

Aus der Poliklinik für Kieferorthopädie
der Ludwig-Maximilians-Universität München
Direktion: Prof. Dr. med. dent. Ingrid Rudzki-Janson

**Individuelle dreidimensionale Simulation von
Weichteilveränderungen
im Gesichtsbereich –
eine Finite-Elemente-Studie**

Dissertation
zum Erwerb des Doktorgrades der Zahnheilkunde
an der Medizinischen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von
Anne-Kathrin Heine
aus Hoyerswerda
2005

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter: Prof. Dr. med. dent. Ingrid Rudzki-Janson

Mitberichterstatter: Prof. Dr. Chr. Benz

Prof. Dr. M. Shakibaei

Mitbetreuung durch den

promovierten Mitarbeiter: Dr.med. Dr. med.dent. Christof Holberg

Dekan: Prof. Dr. med. D. Reinhardt

Tag der mündlichen Prüfung: 26.04.2005

**Meinen Eltern
in Dankbarkeit
gewidmet**

Inhalt

1. Einleitung	1
2. Historie und Literaturübersicht	3
2.1. Finite-Elemente-Methode	3
2.1.1. Historische Entwicklung	3
2.1.2. Prinzip der Finiten-Elemente-Methode	3
2.1.3. Finite-Elemente-Methode in Ingenieurwissenschaften und Medizin	4
2.2. Gesichtserfassung in der Medizin	6
2.2.1. Zweidimensionale Gesichtserfassung	6
2.2.1.1. Fotos	6
2.2.1.2. Stereophotogrammetrie	7
2.2.1.3. Röntgenbilder	8
2.2.1.4. Dentofacial Planner	8
2.2.2. Dreidimensionale Gesichtserfassung	9
2.2.2.1. Laser	9
2.2.2.2. Strukturiertes Licht	10
2.2.2.3. Holographie	10
2.3. Weichteilproportionen	11
2.3.1. Ästhetik und Proportion in Kunst und Medizin	11
2.3.2. Proportionskanon der ägyptischen Kunst	11
2.3.3. Proportion im Mittelalter	14
2.3.4. Die Moderne	16
2.4. Weichteilvorhersage	16
2.4.1. Operationsmethodik	16
2.4.2. Zweidimensionale Prognosestudien	17
2.4.3. Dentofacial Planner	19
Wissenschaftliche Fragestellung	20
3. Methodik	21
3.1. Probanden	21
3.2. Digitales Messverfahren	22
3.2.1. Messaufbau	22
3.2.2. Messablauf	23
3.2.3. Datenaufbereitung	23
3.2.4. Datenbearbeitung	23
3.3. Dentofacial Planner	27
3.3.1. Datenerhebung	27
3.3.2. Durchführung	27
3.3.3. Kephalometrische Vermessungspunkte	29

3.4. Datenauswertung	34
4. Ergebnisse	35
4.1. Finite-Elemente-Modell	35
4.1.1. Abweichung der Prognose vom postoperativen Gesicht	35
4.1.2. Regionale Abweichungen	36
4.1.3. Dorsum Nasalis	37
4.1.4. Pronasale	38
4.1.5. Subnasale	39
4.1.6. Labrale superius	40
4.1.7. Labrale inferius	41
4.1.8. Labiomentalfalte	42
4.1.9. Weichteilpogonion	43
4.1.10. Weichteilmenton	44
4.1.11. Wange	45
4.2. Dentofacial Planner	45
4.2.1. Abweichung der Prognose vom postoperativen Gesicht	45
4.2.2. Regionale Abweichung	48
4.2.3. Dorsum Nasalis	48
4.2.4. Pronasale	49
4.2.5. Subnasale	50
4.2.6. Labrale superius	51
4.2.7. Labrale inferius	52
4.2.8. Labiomentalfalte	53
4.2.9. Weichteilpogonion	54
4.2.10. Weichteilmenton	55
4.3. Finite-Elemente-Modell und Dentofacial Planner	55
4.4. Klinischer Fall	58
4.5. Gegenüberstellung der Weichteilprognosen	68
5. Diskussion	73
5.1. Problematik bei Weichteilvorhersagen	73
5.2. Finite-Elemente-Modell und Dentofacial Planner 2 Verfahren im Vergleich	74
5.2.1. Problematische Bereiche bei Weichteilprognosen	75
5.2.1.1. Finite-Elemente-Modell	75
5.2.1.2. Dentofacial Planner	75
5.2.2. Unproblematische Bereiche bei der Vorhersage von Weichteil- veränderungen	77
5.2.2.1. Finite-Elemente-Modell	77
5.2.2.2. Dentofacial Planner	78
5.2.3. Abweichungen zwischen FE-Modell und Dentofacial Planner	79
5.3. Fehlerbetrachtung	80
5.3.1. Genauigkeit der Scanvorgangs	80

5.3.2. Bearbeitung und Erstellung der Simulation am Dentofacial Planner Plus	80
5.3.3. Bearbeitung des Finiten-Elemente-Modells	81
5.3.4. Erstellung von Fotos	81
5.3.5. Operationsumsetzung	82
5.4. Messaufwand	82
5.5. Prognose	82
6. Zusammenfassung	84
7. Literaturverzeichnis	86
8. Anhang	92
8.1. Abbildungsverzeichnis	92

1. Einleitung

Bei der kombiniert kieferorthopädisch-kieferchirurgischen Behandlung von Dysgnathien wird neben einer funktionellen Verbesserung auch eine Optimierung der fazialen Weichgewebsästhetik angestrebt [3, 4, 6, 8]. Zur Realisierung dieses individuellen und ästhetischen Optimums für den Patienten muss bei der präoperativen Behandlungsplanung die Prognose der Weichteile berücksichtigt werden [59].

Diese Veränderungen können Auswirkungen auf die Eigen- und Fremdwahrnehmung des Einzelnen haben. Häufig haben die Patienten eine hohe Erwartungshaltung an den korrigierenden Eingriff. Trotz objektiven Operationserfolges kann die subjektive Zufriedenheit des Patienten eingeschränkt sein. Anhand verschiedener Prognoseverfahren ist es möglich, dem Patienten den möglichen Operationserfolg zu visualisieren.

Als Standardverfahren zur Prognose von Weichteilveränderungen werden heutzutage zweidimensionale Simulationen verwendet, deren Vorhersagegenauigkeit von vielen Autoren sehr kritisch betrachtet werden [1, 15, 38]. Ein Beispiel hierfür ist der Dentofacial Planner der Firma Dentofacial Software Inc. Toronto. Mit zweidimensionalen Prognoseverfahren lassen sich Weichteilveränderungen lediglich im Profil darstellen. Somit ist die Aussagefähigkeit bezüglich der Position von Nase, Oberlippe, Wange und Hals begrenzt.

Es wurde ein neues Verfahren entwickelt, welches die Erstellung eines individuellen Simulationsmodells und die dreidimensionale Prognose der fazialen Weichteile ermöglicht. Die Grundlage für dieses dreidimensionale Verfahren ist die Finite-Elemente-Methode [12, 43, 44]. Diese Methode basiert auf der Zerlegung einer komplizierten Gestalt eines Körpers in kleine, einfach geformte Teile.

Motoyoshi et al. [43, 44] stellte bereits 1992 ein einfaches Finite-Element-Modell vor, welches die Individualität des Gesichtes nur annähernd zeigte. Das in diesem Projekt neu entwickelte dreidimensionale Finite-Elemente-Modell generiert geometrisch genaue, hochdifferenzierte Simulationsmodelle. Die Datenakquisition erfolgt digital mit einem hochauflösenden 3D-Scanner, der kontaktlos mit einem Laser die Gesichtsoberfläche erfasst. Eine zusätzliche Strahlenexposition ist für den Patienten nicht erforderlich.

Vorteil dieser computergestützten, dreidimensionalen Simulationsmodelle ist die Beurteilung der Veränderungen von Weichteilen nicht nur im Profil, sondern auch im Halbprofil, sowie die Darstellung der ästhetisch wichtigen Veränderungen im Bereich der Nasenspitze, Nasenflügel, der Nasiolabialfalten und der Wangenbereiche [27].

In der folgenden Arbeit wird das computergestützte Verfahren zur Erstellung von individuellen, dreidimensionalen Simulationsmodellen auf die Anwendbarkeit und Verlässlichkeit der Prognose von Weichteilveränderungen im Gesichtsbereich untersucht und mit den Prognoseergebnissen des Dentofacial Planners verglichen.

2. Historie und Literaturübersicht

Bei vielen Patienten, die sich einer Dysgnathie Operation unterziehen, spielt neben der funktionalen Verbesserung die ästhetische Veränderung des Gesichtsprofils eine bedeutende Rolle. Das postoperative Erscheinungsbild hängt entscheidend vom Verhalten der Weichteile ab. Mit derzeitigen Methoden sind kaum verlässliche Prognosen des Weichteilprofils vorhersagbar. Das Schönheitsempfinden ist schwer objektivierbar. In der Historie wurden Schönheit, Größe, Form und faziale Harmonie untersucht und Proportionslehren entwickelt.

2.1. Finite-Elemente-Methode

2.1.1. Historische Entwicklung

Die Finite-Elemente-Methode (FEM) wird schon seit circa 25 Jahren im Ingenieurwesen angewendet. Die Pioniere bei der Entwicklung und Anwendung der Finite-Elemente-Methode waren die Hochschulen und die Luft- und Raumfahrt. Kleine Programme haben in vielen Betrieben und Ingenieurbüros Einzug gehalten. Anwendungsprogramme haben in der Industrie durch individuelle Simulationen zur Vereinfachung von Versuchen geführt. Dies führte zu einer Geld- und Zeitersparnis.

2.1.2. Prinzip der Finiten-Elemente-Methode

Der Grundgedanke der Finiten-Elemente-Methode ist die Zerlegung eines kompliziert gestalteten Körpers in viele kleine, einfach geformte Teile. Diesen Vorgang nennt man Diskretisierung [16].

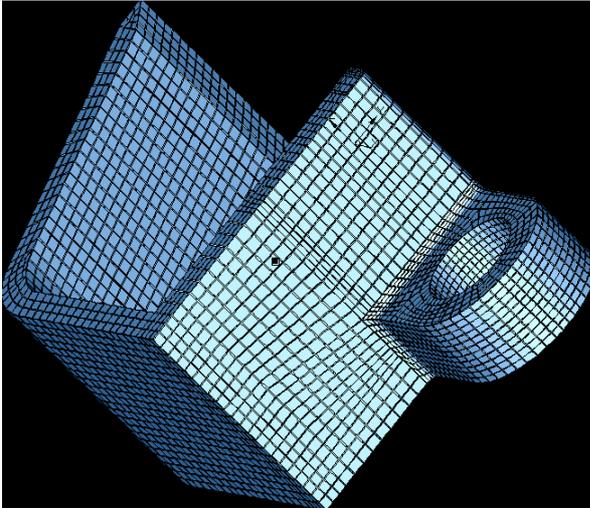


Abb. 1: Darstellung einer Schaufel als Finite-Elemente-Modell

Das (Verformungs-) Verhalten der kleinen Teile (finite Elemente) ist bekannt und berechenbar. Die einzelnen Elemente sind durch „Knoten“ verbunden. Durch die Verknüpfungsbedingungen der Elemente an den Knoten – gleiche Verschiebung und Verdrehung der Knoten in allen in allen Raumrichtungen – kann die Verformung der Gesamtstruktur an jedem Knoten berechnet werden. Die Finite-Elemente-Methode beschreibt ein numerisches Verfahren unter Einsatz von Computern zur Ermittlung von Spannungen und Dehnungen an komplizierten, analytisch nicht berechenbaren belasteten Bauteilen [16].

2.1.3. Finite-Elemente-Methode in Ingenieurwissenschaften und Medizin

Die Anwendungsbereiche für die Finite-Elemente-Methode sind vielfältig. Das computergestützte Berechnungsverfahren kann den Wasserdruck in einem Staudamm, die Belastbarkeit eines Flugzeugflügels, oder die Schallfeldausbreitung in der Fahrgastzelle eines Automobils berechnen. Besonders kommen die Simulationen der Finite-Elemente-Methode in der Automobilindustrie bei Crashtests zum Einsatz [16]. Erste Versuche gab es in der Zahnmedizin, zum Beispiel eine Finite-Elemente-Simulation für Implantate. Problematisch stellte sich heraus, dass bisher der menschliche Körper (Skelett, Weichteile) in seiner Komplexität nicht ausreichend mathematisch beschrieben werden konnten. Die Finite-Elemente-Analyse wurde in den letzten Jahren signifikant verfeinert, indem traditionelle biophysikalische Wissensdatenbanken in einem rationalen Validisierungsprozess verwendet wurden [38].

Die individuellen Geometrien und Materialwerte (Houndsfield-Werte) der Simulationsmodelle werden anhand von 3D-CT-Daten rekonstruiert. Diese Werte können mittels spezieller Software bearbeitet werden bzw. Versuche simuliert werden [37].

In der Poliklinik für Kieferorthopädie der Universität München ist es möglich, individuelle und hoch differenzierte Finite-Elemente-Modelle des knöchernen Schädels und der Schädelbasis sehr schnell und einfach zu erstellen. Diese Daten werden dabei aus CT-Daten generiert. Mit diesen virtuellen Experimenten zur Biomechanik knöcherner Strukturen ist auch eine Simulation zur ästhetischen Weichteilprognose vor skelettverlagernden Operationen möglich [27].

Die anfänglichen Versuche der dreidimensionalen Prognose wurden von verschiedenen Arbeitsgruppen durchgeführt [42,54,58,36].

Im Jahr 1999 verglichen Soncul et al. den Gesichtsscanner als Alternative zum Cephalographen zur Weichteilanalyse vor orthognatischer Operation. Es wurden keine signifikanten Unterschiede bezüglich kieferorthopädischer Messpunkte und Winkel gefunden. Der Gesichtsscanner war durch die Schnelligkeit und die Noninvasivität des Verfahrens, sowie der Dreidimensionalität im Vorteil. Jedoch beschränkten die hohen Kosten die routinemäßige Anwendung dieses Verfahrens [54].

Eine weitere Veröffentlichung auf dem Weg zur Dreidimensionalität bei der operativen Planung mittels Laserscannern stammt von Xia et al. [59]. Sie konstruierten ein farbiges dreidimensionales Gesichtsmodell mittels CT und Laserscanner Daten, welches man zur operativen Simulation und Planung benutzerfreundlich und preisgünstig an konventionellen Computern anwenden kann. Im Jahr 2000 untersuchten Kober et al. [36] die numerische Simulation (Finite-Elemente-Modell) des menschlichen Unterkiefers. Es wurden Standardbewegungen hinsichtlich der Bewegung der Kaumuskelatur simuliert und die Umsetzung der Verhältnisse an den Kondylen getestet, um ein besseres Verständnis der Biomechanik des Unterkiefers zu bekommen. Ohne Feststellung der Kondylen konnten alle Bewegungssituationen, ohne führende Wirkung der Gelenkkapsel, qualitativ reproduziert werden. Die korrekte Erfassung der Kondylen war schwierig, da im dreidimensionalen Versuch der Processus condylaris und die Gelenkkapsel als starre Körper betrachtet wurden.

2.2. Gesichtserfassung in der Medizin

Verfahren zur Vermessung der fazialen Hart- und Weichgewebe werden in den medizinischen Fachgebieten der Kieferorthopädie, der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie und in der plastischen Chirurgie zur Diagnostik, Therapieplanung und Prognose eingesetzt [30]. Die Messung erfolgt unter Beachtung festgelegter Messpunkte, die zwei- oder dreidimensional erfasst werden. Im folgenden Abschnitt werden Verfahren aufgezeigt, die zur fazialen Vermessung angewendet werden.

2.2.1. Zweidimensionale Gesichtserfassung

2.2.1.1. Fotos

Zur Analyse und Therapieplanung werden standardisierte Fotoaufnahmen seitlich und en face im Maßstab 1:1 (in Schlußbißstellung mit entspannter Gesichtsmuskulatur) angefertigt. Neben den Bezugsebenen und den dazugehörigen Winkeln wird das Profelfeld bestimmt. A.M.Schwarz [53] klassifizierte die Profile in bestimmte Gruppierungen. Das en face Bild zeigt die Disproportionen und Asymmetrien des Gesichtes in transversaler und vertikaler Ebene. Das Profilbild wird durch drei Bezugslinien analysiert. Eine horizontale Linie, die Ohr-Augen-Waagerechte, verbindet den Ohrpunkt am Oberrand des Tragus mit dem Orbitalpunkt. Diese Linie ist nahe der Frankfurter Horizontalen, aber nicht mit ihr identisch. Senkrecht zur Auge-Ohr-Waagerechte verlaufen die Orbitasenkrechte und die Nasionsenkrechte. Durch diese Linien wird das Kieferprofilfeld begrenzt. Das Kieferprofilfeld gibt Aufschluss über die verschiedenen Gesichtstypen. Liegt der Subnasalpunkt genau auf der Nasionsenkrechten und das Weichteilpogonion ungefähr in der Mitte des Kieferprofilfeldes, spricht man von einem Durchschnittsgesicht. Daraus ergeben sich die weiteren Einteilungen [32].

Liegt der Subnasalpunkt vor oder hinter der Nasionsenkrechten, liegt ein Vor- oder Rückgesicht vor. Berücksichtigt man das Weichteilpogonion im Verhältnis zum Subnasalpunkt, ergibt sich eine Einteilung in gerade und schiefe Gesichter.

Die Fotos geben eine generelle Orientierung der Gesichtsproportionen und sind für eine Therapieplanung unerlässlich. Eine grobe, ungenaue Prognose des postoperativen Erscheinungsbildes kann mittels einer Fotomontage hergestellt werden, indem der Unterkiefer abgetrennt und verschoben wird.

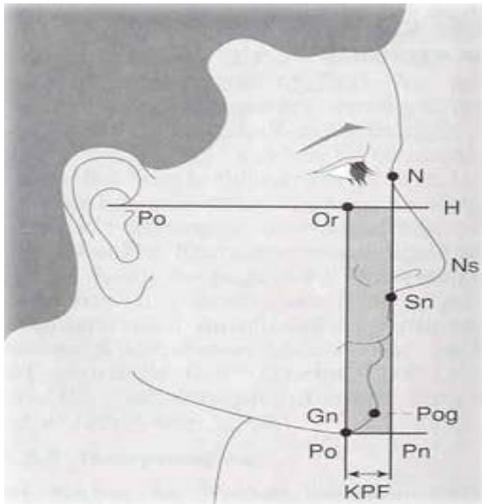


Abb. 2: Fotometrische Vermessungen im Profil

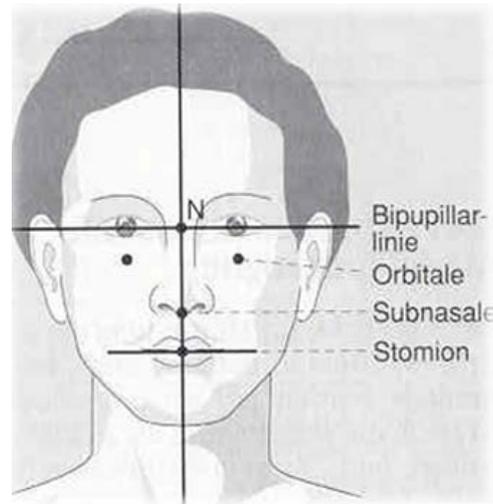


Abb. 3: Fotometrische Vermessungen en face

Ein weiteres ästhetisches Kriterium ist der Verlauf der Nase zum Profil. Die Nasenlänge sollte ungefähr einem Drittel des Gesichtes und die Breite etwa 30% der Nasenbreite betragen. Steinhäuser und Janson haben verschiedene Winkel zur Beurteilung des Profils untersucht. Der Nasofrontalwinkel sollte zwischen 125° und 135° , der Winkel zwischen Nasion und Nasenspitze 30° und der Nasiolabialwinkel 90° bis 110° betragen [56].

2.2.1.2. Stereophotogrammetrie

Die dreidimensionale Stereophotogrammetrie ist die Weiterentwicklung der zweidimensionalen Fotoanalyse. Sie wurde 1957 von Thälmann Degen entwickelt und später (1971) von Burke und Beard überarbeitet. Vor der Aufnahme werden die Referenzpunkte auf dem Patientengesicht markiert [35] und anschließend gleichzeitig von zwei Photokameras, die in unterschiedlichen Winkeln angeordnet sind, aufgenommen.

Die Referenzpunkte, die auf der Mitt-Sagittalen und der Frankfurter Horizontalen liegen sollen, werden auf beiden Fotos dargestellt [48].

Die dreidimensionalen Daten berechnet der Computer über das Verfahren der optischen Triangulation. Das errechnete Gitternetz dient nun zu Analyse- und Diagnosezwecken, ebenso können neben planaren Messungen Volumenänderungen berechnet werden [48].

2.2.1.3. Röntgenbilder

Das Fernröntgenseitenbild (FRS) wurde 1931 von Hofrath und Broadbent in die Kieferorthopädie eingeführt und gilt seitdem als wichtiges diagnostisches Hilfsmittel. Die Entfernung von 1,5 m bei der Anfertigung des FRS ermöglicht eine weitgehend originalgetreue Reproduktion des Gesichtsschädels ohne Vergrößerung und Verzerrung. Die Weichteile bzw. das Profil werden mit einem speziellen Weichteilfilter aus Aluminium verbessert dargestellt. Die sorgfältige Positionierung im Kephalostat erlaubt die reproduzierbare Markierung von Referenzpunkten und ihre Auswertung [32].

Das FRS ist ein wichtiger Pfeiler in der präoperativen Weichteilprognose.

2.2.1.4. Dentofacial Planner

Zur Voraussage der Veränderung des Weichteilprofils nach kieferorthopädischer Behandlung oder Operation auf der Grundlage kephalometrischer Werte steht das Computerprogramm „Dentofacial Planner Plus“ (DFP) zur Verfügung. Die Software wurde von der Firma Dentofacial Software Inc., Toronto, Canada entwickelt und ermöglicht eine gute Weichteilvorhersage im Profilbereich.

Verschiedene Studien mit dieser Software haben im Bereich des Kinns eine gute Prognose aufzeigt, im Bereich der Lippen und der Nase jedoch eine unzureichende Aussagekraft gegeben [15].

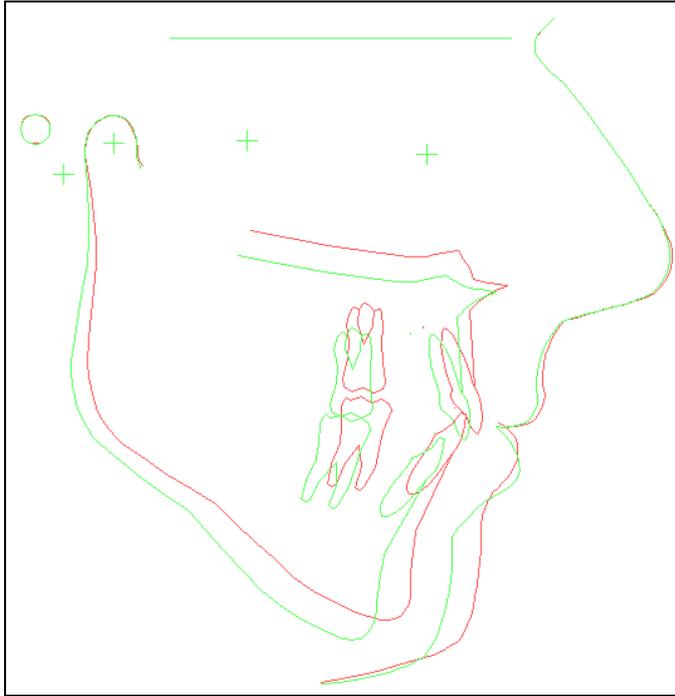


Abb. 4: Beispiel für eine Simulation einer Dysgnathieoperation am Dentofacial Planner (rote Linie) im Vergleich zum präoperativen Erscheinungsbild (grüne Linie)

2.2.2. Dreidimensionale Gesichtserfassung

2.2.2.1. Laser

Die dreidimensionale Datenerfassung der Kopfgeometrie und die Erfassung der Reflexion der Hautoberfläche werden mit einem 3D Laser-Scanner (Cyberware, Monterrey/California, USA) durchgeführt. Für diese Aufnahme werden 10 Sekunden benötigt. Dadurch ist es möglich, auch lebende Objekte dreidimensional abzutasten. Diese Datenakquisition kann mit denen eines CT gekoppelt werden, um eine dreidimensionale Simulation am Gesichtsschädel zu simulieren. Durch die Integration von Farbinformationen lässt sich ein photorealistisches Bild erzeugen [18]. Eine alleinige Weichteilprognose mittels Laserscanner konnte bis zum jetzigen Zeitpunkt nicht zufrieden stellend erstellt werden, da die Umsetzung bzw. Bearbeitung im Computer ungenügend war.

2.2.2.2. Strukturiertes Licht

Eine weitere dreidimensionale Oberflächendigitalisierung von Gesichtern bietet das lichtkodierte Triangulationsverfahren, welches mit strukturiertem Licht arbeitet. Bei diesem Messverfahren werden Weißlichtstreifen auf ein Messobjekt projiziert, die von zwei Kameras aus verschiedenen Blickwinkeln aufgenommen werden. Das Triangulationsverfahren arbeitet wie der menschliche Gesichtssinn, indem mit beiden Augen ein Objekt aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet und der Abstand ermittelt wird. Durch eine Gray-Codierung ist es möglich, die einzelnen Lichtschnitte eindeutig zu identifizieren. Die Gray-codierten Streifenmuster, die durch die hell-dunkel-Sequenz gekennzeichnet sind, ermöglichen die Unterscheidung der Projektionsrichtungen und ergeben ein entsprechendes Codewort. Die akquirierten Daten werden im Computer zu einer Punktwolke gematcht. Diese dreidimensionale Methode ermöglicht neben einer sehr guten Oberflächenerfassung, Messgenauigkeit und Anschaulichkeit auch die Darstellung von Halbprofilen und ist somit vielen etablierten Verfahren überlegen [28].

2.2.2.3. Holographie

Der Anfang und die Entdeckung der Holographie sind 1948 mit dem Physiker Dennis Gabor (Nobelpreis 1971) begründet, der die Funktionstüchtigkeit von Elektronenmikroskopen verbessern sollte. Dabei stieß er auf das Prinzip der Holographie.

Es fehlte jedoch eine geeignete Lichtquelle, so dass die Forschungen erst später mit der Erfindung des Lasers fortgesetzt werden konnten.

Die Arbeitsgruppe "Holografie und Lasertechnologie" unter Leitung von Prof. Dr. Peter Hering entwickelte ein System zur hochauflösenden dreidimensionalen Gesichtprofilvermessung. Damit werden fotorealistische 3D-Computermodelle der Patienten erstellt. Im Gegensatz zu konventionellen Aufnahmemethoden ist bei diesem Verfahren ein Verwackeln der holografischen Bilder nicht möglich. Das verwendete gepulste Lasersystem hat eine extrem kurze Belichtungszeit von 25 ns. Es genügt eine einzige holografische Portraitaufnahme des Patienten. Die darin gespeicherte dreidimensionale Oberflächeninformation wird mit einer Digitalkamera schichtweise aufgezeichnet und die gewonnenen Daten in ein 3D-Computermodell des Gesichts umgewandelt.

Das speziell entwickelte Scanverfahren ermöglicht Laserschnitte von beliebiger Konfiguration und Tiefe. Wichtige Anwendungsgebiete sind die Orthopädie (Implantate), Neurochirurgie (Schädelöffnung) und Thoraxchirurgie (Sternum) [23].

2.3. Weichteilproportionen

2.3.1. Ästhetik und Proportion in Kunst und Medizin

Proportion ist ein anschauliches und wohlgefälliges Verhältnis von Teilen zu einem Ganzen. Wie Symmetrie, Rhythmus und Harmonie ist sie ein Grundgesetz von Schönheit. Die Unterschiede zwischen ihnen sind fließend. Die Symmetrie unterscheidet sich von der Proportion, indem sie nicht auf einem rationalen Verhältnis beruht. Die Harmonie beruht auf qualitativen Verhältnissen, die Proportion auf quantitativen. Die Proportion besteht aus räumlich simultan existierenden Elementen, hingegen der Rhythmus aus einander zeitlich folgenden Elementen [22]. Die Suche nach der Einteilung des Menschen, vor allem die Proportion des Gesichtes, war in der Kunst eine wichtige Aufgabe. Die zweidimensionale Darstellung von Objekten wandelte sich im Laufe der Zeit zu dreidimensionalen und in Einheiten unterteilte Körper.

Die Kunst ist teilweise ein Spiegel ihrer Zeit und der zugehörige Geschmack verschieden. Die Kriterien, die von einem Patienten an sein eigenes Aussehen gestellt werden, sind von Fall zu Fall sehr unterschiedlich und unterliegen zudem in gewisser Hinsicht dem Zeitgeschmack [7]. Disharmonien im Gesichtsbereich veranlassen meist die Patienten, aus ästhetischen Gründen einen Kieferorthopäden aufzusuchen [13].

Riedel [50] beschäftigte sich mit dem allgemeinen Begriff „schön“ und legte Profildurchzeichnungen von Hollywoodschönheiten Kieferorthopäden zur Begutachtung vor. Ausnahmslos lautete das Urteil „durchschnittlich“, jedoch nicht „sehr schön“.

2.3.2. Proportionskanon der ägyptischen Kunst

Der Proportionskanon für die menschliche Gestalt in der ägyptischen Kunst ergibt sich aus den Werken dieser Kunst, aus Wandbildern und Statuen. Charakteristisch ist die Wiedergabe der menschlichen Gestalt in zwei- und dreidimensionaler

Darstellung mit metrisch festgelegten Verhältnissen der Teile des menschlichen Körpers zum Ganzen.

Die Proportionslehre der Menschengestalt ist in der Kunst entwickelt worden. In der ägyptischen medizinischen Literatur findet man keinen Hinweis auf eine Vermessung des Menschen aus anatomischem Interesse. An der zweidimensionalen Darstellung ist die Proportionslehre ausgebildet worden. Die Grundlage der Berechnung bildet die Elle. Als metrisches Gerüst der Menschenfigur diente zunächst das System eines Achsenkreuzes, indem eine Mittelsenkrechte über die in ungleichen Abständen gezogenen Waagerechten gelegt wurde und nur die Proportion für die Höhen, nicht aber die Breite nachvollziehbar festgelegt wurden. Später wurde das Achsenkreuz durch das System des Quadratnetzes ersetzt. Dieses Netz besteht aus engmaschigen und in Abständen gleichmäßig gezogener paralleler Linien, die sich in einem Rechteck in der Größe der zu entwerfenden Figur rechtwinklig schneiden [45].

