (eigene Abbildung)

Bei Betrachtung der Erfolgsquoten in Hinblick auf die klinische Relevanz zeigte sich, dass die erreichten vertikalen Verlagerungen am häufigsten von der Planung abwichen. So zeigte sich, in Hinblick auf die Messung U1-Z, eine klinische Erfolgsquote von 46 % bei der virtuellen Planung und von 73 % bei der konventionellen Planung. Die rotierenden Bewegungen zeigten unabhängig von der Planungsmethode insgesamt höhere Erfolgsquoten mit jeweils 100 % für Roll und Yaw und nur wenigen klinisch relevanten Abweichungen beim Pitch (KP: 92 %; DP: 85 %) (Tabelle 21, Seite 56).

Tabelle 21: Klinische Erfolgsquoten beider Planungsmethoden

Messung	Klinische Erfolgsquote (Prozent)*	
	DP (n=26)	KP (n=26)
U1-X (mm)	22 (85 %)	23 (89 %)
U1-Y (mm)	19 (73 %)	23 (89 %)
U1-Z (mm)	12 (46 %)	19 (73 %)
ROLL (°)	26 (100 %)	26 (100 %)
PITCH (°)	22 (85 %)	24 (92 %)
YAW (°)	26 (100 %)	26 (100 %)

*Erfolg definiert als Abweichungen unter 2 mm für translatorische und unter 4 ° für rotierenden Bewegungen

Zur direkten Gegenüberstellung beider Planungsmethoden dient Tabelle 22, welche die Differenzen der durchschnittlichen absoluten Abweichungen darstellt.

Tabelle 22: Gegenüberstellung der mittleren Abweichungen beider Planungsmethoden

Messung	Durchschnittliche Differenz zwischen den mittleren absoluten Abweichungen beider Planungsmethoden <i>(Median VP – Median KP)</i>	p-Wert	Korrigierter p- Wert ¹
U1-X (mm)	-0,2	0,42	1,0 (n.s.)
U1-Y (mm)	0,6	0,036	0,216 (n.s.)
U1-Z (mm)	0,6	0,558	1,0 (n.s.)
ROLL (°)	-0,1	0,345	1,0 (n.s.)
PITCH (°)	0,3	0,589	1,0 (n.s.)
YAW (°)	0,2	0,414	1,0 (n.s.)

¹ Angepasst nach Bonferroni-Holm

n.s.: nicht signifikant

Bei den translatorischen vertikalen und transversalen Abweichungen zeigte sich eine Überlegenheit seitens der konventionellen Planung (U1-Y: 0,6 mm; U1-Z: 0,6 mm), während die durchschnittlichen sagittalen Ungenauigkeiten nach Durchführung der virtuellen Planungsmethode geringer ausgefallen sind (U1-X: -0,2 mm). Bei Betrachtung der Neigungsbewegungen in der Sagittal- und Horizontalebene zeigte die konventionelle Planung im Durchschnitt eine höhere Präzision (PITCH: 0,3 °, YAW: 0,2 °), während das

Kippen der Okklusionsebene in der Frontalebene seitens der virtuellen Planung präziser stattgefunden hat (ROLL: $-0,1^\circ$). Nach Anpassung des p-Wertes mittels Bonferroni-Holm Korrektur wurde jedoch deutlich, dass keine Messung eine Differenz aufwies, welche für eine signifikante Überlegenheit einer Planungsmethode sprach.

3.3.1 Kephalmetrische Korrelationen

Durch Streudiagramme und zusätzlich mit Hilfe des Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman sollten mögliche Zusammenhänge zwischen den Richtungen der Abweichungen unabhängig von der Planungsmethode dargestellt werden. So wurden insgesamt zwölf Streudiagramme erstellt und analysiert, wobei vier der Diagramme eine eindeutige lineare Verteilung beinhalteten (Abbildung 46).

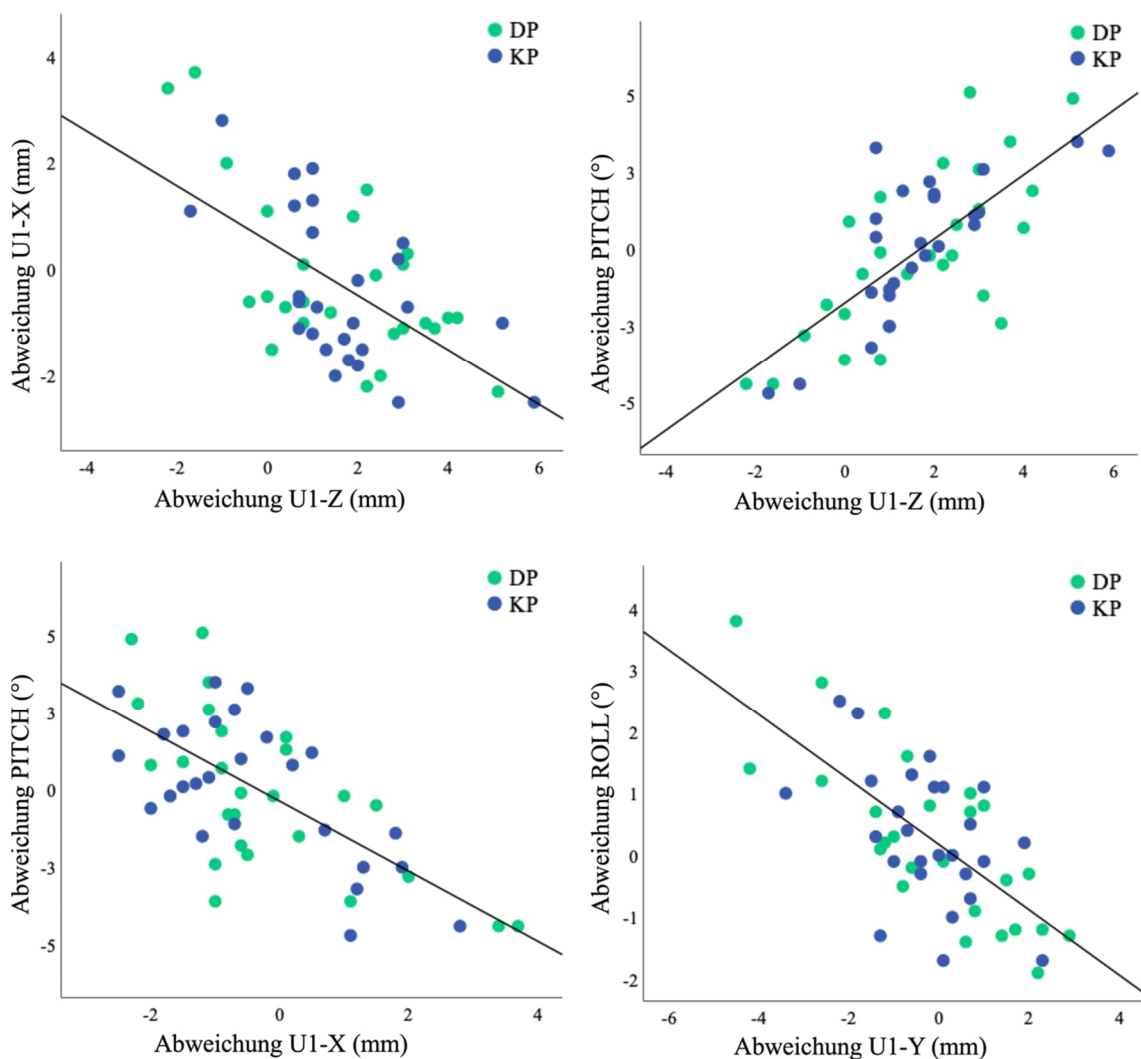


Abbildung 46: Zusammenhänge zwischen den gemessenen Abweichungen Vier der insgesamt zwölf Streudiagramme zeigten einen linearen Zusammenhang unter den Abweichungen. (Eigene Abbildung)

Es hat sich gezeigt, dass eine signifikante Korrelation zwischen Abweichungen in sagittaler, transversaler und vertikaler Richtung sowohl bei linearen Messungen als auch bei den durch die Winkel Roll, Pitch und Yaw definierten Neigungen der Kiefer bestand (Tabelle 23).

Tabelle 23: Zusammenhänge zwischen Abweichungen unterschiedlicher Richtungen

Messung	Korrelierende Messung	Korrelationskoeffizient <i>r</i>	p-Wert	Korrigierter p-Wert ¹
U1-X	U1-Z	- 0,49	< 0,001	0,012*
	ROLL	0,06	0,671	1,0
	PITCH	- 0,61	< 0,001	0,012*
	YAW	0,089	0,529	1,0
U1-Y	U1-X	- 0,14	0,3	1,0
	U1-Z	0,16	0,26	1,0
	ROLL	- 0,61	< 0,001	0,12*
	PITCH	0,23	0,105	0,735
U1-Z	YAW	0,35	0,010	0,08
	ROLL	- 0,05	0,71	1,0
	YAW	0,024	0,864	1,0

¹ Angepasst nach Bonferroni-Holm

*signifikant

n.s.: nicht signifikant

Abweichungen des Oberkiefer-Inzisalpunktes in sagittaler Dimension zeigten einen linearen Zusammenhang zu den Abweichungen in vertikaler Dimension. So korrelierte eine Falschpositionierung des Oberkiefers nach posterior gemessen durch U1-X im mittleren Ausmaß signifikant mit einer zusätzlichen Abweichung nach kaudal (U1-Z). Ein weiterer Zusammenhang zwischen sagittalen und vertikalen Abweichungen bestand bei einer operativ eingestellten Neigung der Maxilla in der Sagittalebene (Pitch), welche mit einer zu weit posterior oder anterior gelegenen Position der Oberkieferinzisivi einherging (U1-X). So bedeutete ein Abfallen beziehungsweise eine nicht ausreichende Impaktion der Maxilla im anterioren Bereich in vielen Fällen auch eine Abweichung der Oberkieferfront nach posterior, während andersherum eine Absenkung im posterioren Bereich zu einer Bewegung der Front nach anterior führte. Die beiden Parameter für die vertikale Abweichungen der Maxilla U1-Z und Pitch wiesen ebenfalls eine starke positive Korrelation auf, wobei ein Hängen der Maxilla im anterioren oder posterioren Bereich

die entsprechende Bewegung der Oberkieferinzisivi nach kaudal oder nach kranial bedeutete. Ebenfalls signifikant und mit zusätzlicher starker negativer Korrelation waren Zusammenhänge zwischen der Abweichung im Bereich von U1-Y und Roll. Interpretiert bedeutet dieses Ergebnis, dass eine Abweichung der Oberkiefermitte nach links oder nach rechts mit einem kranialen Kippen der Kauebene auf der entgegengesetzten Seite einherging. Eine zusätzliche moderate jedoch nicht signifikante positive Korrelation bestand zudem zwischen Yaw und U1-Y. So ging eine Abweichung der Mitte in einigen Fällen mit einer Schwenkung der Maxilla in der Horizontalebene in dieselbe Richtung einher. Dies würde bedeuten, dass die Maxilla nicht als Ganzes, sondern nur im anterioren Anteil zu einer Seite abwich, wodurch eine Rotation im Sinne eines Yaws entstand.

Zur Überprüfung auf Zusammenhänge zwischen der Größe der Abweichung und dem Ausmaß der geplanten Operationsstrecken wurden ebenfalls Streudiagramme erstellt, welche eine Korrelation durch ein lineares Verteilungsmuster visualisieren sollten. Dabei wurde durch die diffuse Verteilung aller Diagramme deutlich, dass die Fehler unabhängig von der Größe der geplanten Operationsstrecken auftraten. Die Darstellung der Streudiagramme erfolgt in Abbildung 47 (Seite 60).

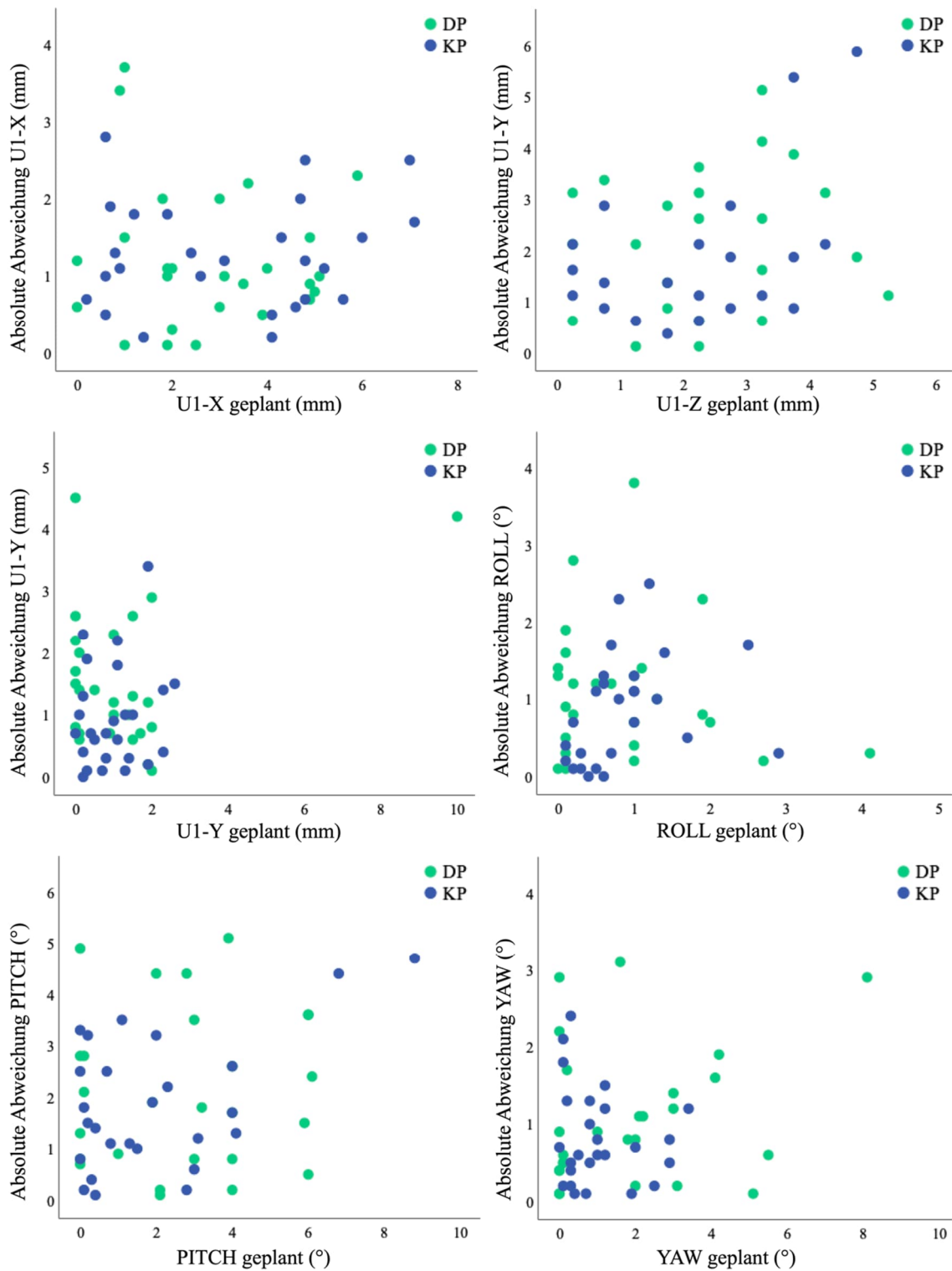


Abbildung 47: Zusammenhänge zwischen Abweichung und Planungsausmaß Die diffuse Verteilung der Streudiagramme veranschaulicht, dass die Abweichungen unabhängig von der Größe der geplanten Strecke auftraten. (Eigene Abbildung)

