

Aus der Universitätsklinik für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde

Tübingen

Abteilung für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie

Ärztlicher Direktor: Professor Dr. Dr. Reinert

Erfassung von Gesichtsoberflächen durch ein lichtcodiertes Triangulationsverfahren

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Zahnheilkunde

der Medizinischen Fakultät
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von

Dr. med. Christof Holberg

aus Seefeld

2002

Dekan:

Professor Dr. C. D. Claussen

1. Berichterstatter:

Professor Dr. Dr. h.c. mult. N. Schwenger

2. Berichterstatter:

Professor Dr. Dr. h.c. E. Körber

**Meinen Eltern
in Dankbarkeit
gewidmet**

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	1
2. Historie und Literaturübersicht	3
2.1. Proportionslehre in Kunst und Medizin	3
2.1.1. Proportionskanon der ägyptischen Kunst	4
2.1.2. Proportion in der Antike	6
2.1.3. Das Mittelalter	8
2.1.4. Die Moderne	10
2.2. Faziale Morphometrie in der Medizin	10
2.2.1. Fotos	11
2.2.2. Stereophotogrammetrie	12
2.2.3. Röntgenbild	13
2.2.4. Interpolierungen aus FRS und FRF	14
2.2.5. Dentofacial Planner	15
2.2.6. Digigraph	17
2.2.7. Moiré - Fotografie	17
2.2.8. Laser (Cyberware)	18
2.2.9. Wissenschaftliche Fragestellung	18
3. Methodik	19
3.1. Probanden	19
3.2. Herstellung der Gipsmasken	20
3.3. Digitales Meßverfahren (TRICOLITE)	21
3.3.1. Datenakquisition	21
3.3.1.1. Meßaufbau und Kalibrierung	22
3.3.1.2. Triangulation	23
3.3.1.3. Gray - Code	25
3.3.1.4. Phasenshift	26
3.3.1.5. Meßbedingungen	26
3.3.1.6. Durchführung der Messungen	28
3.3.1.7. Systematischer Fehler des Tricolite-Verfahrens	28

3.3.2. Datenaufbereitung	29
3.3.3. Datenauswertung	30
3.3.3.1. Software	30
3.3.3.2. Cross - Section	31
3.3.3.3. Meßpunktdefinition	31
3.3.3.4. Messung	31
3.3.4. Meßwertdokumentation	31
3.4. Experimentelles Vorgehen	31
3.4.1. Messungen zur Reliabilität	31
3.4.2. Messungen zum Gipsmaskenfehler	32
3.4.3. Prä- und postoperative Patienten- vermessung	33
4. Ergebnisse	34
4.1. Reliabilität	34
4.1.1. Unbewegtes Meßobjekt	34
4.1.2. Bewegtes Meßobjekt	42
4.1.3. Vergleich des zufälligen Fehlers bei unbewegtem und bewegtem Meßobjekt	46
4.1.4. Fehlerbetrachtung	47
4.2. Genauigkeit der Gipsmasken	49
4.2.1. Durchschnittlicher Gipsmaskenfehler	49
4.2.2. Analyse der Gipsmaskenabweichungen nach Regionen	49
4.2.2.1. Skalare Größe des Fehlers	49
4.2.2.2. Fehlervektor	57
4.2.3. Atmungsabhängigkeit	64
4.2.4. Geschlechtsabhängigkeit	66
4.2.5. Systematischer und zufälliger Fehler	66
4.3. Klinischer Fall	67

5. Diskussion	72
5.1. Das Tricolite - Verfahren im Vergleich	72
5.1.1. Meßgenauigkeit	73
5.1.1.1. Validität	73
5.1.1.2. Reliabilität	75
5.1.2. Meßaufwand und Preis	77
5.2. Optimierung des Tricolite - Verfahrens	78
5.2.1. Meßzeit	78
5.2.2. Abschattungseffekte	78
5.2.3. Ökonomie	78
5.3. Gipsmaskengenauigkeit	79
5.3.1. Atmungsabhängigkeit	80
5.3.2. Geschlechtsabhängigkeit	81
5.4. Klinische Anwendung des Tricolite - Verfahrens	81
5.5. Ausblick	82
6. Zusammenfassung	83
7. Literaturverzeichnis	85
8. Anhang	92

1. Einleitung

Das Gesicht eines Menschen fasziniert durch seine Individualität und Einzigartigkeit. Trotz mancher Ähnlichkeiten ist es ein zuverlässiges Unterscheidungsmerkmal, das es uns ermöglicht, jemanden wiederzuerkennen. Die kognitive Leistung unseres Gehirns, das die Komplexität eines fremden Gesichts in Sekundenbruchteilen dreidimensional registrieren und abspeichern kann, ist in seiner Schnelligkeit und Zuverlässigkeit unübertroffen. In Kunst und Naturwissenschaft bemüht man sich seit jeher, die Proportionen der Gesichtsstrukturen zu beschreiben. Eine einfache Möglichkeit sind dabei zweidimensionale Messungen in der Profilansicht.

Unter dem Gesichtsprofil, das sich vom Lateinischen "filum" = Faden oder Strich ableitet, versteht man traditionell die zweidimensionale Umrißlinie eines Objekts. Schon die alten Ägypter verewigten sich und ihre Gottheiten durch einfache Umrißzeichnungen, bei denen der Kopf und die Beine im lateralen, Brust und Arme dagegen im frontalen Profil gezeichnet wurden. Diese Zeichnungen waren so unspezifisch, daß sie zwar als Symbol dienen konnten, aber kaum beschreibenden Charakter hatten. Aus diesem Grund war die weitere Entwicklung, vor allem in der bildenden Kunst der alten Griechen, vom Streben nach einer vollständigen, also dreidimensionalen Darstellung der Gesichtsstrukturen geleitet.

Auch viele naturwissenschaftliche Disziplinen der Neuzeit wie Geographie und Architektur haben die streng zweidimensionale Definition des Profilbegriffes bereits verlassen und sprechen von Reliefprofilen und synoptischen Profilen, um gegenseitige Beziehungen und Höhenverhältnisse zu beschreiben. In anderen Disziplinen, wie Biologie und Chemie, ist man dazu übergegangen, komplexe Zusammenhänge durch dreidimensionale Isoplethen anschaulich zu erfassen und darzustellen (siehe Abb.1, S.2). Der Trend zum dreidimensionalen Denken hat alle naturwissenschaftlichen Bereiche, so auch die Medizin, erfaßt.

Obwohl bei der Darstellung und Vermessung des Gesichtsschädels die zweidimensionale Profilerfassung noch die Regel ist, gibt es bereits heute Ansätze zur dreidimensionalen Messung der fazialen Hart- und Weichgewebe. Besonders bei skelettverlagernden Dysgnathie-Operationen wäre ein anschauliches dreidimensionales Meßverfahren der postoperativen Weichteilveränderungen, die entscheidend das ästhetische Operationsergebnis bestimmen, ein wichtiger Fortschritt.

Nach Anlegung einer Datenbank könnte man ein Prognoseverfahren entwickeln, das das postoperative Verhalten der Gesichtsteile zuverlässig vorhersagen kann.

Wünschenswert wäre deshalb eine dreidimensionale Meßmethode, die die Gesichtsoberfläche kontaktfrei erfaßt, eine möglichst kurze Meßzeit hat und auch bei geöffneten Augen vollkommen unschädlich ist.

In folgender Arbeit wird ein neues Meßverfahren (Tricolite), das diese Grundforderungen erfüllt, auf seine Meßgenauigkeit und klinische Anwendbarkeit hin untersucht. Mit diesem lichtcodierten Triangulationsverfahren, das mit strukturiertem Licht arbeitet, wird außerdem die Wiedergabegenauigkeit von Gesichtsmasken aus Gips überprüft.

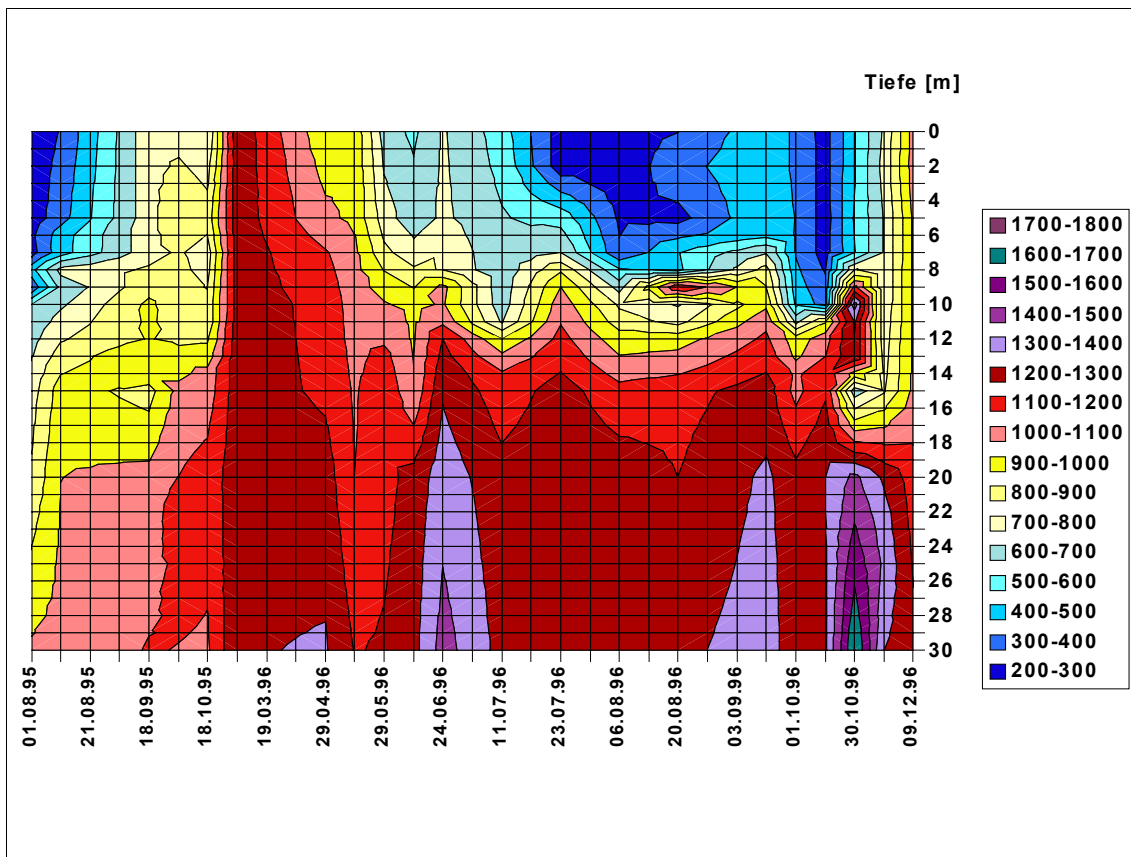


Abb.1:

Dreidimensionale Isoplethen-Darstellung in der Biologie: Konzentrations-Profil eines Gewässers (Ammersee) für das Element Silizium. Auf der x-Achse ist der Tag der Probenentnahme, auf der y-Achse die jeweilige Wassertiefe und auf der z- Achse (Farbcodierung) die gemessene Konzentration aufgetragen (Anmerkung: Der Autor dankt Herrn Dr. rer. nat. Harald Mohrscheidt für die freundliche Überlassung der Abbildung).

2. Historie und Literaturübersicht

Für viele Patienten, die sich einer Dysgnathie-Operation unterziehen, ist neben der funktionellen Verbesserung vor allem die Harmonisierung ihres Gesichtsprofils von großer Bedeutung. Das postoperative ästhetische Ergebnis ist dabei entscheidend vom Verhalten der Weichteile abhängig, das im Gegensatz zu den skeletalen Veränderungen bisher nur schwer vorhergesagt werden kann. Da Schönheit und Ästhetik für den Patienten so wichtig, aber andererseits nur schwer objektivierbar sind, soll im Kapitel 2.1. (siehe unten) der Begriff der fazialen Harmonie, der seine Wurzeln in der bildenden Kunst hat, historisch untersucht werden.

Um Größe, Form und faziale Harmonie messen zu können, wurden bisher in der Medizin verschiedene morphometrische Verfahren entwickelt, die mit dem neuen, in dieser Arbeit vorgestellten, digitalen Verfahren (TRICOLITE) verglichen werden sollen. Einen Überblick über diese morphometrischen Methoden gibt Kap.2.2. (S.11).

2.1. Proportionslehre in Kunst und Medizin

Die Erfassung und Darstellung des menschlichen Gesichts und damit der Proportionen und Verhältnismäßigkeiten seiner Strukturen und Komponenten, war von Anbeginn der Kunst ein zentrales Thema (Farkas, 1981).

"Verhältnis ist das gewisse Verhalten zweier gleichartiger Größen ihrer Abmessung nach. (...) Die dasselbe Verhältnis habenden Größen sollen in Proportion stehend heißen."

Euklid, um 300 v. Chr. (zitiert nach Bahr, 1991)

Die Proportionslehre in der bildenden Kunst ist die Lehre von den Größenverhältnissen der verschiedenen darzustellenden Strukturen. Die Ermittlung dieser Verhältnisse war beeinflusst vom Streben nach dem "Schönen", aber auch geprägt vom Wunsch, eine "Norm" oder ein "traditionelles Maß" festzulegen. Um Gesetzmäßigkeiten und Regeln in der Proportionslehre zu implementieren, bedurfte es eines Maßsystems. Dabei konkurrierten zwei Methoden: einmal die Zerlegung des Ganzen, ein Prinzip, das der organischen Differen-

zierung folgt, und kleinere Maße als Bruchteil der Gesamtstruktur darstellt. Die zweite Methode dagegen hat sich weit über die Grenzen der Kunst durchgesetzt und ist zentrale Grundlage der modernen Morphometrie in der Medizin. Diese alternative Methode stellt eine Größe als das Vielfache einer Einheit, eines sogenannten "Modulus" dar und ermöglicht so die Vergleichbarkeit unabhängiger Größen durch Zurückführung auf eine neutrale Einheit, die zwar als Grundmaß Teil des Ganzen ist, aber nicht von diesem bestimmt wird (Bahr, 1991).

In den folgenden Unterkapiteln wird die Entwicklung der Proportionslehre, angefangen bei den alten Ägyptern chronologisch bis in die Moderne, kurz dargestellt, und der Einfluß, den diese historischen Erkenntnisse auf das moderne morphometrische Denken in der Medizin ausüben, analysiert.

2.1.1 Proportionskanon der ägyptischen Kunst

Zwar existierte im Bereich der ägyptischen Kunst keine ausdrückliche Proportionslehre, doch ergeben sich aus den Wandbildern, Reliefsen und Vollplastiken selbst gewisse Regeln, die oft streng beachtet wurden. Um diese Regeln zu verstehen muß man den Sinn und Zweck, den die künstlerische Darstellung des menschlichen Körpers für die alten Ägypter hatte, berücksichtigen. Nicht eine möglichst naturgetreue Nachahmung des lebenden Menschen stand im Mittelpunkt des künstlerischen Schaffens, vielmehr sollte die Abbildung oder Plastik einem transzendenten Wesen (z.B. Seelenwesen "Ka") als materieller Träger dienen. Dieser Symbolcharakter findet seine Entsprechung in der starren und schematisierten Wirkung, die altägyptische Wandmalereien beim Betrachter hinterlassen (siehe Abb.2, S.5). Ein direkter Nachfolger dieses altägyptischen Kunstverständnisses in unserer modernen Computerwelt ist die Verwendung von sogenannten "Clip arts", schematischen Zeichnungen, die lediglich als Informationsträger dienen sollen und bei denen deshalb eine möglichst naturgetreue Darstellung eher nebensächlich ist (siehe Abb.3).



Abb.2 und 3:

Gottheit Thot auf Papyros (linkes Bild) und ein Clip-Art, entdeckt auf einer Homepage im World Wide Web (rechtes Bild).

Die altägyptische Kunst bleibt stets einer zweidimensionalen flächenhaften Darstellung treu, bei der die dargestellten Figuren durch waagerechte Linien an herausragenden anatomischen Punkten auf unterschiedlicher Höhe unterteilt werden (siehe Abb.4). Die Gesamthöhe der Figur ist ein ganzes Vielfaches der Fußlänge und auch die Achsenpunkte lassen sich mit Hilfe dieses Einheitsmaßes zwanglos herleiten.

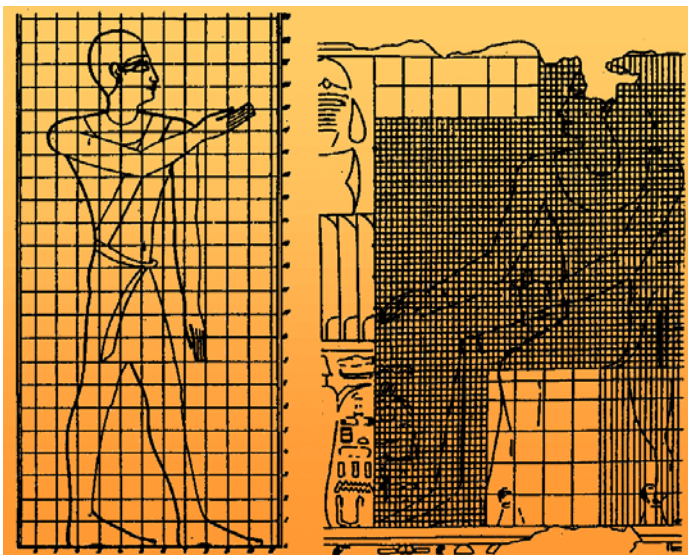


Abb.4:

Koordinatenähnliches Konstruktionsprinzip in der altägyptischen Kunst.

Im Mittleren Reich (2300-1550 v.Chr.) wurde dieses metrische Proportionssystem durch die Einführung eines kompletten Gitternetzes verfeinert, bei dem die Bildaufteilung in Quadrate nun die genaue Breitenausdehnung der Figuren diktiert. Dieses zweidimensionale Koordinatensystem, das nicht nur der Konstruktion, sondern auch der Übertragung dienen konnte, wurde im Laufe der Zeit durch Einführung von Unterquadraten weiter perfektioniert und ist bis heute noch fundamentale Grundlage moderner Meß- und Kopierverfahren. Auch die moderne zweidimensionale Kephalometrie in der Medizin basiert noch auf diesen, von den alten Ägyptern geschaffenen Grundlagen, selbst wenn die computergestützte Auswertung die Größe der Meßquadrate drastisch auf den Bereich der optischen Auflösung des Computers reduziert hat.

2.1.2. Proportion in der Antike

Diese Epoche brachte eine bedeutende Wandlung mit sich. Nicht mehr der "Modulus" als kleinstes Einheitsmaß wurde dem Proportionsdenken zugrunde gelegt, sondern die Relation der Einzelstrukturen zueinander und in Bezug auf das Körperganze bestimmte zunehmend das künstlerische Denken. Nicht mehr eine flächenhafte Darstellung im zweidimensionalen Koordinatensystem wie im alten Ägypten, sondern eine möglichst naturgetreue dreidimensionale Differenzierung der Gesamtgestalt in Rumpf und Glieder war vorrangiges Ziel des künstlerischen Schaffens (siehe Abb.5).

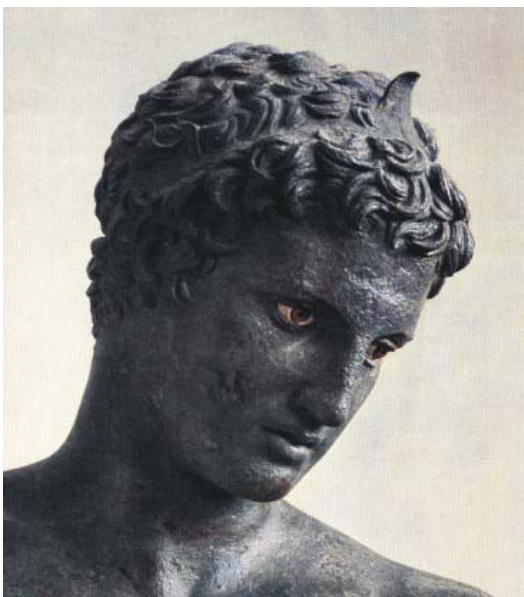


Abb.5: Büste eines unbekanntes Jünglings, gefunden im Meer bei Marathon

"Schönheit existiert nicht in den einzelnen Elementen, sondern im harmonischen Verhältnis der Teile zueinander: im Verhältnis eines Fingers zum anderen, aller Finger zur übrigen Hand, von der übrigen Hand zum Handgelenk, von diesem Handgelenk zum Unterarm, vom Unterarm zum ganzen Arm. Die Schönheit beruht nach Meinung aller Ärzte und Philosophen in der Symmetrie der Glieder."

Galen, 2. Jahrhundert n. Chr. (zitiert nach Bahr, 1991)

Bereits Polyklet (480-410 v.Chr.) machte exakte Angaben zur Proportion des Gesichts. So sollte das Höhen-Breitenverhältnis des Gesichts immer 1:1 und das Verhältnis Länge:Tiefe der Nase 4:2 betragen, um das Kriterium der Harmonie zu erfüllen.

Auch der römische Schriftsteller Vitruv, von dem die, von Leonardo da Vinci zeichnerisch umgesetzte, Einschreibung des Körpers in Kreis und Quadrat stammt (siehe Abb.6), machte konkrete Angaben über die menschliche Proportion. Kopf ($\frac{1}{8}$) und Gesicht ($\frac{1}{10}$) werden darin als aliquote Bruchteile der Körperlänge beschrieben.

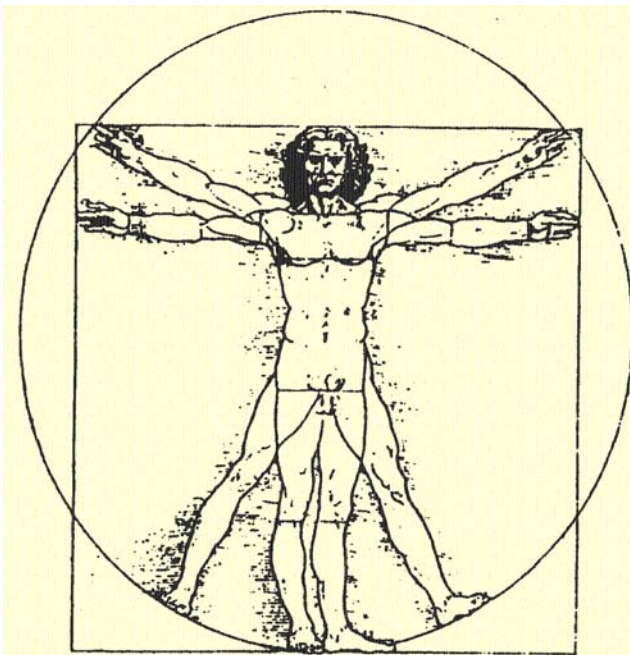


Abb.6:
Mensch in Kreis und Quadrat

Diese Proportionslehre der Antike sollte noch viele bedeutende Künstler der Renaissance und Wissenschaftler der Neuzeit stark beeinflussen. Selbst die heute in der Medizin übliche kephalometrische Auswertung im seitlichen Fernröntgenbild (Hasund,1973), die den Begriff der individuellen Norm geprägt hat, lässt sich auf die Ideen dieser antiken Epoche zurückführen.

2.1.3. Das Mittelalter

Diese Epoche wurde durch Gotik, Byzantinik und südlich der Alpen vor allem durch die Renaissance geprägt.

Die Künstler der Gotik versuchten Köpfe und Gestalten von geometrischen Grundformen, wie Kreis, Dreieck oder Rechteck, abzuleiten, so daß diese zweidimensionale flächenhafte Darstellung die Symbolhaftigkeit der dargestellten Figuren betonte.

Ebenso wie in der Gotik besann man sich in der Byzantinik, die stark durch arabische und indische Einflüsse geprägt war, wieder auf den "Modulus" als grundlegende Einheit und wich damit stark von den Relationsprinzipien der Antike ab. Dieser "Modulus" bestand meist aus einer Gesichtslänge und wurde oft noch in drei Untereinheiten (= eine Nasenlänge) unterteilt. So sollte der Körper bei der künstlerischen Darstellung immer 9,5 Einheiten, der Kopf 1,3 Einheiten und der Rumpf 3 Einheiten lang sein (Malerbuch vom Berge Athos).

Im Gegensatz zu Gotik und Byzantinik entdeckte die Renaissance das antike Denken und die antike Kunst wieder. Berühmte Vertreter dieser Epoche wie Ghiberti, Filarete, Alberti, da Vinci und Dürer ersetzten dabei die Tradition durch genaue Naturbeobachtung. Die Proportionslehre wurde nun zum Ausdruck einer kosmischen Harmonie zwischen Makro- und Mikrokosmos, die auch als anschauliche Verwirklichung der musikalischen Harmonie gelten sollte (zitiert nach Bahr, 1991).

Leonardo da Vinci

Bei Leonardo da Vinci veränderte sich der Intentionsbereich der Proportionslehre vom ausschließlich künstlerischen zum naturbeschreibenden und sogar naturwissenschaftlichen Ansatz.

Seine Proportionslehre lehnte sich dabei v.a. an das Werk Vitruvs an (siehe auch Abb.6: Homo ad circulum et quadratum) und suchte mit dem Verfahren der aliquoten Bruchteilbildung (siehe Abb.7; S.9) nach der grundlegenden Regel, die die Proportionen des Körperbaus beschreiben kann.

Nach Leonardos Vorstellung erreicht der Mensch mit 3 Jahren die Hälfte seiner Endgröße, die sich in 8 Kopf- und 9 Gesichtslängen unterteilt. Dabei markiert die Position der Augen die halbe Kopfhöhe, während der Abstand der Pupillen genau $\frac{1}{3}$ der Gesichtsbreite betragen soll.



Abb.7: Selbstbildnis Leonardos mit Unterteilung der sagittalen Ansicht in Quadrate

Zur Position und Breite der Mundspalte stellt er fest, daß sie die untere Gesichtshälfte nochmals halbiert, und ihre Länge der Distanz zwischen Mund und Kinnspitze entspricht. Die Länge der Nase, die durch ein Doppelquadrat eingeschlossen werden kann, entspricht dabei immer der Ohrenlänge (zitiert nach Bahr, 1991).

Dürer

Nach ersten Ansätzen, die noch nordisch-gotisch geprägt waren (Villard D`Honnecourt) gerät er durch den Nürnberger Humanistenkreis zunehmend unter den Einfluß Leonardos. Im Gegensatz zu da Vinci sucht er nicht die alles bestimmende Norm, sondern entwickelt eine Typenlehre, die grobe Dysharmonien vermeiden soll.

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

Dürer, 1526 n. Chr. (zitiert nach Bahr, 1991)

Seine 4 Bücher über die menschlichen Proportionen (1528), die eine differenzierte Typenlehre darstellen, stellen nach Panofsky (1974) den Höhepunkt der Proportionslehre dar.

Dürer teilt die Kopflänge in 4 gleiche Teile, die durch Haaransatz, Oberlid und Nasensteg getrennt werden. Hier findet sich die moderne Einteilung des Gesichts in Gesichtsdrittel, wie sie auch in der modernen Kephalmetrie beschrieben wird.

Seine Typen (siehe Abb.8) erhält Dürer durch systematische Veränderung aller Parameter, die die Gesichtsstrukturen beschrei-

ben, so daß seine Typendarstellung manchmal sogar im Bereich der grotesken fratzenhaften Karrikatur landet (Panofsky, 1974).

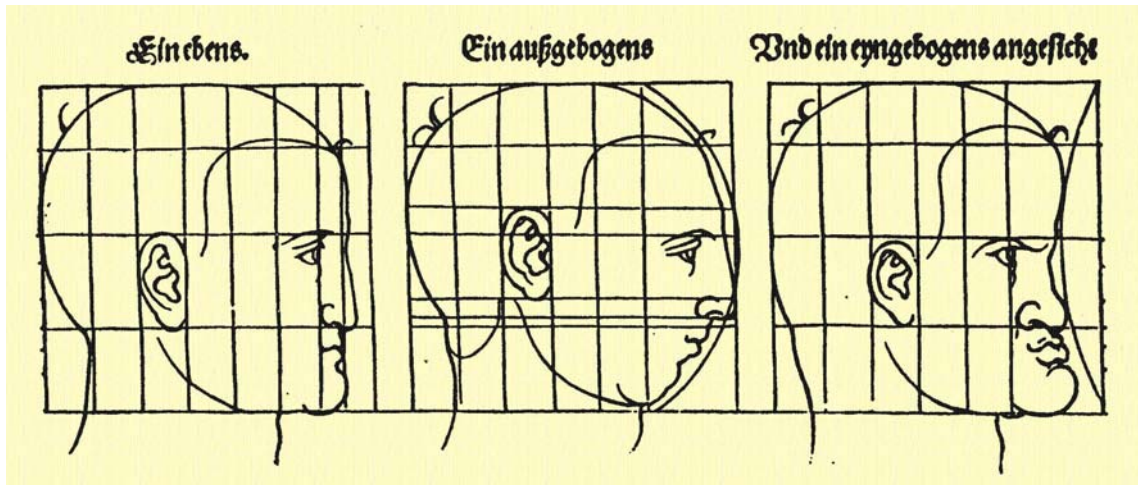


Abb.8: Die drei Grundtypen Dürers, von denen sich alle weiteren konstruktiv ableiten lassen.