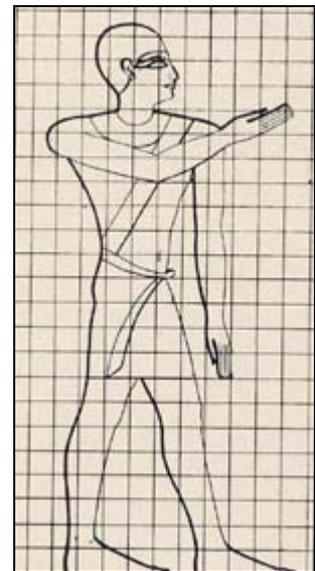


Abb. 5: Der Proportionskanon



Abb. 6: Doryphoros Römische Kopie aus Pompeji

Für das Vermessen des menschlichen Körpers findet man in der griechischen Literatur Informationen, die bis in die 2. Hälfte des 5. Jh. zu Polyklet von Argos zurückreichen. Diese Stellen lassen sich bei Aufzeichnungen von Galen, dem berühmten Arzt des 2. Jh.n.Chr., finden. Er beschreibt, dass die körperliche Schönheit sich aus der die Proportionalität der Glieder bzw. aus den richtigen Maßverhältnissen der Körperteile ergibt.

Polyklet schuf eine Statue, die er die Regel nannte, nach allen Anweisungen der Lehre. Diese Musterstatue, der Kanon, ist schon alles, was aus antiken Quellen überliefert wurde. Sie wurde durch Nachmessen rekonstruiert und die alten Kanonmaße wiedergefunden [25].

Das Prinzip des Kanons liegt nicht in der mechanischen Gleichheit, sondern in der organischen Differenzierung. Polyklet geht nicht aus von einem mechanisch konstruierten Quadratnetz, um dann zu fragen, in welcher Weise die menschliche Gestalt in diesem Netz unterzubringen sei, sondern er geht aus von der organisch in Rumpf, Glieder und Teilglieder differenzierten Gestalt, um dann zu fragen, wie diese Teile sich zueinander und zum Ganzen der Größe nach verhalten möchten [47].

2.3.3. Proportion im Mittelalter

Beim Ausgangspunkt der Bemühungen des Proportionsgesetzes stand der homo ad quadratum mit dem homo ad circulum in einem Bild vereinigt.

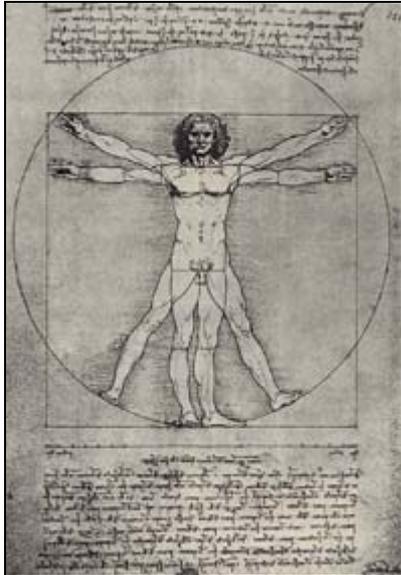


Abb. 7: Proportionsfigur nach Vitruvs Schlüsselschemata der Menschenmasse als Grundlage des Bauens, Leonardo da Vinci

Der menschliche Körper wurde in Moduli unterteilt. Vitruv nahm als Maßeinheit den Fuß und teilte den Menschen in 6 Fußlängen. Alberti wiederum setzte bei Vitruv an und fand 67 Maßpositionen. Er wandte seine Architekturlehre an und stellte erstmals den Menschen anhand eines abstrahierenden Dezimalsystems dar.

Wittkower zeigte, wie im Kernpunkt der Auffassung der Renaissance von den Proportionen mit kleinen Zahlen erfassbare Vergleichbarkeit der Maßeinteilung steht. Die Vergleichbarkeit der Maße stellte das Herzstück der Renaissance-Ästhetik dar.

In ähnlicher Absicht begann Leonardo da Vinci zu messen. Er suchte anatomisch sinnvolle Körperanalogien und setzte diese nach Anzahl und gleichen Längen zusammen. Auch mit geometrischen Teilungsfiguren, die sich durch die Verbindung markanter Körperpunkte ergaben, suchte er in Harmonie gründende Gleichheiten der Körper festzustellen.



Abb. 8: Abmessungen des Kopfes

Leonardo benutzte immer gleiche Zahlen (1:2, 1:3) oder auch nur Buchstaben ($a:b=c:d$) um echte Proportionen aufzustellen [45]. Er stellte fest, dass der Mensch mit 3 Jahren die Hälfte seiner Endgröße erreicht, die sich in 8 Kopf- und 9 Gesichtslängen unterteilt.

Der Mittelpunkt der Proportionsforschung der ganzen Renaissance sind jedoch die „Vier Bücher von menschlicher Proportion (1528)“ von Albrecht Dürer.

Dürer untersuchte viele Menschentypen, um das Mittel als Ideal aufzustellen, aber er bemerkte, dass unter den unterschiedlichen Konstitutionen jede ihre eigene Schönheit besaß [25].

„Die Schönheit, was das ist, das weiß ich nit, wiewohl sie vielen Dingen anhangt.“

Albrecht Dürer

Das Ergebnis waren die 4 Bücher von menschlicher Proportion (1528). Sie sind eine differenzierte Typenlehre und stellen nach Panofsky den Höhepunkt der Proportionslehre dar. Dürer teilte den Kopf in 4 gleiche Teile, die durch den Haaransatz, das Oberlid und den Nasensteg getrennt wurde. Das Gesicht ist in Gesichtsdrittel geteilt worden, wie es heute noch in der modernen Kephalometrie angewendet wird. Seine Typen erhält Dürer durch systematische Veränderung aller Parameter, die die Gesichtsstrukturen beschreiben, so dass seine Typendarstellungen manchmal sogar im Bereich der „grotesken fratzenhaften Karikatur“ landen [47].

2.3.4. Die Moderne

Die Proportionslehre in der bildenden Kunst der heutigen Zeit wird maßgebend anhand naturwissenschaftlicher und medizinischen Analysen gebildet. Vor allem das Röntgen und die damit aufzeigbaren skelettalen Parameter bieten eine neue Dimension. Mit Hilfe der Fotografie und Radiologie, sowie des Lasers hat sich die faziale Morphometrie vom zweidimensionalen Denken zum dreidimensionalen entwickelt.

2.4. Weichteilvorhersage

Verschiedene Autoren [9,50] weisen daraufhin, dass eines der wichtigen Ziele der kieferorthopädischen Behandlung eine Verbesserung des Aussehens ist. Entscheidend ist dabei eine differenzierte Diagnose des Patienten, welche die Ätiologie und die Morphogenese berücksichtigt [51].

Bei einer kieferchirurgischen Korrektur wird nicht nur die funktionale Kieferposition, sondern auch das ästhetische Erscheinungsbild verändert. Dabei hängt die Ästhetik entscheidend von der postoperativen Weichteilveränderung ab. Häufig haben die Patienten eine hohe Erwartung an den korrigierenden Eingriff und trotz Operationserfolg eine verbleibende Unzufriedenheit. Daher ist die Weichteilprognose zur Darstellung des postoperativen Aussehens für den Patienten und den Behandler wichtig.

2.4.1. Operationsmethodik

Ein unproportionales Wachstum des Gesichtsschädels resultiert aus Form- und Lageanomalien der Kiefer. Nach Abschluss des Wachstums wird bei bestimmter Ausprägung der Dysgnathie die Behandlung durch den Mund-Kiefer-Chirurgen erforderlich. Die Eingriffe sind gekennzeichnet durch Osteotomien im Bereich der Kiefer, eingeschlossen der Alveolarfortsätze und Fragmentverlagerungen, um normale Okklusions- und Artikulationsverhältnisse zu erreichen.

Am Unterkiefer werden Eingriffe am aufsteigenden Ast, am Unterkieferkörper und am Alveolarfortsatz unterschieden.

Das Prinzip des Eingriffes am aufsteigenden Unterkieferast besteht aus der Trennung des Unterkiefers vom Gelenkbereich durch stufenförmige sagittale

Spaltung nach H. Obwegeser. Mit dem Erhalt der bukkalen Lamelle bis zum Molarenbereich wurde diese Methode von Dal Pont modifiziert.

Bei Zahnlücken im Seitenzahnggebiet wird der Unterkiefer nach Blair vertikal durchtrennt und das entsprechende Stück Knochen unter Erhalt des Nervus mandibularis ostektomiert. Eine Osteotomie im Korpus mit sagittaler Spaltung des Mandibularkörpers nach Gattinger stellt eine Modifikation dar.

Die Eingriffe im Bereich des Alveolarfortsatzes erfolgen unter Erhaltung der Unterkieferbasis durch die zirkuläre mandibuläre Osteotomie nach J.Obwegeser.

Im Oberkiefer ist die quere Osteotomie der Maxilla im LeFort I Niveau nach H. Obwegeser und Bell die am meisten durchgeführte Operation. Hierbei erfolgt nach Abtrennung der Schleimhaut im oberen Vestibulum vom linken und rechten Prämolarenbereich und der Abtrennung des Septums von der Crista palatina die Durchtrennung der fazialen Kieferhöhlenwand. Im Anschluss wird die Nasenwand osteotomiert und der Tuber maxillae vom Processus pterygoideus getrennt. Das Fragment kann nun nach kaudal mobilisiert werden und anschließend in jede gewünschte Position gebracht werden [17].

2.4.2. Zweidimensionale Prognosestudien

Durch kieferorthopädische und kieferchirurgische Therapien ergeben sich oft Weichteilveränderungen im Gesichtsbereich. Untersuchungen dieser Veränderungen dienen als Grundlage für präoperative Prognosen.

Eine statistische Korrelation zwischen Lage und Stellung der Incisivi und den Weichteilstrukturen des Mundes beschreibt Bloom [8].

Hershey [24] ermittelte in seiner Studie eine Veränderung der Oberlippenpunkte Sulcus labrale superius und Labrale superius um 1,9 mm bzw. 2,9 mm nach posterior bei Retraktion der Incisivi. Bei der Unterlippe lagen die Werte des Sulcus labrale inferius und des Labrale inferius bei 1,5 mm bzw. 3,3 mm. Sie geben für den Sulcus labrale superius einen Korrelationskoeffizienten 0,71, für das Labrale superius 0,82, für den Sulcus labrale inferius 0,58 und das Labrale inferius 0,78 an, die die Weichteilveränderung darstellen sollen. Seine Schlussfolgerung ergab eine klinisch kaum aussagekräftige Prognose im Zusammenhang der Korrelationskoeffizienten mit der Schneidezahnretraktion und deren Weichteilveränderungen, vor allem der Unterlippenveränderung.

Steinhäuser beobachtete im Jahr 1974 Weichteilveränderungen bei 9 Probanden nach einer Vorverlagerung des Unterkiefers. Die Kinnweichteile folgten den knöchernen Strukturen im Verhältnis von 1:1 (93%). Im Unterkiefer beschrieb er ein Verhältnis von 1:2 (62%). Die Erklärung liegt bei den oft sehr tiefen Bissverhältnissen einer mandibulären Retrognathie, bei der eine Vorwölbung oder ein Vorschieben der Unterlippe zum besseren Lippenschluss zustande kommt. In der Vertikalen folgen die Weichteile zu 80%, welche durch die Gesichtshöhe maßgebend beeinflusst werden [55]. Steinhäuser beschrieb die Normwerte für die individuell ideale Beziehung von unterer zur gesamten Gesichtshöhe. Diese Normwerte zur Relation ergeben sich aus der unteren Gesichtshöhe mit 56% entsprechend zur totalen Gesichtshöhe (100%). Er weist darauf hin, dass die individuellen Werte der Patienten mit den idealen Richtwerten zu vergleichen sind und sich diesen Werten angleichen sollten. Die Patienten sollten jedoch nicht dringend auf Normwerte hin behandelt werden [39].

Hillesund et al. [26] beschäftigten sich mit der Lippenspannung der Probanden die im FRS und der Auswertung der Weichteilstrukturen. Es wurden zwei Probandengruppen untersucht. Eine Gruppe von Kindern mit einer sagittalen Stufe von mehr als 8 mm und einer anderen mit Kindern, deren Incisivi normal positioniert waren und im FRS eine entspannte, geschlossene Lippenstellung aufwiesen. Bei der Probandengruppe mit großer sagittaler Stufe zeigte sich bei der entspannten Lippenhaltung im Vergleich zur geschlossenen Haltung eine Zunahme der Oberlippendicke von 2,5 mm. Die Zunahme der Unterlippe betrug 0,3 mm. Die zweite Probandengruppe zeigte eine Zunahme der Oberlippendicke von 1 mm und der Unterlippendicke von 1,5 mm. In der Vertikalen betrug der Unterschied in der ersten Gruppe zwischen 3,5 mm bis 9 mm, in der zweiten Gruppe 1 mm.

Fischer-Brandies et al. [15] untersuchten Fernröntgenseitenbilder von 33 Patienten vor und nach einer Schneidezahnprotrusion. Sie verglichen die im Dentofacial Planner (Version 4.22 A) prognostizierte Weichteilveränderung mit dem kephalometrischen Endbefund. Für das Stomion labrale superius und Labrale superius werden eine Rückbewegung von 1,5 mm bzw. 2,1 mm gefunden, die sich mit den Literaturangaben von Hershey [24] decken. Beim Sulcus labrale inferius und Labrale

inferius zeigt sich eine Retraktion von 1 mm und 0,9 mm.

Hayse et al. [21] untersuchten die Veränderungen der Weich- und Hartgewebe im cervicomandibulären Bereich bei 24 erwachsenen Probanden. Sie stellten bei den cervicomandibulären Messungen eine große Variabilität fest. Hayse beschrieb, dass durch Vorverlagerung des Unterkiefers pro Millimeter eine Abnahme des cervicomandibulären Winkels um $1,5^\circ$ erwartet werden kann.

Bailey et al. [6] stellten in ihrer Studie über Langzeitveränderungen 1 Jahr bis 3-5 Jahre postoperativ bei Weichgewebsprofilen nach Unterkiefervorverlagerungen keine signifikanten Unterschiede zu ausschließlich orthodontisch behandelten Probanden fest. Sie fanden bei chirurgisch behandelten Probanden an den Punkten Labrale superius, Labrale inferius und des Weichteilpogonions nur geringe Veränderungen in horizontaler und vertikaler Richtung.

2.4.3. Dentofacial Planner

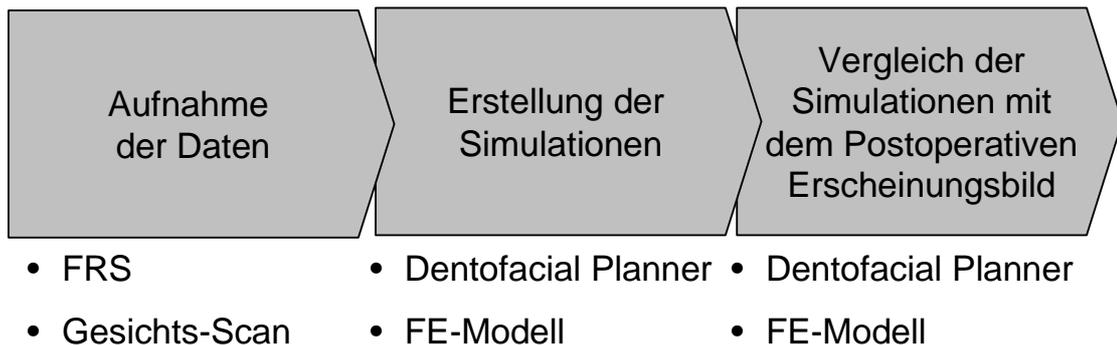
Bislang ist die zweidimensionale Weichteilprognose wie z.B. mittels Dentofacial Planner, der Standard bei der präoperativen Planung. Das Verfahren ermöglicht lediglich eine Prognose im Profil. Der Dentofacial Planner liefert vor allem im Bereich der Wange und des Halses ungenaue Vorhersagen. Bei maxillären Osteotomien kann für das Aussehen der Nase und der Oberlippe, sowie den Nasiolabialwinkel keine genaue Aussage getroffen werden [57].

Wissenschaftliche Fragestellung

In der Poliklinik für Kieferorthopädie in München besteht die Möglichkeit computergestützt mit Hilfe von Laserscannern komplexe anatomische Oberflächengeometrien in genaue, einfache Finite-Elemente-Modelle umzuwandeln. Dabei kann die Planung kieferorthopädischer Operationen simuliert werden, um verschiedene Behandlungsstrategien zur individuellen Ästhetik des Patienten zu vergleichen.

Dieses Prognoseverfahren soll in dieser Arbeit mit dem konventionellen Verfahren des Dentofacial Planners, welches lediglich zweidimensional arbeitet, verglichen werden.

Analyse



Auswertung

(zu beantwortende Fragestellungen)

1. Wie hoch ist die **Genauigkeit des simulierten FE-Modell** im Vergleich zum postoperativen Erscheinungsbild und der Prognose des Dentofacial Planners?
2. Welche **Fehler** treten bei der Erfassung der Patientendaten auf?
3. Ist dieses **Verfahren** im klinischen Alltag **anwendbar**?

3. Methodik

3.1. Probanden

Die Probanden sind Patienten im Alter zwischen 19 und 35 Jahren, wobei das Durchschnittsalter 24,8 Jahre war (Abb. 10). Die 3 weiblichen und 9 männlichen Patienten, welche unmittelbar vor einer kieferchirurgischen Operation standen, stellten sich zum Einscannen ihres Gesichtes zur Verfügung. Von den 12 Probanden wurden 7 bignath und 5 Probanden unignath im Oberkiefer oder Unterkiefer operiert.

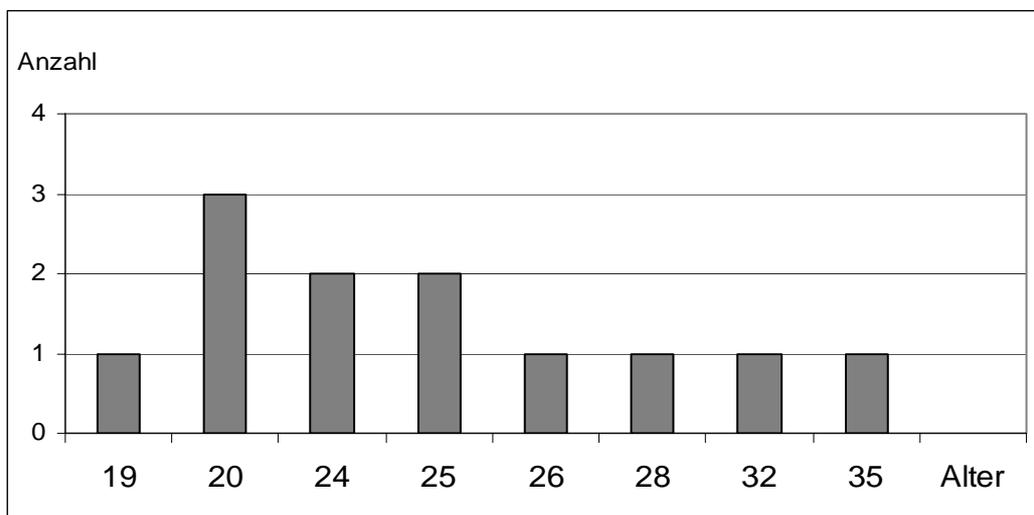


Abb. 10: Altersverteilung der Probanden

Patient	Richtung der skelettalen Verlagerung					
	Mandibula		Maxilla			
	vor	zurück	vor	ant. Anheb.	ant. Absenk.	post. Anheb.
A. B.	5	-	-	-	-	3
M. D.	7	-	4,6	-	-	2
J. D.	3	-	-	-	-	-
A. F.	-	-	2,5	-	-	5
A. G.	-	2	5	-	-	4
C. K.	-	-	3,5	-	-	2
D. L..	-	-	3	1,5	-	6
T. L..	-	7	7	3	-	2
D. P.	7	-	3	-	-	3
N. P.	-	-	3	-	4	1
P. S.	-	-	3	1,5	-	6
I. V.	-	5,5	5			

Tab. 1: Geplante skelettale Verschiebungswerte (in mm) der Modelloperation

3.2. Digitales Messverfahren

Das Gesicht der Probanden wurde mit zwei Laserkameras der Firma Minolta Typ Non-Contact 3D Digitizer Vivid 900 gescannt. Diese Kamera arbeitet mit einer Lichtstreifenmethode, indem ein horizontaler Lichtstreifen durch eine zylindrische Linse das Objekt scannt. Das reflektierte Licht vom Objekt erreicht die CCD Kamera und wird durch Triangulation in Distanzinformationen konvertiert. Dieser Prozess wird durch vertikales Scannen mittels Streifenlicht und Galvanospiegel wiederholt, um somit ein 3D Datenbild des Objektes aufzuzeichnen. Ein Farbbild des Objekts kann beim Scannen der CCD Kamera durch einen RGB Filter entstehen, auch wenn das Streifenlicht nicht ausstrahlt.

3.2.1. Messaufbau

Der Proband saß auf einem verstellbaren Stuhl und hielt seinen Kopf leicht erhoben und mit geschlossenen Augen. Im Abstand von 1m befanden sich lateral rechts und links in einem Winkel von 30° die beiden Minoltakameras Vivid 900. Von diesem Messaufbau führten Kabelverbindungen zu einem zentralen Computer. Als Bearbeitungssoftware diente das Polygen Editing Tool (PET 1.10).

3.2.2. Messablauf

Zu den Scanaufnahmen wurde das Gesicht der Probanden mit ausreichend Licht ausgeleuchtet und die Person fokussiert. Der Proband musste einen Punkt zwischen den beiden Kameras anvisieren, damit sich die Bilder der beiden Kameras ergänzen bzw. überschneiden konnten. Nach Festlegung der Ausgangsposition erfolgte der Scanvorgang mit einer Dauer von 1,5 Sekunden. Die Lichtabtastung des Gesichtes erfolgte zweimal nacheinander - von jeder Kamera einmal. Das Ende des Vorgangs wurde mit einem Signalton bestätigt. Während dieser Zeit sollte der Proband sich nicht bewegen.

3.2.3. Datenaufbereitung

Im Anschluss an die Datenerhebung wurden die entstandenen Punktwolken bearbeitet. Die beiden Messaufnahmen der CCD-Kameras wurden zu einer Punktwolke verschmolzen. Dieser Prozess wird als „matchen“ bezeichnet. Die Punktwolken werden mittels mathematischer Algorithmen im Computer vereinigt. Das Integral aller skalaren und vektoriellen Diskrepanzen weist dann einen minimalen Wert auf. Danach wurden die Daten nach gewünschter Auflösung gefiltert, um die Datenmenge für die Auswertung zu verringern.

3.2.4. Datenbearbeitung

Für eine individuelle Simulation wurde mittels eines speziellen Software-Programms nach Reduktion der Punktwolke um redundante Einzelpunkte über Triangulation ein Polygonnetz generiert, das über spezielle Algorithmen in ein CAD-Modell weiterverarbeitet wurde. Über die CAD-FEM-Schnittstelle entstand so ein dreidimensionales Finite-Elemente-Modell, das geometrisch der individuellen Gesichtsoberfläche des Patienten entsprach. Das individuelle Finite-Elemente-Modell diente als Grundlage für alle weiteren Simulationsschritte, welche unter definierten Rahmenbedingungen bearbeitet wurden. Mit der Software Design Space (ANSYS Inc.) konnten nun dreidimensional die Weichteilverformungen simuliert und analysiert werden. Nach der Skalierung der Finiten-Elemente-Modelle und deren Ausrichtung im Koordinatensystem erfolgte die Bearbeitung der Modelle entsprechend der Werte der Modelloperation.

Ein Simulationsmanager führte durch den Bearbeitungsprozess des Simulationsobjektes. Zunächst musste im Modul „Geometrie“ die Maßeinheiten sowie die Dicke des Modells eingegeben werden.

Das Modell des Gesichts erhielt bei Aktivierung der Schaltfläche „Fixierte Lagerung“ eine definierte Fixierung, in der die Fläche der Verformung eingegrenzt wird. Dies betraf den Bereich der Augenbrauen und des oberen Nasenrückens, sowie den Halsbereich.

Durch Betätigung der Schaltfläche „Angegebene Verschiebung“ erfolgte die Eingabe der achsenabhängigen Verschiebung in mm, die sich aus der präoperativ geplanten Modelloperation ableitete. Anschließend konnte die individuelle Simulation durchgeführt werden. Berechnet wurden bei dieser Simulation neben der achsenabhängigen Verformung auch die Gesamtverformungswerte, die falschfarbenkodiert mittels der Software Design Space dreidimensional visualisiert wurden. Ein interaktives Tool ermöglichte dabei eine quantitative Erfassung der Verformung.

Parameter

Elastizitätsmodul	1,8 MPa
Poisson`s Ratio	0.3
Weichgewebsdicke	5 mm
Lösungsansatz	linear
Fixierte Lagerung	Knotenpunkte supraorbital und zervikal
Fixierte Verschiebung	Knotenpunkte subnasal und submental
Höhe der Verschiebung	individuell abhängig von der Modell-OP

Tab. 2: Rahmenbedingungen bei der Durchführung des virtuellen Experiments

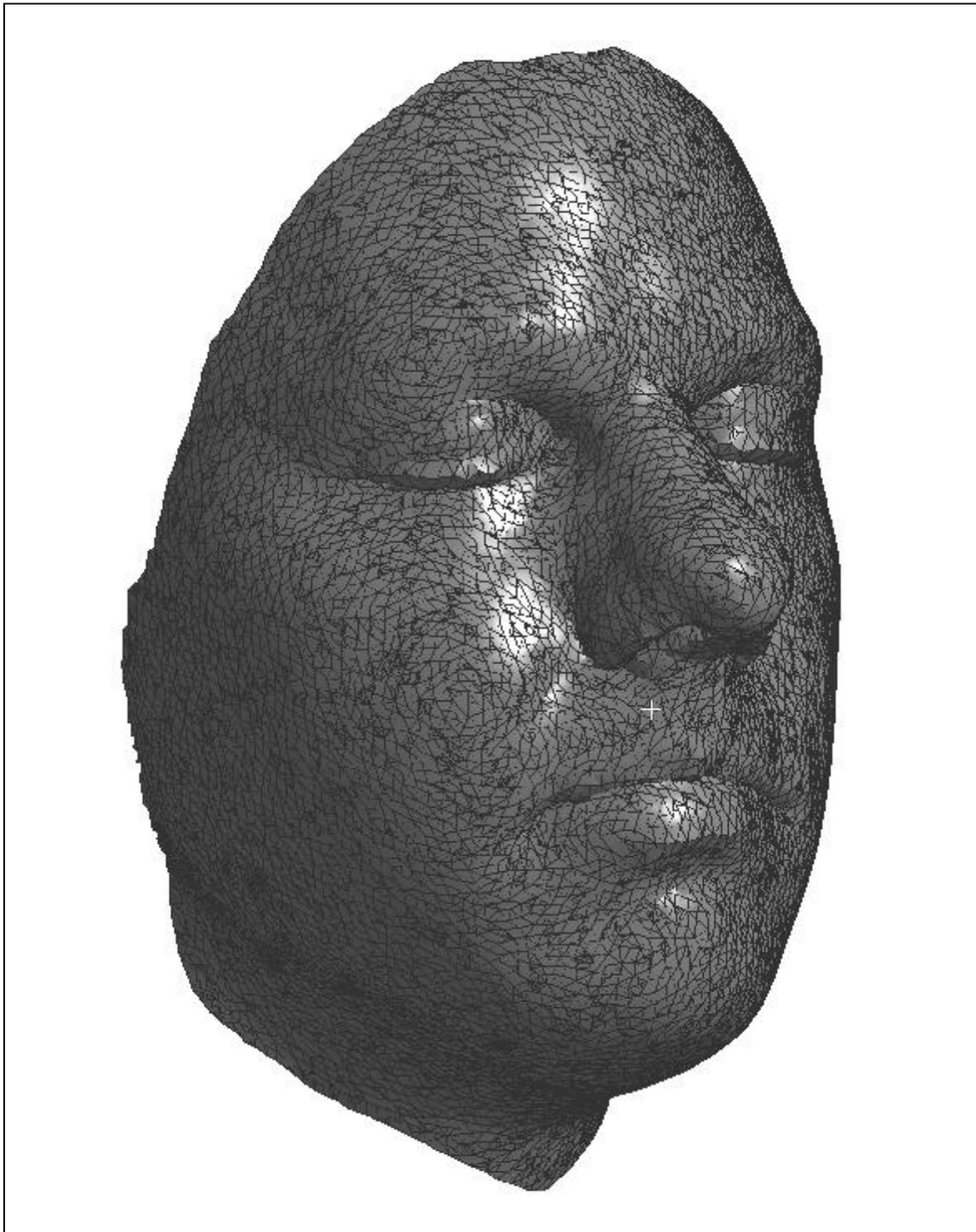


Abb. 11: Punktwolkenmodell ohne Simulation

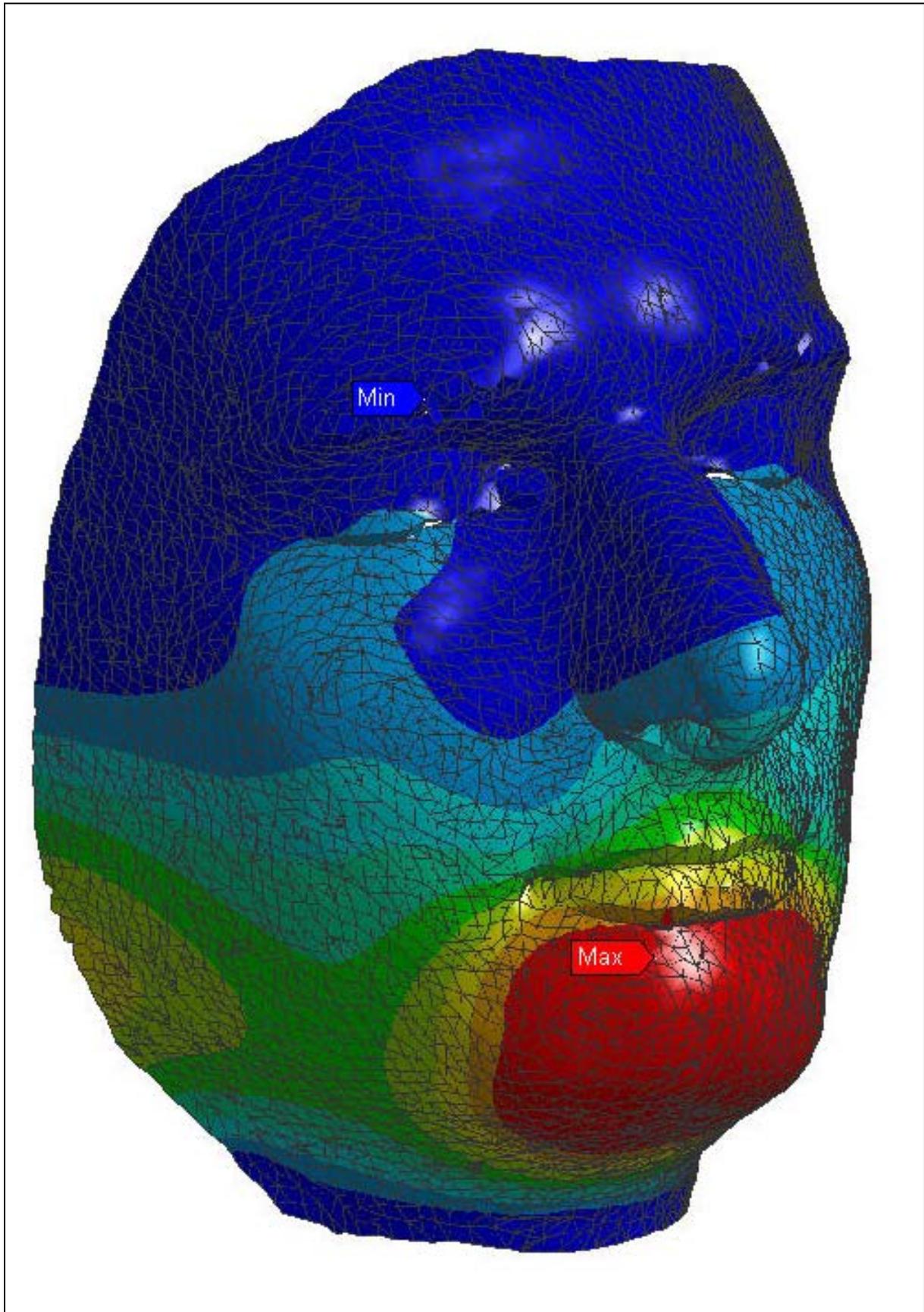


Abb. 12: Individuelle Simulation einer Unterkiefervorverlagerung

3.3. Dentofacial Planner

Der Dentofacial Planner arbeitet mit FRS Daten und wurde von der Firma Dentofacial Software Inc., Toronto entwickelt. Es wurde mit dem Programm DFP Plus 2.01 gearbeitet.