3.4 Ergebnisse der Gegenüberstellung mittels Heatmap

Bei Betrachtung der dreidimensionalen Heatmap wurden Bereiche ohne Abweichungen grün dargestellt, während Verfärbungen in rot oder blau eine Diskrepanz zwischen Planung und Ergebnis markierten. Im Falle einer nicht ausreichenden Verlagerung der Maxilla nach kranial, erschienen die Inzisalkanten und Kauflächen rot (Abbildung 48).

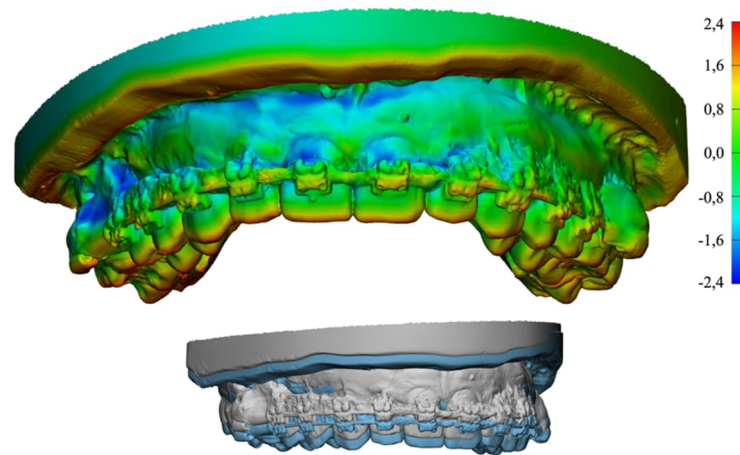


Abbildung 48: Heatmap und entsprechende überlagerte Gipsmodelle Die Heatmap veranschaulichte durch den Farbverlauf das Ausmaß der Abweichungen. Da in diesem Fall die okklusalen Anteile der Zähne rot gefärbt waren und damit die größte positive Abweichung darstellten, wurde von einer Falschpositionierung in vertikaler Dimension ausgegangen. Die Betrachtung der Überlagerung von geplanntem (grau) und postoperativem (blau) Modell bestätigte diese Annahme. (Eigene Abbildung)

Bei Betrachtung der durch die Heatmap ermittelten Werte einer globalen Gegenüberstellung zeigte sich, dass die mittleren Abweichungen der digitalen Planung im Durchschnitt größer waren als die der konventionellen Planung (DP: 1,2 mm; KP: 1,1 mm). Auch die durchschnittlichen maximalen Abweichungen der digitalen Planung waren denen der konventionellen Planung überlegen, wobei beide Planungsmethoden deutlich über den klinisch relevanten 2 mm lagen (DP: 3,8 mm; KP: 3,3 mm). Bei Betrachtung des quadratischen Mittels zeigte sich eine leichte Überlegenheit seitens der konventionellen Planung (DP: 1,5 mm; KP: 1,3 mm). Es hat sich jedoch gezeigt, dass die Überlegenheit der konventionellen Planung keine Signifikanz aufwies (Tabelle 24).

Tabelle 24: Gegenüberstellung der Heatmap-Ergebnisse beider Planungsmethoden

Variable	KP	DP	p-Wert	Korrigierter p-Wert ¹
Maximale Abweichung (mm)	3,3 (1,0-6,6)	3,8 (2,2-7,0)	0,116	0,348 (n.s.)
Mittlere Abweichung (mm)	1,1 (0,4-2,1)	1,2 (0,7-2,7)	0,323	0,576 (n.s.)
RMS (mm)	1,3 (0,5-2,5)	1,5 (0,8-3,1)	0,288	0,576 (n.s.)

¹ Angepasst nach Bonferroni-Holm

n.s.: nicht signifikant

4 Diskussion

4.1 Methodenkritik

4.1.1 Fehlerquellen durch den Datensatz

Die Grundlage der hier vorgestellten Methodik stellten dreidimensionale virtuelle Schädelmodelle dar, welche der Operationsplanung dienten oder diese simulierten und anschließend durch virtuelle Messungen analysiert wurden. Der Ursprung der Schädelmodelle waren DVT-Aufnahmen, welche im Rahmen der Umstellungsosteotomie vier bis acht Wochen vor und innerhalb von ein bis zwei Wochen nach dem Eingriff mit demselben Gerät bei gleichen Aufnahmeeinstellungen durchgeführt wurden. Das dabei verwendete Gerät (PaX Zenith 3D, OrangeDental, Biberbach an der Riss, Deutschland) überzeugt mit hoher Genauigkeit und ist diesbezüglich selbst einigen strahlenintensiveren Computertomographen überlegen (Chen et al. 2018). Trotz strenger Selektion im Vorfeld an die Analysen der Datensätze ist mit minimalen Verzerrungen durch individuelle Bewegungen der Patienten während der Aufnahmezeit zu rechnen (Spin-Neto et al. 2018).

Die Auflösung der erstellten 3D-Bilder lag bei einer Voxelgröße von 0,3 mm, was eine ausreichende Bildqualität für lineare und volumetrische Messungen darstellt (Costa AL et al. 2018). Die gewählte Röhrenspannung von 120 KV sowie die Stromstärke von 6 mA stellen zudem ideale Bedingungen für eine spätere präzise Überlagerung der Schädelmodelle der prä- und postoperativen Aufnahmen dar (Eliliwi et al. 2020).

Laut Empfehlungen von Gaber et al. (2017) ist eine voxelbasierte Überlagerung der prä- und postoperativen Schädel zum Vergleich zwischen Planung und Operationsergebnis nötig, um Fehler durch händische Überlagerung zu vermeiden. Die Überlagerung an Oberflächenstrukturen führt laut Ghoneima et al. (2017) zu einer ähnlichen Genauigkeit und Reproduzierbarkeit, ist laut Han et al. (2021) aber weniger effizient. Die in dieser Studie durchgeführte voxelbasierte Überlagerung zeigte eine durchschnittliche Abweichung von 0,22 mm. In der Literatur werden Werte zwischen 0,05-1,76 mm angegeben, wobei die gewählte Größe der Voxel keinen Einfluss auf die Präzision der Überlagerung zu haben scheint (Andriola et al. 2022; Eliliwi et al. 2020). Die Übersichtsarbeit von Andriola et al. (2022) kommt dabei zu der Erkenntnis, dass eine automatisierte und innerhalb einer Software stattfindende voxelbasierte Überlagerung die höchste Effizienz aufweist. Der durch die Überlagerung entstandene Fehler ist daher bekannt und muss bei Betrachtung der Ergebnisse berücksichtigt werden.

Der Aufnahmezeitpunkt schließt durch den kurzen Abstand zur Kieferumstellung aus, dass Rezidive oder ein *Remodeling* (engl. für Umbau) des Knochens einen Einfluss auf

den Vergleich zwischen Planung und postoperativer Situation haben (Shaheen et al. 2019). Andererseits stellt die Studie dadurch eine Momentaufnahme unmittelbar nach der Verlagerung dar und beurteilt nicht die Langzeitstabilität der Positionierung der Maxilla. Bereits sechs Monate nach der Osteosynthese sind Rezidive der Maxilla von bis zu 62 % der Verlagerungsstrecke bekannt, welche bei Verlagerungen der anterioren Maxilla nach kranial zu Stande kommen, während sagittale Bewegungen stabiler erscheinen (Dowling et al. 2005; Espeland et al. 2008). Demgegenüber lassen Untersuchungen von Holte et al. (2022) annehmen, dass sagittale Bewegungen rezidivanfälliger sind. Dreidimensionale Kurz- und Langzeituntersuchungen sind zur Verbesserung der Stabilität und entsprechender Anpassungen der Operationstechnik von großer Bedeutung und bedürfen weiterer Forschung (Liebregts et al. 2019).

4.1.2 Operationssimulation der konventionellen Planung

Bisherige dreidimensionale Untersuchungen zur Operationspräzision der konventionellen Operationsplanung verglichen die vom Behandler vorgegebenen Operationsstrecken mit dem Operationsergebnis, ohne die tatsächliche dreidimensionale Verlagerungsstrecke der zahntechnisch erstellten Operationssplinte zu berücksichtigen (Hanafy et al. 2020; Kwon et al. 2014; Ritto et al. 2018). Zudem beinhalten die Untersuchungen lediglich lineare Messungen in zwei Ebenen und nutzen damit nicht die vollen Möglichkeiten einer dreidimensionalen Kephalemetrie sowie einer Oberflächenanalyse. Diese Tatsache ergibt sich aus der mangelnden Verfügbarkeit von exakten dreidimensionalen Verlagerungsinformationen der konventionell erstellten Operationssplinte. Oft werden durch den Behandler Kombinationen aus Translations- und Rotationsbewegungen geplant, welche sich während der Modelloperation im Artikulator gegenseitig verändern und damit nahezu unvorhersagbar sind (Jeon et al. 2013). Um jedoch einen exakten dreidimensionalen Vergleich zu ermöglichen, müssen Rotationen und Translationen getrennt voneinander in allen drei Ebenen gemessen werden. Hierfür wurde in der vorliegenden Studie eine Methode entwickelt, die es ermöglichte, die konventionell geplante und in den Splinten enthaltene Verlagerung durch eine digitale Operationssimulation virtuell exakt durchzuführen (Kapitel 2.3.1). Grundlage hierfür stellten präoperative DVT-Aufnahmen der konventionell geplanten Patienten dar, welche im Vorfeld an eine chirurgische Kieferumstellung zur Darstellung anatomischer Gegebenheiten heutzutage eine standardisierte Diagnostik darstellen (Weiss und Read-Fuller 2019). Der anschließende Vergleich zur tatsächlich durchgeführten räumlichen Bewegung der Maxilla konnte durch Überlagerung stattfinden.

Eine Fehlerquelle der Methode ergibt sich aus der Tatsache, dass sowohl die konventionellen als auch die digital erstellten Splinte teilweise bei der Anprobe durch Einschleifen angepasst wurden. Dieses Einschleifen wurde bei der vorgestellten Methodik für die konventionelle Planung berücksichtigt, konnte aber für die digital

erstellten Splinte nicht erfasst werden. Da der Prozess jedoch nur an vereinzelt Zähnen stattfand und generell zur Verbesserung der Passung genutzt wurde, ist der Einfluss auf die geplante Operationsstrecke zu vernachlässigen.

4.1.3 Fehlerquellen der Kephallometrie

Die Messungen, welche die Genauigkeit der Operationen verglichen, sind in Anlehnung an Swennen et al. (2005) aus einer eigens für die Studie erstellten dreidimensionalen Kephallometrie entstanden. Alle durchgeführten Messungen wurden ausschließlich von dem Verfasser der vorliegenden Arbeit manuell erstellt. Wie zur Operationsplanung, zeigt die dreidimensionale Analyse auch bezüglich der Beurteilung der Operationsgenauigkeit Vorteile gegenüber der zweidimensionalen Kephallometrie, welche nach experimentellen Studien von Gateno et al. (2011a) durch Gesichtsasymmetrien verzerrt wird. Zudem kann durch die dreidimensionale Darstellung vermieden werden, dass Doppelkonturen und Überlagerungen die Anfertigung der Kephallometrie erschweren (Farronato et al. 2014). Einige anatomische Strukturen lassen sich dadurch präziser definieren als bei zweidimensionaler Analyse (Ludlow et al. 2009). Die Reliabilität zur Herstellung von Referenzebenen und -linien ist laut Lin (2015) damit insgesamt vergleichbar mit der einer konventionellen Kephallometrie. Andere Untersuchungen kamen jedoch zum gegenteiligen Ergebnis und sehen eine höhere Zuverlässigkeit hinsichtlich der Definition von Messpunkten bei der Durchführung der 2D Analyse (van Vlijmen et al. 2010).

Die in der vorliegenden Studie durchgeführte Untersuchung auf Reliabilität zeigte sowohl in Hinblick auf die Intra- als auch auf die Interreliabilitat für alle in der Kephallometrie enthaltenden ergebnisrelevanten Messungen mittlere Abweichungen von $< 0,5$ mm, wobei mindestens 95 % aller Abweichungen in einem Toleranzbereich von ± 2 mm lagen. Der Einfluss der dadurch entstandenen Abweichungen auf die Resultate ist zu berücksichtigen, stellt aber ein bekanntes Phänomen bei kieferorthopädischen kephallometrischen Analysen dar (Li C et al. 2021). Eine ähnliche Untersuchung von Lee et al. (2015) erreichte zur Reliabilitätsanalyse seiner eigens erstellten dreidimensionalen Kephallometrie im Bereich des Oberkiefer Inzisalpunktes mittlere Abweichungen von 0,76 mm für denselben und 0,89 mm für einen zweiten Untersucher. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie entsprechen daher ähnlichen Untersuchungen und weisen eine vergleichsweise hohe Übereinstimmung auf.