2.1.4. Die Moderne

Hier geht die Proportionslehre der bildenden Kunst endgültig in der naturwissenschaftlichen Analyse auf. Vor allem die Medizin widmet sich der objektiven naturwissenschaftlichen Morphometrie, die durch Einführung des Röntgens und der damit möglichen Erfassung zusätzlicher skelettaler Parameter eine neue Dimension erhält. Harmonie und individuelle Norm (Hasund, 1973) sind Begriffe, die moderne Analyseverfahren prägen. Eine Übersicht über die etablierten morphometrischen Verfahren, bei denen sich eine Entwicklung vom zweidimensionalen zum dreidimensionalen Denken abzeichnet, gibt das folgende Kapitel.

2.2. Faziale Morphometrie 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 (Humphreys, 1984). Das Prinzip dieser Verfahren beruht dabei auf planaren und angulären Messungen zwischen definierten Meß-

punkten, die entweder zwei- oder aber auch dreidimensional erfaßt werden.

Die folgenden Unterkapitel geben eine Literaturübersicht über den momentanen Stand der Technik bei Vermessungsverfahren des menschlichen Gesichts.

2.2.1. Fotos

Fotos in Profil- und Frontal- Ebene, die im Größenverhältnis 1:1 zum Patienten aufgenommen wurden, dienen auch heute noch zur Weichteilanalyse im Gesicht. Dabei werden verschiedenste Referenzpunkte im Profilbild bestimmt und zweidimensional vermessen (Dausch-Neumann, 1964). Neben Winkeln und Strecken wird auch das Kieferprofilfeld (Schwarz, 1958) bestimmt (siehe Abb.9). Auch wenn das Profilfoto lediglich eine generelle Orientierung für Diagnose und Therapie zuläßt, vermittelt es einen unverzichtbaren Eindruck von ästhetisch akzeptablen und nicht akzeptablen Gesichtsproportionen (Steinhäuser und Janson, 1988).

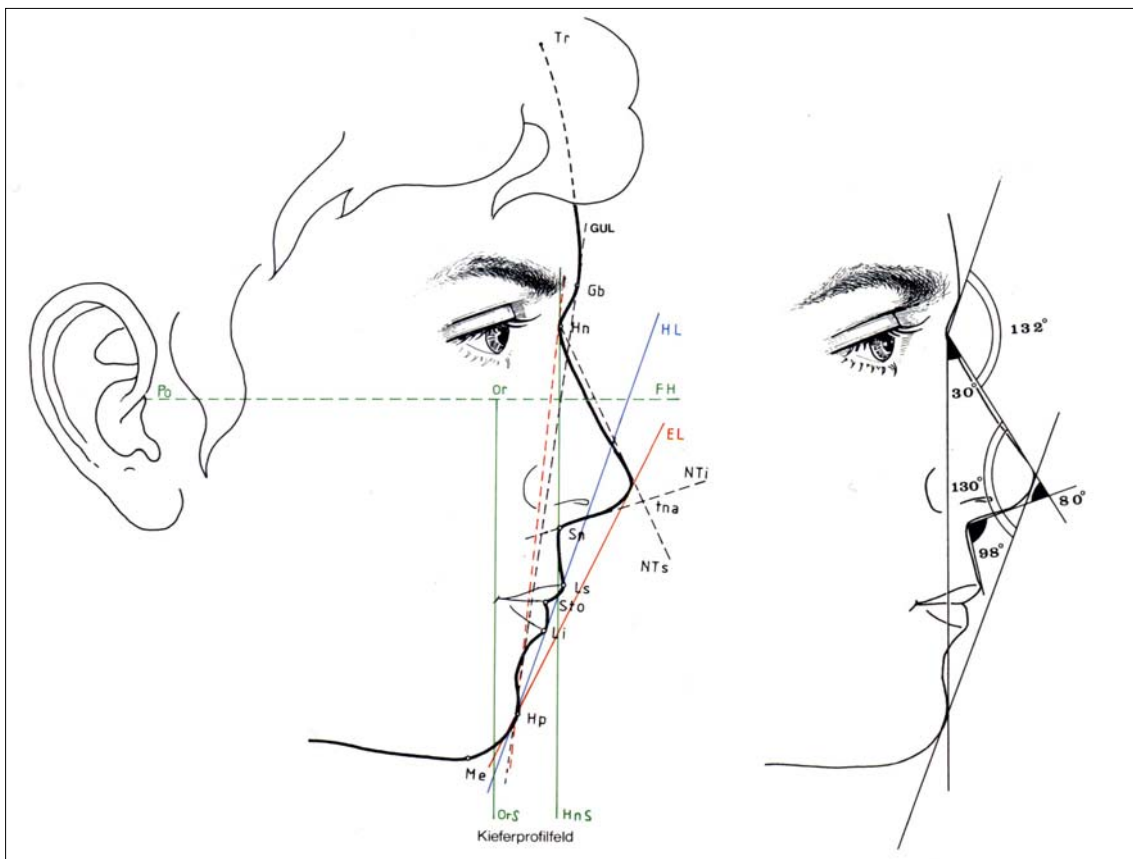


Abb.9: Profilfoto-Auswertung mit Darstellung des Kieferprofilfeldes.

Eine Fotomontage durch Verschiebung des abgetrennten Unter- gesichts vermittelt dem Patienten lediglich eine sehr ungenaue, nur orientierende Prognose des postoperativen ästhetischen Resultats (Kriens, 1974).

2.2.2. Stereophotogrammetrie

Die Stereophotogrammetrie ist eine dreidimensionale Weiterentwicklung der zweidimensionalen Photoanalyse. Das Patienten- gesicht, auf dem die Referenzpunkte mit Farbstift markiert worden sind (Kobayashi et al., 1990), wird dabei gleichzeitig von zwei Photokameras, die in unterschiedlichen Winkeln zum Meßobjekt aufgebaut sind, aufgenommen. Nun werden die Referenzpunkte, die vor allem auf der Mitt-Sagittalen und auf der Frankfurter Horizontalen liegen sollen (Rasse et al., 1991), auf den beiden Photos identifiziert und ihre dreidimensionalen Koordinaten über das Verfahren der optischen Triangulation im Computer berechnet. Das entstandene Gitternetz (siehe Abb.10) kann nun für dreidimensionale Diagnose- und Analysezwecke eingesetzt werden, wobei neben angulären und planaren Messungen sogar Volumenänderungen berechnet werden können (Kobayashi et al., 1990).

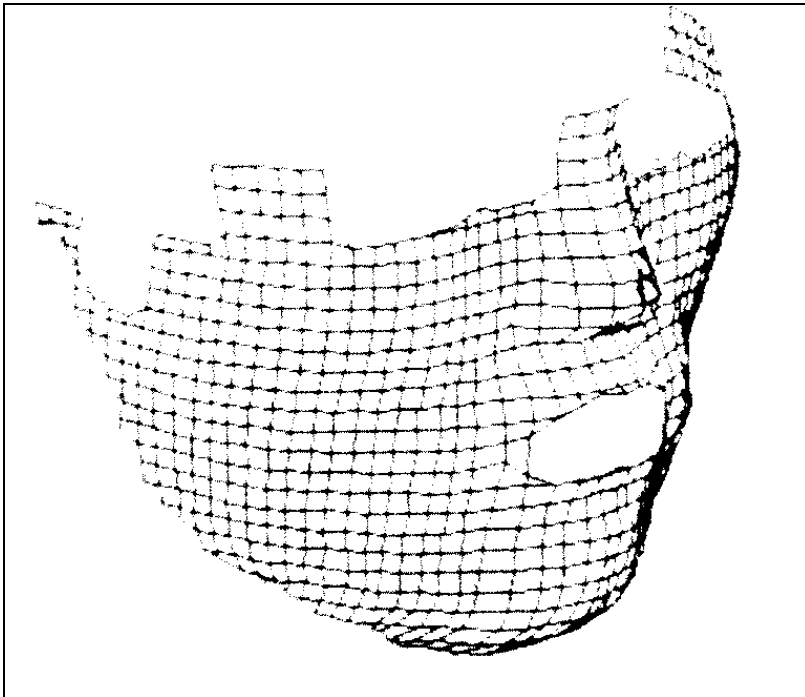


Abb.10:

Dreidimensionale Tiefendatenerfassung durch Stereophotogrammetrie

Das Verfahren der Stereophotogrammetrie, das auf Thälman Degen (1957) zurückgeht, und von Burke und Beard (1971) weiter verbessert wurde, ist heute ein etabliertes Verfahren zur dreidimensionalen Vermessung von Referenzpunkten (siehe Abb.11), das von vielen Autoren verwendet wird, da es billig ist, eine kurze Meßzeit hat und ohne Strahlung auskommt (Rasse et al., 1991). Über die Meßgenauigkeit der Stereophotogrammetrie gibt es in der Literatur jedoch leider keine genauen Angaben.

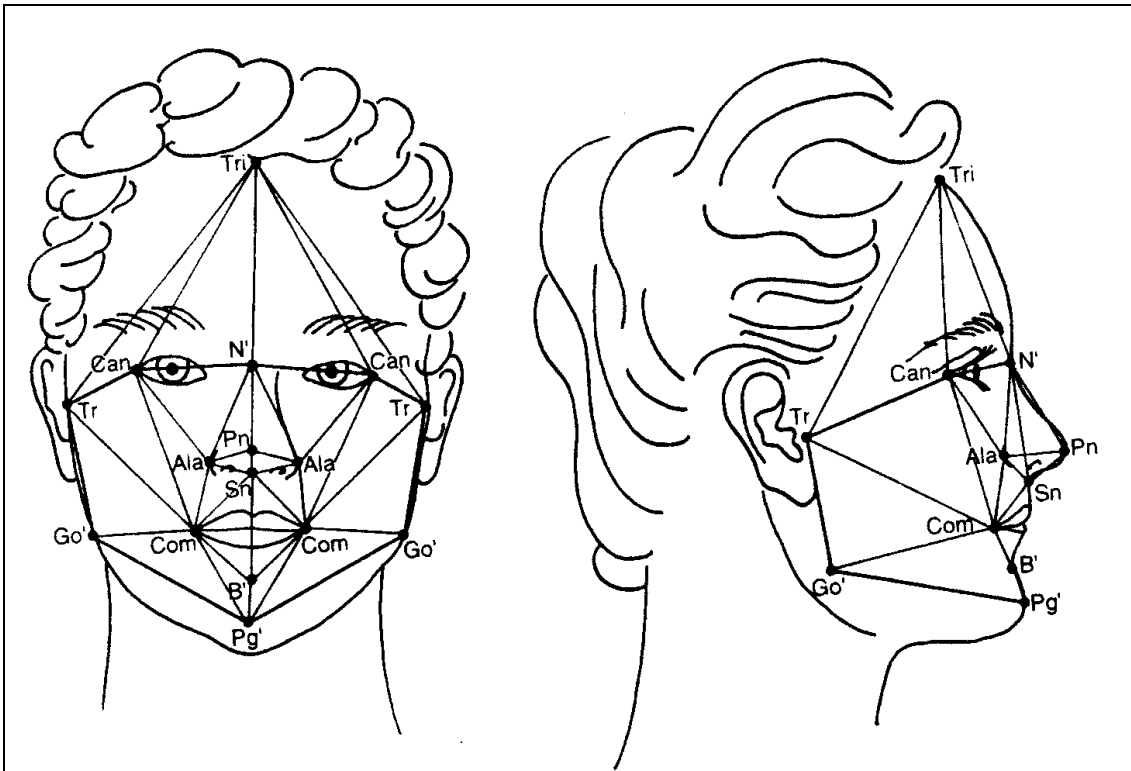


Abb.11: Erfassung und Analyse dreidimensionaler Meßpunkte

2.2.3. Röntgenbild

Am Röntgenbild sind planare, morphometrische Messungen an der Lateralansicht (FRS) und an der Frontalansicht (FRF) des Schädels üblich. Dabei sind neben skelettalen Strecken- und Winkelmessungen auch Weichteilmessungen möglich, vorausgesetzt, daß die Weichteilkontur auf dem Röntgenbild erkennbar ist. Dies wird durch die Vorschaltung eines Kupferfilters und die Verwendung einer Bariumsulfatpaste sichergestellt (Holdaway, 1983). Um bei der Projektion des dreidimensionalen Schädels auf den zweidimensionalen Röntgenfilm die entstehenden Verzeichnungen möglichst gering zu halten, wird ein großer Fokus-Filmabstand (4 m) gewählt (Steinhäuser und Janson, 1988). Nach manueller Festlegung der

Meßpunkte im Röntgenbild (siehe Abb.12) werden verschiedenste Strecken, Winkel und Relationen berechnet, was auch computer-gestützt erfolgen kann.

Einzelne der verschiedenen Parameter, die im FRS berechnet werden können, korrelieren in gewissem Umfang miteinander, so daß bei der Analyse eines FRS die individuelle Norm festgelegt und die übrigen Parameter auf Harmonie überprüft werden können. Messungen im FRS sind, auch wenn diese nur zweidimensional möglich sind, heute der Standard bei der Analyse und Prognose von fazialen Hart- und Weichgeweben (Steinhäuser und Palluk,1995).

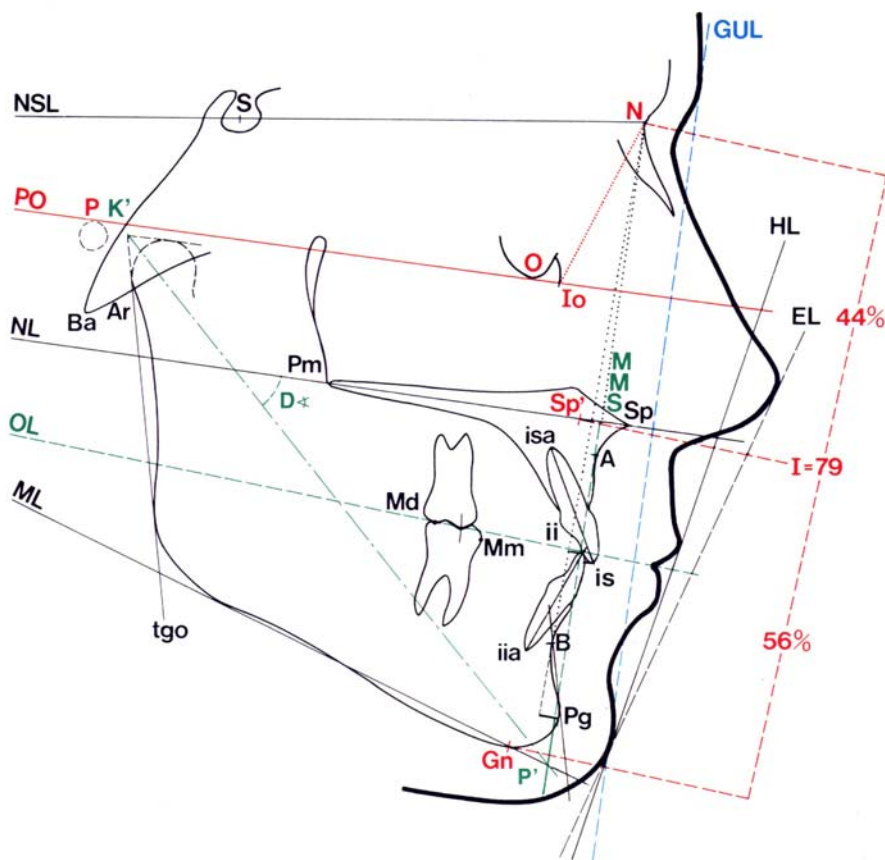


Abb.12: Kephalemtrische Auswertung eines FRS

2.2.4. Interpolierungen aus FRS und FRF

Bei diesem Verfahren, das auf Vorschläge von Savara (1965) zurückgeht, müssen FRS und FRF gleichzeitig aufgenommen werden. Die Umwandlung der zweidimensionalen in dreidimensionale Koordinaten (siehe Abb.13) erfolgt dabei durch Interpolation ähnlich dem Verfahren der Stereophotogrammetrie (siehe Kapitel 2.2.2.).

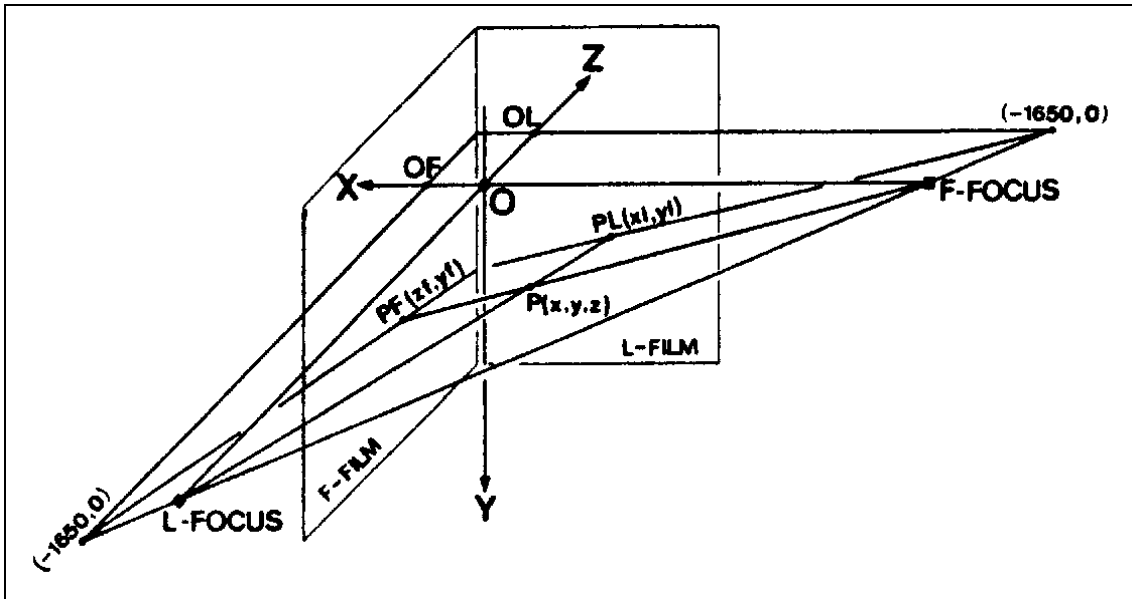


Abb.13: Dreidimensionale Koordinatenberechnung aus FRS und FRF nach Kobayashi et al. (1990).

Da die einzelnen Meßpunkte auf beiden Röntgenaufnahmen eindeutig identifiziert werden müssen, dies aber nur für einige wenige Punkte, vor allem an der peripheren Mandibulakontur möglich ist, ist dieses Verfahren nur sehr eingeschränkt zur dreidimensionalen Vermessung und Analyse geeignet (Kobayashi et al., 1990).

2.2.5. Dentofacial Planner

Der Dentofacial Planner, der mit Daten aus der FRS-Auswertung arbeitet, ist wahrscheinlich das bislang beste Prognoseverfahren für das Verhalten der Weichteile nach skelettverlagernden Eingriffen (Seeholzer und Walker, 1992). Die Software wurde von der Firma Dentofacial Software Inc., Toronto, Canada entwickelt und ermöglicht eine überraschend gute Weichteilvorhersage im Profilbereich (Eales et al., 1994). Während die Vorhersagekraft im Bereich des Kinns von Eales et al. (1994) als gut bezeichnet wird, läßt sie im Bereich der Nase und der Lippen eher zu wünschen übrig (siehe Abb.14, S.16). Andere Autoren (Konstantos et al., 1994), die an mehreren Patienten die Diskrepanzen zwischen Prognose und tatsächlicher Weichteilentwicklung gemessen haben, bestätigen diese Aussagen im wesentlichen. Vor allem der postoperative "remodelling-Effekt" an den skelettalen Strukturen ist ein Störfaktor, der die Vorhersagekraft des Dentofacial Planner stark einschränkt (Eales et al., 1994).

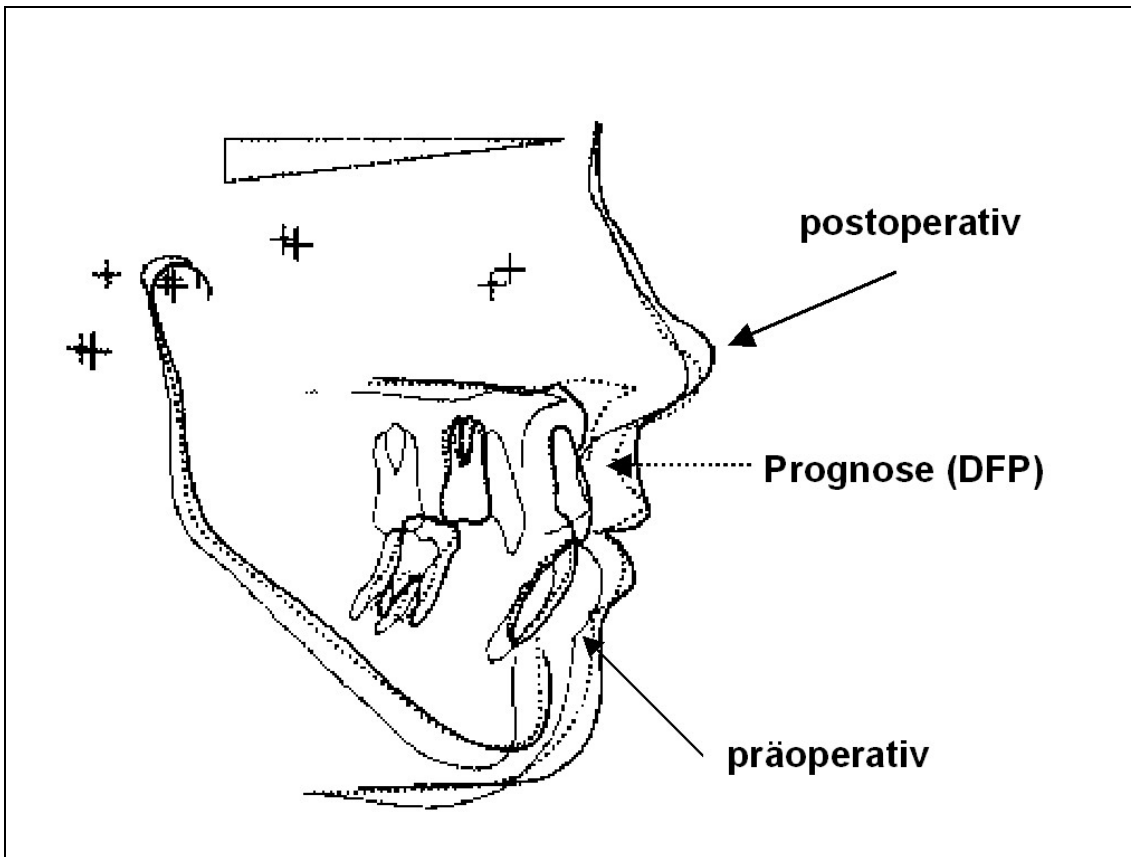


Abb.14: Beispiel für Unterschiede zwischen Prognose (DFP) und tatsächlichem Weichteilverhalten nach Dysgnathie-OP.

Das grundlegende Prinzip, auf dem die Dentofacial Planner Software basiert, beruht auf der imaginären Berechnung der skelettalen Verschiebungseffekte nach den gewünschten Werten und konsekutiver Prognose des Weichteilverhaltens, basierend auf Quotienten, die durch viele retrospektive Studien gewonnen wurden (Birr und Bewersdorff, 1993; Dann et al., 1976; Lines und Steinhäuser, 1974; Mansour et al., 1983; Konstantos et al., 1994; Radney und Jacopsy, 1981; Schendel et al., 1976; Steinhäuser, 1974; Steinhäuser und Paulus, 1979; Steinhäuser und Palluk, 1995). So soll nach Konstantos et al. (1994) die Oberlippe bei skelettaler Verschiebung des Oberkiefers nach kranial automatisch um 10% kürzer werden, während sie bei Verschiebung des Oberkiefers nach anterior zu 50 % der skelettalen Bewegung folgt. Insgesamt ist der Dentofacial Planner ein nützliches Hilfsmittel bei der orientierenden Weichteilvorhersage im streng zweidimensionalen Profil, auf die Exaktheit seiner Prognose kann man sich jedoch nicht verlassen.

2.2.6. Digigraph

Entwickelt wurde dieses Verfahren zur fazialen Weichteilmorphometrie von Birr und Bewersdorff (1993). Mit einem Digitalisierhandstück, dessen exakte Position in einem dreidimensionalen Raum über Ultraschall erfaßt werden kann (Steinhäuser und Palluk, 1995), werden bestimmte Referenzpunkte auf der Gesichtsoberfläche abgegriffen und digital in einem dreidimensionalen Koordinatensystem dargestellt. Da die Erfassung der Weichteilpunkte bis zu 5 Minuten dauern kann, muß dabei der Kopf zur Vermeidung von Bewegungsartefakten in einer speziellen Vorrichtung (Cephalostat) fixiert werden.

Ein ähnliches Verfahren ist die Infrarotmethode nach Ferrario und Sforza (1996), bei der die fazialen Meßpunkte nicht durch Ultraschall, sondern mit Hilfe eines Infrarotverfahrens digitalisiert werden.

Beide Verfahren unterliegen keinen Vergrößerungs- und Verzerrungseffekten, benötigen keine Röntgenstrahlen und ermöglichen eine dreidimensionale Analyse der erfaßten Weichteilpunkte. Über Meßgenauigkeit und klinische Anwendbarkeit sind bisher keine Aussagen in der Literatur zu finden.

2.2.7. Moiré-Fotografie

Dieses Verfahren beruht auf der Projektion von konzentrischen Lichtstrukturen auf die Gesichtsoberfläche (Kawai et al., 1990). Die dabei entstandenen Muster werden mit einer Kamera fotografiert und in einen Computer eingescannt (Jend-Rossmann et al., 1985). Dieser ermittelt aus den verzerrten Lichtkreisen die dreidimensionalen Koordinaten der Gesichtsoberfläche (bis zu 10000 Meßpunkte) und macht sie einer Analyse zugänglich. Bisher wurde das Verfahren, das vornehmlich in der japanischen Literatur beschrieben wird, vor allem zur Analyse von Deformitäten und Asymmetrien im Gesichtsbereich (Kawai et al., 1990) verwendet. Wegen der Anwendung von strukturiertem Licht zur Tiefendatengewinnung ist die Moiré-Fotografie ein Vorgänger unseres Tricolite-Verfahrens. Angaben zur Meßgenauigkeit der Moiré-Methode sind in der zugänglichen Literatur leider nicht zu finden.

2.2.8. Laser (Cyberware)

Die dreidimensionale Datenakquisition der Gesichtsoberfläche erfolgt bei dieser Methode durch Laserabtastung des Gesichts. Laut Girod et al. (1995) dauert der Meßvorgang dabei ca. 10 Sekunden. Eine Kombination mit skelettalen Daten, die aus CT-Aufnahmen gewonnen werden, ermöglicht die dreidimensionale Simulation von skelettverlagernden Operationen. Eine Prognose der postoperativen Weichteilentwicklung ist bisher noch nicht möglich. Der Laser-Scanner der Firma Cyberware, Monterey/California, USA ermöglicht neben der Tiefendatenerfassung auch eine Registrierung der zugehörigen Farbe (Girod et al., 1993). Angaben über Validität und Reliabilität des Verfahrens liegen leider bisher noch nicht vor.

2.2.9. Wissenschaftliche Fragestellung

Das lichtcodierte Triangulationsverfahren, das bereits seit mehreren Jahren in der Automobilindustrie zur Oberflächenerfassung eingesetzt wird, soll im Rahmen dieser Arbeit erstmals für den medizinischen Einsatz zur dreidimensionalen Erfassung von Gesichtsoberflächen getestet werden. Zentrale Fragen, die in dieser Arbeit beantwortet werden sollen, sind:

1. Wie hoch sind Validität und Reliabilität des neuen Verfahrens ?
2. Ist dieses Verfahren eine Alternative zu den etablierten Verfahren der Gesichtsdigitalisierung, insbesondere zur Stereophotogrammetrie und dem Laser-Verfahren ?
3. Ist dieses Verfahren für den klinischen Einsatz am Patienten geeignet ?
4. Ist dieses Verfahren zur Überprüfung der Genauigkeit von Gesichtsmasken aus Gips geeignet, die im klinischen Alltag zur Dokumentation und als indirekte Meßgrundlage eingesetzt werden ?
5. Wo und in welcher Größe treten Fehler bei den Gesichtsmasken aus Gips auf ?