3.3.1. Datenerhebung

Um ein Prognoseverfahren mittels Dentofacial Planner erstellen zu können, wurde zunächst das FRS durchgezeichnet. Das FRS wurde von den oben angeführten Probanden jeweils kurz vor der Operation zu deren Planung angefertigt.

Um später vergleichbare Profilwerte zu verwenden, wurden die Werte der Modelloperation verwendet, die sich im Patientenjournal und an den Splintmodellen befanden.

3.3.2. Durchführung

Nach Eingabe der Patientendaten in das Dentofacial-Planner-Programm wurden anhand eines Schemas, das 71 kephalometrische Vermessungspunkte vorgibt, die einzelnen Punkte des Fernröntgenseitenbildes (Durchzeichnung) mit einem Sensorstift über ein digitales Softwaretool digitalisiert. Die präoperativen Umriss der skelettalen Strukturen und der Profillinie des fazialen Weichgewebes konnten nun von der Software interpoliert werden und lagen zur Simulation in zweidimensionaler Form vor. Danach wurde mit dem Modul „Surgery“ Teile der Maxilla und/ oder Mandibula in sagittaler und vertikaler Richtung entsprechend der Verschiebungswerte der Modelloperation verschoben. Im Anschluss war es möglich das präoperative Bild mit der Simulation zu überlagern.



Abb. 13: Operationsplanung im Dentofacial Planner. Die grüne Linie zeigt den präoperativen Zustand. Die rote Linie stellt die Simulation einer bimaxillären Operation dar.

3.3.3. Kephalometrische Vermessungspunkte

- (1) Glabella, prominentester Punkt der Stirn
- (2) Ein Punkt in der Mitte zwischen Glabella und Weichteilnasion
- (3) Nasion´, Weichteilnasion, der tiefste Punkt der Weichteilkonkavität, auf Höhe der Sutura Nasofrontalis
- (4) Ein Punkt am Übergang der Konkavität des Weichteilnasions zum Nasenrücken
- (5) Dorsum Nasalis, Nasenrücken, annäherungsweise in der Mitte zwischen Nasion´ und Pronasale
- (6) Ein Punkt auf $\frac{3}{4}$ der Strecke zwischen Nasenrücken und Nasenspitze
- (7) Obere Nasenspitze, der am weitesten kranial gelegene Punkt der Nasenspitze
- (8) Pronasale, der am weitesten anterior gelegene Punkt der Nasenspitze
- (9) Untere Nasenspitze, der am weitesten kaudal gelegene Punkt der Nasenspitze
- (10) Columella, der am weitesten anterior gelegene Punkt des Nasenstegs
- (11) Subnasale, am Übergang des Nasenstegs zum Philtrum der Oberlippe
- (12) Sulcus labrale superius, der tiefste Punkt in der Konkavität der Oberlippe
- (13) Labrale superius, vorderster Punkt an der Grenze zwischen Lippenrot und Lippenweiß der Oberlippe
- (14) Ein Punkt auf der Oberlippe, zwischen Labrale superius und Stomion superius
- (15) Stomion superius, der am weitesten kaudal gelegene Punkt der Oberlippe
- (16) Stomion inferius, der am weitesten kranial gelegene Punkt der Unterlippe
- (17) Ein Punkt auf der Unterlippe, zwischen Stomion inferius und Labrale inferius
- (18) Labrale inferius, vorderster Punkt an der Grenze zwischen Lippenrot und Lippenweiß der Unterlippe
- (19) Ein Punkt in der Mitte zwischen Labrale inferius und Labiomentalfalte
- (20) Labiomentalfalte, der tiefste Punkt in der Konkavität zwischen Labrale inferius und Weichteilkinn
- (21) Ein Punkt zwischen Labiomentalfalte und Weichteilpogonion
- (22) Pogonion´, Weichteilpogonion, der am weitesten anterior gelegene Punkt des Weichteilkinns
- (23) Gnathion´, Weichteilgnathion, der am weitesten anterior und kaudal gelegene Punkt des Weichteilkinns

- (24) Menton´, Weichteilmenton, der am weitesten kaudal gelegene Punkt des Weichteilkinns, unterhalb des Menton
- (25) Cervikalpunkt, Halspunkt, der tiefste Punkt am Übergang zwischen Submentalregion und Hals
- (26) Sella, Mittelpunkt der Sella turcica
- (27) Nasion, Übergang des Os frontale in das Os nasale an der Sutura nasofrontalis
- (28) Orbitale, der am weitesten kaudal gelegene Punkt des knöchernen Orbitarandes
- (29) Spina nasalis posterior (SNP), posteriore Begrenzung des Nasenbodens an der Spitze der Spina nasalis posterior
- (30) Palatinum 1, Punkte zwischen der Spina nasalis posterior und anterior entlang des knöchernen Nasenbodens
- (31) Palatinum 2, Punkte zwischen der Spina nasalis posterior und anterior entlang des knöchernen Nasenbodens
- (32) Palatinum 3, Punkte zwischen der Spina nasalis posterior und anterior entlang des knöchernen Nasenbodens
- (33) Palatinum 4, Punkte zwischen der Spina nasalis posterior und anterior entlang des knöchernen Nasenbodens
- (34) Palatinum 5, Punkte zwischen der Spina nasalis posterior und anterior entlang des knöchernen Nasenbodens
- (35) Spina nasalis anterior (ANS), vordere Begrenzung des Nasenbodens an der Spitze der Spina nasalis anterior
- (36) Infra ANS, ein Punkt auf der Vorderfläche der Maxilla in der Mitte zwischen ANS und A-Punkt
- (37) A-Punkt, Subspinale, der tiefste Punkt in der Konkavität der Maxilla zwischen ANS und dem Alveolarkamm
- (38) Wurzelspitze des oberen medialen Schneidezahns
- (39) Kronenspitze des oberen medialen Schneidezahns
- (40) Wurzelspitze des oberen Eckzahns
- (41) Kronenspitze des oberen Eckzahns
- (42) Wurzelspitze des oberen ersten Molaren, konstruiert durch eine Senkrechte zur Okklusionsebene durch die mesiale Höckerspitze
- (43) Mesiale Höckerspitze des ersten oberen Molaren

- (44) Mesiale Höckerspitze des ersten unteren Molaren
- (45) Wurzelspitze des unteren ersten Molaren, konstruiert durch eine Senkrechte zur Okklusionsebene durch die mesiale Höckerspitze
- (46) Wurzelspitze des unteren Eckzahns
- (47) Kronenspitze des unteren Eckzahns
- (48) Kronenspitze des unteren medialen Schneidezahns
- (49) Wurzelspitze des unteren medialen Schneidezahns
- (50) B-Punkt, Supramentale, der tiefste Punkt in der Konkavität der Mandibula, zwischen Alveolarkamm und Pogonion
- (51) PM-Punkt, ein Punkt an der Kinnkontur zwischen B-Punkt und Pogonion, Übergangspunkt von der Konkavität zur Konvexität
- (52) Pogonion, am weitesten anterior gelegener Punkt des knöchernen Kinns
- (53) Gnathion, am weitesten kaudal und anterior gelegener Punkt des knöchernen Kinns
- (54) Menton, am weitesten kaudal gelegener Punkt des knöchernen Kinns
- (55) Posterior Genioplasty Point, ein Punkt, der für Planungen von Kinnplastiken wichtig ist
- (56) Ramal Osteotomy Point, ein Punkt, der für Darstellung einer Osteotomie im aufsteigendem Ast Bedeutung hat
- (57) Ein Punkt zwischen Ramal Osteotomy Point und Gonion
- (58) Gonion, Schnittpunkt der Winkelsymmetralen zwischen Ramustangente und Corpustangente mit der Mandibulakontur
- (59) Ein Punkt am Hinterrand des aufsteigenden Astes in der Nähe des Gonions
- (60) Ein Punkt am Hinterrand des aufsteigenden Astes annäherungsweise in der Mitte zwischen Gonion und Articulare
- (61) Articulare, Schnittpunkt des Hinterrandes des aufsteigenden Astes mit der unteren Kontur der Schädelbasis
- (62) Condylion, am weitesten posterior und kaudal gelegene Punkt des Kondyluskopfes
- (63) Ein Punkt, der das Rotationszentrum der Mandibula darstellt, im Zentrum des Kondyluskopfes
- (64) Porion, der am weitesten kranial gelegene Punkt des äußeren knöchernen Gehörganges

- (65) Basion, der am weitesten dorsal gelegene Punkt am Vorderrand des Foramen occipitale magnum
- (66) Pterygoid-Punkt, der am weitesten kranial gelegene Punkt der pterygo-maxillären Fissur
- (67) Punkt am Vorderrand des Röntgenbildes zur Festlegung der Vertikalen
- (68) Punkt am Vorderrand des Röntgenbildes zur Festlegung der Vertikalen
- (69) Sigmoid, der tiefste Punkt der Incisura semilunaris
- (70) Anteriorer Ramuspunkt, distalster Punkt an der Konkavität des Vorderrandes des aufsteigenden Astes der Mandibula
- (71) Oberer Molarenkontaktpunkt, distalster Punkt an der Kronenkontur der oberen ersten Molaren

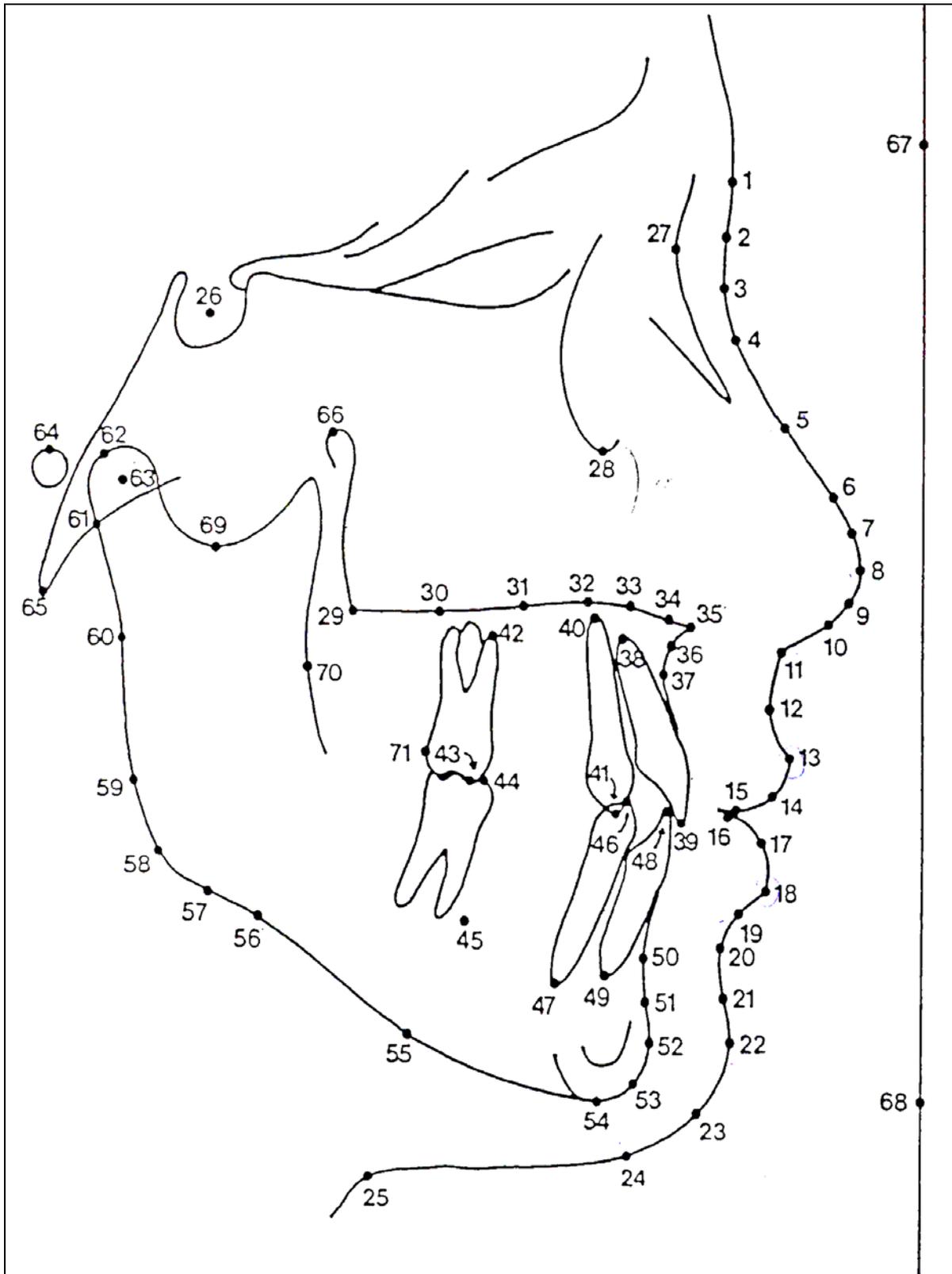


Abb. 14: Darstellung der im Dentofacial Planner verwendeten kephalometrischer Messpunkte

3.4. Datenauswertung

Die Auswertung erfolgte mit dem Softwareprogramm CorelDraw 9/ Corel PhotoPaint der Firma Corel Inc., Ottawa, Kanada. Die Software bietet die Möglichkeit des direkten Vergleichs der Simulationen zum postoperativen Erscheinungsbild (Profilfoto) durch Überlagerung der Bilder in verschiedenen Transparenzen. Die Auswertung der Profile wurde anhand von acht kephalometrischen Punkten (Dorsum Nasalis, Pronasale, Subnasale, Labrale superius, Labrale inferius, Labiomentalfalte, Weichteilpogonion, Weichteilmenton) ermittelt. Als Referenzpunkte dienten das Nasion und das Pronasale, als Referenzlinie das Dorsum nasalis. Die im Fernröntgenseitenbild gemessene Strecke zwischen Nasion und Pronasale wurde anhand der Skalierung auf dem Röntgenbild umgerechnet. Dieser Wert war die Basis um eine möglichst genaue 1:1 Wiedergabe zu erhalten. Anhand eines Gitternetzes konnte der Betrag der Verschiebungen dieser Punkte abgelesen werden.

4. Ergebnisse

4.1. Finite-Elemente-Modell

4.1.1. Durchschnittliche Abweichung der Prognose vom postoperativen Gesicht

Bei 12 Probanden wurde das postoperative Profil mit dem zugehörigen Profil des FE-Modells verglichen. Das Profil wurde anhand von 8 verschiedenen Messpunkten (Dorsum Nasalis, Pronasale, Subnasale, Labrale superius, Labrale inferius, Labiomentalfalte, Weichteilpogonion und Weichteilmenton) entlang der Profillinie untersucht.

In Abb. 15 und Abb. 16 werden die Mittelwerte und die Standardabweichungen der Differenzmessungen aller Messpunkte in horizontaler und in vertikaler Verschiebung dargestellt. Weiterhin werden die Abweichungen der Simulationen regional analysiert.

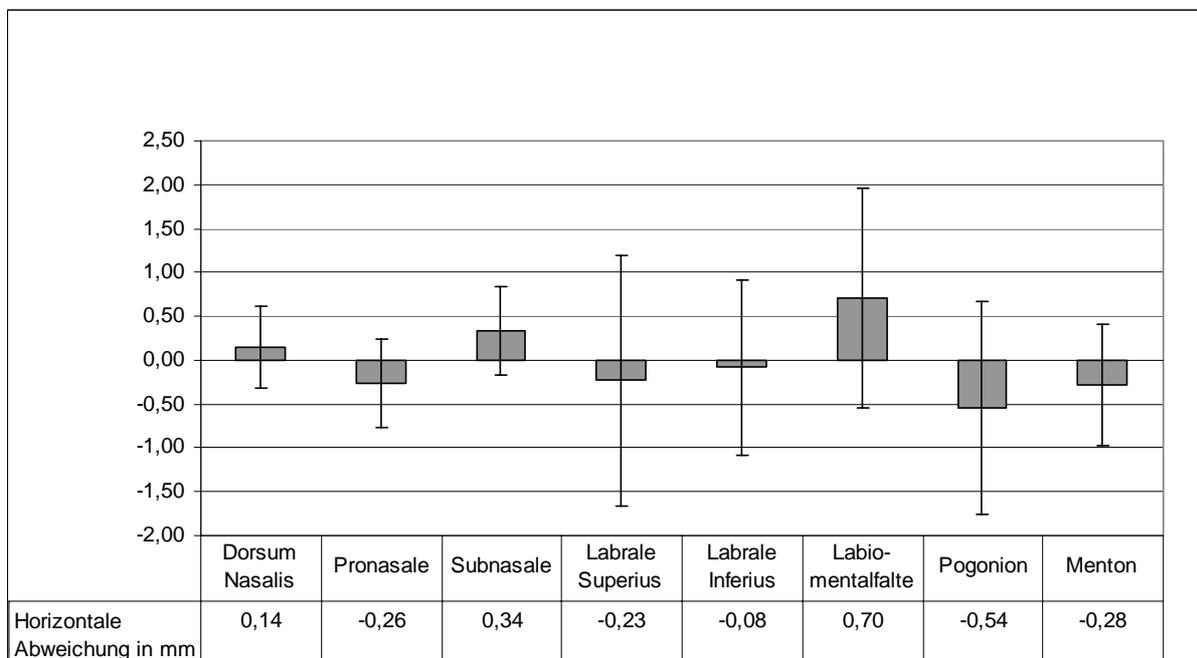


Abb. 15: Verteilung der horizontalen Abweichung zwischen dem postoperativen Gesicht und der Simulation Finite-Elemente-Modell bei 12 Probanden

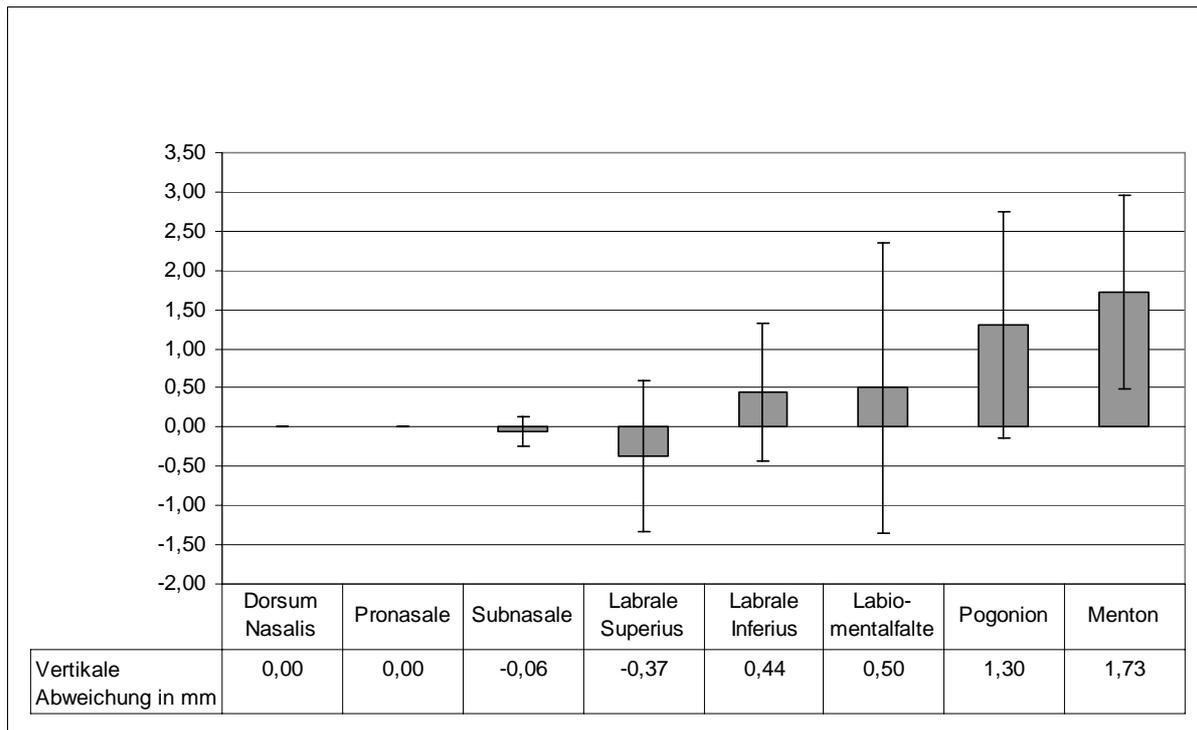


Abb. 16: Verteilung der vertikalen Abweichung zwischen dem postoperativen Gesicht und der Simulation im Finite-Elemente-Modell bei 12 Probanden

4.1.2. Regionale Abweichungen

Die folgenden Diagramme sind nach den einzelnen Messpunktregionen gegliedert und zeigen die horizontalen (anterior und posterior) und vertikalen (kranial und kaudal) Verschiebungen. Die Darstellung „keine“ Verschiebung stellt die Anzahl der Fälle dar, bei der weder eine horizontale noch eine vertikale Verschiebung zu messen war. In einigen Fällen konnte eine horizontale Verschiebung gekoppelt mit einer vertikalen Verschiebung auftreten, die getrennt registriert wurden.

4.1.3. Dorsum Nasalis

Bei den 12 Probanden gab es bei der Simulation des FE- Modells in einem Fall eine Abweichung nach anterior (siehe Abb. 17). In 11 Fällen war kein Unterschied zu verzeichnen.

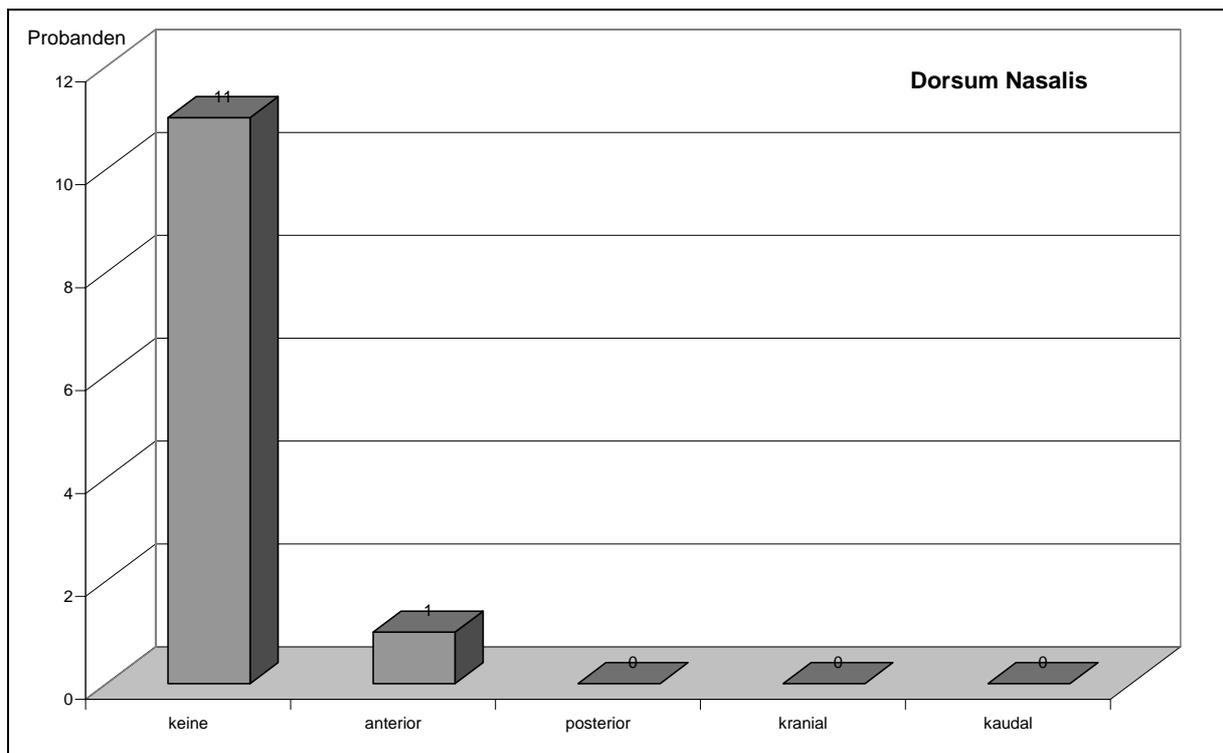


Abb. 17: Verteilung der Abweichungsrichtungen am Messpunkt Dorsum Nasalis zwischen postoperativem Gesicht und Finite-Elemente-Modell

4.1.4. Pronasale

Die Nasenspitze wich in 3 von 12 Fällen in der Simulation nach posterior ab. Bei 9 Probanden bestand kein Unterschied (siehe Abb. 18).

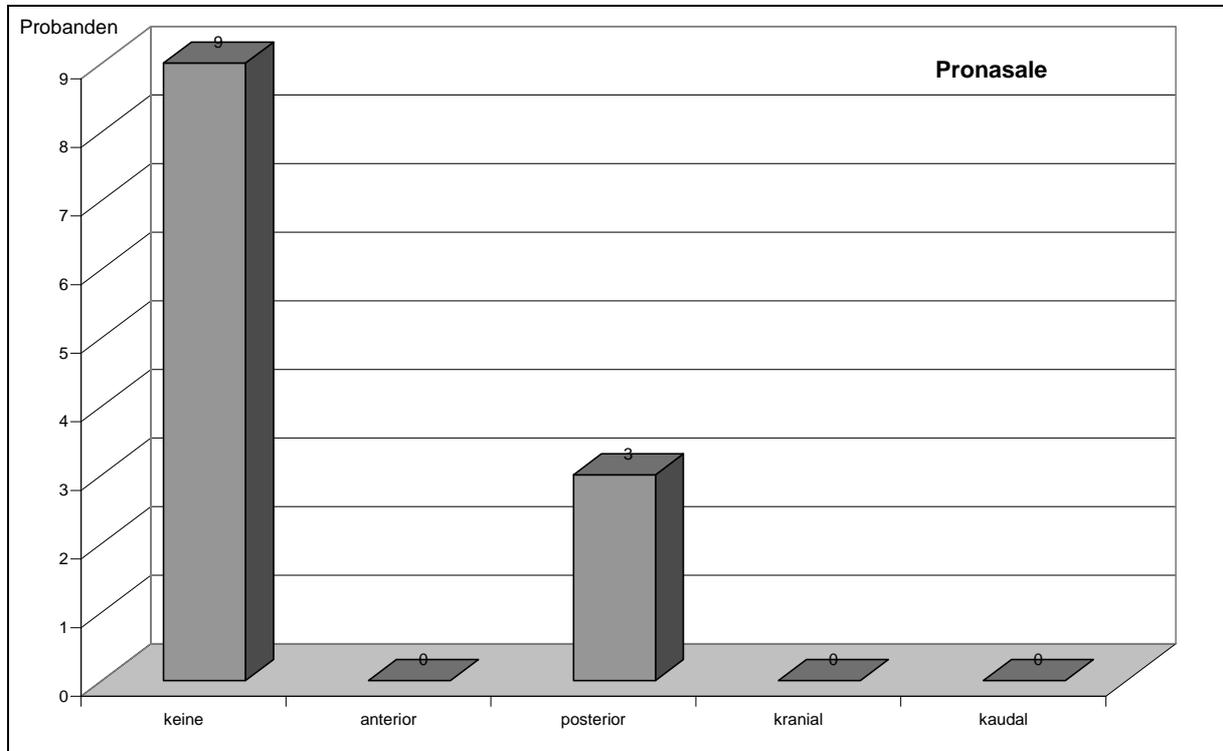


Abb. 18: Verteilung der Abweichungsrichtungen am Messpunkt Pronasale zwischen postoperativem Gesicht und Finite-Elemente-Modell

4.1.5. Subnasale

Der Messpunkt Subnasale lag bei der Simulation in 5 Fällen nach anterior und in einem Fall nach kaudal verschoben. Eine komplette Übereinstimmung gab es bei 6 Probanden (siehe Abb. 19).

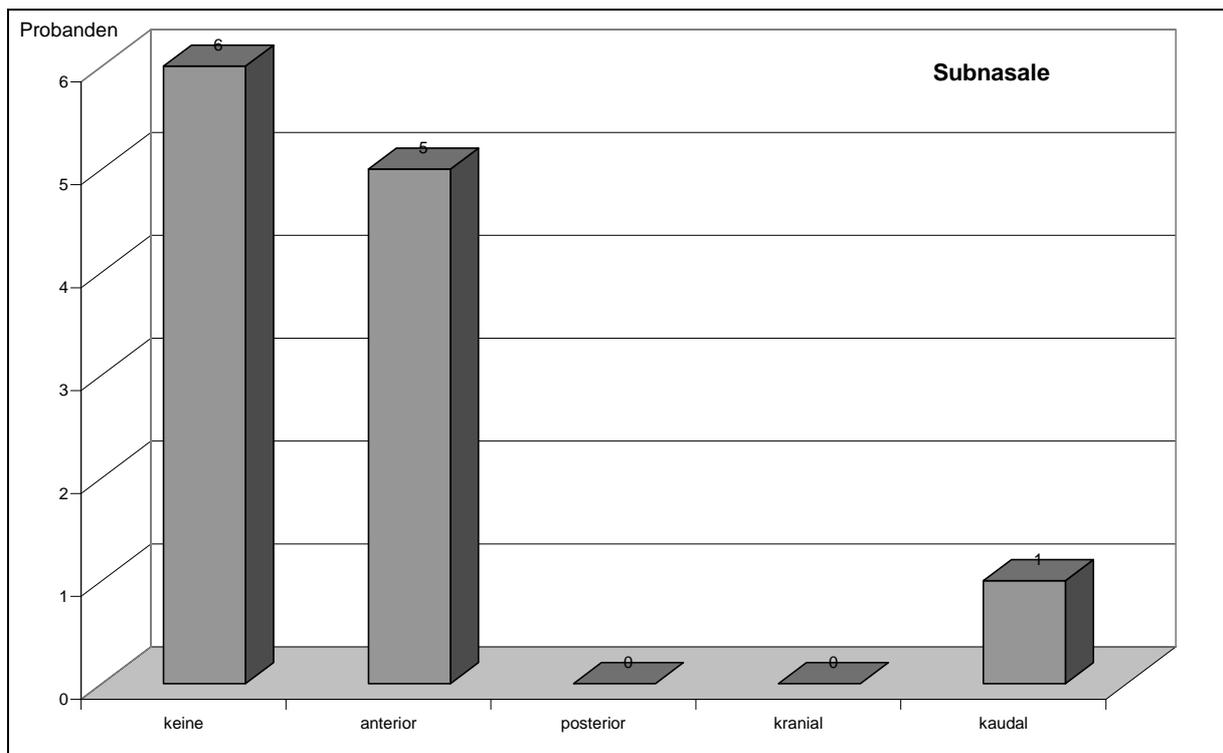


Abb. 19: Verteilung der Abweichungsrichtungen am Messpunkt Subnasale zwischen postoperativem Gesicht und Finite-Elemente-Modell

4.1.6. Labrale superius

Am Messpunkt der Oberlippe wich die Simulation des FE-Modells horizontal in 4 Fällen nach anterior und in 2 nach posterior ab. In der Vertikalen wurde die Verschiebung in 2 Fällen nach kranial und in 2 Fällen nach kaudal festgestellt. Eine komplette Übereinstimmung fand sich bei 4 Probanden (siehe Abb. 20).