Zur Einteilung des Patientenkollektivs wurden kephallometrische Analysen verwendet, welche international einen Standard für kieferorthopädische Diagnostik darstellen (Hasund und Jenatschke 1973). Da diese Kephallometrie auf zweidimensionalen Messungen basiert und dreidimensionale Winkel durch die dritte Ebene die Gefahr einer Verzerrung verursachen, wurden die entsprechenden Messungen auf die Sagittalebene

des Schädels projiziert. Lediglich die Mentonabweichung wurde zusätzlich in der Ansicht von anterior beurteilt.

Die in dieser Studie verwendete dreidimensionale kephalometrische Gegenüberstellung basierte auf einem aus den Ebenen SAG, FHP und FH bestehenden Koordinatensystem, welches patientenindividuell durch vier Punkte definiert wurde (PoR, PoL, OrR, N). Dadurch hatte die Ausrichtung der Schädel im globalen Koordinatensystem keinen Einfluss auf die Ergebnisse der Kephalmetrie und alle Messungen fanden durch die Überlagerung der prä- und postoperativen Schädelmodelle im selben Koordinatensystem statt. Ausgeprägte Asymmetrien stellen jedoch ein Risiko bei der Verwendung eines schädelinternen Referenzsystems dar, da sie den Vergleich unter den Patienten verzerren können (Gateno et al. 2011b). Da Gesichtsasymmetrien des oberen Gesichtsschädels, welcher zur Erstellung des Koordinatensystems relevant war, nur bei ca. 5 % der kieferorthopädisch behandelten Patienten vorkommen, ist bei wenigen Patienten mit einer Verzerrung zu rechnen (Severt und Proffit 1997).

Die zur Erstellung des Koordinatensystems initial verwendete Ebene Frankfurter Horizontale (FH) beinhaltete Punkte, welche ursprünglich zur zweidimensionalen Analyse definiert wurden und bei der dreidimensionalen Punkteidentifikation eine vergleichsweise geringe Reliabilität aufweisen (Lisboa et al. 2015). In der Literatur wird daher diskutiert, ob Punkte mit höherer Zuverlässigkeit zur Definition der Frankfurter Horizontale im dreidimensionalen Schädelmodell verwendet werden sollten (Hofmann et al. 2016). Es hat sich jedoch gezeigt, dass die ursprüngliche definierte Frankfurter Horizontale für vertikale Messungen, welche zu den aussagekräftigsten Ergebnissen der hier vorgestellten Studie führten, eine zuverlässige Referenz darstellt (Dot et al. 2021). Zur Minimierung der Fehler, welche durch eine geringe Zuverlässigkeit bei der Punktesetzung entstehen könnten, wurden alle Messungen durch eine Person bei hoher Intra-Rater Reliabilität erstellt.

Einen Teil der Kephalmetrie stellte die dreidimensionale Neigung der Okklusionsebene des Oberkiefers durch die Winkel PITCH, ROLL und YAW dar, welche nach einer Projektion auf die entsprechende Ebene vereinfacht durch zweidimensionale Winkel zwischen zwei Linien dargestellt werden. Dadurch wurden die Winkel prä- und postoperativ in derselben Schicht des Schädels gemessen, zeigten aber nicht die wahre dreidimensionale Orientierung der Maxilla, welche zusätzlich durch Neigungen in der zweiten und dritten Dimension beeinflusst wird (Gateno et al. 2011b).

Zur Untersuchung der sagittalen, transversalen und vertikalen translatorischen Operationspräzision wurde die Lage der mittleren Inzisiven des Oberkiefers untersucht. Diese Messung ist für die Gesamtheit der Maxilla zunächst nur wenig aussagekräftig. Das Widerstandszentrum der abgetrennten Maxilla, dessen Verlagerung die alleinige Translation beurteilen würde, ist patientenindividuell und lässt sich aufgrund der

Komplexität der Anatomie nur schwierig bestimmen. Zudem wäre der klinische Mehrwert der resultierenden Information fragwürdig. Im Bereich der oberen Einsen können die gewählten Messungen die Abweichungen aus geometrischen Gründen größer erscheinen lassen, was auf den Abstand zum Rotationszentrum zurückzuführen ist, falls dieses außerhalb der Inzisiven liegt. Anders als bei der Betrachtung von Mittelwerten aller Zähne oder der gesamten Maxilla, stellt die gewählte Messung im Bereich der Inzisiven daher eine besonders strenge Analyse dar. Da die Lage der Oberkieferschneidezähne durch die direkte Sichtbarkeit sowohl für Behandler als auch für Patienten einen wichtigen Parameter zur Erfolgsbeurteilung darstellt, dient der Punkt zwischen den beiden mittleren Schneidezähnen - trotz der Einwirkungen von Rotationen - als klinisch aussagekräftige Referenz (Kim und Lee 2022).

Wie bereits beschrieben wird bei Betrachtung der numerischen Abweichungen zwischen geplanter und erreichter Position der Maxilla zwischen tatsächlichen Beträgen und absoluten Beträgen unterschieden. Während die tatsächlichen Beträge durch ein Vorzeichen sowohl Rückschlüsse auf die Strecke als auch auf Richtung der Ungenauigkeit zulassen, beschreiben absolute Beträge lediglich die Größe des entstandenen Fehlers. Um Aussagen über die generelle Genauigkeit der Planungsmethoden machen zu können, ist zunächst eine Darstellung der absoluten Strecken notwendig, um ein Aufwiegen von positiven und negativen Werten zu vermeiden. Die durchschnittliche Ungenauigkeit erscheint durch diese Methode größer und stellt damit eine besonders kritische Gegenüberstellung dar, bei der es zunächst nicht von Bedeutung ist, ob eine Richtungstendenz vorliegt. Auch in der internationalen Literatur dienen absolute Abweichungen zur Beurteilung der Genauigkeit von verschiedenen Planungs- und Operationstechniken (Bengtsson et al. 2017; Ferguson und Luyk 1992; Kim und Lee 2022; Kwon et al. 2014). Da jedoch Aussagen über die Richtung genutzt werden können, um Rückschlüsse zur Entstehung der Ungenauigkeiten zu ziehen, wurden in der vorliegenden Studie auch die Beträge aller Messungen ausgewertet und verglichen (Sharifi et al. 2008).

4.1.4 Limitationen der Heatmap

Die Grundlage für die vergleichende Oberflächenanalyse im Sinne einer Heatmap stellten in dieser Studie zwei gleich große, digitalisierte Oberkiefermodelle dar, wobei sich eines in der geplanten und das andere in der operierten Position befand. Dabei wurden, anders als bei kephalometrischen Analysen, nicht die gleichen Punkte der jeweiligen Modelle zur Abstandsmessung gewählt, sondern diejenigen Punkte, welche den geringsten Abstand zueinander aufweisen. Da auch Punkte gemessen wurden, welche in Bereichen liegen, in denen postoperativ weiterhin kein Abstand zwischen den Modellen bestand, entstanden Bereiche mit metrisch erfassten Abweichungen von 0 mm (Kapitel 2.3.4).

Daraus resultiert ein Effekt, welcher die eigentliche durchschnittliche Abweichung generell kleiner darstellen lässt (Jabar et al. 2015). Eine besondere Bedeutung kommt bei Betrachtung der Ergebnisse daher dem quadratischen Mittel zu, welches bei der Berechnung die höheren Abweichungen stärker wertet als die kleineren und damit eine kritischere Gegenüberstellung liefert. Im Vergleich zum arithmetischen Mittel wird das Quadrat der Abweichungen berücksichtigt, was dazu führt, dass größeren Abweichungen mehr Gewichtung zukommt als den Bereichen ohne messbare Diskrepanz. Jabar et al. (2015) fanden heraus, dass das quadratische Mittel die tatsächliche Strecke zwischen den Modellen am ehesten beschreibt, aber weiterhin nicht den vollständigen Umfang der vorhandenen Diskrepanz deutlich macht.

In Hinblick auf diese Problematik wurden zudem die durchschnittlichen maximalen Abweichungen angegeben. Da zur Erstellung der Heatmap jedoch digitalisierte Gipsmodelle verwendet wurden, dessen Umfänge im oberen Bereich durch den Sockel über die Zähne hinausgehen, wurden auch in diesem Areal die Abweichungen durch das Programm errechnet. Durch die breitere Modellbasis im Vergleich zu den Zähnen, welche durch ein Einkürzen des digitalen Modells möglichst klein gehalten wurde, entstand bei fehlerhaften Rotationen ein größerer Fehler im Bereich der irrelevanten Gipsstrukturen als im Bereich der Zähne (Abbildung 49).

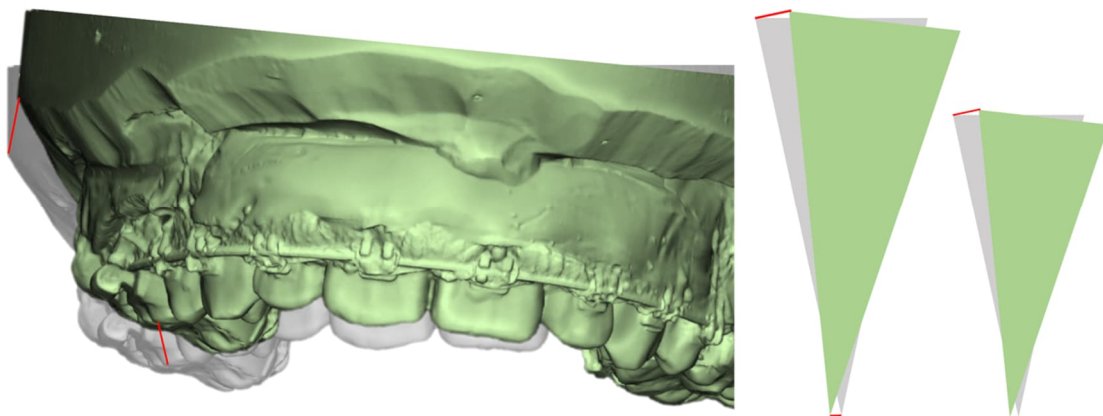


Abbildung 49: Geometrischer Einfluss auf die Ergebnisse der Heatmap Durch die Rotation eines nach oben breiter werdenden Modells erscheint der Fehler im Bereich der irrelevanten Gipsstrukturen größer als im Bereich der klinisch relevanten Zähne. Der Fehler ist zudem bei größeren Modellen ausgeprägter als bei kleineren. Zur besseren Darstellung der Problematik wurde für diese Abbildung der Sockel nicht eingekürzt. (Eigene Abbildung)

Zusätzlich erscheint dadurch der Fehler bei größeren Sockeln größer als bei kleineren. Die durch dieses geometrische Phänomen verursachten Verfälschungen müssen daher bei Betrachtung der maximalen Abweichungen berücksichtigt werden. Sie ließen sich durch die Entfernung des irrelevanten Gipssockels minimieren, aber nicht gänzlich vermeiden. Ein ähnlicher Effekt entstand entsprechend auch bei mit Wachs ausgeblockten Brackets,

Bögen oder Bändern während der Abformung, welche nicht immer vollständig am digitalen Modell entfernt werden konnten.

Die Verwendung von Heatmaps zur Darstellung von Abweichungen zwischen dreidimensionalen Körpern wurde im wissenschaftlichen Kontext bei kieferchirurgischen Umstellungsosteotomien bereits von mehreren Autoren angewendet und diskutiert (Chin et al. 2017; Marliere et al. 2019). Durch die Analyse der gesamten Maxilla bei der dreidimensionalen flächenhaften Gegenüberstellung wird verhindert, dass ein alleiniger, im Bereich der Zähne definierter Punkt, die gesamte Bewegung der Kiefer beschreiben soll. Bei langfristiger Gegenüberstellung kann so zudem ausgeschlossen werden, dass Bewegungen einzelner Zähne im Sinne einer Anpassung die wirkliche skelettale Diskrepanz maskieren (Jabar et al. 2015). Die Anwendung entsprechender Methoden eliminiert darüber hinaus Ungenauigkeiten, welche durch das händische Definieren der Punkte während einer dreidimensionalen Kephalemetrie entstehen (Marliere et al. 2019).

4.1.5 Verschiedene Operateure und Operationstechnik

Die berücksichtigten Kieferumstellungen erfolgten nicht durch einen alleinigen Operateur, sondern wurden fluktuierend durch ein chirurgisches Team der Abteilung für Mund- Kiefer- und Gesichtschirurgie der Universitätsmedizin Göttingen durchgeführt. Dabei oblag die Supervision aller Operationen einem leitenden Oberarzt und die Eingriffe fanden nach einem einheitlichen Operationsprotokoll statt, das allen Operateuren bekannt war. Zudem wurde eine Operationstechnik gewählt, welche durch die intraoperative Fixierung des gelenktragenden Unterkieferanteils Fehlerquellen minimiert und schnell erlernt werden kann. Hsu et al. (2013) berichten, dass nach der Etablierung eines Planungs- und Operationsprotokolls eine einheitlich chirurgische Präzision selbst über die Grenzen einer Klinik hinaus möglich ist. Andere Studien konnten herausfinden, dass unterschiedliche Chirurgen sich nicht in der absoluten Genauigkeit unterscheiden, die Richtung der Abweichungen jedoch unterschiedlich ausfallen kann (Jacobson R und Sarver 2002). Der Aspekt, dass unterschiedliche Chirurgen einen individuellen Einfluss auf das Operationsergebnis haben können, ist daher bei Betrachtung der Ergebnisse von Bedeutung.