3. Methodik

3.1. Probanden

15 Probanden, von denen 7 weiblich und 8 männlich waren (siehe Abb.15), stellten sich für die Gesichtsabformung mit Alginat und die anschließenden morphometrischen Messungen zur Verfügung.

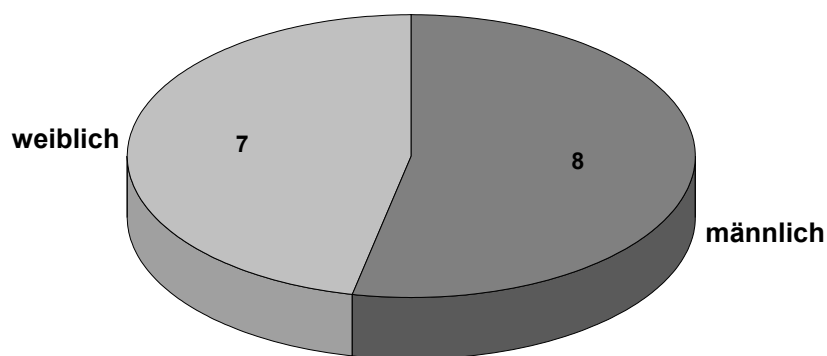


Abb.15: Geschlechtsverteilung der teilnehmenden Probanden

Das durchschnittliche Alter der Probanden betrug 24,7 Jahre (siehe Abb.16).

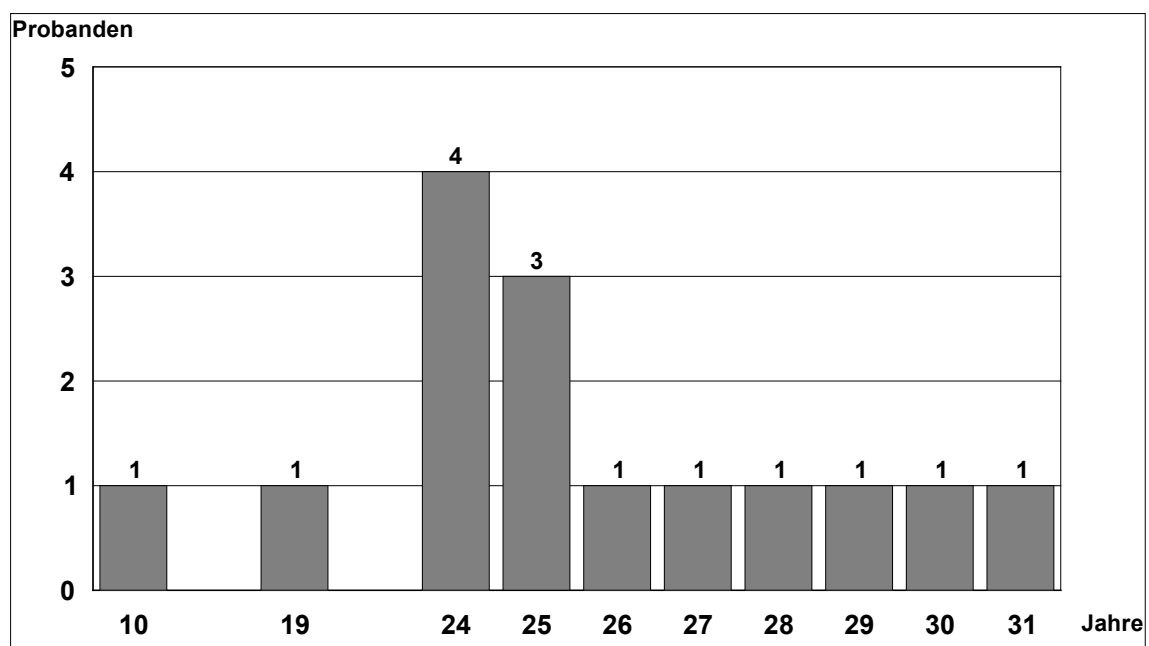


Abb.16: Altersverteilung der teilnehmenden Probanden

Mit Hilfe einer Alginatabformung wurden Gipsmasken von den Gesichtern der Probanden angefertigt, deren Genauigkeit anschließend durch Vergleich mit den tatsächlichen Gesichtsstrukturen ermittelt werden sollte. Dazu wurden sowohl die Gesichter der Probanden als auch die korrespondierenden Gipsmasken mit dem Tricolite-Verfahren digitalisiert und die jeweiligen Punktwolken im Computer auf Discrepanzen hin überprüft. Der Zeitraum zwischen Erstellung der Gipsmaske und Digitalisierung des zugehörigen Gesichts betrug durchschnittlich 3,2 Tage.

3.2. Herstellung der Gipsmasken

Von jedem der Probanden wurde eine Gesichtsmaske aus Gips angefertigt, die als indirekte Meßgrundlage dienen sollte (Abb.17).

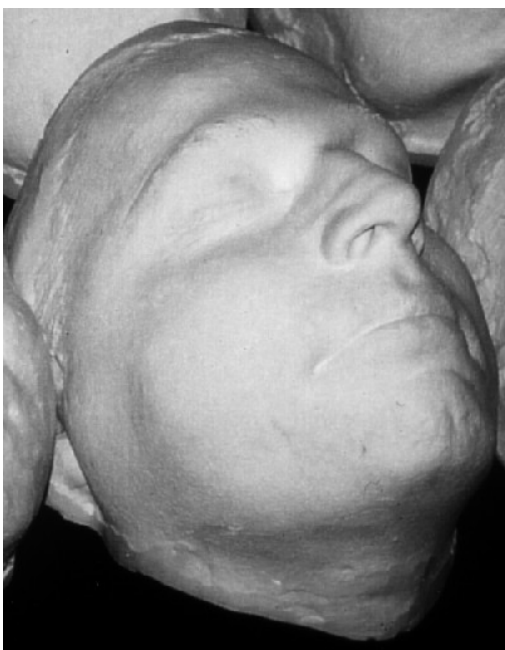


Abb.17: Gipsmaske, die vom Gesicht eines Probanden durch Alginatabformung erstellt wurde.

Der Proband lag während der Abformung flach auf einem Zahnarztstuhl. Vor der eigentlichen Abformung wurden die Augenbrauen und der Haaransatz des Probanden mit Vaseline eingefettet und die Haare mit einem Strumpfband geschützt. Die Atmung der Probanden wurde während der Abformung durch Plastikröhrchen, die bei 12 Probanden in die Nase und bei 3 Probanden in den Mund gesteckt wurden, sichergestellt.

Für die Abformung wurde Alginat der Firma Bayer verwendet, das in großen Anrührbechern mit der vorgeschriebenen Menge Wasser verrührt und großzügig auf das Gesicht des Probanden von kranial nach kaudal aufgebracht wurde. Dabei wurde darauf geachtet, daß vor allem Nasen- und Mundregion sowie der orbitale Bereich ohne Blaseneinschluß abgedeckt wurden. In das noch weiche Alginat wurden umgebogene Büroklammern als Retentionshilfe eingebracht, ohne sie auf das Gesicht durchzudrücken.

Nach Abbinden der Alginatschicht wurde nun Alabastergips aufgebracht, wobei beachtet werden mußte, nicht versehentlich die Plastikröhrchen mit Gips zu verschließen. Mit dem Abnehmen der Abformschale wurde nun solange gewartet, bis der Gips erhärtet und stabil genug war.

Vor dem Ausgießen mußte erst noch der Rand der Schale nachbearbeitet werden. Lose Alginatstellen wurden mit Hilfe von Sekundenkleber wieder mit dem Gips verbunden, so daß die Schale mit Hartgips in mehreren Portionen ausgegossen werden konnte.

Um das Gewicht der entstehenden Gipsmaske zu reduzieren, wurden Plastikflaschen in den noch weichen Gips eingedrückt, die nach dem Aushärten des Hartgipses wieder entfernt werden konnten.

Nach Trocknen des Gipses wurden die Abformschalen mit einem Hammer abgeschlagen und die ausgebetteten Masken mit Fräsen vorsichtig und lediglich am Rand nachbearbeitet.

3.3. Digitales Meßverfahren (TRICOLITE)

Die Oberflächendigitalisierung der Probandengesichter und der korrespondierenden Gipsmasken wurde mit einem lichtcodierten Triangulationsverfahren (TRICOLITE), das mit strukturiertem Licht arbeitet, durchgeführt.

3.3.1. Datenakquisition

Das Meßverfahren arbeitet mit einer Projektion von Weißlichtstreifen auf das Meßobjekt, die von zwei Kameras aus verschiedenen Blickwinkeln aufgenommen werden (siehe Abb.18 und 19, S.22).

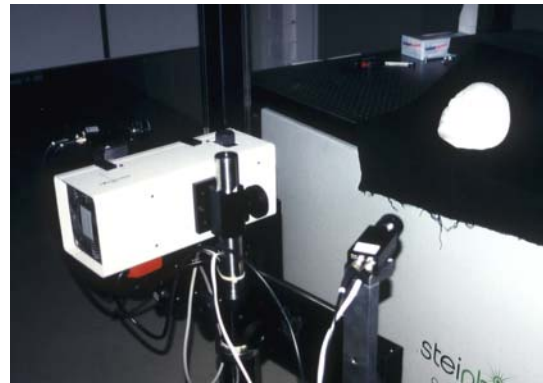
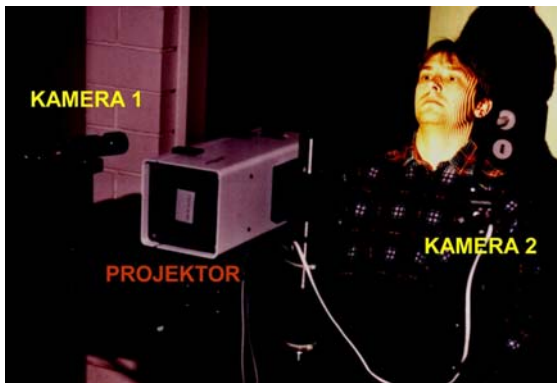


Abb.18 und 19: Meßaufbau bei der Probandenvermessung (linkes Bild) und der Vermessung einer Gipsmaske (rechtes Bild).

Zur Steigerung der Meßgenauigkeit des Verfahrens kommen dabei ein "Codierter Lichtansatz" (siehe Kapitel 3.3.1.3.) und der "Phasen-shift" (siehe Kapitel 3.3.1.4.) zur Anwendung.

3.3.1.1. Meßaufbau und Kalibrierung

Der Proband saß während der Messung auf einem Stuhl und mußte seinen Kopf, der von einer konventionellen Kopfstütze gehalten wurde, leicht überstrecken (siehe Abb.18). Im Abstand von 1,80m befand sich die Meßeinheit, die aus einem LCD-Projektor und zwei CCD-Kameras bestand. Der Weißlichtprojektor lag dabei in der zentralen Achse, während die beiden Kameras lateral in einem Winkel von 30° Grad zur zentralen Achse geneigt standen (Abb.20).

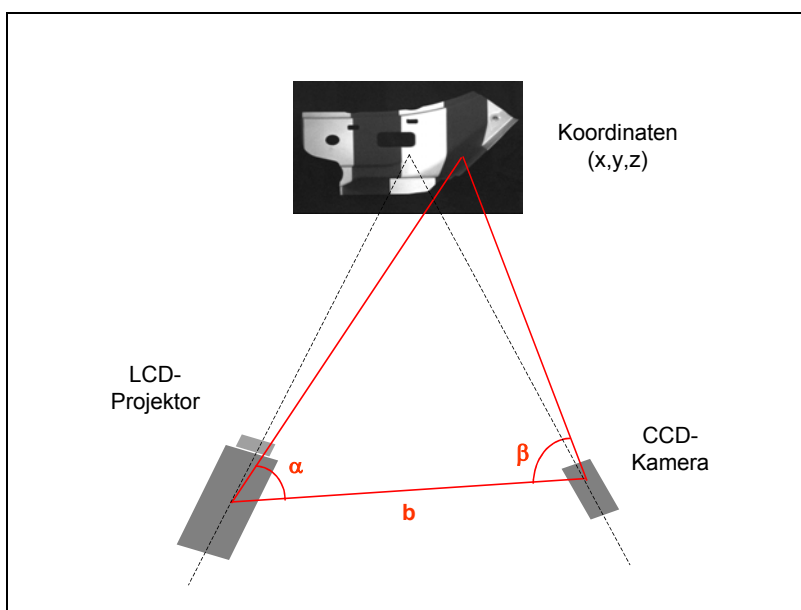


Abb.20: Darstellung des Triangulationsprinzips bei einer Kamera.

Von diesem Meßaufbau, der auf einem fahrbaren Gestell montiert war, führten Kabelverbindungen zur zentralen Computereinheit, die den gesamten Meßvorgang koordinierte.

Zur Projektion der Strukturmuster wurden Weißlichtprojektoren mit rechnergesteuerten LCD-Masken eingesetzt (Strutz und Riechmann, 1996), die sich sowohl in Zeilen- als auch in Spaltenrichtung von der Computersoftware ansteuern ließen. Die beiden CCD-Kameras mußten vor Beginn der Messungen kalibriert werden (Strutz und Riechmann, 1996). Der angeschlossene PC, der zur Meßkoordinierung genutzt wurde, hatte folgende Konfiguration:

Pentium 266 MMX, 128 MB RAM, 9,0 GB HDD (SCSI ultra wide)

Als Bearbeitungssoftware diente das von der Firma Steinbichler entwickelte Programm "Comet" (siehe Abb.21).

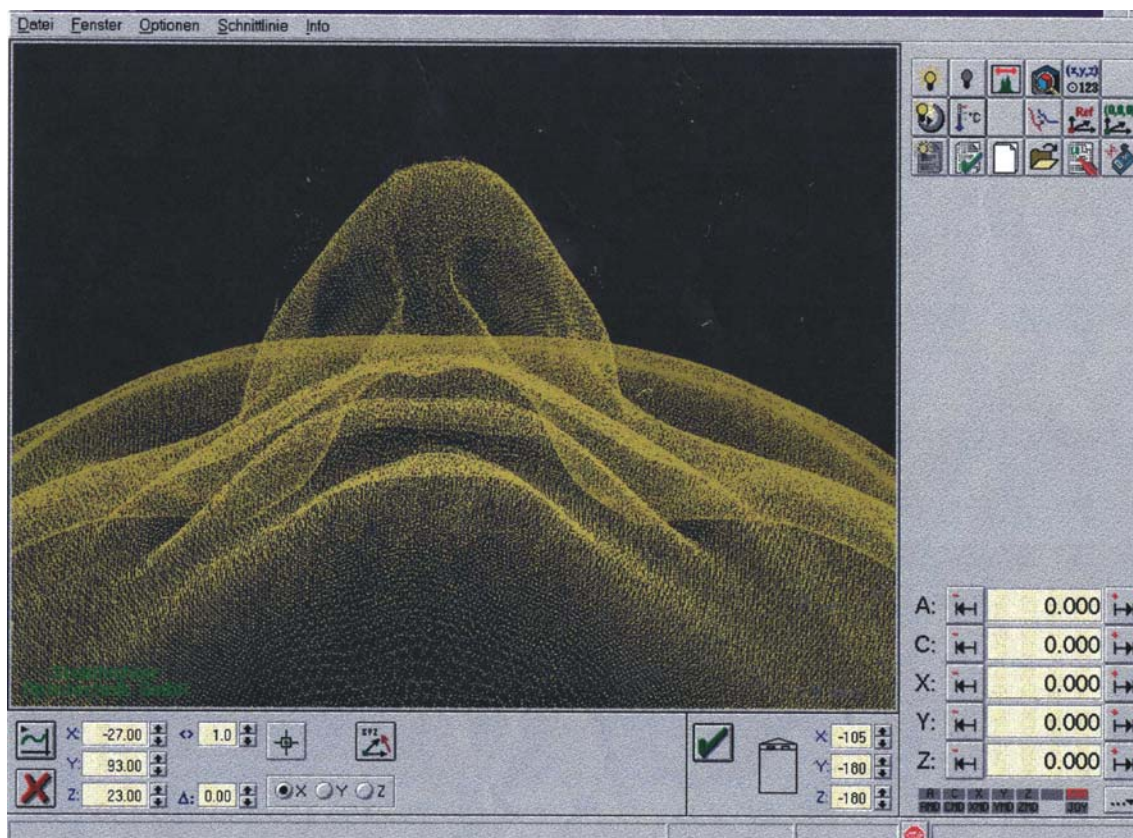


Abb.21: Tiefendatensatz, dargestellt als Punktwolke im Softwarepaket "Comet".

3.3.1.2. Triangulation

Der menschliche Gesichtssinn ist Vorbild für das optische Triangulationsverfahren. Der Mensch betrachtet mit seinen beiden Augen

ein Objekt unter zwei unterschiedlichen Blickwinkeln, so daß er in der Lage ist, den Abstand zu diesem Objekt gut abzuschätzen. Auf diese Weise kann die komplexe Bildverarbeitung im ZNS eine räumliche Vorstellung der Umgebung erstellen. Ähnlich arbeitet das Triangulationsverfahren, bei dem ein definierter Lichtfleck durch einen Projektor (z.B. Laser) auf das Meßobjekt geworfen und auf einem Sensor (PSD = position sensitive diode) abgebildet wird.

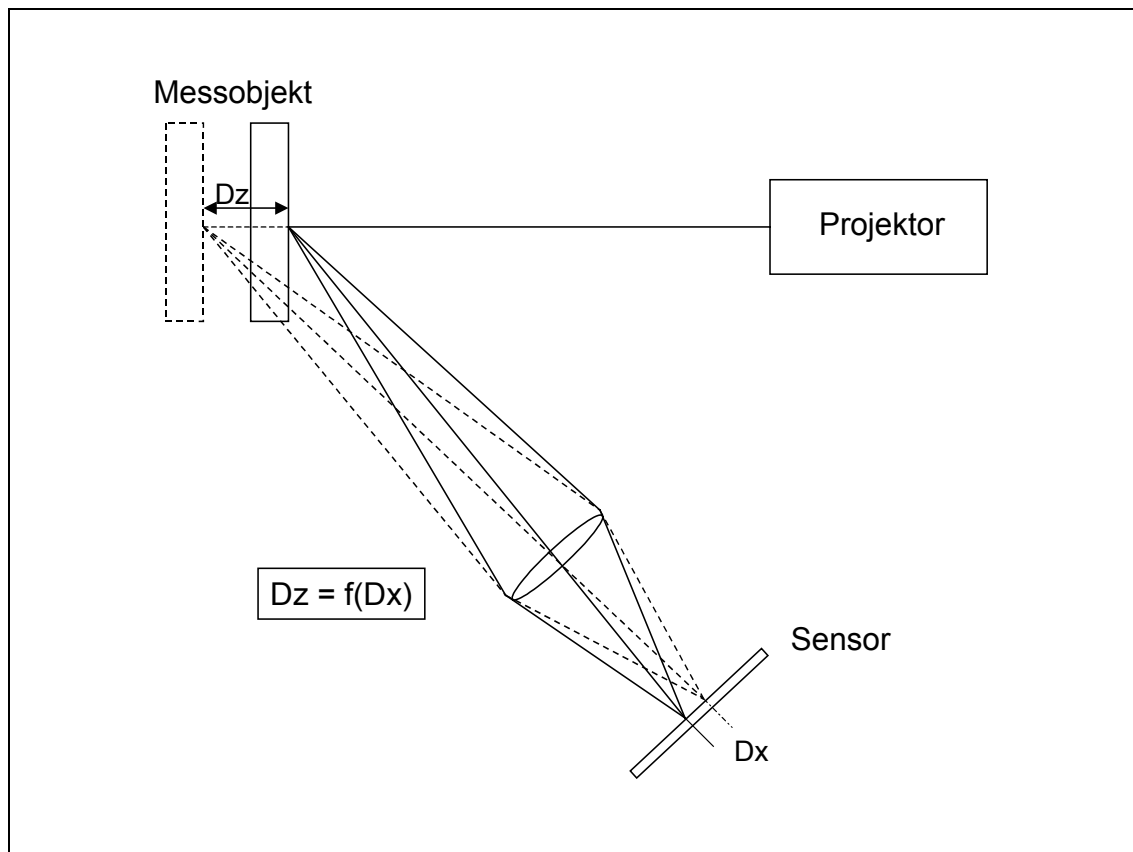


Abb.22: Funktionsprinzip eines Triangulationssensors.

Der von dieser Diode gelieferte Meßwert Dx kann wegen des bekannten konstruktiven Sensoraufbaus direkt in den Abstand Dz des Meßobjekts umgerechnet werden (siehe Abb.22). Beim Lichtschnittverfahren kann durch Aufweiten des Lichtpunktes zu einer Linie das entstandene Bild von einem flächenhaften CCD - Sensor registriert und das Profil des an dieser Stelle "geschnittenen" Meßobjekts errechnet werden. Bei der gleichzeitigen Projektion einer Vielzahl von parallelen Linien auf das Meßobjekt erreicht man durch Kombination der jeweils entstehenden Profilschnitte eine dreidimensionale Erfassung der Oberflächenstruktur des Meßobjekts (siehe Abb.23, S.25).

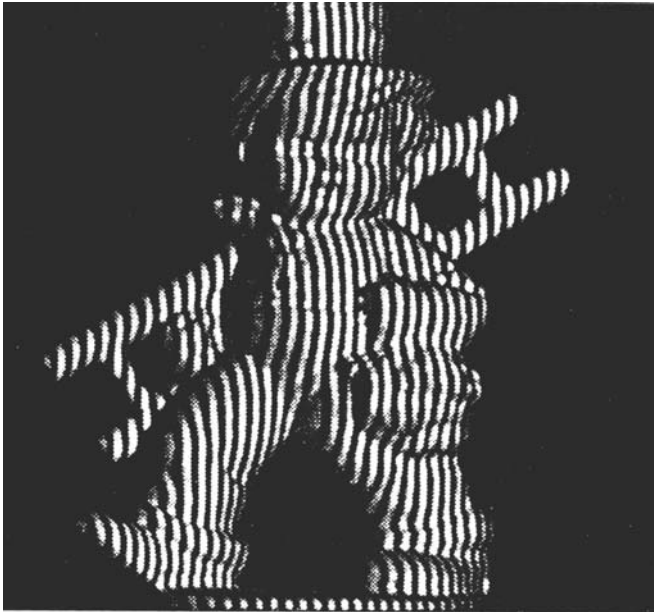


Abb.23: Räumliche Erfassung einer Freiformfläche durch Projektion paralleler Lichtlinien.

3.3.1.3. Gray - Code

Bei der Triangulation stellt die schnelle und eindeutige Identifizierung der einzelnen Lichtschnitte und damit der einzelnen Meßpunkte einen entscheidenden Faktor dar, der die Schnelligkeit und die Meßgenauigkeit des Verfahrens wesentlich bestimmt.

Die Gray-Codierung ist ein schnelles robustes Verfahren zur raumzeitlichen Codierung des zu vermessenden Arbeitsraumes. Durch sequentielle Projektion von n Gray-codierten Streifenmustern in den Objektraum wird die Unterscheidung von 2^n unterschiedlichen Projektionsrichtungen ermöglicht, die jeweils durch eine charakteristische hell-dunkel-Sequenz und damit durch ein entsprechendes n -stelliges Codewort gekennzeichnet sind.

Zur dreidimensionalen Vermessung des Objektraumes werden die mit Hilfe eines transparenten LCDs erzeugten und an den Objekten deformierten Muster von einer CCD-Kamera aufgezeichnet. Durch Binarisierung lassen sich diese Graubilder in beleuchtete und unbeleuchtete Bildbereiche trennen. Die während der Sequenz entstehenden Binärbilder werden nun im konventionellen Bildspeicher des Computers zum sogenannten Bit-Plane-Stack zusammengestellt (siehe Abb.24, S.26). Jedes Pixel dieses Bit-Plane-Stack enthält nun für den an dieser Stelle beobachteten Objektpunkt eine n -stellige Bitfolge, die die Beleuchtungsrichtung des Projektors zu diesem Objektpunkt eindeutig beschreibt. Das Korrespondenzproblem zwischen Projektor und den beiden Kameras ist damit implizit und eindeutig gelöst.

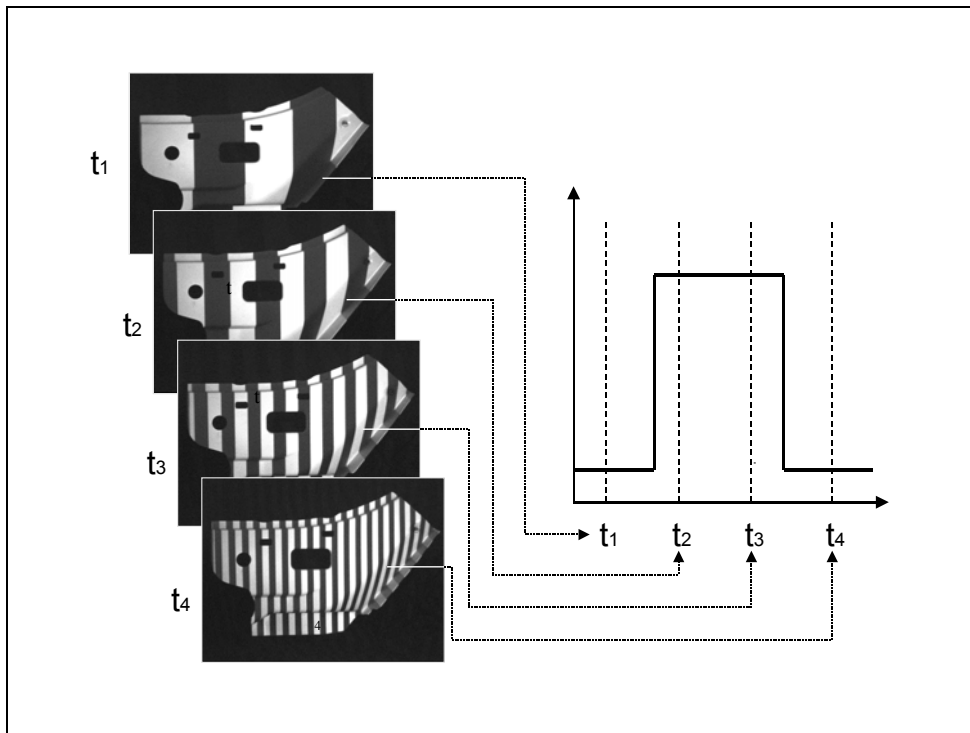


Abb.24: Raum-/ Zeit-Codierung einzelner Oberflächenpunkte.

3.3.1.4. Phasenshift

Da eine reine Tiefendatenerfassung durch Bestimmung der Streifenordnung oft zu ungenau ist, wird neben der digitalen Zählung der hellen und dunklen Strukturen auch die analoge Auswertung der Streifenperiode angestrebt.

Bei der Projektion von sehr feinen Lichtlinien tritt eine Intensitätsverteilung auf, die einen sinusförmigen Verlauf besitzt. Die Phase dieses sinusförmigen Verlaufs kann für jedes Pixel sehr zuverlässig berechnet werden, wenn die Phasenlage des Streifengitters um einen definierten Betrag durch den softwaregesteuerten Projektor verschoben wird. Mit diesem Verfahren ist die Auflösung eines Lichtstreifens bis 8 bit möglich, was die Meßgenauigkeit des Tricolite- Verfahrens deutlich erhöht.

3.3.1.5. Meßbedingungen

Um hohe Meßgenauigkeiten zu erzielen, muß das Meßobjekt hinsichtlich Oberflächenbeschaffenheit und Geometrie gewisse Grundanforderungen erfüllen. Nur so ist ein optimaler Einsatz des Meßverfahrens realisierbar, der nicht die Grenzen und Möglichkeiten der optischen Triangulation überschreitet.

Geometrie des Meßobjekts

Das Meßobjekt muß so vor dem 3-D-Sensor plziert werden, daß weder in Projektions- noch in Beobachtungsrichtung der beiden Kameras irgendwelche Hinterschneidungen auftreten. Die Signalqualität sinkt bei Flächen, die unter-sich-gehend sind, so stark ab, daß diese Areale nicht ausgewertet werden können (siehe Abb.25). Bei Vermessung der Gipsmasken und Gesichter treten keine unter-sich-gehenden Areale auf. Lediglich im Bereich der seitlichen Nase und der Regio submentalis ist der Winkel zur Projektions- und Beobachtungsrichtung etwas steiler, so daß diese Flächen bei der Einstellung der Meßapparatur besonders berücksichtigt werden müssen.