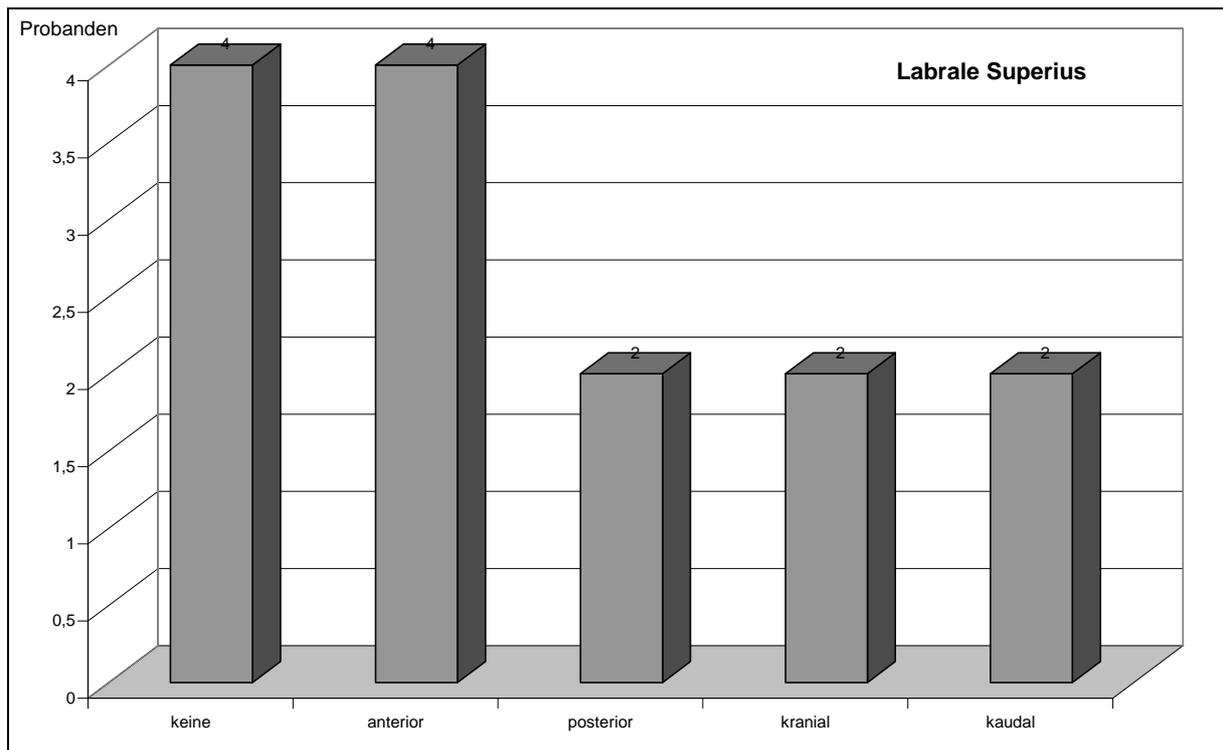


Abb. 20: Verteilung der Abweichungsrichtungen am Messpunkt Labrale superius zwischen postoperativem Gesicht und Finite-Elemente-Modell

4.1.7. Labrale inferius

Der Messpunkt Unterlippe wich in 4 Fällen nach anterior oder nach posterior, in 4 Fällen nach kranial und in 1 Fall nach kaudal ab (siehe Abb. 21). In 4 von 12 Fällen stimmte die Simulation mit der Realität überein.

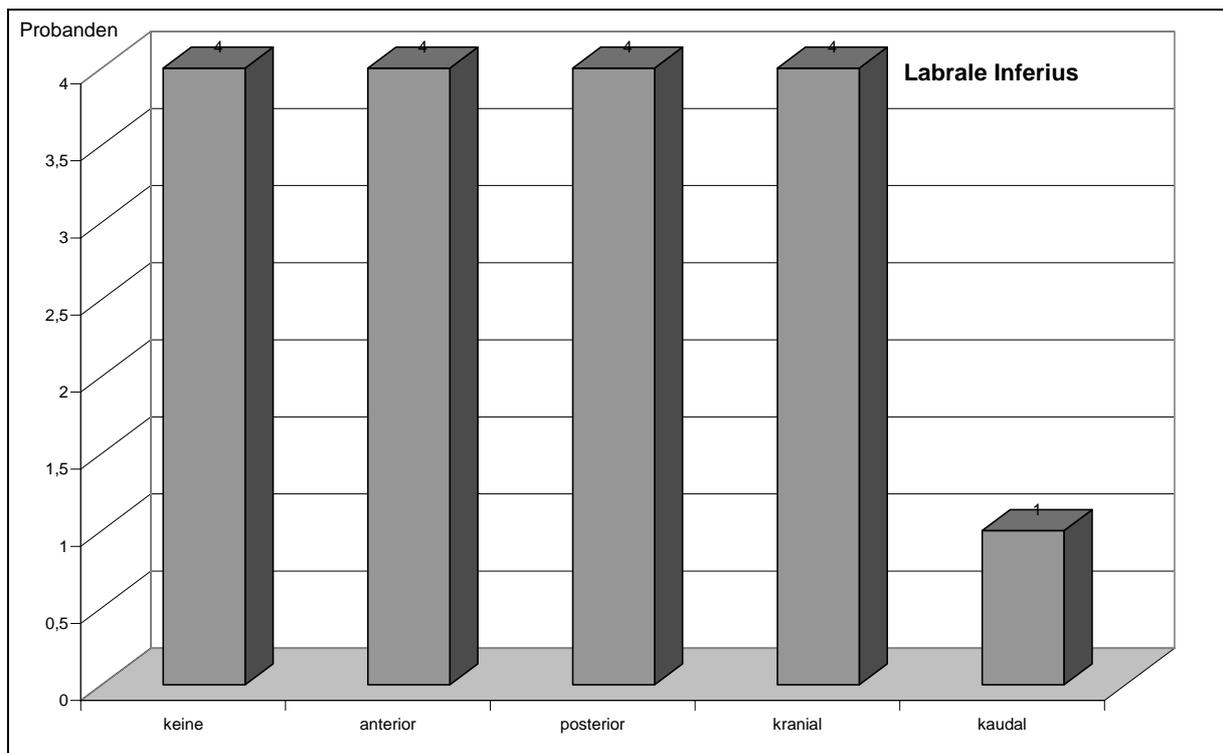


Abb. 21: Verteilung der Abweichungsrichtungen am Messpunkt Labrale inferius zwischen postoperativem Gesicht und Finite-Elemente-Modell

4.1.8. Labiomentalfalte

Am Messpunkt der Labiomentalfalte wurden keine kompletten Übereinstimmungen verzeichnet. Von den 12 Probanden zeigte sich in 11 Fällen eine horizontale Verschiebung. Bei 7 Fällen ergab sich eine Verschiebung nach anterior und 4 Fällen nach posterior. In der Vertikalen ergab sich eine Verschiebung bei 10 von 12 Fällen. In 6 Fällen wich der Messpunkt nach kranial und in 4 nach kaudal ab (siehe Abb. 22).

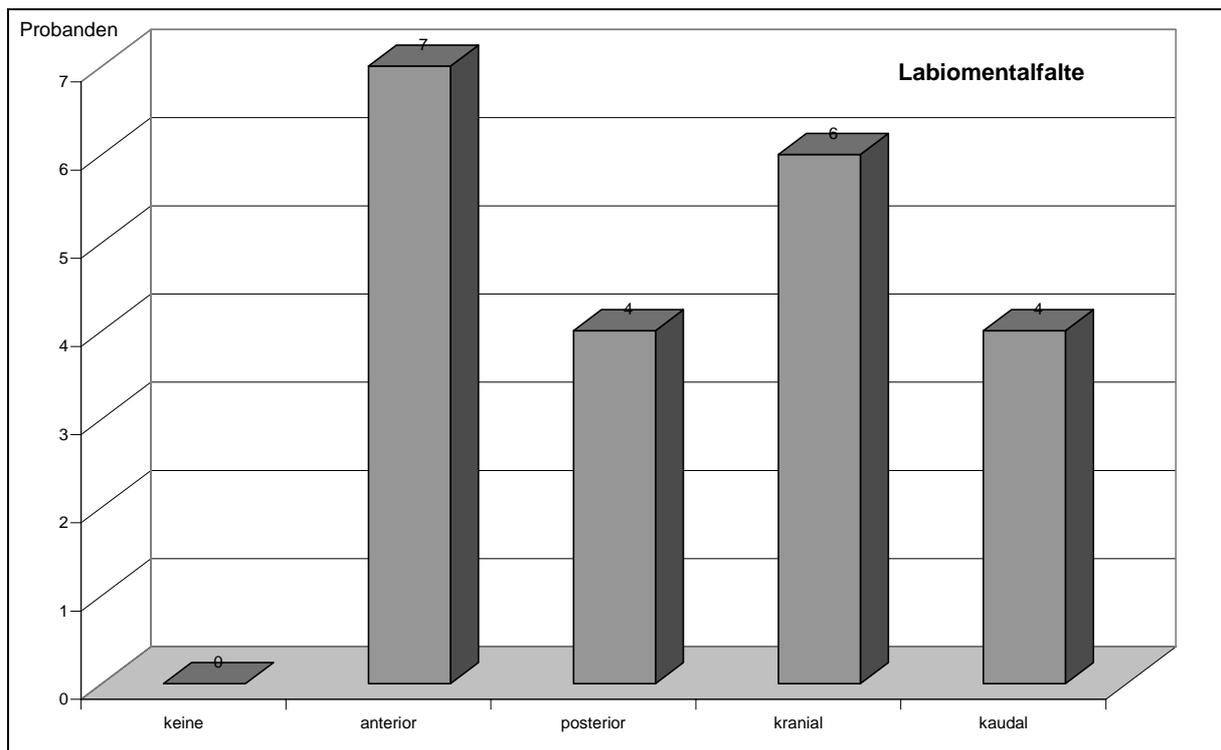


Abb. 22: Verteilung der Abweichungsrichtungen am Messpunkt Labiomentalfalte zwischen postoperativem Gesicht und Finite-Elemente-Modell

4.1.9. Weichteilpogonion

Eine Übereinstimmung im Messpunkt Weichteilpogonion ergab sich bei 3 von 12 Probanden. In 5 Fällen wich das Pogonion nach posterior, in 3 Fällen nach anterior ab. In 6 Fällen lag das simulierte Pogonion nach kranial verschoben vor (siehe Abb. 23).

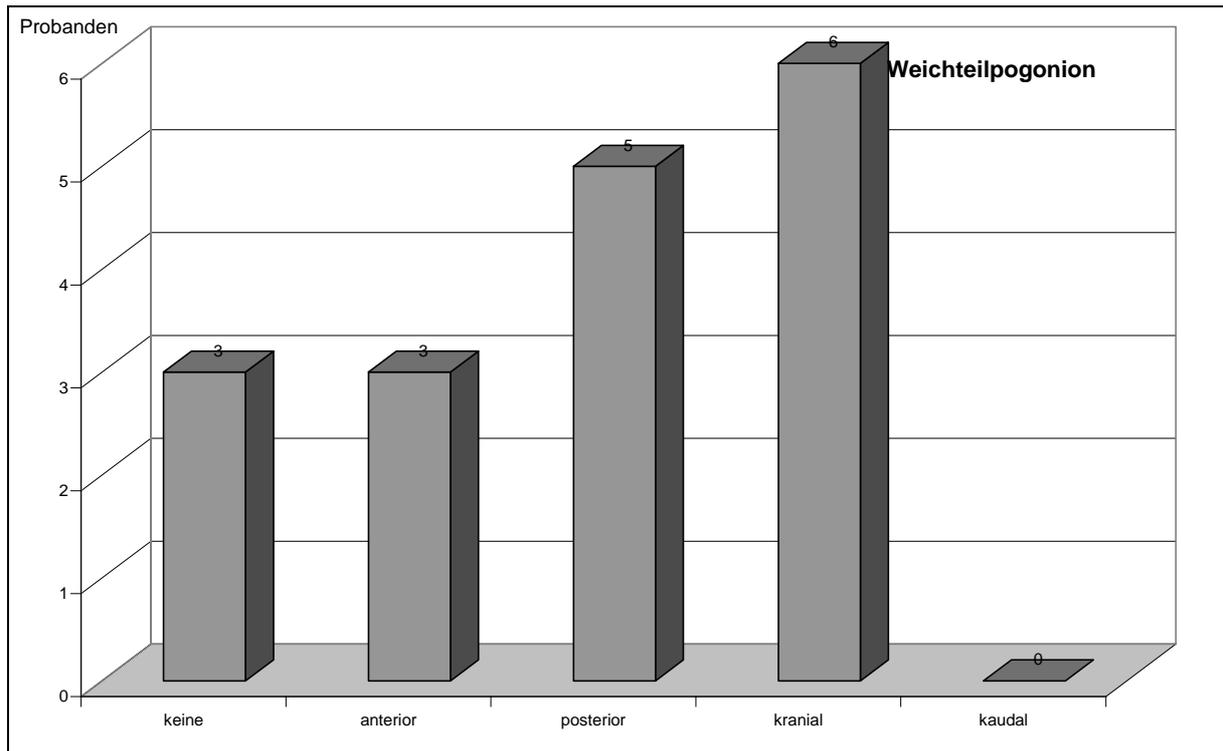


Abb. 23: Verteilung der Abweichungsrichtungen am Messpunkt Weichteilpogonion zwischen postoperativem Gesicht und Finite-Elemente-Modell

4.1.10. Weichteilmenton

Am Messpunkt Weichteilmenton ergaben sich in 2 Fällen komplette Übereinstimmungen. Horizontal wich der Messpunkt in 1 Fall nach anterior und in 3 Fällen nach posterior ab. In der Vertikalen lag der simulierte Messpunkt in 9 Fällen nach kranial verschoben vor (siehe Abb. 24).

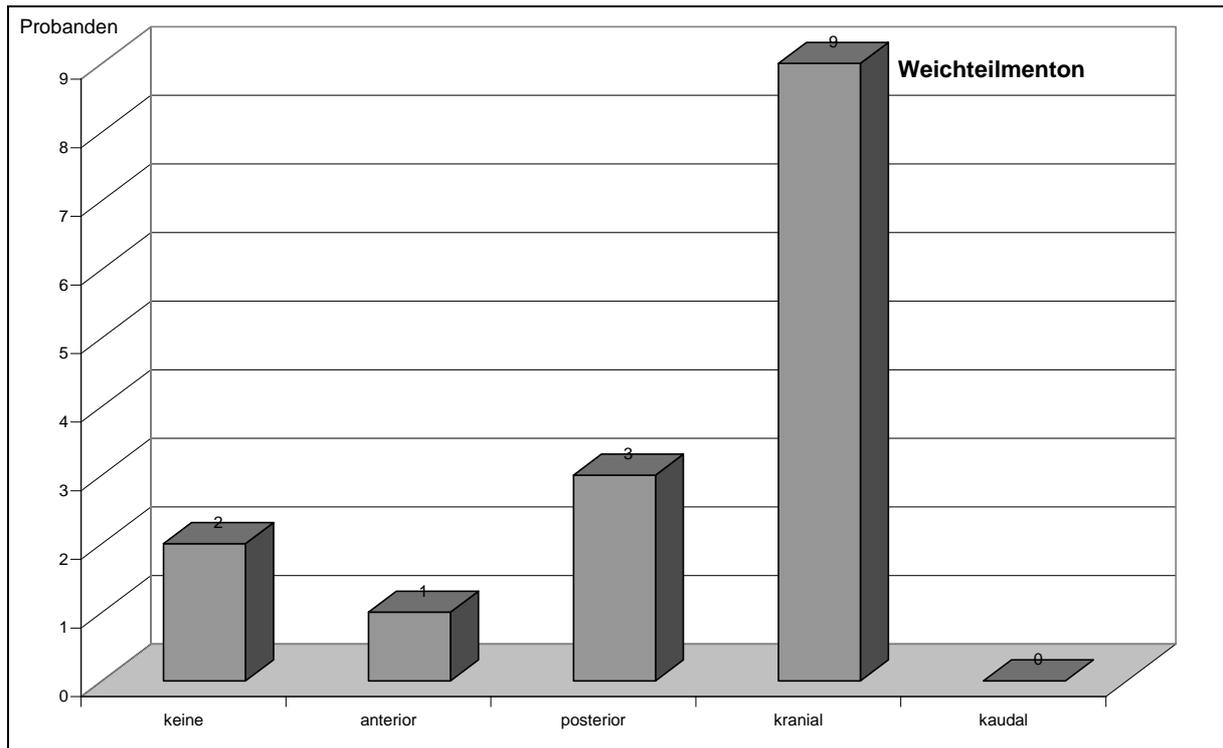


Abb. 24: Verteilung der Abweichungsrichtungen am Messpunkt Weichteilmenton zwischen postoperativem Gesicht und Finite-Elemente-Modell

4.1.11. Wange

Im simulierten Modell lassen sich die Wangenveränderungen metrisch ablesen. Bei allen 12 Probanden wich die Wange nach medial ab, unabhängig der Operationsart. Die proportionale Wangenveränderung konnte sowohl bei alleiniger Korrektur im Oberkiefer als auch im Unterkiefer festgestellt werden. Bei bignathen Korrekturen summieren sich die Werte der operativen Korrektur. Steigende Veränderungen des Kiefers zogen stärkere Abweichungen der Wange nach sich (siehe Abb. 25).

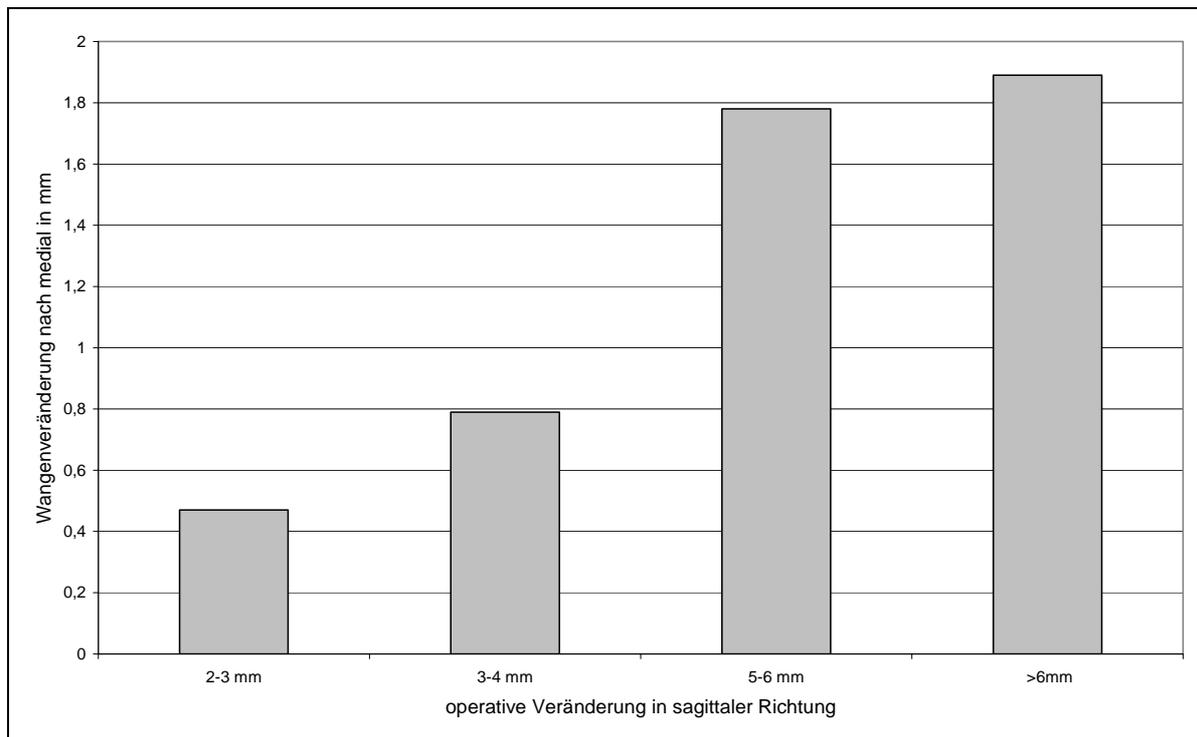


Abb. 25: Abweichung des Wangenmesspunktes nach medial in Abhängigkeit der Größe der operativen Verschiebung in sagittaler Richtung

4.2. Dentofacial Planner

4.2.1. Durchschnittliche Abweichung der Prognose vom postoperativen Gesicht

Bei 12 Probanden wurde das postoperative Profil mit dem zugehörigen Profil des Dentofacial Planners verglichen. Das Profil wurde ebenfalls anhand von 8 verschiedenen Messpunkten (Dorsum Nasalis, Pronasale, Subnasale, Labrale superius, Labrale inferius, Labiomentalfalte, Weichteilpogonion und Weichteilmenton) entlang der Profillinie untersucht. In Abb. 26 und Abb. 27 werden die Mittelwerte und

die Standardabweichungen der Differenzmessungen aller Messpunkte in horizontaler und in vertikaler Verschiebung dargestellt. Zudem werden die Abweichungen der Simulationen regional analysiert.

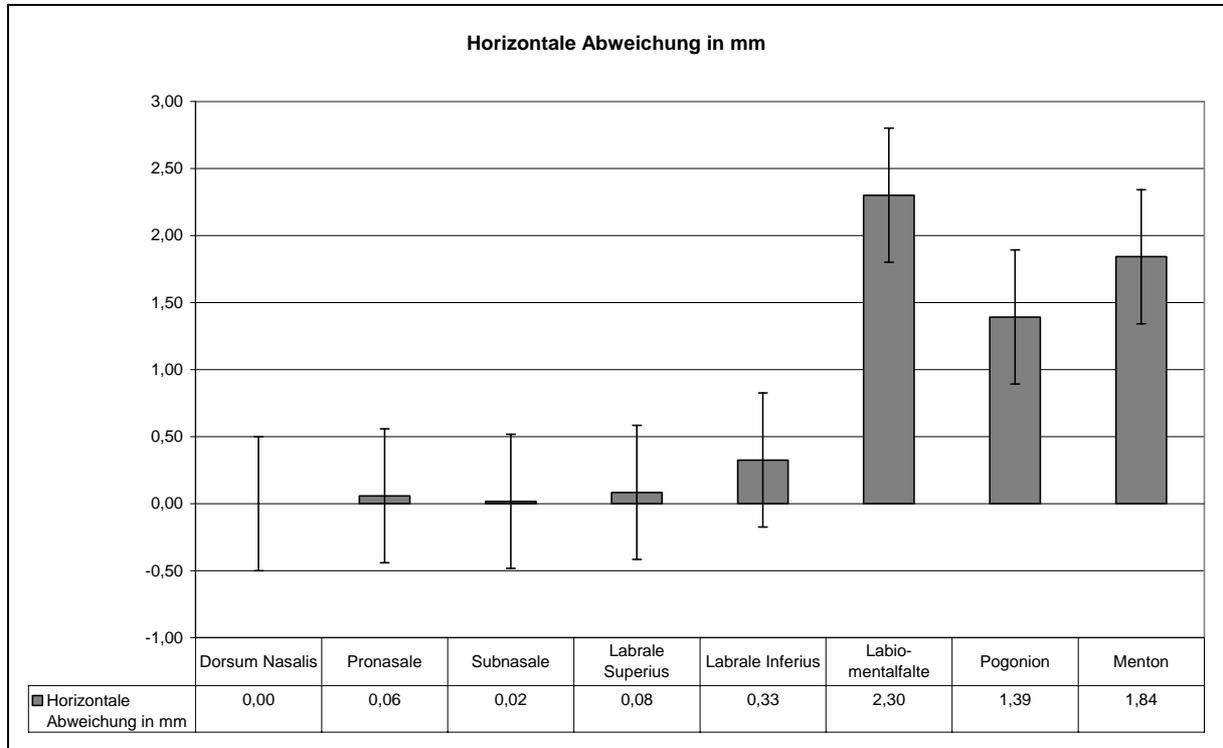


Abb. 26: Verteilung der horizontalen Abweichung zwischen dem postoperativen Gesicht und der Simulation im Dentofacial Planner bei 12 Probanden

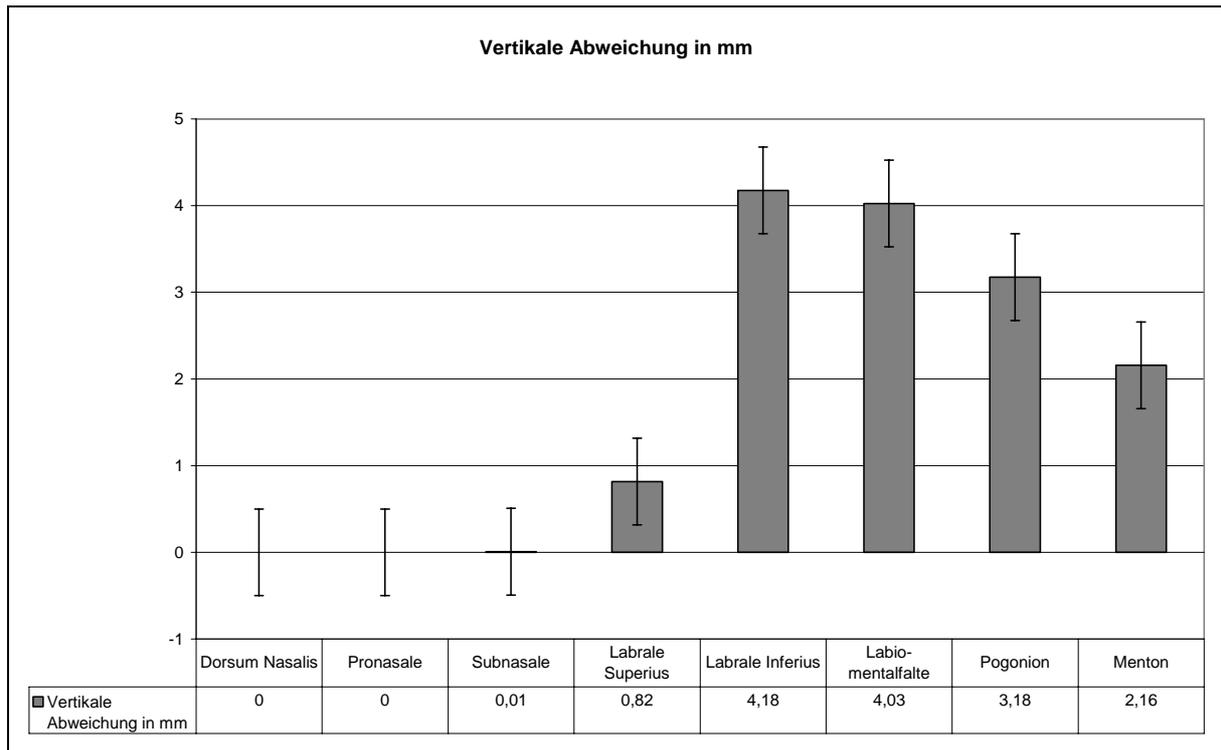


Abb. 27: Verteilung der vertikalen Abweichung zwischen dem postoperativen Gesicht und der Simulation im Dentofacial Planner (DFP) bei 12 Probanden

4.2.2. Regionale Abweichung

4.2.3. Dorsum Nasalis

Der Messpunkt Nasenrücken zeigte in allen Fällen der Untersuchung ein komplette Übereinstimmung zwischen dem realen Profil des Probanden und der Simulation am Dentofacial Planner (siehe Abb. 28).

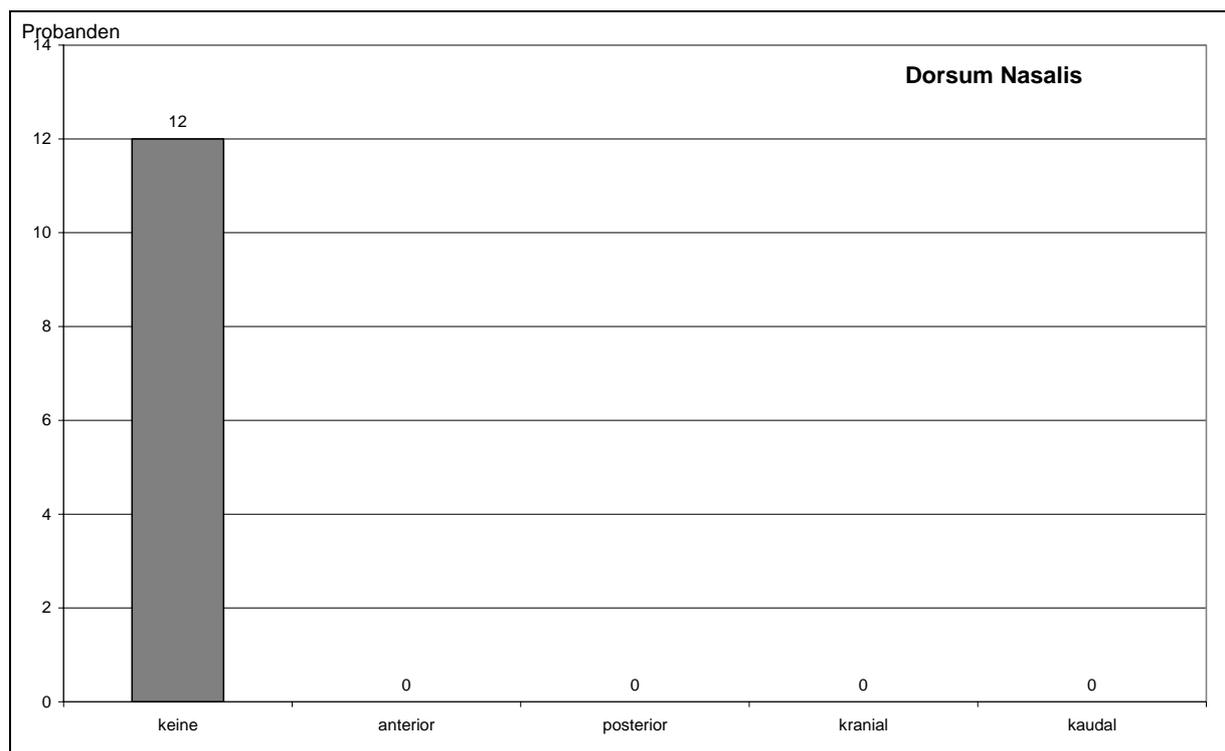


Abb. 28: Verteilung der Abweichungsrichtungen am Messpunkt Dorsum Nasalis zwischen postoperativem Gesicht und DFP

4.2.4. Pronasale

Der Messpunkt der Nasenspitze ergab in 6 von 12 Fällen eine Übereinstimmung. Bei 3 Fällen wurde jeweils eine Verschiebung nach anterior oder posterior registriert. Vertikal wurden keine Verschiebungen registriert (siehe Abb. 29).