4.1.6 Mangelnde Beurteilung der Mandibula

Die Untersuchungen im Rahmen dieser Studie beschränkten sich auf die Genauigkeit der Oberkieferverlagerung und berücksichtigten damit weder die Präzision der Unterkieferverlagerung noch die Qualität der erreichten Okklusion. Da die postoperative Bildgebung teilweise erst bis zu einer Woche nach der Kieferumstellung erfolgte und es in Einzelfällen bis dahin zur Entfernung des finalen Übungssplintes kam, konnte die Position der Mandibula wegen der Weichgewebsschwellung und einer eingeschränkten

muskulären Führung nicht eindeutig reproduziert werden. Als Alternative wäre eine Überlagerung im Bereich der intraoperativ fixierten Unterkieferäste und der Kondylen möglich gewesen, wobei auch hier minimale Bewegungen zueinander festgestellt werden (Bethge et al. 2015). In der Literatur wird die Verlagerung der Mandibula bei digitaler Operationsplanung mit einer ähnlichen Genauigkeit wie die der Maxilla angegeben, während nach konventioneller Planung die Ungenauigkeit der Mandibula überwiegt (Hsu et al. 2013; Zinser et al. 2013). Da die postoperative Position des Unterkiefers ausschlaggebend für die Zielokklusion ist, sind entsprechende Untersuchungen von großer Wichtigkeit. Die Erstellung intraoperativer DVT-Aufnahmen könnte einen Lösungsansatz darstellen, der den Einfluss der Schwellung minimieren würde.

4.2 Diskussion der Ergebnisse

4.2.1 Patientenkollektiv

Bei der vorliegenden Studie handelt es sich um eine retrospektive Beobachtung, bei der Patientendaten aus den Jahren 2016 bis 2019 verwendet wurden. Durch den graduellen Übergang von der KP zur DP, welcher zu dieser Zeit im Zentrum für Zahn- Mund- Kieferheilkunde der Universitätsmedizin Göttingen stattgefunden hat, war eine Randomisierung hinsichtlich der Planungsmethoden nicht möglich. Eine Randomisierung der Patienten hätte durch eine zufällige Gruppenzuordnung unerwünschte Nebenwirkungen durch die bewusste Auswahl des Behandlers vermieden und damit die Qualität der Studie gesteigert (Sessler und Imrey 2015). Die retrospektive Auswahl der Patienten erfolgte, neben den Ein- und Ausschlusskriterien aus Kapitel 2, nach dem zeitlichen Ablauf der Eingriffe unabhängig von Alter, Geschlecht, skelettaler Konfiguration und Auswahl der verlagerten Kiefer.

Da die skelettale Konfiguration die Richtung der Oberkieferverlagerung und damit eventuell die Genauigkeit hätte beeinflussen können, musste hier zunächst ein signifikanter Zusammenhang zur gewählten Planungsmethode mittels χ^2 -Tests ausgeschlossen werden (Choi JY et al. 2009). Dabei wurde deutlich, dass die zu vergleichenden Gruppen eine ähnliche Verteilung hinsichtlich der Dysgnathien aufwiesen. Die Wahl hinsichtlich mono- oder bimaxillärer Osteotomie hat wegen des identischen operativen Vorgehens inklusive der intraoperativen vertikalen Kontrollen ebenso wie Alter und Geschlecht keinen Einfluss auf die Operationsgenauigkeit (Kim und Lee 2022; Sharifi et al. 2008). Ein gewisses Ungleichgewicht im Bereich dieser Faktoren seitens einer Gruppe ist daher akzeptabel. Während bei der kephalometrischen Auswertung und damit beim Vorliegen von Kieferfehlstellungen zwischen Männern und Frauen kein signifikanter Unterschied bekannt ist, wird bei kieferorthopädisch-kieferchirurgischen Therapien eine Geschlechterverteilung zugunsten der weiblichen

Patienten von 1,6 – 2: 1 beschrieben (Lagorsse und Gebeile-Chauty 2018; Parton et al. 2011; Proffit et al. 1990). Damit stellt die Verteilung in der vorliegenden Studie (weiblich: n = 32; männlich: n = 20) die eines klinisch realistischen Kollektivs dar.

Nach Durchführung einer Fallzahlplanung wurde die Anzahl der Patienten so gewählt, dass eine durchschnittliche Differenz zwischen den Gruppen im Bereich der vertikalen Verlagerung von mindestens einem Millimeter ein signifikantes Ergebnis dargestellt hätte. Da die Unterschiede, die im Rahmen dieser Studie festgestellt wurden, alle innerhalb eines Millimeters lagen, wäre eine größere Auswahl an Probanden nötig gewesen, um einen möglicherweise signifikanten Zusammenhang bei kleineren Abweichungen feststellen zu können. Die klinische Relevanz bei signifikanten Abweichungen unter einem Millimeter ist jedoch fragwürdig.

4.2.2 Einordnung der kephalometrischen Ergebnisse

Unabhängig von der Planungsmethode zeigten alle Messungen signifikante Abweichungen zwischen Operationsplanung und -ergebnis. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass ein theoretisch erreichbarer Wert von durchschnittlich 0 mm und 0 ° die Grundlage für diese Aussage darstellt, welcher jedoch bisher in keiner Untersuchung zur Operationspräzision weder von digital noch von konventionell geplanten Eingriffen erreicht werden konnte (Alkhayer et al. 2020; Haas et al. 2014).

Bessere klinische Aussagen bietet daher der Vergleich zu Werten, welche zur visuellen Erkennbarkeit von Abweichungen definiert wurden (Kokich et al. 1999; Padwa et al. 1997). Die daraus resultierenden Erfolgsquoten lassen eine klinische Einordnung der Ergebnisse zu. Als klinisch akzeptabel gelten dabei Abweichungen unter 2 mm beziehungsweise unter 4 °, wobei laut Literatur je nach Planungs- und Operationstechnik Erfolgsquoten zwischen 46 % und 100 % erreicht werden (Hanafy et al. 2020; Sharifi et al. 2008).

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurden die größten absoluten linearen Abweichungen bei beiden Planungsmethoden in der vertikalen Dimension registriert, wobei die durchschnittliche Abweichung der konventionellen Planung mit 1,6 mm kleiner ausfiel als die der digitalen Planung mit 2,2 mm. Entsprechend war die klinische Erfolgsquote gemessen an den obigen Parametern der DP mit 46 % geringer als die 73-prozentige Erfolgsquote der KP. Über die Hälfte der digital geplanten und operierten Patienten haben damit das klinische Limit von 2 mm in der vertikalen Dimension knapp überschritten. Die Werte der nicht absoluten Abweichungen entsprachen nahezu den absoluten Beträgen (KP: 1,4 mm; DP: 2,1 mm) und ließen damit eine Aussage zur Richtung der vertikalen Abweichungen zu. So war die Maxilla wegen des positiven Vorzeichens im Schnitt weiter kaudal fixiert worden, als es die Planungen vorgesehen haben. Der Unterschied zwischen digitaler und konventioneller Planung stellte trotz der

erkennbaren Tendenz kein statistisch signifikantes Ergebnis dar. Insgesamt zeigte sich bezüglich der vertikalen Einstellung der Maxilla eine höhere Präzision in der KP, wobei anzumerken ist, dass der Unterschied zur DP mit Differenzwerten von ca. 0,6mm als klinisch irrelevant zu werten ist. Demgegenüber steht der erheblich höhere Informationsgehalt mittels dreidimensionaler Bildgebung bei der DP im Gegensatz zur rein artikulatorbezogenen KP anhand von Gipsmodellen.

Zu präziseren Ergebnissen bei ebenfalls nicht signifikanten Unterschieden kommt auch die Gegenüberstellung von Ritto et al. (2018), bei der die konventionelle Planung eine durchschnittliche vertikale Abweichung von 1,46 mm am Zahn 11 erreichte, während die Ergebnisse nach digitaler Planung im Schnitt 1,58 mm abwichen. Kwon et al. (2014) erreichte wiederum genauere Werte für beide Planungsmethoden, wobei die digitale Planung mit 0,95 mm kleinere vertikale Abweichungen zeigte als die konventionelle Planung mit 1,23 mm.

Fehler in der vertikalen Dimension sind ein bekanntes Phänomen in der kieferchirurgischen Umstellungsosteotomie und wurden von mehreren Autoren beschrieben (Ellis 1999; Kwon et al. 2014; McCance et al. 1992; Polido et al. 1991; Ritto et al. 2018). Dabei scheint das Ausmaß der vertikalen Abweichungen sowohl von der Planungs- als auch von der Operationstechnik zu variieren und wird mit durchschnittlichen Werten von 0,26 bis 2,2 mm bei Erfolgsquoten zwischen 52 und 100 % angegeben (Hanafy et al. 2020; Kwon et al. 2002; Polido et al. 1991). Die Ergebnisse der vorliegenden Studie unterstreichen damit einmal mehr die große Varianz der Abweichungen und beleuchten kritisch die Herausforderung der vertikalen Kieferverlagerung, die auch bei modernen virtuellen Planungsmethoden bestehen bleibt. Schon früh haben Van Sickels et al. (1986) erkannt, dass sich die Wahl der intraoperativ gewählten Referenzpunkte auf die Präzision der Oberkieferverlagerung auswirkt, wobei externe Referenzpunkte in ihrer wie auch in darauffolgenden Studien zu genaueren Ergebnissen führten (Ferguson und Luyk 1992; Iino et al. 2002; Polido et al. 1991; Stanchina et al. 1988). Ferguson und Luyk (1992) haben Verbesserungen der Ergebnisse von bis zu 1,3 mm beschrieben, wenn externe Referenzpunkte bei präzisen und wiederholten Messungen verwendet wurden (Abbildung 50, Seite 72).

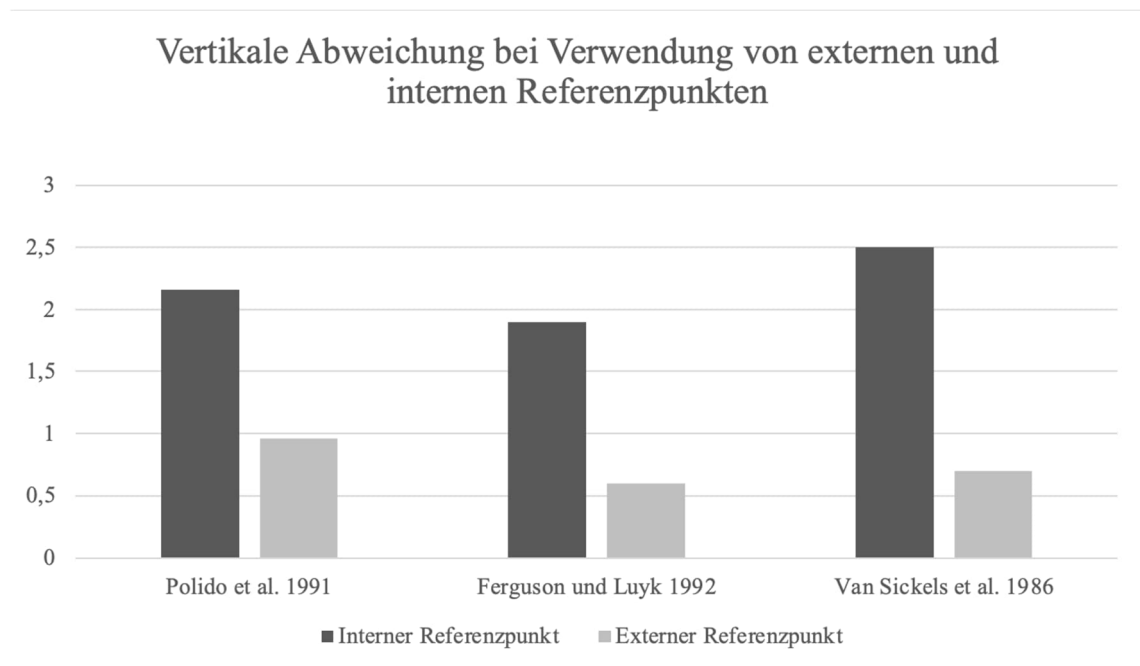


Abbildung 50: Einfluss des gewählten Referenzpunktes auf die vertikale Verlagerung Abweichung des Operationsergebnisses von der Planung in Abhängigkeit von der gewählten Referenzmessung in Millimetern (Ferguson und Luyk 1992; Polido et al. 1991; Van Sickels et al. 1986). (Eigene Abbildung)

Im Laufe der neunziger Jahre wurden weitere Techniken und Instrumente entwickelt, die teilweise mit einer gesteigerten Präzision einhergingen. So erreichte das Göttinger Konzept, das unter anderem die Verwendung eines intraoperativen Gesichtsbogens vorgesehen hatte, Genauigkeiten von ± 1 mm in vertikaler und sagittaler Dimension (Schwestka-Polly R. et al. 1998). Die Operationen der hier vorgestellten Studie fanden mit internen Referenzmessungen ohne zusätzliche Hilfsmittel statt, was als Ursache für die Abweichungen der vertikalen Verlagerung beider Planungsmethoden diskutiert werden kann. Limitationen der internen Referenzmessungen ergeben sich besonders bei zusätzlichen sagittalen und rotierenden Bewegungen der Kiefer, die eine vertikale Kontrolle beeinflussen (Neubert et al. 1988). Neueste digitale Planungsmethoden umgehen die Problematik der erschwerten vertikalen Referenz durch das individualisierte Design von Osteosyntheseplatten, Säge- und Bohrschablonen sowie von Splinten, die Ausleger zur vertikalen Kontrolle enthalten (Hanafy et al. 2020; Li B et al. 2017). Die dadurch erreichte Präzision ist derer von den in dieser Studie verwendeten klassischen Operationssplinten signifikant überlegen (Jones et al. 2022).