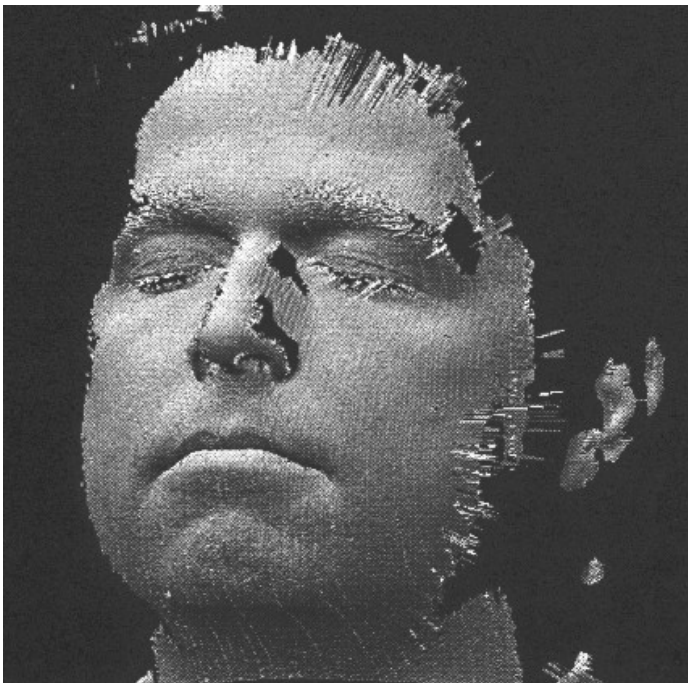


Abb.25: Durch Abschattungsphänomen verursachter Datenausfall im Bereich der lateralen Nase. Eine neue Messung mit einem etwas flacheren Projektions- und Beobachtungswinkel der Meßapparatur war hier notwendig.

Oberflächenbeschaffenheit des Meßobjekts

Das auf das Meßobjekt projizierte Streifenmuster wird dort durch das Oberflächenrelief verzerrt und so von den beiden CCD-Kameras aus unterschiedlichen Blickwinkeln aufgenommen. Diese Erfassung durch den Chip der CCD-Kamera setzt voraus, daß zumindest ein Teil des Lichts von der Oberfläche des Meßobjekts diffus reflektiert wird. Helle matte Oberflächen erzielen dabei optimale Ergebnisse, im Gegensatz zu spiegelnden oder transparenten Oberflächen, die

keine Abbildung der Streifenstruktur durch die Kameras zulassen. Eine Beschichtung mit mattweißem Pulver verbessert oft die Reflektionseigenschaften des Meßobjekts.

Bei der Vermessung der Gesichter und Gipsmasken war diese Beschichtung nicht notwendig, da die Darstellung der projizierten Lichtstreifen hervorragend war.

Die Größe des Meßfeldes

Die Meßfeldgröße hat entscheidenden Einfluß auf die Auflösung und damit auf die Meßgenauigkeit des Verfahrens. Die Variation des optischen Aufbaus erlaubt beim Tricolite-Verfahren eine Anpassung der Meßfeldgröße an die Anforderungen des zu lösenden Meßproblems (Strutz und Riechmann, 1996).

Bei unseren Messungen betrug die Meßfeldgröße ca. $0,06 \text{ m}^2$, was eine komplette Erfassung des Gesichts bzw. der Gipsmaske ermöglichte. Sie liegt damit im mittleren Bereich des möglichen Größenspektrums, das sich zwischen $0,00001 \text{ m}^2$ und 10 m^2 befindet.

3.3.1.6. Durchführung der Messungen

Nach Aufbau und Kalibrierung der Meßanordnung und richtiger Positionierung des Meßobjekts lief der Meßvorgang nach einer von der Software gesteuerten festen Reihenfolge (Makro-File) ab. Zuerst wurde die Helligkeitsverteilung auf dem Meßobjekt durch Falschfarben dargestellt, dann wurden die Referenzbilder hell-dunkel zur Festlegung der Objektgrenzen projiziert. Als nächstes kamen Gray-Code und Phasen-Shift und als letztes schließlich die eigentliche Triangulation.

3.3.1.7. Systematischer Fehler des Tricolite-Verfahrens

Entscheidendes Kriterium für die Auflösung und damit für die Meßgenauigkeit des Tricolite-Verfahrens ist die Meßfeldgröße. Abhängig von den Anforderungen des zu lösenden Meßproblems läßt sich die Auflösung in einem relativ großen Bereich variieren. Die mögliche Größe des Meßobjekts wird nach oben hin durch den zur Messung nötigen Mindestlichtfluß beschränkt und ist somit stark von der Umgebungshelligkeit abhängig. Bei sehr kleinen Meßobjekten wiederum bilden Beugungserscheinungen der projizierten Lichtstreifen die physikalische Grenze, wobei die gerade noch projizier-

bare Streifendichte bei etwa 100-200 Linien pro Millimeter liegt (Strutz und Riechmann, 1996). Die Meßfeldgröße, in der eine vernünftige Auflösung erreicht werden kann, liegt für das Tricolite-Verfahren in einem Bereich zwischen 10 Quadratmillimetern und etlichen Quadratmetern. Da der Auflösung durch die Größe des Meßfeldes Grenzen gesetzt sind, wird die Meßgenauigkeit in Abhängigkeit der Ausdehnung des Meßobjekts angegeben. Bei der verwendeten Meßapparatur (exakte Kalibrierung und Verwendung des Phasen-Shifts) betrug der systematische Fehler 1:1000 der Objektausdehnung. Bei der Vermessung unserer Gesichter und Masken ergibt dies einen systematischen Fehler von 0,20 mm.

3.3.2. Datenaufbereitung

Nach Abschluß der Datenakquisition wurden die 4 Punktwolken, die aus 2 Meßaufnahmen der beiden CCD-Kameras stammten, zu einer einzelnen Punktwolke vereinigt. Dieser Vorgang, der als "matchen" bezeichnet wird, wurde mit Hilfe von mathematischen Algorithmen im Computer durchgeführt, der automatisch diejenige Relativposition der Teilwolken berechnen konnte, bei der das Integral aller skalaren und vektoriellen Diskrepanzen einen minimalen Wert aufwies (Abb.26). Anschließend wurden die akquirierten Daten je nach gewünschter Auflösung gefiltert, um die redundante Datenmenge für eine effizientere Datenauswertung zu verringern.

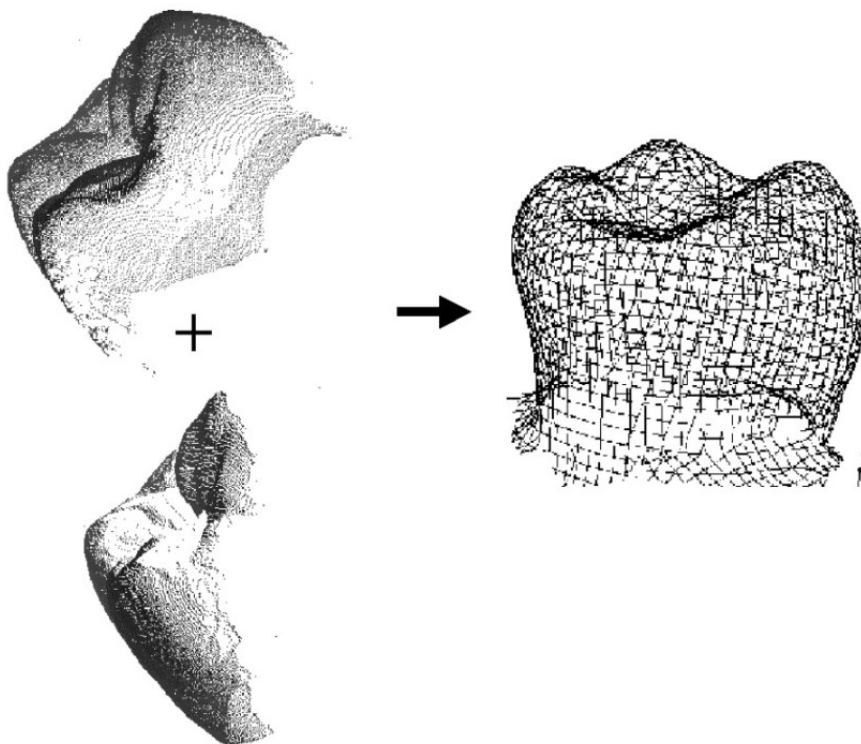


Abb.26: Beispiel für das Matchen mehrerer Punktwolken.

3.3.3. Datenauswertung

3.3.3.1. Software

Die gematchten und gefilterten Tiefendaten wurden nun in die Software "Surfacer" der Firma Imageware, USA, eingespeist. In dieser Anwendung, die zur digitalen Bearbeitung und Generierung von Freiformflächen vor allem in der Automobilindustrie eingesetzt wird, konnten die Punktwolken beliebig bearbeitet und vermessen werden. Hierfür standen unterschiedlichste Tools zur Verfügung, wie z.B. Zoom (siehe Abb.27), Rotation, Translation, Cross-Section, Falschfarbeneinsatz (siehe Abb.28) und Oberflächengenerierung.

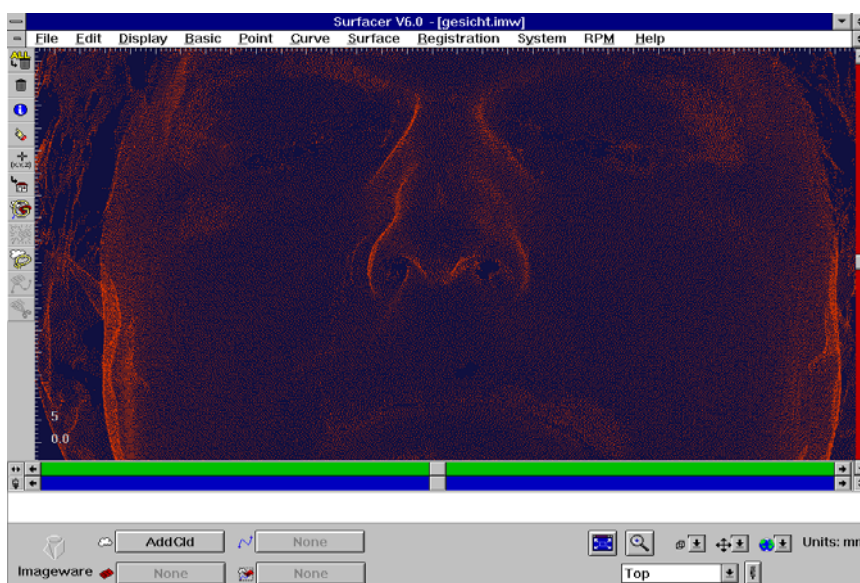


Abb.27: Zoom-Tool zur Vergrößerung einzelner Regionen in der Punktwolke.

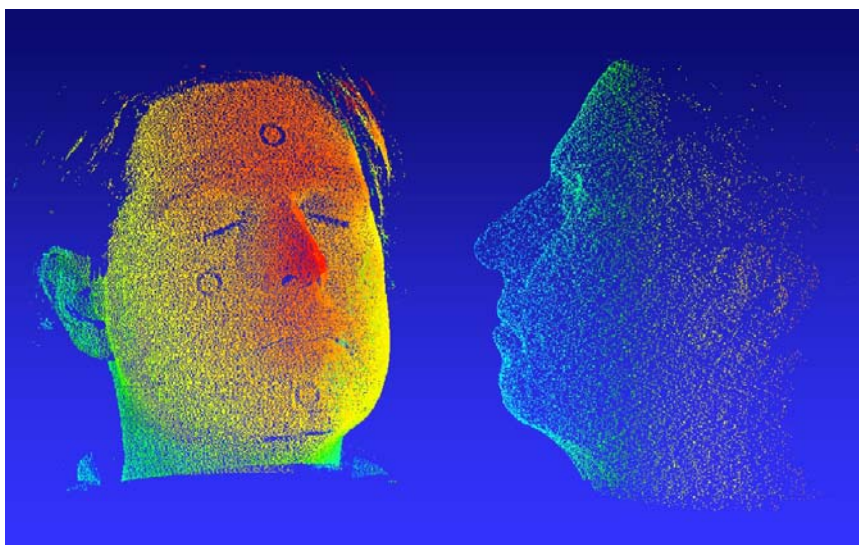


Abb.28: Falschfarben-Tool zur Kennzeichnung der Helligkeitsverteilung. Es handelt sich nun um eine vierdimensionale Darstellung der Punktwolke.

3.3.3.2. Cross - Section

Um Differenzen zwischen einzelnen Punktwolken (z.B. Gesicht-Maske) reproduzierbar ausmessen zu können, wurden ein sagittaler (Mitt-Sagittale) und ein horizontaler Schnitt (Campersche Ebene) durch die Punktwolken gelegt. In den beiden Cross-Sections wurden nun die einzelnen Meßpunkte festgelegt und die Differenzen vermessen.

3.3.3.3. Meßpunktdefinition

Zwischen den einzelnen Punktwolken wurden Diskrepanzen an folgenden Referenzpunkten untersucht: Stirnmitte, Glabella, Nasenrücken, Nasenspitze, Subnasale, Oberlippe, Unterlippe, Kinn, Hals und Wange.

3.3.3.4. Messung

Die Ausmessung der Differenzen und die Bestimmung der Abweichungsrichtung wurde durch ein Tool in der Software ermöglicht, das durch selektives Anklicken der Meßpunkte die Differenz auf 0,01 mm genau berechnen konnte.

3.3.4. Meßwertdokumentation

Die Differenzen der einzelnen Punktwolken wurden in einen Meßwertbogen (siehe Anhang, S.92) eingetragen, wobei der vom Computer errechnete Wert auf 0,1 mm gerundet wurde. Der Fehlervektor wurde in der jeweiligen Ebene in seiner zweidimensionalen Form angegeben, wobei die quantitative Ausprägung durch skalare Werte (1=mäßig; 2=mittel und 3=stark) codiert wurde.

3.4. Experimentelles Vorgehen

3.4.1. Messungen zur Reliabilität

Ein unbewegliches (Gipsmaske) und ein bewegliches Meßobjekt (Proband) wurden jeweils 6 mal seriell vermessen. Die Diskrepanzen zwischen den einzelnen Punktwolken (siehe Abb.29, S.32 und Abb.30, S.32) waren dabei ein Maß für den zufälligen Fehler des Meßverfahrens.

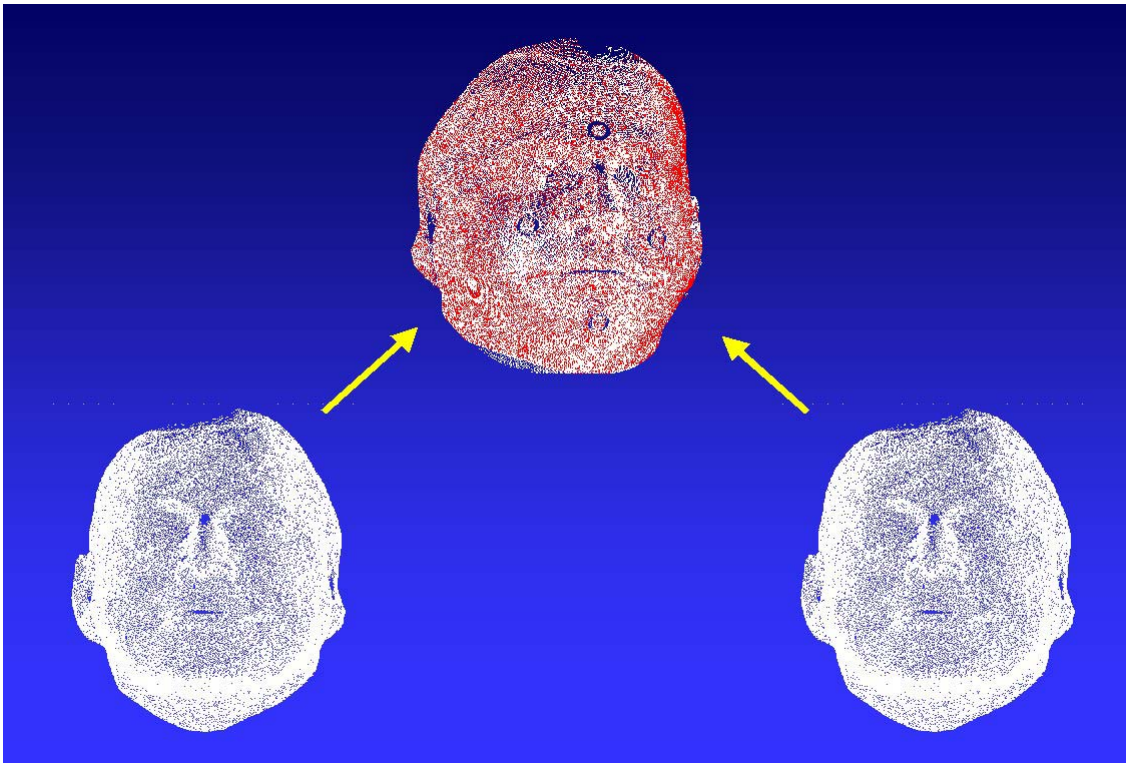


Abb.29: Differenz zwischen zwei Messungen an ein und derselben Maske

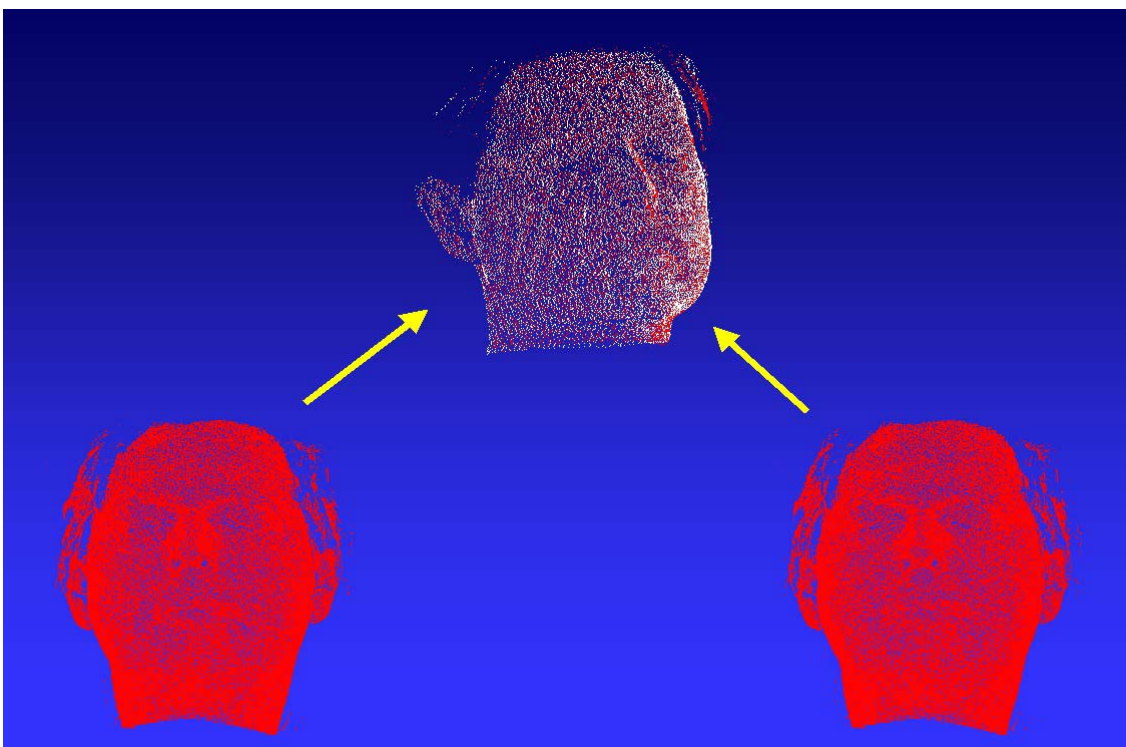


Abb.30: Differenz zwischen zwei Messungen an ein und demselben Gesicht.

3.4.2. Messungen zum Gipsmaskenfehler

Von jedem der 15 Probandengesichter wurde eine Gipsmaske durch Abformung mit Alginate hergestellt. Anschließend wurde die Ober-

fläche mit dem Tricolite-Verfahren vermessen und mit der digitalisierten Gesichtsoberfläche des Probanden verglichen (siehe Abb. 31). Die Differenz der beiden Punktwolken war dabei ein Maß für den Gipsmaskenfehler.

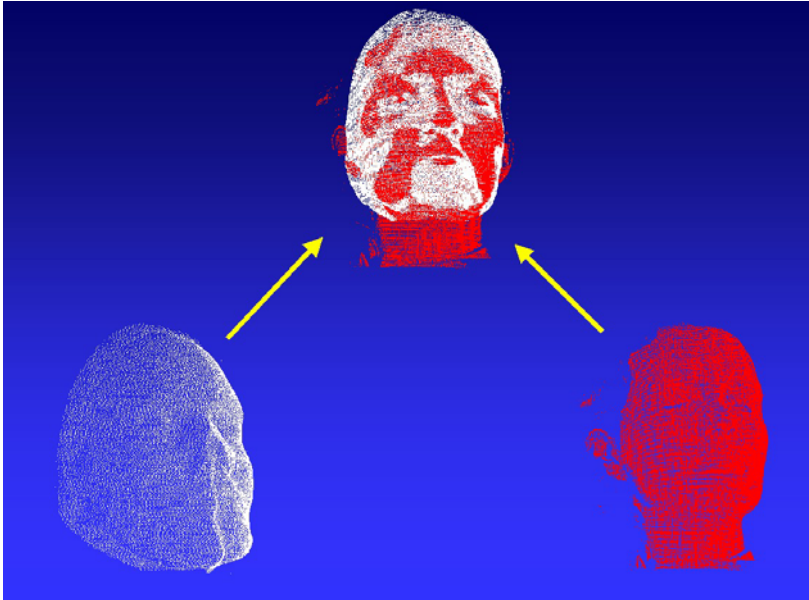


Abb.31: "Matching" zwischen Gipsmaske und tatsächlichem Gesicht.

3.4.3. Prä- und postoperative Patientenvermessung

Das Gesicht einer exemplarischen Patientin wurde zweimal digitalisiert, das erstmalig kurz vor der Operation, und das zweitemal ca. 3 Wochen nach dem Eingriff. Da die Differenz der beiden Punktwolken (siehe Abb.32) ein Maß für das postoperative Verhalten der fazialen Weichteile war, konnten diese Veränderungen mit den skelettalen Verschiebungen durch die Operation verglichen werden.

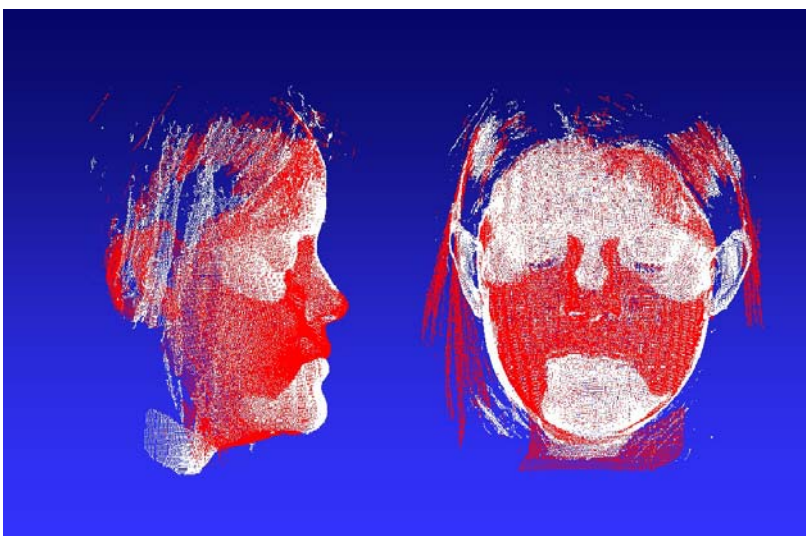


Abb.32: "Matching" aus präoperativer (weiß) und postoperativer Punktwolke (rot).

4. Ergebnisse

4.1. Reliabilität

Durch serielles Messen ein und desselben Meßobjekts wurde die Reproduzierbarkeit und damit die Reliabilität der Meßmethode bestimmt. Differenziert wurde dabei zwischen unbewegtem (Gipsmaske) und bewegtem Meßobjekt (Proband). Die Meßunterschiede, die sich trotz Konstanz des Meßobjektes ergeben haben, werden im folgenden als zufälliger Fehler bezeichnet.

4.1.1. Unbewegtes Meßobjekt

Zur Meßmethode des zufälligen Fehlers: Auf einer Gipsmaske, die als unbewegtes Meßobjekt diente, wurden 11 Meßpunkte definiert (siehe Abb.50, S.50). Diese Gipsmaske wurde sechs mal hintereinander innerhalb einer Stunde mit dem Tricolite-Verfahren digitalisiert. Die jeweils beiden nacheinander akquirierten Punktwolken wurden miteinander gematcht (siehe Abb.36, S.37) und anschließend sagittal (siehe Abb.39, S.39) und horizontal geschnitten (siehe Abb.40, S.40 und Abb.41, S.41). Die Abweichungen der beiden Punktwolken voneinander an den definierten Meßpunkten (siehe Abb.33, S.35) wurden jetzt ausgemessen (in mm). Die Abbildungen 39 bis 41 (S.39 bis S.41) zeigen beispielhaft, wie gering die Abweichungen der beiden Punktwolken voneinander sind und geben einen anschaulichen Eindruck über die Größe des zufälligen Fehlers bei der Gesichtsdigitalisierung. Der zufällige Fehler betrug über das gesamte Gesicht (bei 11 Meßpunkten) im Durchschnitt 0,12 mm. Die regionalen Unterschiede waren jedoch enorm. Betrachtet man die Verteilung des Fehlers (siehe Abb.34, S.36 und Abb.37, S.38) über die einzelnen Meßpunkte, so fällt vor allem der Bereich der Wange mit durchschnittlich 0,24 mm aus dem Rahmen, während Stirn, Nase und Lippen sogar unter 0,1 mm liegen. Die Größe des zufälligen Fehlers an den einzelnen Meßpunkten im Gesicht wird in Abb.36, S.37 anschaulich dargestellt. Nun wurden die Meßpunkte, die in gleichen Gesichtsregionen liegen, zusammengefaßt (Abb.35, S.36) und die Verteilung des zufälligen Fehlers über diese Gesichtsregionen ermittelt (siehe Abb.38, S.38).

	1.Messung	2.Messung	3.Messung	4.Messung	5.Messung
Stirn	0,03 mm	0,09 mm	0,12 mm	0,05 mm	0,11 mm
Glabella	0,18 mm	0,08 mm	0,04 mm	0,13 mm	0,07 mm
Nasentrücken	0,09 mm	0,08 mm	0,02 mm	0,05 mm	0,06 mm
Nasenspitze	0,02 mm	0,10 mm	0,08 mm	0,06 mm	0,06 mm
Subnasale	0,05 mm	0,07 mm	0,04 mm	0,07 mm	0,08 mm
Wange links	0,36 mm	0,38 mm	0,14 mm	0,21 mm	0,33 mm
Wange rechts	0,18 mm	0,14 mm	0,22 mm	0,31 mm	0,14 mm
Oberlippe	0,06 mm	0,18 mm	0,16 mm	0,06 mm	0,05 mm
Unterlippe	0,02 mm	0,03 mm	0,11 mm	0,08 mm	0,06 mm
Kinn	0,16 mm	0,12 mm	0,22 mm	0,24 mm	0,18 mm
Submentale	0,18 mm	0,17 mm	0,09 mm	0,13 mm	0,12 mm

Abb.33: Darstellung aller Einzelwerte von insgesamt fünf Differenzmessungen, die zwischen sechs Punktwolken durchgeführt worden waren (Range). Die Tiefendaten der einzelnen Punktwolken hatte man durch serielles Vermessen einer Gipsmaske erhalten. Die Differenzen zwischen diesen Punktwolken wurden dabei an insgesamt elf fazialen Meßpunkten erfaßt.

Die Wangenregion zeigte den größten zufälligen Fehler mit durchschnittlich 0,24 mm, gefolgt von der Kinnregion mit 0,16 mm. Stirn (0,09 mm), Nase (0,06 mm) und Mund (0,08 mm) dagegen lagen mit ihren durchschnittlichen Fehlerwerten sogar unter einem Millimeter.