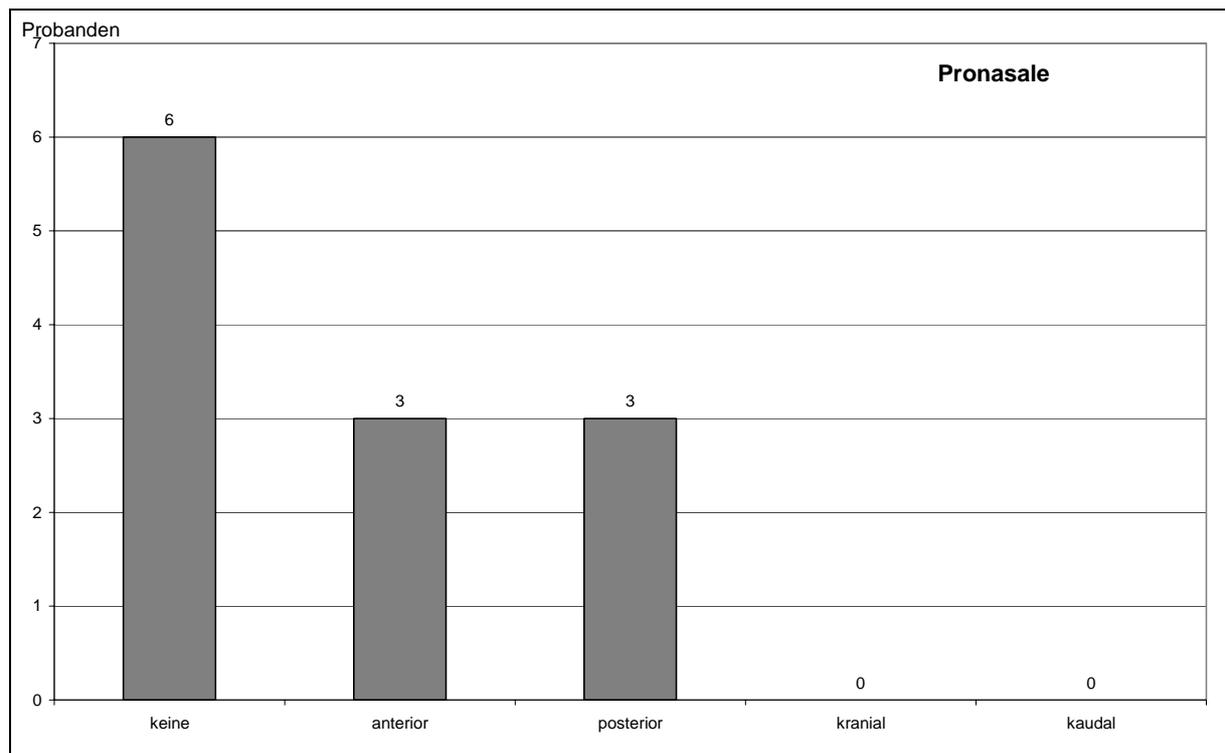


Abb. 29: Verteilung der Abweichungsrichtungen am Messpunkt Pronasale zwischen postoperativem Gesicht und DFP

4.2.5. Subnasale

Eine Übereinstimmung des Messpunktes Subnasale war bei 7 von 12 Fällen gegeben. Eine anteriore Verschiebung war in 3 Fällen, eine posteriore in 2 Fällen zu verzeichnen. In 1 Fall wich der Messpunkt nach kaudal und in 2 Fällen nach kranial ab (siehe Abb. 30).

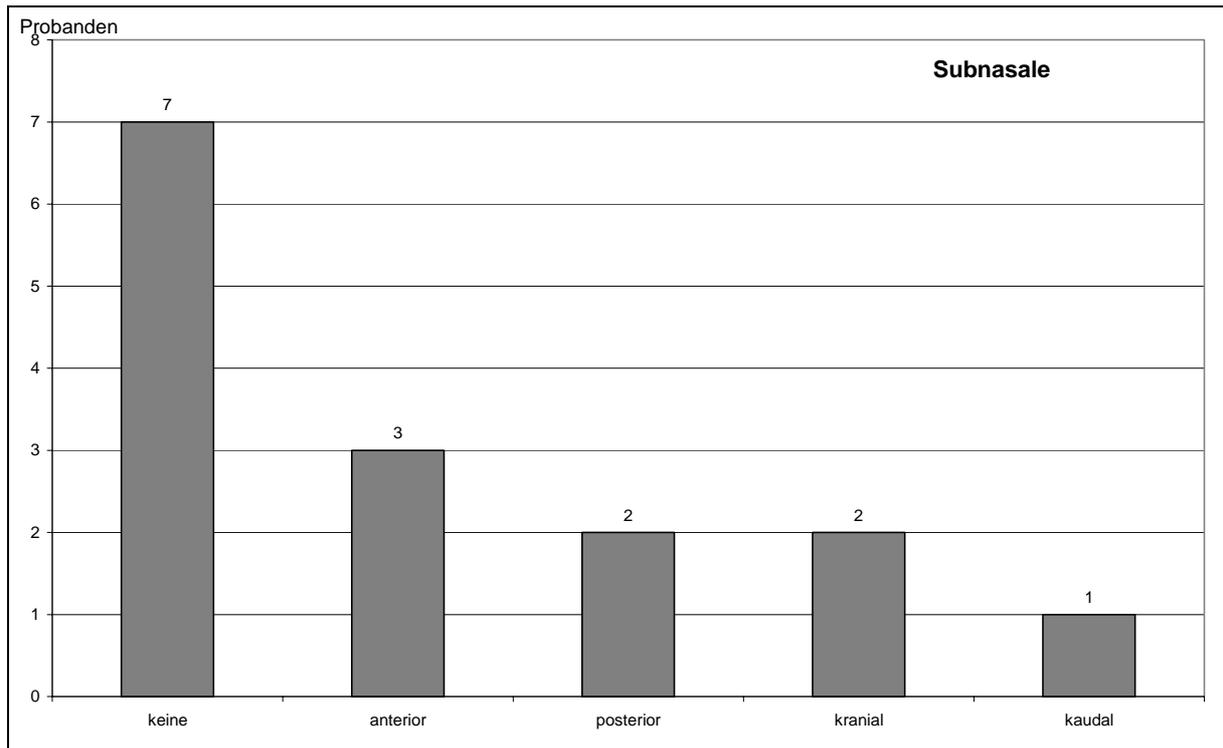


Abb. 30: Verteilung der Abweichungsrichtungen am Messpunkt Subnasale zwischen postoperativem Gesicht und DFP

4.2.6. Labrale superius

Der Messpunkt Labrale superius zeigte in 7 Fällen eine anteriore und in 4 Fällen eine posteriore Verschiebung. In 5 Fällen wich der Punkt nach kranial und in 2 Fällen nach kaudal ab. Bei 2 Probanden gab es an diesem Messpunkt eine komplette Übereinstimmung (siehe Abb. 31).

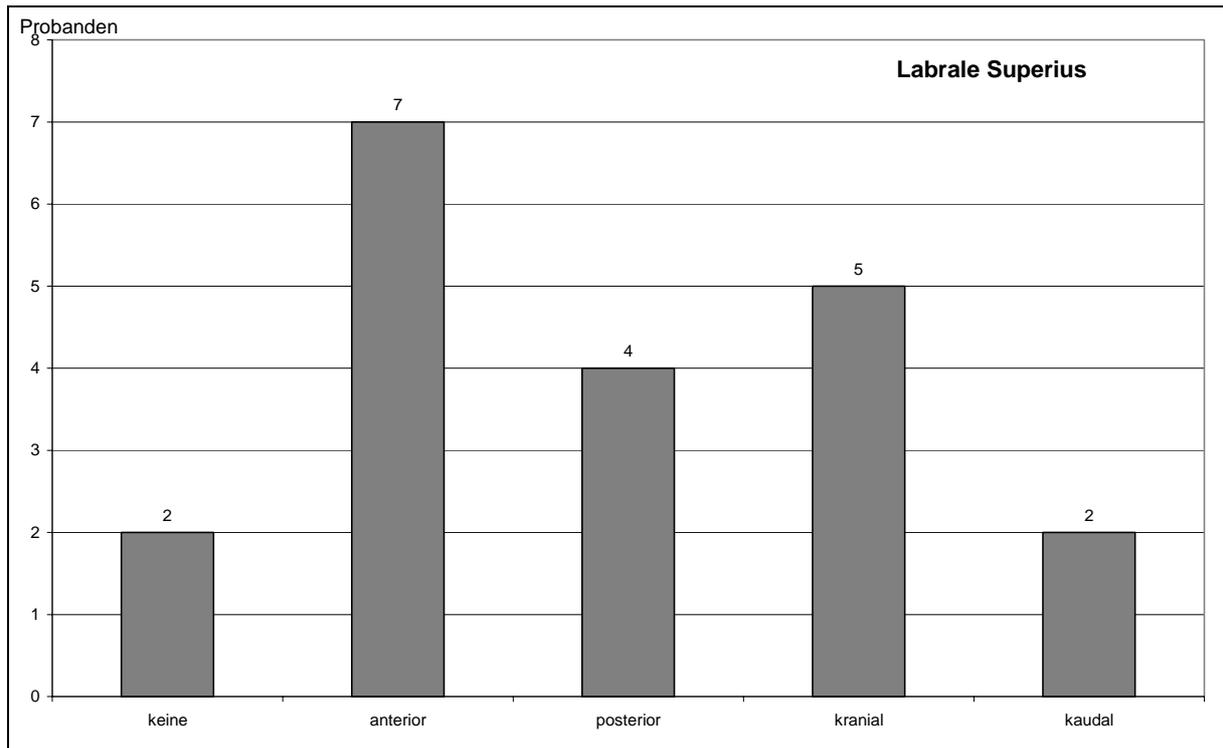


Abb. 31: Verteilung der Abweichungsrichtungen am Messpunkt Labrale superius zwischen postoperativem Gesicht und DFP

4.2.7. Labrale inferius

Die Unterlippe stimmte bei keiner Simulation komplett überein. In allen 12 Fällen zeigte sich eine anteriore Verschiebung. In der Vertikalen war der Messpunkt in 7 Fällen nach kranial und in 4 Fällen nach kaudal verschoben (siehe Abb. 32).

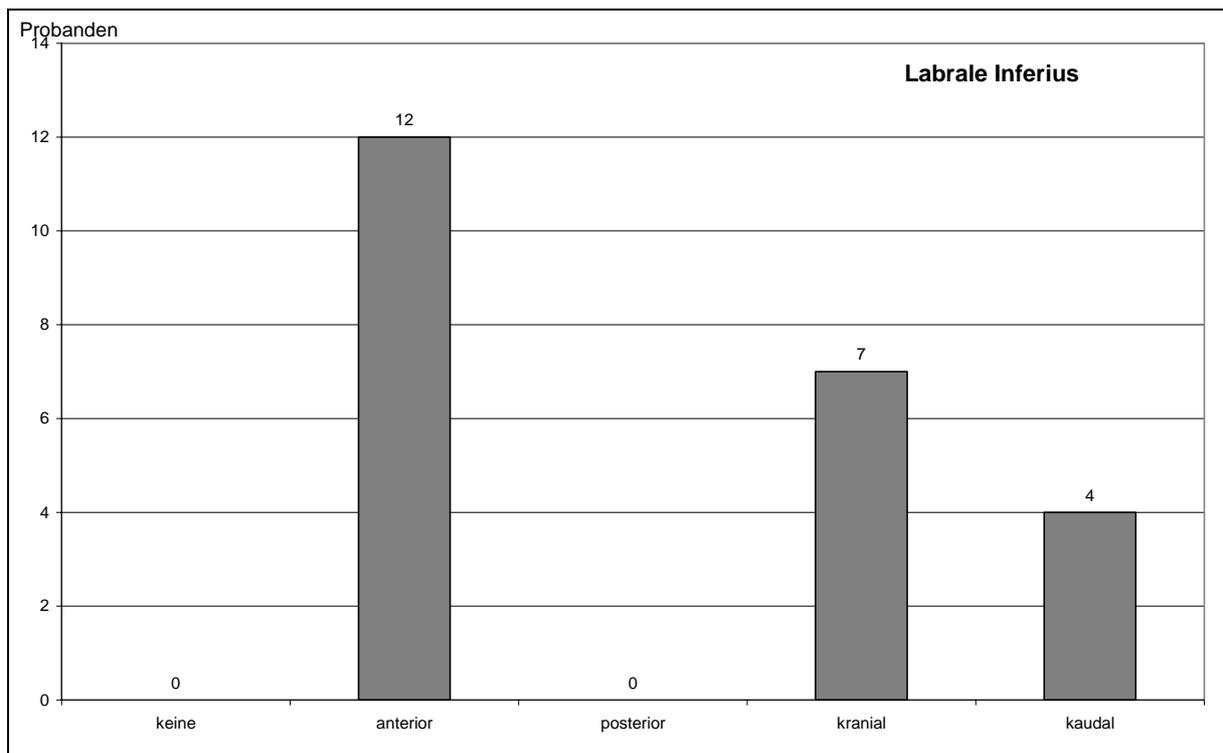


Abb. 32: Verteilung der Abweichungsrichtungen am Messpunkt Labrale inferius zwischen postoperativem Gesicht und DFP

4.2.8. Labiomentalfalte

Die Labiomentalfalte stimmte in keiner der Untersuchung komplett überein. Sie wich in 9 Fällen nach anterior, in 2 Fällen nach posterior, in 11 Fällen nach kranial und in 1 Fall nach kaudal ab (siehe Abb. 33).

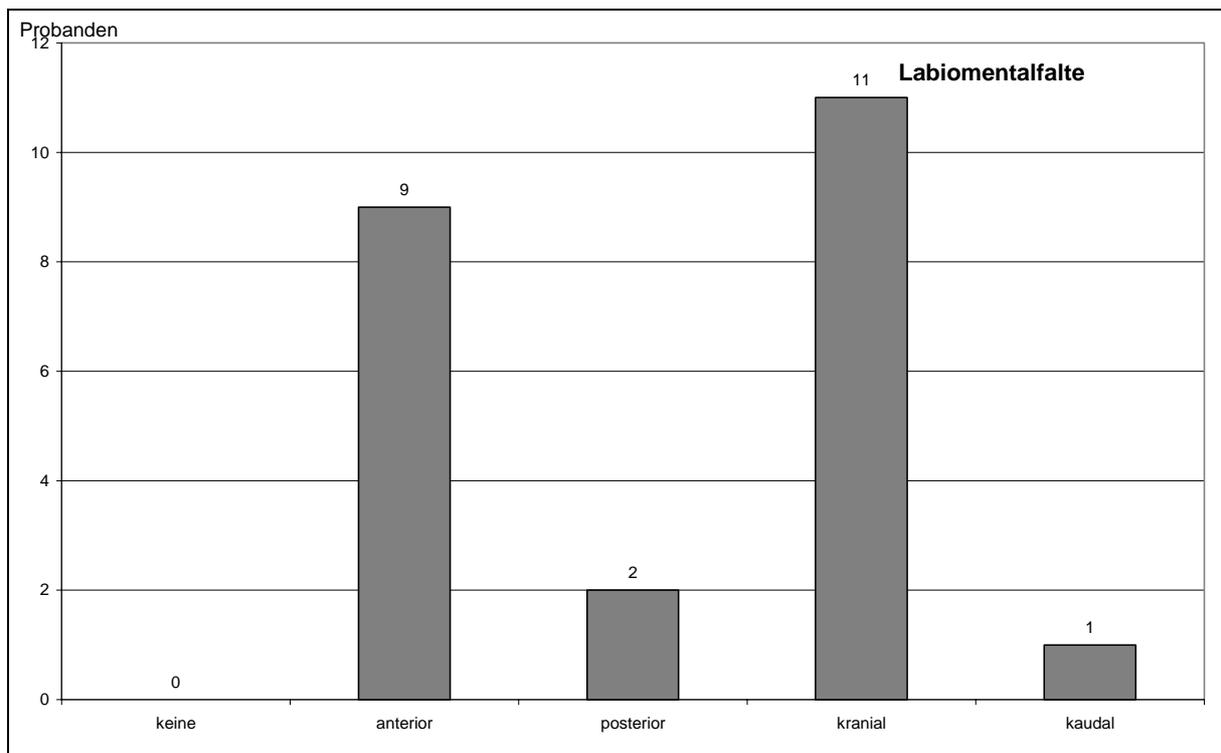


Abb. 33: Verteilung der Abweichungsrichtungen am Messpunkt Labiomentalfalte zwischen postoperativem Gesicht und DFP

4.2.9. Weichteilpogonion

Bei 2 Probanden bestand eine komplette Übereinstimmung der DFP-Simulation mit dem Profil. In 8 Fällen wich das Weichteilpogonion nach anterior, in 2 Fällen nach posterior, bei 9 Fällen nach kranial und einmal nach kaudal ab (siehe Abb. 34).

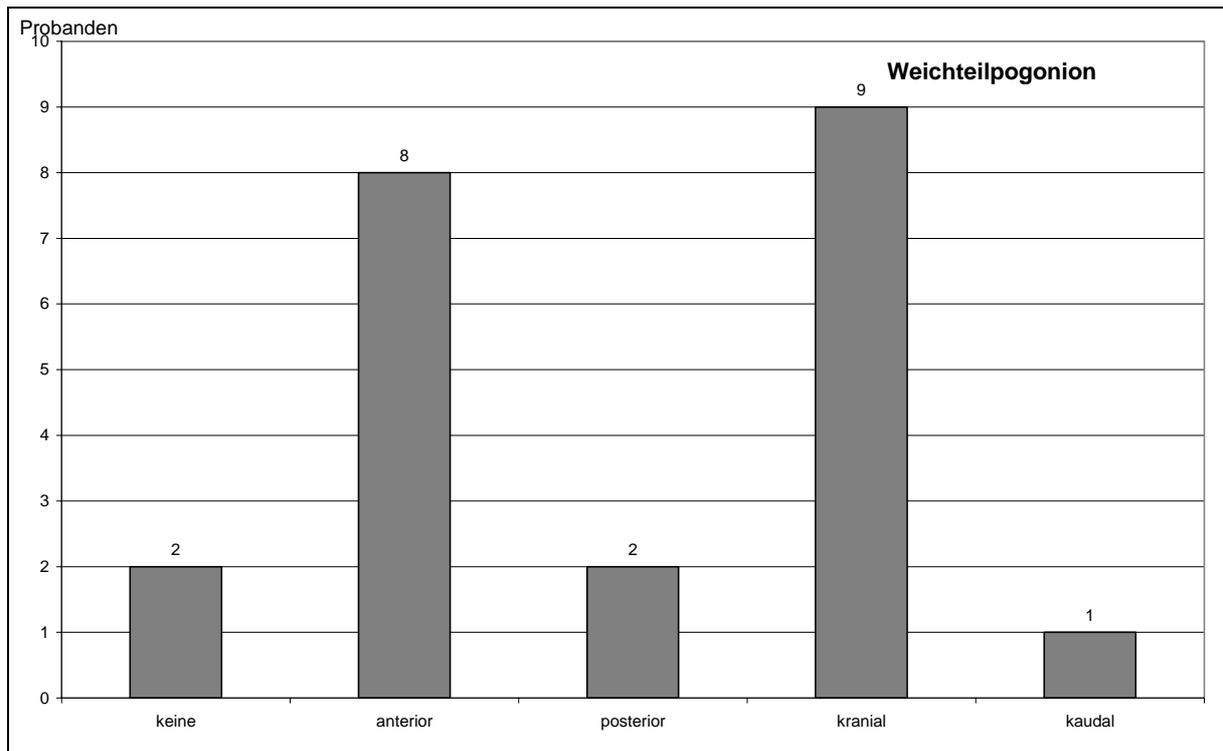


Abb. 34: Verteilung der Abweichungsrichtungen am Messpunkt Weichteilpogonion zwischen postoperativem Gesicht und DFP

4.2.10. Weichteilmenton

Der Messpunkt Weichteilmenton verschob sich in 7 Fällen nach anterior, in 2 Fällen nach posterior, in 7 Fällen nach kranial und in 4 Fällen nach kaudal. In 2 von 11 Probanden konnte eine komplette Übereinstimmung gezeigt werden (siehe Abb. 35).

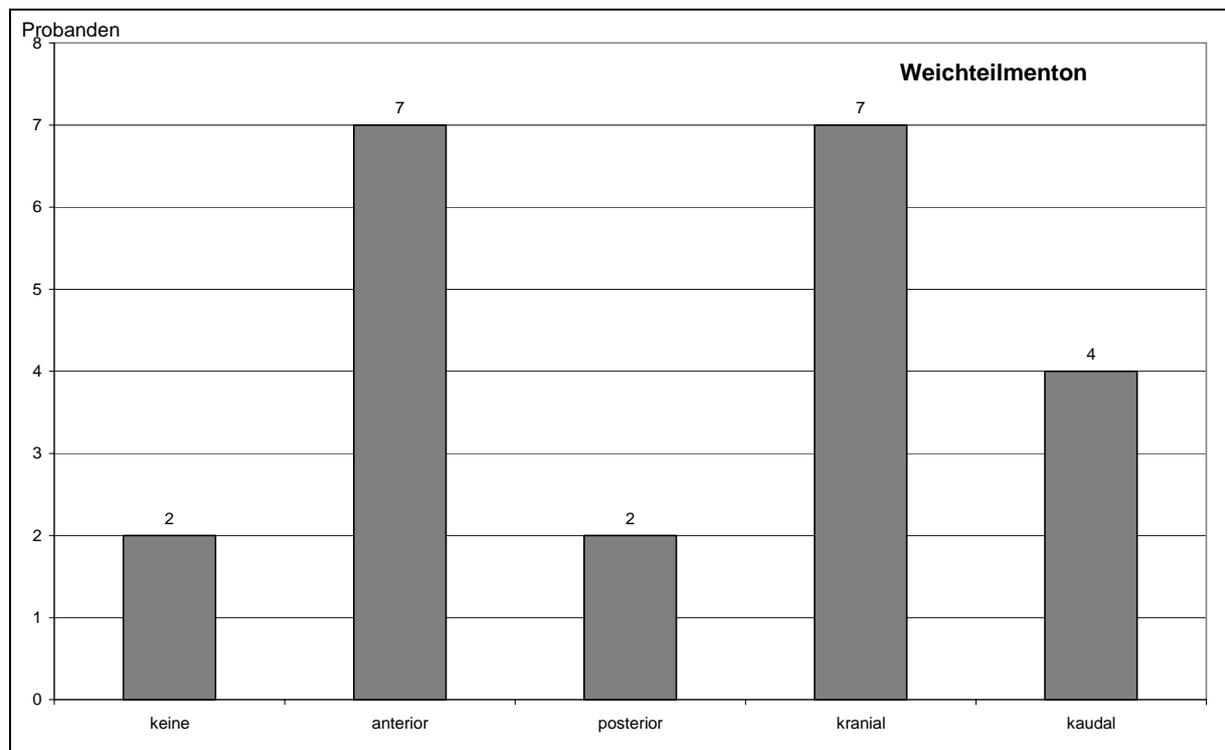


Abb. 35: Verteilung der Abweichungsrichtungen am Messpunkt Weichteilmenton zwischen postoperativem Gesicht und DFP

4.3. Finite-Elemente-Modell und Dentofacial Planner

Nach vollzogener Dysgnathie-Operation wurden bei 12 Probanden anhand der Werte der Modelloperation eine 3D- Simulation mit einem Finite-Elemente-Modell und eine 2D- Simulation im Dentofacial Planner Plus (DFP) des präoperativen Zustandes erarbeitet.

Im folgenden Kapitel werden die beiden Verfahren hinsichtlich der horizontalen und in der vertikalen Abweichung miteinander verglichen. Eine Tabelle mit den jeweiligen Mittelwerten der 12 Fälle veranschaulicht die genaue Abweichung.

Der durchschnittliche Fehlerwert über alle Messpunkte betrug bei der Finite-Elemente-Methode in horizontaler Richtung 0,32 mm und in vertikaler Richtung 0,55 mm. Die entsprechenden Fehlerwerte lagen bei der Simulation im Dentofacial

Planner Plus deutlich höher. Hier wurde in horizontaler Richtung ein durchschnittlicher Fehlerwert von 0,75 mm und in vertikaler Richtung sogar ein Durchschnittsfehler von 1,80 mm über alle Messpunkte ermittelt. Die Analyse der Prognosefehler zeigte erhebliche regionale Unterschiede.

In der horizontalen Analyse zeigen beide Verfahren vom Dorsum nasalis bis zur Labrale inferius nur geringe Unterschiede der Mittelwerte von 0,4 bis -0,4 mm. Der Dentofacial Planner zeigt jedoch besonders im Bereich der Ober- und Unterlippe eine Standardabweichung von 2,5 mm bzw. 3,6 mm. Die Standardabweichungen im Finite-Elemente-Modell liegen beim Messpunkt der Oberlippe bei 1,4 mm und der Unterlippe bei 1 mm.

Die größeren Ungenauigkeiten liegen im Bereich des Untergesichtes. Besonders beim Messpunkt der Labiomentalfalte zeigt der DFP eine höhere Abweichung bis zu 2,3 mm mit einer Standardabweichung von 2,6 mm. Die Messpunkte Weichteilpogonion und Weichteilmenton zeigen eine ähnlich hohe Abweichung bis zu 1,39 mm bzw. 1,84 mm. Die Standardabweichungen liegen im Bereich zwischen 2,0 mm und 3,6 mm. Die Mittelwerte der horizontalen Abweichungen im Finite-Elemente-Modell liegen unter 1 mm, die Standardabweichungen bis zu 1,4 mm.

Die vertikale Analyse zeigt an den ersten drei Messpunkten, Dorsum nasalis, Pronasale und Subnasale, keine Abweichungen. Eine geringfügige Abweichung bis 0,3 mm liegt am Messpunkt der Oberlippe.

Im Bereich des Untergesichts unterscheiden sich die Simulationen des Finite-Elemente-Modells und des DFP.

Die Abweichung des Finite-Elemente-Modells steigt vom Labrale inferius 0,4 mm bis zum Weichteilmenton um 1,7 mm an. Die Standardabweichungen liegen bei maximal 1,8 mm. Im DFP steigt die Ungenauigkeit im Bereich der Unterlippe und der Labiomentalfalte auf über 4 mm. Die Abweichung am Messpunkt Weichteilpogonion beträgt 3,1 mm und am Messpunkt Menton 2,1 mm.

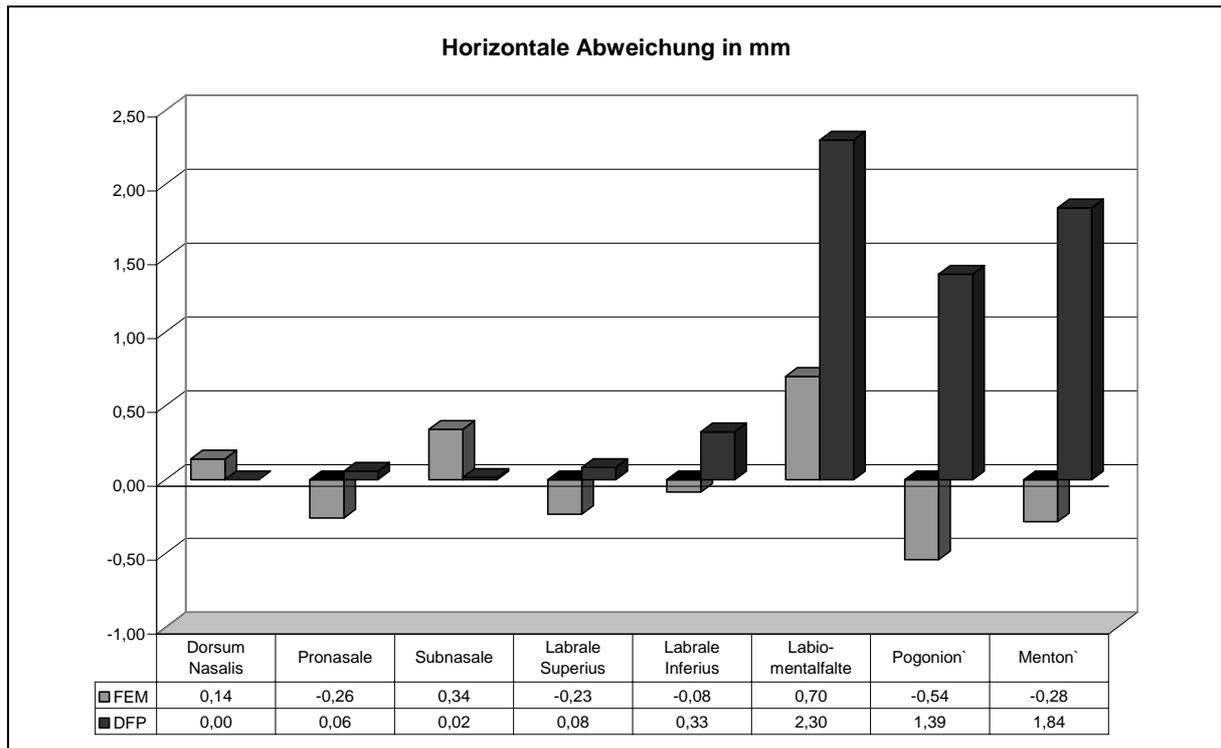


Abb. 36: Vergleich der horizontalen Abweichung der Simulationen des Finite-Elemente-Modells und dem DFP an verschiedenen Messpunkten

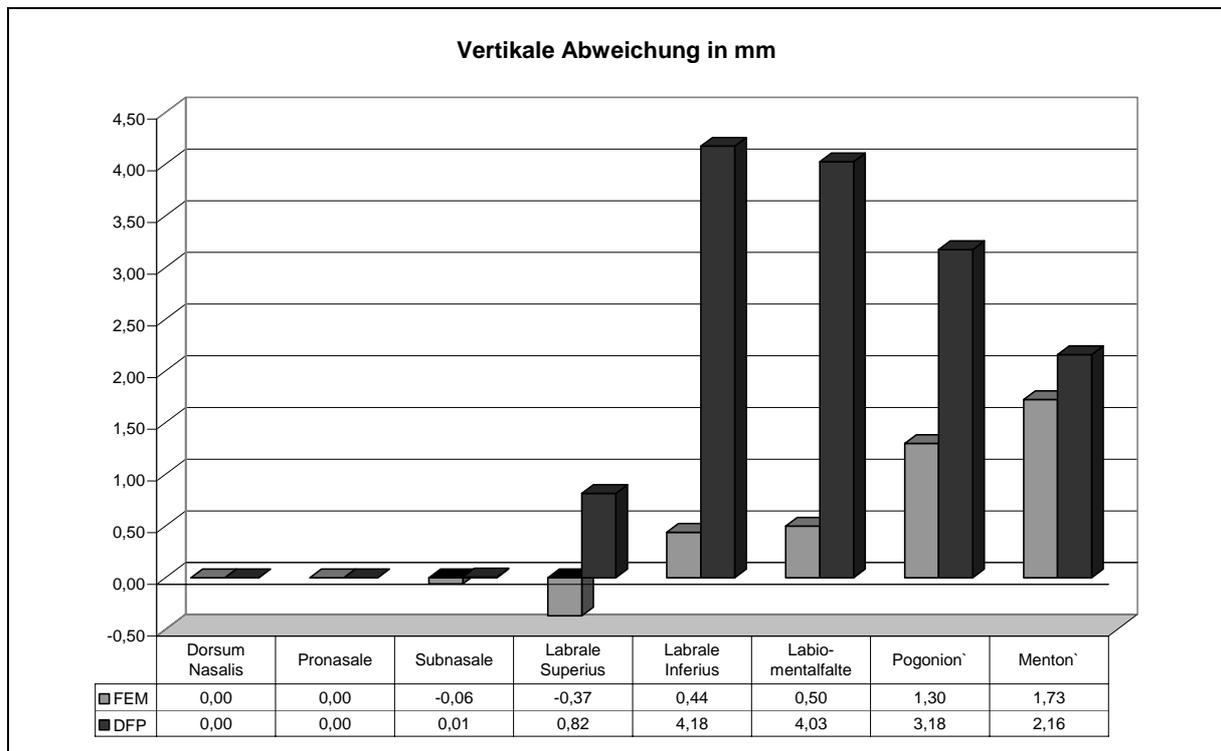


Abb. 37: Vergleich der verschiedenen Messpunkte mit den Simulationen des Finite-Elemente-Modells und dem DFP in der Vertikalen

Neben der Ermittlung der jeweiligen Messpunkte wurde auch der Nasolabialwinkel der Simulationen des Finite-Elemente-Modells und des Dentofacial Planners im Vergleich zum postoperativen Profil gemessen. Der Mittelwert der Abweichung des Winkels beträgt im DFP $0,5^\circ$ und im Finite-Elemente-Modell $-0,25^\circ$.