Im Vorfeld der Studie wurde angenommen, dass technisch bedingte Ungenauigkeiten bei der Durchführung der konventionellen Modelloperation ursächlich für vertikale Abweichungen sein können und damit eine Unterlegenheit gegenüber der digitalen Planung entsteht (Sharifi et al. 2008). Die Ergebnisse der Studie relativieren jedoch diese Fehlerquellen und verdeutlichen die Wichtigkeit einer präzise durchgeführten Operationstechnik. So scheint der Einfluss des Fehlers, der beispielsweise während der

Gesichtsbogenübertragung entsteht, bei dieser Art der Operationstechnik keinen entscheidenden Einfluss auf die vertikale Verlagerungsgenauigkeit zu haben.

Andererseits können technische Ursachen die relative Ungenauigkeit der digitalen Planung erklären, welche auf die Materialstärke der Operationssplinte zurückzuführen sind. Da der digitalen Planung im Gegensatz zur konventionellen Methode nur in seltenen Fällen und nur im kleinen Ausmaß eine Autorotation des Unterkiefers vorausgeht, sind die gedruckten Operationssplinte dünner. Lediglich der finale Übungssplint, welcher im Anschluss an den Eingriff getragen wird, ist hinsichtlich der vertikalen Dimension für beide Planungsmethoden identisch. Neben einer verminderten Stabilität kann die grazile Erscheinung der digital designten Splinte dazu führen, dass die Operateure die zu entfernende Knochenschicht unterschätzen und damit nicht ausreichend Platz zum Anheben der Maxilla schaffen (Bamber und Harris 1995; Borikanphanitphaisan et al. 2021).

In Hinblick auf Splintmaterial und -produktion konnte die Arbeitsgruppe von Shqaidef et al. (2014) während einer Modelloperation mit Gipsmodellen feststellen, dass CAD-CAM erstellte Splinte durchschnittliche Abweichungen von 0,94 mm zur tatsächlichen Position der Kiefer verursachen können. Hierbei muss jedoch auf die große Bandbreite an unterschiedlichen 3D-Druckern und Splintmaterialien hingewiesen werden. Als Grund für die Abweichungen wird von den Autoren die mögliche Entstehung von unter sich gehenden Bereichen durch zu exakte Passung diskutiert. Die Studie von Wang et al. (2022) bestätigte diese Annahme und legte dar, dass Splinte mit flachem okklusalem Relief von 2-3 mm Tiefe eine bessere Passung aufweisen als Splinte mit 3-5 mm Tiefe.

Ungenauigkeiten, die durch den Herstellungsprozess der Splinte entstanden, betrafen lediglich die DP, da die Strecke der konventionell erstellten Splinte digital erfasst wurde und somit bereits festlag. Inwiefern die Ungenauigkeiten mit dem gewählten CAD/CAM Verfahren einhergingen, ließ sich im Rahmen dieser Studie nicht quantifizieren, stellt aber eine Erkenntnis dar, die es bei der Ergebnisdiskussion einzubeziehen gilt.

Ebenfalls technischen Ursprungs und ebenfalls die digitale Planung betreffend war der teilweise unpräzise Austausch der im DVT ungenau dargestellten Zähne durch zuvor digitalisierte Gipsmodelle. Trotz genauer Überprüfung der Überlagerung in koronaler, axialer und sagittaler Ansicht sind Abweichungen zwischen 0,11 und 0,43 mm bekannt (Lin et al. 2013). Da die Modelle anschließend zur Planung und Herstellung der Operationssplinte verwendet wurden, ist eine klinische Auswirkung nicht auszuschließen. Da jedoch für beide Methoden der Austausch der Modelle im DVT zur Beurteilung der Präzision notwendig war, hat dieser Effekt ebenfalls einen Einfluss auf die Ergebnisse der konventionellen Planung.

Ein weiterer Faktor, der die vertikale Genauigkeit während des chirurgischen Eingriffs beeinträchtigt, ist der Einfluss anatomischer Strukturen, wie beispielsweise der

Tuberositas maxillaris, des Processus pterygoideus und der Arteria palatina descendens sowie eine unregelmäßige Osteotomie des hinteren Oberkiefers bei mangelnder oder übermäßiger Knochenentfernung (Choi JY et al. 2009).

In Hinblick auf die sagittalen Unterschiede zwischen Planung und Ergebnis sind mit einer durchschnittlichen Abweichung von 1,0 mm bei der digitalen und 1,2 mm bei der konventionellen Planung sowie Erfolgsquoten von 89 % und 83 % deutlich bessere Ergebnisse erreicht worden. Ohne Berechnung der Absolutbeträge ergab sich eine mittlere Abweichung von -0,7 mm für beide Planungsmethoden, was bedeutet, dass die Inzisiven der Maxilla im Durchschnitt weiter posterior lagen als geplant. Diese erreichten Werte sind vergleichbar mit anderen Gegenüberstellungen und zeigen ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Planungstechniken. Bei Betrachtung der Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass eine Rotation der Maxilla in der Sagittalebene im Sinne eines *Pitchs*, welches eine vertikale Bewegung darstellt, einen Einfluss auf die sagittale Verlagerung der Schneidezähne hat. So erklärt sich der festgestellte lineare Zusammenhang zwischen den vertikalen und sagittalen Abweichungen im Bereich der oberen Einser. Diese geometrische Erklärung ist bekannt und lässt sich von einigen Autoren auf die Falschpositionierung des Oberkiefermodells bei der Gesichtsbogenübertragung zurückführen (Barbenel et al. 2010; Ellis et al. 1992). Da ebenfalls die digital geplanten Operationen von diesem Zusammenhang betroffen waren, ist zusätzlich von intraoperativen Ursachen auszugehen.

Die Zusammenhänge zwischen der Neigung der Maxilla in der Frontalebene im Sinne eines *Rolls* und den transversalen Abweichungen der Inzisiven lassen sich ebenfalls durch vertikale Abweichungen erklären. Einseitige vertikale Abweichungen durch Fehler im Bereich der Referenzmessungen verursachen ein Kippen der Okklusionsebene und bewegen den Punkt zwischen den mittleren Schneidezähnen des Oberkiefers in die entgegengesetzte Richtung der hängenden Seite. Dieser Zusammenhang war in den erstellten Streudiagrammen deutlich sichtbar (siehe Kapitel 3.3).

Hinsichtlich der transversalen Abweichungen zeigte die digitale Planung mit durchschnittlich 1,3 mm zwar ein klinisch akzeptables, aber im Vergleich zu den konventionell geplanten Umstellungen mit 0,7 mm ein erkennbar schlechteres Ergebnis. Trotz der fast doppelt so großen Abweichung war der Unterschied zwischen den Planungsmethoden nach Anwendung der Bonferroni-Holm Korrektur nicht signifikant. Die Erfolgsquote der digitalen Planung mit 73 % im Vergleich zu 89 % verdeutlichen zudem, dass nur 4 Probanden mehr im Vergleich zu den konventionell Geplanten eine Abweichung größer als 2 mm erfuhren. Die ähnlichen Interquartilsabstände von 1,5 mm für die digitale und 1,1 mm für die konventionelle Planung deuten an, dass die erhöhte Abweichung der digitalen Planung auf einzelne Ausreißer zurückzuführen sein könnte. Diese wiederum lassen sich ähnlich wie die sagittalen Abweichungen wegen der generell

guten Passung der Operationsspinte nicht auf die Planungsmethode zurückführen, sondern verdeutlichen erneut die Bedeutung einer exakten Operationstechnik bei beidseits präzise durchgeführter Referenzmessung.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie lassen nicht auf Zusammenhänge zwischen der Größe der geplanten Verlagerung und den entstandenen Ungenauigkeiten schließen. Die diffusen Verteilungen der Streudiagramme aus Kapitel 3.3 zeigen, dass Abweichungen unabhängig von der Größe der geplanten Verlagerungen entstehen können. In Hinblick auf die klinische Operationsplanung bedeutet dieses Ergebnis, dass man durch die Reduktion der Verlagerungsstrecken keinen Einfluss auf die Operationsgenauigkeit hat. Sowohl große als auch kleine Bewegungen der Kiefer können die gleichen Ungenauigkeiten aufweisen. Da die Ungenauigkeiten zudem in jede Richtung auftreten konnten, ist keine generelle Über- oder Unterkorrektur im Rahmen der Operationsplanung zu empfehlen.

4.2.3 Bewertung der Heatmap-Ergebnisse

Durch die in dieser Studie entwickelten Planungsmethode war es erstmalig möglich, sowohl die dreidimensionalen kephalometrischen Messungen als auch eine 3D Oberflächenanalyse zur Beurteilung der KP zu erstellen und mit der DP zu vergleichen. Bisherige Untersuchungen beschränkten sich auch hier auf die DP und ließen keine direkte Gegenüberstellung mit konventionellen, nicht digitalen Planungsmethoden im selben dreidimensionalen Koordinatensystem zu.

Die Ergebnisse lassen durch die farbliche Darstellung eine grobe Aussage über die Richtung der Abweichungen zu und dokumentieren zudem die maximalen, minimalen und durchschnittlichen Fehler bezogen auf die Gesamtoberfläche der Maxilla. Eine genaue Aussage über komplexere Bewegungen sowie eine Unterscheidung in Rotation und Translation ist dabei jedoch nicht möglich (Jabar et al. 2015).

Die durchschnittlichen Abweichungen der Heatmap fielen mit 1,1 mm (KP) und 1,2 mm (DP) entsprechend der in Kapitel 4.1.4 beschriebenen Ursache gering aus, stellen aber keine aussagekräftige Gegenüberstellung dar. Die maximalen Abweichungen fielen mit durchschnittlichen 3,3 mm (KP) und 3,8 mm (DP) hoch aus, wurden aber durch unbedeutende Areale des Gipsmodells zu groß dargestellt. Zudem sind diese Ergebnisse nicht besonders aussagekräftig, da nicht der Abstand zwischen zwei gleichen Punkten zwischen beiden Modellen gemessen wurde, sondern lediglich der kürzeste Abstand. Demnach hätte jede digital geplante Operation das klinische Optimum von maximal 2 mm Diskrepanz in einem Areal des Gipsmodells überschritten. Das quadratische Mittel, welches den aussagekräftigsten Wert der Analyse darstellt, lag mit 1,3 mm (KP) und 1,5 mm (DP) in einem klinisch akzeptablen Bereich, überschritt für die digitale Planung jedoch leicht das Ergebnis von 1,27 mm einer vergleichbaren Untersuchung (Marliere et

al. 2019). Die Forschungsgruppe von Marliere et al. hat dabei den gesamten Schädel von Planung und Operationsergebnis verglichen und dadurch Auswirkungen durch den Gipssockel vermieden. Ein Nachteil der Methode ist, dass die Frakturlinien nicht reproduzierbar simuliert werden können und zudem Artefakte im Bereich der Osteosynthesematerialien die Ergebnisse beeinflussen.

4.2.4 Klinische Konsequenz und Ausblick

Die digitalen Fortschritte ermöglichen eine effiziente Planungsmethode, die durch die virtuelle Durchführung eindeutige Vorteile hinsichtlich Visualisierung, Kommunikation und Techniksensibilität bietet. Die computerbasierte Operationssimulation erzeugt einen Mehrwert hinsichtlich der Eruiierung idealer Operationsstrecken und bereitet den Chirurgen auf mögliche anatomische Besonderheiten vor. Obwohl durch die Verwendung der digitalen Planung die technischen Auswirkungen der konventionellen Planung minimiert wurden, ist hinsichtlich der Präzision im Rahmen dieser Studie keine signifikante Überlegenheit seitens einer Planungsmethode zu verzeichnen. Beide Methoden zeigten signifikante Abweichungen zum möglichen Operationsergebnis, lieferten aber insgesamt klinisch akzeptable Ergebnisse. Deutlich wird, dass unabhängig von der Art der Operationsvorbereitung bei der Durchführung der Operation auf große Sorgfalt mit präziser Referenzkontrolle geachtet werden muss. Besonders vertikale Abweichungen und entsprechende Auswirkungen auf die weiteren Dimensionen können dadurch vermieden werden.

Die Vielzahl an Möglichkeiten zur virtuellen und individualisierten Gestaltung von intraoperativen Hilfsmitteln, die sich durch die Entwicklung und Verbesserung von Bildgebung, Planungssoftwares und 3D-Druck ergeben, sorgen aktuell für eine Infragestellung des klassischen Splintmodells wie es in dieser Studie Anwendung fand. Zinser et al. (2013) beschrieben schon vor knapp 10 Jahren die individualisierten Gestaltungsmöglichkeiten von digital erstellten Operationssplinten und bezeichneten diese aufgrund der hohen Operationsgenauigkeit als Paradigmenwechsel in der orthognathen Chirurgie. Zur selben Zeit entstanden erste digital geplante und 3D gedruckte *cutting guides* zur schablonierten Durchführung der Osteotomie sowie auf Grundlage der dreidimensionalen Bildgebung angepasste Titanplatten zur Osteosynthese (Li B et al. 2013; Philippe 2013; Seeberger et al. 2011). Seitdem zeigen sich vermehrt vielversprechende Möglichkeiten, die Präzision durch virtuelles Design von individuellen Hilfsmitteln signifikant zu steigern, um damit die Vorteile der digitalen Planung vollständig zu nutzen (Jones et al. 2022; Kraeima et al. 2016; Monteiro Carneiro et al. 2020) (Abbildung 51, Seite 77).