Meßpunkt	n	mean	Std.-Dev.
Stirn	5	0,08 mm	0,04 mm
Glabella	5	0,10 mm	0,06 mm
Nasentrücken	5	0,06 mm	0,03 mm
Nasenspitze	5	0,06 mm	0,03 mm
Subnasale	5	0,06 mm	0,02 mm
Wange links	5	0,28 mm	0,10 mm
Wange rechts	5	0,20 mm	0,07 mm
Oberlippe	5	0,10 mm	0,06 mm
Unterlippe	5	0,06 mm	0,04 mm
Kinn	5	0,18 mm	0,05 mm
Submentale	5	0,14 mm	0,04 mm

Abb.34: Darstellung der durchschnittlichen Differenzwerte (Gipsmaske) an den elf fazialen Meßpunkten. Diese Durchschnittswerte wurden aus den Einzelwerten der Abb.33, S.35 gebildet.

Region	Meßpunkt	n	mean	Std.-Dev.
Stirn	Stirn Glabella	10	0,09 mm	0,05 mm
Nase	Nasentrücken Nasenspitze Subnasale	15	0,06 mm	0,03 mm
Wange	Wange links Wange rechts	10	0,24 mm	0,09 mm
Mund	Oberlippe Unterlippe	10	0,08 mm	0,05 mm
Kinnregion	Kinn Submentale	10	0,16 mm	0,05 mm

Abb.35: Darstellung der durchschnittlichen Differenzwerte (Gipsmaske) für fünf Gesichtsregionen. Die einzelnen fazialen Meßpunkte aus Abb.33, S.35 und Abb.34 wurden dabei den einzelnen Gesichtsregionen zugeteilt.

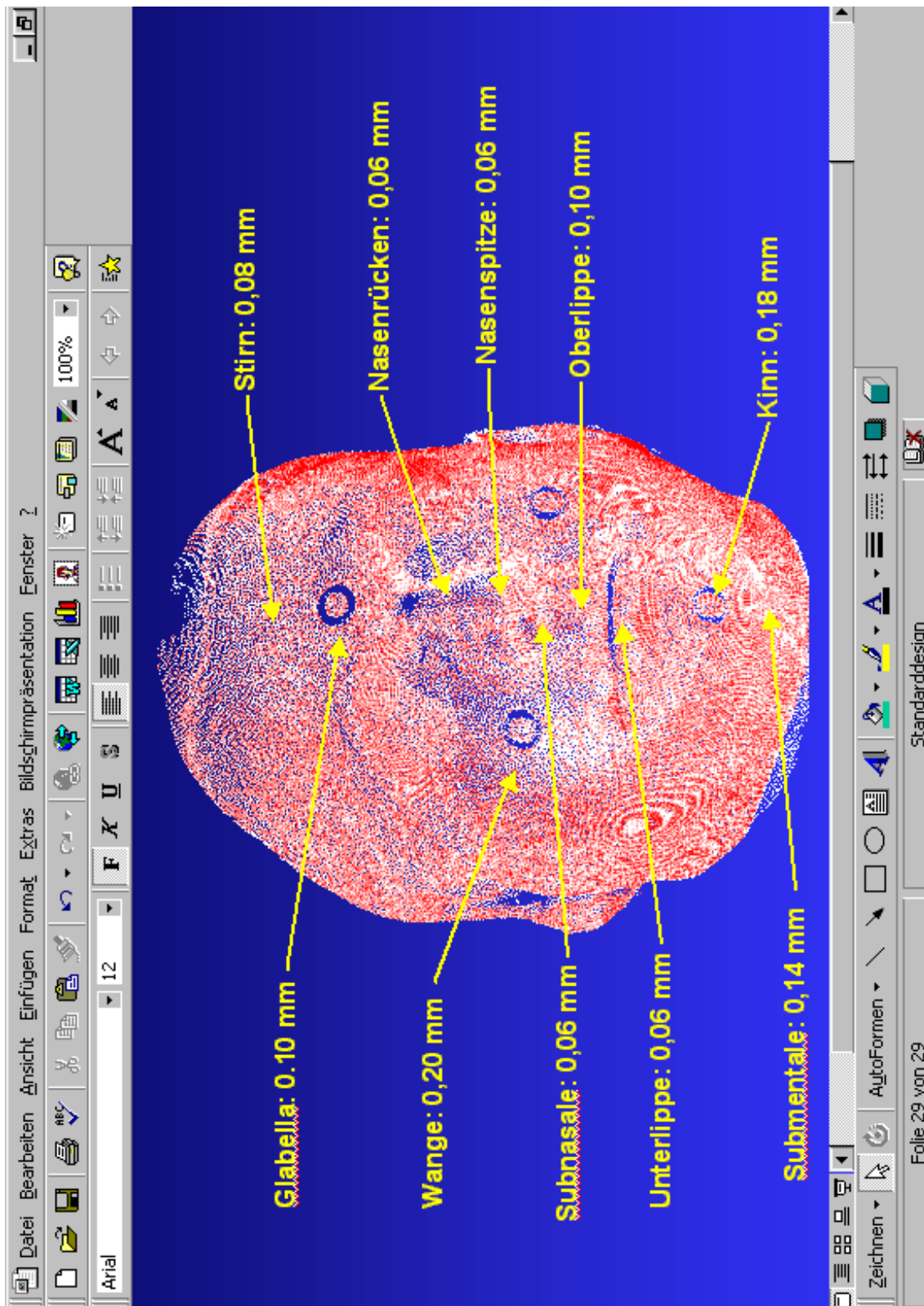


Abb.36: Zwei gematchte Punktwolken (rot und weiß) einer Gipsmaske mit Angabe der Durchschnittswerte an den fazialen Meßpunkten, die bei den fünf Differenzmessungen ermittelt worden sind (siehe auch Abb.34, S.36).

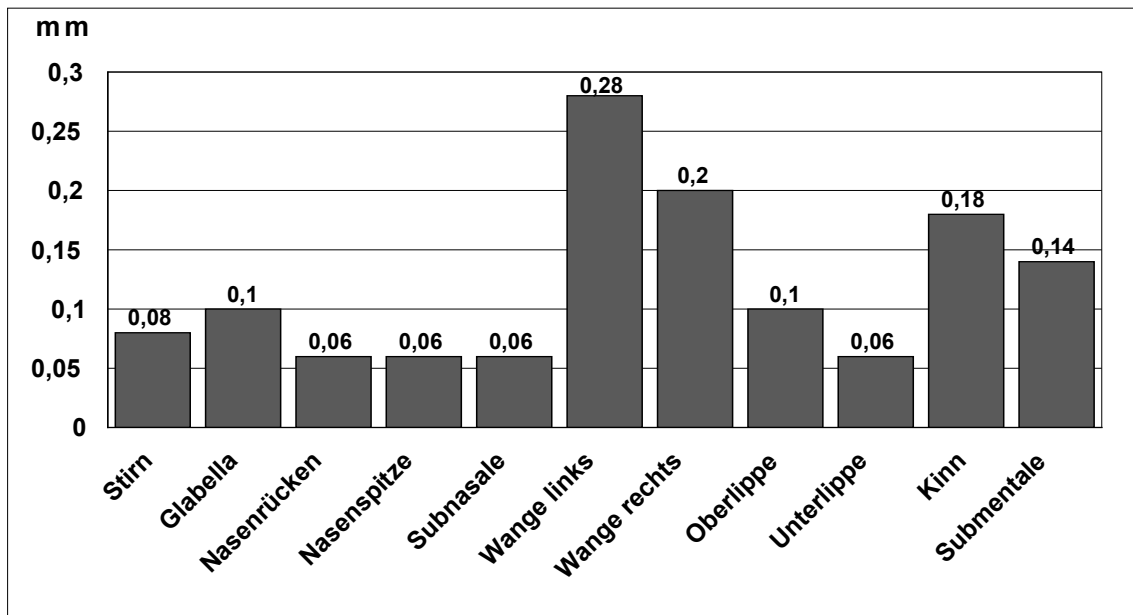


Abb.37: Verteilung der durchschnittlichen Differenzen (n=5, Gipsmaske) über die fazialen Meßpunkte (siehe auch Abb.34, S.36).

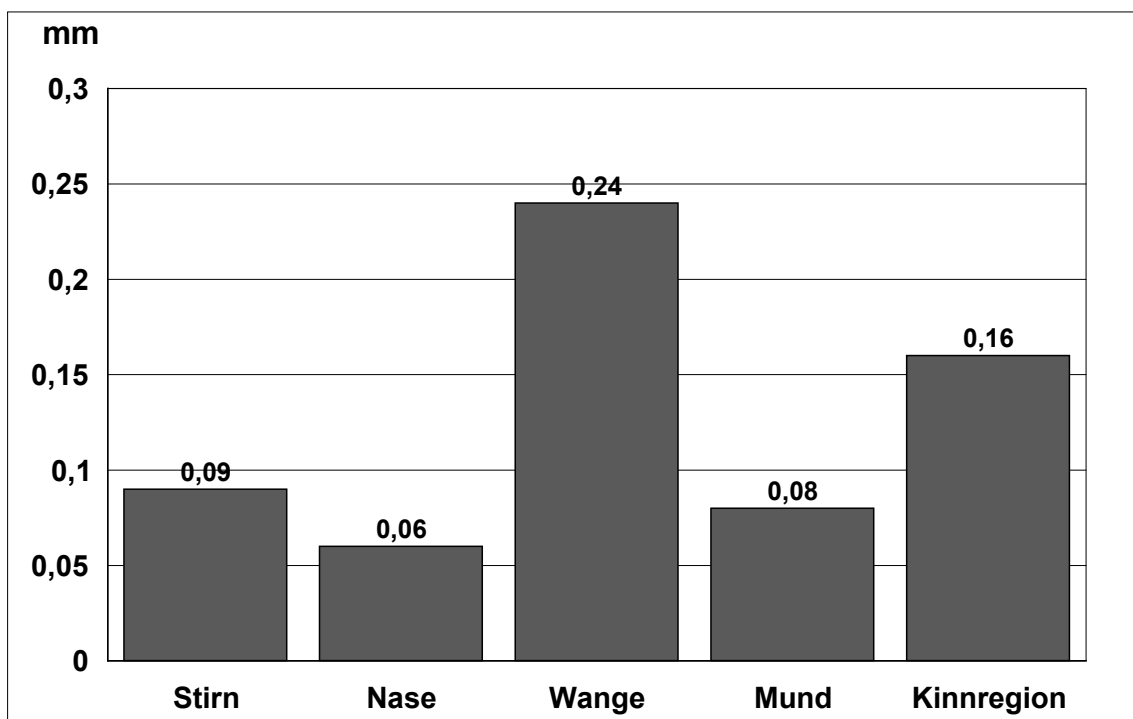


Abb.38: Verteilung der durchschnittlichen Differenzen (n=5, Gipsmaske) über die Gesichtsregionen (siehe auch Abb.35, S.36).

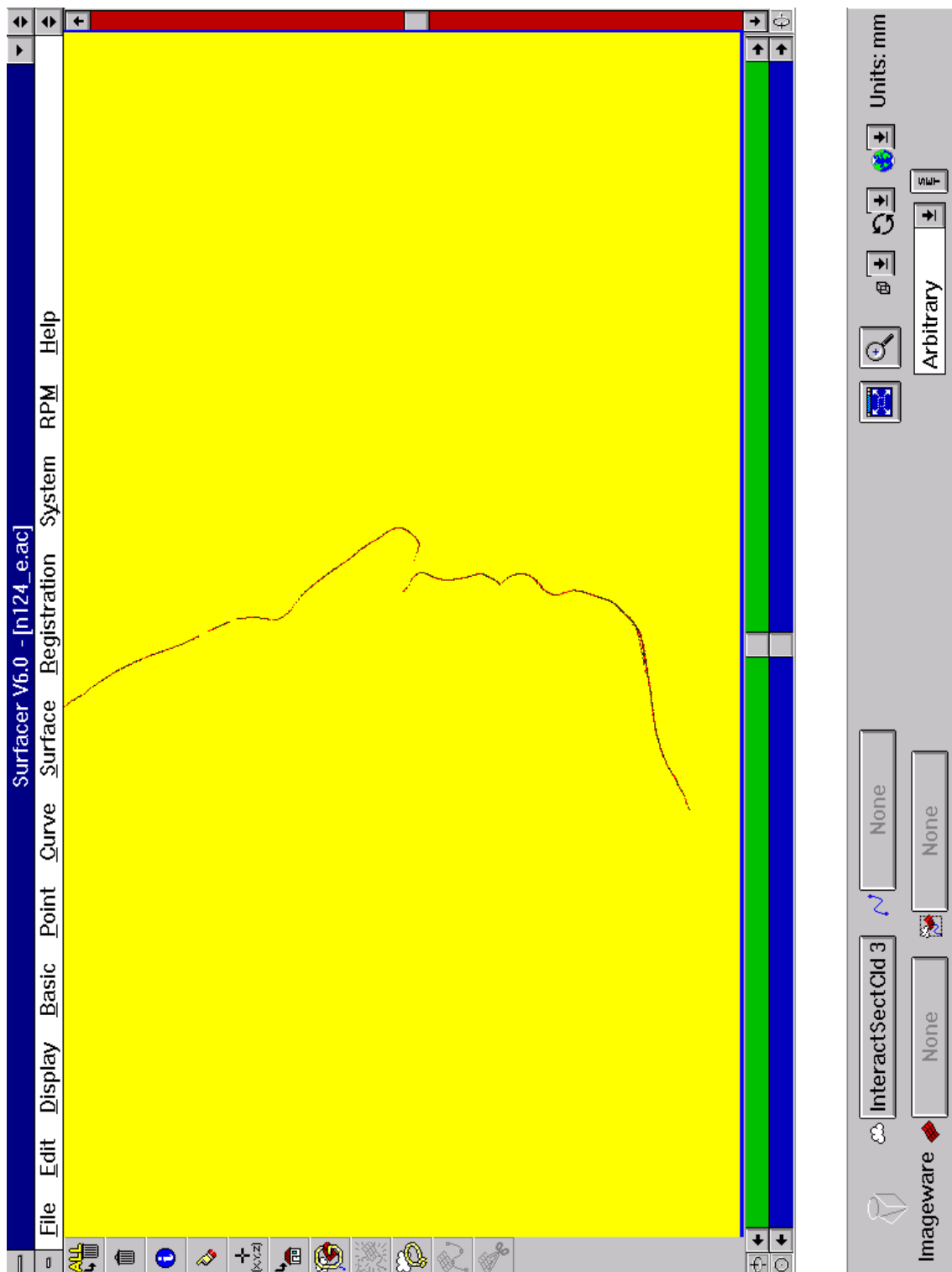


Abb.39: Beispiel einer sagittalen Cross-Section (Paramedianschnitt) zweier Messungen ein und derselben Maske. Wie man sieht, sind die Unterschiede der beiden Messungen (rot und schwarz) kaum sichtbar.

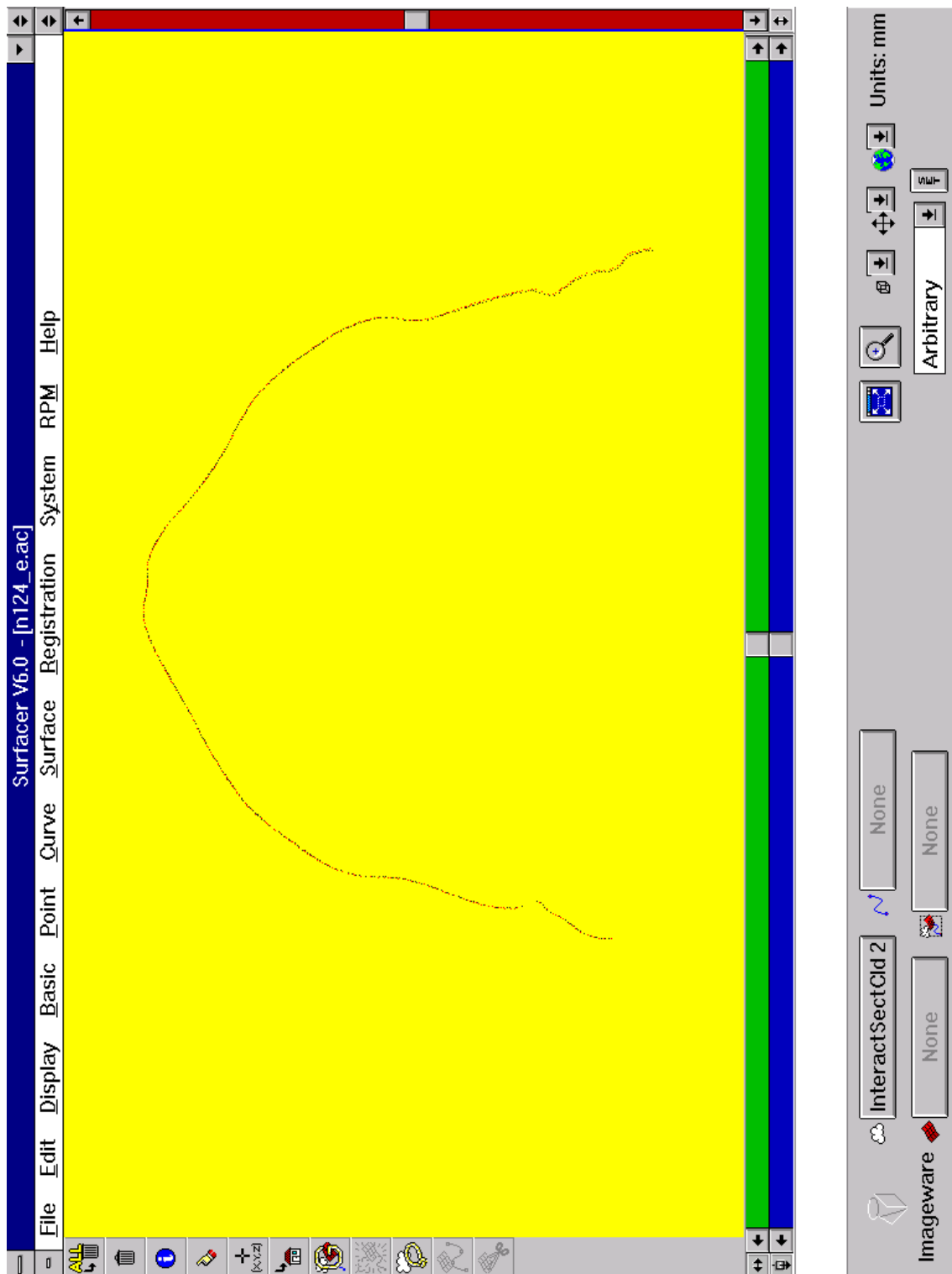


Abb.40: Beispiel einer transversalen Cross-Section (Lage zwischen Subnasale und Lippenrot der Oberlippe) zweier Messungen ein und derselben Maske. Auch hier sind Unterschiede der beiden Messungen (rot und schwarz) kaum sichtbar.

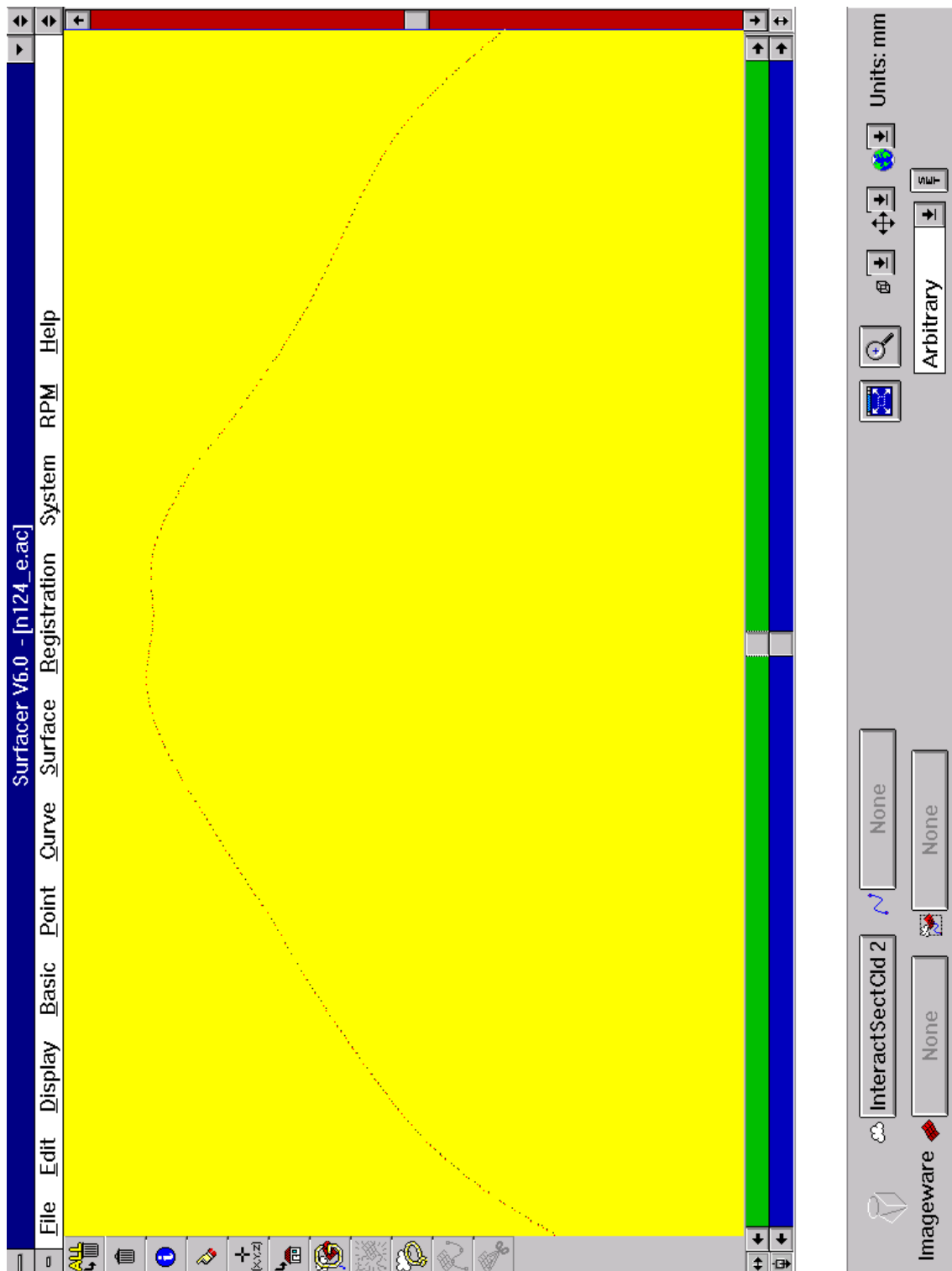


Abb. 41: Vergrößerung eines Ausschnittes der Abb.40. Auch jetzt zeigt sich keine signifikante Diskrepanz zwischen den beiden Punktwolken.

4.1.2. Bewegtes Meßobjekt

Ein Probandengesicht wurde innerhalb einer Stunde sechs mal hintereinander mit dem Tricolite-Verfahren digitalisiert. Jeweils die beiden nacheinander akquirierten Punktwolken wurden miteinander gematcht (siehe Abb.44; S.44) und sagittale sowie horizontale Schnitte angefertigt. Nun wurden die Differenzen zwischen den beiden Punktwolken an elf definierten fazialen Meßpunkten ausgemessen (siehe Abb.42).

	1.Messung	2.Messung	3.Messung	4.Messung	5.Messung
Stirn	0,12 mm	0,11 mm	0,04 mm	0,06 mm	0,08 mm
Glabella	0,32 mm	0,28 mm	0,11 mm	0,15 mm	0,42 mm
Nasenrücken	0,22 mm	0,09 mm	0,15 mm	0,17 mm	0,08 mm
Nasenspitze	0,61 mm	0,65 mm	0,32 mm	0,41 mm	0,69 mm
Subnasale	0,31 mm	0,92 mm	0,95 mm	0,63 mm	1,27 mm
Wange links	0,21 mm	0,19 mm	0,37 mm	0,41 mm	0,14 mm
Wange rechts	0,14 mm	0,40 mm	0,19 mm	0,25 mm	0,23 mm
Oberlippe	0,83 mm	0,32 mm	0,54 mm	0,68 mm	0,75 mm
Unterlippe	0,38 mm	0,54 mm	0,86 mm	0,91 mm	0,32 mm
Kinn	0,41 mm	0,45 mm	0,12 mm	0,35 mm	0,18 mm
Submentale	0,84 mm	0,41 mm	0,54 mm	0,60 mm	0,72 mm

Abb.42: Darstellung aller Einzelwerte von insgesamt fünf Differenzmessungen, die zwischen sechs Punktwolken durchgeführt worden waren (Range). Die Tiefendaten der einzelnen Punktwolken hatte man durch serielles Vermessen eines Probandengesichts erhalten. Die Differenzen zwischen diesen Punktwolken wurden dabei an insgesamt elf fazialen Meßpunkten erfaßt .

Dabei lag die durchschnittliche Differenz zwischen den Punktwolken an elf Meßpunkten bei 0,41 mm. Die Verteilung dieser durchschnittlichen Differenzen über die einzelnen Meßpunkte ist in den Abbildungen 43 und 46, S.45) dargestellt. Dabei zeigen sich besonders große Differenzen an Nase, Mund und Submentale. Die Meßpunkte, die in gleichen Gesichtsregionen liegen, wurden zusammengefaßt (siehe Abb.45, S.45) und die Verteilung der durchschnittlichen Differenzen zwischen den Punktwolken über diese Gesichtsregionen ermittelt (siehe Abb.45, S.45 und Abb.47, S. 46).

Meßpunkt	n	mean	Std.-Dev.
Stirn	5	0,08 mm	0,03 mm
Glabella	5	0,26 mm	0,13 mm
Nasentrücken	5	0,14 mm	0,06 mm
Nasenspitze	5	0,54 mm	0,16 mm
Subnasale	5	0,82 mm	0,36 mm
Wange links	5	0,26 mm	0,12 mm
Wange rechts	5	0,24 mm	0,10 mm
Oberlippe	5	0,62 mm	0,20 mm
Unterlippe	5	0,60 mm	0,27 mm
Kinn	5	0,30 mm	0,14 mm
Submentale	5	0,62 mm	0,17 mm

Abb.43: Darstellung der durchschnittlichen Differenzwerte (Proband) an den elf fazialen Meßpunkten. Diese Durchschnittswerte wurden aus den Einzelwerten der Abb.42, S.42 gebildet.

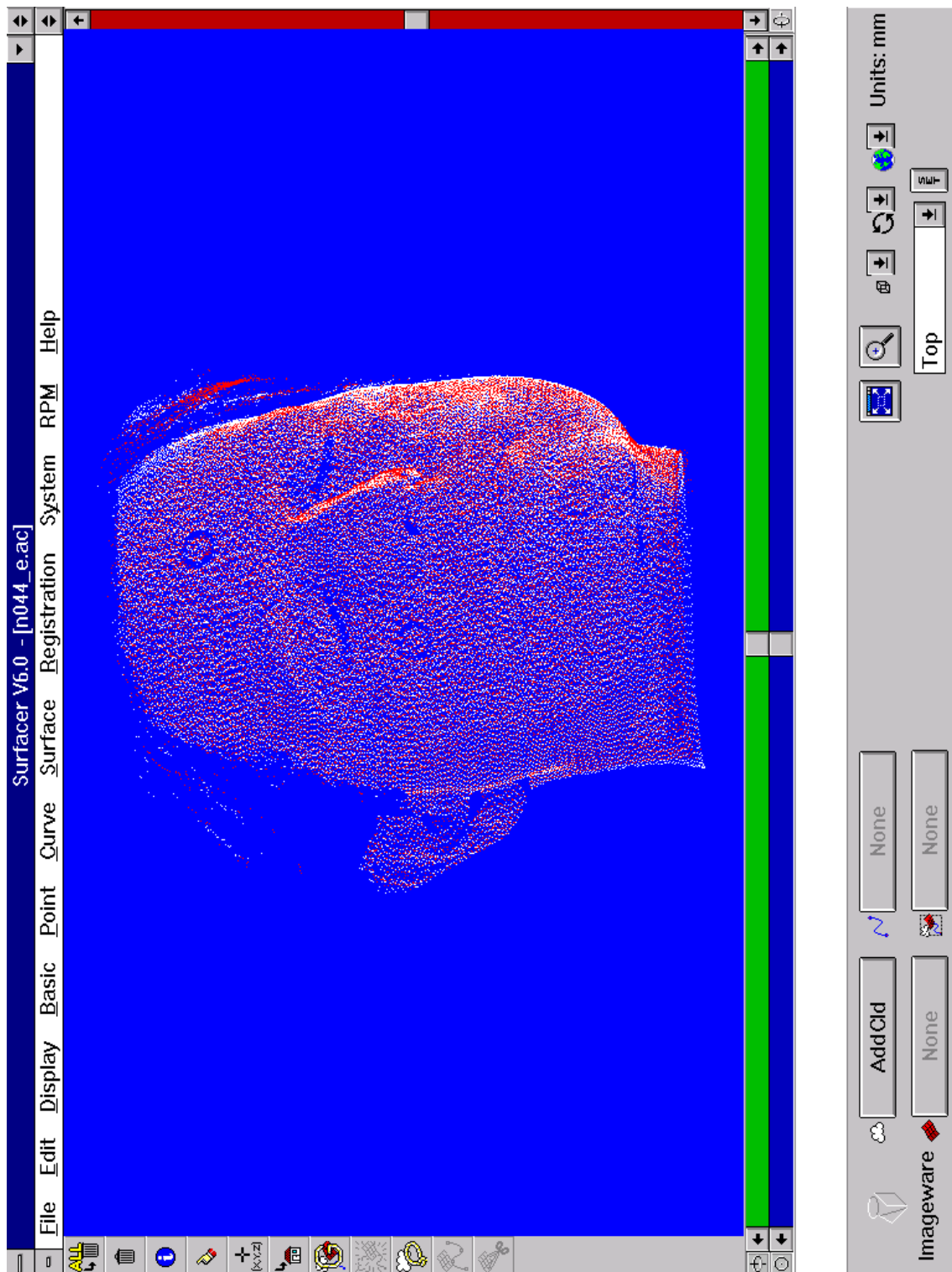


Abb.44: Darstellung zweier verschiedener Punktwolken (rot und weiß) eines Probanden, die miteinander gematcht wurden.