4.4. Klinischer Fall

Dieser klinische Fall eines Patienten steht stellvertretend für die Gruppe der 12 Probanden, bei denen die postoperativen Gesichtsprofile mit den 3D Gesichtssimulationen des Finite-Elemente-Modells und des Dentofacial Planners verglichen wurden. Der Patient zeigte eine maxilläre Retrognathie sowie einen offenen Biss. Die Operationsplanung umfasste die Vorverlagerung der Maxilla um 3 mm, eine anteriore Anhebung um 1,5 mm und eine posteriore Anhebung um 6 mm. Die Mandibula sollte durch Autorotation angeglichen werden.

6 Wochen vor der Operation wurde das Gesicht des Patienten fotografiert und mittels Laser digitalisiert.

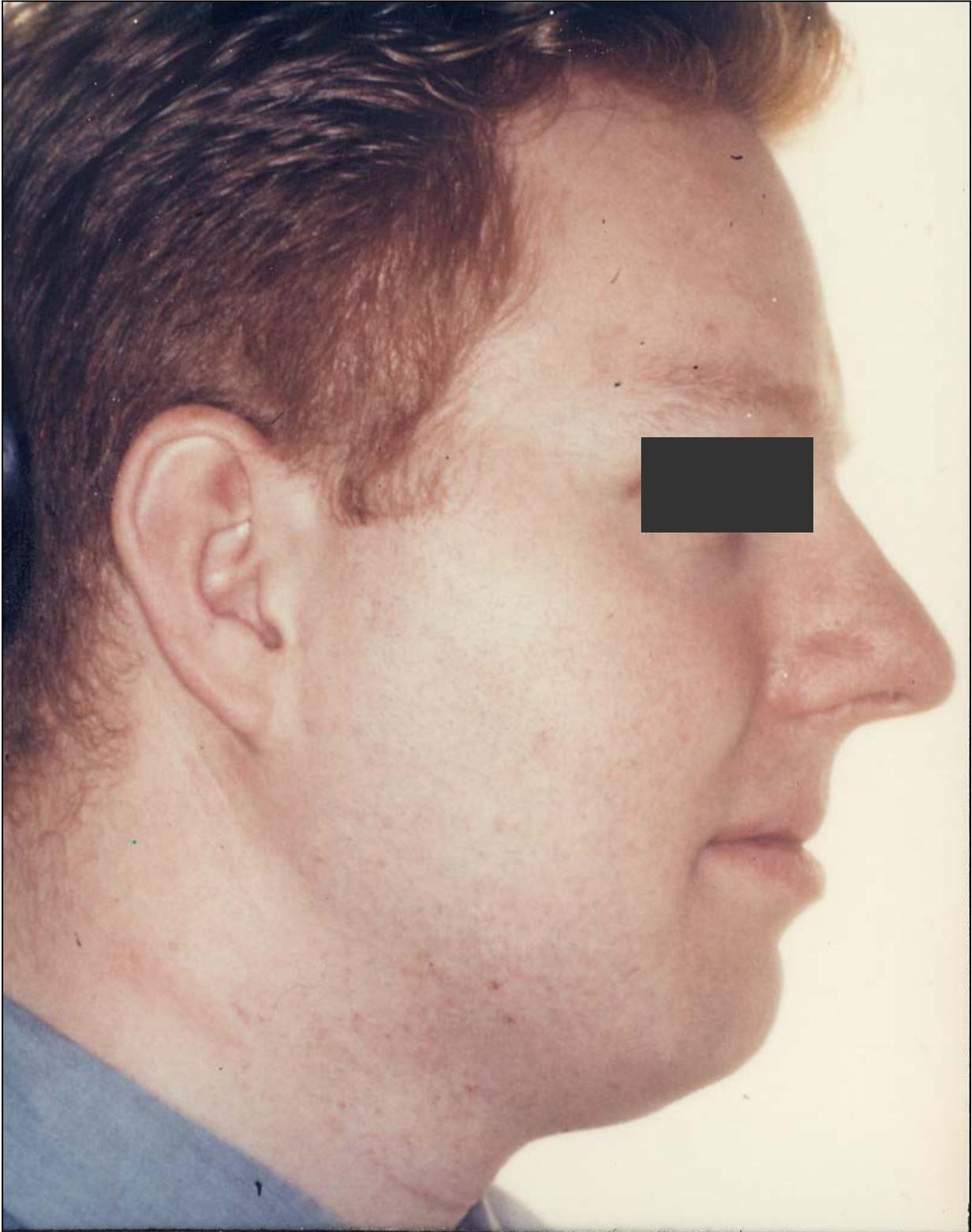


Abb. 38: Präoperatives Foto eines Patienten im Dentofacial Planner

Mit den Daten der Operationsplanung wurde zunächst ein Simulationsmodell am Dentofacial Planner erstellt.



Abb. 39: Postoperatives Foto des Probanden



Abb. 40: Darstellung der präoperativen Situation (grüne Linie) und der Simulation (rote Linie) des Dentofacial Planner.

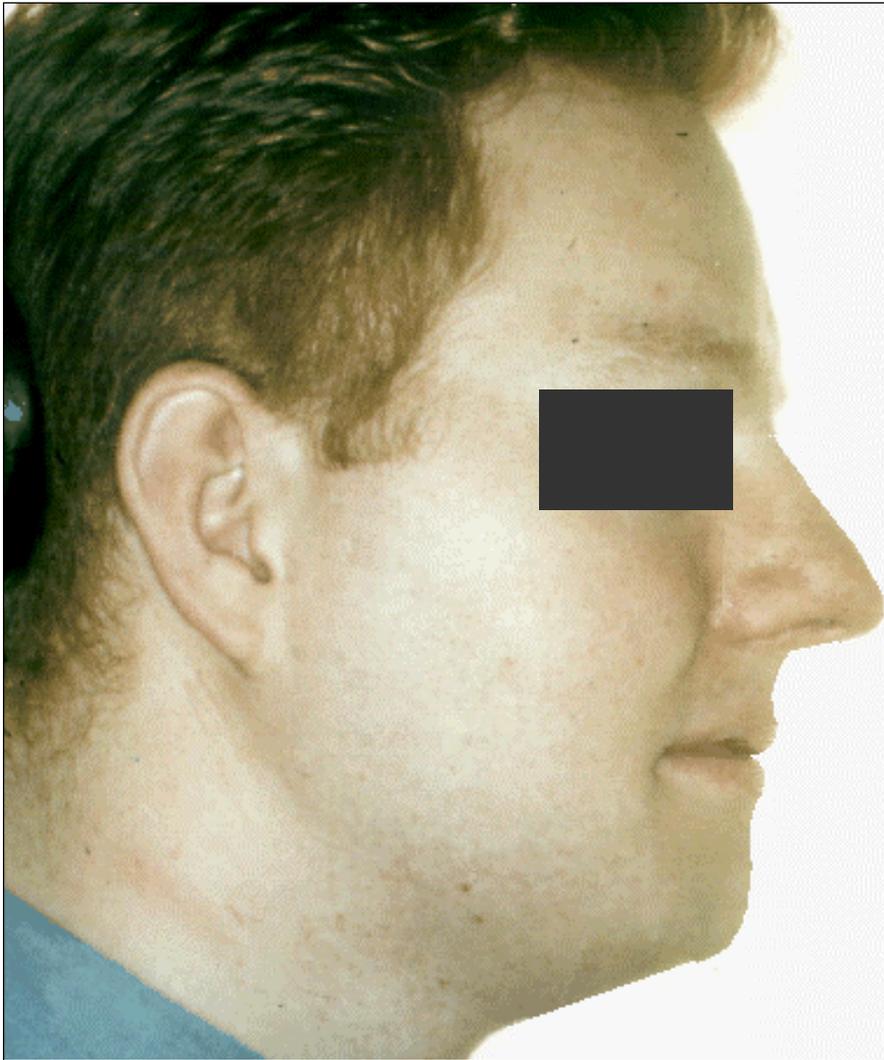


Abb. 41: Simulation (Foto) des Dentofacial Planner, entsprechend der roten Linie von Abb. 40

Für die Simulation des individuellen 3D-Modells wurde aus der digitalisierten Punktwolke in diversen Arbeitsschritten ein Finite-Elemente-Modell am Computer konstruiert.

Die fertige Simulation kann von allen Seiten betrachtet werden. Die Weichteilveränderung kann anhand der Legende und deren Farbkodierung metrisch ermittelt und als Prozess animiert werden.

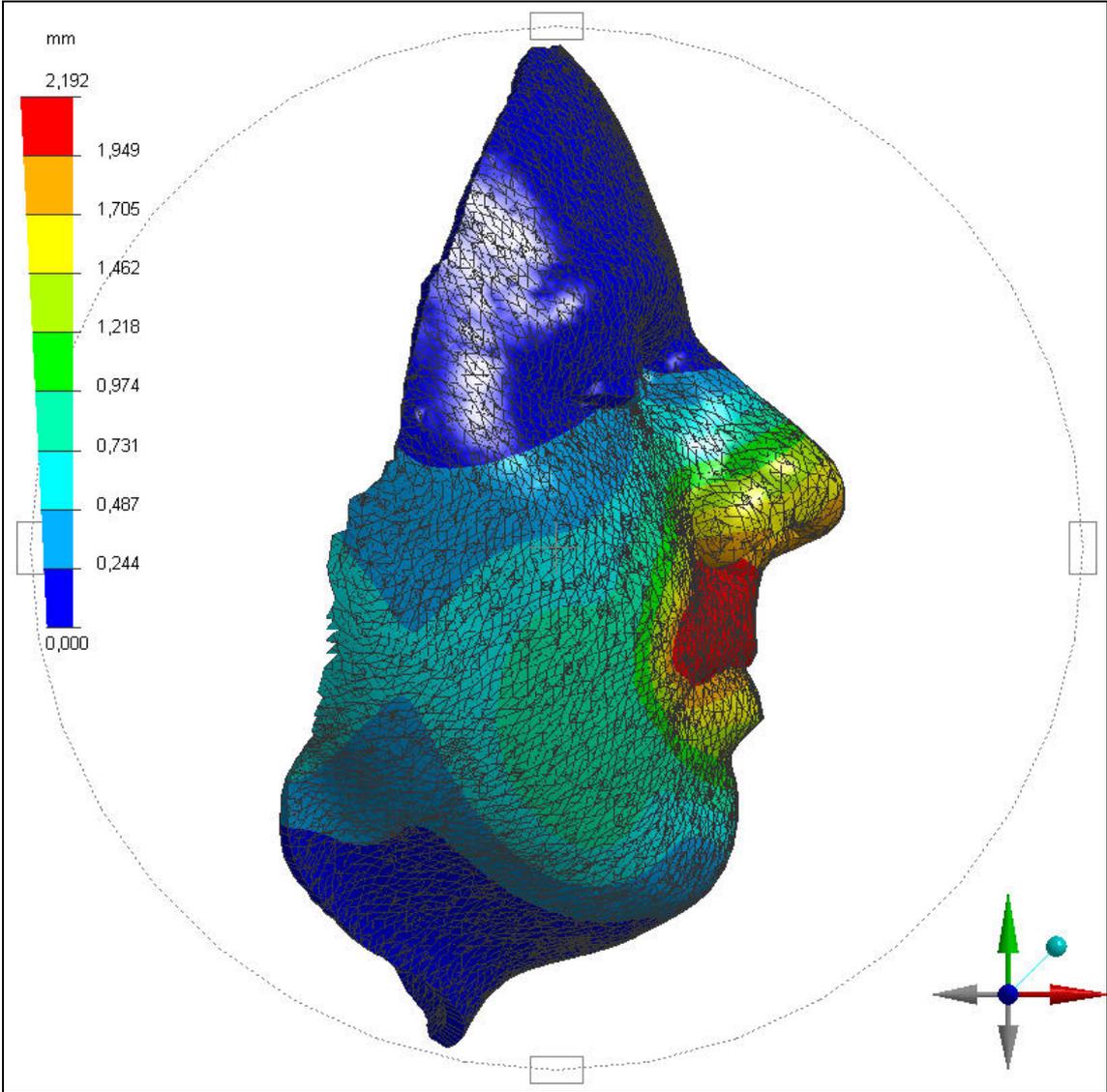


Abb. 42: Rechte Profilansicht des simulierten FE-Modells

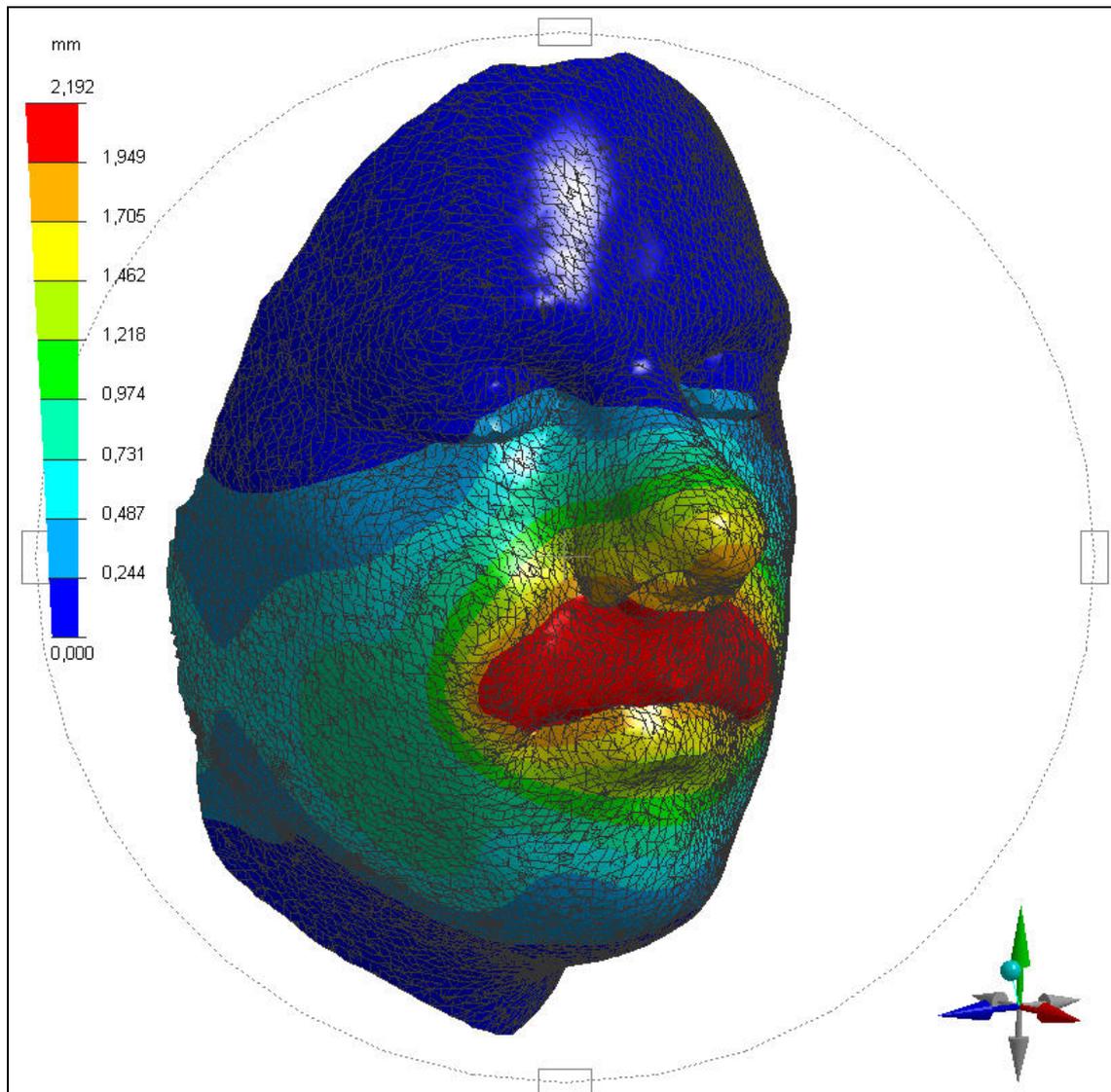


Abb. 43: Halbprofil rechts des simulierten Finite-Elemente-Modells

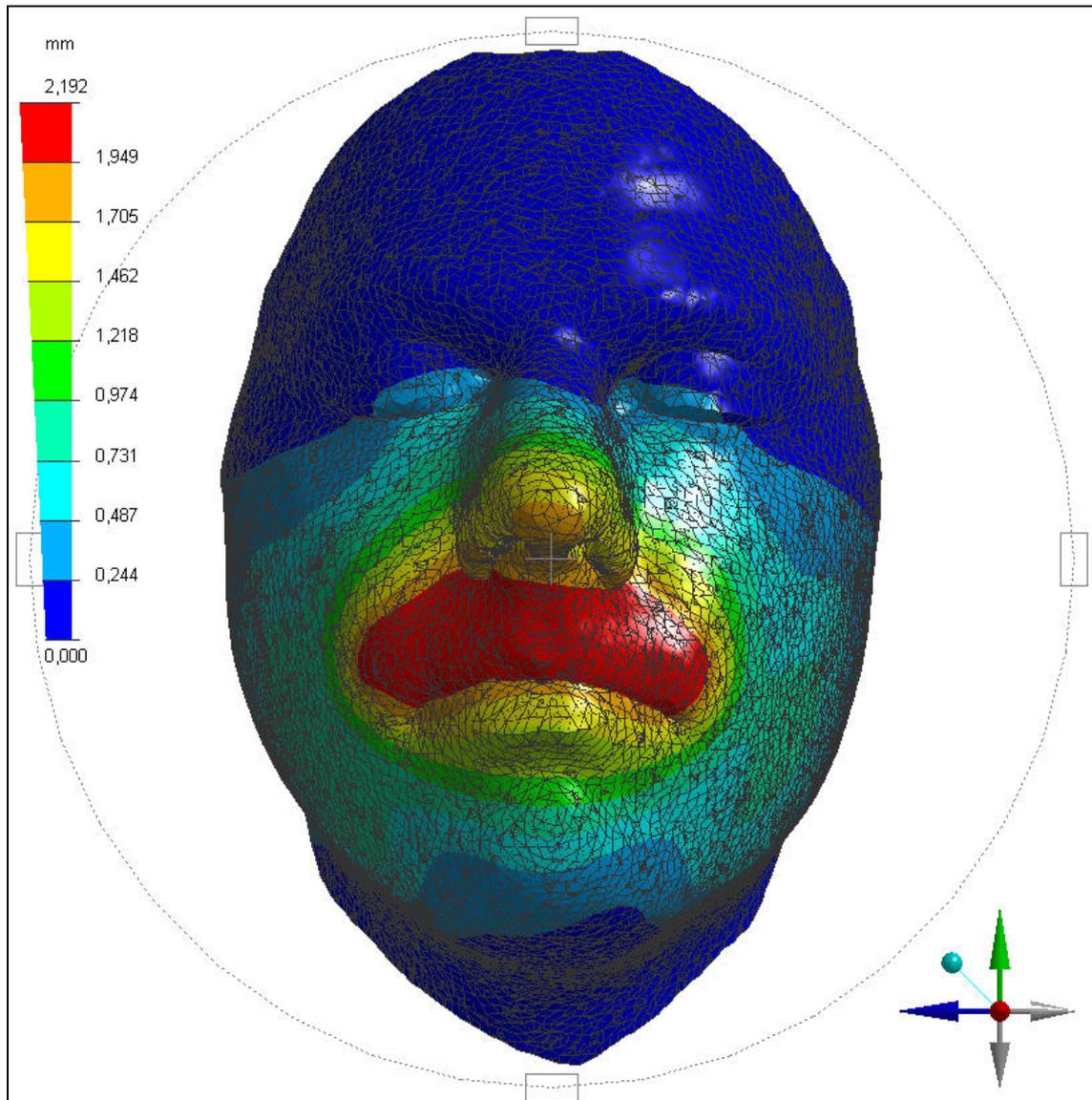


Abb. 44: En face Ansicht des simulierten FE-Modells

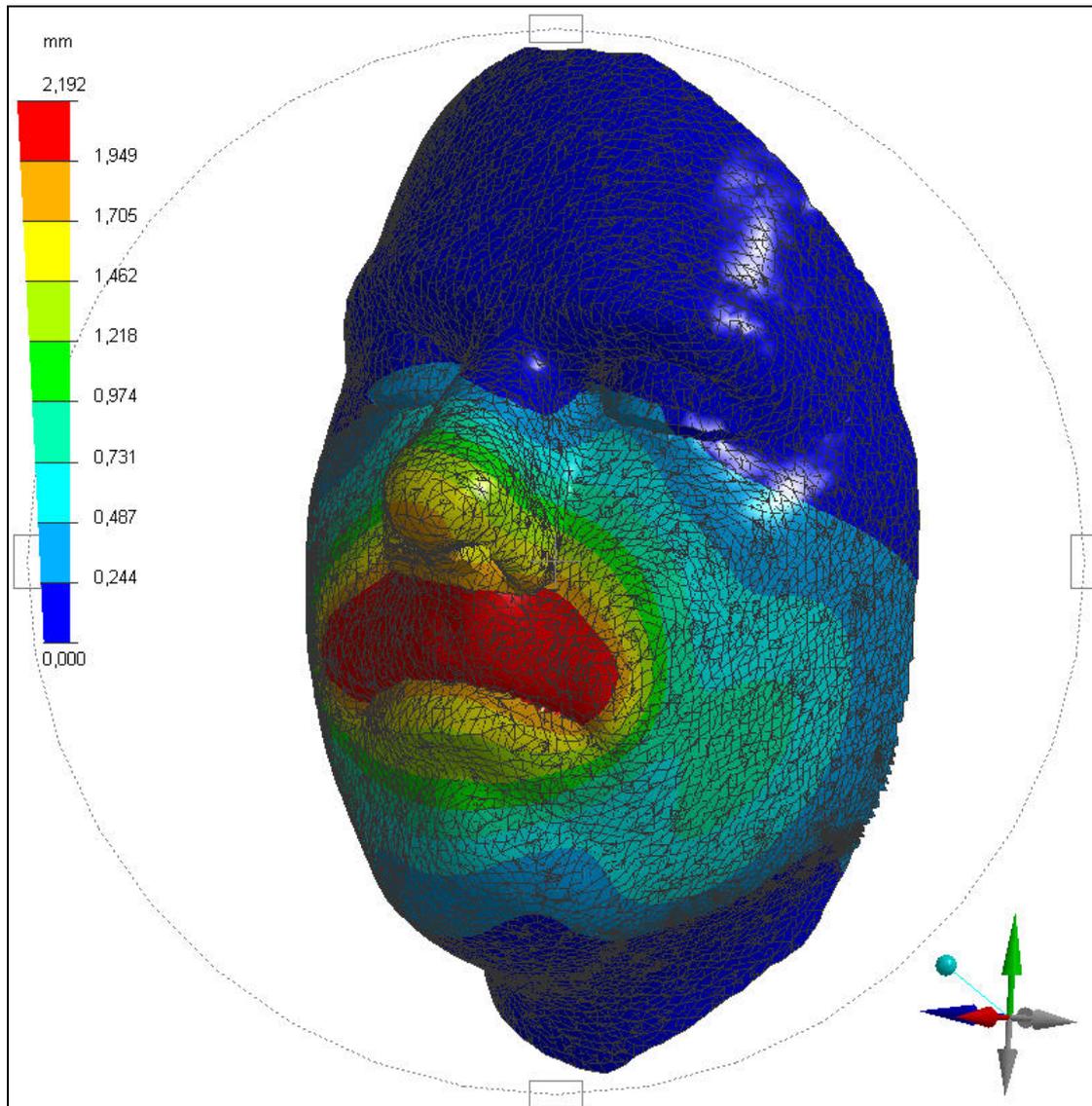


Abb. 45: Profil halblinks des simulierten Finite-Elemente-Modells

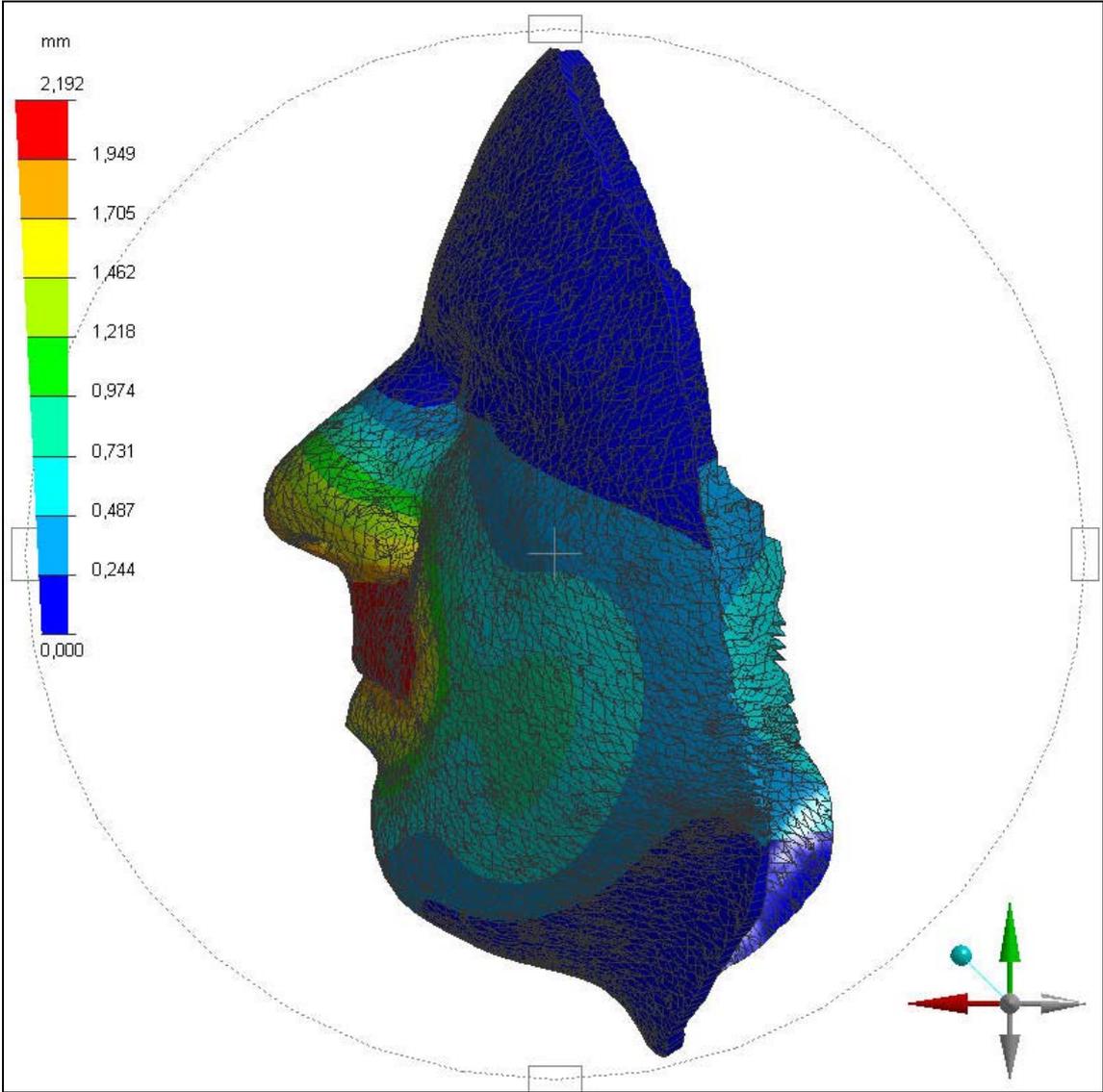
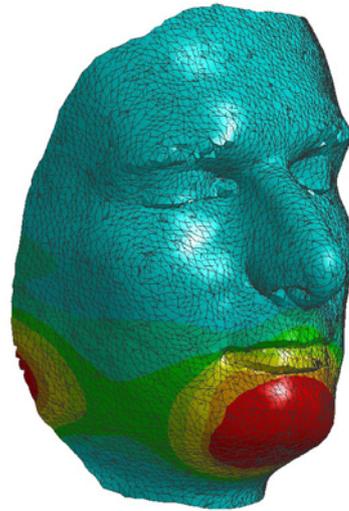
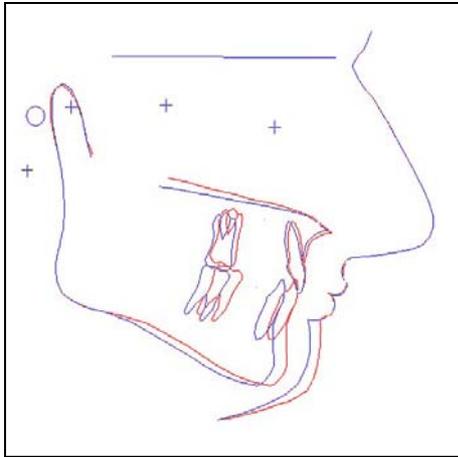
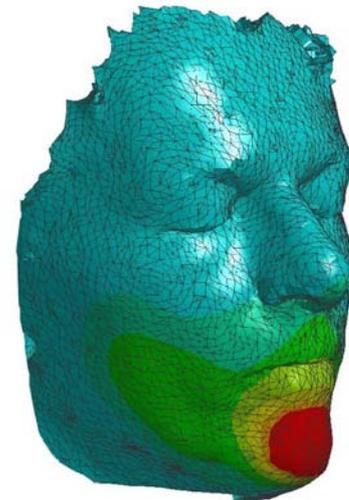
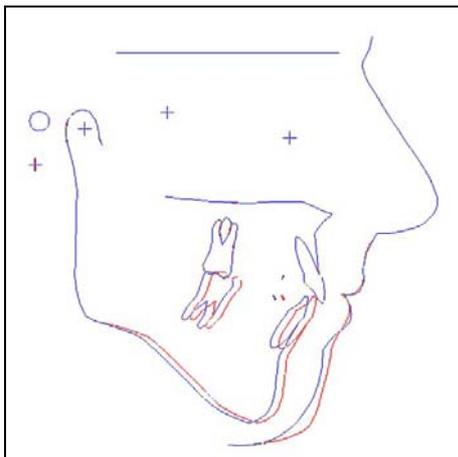