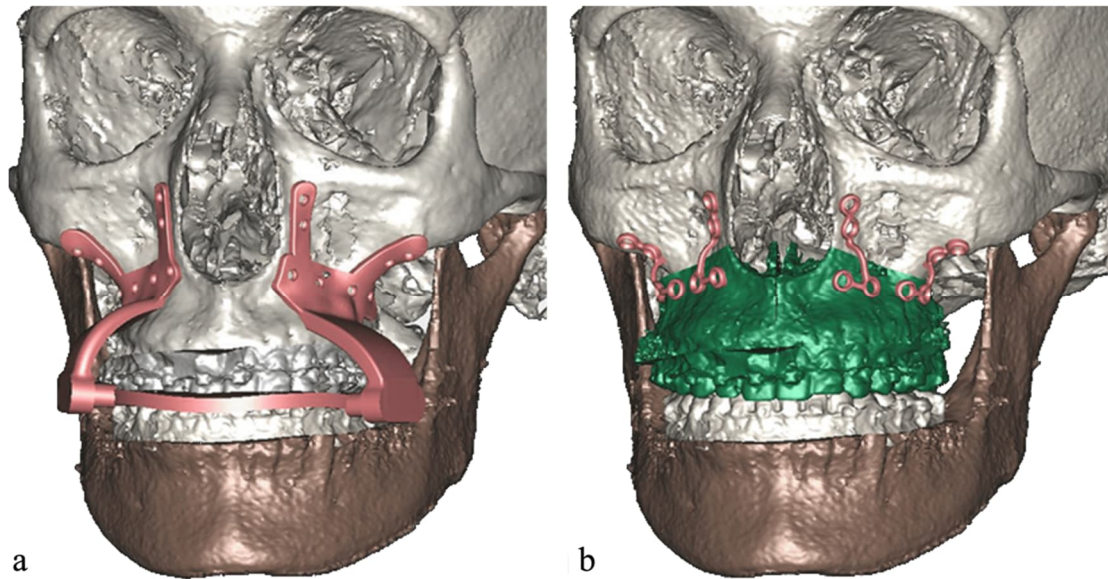


Abbildung 51: Individualisierte Osteotomieschablonen und Osteosyntheseplatten Neue digitale Planungsmethoden nutzen die dreidimensionalen Informationen der DVT-Aufnahme zur Anfertigung patientenbezogener Hilfestellungen. Auf zusätzliche Referenzkontrollen kann durch individualisierte Osteotomie- und Osteosyntheseschablonen (a) sowie passgenaue CAD/CAM Osteosyntheseplatten (b) verzichtet werden. Abbildung von Kraeima et al. (2016). Die Verwendung erfolgt mit freundlicher Genehmigung von Joep Kraeima (Universität Groningen) und dem Verlag Elsevier unter der Lizenznummer 5374891010368.

Die Möglichkeiten der Digitalisierung wurden im Rahmen dieser Studie noch nicht vollständig ausgeschöpft und stellen daher einen Ausblick für zukünftige Eingriffe dar. Eine Verbesserung der intraoperativen vertikalen und damit auch sagittalen sowie transversalen Kontrolle könnte so erreicht und vermutlich die Genauigkeit insgesamt gesteigert werden.

5 Zusammenfassung

Ausgeprägte Kieferfehlstellungen lassen sich im Erwachsenenalter nur noch chirurgisch therapieren und bedürfen daher einer interdisziplinären kieferorthopädisch-kieferchirurgischen Therapie. Um dabei die korrekte Position der Kiefer zueinander und zum restlichen Schädel zu erreichen, kann im Vorfeld eine Operationsplanung stattfinden, welche die Erstellung von Übertragungshilfen für den eigentlichen Eingriff ermöglicht. Trotz dieser sogenannten Operationssplinte sind Abweichungen zwischen Operationsplanung und -ergebnis bekannt, wobei neben der Operationstechnik auch die gewählte Planungsmethode einen Einfluss auf die Größe der Abweichungen haben kann. Inhalt der vorgelegten Arbeit ist daher eine Gegenüberstellung von zwei unterschiedlichen Planungsmethoden, die zwischen 2016 und 2019 in der Universitätsmedizin Göttingen angewendet wurden.

Prinzipiell lässt sich die Durchführung der Planung in eine konventionelle und eine digitale Variante unterteilen, wobei die konventionelle und auf Basis von Gipsmodellen stattfindende Planungsmethode über lange Zeit den Goldstandard darstellte. In Hinblick auf diese Methode sind jedoch Fehlerquellen bekannt, die sich auf die vielen zahntechnischen Schritte zurückführen lassen. Durch die Digitalisierung wird eine virtuelle Planung ermöglicht, die durch die Verwendung von dreidimensionalen Röntgenaufnahmen fehleranfällige Schritte vermeidet und dem Behandler eine verbesserte Darstellung bietet. Ob die Reduktion der Fehleranfälligkeit auch zu einer verbesserten Präzision führt, ist Gegenstand der hier vorgestellten zweiarmigen retrospektiven Beobachtungsstudie.

Zur Durchführung der virtuellen dreidimensionalen Gegenüberstellung von Operationsplanung und -ergebnis beider Planungsmethoden wurde zunächst eine Methode zur Digitalisierung der konventionellen Planung entwickelt. Die Abweichungen zwischen Planung und Operationsergebnis konnten anschließend für beiden Planungsmethoden durch Überlagerung der prä- und postoperativen DVT-Aufnahmen und eine eigens erstellte Kephalmetrie erfasst und anschließend statistisch ausgewertet werden. Zudem fand eine dreidimensionale Oberflächenanalyse statt. Da die Position des Unterkiefers im postoperativen Zustand nicht repositionierbar war, fand die Analyse nur für die Genauigkeit der Oberkieferverlagerung statt.

Je Methode wurden 26 Patienten inkludiert, wobei zunächst ausgeschlossen wurde, dass die Verteilung der Dysgnathien einen Einfluss auf das Ergebnis haben konnte. Während die Unterschiede zwischen den Planungsmethoden nicht signifikant waren, lagen alle Messungen signifikant außerhalb der erreichbaren Genauigkeit. Die geringste Erfolgsquote verzeichnete die vertikale Verlagerung und betrug 46 % bei digitaler und 73 % bei konventioneller Planung, wobei Erfolg als Abweichung < 2 mm definiert wurde. Die sagittalen Verlagerungen wurden mit Erfolgsquoten von 85 % (digital) und

89 % (konventionell) erreicht, standen jedoch bezüglich der Präzision in einem signifikanten Zusammenhang mit vertikalen Ungenauigkeiten. Die Oberflächenanalyse ergab eine Abweichung im quadratischen Mittel von 1,3 mm (konventionell) und 1,5 mm (digital).

Vertikale Fehler wurden im Zusammenhang mit den durchgeführten Planungs- und Operationstechniken bereits mehrfach beschrieben. Die bisherige Annahme, dass die konventionelle Planung diesbezüglich anfälliger ist, konnte nicht bestätigt werden. Die vertikale Führung des Operationssplintes ist unabhängig von der Herstellungstechnik mit noch einiger Unsicherheit verbunden und bedarf zusätzlicher intraoperativer Hilfen im Sinne von Referenzmessungen. Die Ergebnisse der vorgestellten Untersuchungen heben die Wichtigkeit dieser Kontrollen hervor, wobei die Erstellung von modifizierten und individualisierten CAD/CAM Splinten und Titanplatten ebenfalls einen Ausblick darstellt. Die digitale Planung stellt hinsichtlich der Genauigkeit eine gleichwertige Alternative zur konventionellen Planung dar, bietet aber zusätzlich durch das dreidimensionale Schädelmodell Vorteile in Hinblick auf Darstellung, Simulation, Kommunikation und Effizienz.

6 Literaturverzeichnis

Al-Hadi N, Chegini S, Klontzas ME, McKenny J, Heliotis M (2019): Patient expectations and satisfaction following orthognathic surgery. *Int J Oral Maxillofac Surg* 48, 211-216

Alkhayer A, Piffko J, Lippold C, Segatto E (2020): Accuracy of virtual planning in orthognathic surgery: a systematic review. *Head Face Med* 16, 34

Andrews LF (1972): The six keys to normal occlusion. *Am J Orthod* 62, 296-309

Andrews LF (2015): The 6-elements orthodontic philosophy: Treatment goals, classification, and rules for treating. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 148, 883-887

Andriola FO, Haas Junior OL, Guijarro-Martinez R, Hernandez-Alfaro F, Oliveira RB, Pagnoncelli RM, Swennen GR (2022): Computed tomography imaging superimposition protocols to assess outcomes in orthognathic surgery: a systematic review with comprehensive recommendations. *Dentomaxillofac Radiol* 51, 20210340

Angle EH: Treatment of Malocclusion of the Teeth and Fractures of the Maxillae, Angle's System. 6. Auflage; White Dental Manufacturing Company, Philadelphia 1900

Baherimoghaddam T, Oshagh M, Naseri N, Nasrbadi NI, Torkan S (2014): Changes in cephalometric variables after orthognathic surgery and their relationship to patients' quality of life and satisfaction. *J Oral Maxillofac Res* 5, e6

Baker SB, Goldstein JA, Seruya M (2012): Outcomes in computer-assisted surgical simulation for orthognathic surgery. *J Craniofac Surg* 23, 509-513

Bamber MA, Harris M (1995): The role of the occlusal wafer in orthognathic surgery; a comparison of thick and thin intermediate osteotomy wafers. *J Craniomaxillofac Surg* 23, 396-400

Barbenel JC, Paul PE, Khambay BS, Walker FS, Moos KF, Ayoub AF (2010): Errors in orthognathic surgery planning: the effect of inaccurate study model orientation. *Int J Oral Maxillofac Surg* 39, 1103-1108

Bell WH, Fonseca RJ, Kenneky JW, Levy BM (1975): Bone healing and revascularization after total maxillary osteotomy. *J Oral Surg* 33, 253-260

Bender R, Lange S (2001): Adjusting for multiple testing - when and how? *J Clin Epidemiol* 54, 343-349

Bengtsson M, Wall G, Greiff L, Rasmusson L (2017): Treatment outcome in orthognathic surgery - A prospective randomized blinded case-controlled comparison of planning accuracy in computer-assisted two- and three-dimensional planning techniques (part II). *J Craniomaxillofac Surg* 45, 1419-1424

Bethge LS, Ballon A, Mack M, Landes C (2015): Intraoperative condyle positioning by sonographic monitoring in orthognathic surgery verified by MRI. *J Craniomaxillofac Surg* 43, 71-80

Beyer JW, Lindauer SJ (1998): Evaluation of dental midline position. *Semin Orthod* 4, 146-152

Bland JM, Altman DG (1986): Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet* 1, 307-310

Borikanphanitphaisan T, Lin CH, Chen YA, Ko EW (2021): Accuracy of Mandible-First versus Maxilla-First Approach and of Thick versus Thin Splints for Skeletal Position after Two-Jaw Orthognathic Surgery. *Plast Reconstr Surg* 147, 421-431

Caprioglio A, Zucconi M, Calori G, Troiani V (1999): Habitual snoring, OSA and craniofacial modification. Orthodontic clinical and diagnostic aspects in a case control study. *Minerva Stomatol* 48, 125-137

Chen H, van Eijnatten M, Aarab G, Forouzanfar T, de Lange J, van der Stelt P, Lobbezoo F, Wolff J (2018): Accuracy of MDCT and CBCT in three-dimensional evaluation of the oropharynx morphology. *Eur J Orthod* 40, 58-64

Chin SJ, Wilde F, Neuhaus M, Schramm A, Gellrich NC, Rana M (2017): Accuracy of virtual surgical planning of orthognathic surgery with aid of CAD/CAM fabricated surgical splint - A novel 3D analyzing algorithm. *J Craniomaxillofac Surg* 45, 1962-1970

Choi, Kim JS, Cha JY, Hwang CJ (2016): Effect of malocclusion severity on oral health-related quality of life and food intake ability in a Korean population. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 149, 384-390

Choi JY, Choi JP, Baek SH (2009): Surgical accuracy of maxillary repositioning according to type of surgical movement in two-jaw surgery. *Angle Orthod* 79, 306-311

Chow W, He Z, Liu Y, Song J, Xu C, Luo E (2022): Intraoperative condylar positioning techniques on mandible in orthognathic surgery. *Orthod Craniofac Res* 25, 449-458

Cohen J (1988): Statistical power analysis for the Behavioral Sciences. *Curr Dir Psychol Sci* 2, 98-101

Costa AL, Barbosa BV, Perez-Gomes JP, Calle AJ, Santamaria MP, Lopes SC (2018): Influence of voxel size on the accuracy of linear measurements of the condyle in images of cone beam computed tomography: A pilot study. *J Clin Exp Dent* 10, e876-e882

Costa F, Robiony M, Toro C, Sembronio S, Polini F, Politi M (2008): Condylar positioning devices for orthognathic surgery: a literature review. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 106, 179-190

Cunningham SJ, Hunt NP, Feinmann C (1995): Psychological aspects of orthognathic surgery: a review of the literature. *Int J Adult Orthodon Orthognath Surg* 10, 159-172

Dal Pont G (1961): Retromolar osteotomy for the correction of prognathism. *J Oral Surg Anesth Hosp Dent Serv* 19, 42-47

Dot G, Rafflenbeul F, Kerbrat A, Rouch P, Gajny L, Schouman T (2021): Three-Dimensional Cephalometric Landmarking and Frankfort Horizontal Plane Construction: Reproducibility of Conventional and Novel Landmarks. *J Clin Med* 10, 5303

Dowling PA, Espeland L, Krogstad O, Stenvik A, Kelly A (1999): Duration of orthodontic treatment involving orthognathic surgery. *Int J Adult Orthodon Orthognath Surg* 14, 146-152

Dowling PA, Espeland L, Sandvik L, Mobarak KA, Hogevoid HE (2005): LeFort I maxillary advancement: 3-year stability and risk factors for relapse. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 128, 560-567

Eliliwi M, Bazina M, Palomo JM (2020): kVp, mA, and voxel size effect on 3D voxel-based superimposition. *Angle Orthod* 90, 269-277

Ellis E, 3rd (1999): Bimaxillary surgery using an intermediate splint to position the maxilla. *J Oral Maxillofac Surg* 57, 53-56

Ellis E, 3rd, Tharanon W, Gambrell K (1992): Accuracy of face-bow transfer: effect on surgical prediction and postsurgical result. *J Oral Maxillofac Surg* 50, 562-567

Epker BN, Wessberg GA (1982): Mechanisms of early skeletal release following surgical advancement of the mandible. *Br J Oral Surg* 20, 175-182

Espeland L, Dowling PA, Mobarak KA, Stenvik A (2008): Three-year stability of open-bite correction by 1-piece maxillary osteotomy. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 134, 60-66