Region	Meßpunkt	n	mean	Std.-Dev.
Stirn	Stirn	10	0,17 mm	0,08 mm
	Glabella			
Nase	Nasenrücken	15	0,50 mm	0,19 mm
	Nasenspitze			
	Subnasale			
Wange	Wange links	10	0,25 mm	0,11 mm
	Wange rechts			
Mund	Oberlippe	10	0,61 mm	0,24 mm
	Unterlippe			
Kinnregion	Kinn	10	0,46 mm	0,16 mm
	Submentale			

Abb.45: Darstellung der durchschnittlichen Differenzwerte (Proband) für fünf Gesichtsregionen. Die einzelnen fazialen Meßpunkte aus Abb.42, S.42 und Abb.43, S.43 wurden dabei den einzelnen Gesichtsregionen zugeteilt.

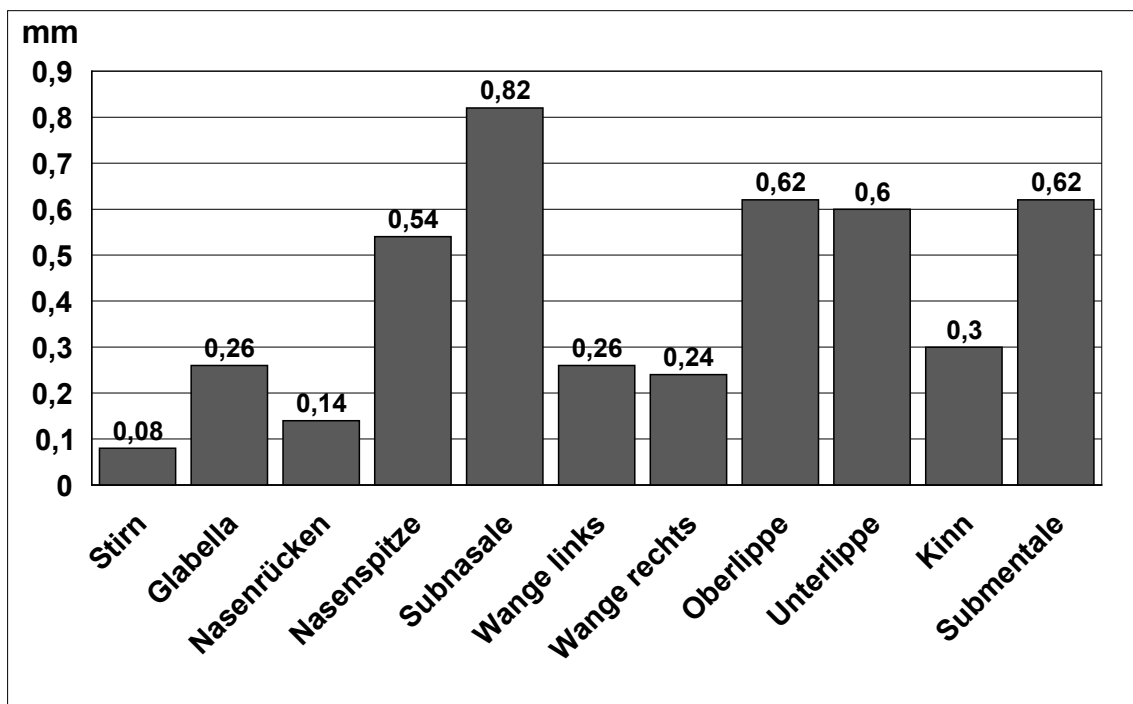


Abb.46: Verteilung der durchschnittlichen Differenzen (n=5, Proband) über die fazialen Meßpunkte (siehe auch Abb.43, S.43).

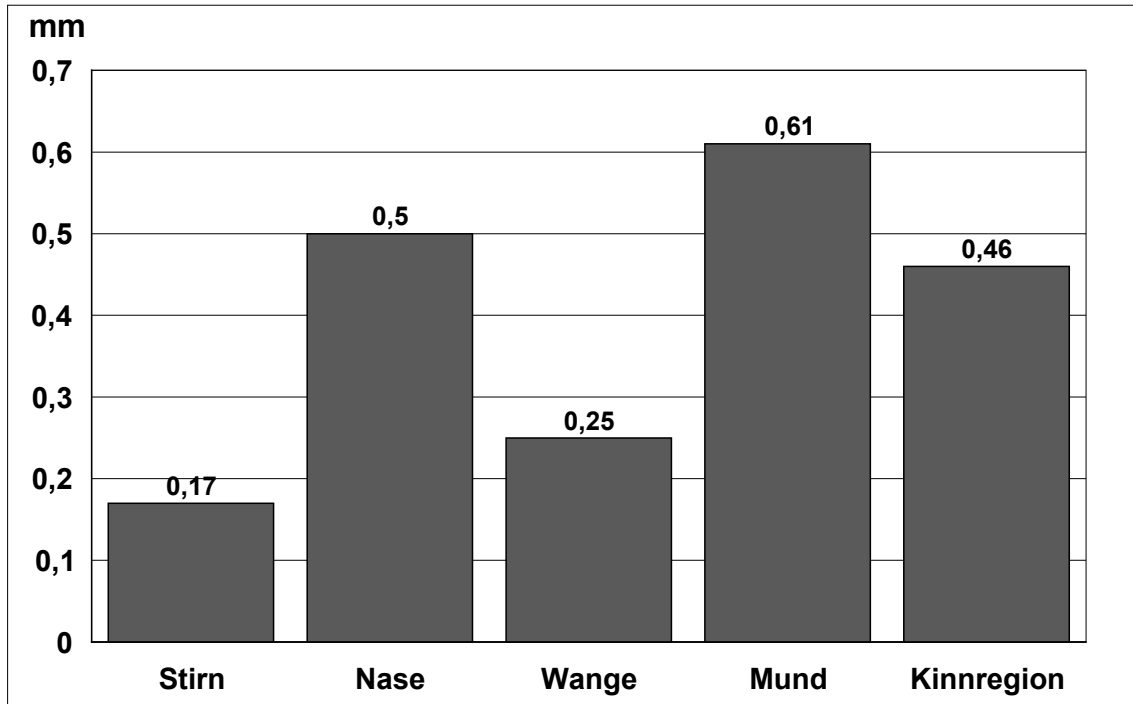


Abb.47: Verteilung der durchschnittlichen Differenzen (n=5, Proband) über die Gesichtsregionen (siehe auch Abb.45, S.45).

4.1.3. Vergleich des zufälligen Fehlers bei unbewegtem und bewegtem Meßobjekt

Die zufälligen Fehler am bewegten Meßobjekt (Proband) sind im Durchschnitt fast dreimal so groß wie am unbewegten Meßobjekt (Gipsmaske). Auch die regionale Verteilung des zufälligen Fehlers verhält sich bei den beiden Meßobjekten unterschiedlich (siehe Abb.48; S.47). Während die Wange beim unbewegten Meßobjekt mit einem überdurchschnittlich hohen Fehler behaftet ist, fällt sie beim bewegten Meßobjekt nicht aus dem Rahmen. Für Nase, Mund und Hals gilt dies genau umgekehrt.

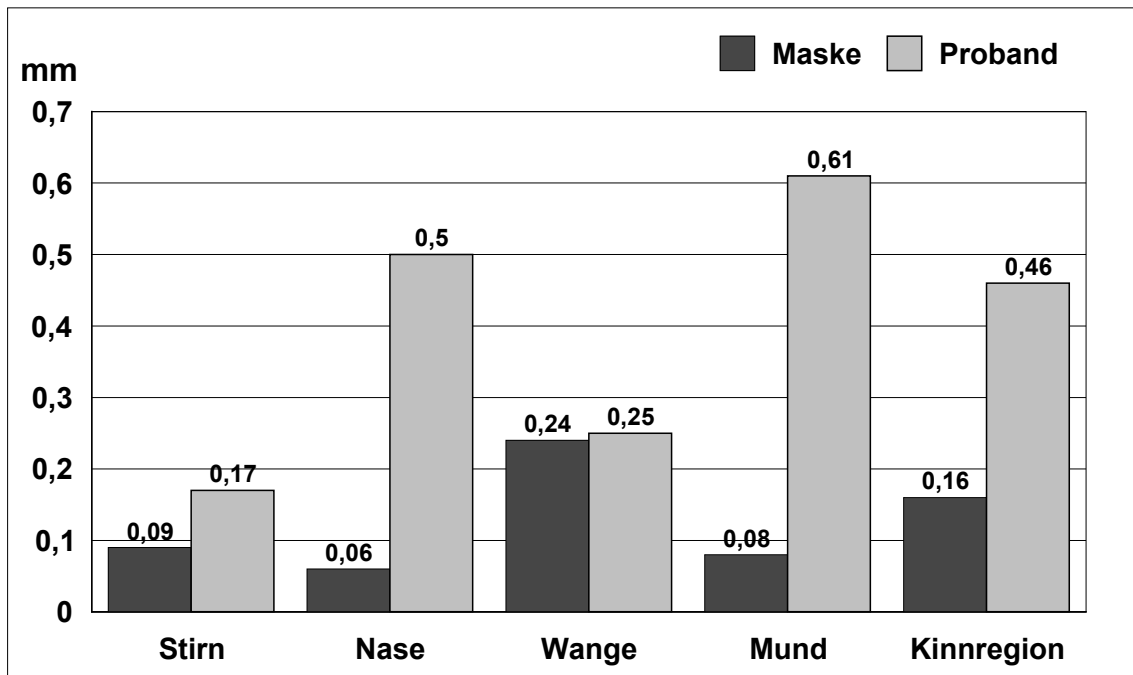


Abb.48: Vergleich der durchschnittlich gemessenen Differenzen beim unbewegten Meßobjekt (Gipsmaske) und beim bewegten Meßobjekt (Proband) in den unterschiedlichen Gesichtsregionen. Dabei wurden die Werte aus den Abb. 38 und 47 vergleichend gegenübergestellt.

4.1.4. Fehlerbetrachtung

Der systematische Fehler der Meßmethode liegt bei 0,20 mm, unabhängig davon, ob ein bewegtes oder unbewegtes Meßobjekt vermessen wird. Die Reliabilität (Zuverlässigkeit) der Methode wird durch die Ergebnisse der seriellen Messungen am bewegten und unbewegten Meßobjekt bestimmt. Der zufällige Fehler, der sich aus diesen Wiederholungsmessungen ergibt, addiert sich zum systematischen Fehler im Sinne einer Vektoraddition, so daß sich die skalaren Durchschnittswerte von systematischem und zufälligem Fehler im ungünstigsten Fall summieren (siehe Abb.49; S.48). Der Gesamtfehler beträgt so bei der Vermessung eines unbewegten Objekts maximal 0,32 mm, jedoch 0,61 mm bei Vermessung eines bewegten Objekts (Proband). Problemregionen, die durchschnittlich einen höheren Gesamtfehler aufweisen, sind dabei beim unbewegten Meßobjekt die Wange und beim bewegten Meßobjekt Nase, Mund und Submentalregion (siehe Abb.49, S.48).

	MASKE	PROBAND
Systematischer Fehler	0,20 mm	0,20 mm
Zufälliger Fehler	0,12 mm	0,41 mm
Gesamtfehler	0,32 mm	0,61 mm
Problemregionen	Wange	Nase, Mund, Submentalregion

Abb.49: Darstellung des systematischen, zufälligen und schlechtest möglichen Gesamtfehlers bei unbewegtem (Gipsmaske) und bewegtem Meßobjekt (Proband).

4.2. Genauigkeit der Gipsmasken

Mit dem lichtcodierten Triangulationsverfahren (TRICOLITE) wurde bei 15 Probanden sowohl die Gesichtsoberfläche als auch die Oberfläche der entsprechenden Gipsmaske digitalisiert und die beiden dabei entstehenden korrespondierenden Punktwolken gematcht. An 11 verschiedenen Meßpunkten (siehe Abb.50, S.50) wurden nun die durchschnittlichen Abweichungen zwischen Gipsmaskenpunktwolken und Gesichtspunktwolken gemessen. Dabei wurde zwischen der rein skalaren Größe der Abweichung und der vektoriellen Richtung der Abweichung unterschieden. Die skalare Größe der Abweichung ist dabei ein Maß für die Höhe des Fehlers, der bei der Herstellung der Probandengipsmaske an einem bestimmten Meßpunkt (siehe Abb.50, S.50) entstanden ist. Der Vektor der Abweichung dagegen beschreibt die Richtung dieses entstandenen Gipsmaskenfehlers, da es für weitere Ursachenanalysen von besonderem Interesse ist, in welcher räumlichen Orientierung der Fehler an einem bestimmten Meßpunkt aufgetreten ist.

4.2.1. Durchschnittliche Abweichung der Gipsmaske vom Gesicht (Durchschnittlicher Gipsmaskenfehler)

Bei 15 Probanden und ihren korrespondierenden Gipsmasken wurden an jeweils 11 fazialen Meßpunkten (siehe Abb.50, S.50) Differenzmessungen zwischen Gipsmasken- und Gesichtspunktwolke vorgenommen (siehe Abb.52, S.51). Bei den insgesamt 165 durchgeführten Differenzmessungen betrug die durchschnittliche Abweichung der Gipsmaskenpunktwolke von der Gesichtspunktwolke 2,32 mm. Dieser skalare Wert ergab sich als Durchschnittswert unabhängig vom Meßpunkt. Berücksichtigt man jedoch die Verteilung über die fazialen Meßpunkte, so wurden erhebliche regionale Unterschiede bei der skalaren Größe der Abweichungen deutlich (siehe Abb.51, S.50 und Abb.53, S.52).

4.2.2. Analyse der Gipsmaskenabweichungen nach Regionen

4.2.2.1. Skalare Größe des Fehlers

Die regionale Verteilung der Abweichungen Gesicht-Maske zeigt deutliche Unterschiede im skalaren Wert. Nasenspitze und untere Gesichtsregionen wie Kinn und Submentalregion zeigen im Durchschnitt höhere Fehler als Stirn und Glabella (Abb.51, S.50 und Abb.53, S.52).

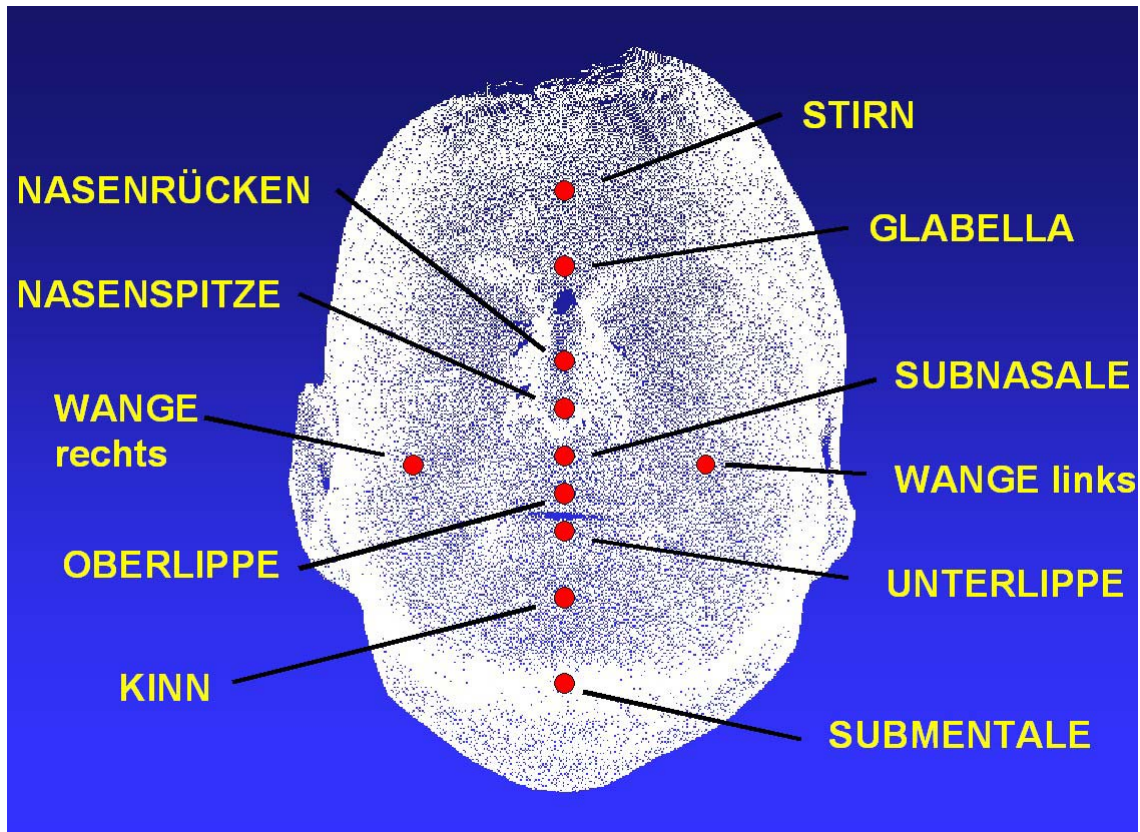


Abb.50: Meßpunkte an der Gipsmaskenpunktwolke, an denen die Differenz zur korrespondierenden Gesichtspunktwolke gemessen wurde.

Meßpunkt	n	mean	Std.-Dev.
Stirn	15	0,97 mm	0,86 mm
Glabella	15	0,95 mm	1,17 mm
Nasenrücken	15	1,43 mm	1,40 mm
Nasenspitze	15	3,17 mm	1,97 mm
Subnasale	15	2,31 mm	1,55 mm
Wange links	15	1,77 mm	0,69 mm
Wange rechts	15	2,25 mm	1,18 mm
Oberlippe	15	2,89 mm	1,43 mm
Unterlippe	15	2,77 mm	2,49 mm
Kinn	15	3,55 mm	2,98 mm
Submentale	15	3,42 mm	2,36 mm

Abb.51: Darstellung der durchschnittlichen Differenzwerte zwischen Gipsmasken- und Gesichtspunktwolke an den fazialen Meßpunkten. Diese Durchschnittswerte ergeben sich aus den Einzelwerten der Abb.52, S.51.

	<i>Proband 1</i>	<i>Proband 2</i>	<i>Proband 3</i>	<i>Proband 4</i>	<i>Proband 5</i>	<i>Proband 6</i>	<i>Proband 7</i>	<i>Proband 8</i>
Stirn	3,6 mm	1,0 mm	0,7 mm	0,5 mm	0,9 mm	0,0 mm	0,6 mm	1,2 mm
Glabella	4,6 mm	0,0 mm	0,2 mm	0,6 mm	2,1 mm	1,0 mm	0,5 mm	1,4 mm
Nasenrücken	4,9 mm	0,3 mm	0,3 mm	0,3 mm	2,7 mm	1,1 mm	0,0 mm	1,4 mm
Nasenspitze	5,9 mm	4,5 mm	0,4 mm	1,4 mm	4,2 mm	2,4 mm	4,6 mm	5,2 mm
Subnasale	5,4 mm	4,4 mm	1,4 mm	0,9 mm	1,1 mm	1,6 mm	3,9 mm	4,8 mm
Wange links	1,9 mm	2,3 mm	3,3 mm	0,8 mm	1,7 mm	1,3 mm	2,2 mm	2,0 mm
Wange rechts	3,4 mm	2,1 mm	1,8 mm	1,1 mm	2,4 mm	2,1 mm	1,4 mm	3,8 mm
Oberlippe	5,6 mm	4,2 mm	5,5 mm	1,9 mm	1,1 mm	1,6 mm	4,5 mm	2,8 mm
Unterlippe	4,5 mm	4,3 mm	9,8 mm	1,8 mm	1,6 mm	0,2 mm	4,2 mm	3,7 mm
Kinn	4,0 mm	5,7 mm	9,8 mm	2,1 mm	3,1 mm	0,4 mm	9,5 mm	3,5 mm
Submentale	6,0 mm	5,0 mm	6,0 mm	2,8 mm	2,9 mm	1,1 mm	9,8 mm	3,4 mm

	<i>Proband 9</i>	<i>Proband 10</i>	<i>Proband 11</i>	<i>Proband 12</i>	<i>Proband 13</i>	<i>Proband 14</i>	<i>Proband 15</i>	<i>mean</i>
Stirn	0,6 mm	1,6 mm	1,2 mm	1,1 mm	1,1 mm	0,0 mm	0,4 mm	0,86 mm
Glabella	0,8 mm	1,4 mm	0,1 mm	0,0 mm	0,5 mm	0,2 mm	0,8 mm	1,17 mm
Nasenrücken	2,1 mm	2,1 mm	3,4 mm	0,4 mm	0,5 mm	1,5 mm	0,4 mm	1,40 mm
Nasenspitze	3,2 mm	0,5 mm	6,8 mm	3,0 mm	2,3 mm	2,0 mm	1,2 mm	1,97 mm
Subnasale	2,0 mm	1,6 mm	2,7 mm	0,5 mm	1,4 mm	1,6 mm	1,4 mm	1,55 mm
Wange links	1,4 mm	0,6 mm	2,1 mm	1,4 mm	2,5 mm	1,2 mm	1,8 mm	0,69 mm
Wange rechts	5,2 mm	1,7 mm	2,8 mm	1,0 mm	2,4 mm	0,8 mm	1,7 mm	1,18 mm
Oberlippe	2,5 mm	2,5 mm	2,0 mm	2,0 mm	3,4 mm	1,6 mm	2,2 mm	1,43 mm
Unterlippe	2,1 mm	4,5 mm	1,1 mm	0,4 mm	1,4 mm	0,6 mm	1,4 mm	2,49 mm
Kinn	5,8 mm	2,6 mm	0,9 mm	0,9 mm	0,9 mm	1,2 mm	2,9 mm	2,98 mm
Submentale	3,0 mm	2,0 mm	2,4 mm	2,0 mm	2,0 mm	1,0 mm	1,9 mm	2,36 mm

Abb.52: Darstellung aller gemessenen Einzeldifferenzen zwischen Gipsmasken- und Gesichtspunktwolke bei 15 Probanden an den fazialen Meßpunkten. Die Durchschnitte dieser Einzelwerte sind für die Meßpunkte in Abb.51, S.50 dargestellt.

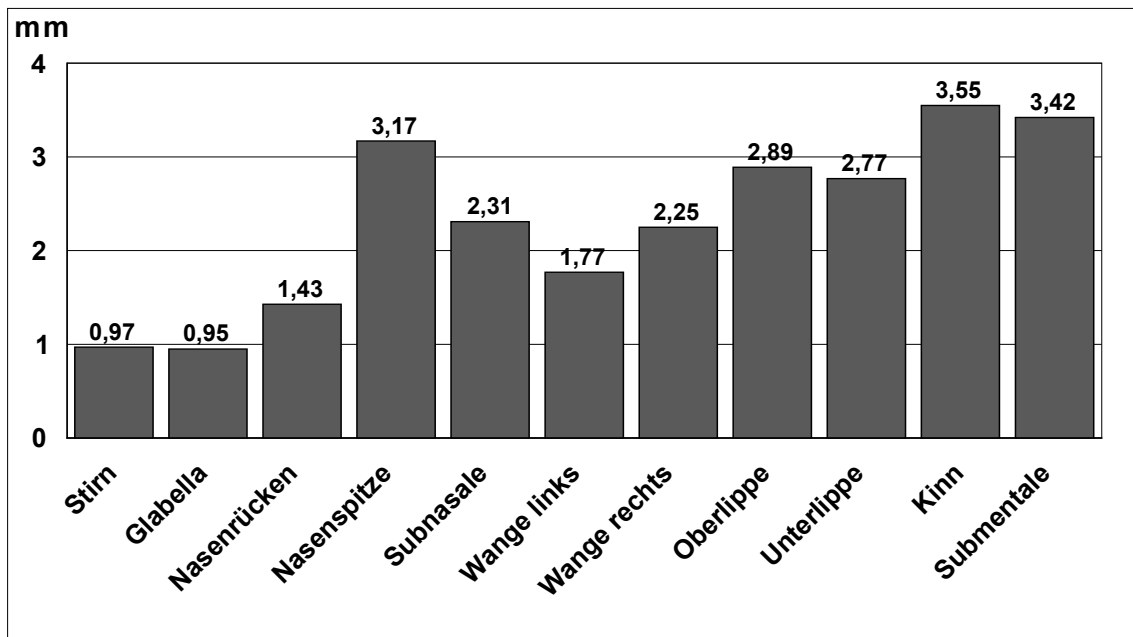


Abb.53: Verteilung der durchschnittlichen Differenzwerte zwischen Gipsmasken- und korrespondierenden Gesichtspunktswolken (n=15) über die Meßpunkte. Diese Abbildung ist die grafische Veranschaulichung der Ergebnisse aus Abb.51, S.50.

Die einzelnen Meßpunkte wurden zusammengefaßt und verschiedenen Gesichtsregionen (Stirn, Nase, Wange, Mund und Kinnregion) zugeordnet. Nun konnte die regionale Verteilung der durchschnittlichen Differenzen zwischen Gipsmasken- und Gesichtspunktswolken bestimmt werden (siehe Abb.54).

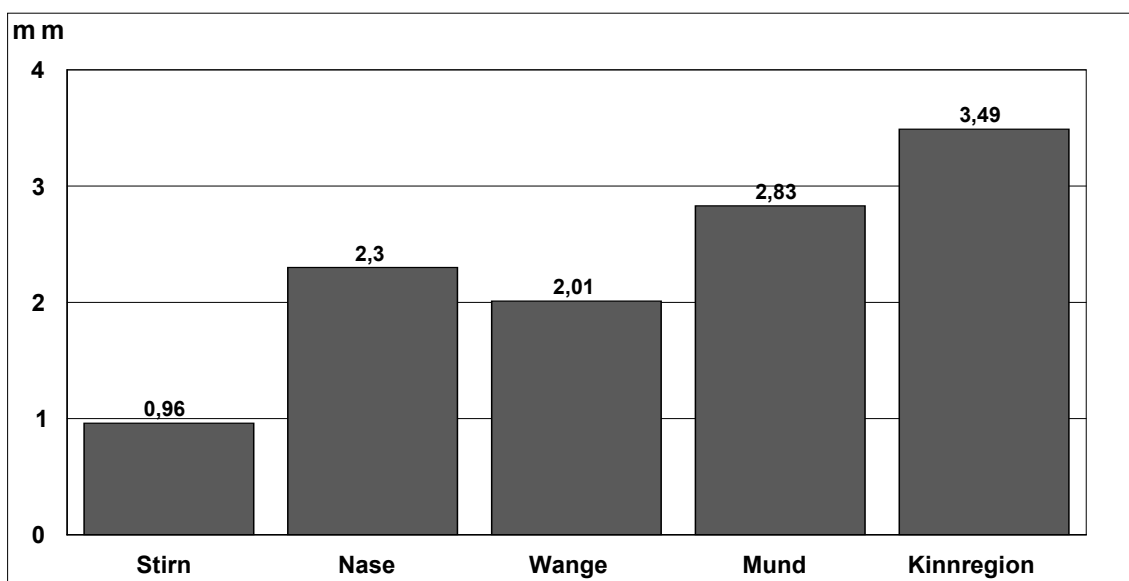


Abb.54: Verteilung der durchschnittlichen Differenzwerte zwischen Gipsmasken- und korrespondierenden Gesichtspunktswolken (n=15) über die Gesichtsregionen

Die Abbildungen 55 und 56 zeigen an einem Beispiel das methodische Vorgehen. Die Gesichtspunktwolke (rot) des Probanden (siehe Abb.55) wurde mit der Gipsmaskenpunktwolke (weiß) gematcht (siehe Abb.56). Danach wurden Sagittal- (siehe Abb.57, S.54 und Abb.58, S.55) und Horizontalschnitte (siehe Abb.59, S.56) angefertigt, um die Abweichungen der beiden Punktwolken zu vermessen.