Abb. 46: Linkes Profil des simulierten Finite-Elemente-Modells

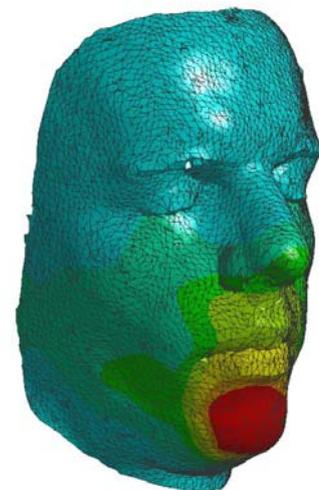
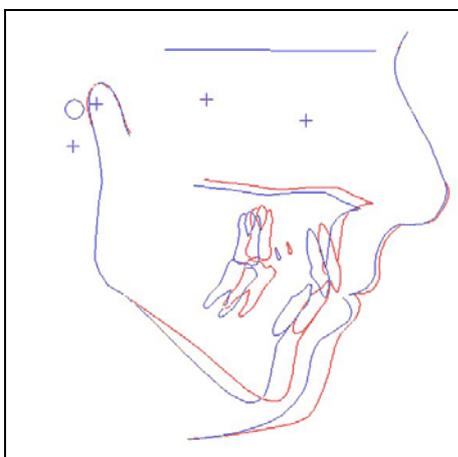
4.5. Gegenüberstellung der Weichteilprognosen



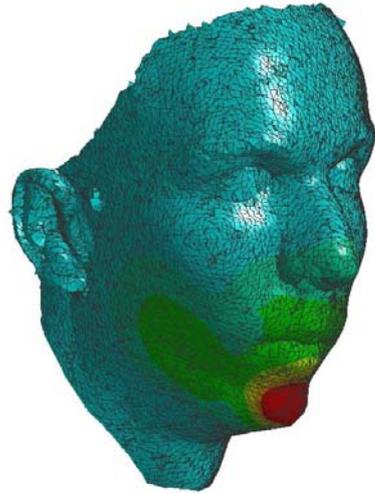
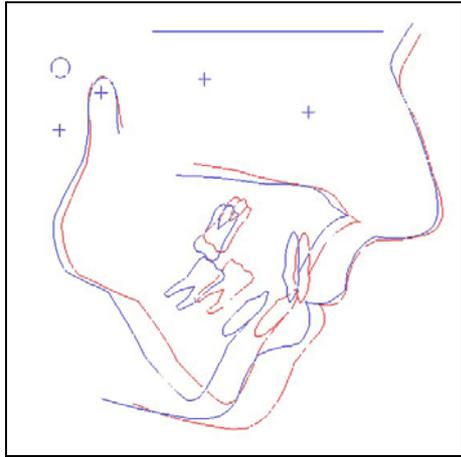
Nr. 1



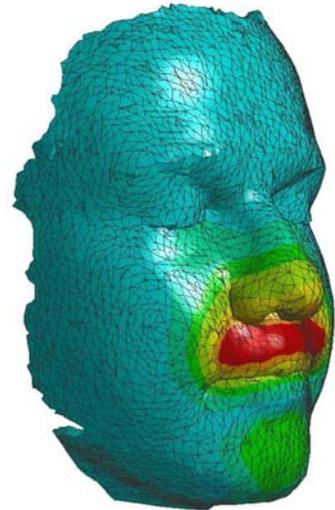
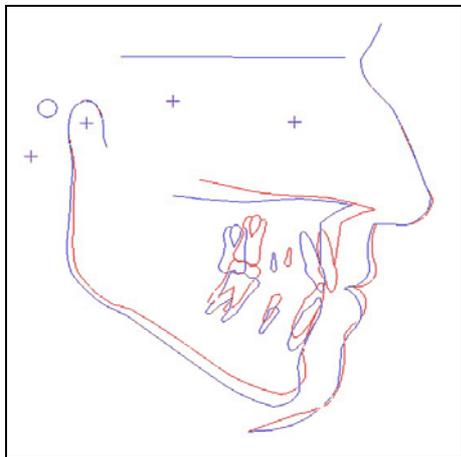
Nr. 2



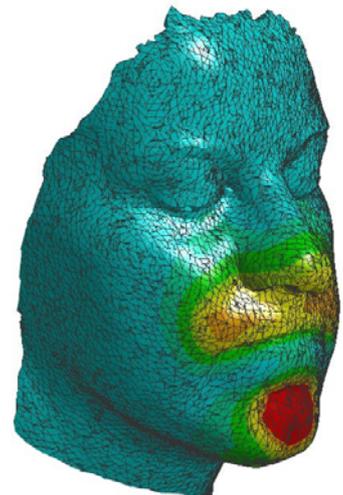
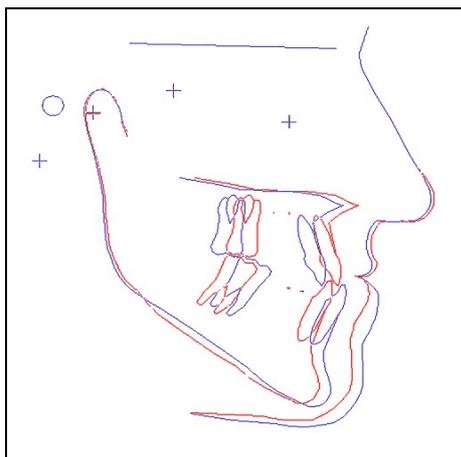
Nr. 3



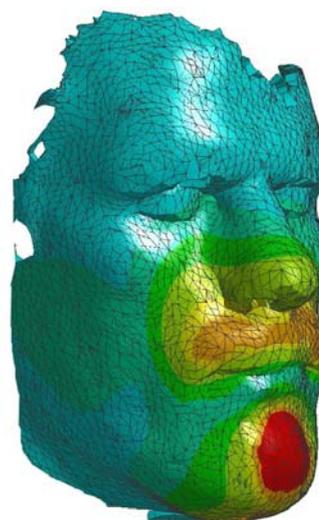
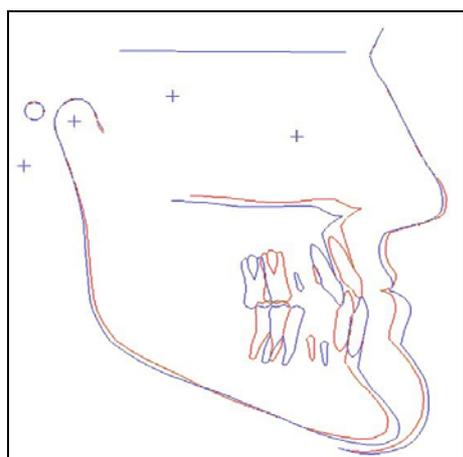
Nr. 4



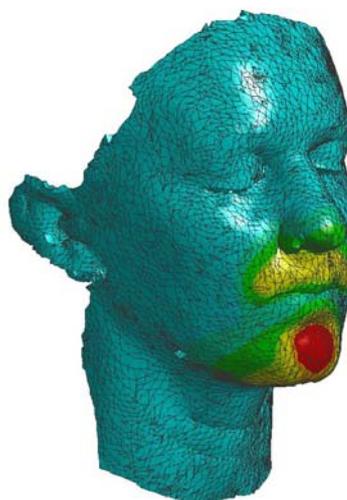
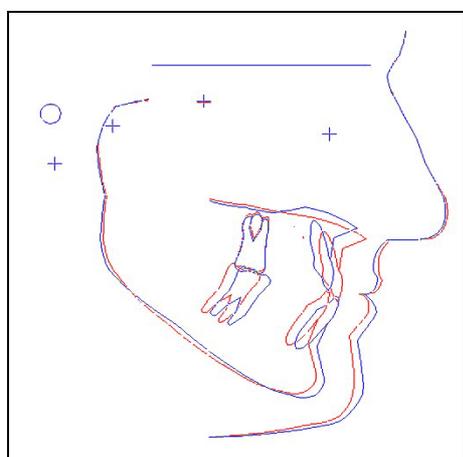
Nr. 5



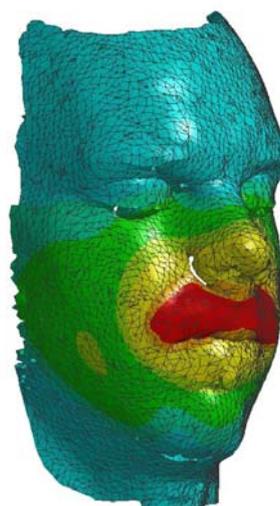
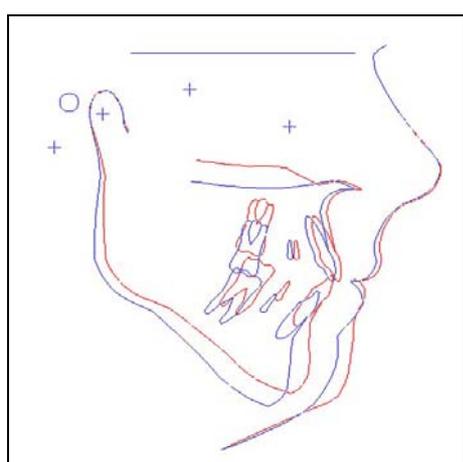
Nr. 6



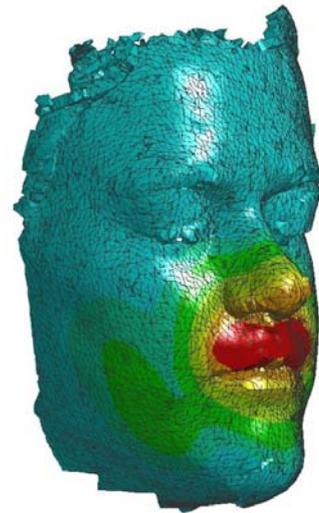
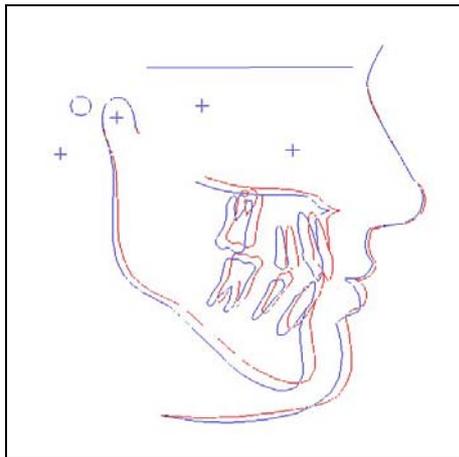
Nr. 7



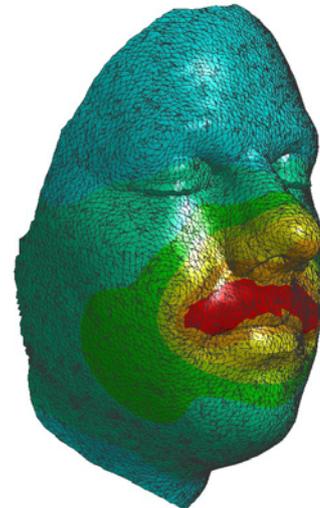
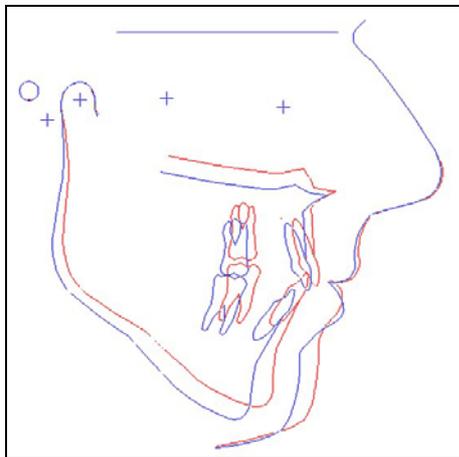
Nr. 8



Nr. 9

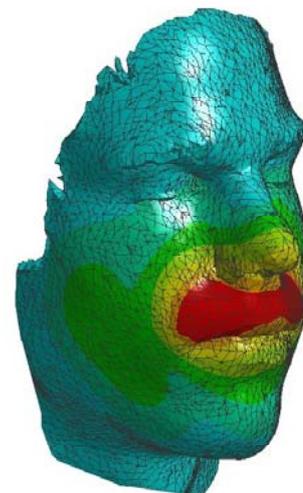
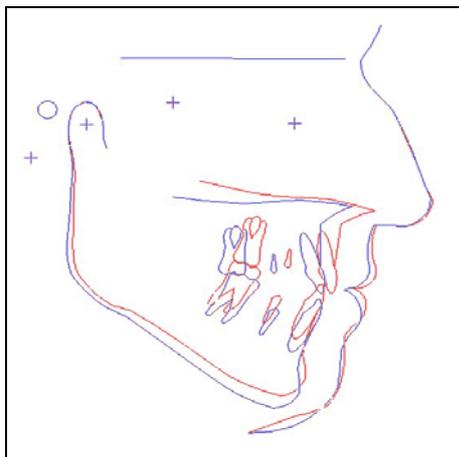


Nr. 10



Nr.

11



Nr. 12

Abb. 47: Weichteilprognose bei 12 Patienten mit dem Dentofacial Planner Plus (links) und dem Finite-Elemente-Verfahren (rechts).

Nach dem Ausmessen der Messpunkte der Simulationen im Vergleich zum postoperativen Profil wurden folgende Differenzen ermittelt.

Durchschnittlicher Prognosefehler				
Messpunkt	3D-Finite Elemente Methode		Dentofacial Planner®	
	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal
Dorsum nasalis	0.14 mm	0.00 mm	0.00 mm	0.00 mm
Pronasale	0.26 mm	0.00 mm	0.06 mm	0.00 mm
Subnasale	0.34 mm	0.06 mm	0.02 mm	0.01 mm
Labrale superius	0.23 mm	0.37 mm	0.08 mm	0.82 mm
Labrale inferius	0.08 mm	0.44 mm	0.33 mm	4.18 mm
Submentale	0.70 mm	0.50 mm	2.30 mm	4.03 mm
Weichteilpogonion	0.54 mm	1.30 mm	1.39 mm	3.18 mm
Weichteilmenton	0.28 mm	1.73 mm	1.84 mm	2.16 mm

Tab. 3: Tabelle der durchschnittlichen Prognosefehler (n=12) des Finite-Elemente-Modells und des Dentofacial Planners

5. Diskussion

5.1. Problematik bei Weichteilvorhersagen

Eine Vorhersage des Weichteilprofils ist schwierig und bereits in verschiedenen Studien untersucht worden. Besonders die Prognose der Lippen- und Kinnregion wird von einer Reihe von Faktoren beeinflusst. Die kieferorthopädischen Normwerte für das Profil sind Richtlinien und nur bedingt auf die Therapie des Patienten übertragbar.

Eine entscheidende Bedeutung trägt die Populationszugehörigkeit. Eine Studie von Satravaha et al. zeigte, dass die Gesichtsformen von sudanesischen, europäischen und amerikanischen Kindern deutlich abweichen [52,11].

Ebenso ist der Geschlechtsunterschied, bezüglich der Nasengröße, und die altersabhängige Weichteilveränderung entscheidend [41,34].

Auch ist die Konstitution des Patienten beim Profilverlauf zu berücksichtigen. Ein kräftigerer Körperbau korreliert mit einem markanteren Profilverlauf und einer längeren Nase [46]. Der Stirnverlauf nimmt ebenfalls Einfluss auf den Gesamteindruck des Profils [20]. Ein Hervortreten des Untergesichts resultiert aus einer steilen Stirn, wogegen bei einer Stirn mit flachem Verlauf das Untergesicht zurücktritt [53].

Neben Zusammenhängen zwischen Wangenprominenz und Kinnspitze konnten Beziehungen zwischen Breite der Nasenflügel, Augenabstand und der Mundspaltenbreite gezeigt werden [49].

Die unterschiedliche Dicke und Länge der Weichteile kann die Weichteilprognose erschweren. Es besteht eine hohe Variabilität in den einzelnen Weichteilbereichen bezüglich der Hart- und Weichgewebsveränderungen [9,19].

Unterschiede des Lippentonus, welcher von der perioralen Muskulatur beeinflusst wird, beeinflussen die Lippenstellung und damit die Reproduzierbarkeit im Fernröntgenseitenbild. Normalerweise ist für den Lippenschluss nur eine leichte Anspannung notwendig. Bei Dysgnathien kann diese Kontraktion verstärkt sein. Die Lippenposition kann auch von der psychischen Tagesform abhängen [10].

Unabhängig von der individuellen Weichteilveränderung des Patienten konnte festgestellt werden, dass bei ein und derselben Person durch verschiedene

kephalometrische Analyseverfahren unterschiedliche operative Behandlungsvorschläge geplant wurden [58,31].

5.2. Finite-Elemente-Modell und Dentofacial Planner 2 Verfahren im Vergleich

Die Finite-Elemente-Methode ist nach Ansicht verschiedener Autoren [18,33,38,44,61] ein Instrument zur Simulation von fazialen Weichteilveränderungen. Die Möglichkeit einer falschfarbenkodierte Visualisierung von regionalen, dreidimensionalen Weichteilverformungen unterscheidet sich qualitativ von den zweidimensionalen Verfahren [43,44].

Mit dieser Methode lassen sich neben der Profilanalyse ebenfalls die Veränderungen der Wange, Nasiolabialfalten und Nasenflügel prognostizieren [59,60].

Zum Vergleich der dreidimensionalen Finite-Elemente-Methode mit dem zweidimensionalen Verfahren des Dentofacial Planner Plus konnten die Messungen lediglich auf den sagittalen Bereich der Profilebene bezogen werden, um vergleichende Aussagen treffen zu können. Ästhetisch wichtige Regionen wie die der Wange, der Nasiolabialfalten und der Nasenflügel können mit allen zweidimensionalen Weichteilprognoseverfahren, deren Software auf Profilaufnahmen und Fernröntgenseitenbildern basiert, nur limitierend eine umfassende faziale Weichteilsimulation darstellen [18,26,43].

Die Weichteilprognose anhand der Finite-Elemente-Methode erlaubt eine dreidimensionale Visualisierung der gesamten fazialen Weichteiloberfläche, ohne sich auf die Profilsicht beschränken zu müssen. Eine umfassende ästhetische Behandlungsplanung kann damit aufgezeigt werden. Bei Bedarf können dem Patienten die Operationsplanung und die daraus resultierenden ästhetischen Veränderungen bildlich dargestellt werden. Eine dynamische Darstellung der Weichteilveränderungen unter Berücksichtigung verschiedener Behandlungsplanungen ermöglicht eine Informationsgabe ohne das ästhetische Ziel festzulegen, welches forensisch problematisch wäre [15,28]. Beide Simulationsverfahren zeigen hinsichtlich der Validität und der Prognosegenauigkeit deutliche Unterschiede. Der durchschnittliche Gesamtfehler, gemessen über alle Messpunkte, war beim Dentofacial Planner Plus fast doppelt so hoch im Vergleich zum Finite-Elemente-Verfahren. Die Prognosegenauigkeit im Mittelgesicht ist bei beiden Verfahren als moderat einzustufen, wobei im Bereich des unteren Gesichtsdrittels der Dentofacial

Planner Plus große Abweichungen hinsichtlich des postoperativen Gesichtprofils zeigt.

Zur Beurteilung der Messwerte werden eine Messfehlergrenze und eine Toleranzbreite definiert. Die Messfehlergrenze beträgt $\pm 1,1$ mm und die Toleranzbreite ± 2 mm. Diese Werte ergeben sich für den Durchzeichen- und Digitalisierungsfehler [15].

5.2.1. Problematische Bereiche bei Weichteilprognosen

5.2.1.1. Finite-Elemente-Modell

Bei der Weichteilprognose anhand der Finite-Elemente-Methode wurden an den Messpunkten keine Werte außerhalb der Toleranzbreite von ± 2 mm gemessen. Im Toleranzbereich wurden Werte für die Messpunkte Weichteilpogonion (1,3 mm) und Weichteilmenton (1,73 mm) in der vertikalen Abweichung verzeichnet. Diese Abweichungen sind auf die Bearbeitung der Operationsplanung am Finiten-Elemente-Modell zurückzuführen. Die simulierte Veränderung ist nur in sagittaler und vertikaler Richtung möglich. Eine Autorotation des Unterkiefers und eine dorsale Anhebung oder Absenkung des Oberkiefers ist nur bedingt simulierbar.

5.2.1.2. Dentofacial Planner

Die Weichteilvorhersage in vertikaler und horizontaler Richtung ist im unteren Gesichtsdrittel vergleichsweise ungenauer als im mittleren Drittel.

Beim horizontalen Vergleich stellen die Messpunkte Labiomentalfalte und - weniger gravierend - Weichteilpogonion und Weichteilmenton, die problematischen Bereiche bei der Simulation mit dem Dentofacial Planner dar. Der Punkt Labiomentalfalte liegt mit 2,3 mm außerhalb der Toleranzbreite und ist nicht akzeptabel. Die Punkte Weichteilpogonion mit 1,39 mm und Weichteilmenton mit 1,84 mm liegen innerhalb der Toleranzbreite.

Ursache für die schlechte Prognose hinsichtlich der Labiomentalfalte könnte die schwierige Definierbarkeit des Messpunktes im Fernröntgenseitenbild darstellen. Dabei ist die Reproduzierbarkeit dieses Punktes von der Bildqualität, der Messgenauigkeit des Untersuchers und den Messbedingungen abhängig. Systematische Fehler ergeben sich durch die unterschiedliche Auffassung der

Auswertung einzelner Personen. Verschiedene Filmqualitäten, fehlerhafte Positionierung der Patienten und Bestimmung der Vermessungspunkte treten als Zufallsfehler auf [29]. Verspannte Muskelverhältnisse im Kinnbereich beeinflussen ebenfalls die Reproduzierbarkeit der Labiomentalfalte [55]. Diese Anspannungen des Kinnbereichs können auch den Messpunkt Weichteilpogonion in der Prognose als Verdickung darstellen. Die Verdickung der Region der Labiomentalfalte und des Weichteilpogonions ist auf die Weichgewebsantwort des operativen Eingriffs zurückzuführen [12].

Die Kopfnegung des Patienten bei der postoperativen Fotografie beeinflusst ebenfalls das Messwertergebnis. Durch leichte Senkung des Kopfes wird die Haut im Kinnbereich gestaucht und dadurch die Bestimmung des Weichteilmentons erschwert.

Problematische Prognosen entstanden in der vertikalen Abweichung der Messpunkte Labrale inferius, Labiomentalfalte, Weichteilpogonion und Weichteilmenton für die Bearbeitung am Dentofacial Planner. Die Messwerte betragen an den Messpunkten Labrale inferius 4,1 mm, Labiomentalfalte 4,0 mm, Weichteilpogonion 3,18 mm und Weichteilmenton 2,16 mm. Diese Werte liegen außerhalb des Toleranzbereiches. Die Ursache für die schwierige Prognose der Labiomentalfalte, des Weichteilpogonions und des Weichteilmentons in der Vertikalen sind zu vergleichen mit den oben genannten Gründen der horizontalen Auswertung.

Eine Dissertation von Fischer [14], welche sich mit der Prognose von Weichteilveränderungen mittels Dentofacial Planner Plus Version 2.01 befasste, beschrieb ebenfalls ungenaue Messwerte in der Horizontalen und Vertikalen für den Bereich des unteren Gesichtsdrittels. Die Messpunkte zeigten in der Horizontalen Messwerte für das Weichteilmenton -1,5 mm und das Weichteilpogonion -3,6 mm mit einer Standardabweichung von 5,8 mm. In der Vertikalen zeigte sich der Messpunkte Labrale inferior als unsicherste Variable mit -1,1 mm Abweichung. Die Arbeit zeigt für den Kinnbereich Messwerte mit hohen Standardabweichungen zwischen 3 mm und 7,5 mm, was somit auf eine Prognoseungenauigkeit schließen lässt.

Die kieferchirurgisch zu behandelnden Patienten haben zumeist ausgeprägte Dysgnathien und einen erschwerten Lippenschluss. Bei der Röntgen – und Laseraufnahme wurde dieser Lippenschluss meist durch eine Anspannung der perioralen Muskulatur kompensiert, welches zu ungenauen Messwerten führte [1], zeigten ebenfalls Abweichungen bei den Dentofacial Planner Profilprognosen für das

Stomion inferius und das Weichteilmenton mit signifikantem Unterschied. Diese Werte wurden auf die präoperative Lippenspannung und den Tonus der perioralen Muskulatur zurückgeführt.

5.2.2. Unproblematische Bereiche bei der Vorhersage von Weichteilveränderungen

5.2.2.1. Finite-Elemente-Modell

In der horizontalen Ausrichtung befinden sich alle simulierten Messpunkte im Messgenauigkeitsbereich von +/- 1,1 mm. Bis auf die Messpunkte Weichteilpogonion und Weichteilmenton zeigen die Messpunkte in vertikaler Abweichung ebenfalls genaue Werte.

Am Messpunkt Dorsum nasalis kann in der horizontalen Abweichung eine Abweichung von 0,14 mm gemessen werden. Eine vertikale Abweichung kann nicht verzeichnet werden. Der Bereich des Dorsum nasalis stellt periostunterstützte Haut am Os nasale dar, welches bei einer Le-Fort I Operation nicht verändert wird. Eine messbare Veränderung ist daher nicht aufzeigbar.

Der Bereich der Nasenspitze zeigte lediglich in der Horizontalen eine Abweichung von 0,26 mm nach posterior. Die Veränderung der Nasenspitze, welche aus hautbedecktem Knorpel besteht, ist bei sagittaler Abweichung sehr gut simulierbar.

Mit einer durchschnittlichen horizontalen Veränderung von 0,34 mm nach anterior und 0,06 mm nach kaudal konnte der Messpunkt Subnasale simuliert werden. Dabei ist die Veränderung des Subnasale abhängig von der sagittalen Veränderung des Oberkiefers und der damit folgenden Weichteiländerung, insbesondere der Oberlippe.

Der Messpunkt Labrale superius beschreibt den Übergang von Lippenrot zu Lippenweiß der Oberlippe. Dieser Punkt wurde durchschnittlich 0,23 mm nach posterior und 0,37 mm nach kaudal prognostiziert. Es wurde bei der Erstellung der Laserscans und der postoperativen Photographie auf eine entspannte Lippenhaltung geachtet, um die Fehlerquote bei Anspannung der perioralen Muskulatur zu minimieren. Bei der Erstellung der Simulation wurde beachtet, dass die Weichteile bei einer Oberkiefervorverlagerung zwischen 50 % und 90 % folgen. Bei einer Unterkieferrückverlagerung wird die Oberlippe 20 % zurückverlagert [5].

Der Messpunkt Labrale inferius wurde mit einer hohen Genauigkeit von 0,08 mm nach posterior und 0,44 mm nach kranial dargestellt. Diese genaue Simulation ist ebenfalls auf die Beachtung der entspannten Lippenhaltung bei der Laserscanaufnahme und der postoperativen Fotografie zurückzuführen. Damit konnte eine entscheidende Fehlerquelle ausgeräumt werden. Außerdem wurde die aus der Hartgewebeverlagerung resultierende Weichteilveränderung berücksichtigt. Bei einer Rück- bzw. Vorverlagerung des Unterkiefers folgt die Unterlippe zwischen 85 % und 90 % [5].

Die Simulation der Labiomentalfalte erfolgt durchschnittlich 0,7 mm nach anterior und 0,5 mm nach kranial. Entscheidend für diese sehr gute Prognose war die Entspannung der Lippen des Kinnbereichs.

5.2.2.2. Dentofacial Planner

Mit dem zweidimensionalen Prognoseverfahren kann das mittlere Gesichtsdrittel verlässlich dargestellt werden.

Der Messpunkt Dorsum nasalis zeigte keine Abweichungen. Die hohe Simulationsgenauigkeit wird durch das unveränderte Os nasale, welches mit periostunterstützter Haut überzogen ist, realisiert.

Die Nasenspitze wurde sehr gut mit einer durchschnittlichen Abweichung von 0,06 mm nach kranial simuliert. Die Nasenspitze wird bei einer Oberkiefervorverlagerung nur leicht aufgerichtet [5]. Somit ist eine Veränderung des Messpunktes Pronasale nur gering messbar.

Mit einer Abweichung von 0,34 mm nach anterior und 0,01 mm nach kaudal wurde der Messpunkt Subnasale prognostiziert. Fischer-Brandies et al. [15] untersuchten die durchschnittliche Bewegung des Punktes Subnasale und stellten eine stationäre Position fest.

Die Oberlippe wurde im Durchschnitt 0,08 mm nach kranial und 0,82 mm in der Profilsimulation dargestellt. Die gute Darstellbarkeit dieses Punktes deckt sich mit den Ergebnissen der Studie von Fischer [14]. Auch sie verzeichnete Werte innerhalb der Messgenauigkeitsgrenze mit dem Dentofacial Planner Version 2.01.

5.2.3. Abweichungen zwischen Finite-Elemente-Modell und Dentofacial Planner

Die Unterschiede zwischen der dreidimensionalen Prognose des Finite-Elemente-Modells und dem zweidimensionalen Verfahren des Dentofacial Planners liegen vor allem im unteren Gesichtsdrittel.

Das Prognoseverfahren des Dentofacial Planners erlaubt in diesem Bereich keine verlässliche Prognose.