Esperao PT, de Oliveira BH, de Oliveira Almeida MA, Kiyak HA, Miguel JA (2010): Oral health-related quality of life in orthognathic surgery patients. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 137, 790-795

Farronato G, Salvadori S, Nolet F, Zoia A, Farronato D (2014): Assessment of inter- and intra-operator cephalometric tracings on cone beam CT radiographs: comparison of the precision of the cone beam CT versus the latero-lateral radiograph tracing. *Prog Orthod* 15, 1

FDI World Dental Federation (2016): FDI's definition of oral health. <https://www.fdiworldental.org/fdis-definition-oral-health>; abgerufen am 21.12.2022

Ferguson JW, Luyk NH (1992): Control of vertical dimension during maxillary orthognathic surgery. A clinical trial comparing internal and external fixed reference points. *J Craniomaxillofac Surg* 20, 333-336

Gaber RM, Shaheen E, Falter B, Araya S, Politis C, Swennen GRJ, Jacobs R (2017): A Systematic Review to Uncover a Universal Protocol for Accuracy Assessment of 3-Dimensional Virtually Planned Orthognathic Surgery. *J Oral Maxillofac Surg* 75, 2430-2440

Gateno J, Forrest KK, Camp B (2001): A comparison of 3 methods of face-bow transfer recording: implications for orthognathic surgery. *J Oral Maxillofac Surg* 59, 635-640

Gateno J, Xia JJ, Teichgraeber JF (2011a): Effect of facial asymmetry on 2-dimensional and 3-dimensional cephalometric measurements. *J Oral Maxillofac Surg* 69, 655-662

Gateno J, Xia JJ, Teichgraeber JF (2011b): New 3-dimensional cephalometric analysis for orthognathic surgery. *J Oral Maxillofac Surg* 69, 606-622

Ghoneima A, Cho H, Farouk K, Kula K (2017): Accuracy and reliability of landmark-based, surface-based and voxel-based 3D cone-beam computed tomography superimposition methods. *Orthod Craniofac Res* 20, 227-236

Glick M, Williams DM, Kleinman DV, Vujcic M, Watt RG, Weyant RJ (2016): A new definition for oral health developed by the FDI World Dental Federation opens the door to a universal definition of oral health. *Int Dent J* 66, 322-324

Grubb J, Evans C (2007): Orthodontic management of dentofacial skeletal deformities. *Clin Plast Surg* 34, 403-415

Haas OL, Jr., Becker OE, de Oliveira RB (2014): Computer-aided planning in orthognathic surgery - systematic review. *Int J Oral Maxillofac Surg* 25, S0901-5027(14)00430-5

Han G, Li J, Wang S, Wang L, Zhou Y, Liu Y (2021): A comparison of voxel- and surface-based cone-beam computed tomography mandibular superimposition in adult orthodontic patients. *J Int Med Res* 49, 300060520982708

Hanafy M, Akoush Y, Abou-ElFetouh A, Mounir RM (2020): Precision of orthognathic digital plan transfer using patient-specific cutting guides and osteosynthesis versus mixed analogue-digitally planned surgery: a randomized controlled clinical trial. *Int J Oral Maxillofac Surg* 49, 62-68

Hasund AP, Jenatschke F (Hrsg.): *Klinische Kephalometrie für die Bergen-Technik. Kieferorthopädische Abteilung des zahnärztlichen Institutes der Universität in Bergen, Bergen 1973*

Hernandez-Alfaro F, Guijarro-Martinez R (2013): New protocol for three-dimensional surgical planning and CAD/CAM splint generation in orthognathic surgery: an in vitro and in vivo study. *Int J Oral Maxillofac Surg* 42, 1547-1556

Hernandez-Alfaro F, Guijarro-Martinez R, Peiro-Guijarro MA (2014): Surgery first in orthognathic surgery: what have we learned? A comprehensive workflow based on 45 consecutive cases. *J Oral Maxillofac Surg* 72, 376-390

Ho CT, Lin HH, Liou EJ, Lo LJ (2017): Three-dimensional surgical simulation improves the planning for correction of facial prognathism and asymmetry: A qualitative and quantitative study. *Sci Rep* 7, 40423

Hofmann E, Fimmers R, Schmid M, Hirschfelder U, Detterbeck A, Hertrich K (2016): Landmarks of the Frankfort horizontal plane : Reliability in a three-dimensional Cartesian coordinate system. *J Orofac Orthop* 77, 373-383

Holm S (1979): A Simple Sequentially Rejective Multiple Test Procedure. *Scand J Stat* 6, 65-70

Holte MB, Diaconu A, Ingerslev J, Thorn JJ, Pinholt EM (2022): Virtual surgical analysis: long-term cone beam computed tomography stability assessment of segmental bimaxillary surgery. *Int J Oral Maxillofac Surg* 51, 1188-1196

Hsu SS, Gateno J, Bell RB, Hirsch DL, Markiewicz MR, Teichgraber JF, Zhou X, Xia JJ (2013): Accuracy of a computer-aided surgical simulation protocol for orthognathic surgery: a prospective multicenter study. *J Oral Maxillofac Surg* 71, 128-142

Hwang SJ, Haers PE, Zimmermann A, Oechslin C, Seifert B, Sailer HF (2000): Surgical risk factors for condylar resorption after orthognathic surgery. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 89, 542-552

Iino M, Niitsu K, Horiuchi T, Matsushima R, Hamada Y, Ishii H, Kondoh T, Seto K (2002): Accuracy of maxillary positioning during orthognathic surgery: comparison of 2 external reference points. *Asian Journal of Oral and Maxillofacial Surgery* 14, 61-69

Ireland AJ, Cunningham SJ, Petrie A, Cobourne MT, Acharya P, Sandy JR, Hunt NP (2014): An index of orthognathic functional treatment need (IOFTN). *J Orthod* 41, 77-83

Jabar N, Robinson W, Goto TK, Khambay BS (2015): The validity of using surface meshes for evaluation of three-dimensional maxillary and mandibular surgical changes. *Int J Oral Maxillofac Surg* 44, 914-920

Jacobson A (1975): The "Wits" appraisal of jaw disharmony. *Am J Orthod* 67, 125-138

Jacobson A (1990): Planning for orthognathic surgery - art or science? *Int J Adult Orthodon Orthognath Surg* 5, 217-224

Jacobson R, Sarver DM (2002): The predictability of maxillary repositioning in LeFort I orthognathic surgery. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 122, 142-154

Jager A, Zittlau O, Luhr HG (1994): The differential diagnostic value of skeletal, dental and soft-tissue analyses in the planning of orthodontic-oral surgical therapy. A retrospective study of treated patients with skeletal Angle class III. *Fortschr Kieferorthop* 55, 269-278

Jeon J, Kim Y, Kim J, Kang H, Ji H, Son W (2013): New bimaxillary orthognathic surgery planning and model surgery based on the concept of six degrees of freedom. *Korean J Orthod* 43, 42-52

Jones JP, Amarista FJ, Jeske NA, Szalay D, Ellis E, 3rd (2022): Comparison of the Accuracy of Maxillary Positioning With Interim Splints Versus Patient-Specific Guides and Plates in Executing a Virtual Bimaxillary Surgical Plan. *J Oral Maxillofac Surg* 80, 827-837

Kim CS, Lee H (2022): Comparison of actual amount of movement with surgical treatment objective in the orthognathic maxillary repositioning. *J Stomatol Oral Maxillofac Surg* 123, e85-e89

Kim CS, Lee SC, Kyung HM, Park HS, Kwon TG (2014): Stability of mandibular setback surgery with and without presurgical orthodontics. *J Oral Maxillofac Surg* 72, 779-787

Kiyak HA, West RA, Hohl T, McNeill RW (1982): The psychological impact of orthognathic surgery: a 9-month follow-up. *Am J Orthod* 81, 404-412

Kokich VO, Jr., Kiyak HA, Shapiro PA (1999): Comparing the perception of dentists and lay people to altered dental esthetics. *J Esthet Dent* 11, 311-324

Kraeima J, Jansma J, Schepers RH (2016): Splintless surgery: does patient-specific CAD-CAM osteosynthesis improve accuracy of Le Fort I osteotomy? *Br J Oral Maxillofac Surg* 54, 1085-1089

Kretschmer WB, Zoder W, Baciut G, Bacuit M, Wangerin K (2009): Accuracy of maxillary positioning in bimaxillary surgery. *Br J Oral Maxillofac Surg* 47, 446-449

Kubein D, Luhr HG, Jäger A, Schauer HW, von Ehrlich V (1987): Diagnostik der Relation der Kiefergelenke zur Okklusion. Intraoperatives Kontrollverfahren zur Optimierung kieferorthopädisch-chirurgischer Eingriffe in Verbindung mit der Plattenosteosynthese. *Fortschr Kieferorthop* 48, 267-275

Kubein-Meesenburg D: Die kraniale Grenzfunktion des stomatognathen Systems des Menschen. Hanser, München 1985

Kwon TG, Mori Y, Minami K, Lee SH (2002): Reproducibility of maxillary positioning in Le Fort I osteotomy: a 3-dimensional evaluation. *J Oral Maxillofac Surg* 60, 287-293

Kwon TG, Choi JW, Kyung HM, Park HS (2014): Accuracy of maxillary repositioning in two-jaw surgery with conventional articulator model surgery versus virtual model surgery. *Int J Oral Maxillofac Surg* 43, 732-738

Lagorsse A, Gebeile-Chauty S (2018): Does gender make a difference in orthodontics? A literature review. *Orthod Fr* 89, 157-168

Lagravere MO, Low C, Flores-Mir C, Chung R, Carey JP, Heo G, Major PW (2010): Intraexaminer and interexaminer reliabilities of landmark identification on digitized lateral cephalograms and formatted 3-dimensional cone-beam computerized tomography images. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 137, 598-604

Lee M, Kanavakis G, Miner RM (2015): Newly defined landmarks for a three-dimensionally based cephalometric analysis: a retrospective cone-beam computed tomography scan review. *Angle Orthod* 85, 3-10

Li B, Zhang L, Sun H, Yuan J, Shen SG, Wang X (2013): A novel method of computer aided orthognathic surgery using individual CAD/CAM templates: a combination of osteotomy and repositioning guides. *Br J Oral Maxillofac Surg* 51, e239-244

Li B, Shen S, Jiang W, Li J, Jiang T, Xia JJ, Shen SG, Wang X (2017): A new approach of splint-less orthognathic surgery using a personalized orthognathic surgical guide system: A preliminary study. *Int J Oral Maxillofac Surg* 46, 1298-1305

Li C, Teixeira H, Tanna N, Zheng Z, Chen SHY, Zou M, Chung CH (2021): The Reliability of Two- and Three-Dimensional Cephalometric Measurements: A CBCT Study. *Diagnostics (Basel)* 11, 2292

Liebregts J, Baan F, van Lierop P, de Koning M, Berge S, Maal T, Xi T (2019): One-year postoperative skeletal stability of 3D planned bimaxillary osteotomies: maxilla-first versus mandible-first surgery. *Sci Rep* 9, 3000

Lin HH, Chuang YF, Weng JL, Lo LJ (2015): Comparative validity and reproducibility study of various landmark-oriented reference planes in 3-dimensional computed tomographic analysis for patients receiving orthognathic surgery. *PLoS One* 10, e0117604

Lin HH, Chiang WC, Lo LJ, Sheng-Pin Hsu S, Wang CH, Wan SY (2013): Artifact-resistant superimposition of digital dental models and cone-beam computed tomography images. *J Oral Maxillofac Surg* 71, 1933-1947

Lisboa Cde O, Masterson D, da Motta AF, Motta AT (2015): Reliability and reproducibility of three-dimensional cephalometric landmarks using CBCT: a systematic review. *J Appl Oral Sci* 23, 112-119

Lotzmann U (1990): Considerations of precision and consistence of mandibular transverse hinge axis. *ZWR* 99, 372-379

Ludlow JB, Gubler M, Cevidanes L, Mol A (2009): Precision of cephalometric landmark identification: cone-beam computed tomography vs conventional cephalometric views. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 136, 312 e311-310

Luhr HG: Skelettverlagernde Operationen zur Harmonisierung des Gesichtsprofils - Probleme der stabilen Fixation von Osteotomiesegmenten. In: Pfeifer G (Hrsg.): Die Ästhetik von Form und Funktion in der plastischen und Wiederherstellungschirurgie. Springer, Berlin 1985, 87-92

Luhr HG (1986): Discussion: Miniplate Fixation of Le Fort I Osteotomies: by Harvey M. Rosen, M.D., D.M.D. *Plast Reconstr Surg* 78, 755

Luhr HG (1989): The significance of condylar position using rigid fixation in orthognathic surgery. *Clin Plast Surg* 16, 147-156

Luhr HG, Kubein-Meesenburg D (1989): Rigid skeletal fixation in maxillary osteotomies. Intraoperative control of condylar position. *Clin Plast Surg* 16, 157-163

Luther F, Morris DO, Hart C (2003): Orthodontic preparation for orthognathic surgery: how long does it take and why? A retrospective study. *Br J Oral Maxillofac Surg* 41, 401-406

Marliere DA, Demetrio MS, Schmitt AR, Lovisi CB, Asprino L, Chaves-Netto HD (2019): Accuracy between virtual surgical planning and actual outcomes in orthognathic surgery by iterative closest point algorithm and color maps: A retrospective cohort study. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal* 24, e243-e253

McCance AM, Moss JP, James DR (1992): Le Fort I maxillary osteotomy: is it possible to accurately produce planned pre-operative movements? *Br J Oral Maxillofac Surg* 30, 369-376

McNamara JA, Jr. (1984): A method of cephalometric evaluation. *Am J Orthod* 86, 449-469

McNamara JA, Jr., Seligman DA, Okeson JP (1995): Occlusion, Orthodontic treatment, and temporomandibular disorders: a review. *J Orofac Pain* 9, 73-90

Modig M, Andersson L, Wardh I (2006): Patients' perception of improvement after orthognathic surgery: pilot study. *Br J Oral Maxillofac Surg* 44, 24-27