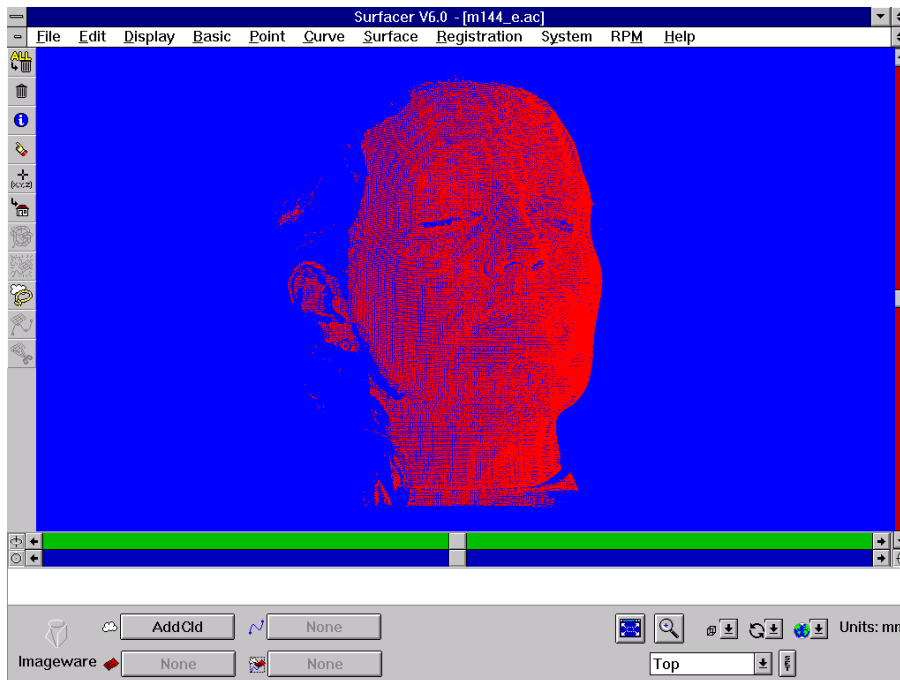


Abb.55: Dreidimensionale Gesichtspunktwolke eines Probanden

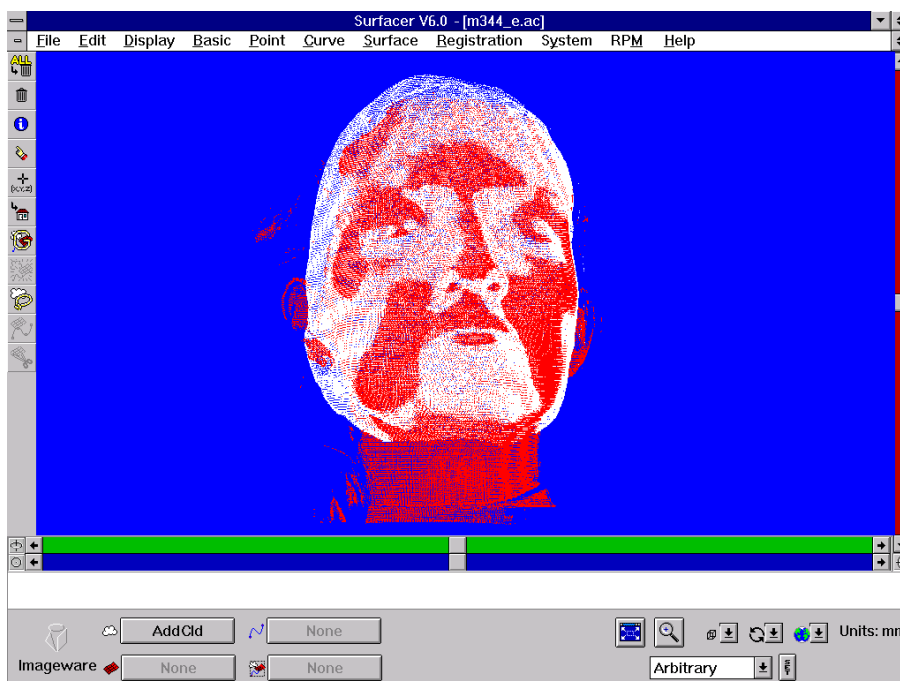


Abb.56: Die Gesichtspunktwolke aus Abb.55, gematcht mit der korrespondierenden Gipsmaskenpunktwolke des Probanden.

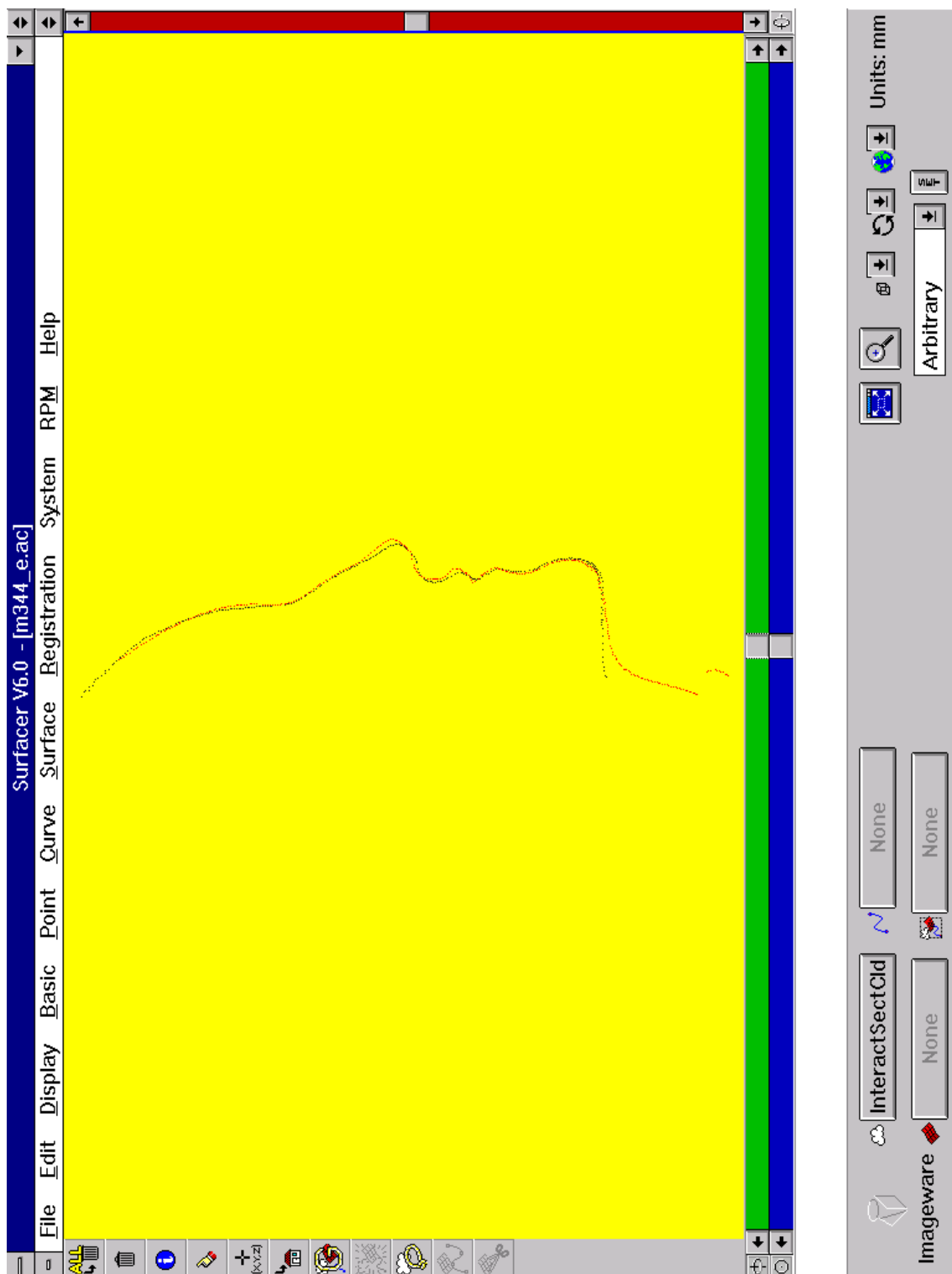


Abb.57: Beispiel für einen Sigittalschnitt durch die zwei gematchten Punktwolken aus Abb.56, S.53. Im Gegensatz zur Abb.56, S.53 wird die Gipsmaskenpunktwolke durch eine schwarze Linie repräsentiert.

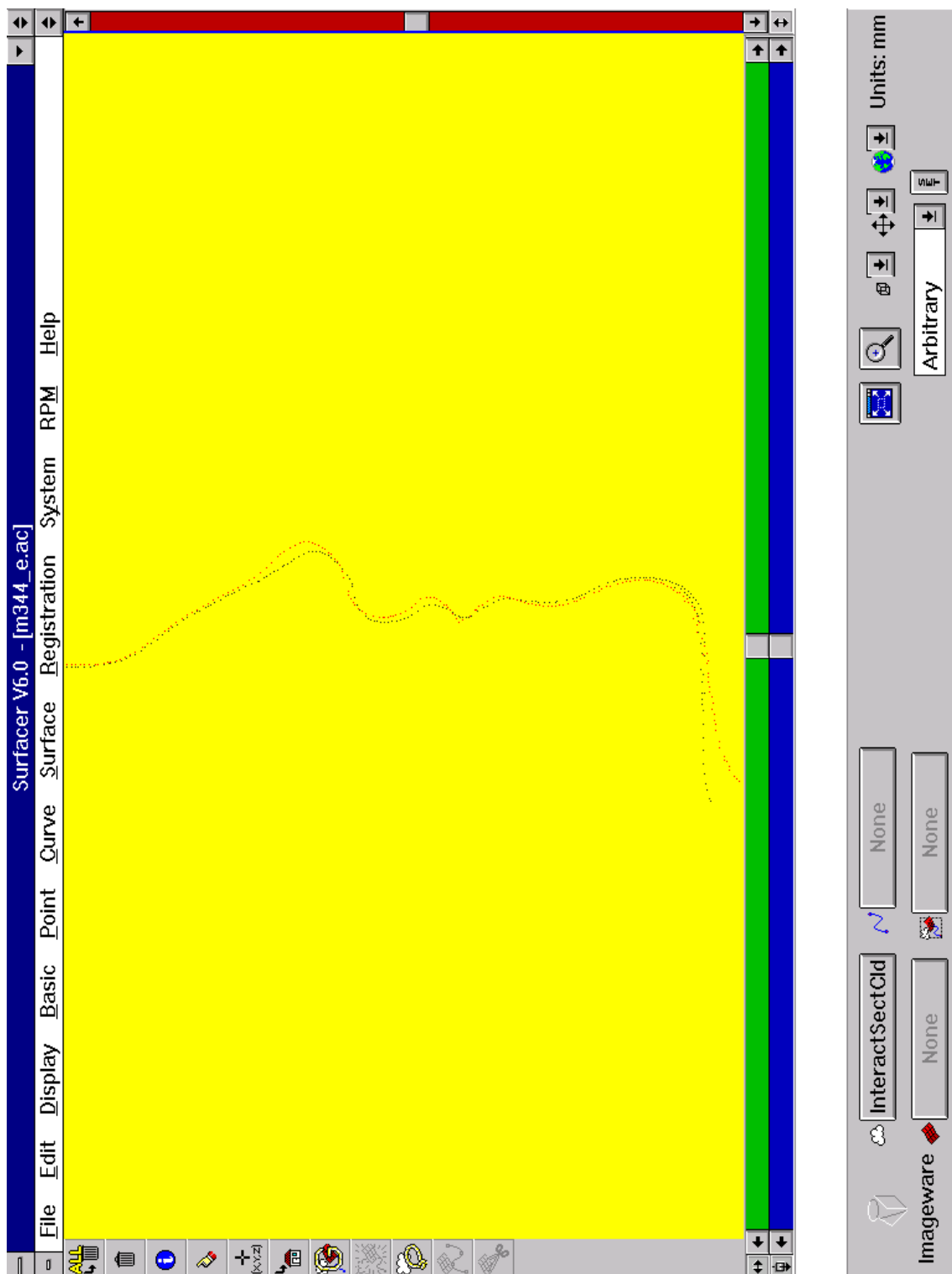


Abb.58: Vergrößerter Ausschnitt aus der Abb.57, S.54. Hier sieht man besonders deutlich die starken Diskrepanzen im Bereich der Nase und der Submentalregion. Auch hier wird die Gipsmaskenpunktvolke durch eine schwarze Linie repräsentiert.

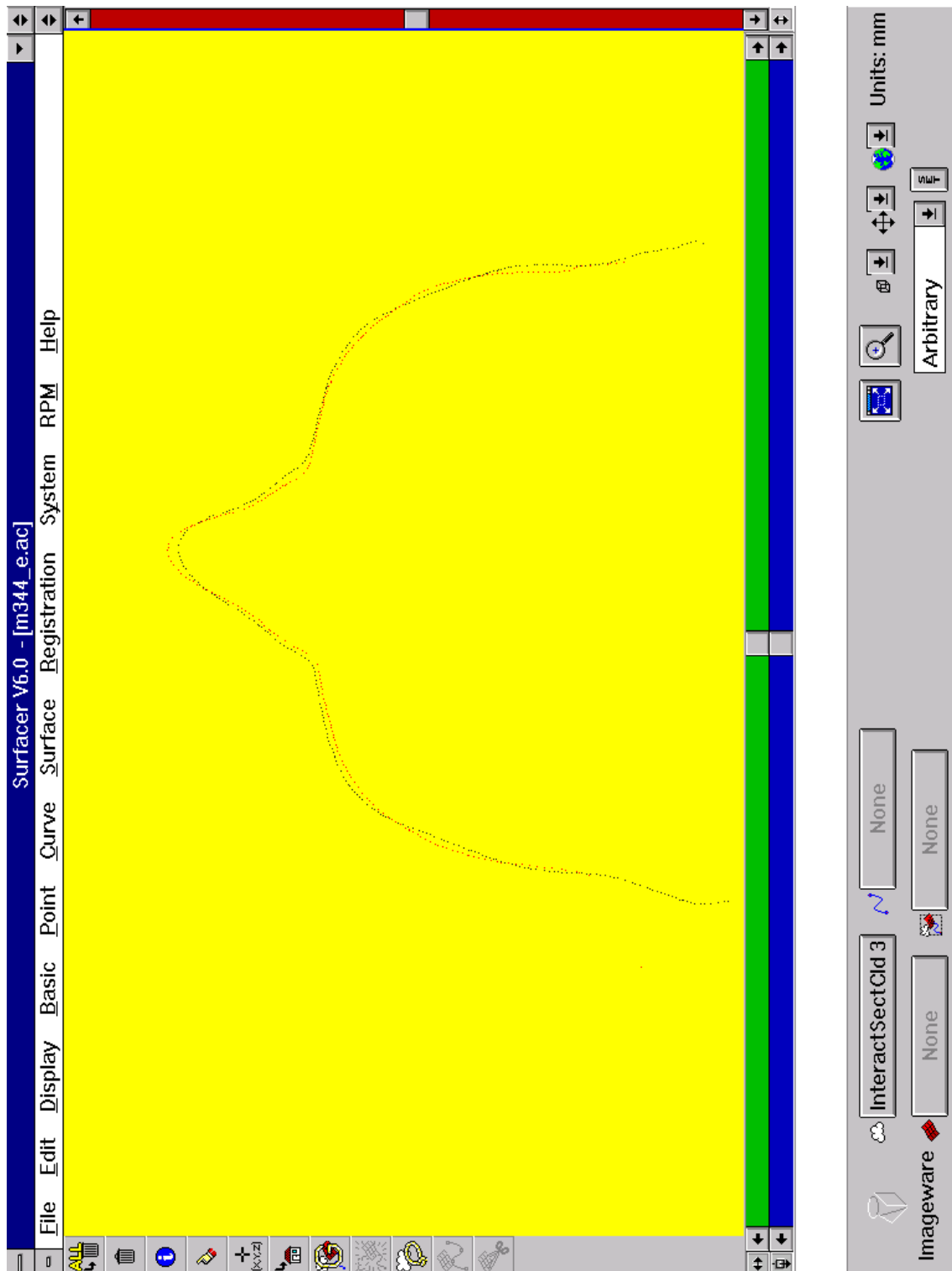


Abb.59: Horizontaler Schnitt durch die gematchten Punktwolken aus Abb.56, S.53. Man sieht wieder deutlich die Diskrepanzen im Bereich der Nase. (rot = Gesichtspunktwolke; schwarz = Gipsmaskenpunktwolke).

4.2.2.2. Fehlervektor

Die Richtung der Abweichung zwischen Gipsmaskenpunktwolke und Gesichtspunktwolke war bei den einzelnen Meßpunkten unterschiedlich.

Nasenspitze

Bei den 15 Probanden wich die Nasenspitze in der Gipsmaskenpunktwolke im Vergleich zur Gesichtspunktwolke in 7 Fällen nach kaudal und in 3 Fällen nach kranial ab. Nach posterior wich die Nasenspitze in 3 Fällen und nach anterior in 1 Fall ab (siehe Abb.60). Keine Unterschiede zwischen Gesichtspunktwolke und Gipsmaskenpunktwolke an der Nasenspitze wurde lediglich bei einem der 15 Probanden festgestellt (siehe Abb.60).

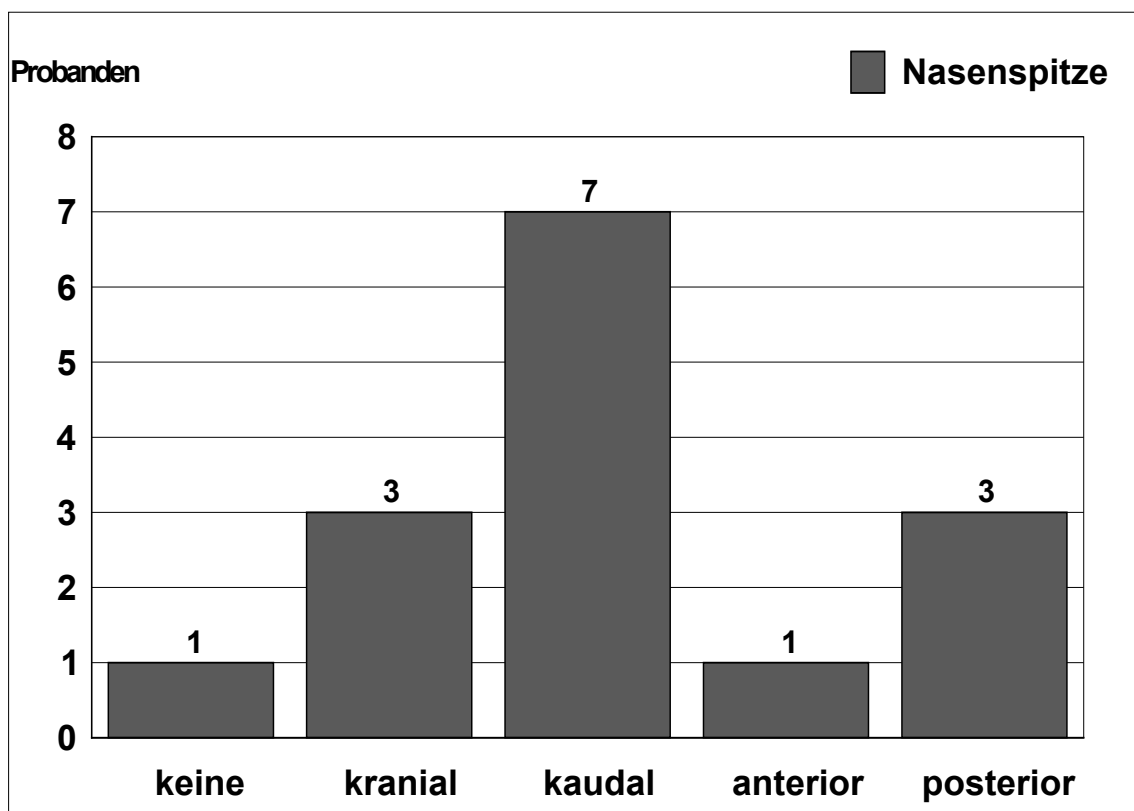


Abb.60: Verteilung der Abweichungsrichtungen zwischen korrespondierenden Gesichts- und Gipsmaskenpunktwolken bei 15 Probanden an der Nasenspitze.

Nasenrücken

Am Nasenrücken wich die Gipsmaskenpunktwolke in 9 Fällen nach kaudal und nur in 1 Fall nach kranial von der Gesichtspunktwolke ab (siehe Abb.61). Keine Unterschiede zwischen beiden Punktvolken wurden in 3 Fällen festgestellt.

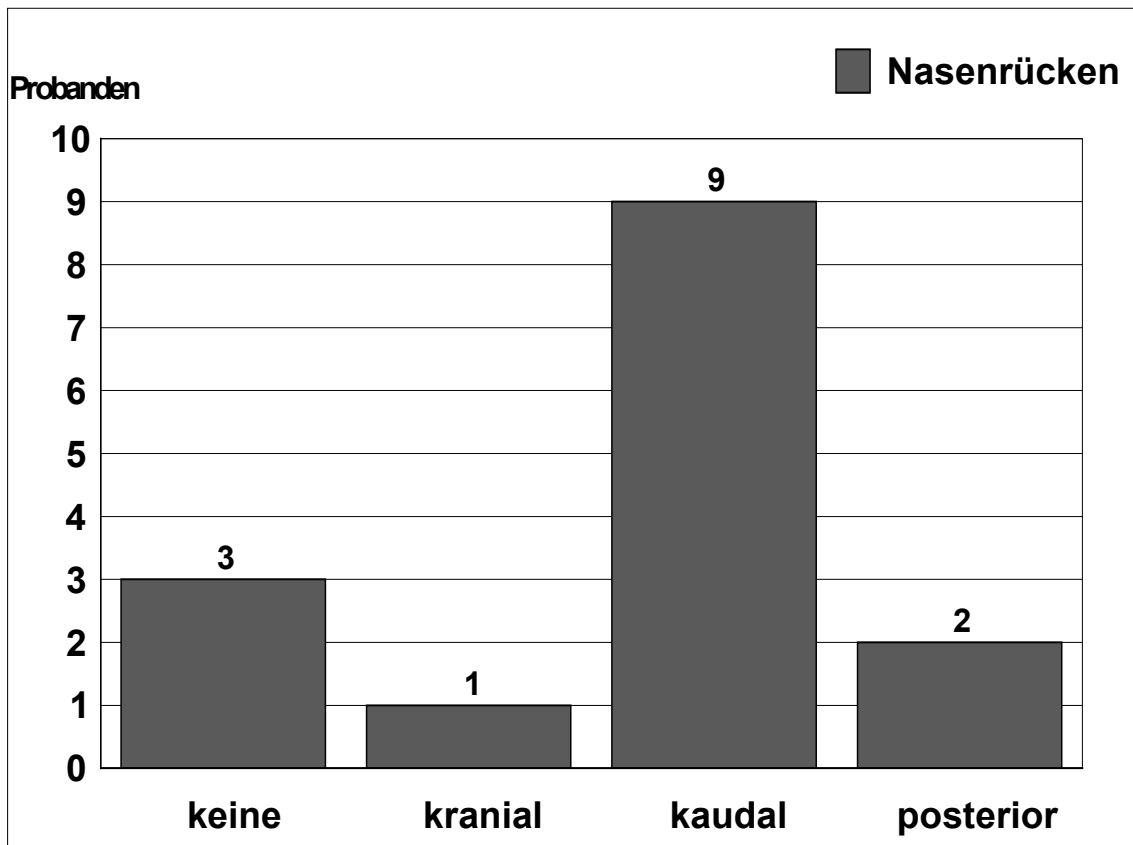


Abb.61: Verteilung der Abweichungsrichtungen zwischen korrespondierenden Gesichts- und Gipsmaskenpunktvolken bei 15 Probanden am Nasenrücken.

Subnasale

Am Meßpunkt Subnasale wich die Gipsmaskenpunktwolke bei den 15 Probanden in 8 Fällen nach posterior, in 4 Fällen nach kaudal und in 2 Fällen nach kranial von der korrespondierenden Gesichtspunktwolke ab (siehe Abb.62, S.59). Eine komplette Übereinstimmung zwischen Gipsmasken- und Gesichtspunktwolke wurde in keinem Fall beobachtet.

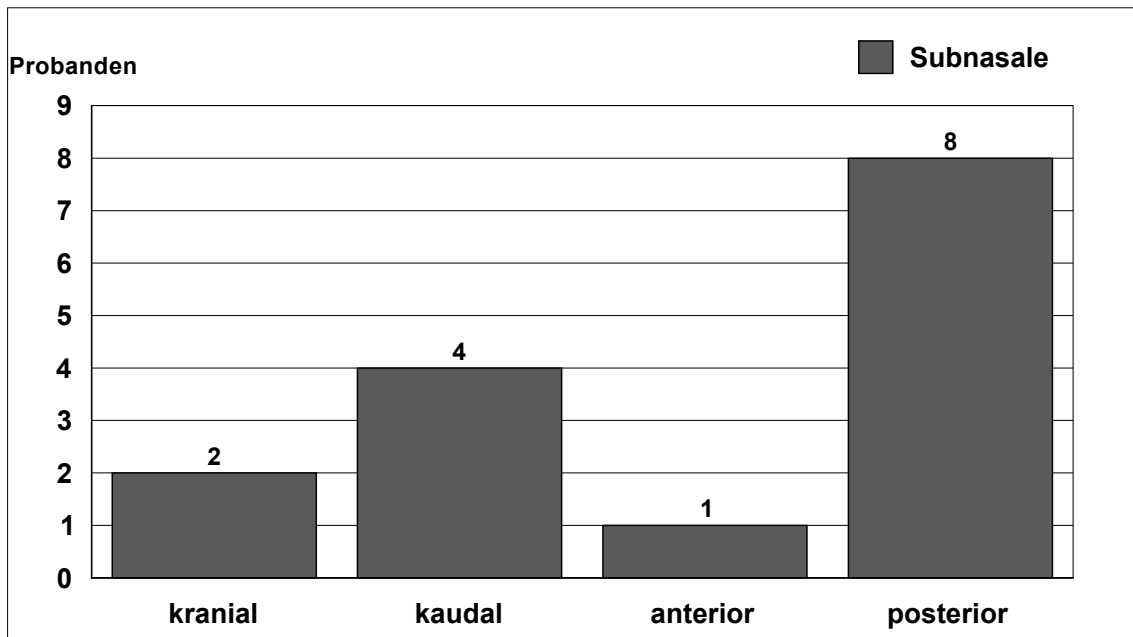


Abb.62: Verteilung der Abweichungsrichtungen zwischen korrespondierenden Gesichts- und Gipsmaskenpunktvolken bei 15 Probanden am Subnasalpunkt.

Oberlippe

Am Meßpunkt Oberlippe wich die Gipsmaskenpunktvolke bei den 15 Probanden in 6 Fällen nach posterior, in 4 Fällen nach kaudal und bei 3 Fällen nach kranial ab (siehe Abb. 63).