In der Horizontalen werden die Messpunkte Labiomentalfalte, Weichteilpogonion und Weichteilmenton zu weit nach anterior prognostiziert. In der Vertikalen wurden die Messpunkte Labrale inferius und Labiomentalfalte durchschnittlich 4 mm nach kranial und die Punkte Weichteilpogonion und Weichteilmenton 2 mm bis 3 mm nach kranial simuliert.

Die vorliegende Studie zur individuellen Weichteilprognose mittels Finite-Elemente-Methode verzeichnet Werte in der Horizontalen und Vertikalen innerhalb des Messgenauigkeitsbereiches, mit Ausnahme der Messpunkte des Weichteilpogonions und Weichteilmentons. Die Werte in der vertikalen Veränderung liegen innerhalb des Toleranzbereiches. Die Ergebnisse zeigen, dass die individuelle Weichteilprognose im zweidimensionalen Verlauf mittels Finite-Elemente-Methode dem Dentofacial-Planner überlegen ist. Dies trifft insbesondere für die Messwerte im Mittelgesicht und Kinn zu. Hier konnte eine deutlichere Genauigkeit der Weichteilprognose im Vergleich zum Dentofacial Planner aufgezeigt werden.

Mögliche Gründe für diese Unterschiede liegen in der erschwerten Definierbarkeit der Messpunkte im Fernröntgenseitenbild bei der Bearbeitung der Bilder am Dentofacial Planners. Häufig ist das Weichteilprofil im Fernröntgenseitenbild schlecht abgebildet.

Ein weiterer Grund ist die Betrachtungsmöglichkeit der Simulationen. Das dreidimensionale Finite-Elemente-Modell überwiegt in der Darstellbarkeit des Gesichtes und dessen einzelner Bereiche. Das Volumenmodell gibt eine verlässliche Auskunft über die Weichteilveränderung des geplanten kieferchirurgischen Eingriffs. Aufgrund der geringen Anzahl an Probanden mit unterschiedlichen Korrekturmaßnahmen kann keine eindeutige Aussage bezüglich der Reliabilität der Studie getroffen werden. Die vorliegende Arbeit ist demnach eine Pilotstudie für ein neues Weichteilprognoseverfahren.

Mit dem Finite-Elemente-Modell lassen sich Operationsplanung, Weichteilveränderungen und Ästhetikprognosen dreidimensional veranschaulichen und dem Patienten demonstrieren.

5.3. Fehlerbetrachtung

5.3.1. Genauigkeit der Scanvorgangs

Mit den Minoltakameras wurde bei den 12 Probanden die Gesichtsoberfläche erfasst und digitalisiert. Die beiden Kameras arbeiteten nacheinander, somit wurde die Zeit des Scanvorgangs verdoppelt (circa 20 Sekunden). Während dieser Zeit konnten Abweichungen durch, z.B. durch Atmen, zur Darstellung von verzerrten Punktwolken führen, die die Genauigkeit für das Matchen behinderten. Lediglich eine Fehlergröße bis zu 0,3 mm war tolerabel, andernfalls wurde die Aufnahme wiederholt. Die Gesichtsoberfläche wurde horizontal gescannt, jedoch haben sich bei einigen Probanden die Ober- und Unterlippe überlagert, dass keine genaue Abbildung des Stomion superius und Stomion inferius verzeichnet werden konnte.

5.3.2. Bearbeitung und Erstellung der Simulation am Dentofacial Planner Plus

Ausgangsmaterial für die Bearbeitung am Dentofacial Planner ist das Fernröntgenseitenbild und dessen Durchzeichnung. Im Fernröntgenseitenbild sind die knöchernen Strukturen und Zähne überlagert und in der Durchzeichnung meist nicht korrekt übertragbar, was zu Verlagerungen von Zähnen, als auch einer Verschiebung der Mandibula führen kann. Dieser Projektionsfehler entsteht durch die Projektion eines dreidimensionalen Objektes auf zwei Dimensionen.

Fehlerhafte Identifizierungen von Vermessungspunkten können durch unsichere Reproduzierbarkeit, mangelnde Bildqualität und Genauigkeit des Auswerter erfolgen. Zufällige Fehler entstehen durch verschiedene Filmqualitäten und fehlerhafte Positionierung der Patienten. Unterschiedliche Auffassungen einzelner Auswerter ergeben einen systematischen Fehler [29,31]. Eine fehlerhafte Identifizierung der kephalometrischen Vermessungspunkte kann alle Werte und Berechnungen des Computers in Frage stellen. Bei Abweichung der Position des Kopfes durch Rotation von weniger als 5 Grad kommt es zu einer fehlerhaften

Längenmessung innerhalb der Toleranzbreite von 1%. Bei einer Rotation von mehr als 5 Grad folgen höhere fehlerhafte Werte der Längenmessung [2].

Die bisherige dreidimensionale Operationsplanung erfolgt dreidimensional am Gipsmodell durch den Behandler. Er verschiebt direkt die Kiefer in die gewünschte Position. Am FRS bzw. Dentofacial Planner ist dieses nicht möglich, da lediglich eine vertikale und sagittale Simulation möglich ist. Die horizontale Verschiebung ist nicht darstellbar.

5.3.3. Bearbeitung des Finiten-Elemente-Modells

Für die Erstellung einer Simulation ist ein individuelles dreidimensionales Gesichtsmodell des Probanden erforderlich. Um im weiteren Verlauf eine exakte Berechnung durchführen zu können, muss das Modell im Koordinatensystem ausgerichtet sein.

Ein dreidimensionales Modell erlaubt die Veränderung in der Horizontalen, Vertikalen und Sagittalen. Autorotationen der Kiefer sind nur bedingt nachzuvollziehen.

5.3.4. Erstellung von Fotos

Das postoperative Erscheinungsbild der Probanden wurde in Form eines Fotos im Profil festgehalten. Im Gegensatz zur Aufnahme eines FRS wurde der Kopf des Probanden nicht fixiert und daher nicht exakt die Frankfurter Horizontale bzw. Sagittalebene eingestellt. Dies kann bei dem Foto eine Fehlerquelle darstellen, welche durch die Abbildung der Augenbraue der verdeckten Seite zu erkennen ist.

Ein weiterer Fehler ergibt sich bei der Verwendung von Fotos, welche den Kopf verkleinert darstellen [53]. Um diesen Fehler zu kompensieren wurden am Fernröntgenseitenbild Maßstäbe ermittelt. Diese Werte wurden anschließend auf die Fotos der Patienten übertragen, indem sie mittels Software Programm Corel PhotoPaint 9 vergrößert wurden.

Eine weitere mögliche Fehlerquelle bei der Erstellung der postoperativen Fotos stellt der Allgemeinzustand des Patienten und die nach der Operation folgenden orthodontischen Maßnahmen dar.

5.3.5. Operationsumsetzung

Ein möglicher Unsicherheitsfaktor ist die Durchführung der skelettverlagernden Operation. Die exakte Umsetzung der Planungsvorlagen stellt hohe Anforderungen an den Operateur. Besonders bei der Einstellung der vertikalen Position der Maxilla, kann es zum Auftreten von Abweichungen im Vergleich zur geplanten Modell-Operation kommen, welche über eine veränderte mandibuläre Autorotation, trotz passender OP-Splinte zu Abweichungen zwischen dem präoperativ prognostizierten und dem tatsächlichen postoperativen Weichteilprofil führen kann.

5.4. Messaufwand

Für die Erstellung eines dreidimensionalen Finite-Elemente-Modells werden die Daten (Gesicht) mittels 3-D-Scanner erfasst. Diese komplexen Daten werden anschließend im Computer generiert. Der zeitliche Aufwand liegt etwa bei einer halben Stunde, wobei 90% dieser Zeit reine Rechenzeit des Computers sind. Dieses Prognoseverfahren hat den Vorteil, dass der Patient keiner Strahlenquelle ausgesetzt wird. Für die Prognose am Dentofacial Planner wird ein FRS benötigt, mit dem durch Digitalisierung die Prognose im Softwareprogramm erstellt wird. Die Digitalisierung und Simulation belaufen sich auf eine halbe Stunde. Es gibt natürlich Möglichkeiten, die Differenzierung der Finite-Elemente-Modelle zu verfeinern und damit die Prognosefähigkeit zu erhöhen, jedoch wäre das mit einer erheblichen Zunahme von Kosten verbunden.

5.5. Prognose

Mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode ist eine Erstellung von individuellen, dreidimensionalen Weichteil- und Ästhetikprognosen des Gesichtsbereiches durchführbar. Eine absolut exakte Weichteilprognose ist jedoch nicht durchführbar.

Um die Prognosegenauigkeit zu erhöhen sollten die Simulationsmodelle verfeinert werden. Neben der Berücksichtigung von Rasse und Geschlecht ist die Unterteilung der patientenindividuellen Gewebsschichtung des Gesichts wichtig. Das daraus resultierende Elastizitätsmodul vermag die Prognose zu präzisieren.

Bei der Weiterentwicklung dieses Verfahrens sollte eine verbesserte Integration der Autorotation des Unterkiefers berücksichtigen.

Mit einer Verbesserung des Systems durch Vereinfachung der Softwareanwendung und schnelleren Rechenprozessen ist die Integration der Finiten-Elemente-Methode im klinischen Alltag vorstellbar.

6. Zusammenfassung

In dieser Studie wurde eine individuelle faziale Weichteilprognose mit der Finiten-Elemente-Methode getestet und deren Validität und Prognosegenauigkeit geprüft. Zum Vergleich wurden die Messwerte mit einem zweidimensionalen Verfahren, dem Dentofacial Planner Plus Version 2.01, verglichen. Für die Erstellung der Weichteilprognose stellten sich 12 erwachsene Probanden zur Verfügung, bei denen eine kombiniert kieferorthopädisch-kieferchirurgische Behandlung durchgeführt wurde. Zur präoperativen Prognose der Weichteilveränderungen wurde ein Profildfoto mit einer digitalen Kamera der Firma Canon, EOS 10D, und ein Fernröntgenseitenbild für die Weichteilprognose des zweidimensionalen Verfahrens hergestellt. Nach Eingabe der kephalometrischen Messpunkte in das interaktive Softwaretool des Dentofacial Planners konnte die Operation simuliert werden. Dazu wurden die Werte der Modelloperation hinzugezogen. Nach Verschiebung der Maxilla und Mandibula in sagittaler und vertikaler Richtung errechnete die Software die Weichteilprognose, die als Profillinie zweidimensional visualisiert wurde.

Für die digitale Gesichtserfassung der Probanden wurden mittels 3-D Laserscanner die fazialen Weichteile für das dreidimensionale Verfahren erfasst. Die akquirierten Punktwolken konnten vereinigt und über spezielle Algorithmen in ein CAD-Modell verarbeitet werden. Über diese CAD-Schnittstelle war es möglich ein Finite-Elemente-Modell zu generieren. Die Simulation zur fazialen Weichteilprognose erfolgte mit der Software Design Space (Ansys Inc.). Im Unterschied zum zweidimensionalen Verfahren besteht beim Finite-Elemente-Verfahren die Möglichkeit einer falschfarbenkodierte Visualisierung der regionalen Weichteilveränderungen im dreidimensionalen Raum. Es kann neben der Prognose der Profillinie auch eine ästhetisch wichtige Beurteilung der Wangen, der Nasenflügel und Nasiolabialfalten getroffen werden.

Bei vergleichenden Messungen zwischen den beiden Prognoseverfahren zeigen sich bezüglich der Validität und der Prognosegenauigkeit eindeutige Unterschiede. Der durchschnittliche Gesamtfehler des Dentofacial Planners ist fast doppelt so hoch, im Vergleich zum Fehler des Finite-Elemente-Verfahrens. Es konnten regionale Unterschiede festgestellt werden. Im Mittelgesicht ist die Prognose der beiden Verfahren als gut einzustufen, währenddessen die Prognose des unteren

Gesichtsdrittels mit dem Dentofacial Planner hohe Abweichungen zum postoperativen Gesichtsprofil aufweist. Diese Ergebnisse wurden von Fischer (2002) in einer Dissertation bestätigt. Die Prognosegenauigkeit des Finite-Elemente-Verfahrens ist im unteren Gesichtsdrittel höher. Jedoch wurde am Messpunkt Weichteilmenton Abweichungen in vertikaler Richtung mit Messwerten von über 1,5 mm aufgezeigt. Eine mögliche Erklärung dafür ist die geringe Simulation der Autorotation des Unterkiefers bei der Bearbeitung des Finite-Elemente-Modells.

Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass trotz der besseren Beurteilung der individuellen, fazialen Weichteilverhältnisse in allen drei Dimensionen des Raumes im Vergleich zum zweidimensionalen Verfahren keine absolut perfekte Weichteilprognose getroffen werden kann. Um dieses Verfahren der Finiten-Elemente-Methode zu verfeinern sollten bei der Herstellung des Finite-Elemente-Modells die Weichgewebsschichten und die Autorotation des Unterkiefers berücksichtigt werden.

7. Literaturverzeichnis

1. Aharon P, Eisig S, Cisneros GJ:
Surgical prediction reliability: A comparison of two computer software systems
Int. J. Adult Orthod. Orthognath. Surg. 1997; 12:65-78
2. Alqvist J, Eliasson S, Welander U:
The effect of projection errors on cephalometric measurements
Europ. J. Orthod. 1986; 8: 141-148
3. Arnett GW, McLaughlin RP. Facial and Dental Planning for Orthodontists and Oral Surgeons. Edinburgh: Mosby, 2004.
4. Attarzadeh F, Adenwalla S. Soft-tissue profile changes concurrent with the orthodontic treatment. Int J Orthod 1990;28:9-16.
5. Austermann KH:
Chirurgische Behandlung der Dysgnathien
In: Horch HH(Hrsg.):
Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie II 1990
Urban& Schwarzenberg Verlag
6. Bailey LJ, Collie FM, White RP:
Long-term soft tissue changes after orthognatic surgery
Int. Adult Orthod. Orthognath. Surg. 1996; 7-18
7. Berz A:
Beziehungen von Funktion, Morphologie und Ästhetik des Kauorgans zu Psyche
Zahnärztl. Welt 1967; 68:872
8. Bloom LA:
Perioral profile changes in orthodontic treatment
Am. J. Orthod. 1961; 47: 371-79
9. Burstone CJ:
The integumental profile
Am. J. Orthod. 1958; 44:1-25n treatment planning
10. Burstone CJ:
The lip posture and its significance
Am. J. Orthod. 1967; 53:262-279
11. Connor AM, Moshiri F:
Orthognatic Surgery norms for American black patients
Am. J. Orthod. 1985; 7:119-134

12. Dermaut LR, De Smit AA:
Effects of sagittal split advancement osteotomy on facial profiles
Eur. J. Orthod. 1989; 11:366-374
13. Fässler FF:
Die Behandlungsvariation in der kieferorthopädischen Erstberatung
Med. Dissertation München, 1999
14. Fischer AM:
Prognose zur Veränderung des Weichgewebsprofils einer skelettal tiefen
Konfiguration durch operative Therapie im Unterkiefer mit Hilfe des Dentofacial-
Planner-Plus 2.01
Dissertation, 2000
15. Fischer-Brandies H, Seeholzer H, Fischer-Brandies E, Bauerfeind I:
Vorhersagbarkeit der Weichteilveränderungen mit dem Dentofacial Planner
4.22A nach kieferorthopädischer Erwachsenenbehandlung
Inf. Orthod. und Kieferorth. 1990; 21:517-524
16. Fröhlich P:
FEM-Leitfaden
Einführung und praktischer Einsatz von Finite-Element-Programmen
Springer Verlag 1995
17. Gattinger B, Obwegeser J:
Chirurgische Kieferorthopädie und kraniofazialer Fehlbildungschirurgie
Zahn-Mund-Kiefer-Heilkunde Spezielle Chirurgie
Georg Thieme Verlag 2002; 235-273
18. Girod S, Keeve E, Girod B:
Advances in interactive craniofacial surgery planning by 3D simulation and
visualization
Int. J. Oral Maxillofac. Surg. 1995; 24:120 -125
19. Harradine NWT, Birnie DJ:
Computerized prediction of the results of orthognatic surgery
J. Max. Surg. 1985; 13:245-249
20. Hausser E:
Kauorgan und Profilverlauf im Fernröntgenbild
Österr. Z. Stomatol. 1958; 55:339-351
21. Hayse RJ, Sarver DM, Jacobson A:
The quantification of soft tissue cervicomental changes after mandibular
advancement surgery
Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop. 1994, 383-391
22. Henckemann W, Lotter K:
Proportion Lexikon der Ästhetik 1992; 196-197

23. Hering P:
Holographie und Lasertechnik in der Medizin
Pressemitteilungen
Caesar-Center of advanced european studies and research, 2002
24. Hershey HG:
Incisor tooth retraction and subsequent profile change in postadolescent female patients
Am. J. Orthod. 1972; 61:45-53
25. Hiller F:
Anthropometrie in Kunst und Wissenschaft
Der Vermessene Mensch
Heinz Moos Verlag München 1973
26. Hillesund E, Fjeld D, Zachrisson BU:
Reliability of soft tissue-profile in cephalometrics
Am. J. Orthod., 1978;74:537-550
27. Holberg C:
Ästhetik-Prognose im Virtuellen Biomechanik Labor.
BZB 2003; 1-2:46-48
28. Holberg C:
Erfassung von Gesichtsoberflächen durch ein lichtcodiertes
Triangulationsverfahren.
Dissertation Universität Tübingen, 2002
29. Houston WJB, Orth D:
The analysis of errors in orthodontic measurements
Am. J. Orthodont. 1983; 83:382-390
30. Humphreys B:
Proportions of the aesthetic face
Thieme-Stratton Inc., New York 1984
31. Jacobson A:
Planning for orthognathic surgery- art of science
Int. J. Orthod. Surg. 1990; 217-224
32. Kahl-Nieke B:
Einführung in die Kieferorthopädie
Urban & Schwarzenberg Verlag 1995
33. Keeve E, Girod S, Kikinis R, Girod B:
Deformable modeling of facial tissue for craniofacial surgery simulation
Comput Aided Surg 1998; 3:228-238.

34. Kess K :
Altersabhängige Weichteilveränderungen des Gesichts
Fortschr. Kieferorthop. 1990; 51:373-377
35. Kobayashi T, Ueda K, Honma K, Sasakura H:
Three-dimensional analysis of facial morphology before and after orthognatic surgery
J Cranio Maxillofac. Surg 1990; 18:68-73
36. Kober C, Sader R, Thiele H, Bauer HJ, Zeilhofer HF, Hoffmann KH, Horch HH:
Numerische Simulation (FEM) des menschlichen Unterkiefers: Validierung der Umsetzung der Kaumuskulatur.
Biomed. Technik 2000; 45:199-205
37. Kober C, Sader R, Thiele H, Bauer HJ, Zeilhofer HF, Hoffmann KH, Horch HH:
Spannungsanalyse des menschlichen Unterkiefers bei traumatologischen Standardsituationen mittels numerischer Situation.
Mund Kiefer Gesichts Chir 2001; 5:114-119
38. Koriioth TWP, Versluis A:
Modeling the mechanical behavior of the jaws and the their related structures by finite element (FE) analysis.
Crit Rev Oral Med 1997; 8:90-104
39. Lines PA, Steinhäuser EW:
Profilometrics as a New Diagnostic Aid in the Treatment Planning of Orthognatic Surgery.
Fortschr. Kiefer-Gesichtschir. 1981; 26:6-8
40. Lines PA, Lines RP, Lines CA:
Profile metrics and facial esthetics
Am. J. Orthod. 1978; 73:648-65
41. Luster mann EA:
The esthetics of the occidental face: A study of Dentofacial morphology based upon anthropologic criteria
Am. J. Orthod. 1963; 49: 836-850
42. Mc Cance AM, Moss JP, Fright WR, Linney Ad, James DR:
A three dimensional analysis of bone and soft tissue to bone ratio of movements in 17 skeletal II patients following orthognatic surgery
Eur. J. Orthod. 1993; 97-106
43. Motoyoshi M:
Finite element model of facial soft tissue. Deformation following surgical correction.
J Nihon Univ Sch Dent 1992; 34:111-122

44. Motoyoshi M, Yoshizumi A, Nakajima A, Kishi M, Namura S:
Finite element model of facial soft tissue. Effects of thickness and stiffness on changes following simulation of orthognathic surgery
J Nihon Univ Sch Dent 1993; 35:118-123.
45. Müller HW, Hiller F:
Der Vermessene Mensch
Heinz Moos Verlag München 1973
46. Müller-Schelken H:
Esthetic corrections in cases of orthognathic surgery
Int. J. Adult Orthod. Orthognat. Surg. 1989; 4:229-237
47. Panowsky E:
Aufsätze zu Grundfragen der Kunstwissenschaften.
Verlag Bruno Hessling Berlin 1974
48. Rasse M, Forkert G, Waldhäusl P:
Stereogrammetry of facial soft tissue.
Int J Oral Maxillofac Surg 1991; 20:163-166
49. Ricketts RM:
Esthetics, enviroment, and the law of lip relation
Am. J. Orthod. 1968; 54:272-289
50. Riedel RA:
An analysis of dentofacial relationship
Am. J. Orthod. 1957; 43:103-119
51. Rudzki-Janson I, Noachtar R:
Functional appliance therapy with the bionator
Semin. Orthod. 1998; 4:33-45
52. Satravaha S, Schlegel D:
Antropometrische sowie Zahn-, Mund- und Kieferbefunde bei sudanesischen Kindern
Fortsch. Kieferorthop. 1988; 49:108-131
53. Schwarz AM:
Die Röntgenostatik. Die kieferorthopädische Diagnose am Fern-Röntgenbild
Verlag Urban & Schwarzenberg, Wien Innsbruck 1958
54. Soncul B, Bamber M:
The optical surface scan as an alternative to the cephalograph for soft tissue analysis for orthognathic surgery
Int J Adult Orthod Orthognath Surg 1999; 14:277-283
55. Steinhäuser EW:
Weichteilveränderungen bei korrektiven Osteotomien im Kieferbereich
Dtsch. Zahnärztl. Z. 1974; 29:1065-1073

56. Steinhäuser EW, Janson IM:
Kieferorthopädische Chirurgie. Eine interdisziplinäre Aufgabe, Band I
Grundlagen zur Behandlungsplanung und Behandlungsdurchführung
Quintessenz Verlag GmbH Berlin, Chicago, London, Sao Paolo, Tokio 1988
57. Storr I, Hocholzer M, Rudzki-Janson I, Mast G, Schwenzer K, Ehrenfeld M:
Kieferorthopädische Behandlungsergebnisse nach bignather Osteotomie
BLZK-BZB 1998; 7-8:50-51
58. Wylie GA, Fish LC, Epker BN:
Cephalometrics: a comparison of life analyses currently used in diagnosis of
ento-facial deformities
Int. J. Adult Orthod. Orthognath. Surg. 1987; 2:15-36
59. Xia J, Wang D, Samman N, Yeung R, Tideman H:
Computer-assisted three-dimensional surgical planning and simulation: 3D colour
facial model generation
Int J Oral Maxillofac Surg 2000; 29:2-10
60. Xia J:
Three-dimensional virtual reality surgical planning and simulation workbench for
orthognathic surgery
Int J Adult Ortodont Orthognath Surg 2000; 15:265-82
61. Zhang M, Zheng Y, Mak A:
Estimating the effective Young's modulus of soft tissues from indentation tests-
nonlinear finite element analysis of effects of friction and large deformation
Med eng Phys 1997; 19:512-517

8. Anhang

8.1. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Darstellung einer Schaufel als Finite-Element-Modell	4
Abb. 2:	Fotometrische Vermessungen im Profil	7
Abb. 3:	Fotometrische Vermessungen en face	7
Abb. 4:	Beispiel für eine Simulation einer Dysgnathieoperation am Dentofacial Planner (rote Linie)	9
Abb. 5:	Der Proportionskanon	12
Abb. 6:	Doryphoros Römische Kopie aus Pompeji	12
Abb. 7:	Proportionsfigur nach Vitruvs Schlüsselschemata der Menschenmasse als Grundlage des Bauens, Leonardo da Vinci	13
Abb. 8:	Abmessungen des Kopfes	14
Abb. 9:	Vorgehensweise zur Beantwortung der wissenschaftlichen Fragestellung	20
Abb. 10:	Altersverteilung der Probanden	21
Abb. 11:	Punktwolkenmodell ohne Simulation	25
Abb. 12:	Individuelle Simulation einer Unterkiefervorverlagerung	26
Abb. 13:	Operationsplanung im Dentofacial Planner.	28
Abb. 14:	Darstellung der im Dentofacial Planner verwendete kephalometrischer Messpunkte	33
Abb. 15:	Verteilung der horizontalen Abweichung zwischen dem postoperativen Gesicht und der Simulation Finite-Elemente-Modell bei 12 Probanden	35
Abb. 16:	Verteilung der vertikalen Abweichung zwischen dem postoperativen Gesicht und der Simulation im Finite-Elemente-Modell bei 12 Probanden	36
Abb. 17:	Verteilung der Abweichungsrichtungen am Messpunkt Dorsum Nasalis zwischen postoperativem Gesicht und Finite-Elemente-Modell	37
Abb. 18:	Verteilung der Abweichungsrichtungen am Messpunkt Pronasale zwischen postoperativem Gesicht und Finite-Elemente-Modell	38
Abb. 19:	Verteilung der Abweichungsrichtungen am Messpunkt Subnasale zwischen postoperativem Gesicht und Finite-Elemente-Modell	39
Abb. 20:	Verteilung der Abweichungsrichtungen am Messpunkt Labrale superius zwischen postoperativem Gesicht und Finite-Elemente-Modell	40
Abb. 21:	Verteilung der Abweichungsrichtungen am Messpunkt Labrale inferius zwischen postoperativem Gesicht und Finite-Elemente-Modell	41
Abb. 22:	Verteilung der Abweichungsrichtungen am Messpunkt Labiomentalfalte zwischen postoperativem Gesicht und Finite-Elemente-Modell	42
Abb. 23:	Verteilung der Abweichungsrichtungen am Messpunkt Weichteilpogonion zwischen postoperativem Gesicht und Finite-Elemente-Modell	43

Abb. 24:	Verteilung der Abweichungsrichtungen am Messpunkt Weichteilmenton zwischen postoperativem Gesicht und FE-Modell	44
Abb. 25:	Abweichung des Wangenmesspunktes nach medial in Abhängigkeit des Größe der operativen Verschiebung in sagittaler Richtung	45
Abb. 26:	Verteilung der horizontalen Abweichung zwischen dem postoperativem Gesicht und der Simulation im Dentofacial Planner bei 12 Probanden	46
Abb. 27:	Verteilung der vertikalen Abweichung zwischen dem postoperativem Gesicht und der Simulation im Dentofacial Planner (DFP) bei 12 Probanden	47
Abb. 28:	Verteilung der Abweichungsrichtungen am Messpunkt Dorsum Nasalis zwischen postoperativem Gesicht und DFP	48
Abb. 29:	Verteilung der Abweichungsrichtungen am Messpunkt Pronasale zwischen postoperativem Gesicht und DFP	49
Abb. 30:	Verteilung der Abweichungsrichtungen am Messpunkt Subnasale zwischen postoperativem Gesicht und DFP	50
Abb. 31:	Verteilung der Abweichungsrichtungen am Messpunkt Labrale superius zwischen postoperativem Gesicht und DFP	51
Abb. 32:	Verteilung der Abweichungsrichtungen am Messpunkt Labrale inferius zwischen postoperativem Gesicht und DFP	52
Abb. 33:	Verteilung der Abweichungsrichtungen am Messpunkt Labio-mentalfalte zwischen postoperativem Gesicht und DFP	53
Abb. 34:	Verteilung der Abweichungsrichtungen am Messpunkt Weichteilpogonion zwischen postoperativem Gesicht und DFP	54
Abb. 35:	Verteilung der Abweichungsrichtungen am Messpunkt Weichteilmenton zwischen postoperativem Gesicht und DFP	55
Abb. 36:	Vergleich der horizontalen Abweichung der Simulationen des FE-Modells und dem DFP an verschiedenen Messpunkten	57
Abb. 37:	Vergleich der verschiedenen Messpunkte mit den Simulationen des Finite-Elemente-Modells und dem DFP in der Vertikalen	57
Abb. 38:	Präoperatives Foto eines Patienten im Dentofacial Planner	59
Abb. 39:	Postoperatives Foto des Probanden	60
Abb. 40:	Darstellung der präoperativen Situation (grüne Linie) und der Simulation (rote Linie) des Dentofacial Planner	61
Abb. 41:	Simulation (Foto) des Dentofacial Planner	62
Abb. 42:	Rechte Profilansicht des simulierten FE-Modells	63
Abb. 43:	Halbprofil rechts des simulierten Finite-Elemente-Modells	64
Abb. 44:	En face Ansicht des simulierten FE-Modells	65
Abb. 45:	Profil halblinks des simulierten Finite-Elemente-Modells	66
Abb. 46:	Linkes Profil des simulierten Finite-Elemente-Modells	67
Abb. 47:	Weichteilprognose bei 12 Patienten mit dem Dentofacial Planner Plus (links) und dem Finite-Elemente-Verfahren (rechts).	71
Tab. 1:	Geplante skelettale Verschiebungswerte (in mm) der Modell-operation	22
Tab. 2:	Rahmenbedingungen bei der Durchführung des virtuellen Experiments	24
Tab. 3:	Tabelle der durchschnittlichen Prognosefehler (n=12) des Finite-Elemente-Modells und des Dentofacial Planners	72

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt

Frau Prof. Dr. Ingrid Rudzki-Janson für die Überlassung des Dissertationsthemas,

Herrn Dr. Dr. Christof Holberg für die hervorragende Betreuung und Unterstützung bei der Durchführung der vorliegenden Arbeit,

Herrn Dr. Thomas Sagner für die Einarbeitung in das Computerprogramm Dentofacial Planner,

den Assistenten der Poliklinik für Kieferorthopädie, München, für die Motivierung der Probanden bezüglich dieser Studie,

Herrn Bernhard Krebs für den unermüdlichen Beistand und die Unterstützung bezüglich Computerfragen,

meinen Eltern für die moralische Unterstützung und meiner Schwester für die Beratung.

Lebenslauf

Name: Anne-Kathrin Heine

Wohnort: Birkenfeldstrasse 4, 80804 München

geboren: 16. März 1976 in Hoyerswerda

Staatsangehörigkeit: deutsch

Eltern: Dr. Dietrich Heine, Zahnarzt
Christine Heine, Physiotherapeutin

Grundschule: **1982-1989** Polytechnische Oberschule, Hoyerswerda

Gymnasium: **1989-1994** Gymnasium Franziskanerum, Meißen

Abitur: **06/1994**

Studium: **1994-2001** Studium der Zahnmedizin
an der Humboldt Universität zu Berlin (Charité)

Staatsexamen: **01/2002**

Assistenzzeit: **01/2002 - 12/2003**
Vorbereitungsassistentin in der Zahnarztpraxis
Dr. K. Wackerl in Dachau
seit 01/2004
Vorbereitungsassistentin in der Zahnarztpraxis
Dr. K. Ongyerth / Dr. W. Kaefer in München