Monteiro Carneiro NC, Oliveira DV, Real FH, Karla da Silva Tabosa A, Carneiro Junior JT (2020): A new model of customized maxillary guide for orthognathic surgery: Precision analysis. *J Craniomaxillofac Surg* 48, 1119-1125

Mtaya M, Brudvik P, Astrom AN (2009): Prevalence of malocclusion and its relationship with socio-demographic factors, dental caries, and oral hygiene in 12- to 14-year-old Tanzanian schoolchildren. *Eur J Orthod* 31, 467-476

Naini FB, Gill DS (Hrsg.): Orthognathic surgery: principles, planning and practice. Wiley-Blackwell, Hoboken 2017

Neubert J, Bitter K, Somsiri S (1988): Refined intraoperative repositioning of the osteotomized maxilla in relation to the skull and TMJ. *J Craniomaxillofac Surg* 16, 8-12

O'Malley AM, Milosevic A (2000): Comparison of three facebow/semi-adjustable articulator systems for planning orthognathic surgery. *Br J Oral Maxillofac Surg* 38, 185-190

Obwegeser H (1965): Eingriffe am Oberkiefer zur Korrektur des progener Zustandsbildes. *Swiss Dent J* 75, 365-374

Olszewski R, Reychler H (2004): Limitations of orthognathic model surgery: theoretical and practical implications. *Rev Stomatol Chir Maxillofac* 105, 165-169

Padwa BL, Kaiser MO, Kaban LB (1997): Occlusal cant in the frontal plane as a reflection of facial asymmetry. *J Oral Maxillofac Surg* 55, 811-816

Parton AL, Tong DC, De Silva HL, Farella M, De Silva RK (2011): A nine-year review of orthognathic surgery at the University of Otago. *N Z Dent J* 107, 117-120

Pelo S, Gasparini G, Garagiola U, Cordaro M, Di Nardo F, Staderini E, Patini R, de Angelis P, D'Amato G, Saponaro G, et al. (2017): Surgery-first orthognathic approach vs traditional orthognathic approach: Oral health-related quality of life assessed with 2 questionnaires. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 152, 250-254

Philippe B (2013): Custom-made prefabricated titanium miniplates in Le Fort I osteotomies: principles, procedure and clinical insights. *Int J Oral Maxillofac Surg* 42, 1001-1006

Pietila R, Tolvanen M, Peltomaki T, Svedstrom-Oristo AL (2017): Symptoms in the masticatory system and related quality of life in prospective orthognathic patients. *Acta Odontol Scand* 75, 402-406

Polido WD, Ellis E, 3rd, Sinn DP (1991): An assessment of the predictability of maxillary repositioning. *Int J Oral Maxillofac Surg* 20, 349-352

Proffit WR, Phillips C, Dann Ct (1990): Who seeks surgical-orthodontic treatment? *Int J Adult Orthodon Orthognath Surg* 5, 153-160

Proffit WR, Turvey TA, Phillips C (1996): Orthognathic surgery: a hierarchy of stability. *Int J Adult Orthodon Orthognath Surg* 11, 191-204

Quast A, Santander P, Trautmann J, Moser N, Schliephake H, Meyer-Marcotty P (2020): A new approach in three dimensions to define pre- and intraoperative condyle-fossa relationships in orthognathic surgery - is there an effect of general anaesthesia on condylar position? *Int J Oral Maxillofac Surg* 49, 1303-1310

Quast A, Santander P, Witt D, Damm A, Moser N, Schliephake H, Meyer-Marcotty P (2019): Traditional face-bow transfer versus three-dimensional virtual reconstruction in orthognathic surgery. *Int J Oral Maxillofac Surg* 48, 347-354

Quast A, Santander P, Leding J, Klenke D, Moser N, Schliephake H, Meyer-Marcotty P (2021): Orthodontic incisor decompensation in orthognathic therapy-success and efficiency in three dimensions. *Clin Oral Investig* 25, 4001-4010

Resnick CM, Inverso G, Wrzosek M, Padwa BL, Kaban LB, Peacock ZS (2016): Is There a Difference in Cost Between Standard and Virtual Surgical Planning for Orthognathic Surgery? *J Oral Maxillofac Surg* 74, 1827-1833

Resnick CM, Kim S, Yorlets RR, Calabrese CE, Peacock ZS, Kaban LB (2018): Evaluation of Andrews' Analysis as a Predictor of Ideal Sagittal Maxillary Positioning in Orthognathic Surgery. *J Oral Maxillofac Surg* 76, 2169-2176

Reyneke JP, Ferretti C (2002): Intraoperative diagnosis of condylar sag after bilateral sagittal split ramus osteotomy. *Br J Oral Maxillofac Surg* 40, 285-292

Rinchuse DJ, Kandasamy S (2006): Centric relation: A historical and contemporary orthodontic perspective. *J Am Dent Assoc* 137, 494-501

Ritto FG, Schmitt ARM, Pimentel T, Canellas JV, Medeiros PJ (2018): Comparison of the accuracy of maxillary position between conventional model surgery and virtual surgical planning. *Int J Oral Maxillofac Surg* 47, 160-166

Schweska R, Engelke D, Zimmer B, Kubein-Meesenburg D (1991): Positioning control of the upper incisors in orthognathic surgery. Pre-operative planning with the Model Positioning Device and intra-operative application of the Sandwich Splint. *Eur J Orthod* 13, 367-371

Schweska-Polly R (2004): Fortschritte in der gelenkbezüglichen kieferorthopädisch-kieferchirurgischen Therapie. *Inf Orthod Kieferorthop* 36, 205-218

Schweska-Polly R, Kubein-Meesenburg D, Luhr HG (1998): Techniques for achieving three-dimensional positioning of the maxilla applied in conjunction with the Gottingen concept. *Int J Adult Orthodon Orthognath Surg* 13, 248-258

Schweska-Polly R, Kubein-Meesenburg D, Luhr HG (1999): Ergebnisse der Anwendung des Göttinger Konzepts zur räumlichen Einstellung des Oberkiefers nach Umstellungsosteotomien. *Oral Maxillofac Surg* 3, 123-130

Schweska-Polly R, Roese D, Kuhnt D, Hille KH (1993): Application of the model-positioning appliance for three-dimensional positioning of the maxilla in cast surgery. *Int J Adult Orthodon Orthognath Surg* 8, 25-31

Seeberger R, Scherfler S, Freier K, Thiele O (2011): Use of stereolithographic cutting guides in corrective (wedge) Lefort I osteotomy. *Br J Oral Maxillofac Surg* 49, e20-21

Sessler DI, Imrey PB (2015): Clinical Research Methodology 2: Observational Clinical Research. *Anesth Analg* 121, 1043-1051

Severt TR, Proffit WR (1997): The prevalence of facial asymmetry in the dentofacial deformities population at the University of North Carolina. *Int J Adult Orthodon Orthognath Surg* 12, 171-176

Shaheen E, Shujaat S, Saeed T, Jacobs R, Politis C (2019): Three-dimensional planning accuracy and follow-up protocol in orthognathic surgery: a validation study. *Int J Oral Maxillofac Surg* 48, 71-76

Sharifi A, Jones R, Ayoub A, Moos K, Walker F, Khambay B, McHugh S (2008): How accurate is model planning for orthognathic surgery? *Int J Oral Maxillofac Surg* 37, 1089-1093

Shqaidef A, Ayoub AF, Khambay BS (2014): How accurate are rapid prototyped (RP) final orthognathic surgical wafers? A pilot study. *Br J Oral Maxillofac Surg* 52, 609-614

Slavnic S, Marcusson A (2010): Duration of orthodontic treatment in conjunction with orthognathic surgery. *Swed Dent J* 34, 159-166

Soh CL, Narayanan V (2013): Quality of life assessment in patients with dentofacial deformity undergoing orthognathic surgery - a systematic review. *Int J Oral Maxillofac Surg* 42, 974-980

Spin-Neto R, Costa C, Salgado DM, Zambrana NR, Gotfredsen E, Wenzel A (2018): Patient movement characteristics and the impact on CBCT image quality and interpretability. *Dentomaxillofac Radiol* 47, 20170216

Stanchina R, Ellis E, 3rd, Gallo WJ, Fonseca RJ (1988): A comparison of two measures for repositioning the maxilla during orthognathic surgery. *Int J Adult Orthodon Orthognath Surg* 3, 149-154

Stokbro K, Aagaard E, Torkov P, Bell RB, Thygesen T (2014): Virtual planning in orthognathic surgery. *Int J Oral Maxillofac Surg* 43, 957-965

Sukegawa S, Kanno T, Manabe Y, Matsumoto K, Sukegawa-Takahashi Y, Masui M, Furuki Y (2018): Is the removal of osteosynthesis plates after orthognathic surgery necessary? Retrospective long-term follow-up study. *Int J Oral Maxillofac Surg* 47, 1581-1586

Sun Y, Luebbbers HT, Agbaje JO, Schepers S, Vrielinck L, Lambrechts I, Politis C (2013): Accuracy of upper jaw positioning with intermediate splint fabrication after virtual planning in bimaxillary orthognathic surgery. *J Craniofac Surg* 24, 1871-1876

Swennen G: 3D Virtual Treatment Planning of Orthognathic Surgery: A Step-by-Step Approach for Orthodontists and Surgeons. 1. Auflage; Springer, Berlin 2017

Swennen GRJ, Schutyser F, Hausamen J-E (Hrsg.): Three-dimensional cephalometry: a color atlas and manual. 1. Auflage; Springer, New York 2005

Tamme JA, Rohnen M, Gassling V, Ciesielski R, Fischer-Brandies H, Wiltfang J, Koos B (2017): Correlation of general and oral health-related quality of life in malocclusion patients treated with a combined orthodontic and maxillofacial surgical approach. *J Craniofac Surg* 45, 1971-1979

Thiesen G, Gribel BF, Freitas MP (2015): Facial asymmetry: a current review. *Dental Press J Orthod* 20, 110-125

Trauner R, Obwegeser H (1957): The surgical correction of mandibular prognathism and retrognathia with consideration of genioplasty. I. Surgical procedures to correct mandibular prognathism and reshaping of the chin. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 10, 677-689

Van Sickels JE, Larsen AJ, Triplett RG (1986): Predictability of maxillary surgery: a comparison of internal and external reference marks. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 61, 542-545

Van Vlijmen OJ, Maal T, Berge SJ, Bronkhorst EM, Katsaros C, Kuijpers-Jagtman AM (2010): A comparison between 2D and 3D cephalometry on CBCT scans of human skulls. *Int J Oral Maxillofac Surg* 39, 156-160

Walker F, Ayoub AF, Moos KF, Barbenel J (2008): Face bow and articulator for planning orthognathic surgery: 1 face bow. *Br J Oral Maxillofac Surg* 46, 567-572

Wallen T, Bloomquist D (1986): The clinical examination: is it more important than cephalometric analysis in surgical orthodontics? *Int J Adult Orthodon Orthognath Surg* 1, 179-191

Wang Y, Wang P, Xiang X, Xu H, Tang Y, Zhou Y, Bai D, Xue C (2022): Effect of occlusal coverage depths on the precision of 3D-printed orthognathic surgical splints. *BMC Oral Health* 22, 218

Wassmund M: *Lehrbuch der praktischen Chirurgie des Mundes und der Kiefer*. H. Meusser, Leipzig 1935

Weiss R, 2nd, Read-Fuller A (2019): Cone Beam Computed Tomography in Oral and Maxillofacial Surgery: An Evidence-Based Review. *Dent J (Basel)* 7, 52

Williams AC, Shah H, Sandy JR, Travess HC (2005): Patients' motivations for treatment and their experiences of orthodontic preparation for orthognathic surgery. *J Orthod* 32, 191-202

Xia JJ, Gateno J, Teichgraeber JF, Yuan P, Chen KC, Li J, Zhang X, Tang Z, Alfi DM (2015): Algorithm for planning a double-jaw orthognathic surgery using a computer-aided surgical simulation (CASS) protocol. Part 1: planning sequence. *Int J Oral Maxillofac Surg* 44, 1431-1440

Zhang N, Liu S, Hu Z, Hu J, Zhu S, Li Y (2016): Accuracy of virtual surgical planning in two-jaw orthognathic surgery: comparison of planned and actual results. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol* 122, 143-151

Zhang YF, Xiao L, Li J, Peng YR, Zhao Z (2010): Young people's esthetic perception of dental midline deviation. *Angle Orthod* 80, 515-520

Zingler S, Hakim E, Finke D, Brunner M, Saure D, Hoffmann J, Lux CJ, Erber R, Seeberger R (2017): Surgery-first approach in orthognathic surgery: Psychological and biological aspects - A prospective cohort study. *J Craniomaxillofac Surg* 45, 1293-1301

Zinser MJ, Sailer HF, Ritter L, Braumann B, Maegele M, Zoller JE (2013): A paradigm shift in orthognathic surgery? A comparison of navigation, computer-aided designed/computer-aided manufactured splints, and "classic" intermaxillary splints to surgical transfer of virtual orthognathic planning. *J Oral Maxillofac Surg* 71, 2151 e2151-2121

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. med. dent. Philipp Meyer-Marcotty für die Überlassung des Forschungsthemas und die stets exzellente Betreuung. Auch für die Unterstützung und Ko-Betreuung von Prof. Dr. med. Dr. med. dent. Henning Schliephake möchte ich mich in diesem Rahmen herzlich bedanken.

Frau PD Dr. med. dent. Anja Quast möchte ich meinen Dank für ihre Hilfsbereitschaft und ihre überaus engagierte Betreuung während der gesamten Durchführung dieser Arbeit aussprechen. Sie sowie die gesamte Arbeitsgruppe Dysgnathie waren für die Umsetzung dieser Forschungsarbeit eine große Unterstützung.

Meinen Arbeitskollegen der Poliklinik für Kieferorthopädie der Universitätsmedizin Göttingen bin ich für ihre Bemühungen, Anregungen und produktiven Gedanken ebenfalls sehr dankbar.