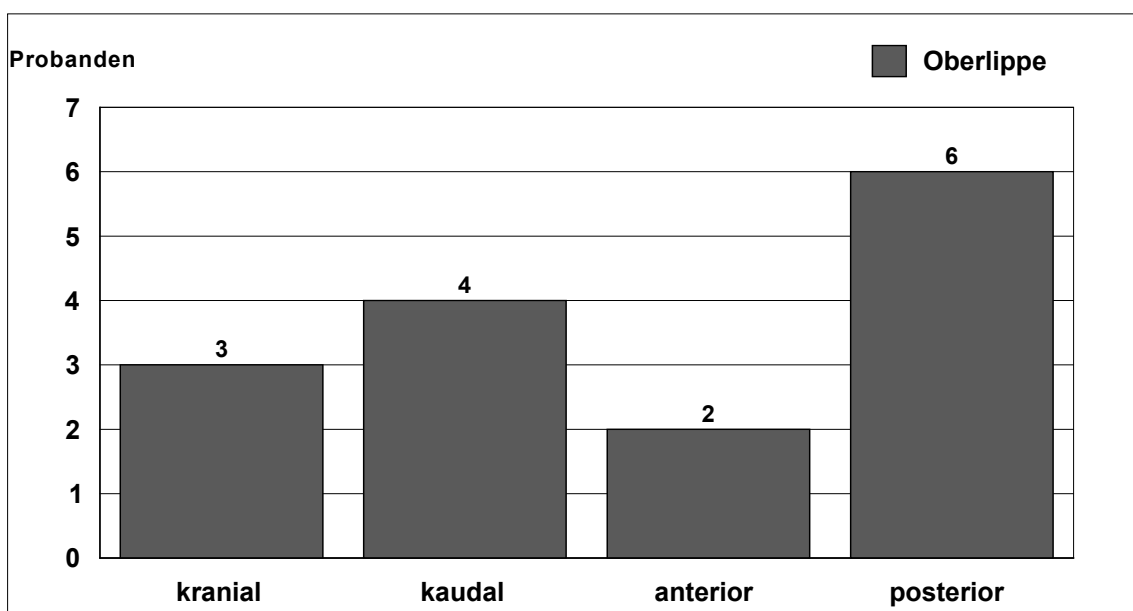


Abb.61: Verteilung der Abweichungsrichtungen zwischen korrespondierenden Gesichts- und Gipsmaskenpunktvolken bei 15 Probanden an der Oberlippe.

WANGE

Die paarigen Meßpunkte Wange rechts und Wange links wurden bei der Auswertung der Wange zusammengefaßt, so daß sich bei 15 Probanden insgesamt 30 Meßwerte ergaben (n=30). In 22 Fällen wurde eine Abweichung der Gipsmaskenpunkt看ke nach medial, in 6 Fällen nach posterior und in 2 Fällen nach anterior im Vergleich zur korrespondierenden Gesichtspunkt看ke festgestellt (Abb.64).

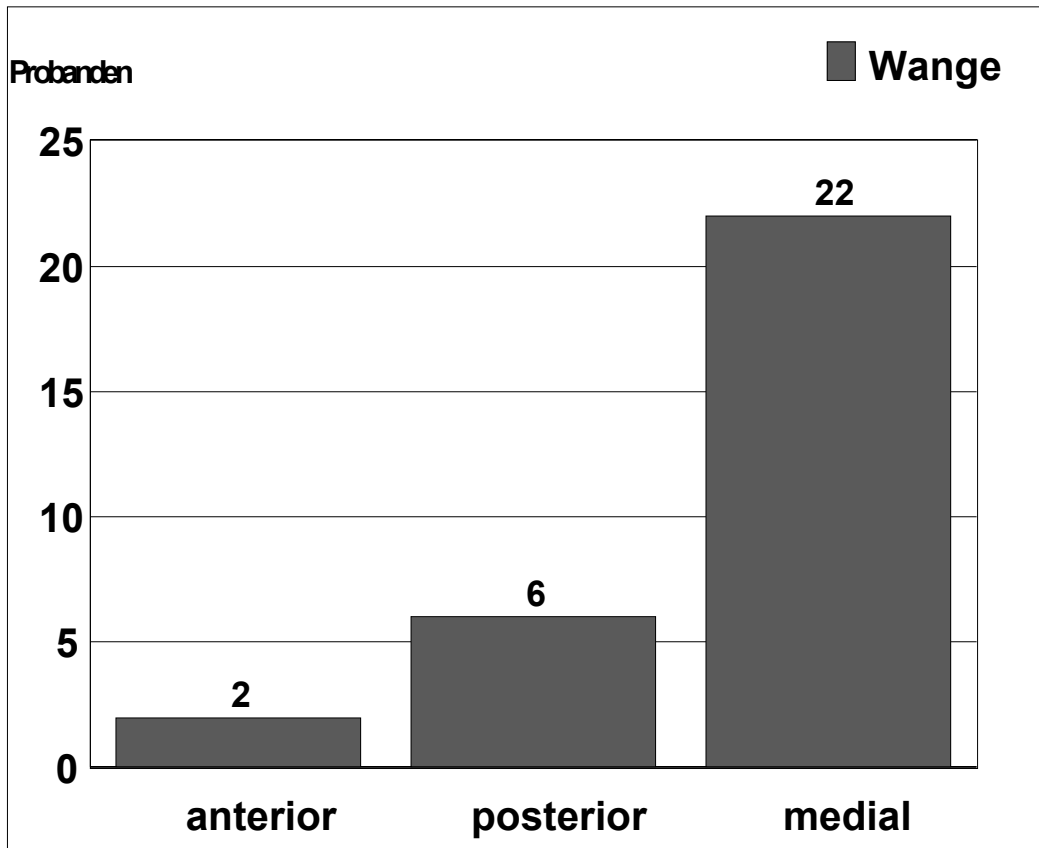


Abb.64: Verteilung der Abweichungsrichtungen zwischen korrespondierenden Gesichts- und Gipsmaskenpunkt看ken bei 15 Probanden am Meßpunkt Wange.

Stirn

Am Meßpunkt Stirn wich bei den 15 Probanden die Gipsmaskenpunkt看ke in 9 Fällen nach posterior und in 1 Fall nach anterior ab (siehe Abb. 65, S.61). In 5 Fällen war kein Unterschied zwischen den beiden korrespondierenden Punkt看ken am Meßpunkt Stirn zu erkennen.

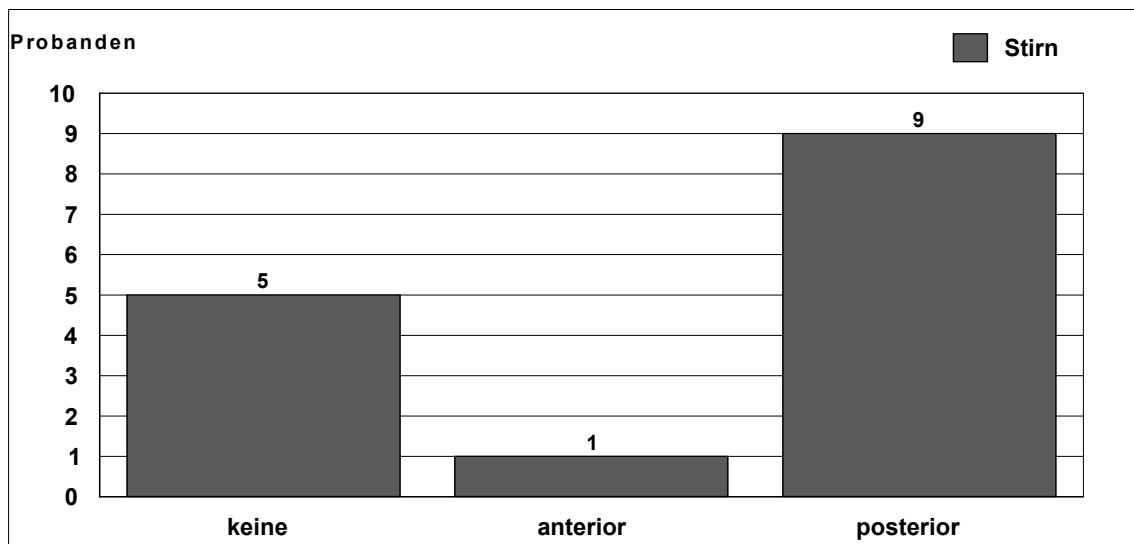


Abb.65: Verteilung der Abweichungsrichtungen zwischen korrespondierenden Gesichts- und Gipsmaskenpunktvolken bei 15 Probanden am Meßpunkt Stirn.

Glabella

Am Meßpunkt Glabella wich die Gipsmaskenpunktvolke in 6 Fällen (n=15) von der Gesichtspunktvolke nach posterior und in 2 Fällen nach kaudal ab. Keine Unterschiede der beiden korrespondierenden Punktvolken erkannte man bei 6 der Probanden für den Meßpunkt Glabella (siehe Abb.66). Eine Abweichung nach anterior trat in einem Fall auf.

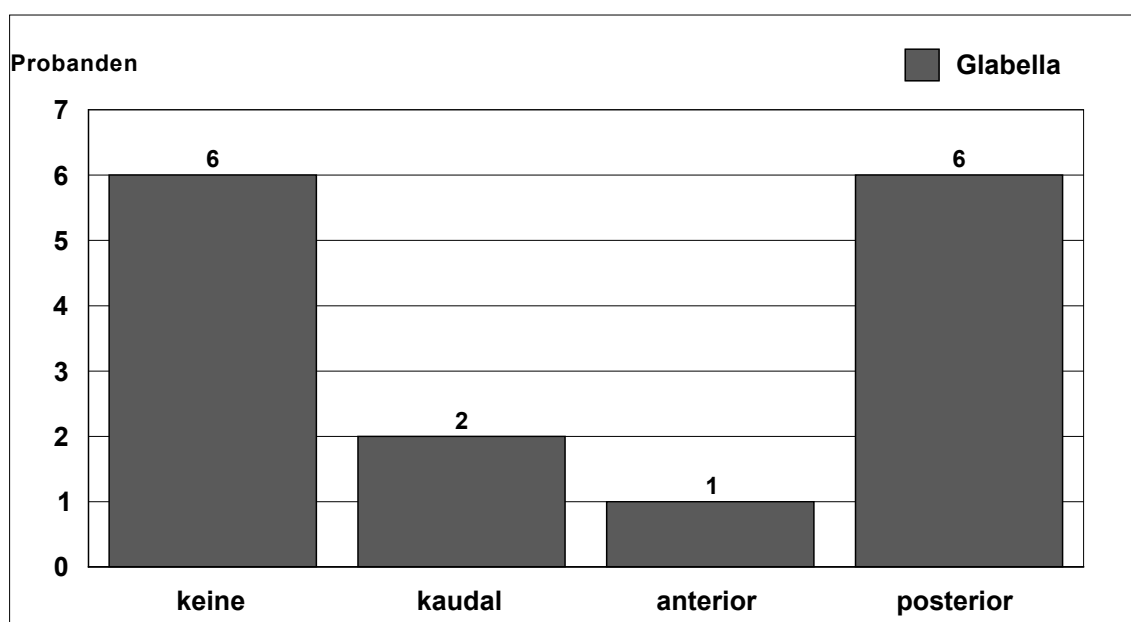


Abb.66: Verteilung der Abweichungsrichtungen zwischen korrespondierenden Gesichts- und Gipsmaskenpunktvolken bei 15 Probanden am Meßpunkt Glabella.

Unterlippe

Am Meßpunkt Unterlippe wich die Gipsmaskenpunktwolke in 8 Fällen (n=15) von der Gesichtspunktwolke nach posterior, in 5 Fällen nach kranial und in 2 Fällen nach kaudal ab (siehe Abb. 67).

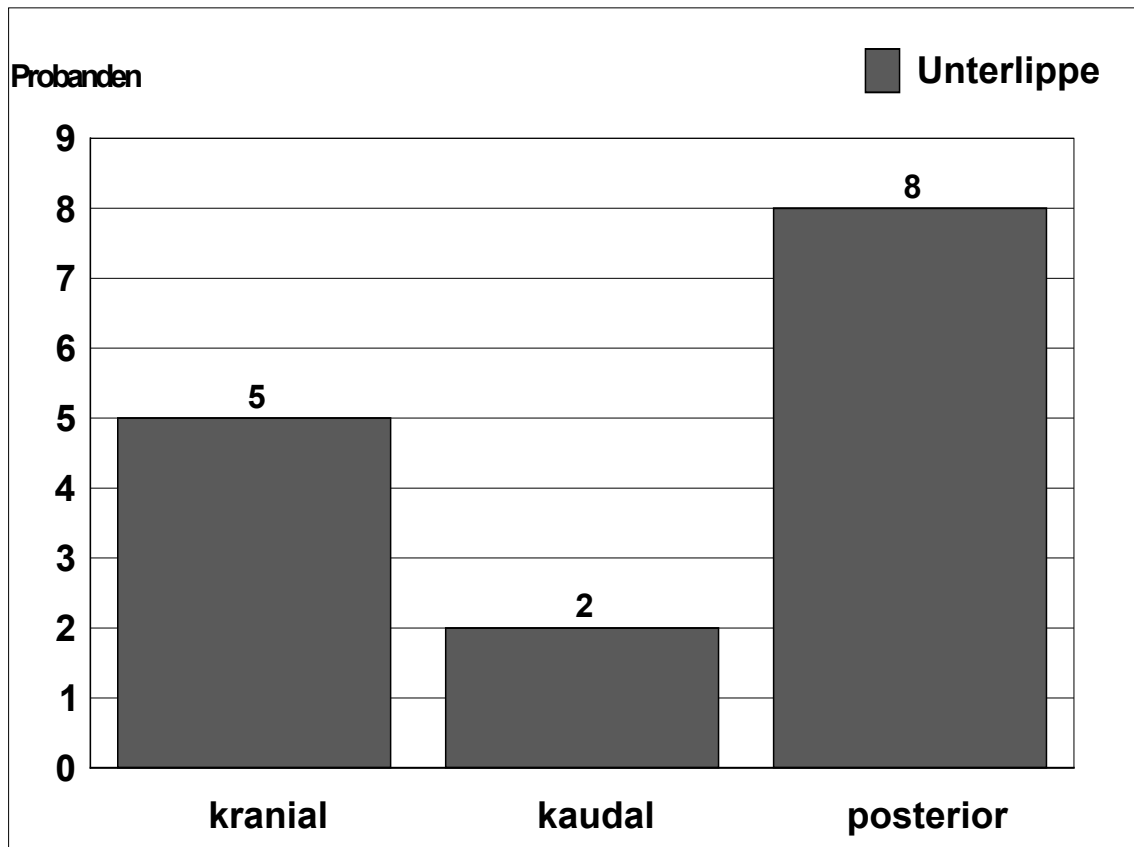


Abb.67: Verteilung der Abweichungsrichtungen zwischen korrespondierenden Gesichts- und Gipsmaskenpunktwolken bei 15 Probanden am Meßpunkt Unterlippe.

Kinn

Am Meßpunkt Kinn wich die Gipsmaskenpunktwolke in 8 Fällen (n=15) von der korrespondierenden Gesichtspunktwolke nach posterior, in 4 Fällen nach kranial und in 2 Fällen nach kaudal ab. In keinem einzigen Fall konnte eine Übereinstimmung der beiden Punkt wolken festgestellt werden (siehe Abb.68, S.63). Eine Abweichung nach anterior trat dagegen in einem Fall auf.

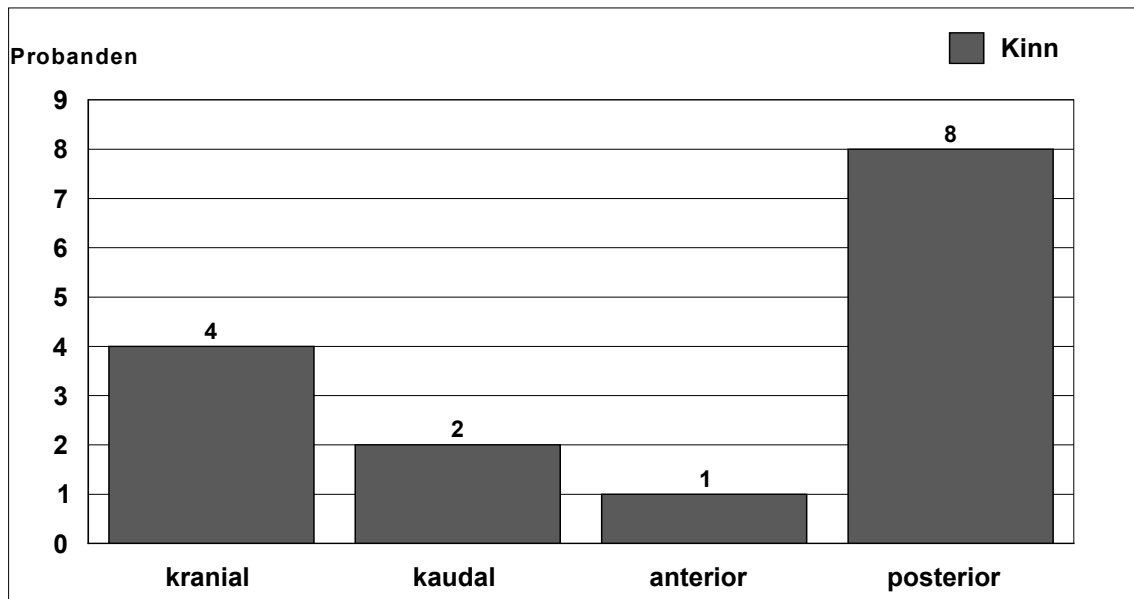


Abb.68: Verteilung der Abweichungsrichtungen zwischen den korrespondierenden Gesichts- und Gipsmaskenpunktvolken bei 15 Probanden am Meßpunkt Kinn.

Submentale

Am Meßpunkt Submentale wich die Gipsmaskenpunktvolke bei 13 der 15 Probanden von der Gesichtspunktvolke nach kranial und bei 2 Probanden nach kaudal ab (siehe Abb. 69).

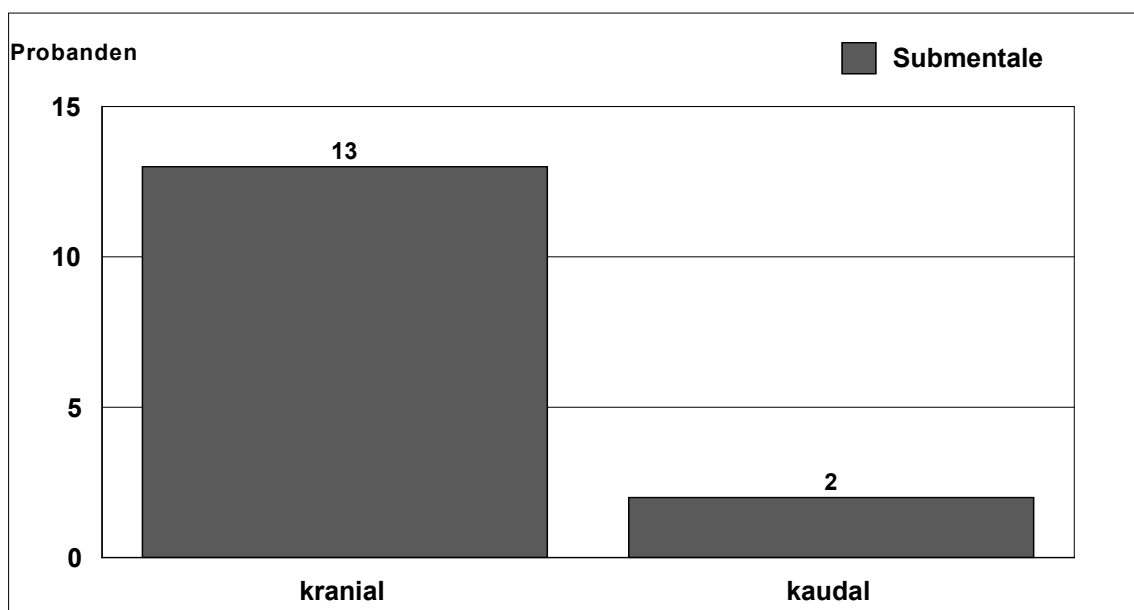


Abb.69: Verteilung der Abweichungsrichtungen zwischen korrespondierenden Gesichts- und Gipsmaskenpunktvolken bei 15 Probanden am Meßpunkt Submentale.

4.2.3. Atmungsabhängigkeit

Drei Probanden atmeten während der Gesichtsabformung nicht durch Nasen-, sondern durch Mundröhrchen (siehe Kapitel "METHODIK"). Bei den "Mundatmern" fiel die durchschnittliche Abweichung der Gipsmaskenpunkt wolke von der Gesichtspunkt wolke vor allem im unteren Gesichtsdrittel deutlich größer aus. Im Bereich der Ober- und Unterlippe war die durchschnittliche Differenz doppelt so groß und im Bereich Kinn und Hals sogar dreimal so groß wie bei den "Nasematmern" (siehe Abb.70 und Abb.71, S.65). Auffallend ist, daß die Abweichungen im Bereich der Nase bei den "Nasematmern" (n=12) nicht viel größer war, als bei den "Mundatmern" (n=3).

	Nasematmung	Mundatmung
Stirn	1,05 mm	0,63 mm
Glabella	1,06 mm	0,50 mm
Nasentrücken	1,58 mm	0,80 mm
Nasenspitze	3,28 mm	2,73 mm
Subnasale	2,28 mm	2,43 mm
Wange links	1,63 mm	2,30 mm
Wange rechts	2,11 mm	2,09 mm
Oberlippe	2,58 mm	4,17 mm
Unterlippe	2,13 mm	5,37 mm
Kinn	2,35 mm	8,37 mm
Submentale	2,71 mm	6,27 mm

Abb.70: In der Tabelle sind für jeden Atmungstyp (12 Nasematmer und 3 Mundatmer) die durchschnittlichen Abweichungen der Gipsmaskenpunkt wolken von den Gesichtspunkt wolken für jeden Meßpunkt dargestellt. Vor allem bei den Meßpunkten Ober-, Unterlippe, Kinn und Submentale differieren die durchschnittlichen Abweichungen je nach Atmungstyp stark.

Die besonders starken Abweichungen im unteren Gesichtsdrittel bei den "Mundatmern" (siehe Abb.71, S.65) sprechen für eine muskuläre Mitursache für Diskrepanzen, die zwischen korrespondierenden Gipsmasken- und Gesichtspunktfolgen gemessen werden.

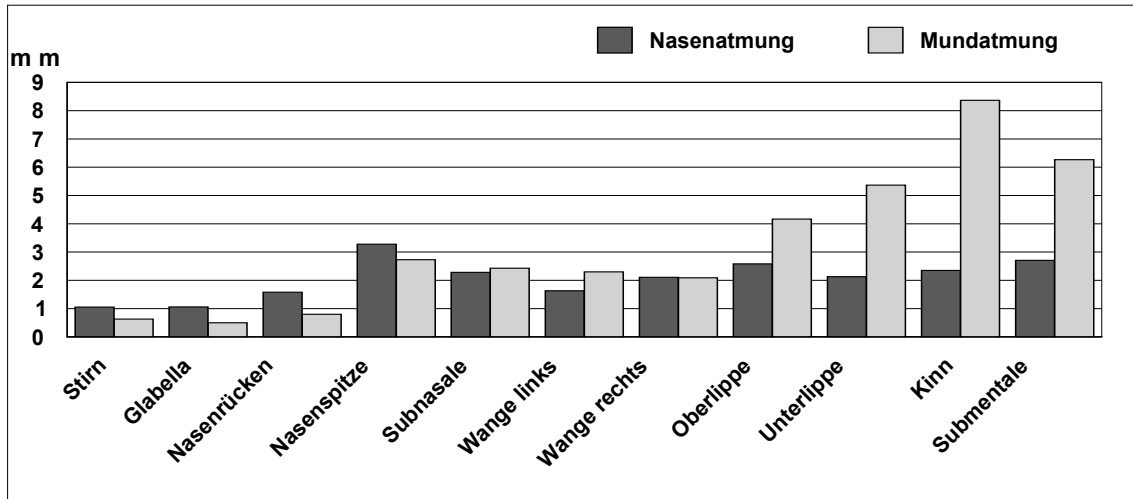


Abb.71: Vergleich der Abweichungen zwischen Gipsmaskenpunktfolge und korrespondierender Gesichtspunktfolge für die einzelnen Meßpunkte bei Nasen- und bei Mundatmern.

Weist man die einzelnen Meßpunkte den Gesichtsregionen zu, so ergibt sich eine regionale Verteilung, die die Abweichungsunterschiede bei Nasen- und Mundatmern besonders deutlich macht (siehe Abb.72).

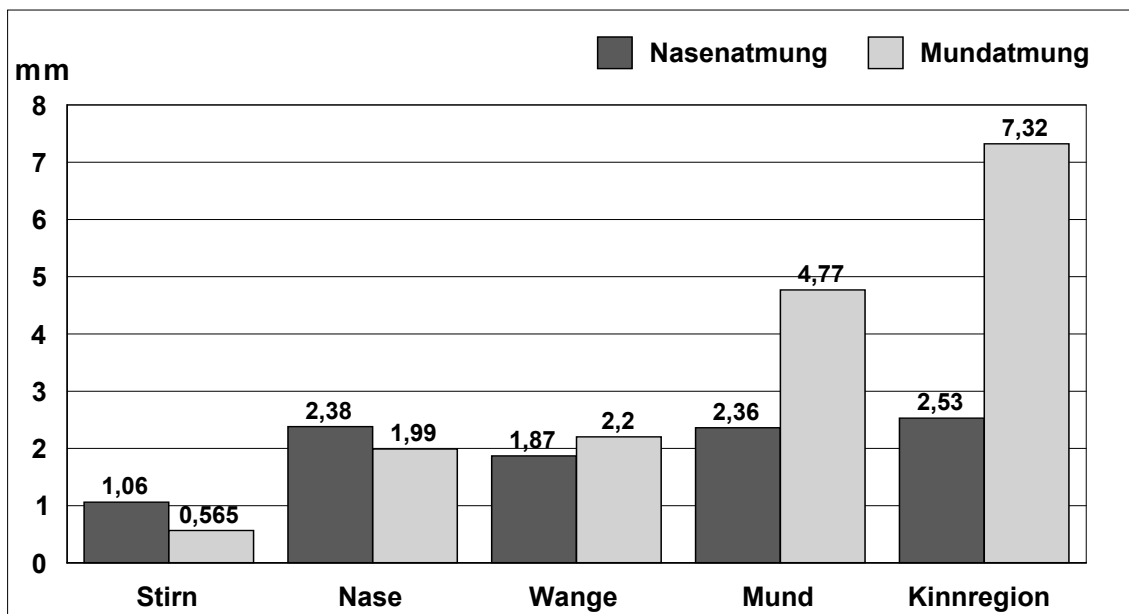


Abb.72: Regionale Verteilung der Diskrepanzen zwischen Gipsmaskenpunktfolge und Gesichtspunktfolge bei Nasen- und Mundatmung.

4.2.4. Geschlechtsabhängigkeit

Von den 15 Probanden waren 7 weiblich und 8 männlich. Für keinen der 11 Meßpunkte sind für die Größe und die Richtung der Abweichungen besondere Unterschiede zwischen den Geschlechtern erkennbar (siehe Abb.73).

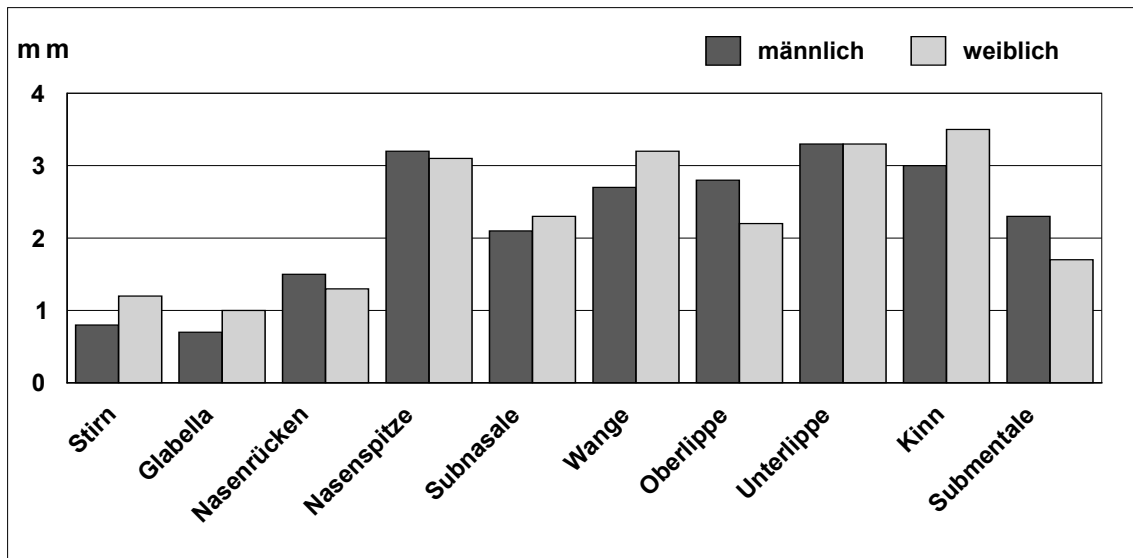


Abb.73: Verteilung der Abweichungen zwischen Gipsmaskenpunktwolken und Gesichtspunktwolken bei Frauen (n=7) und Männern (n=8).

4.2.5. Systematischer und zufälliger Fehler

Die Genauigkeit der Gipsmasken kann durch folgende systematische Fehlerquellen beeinträchtigt werden: Kontraktions- und Expansionseffekte des Gipses führen während der Abbindezeit zu Dimensionsveränderungen der Gipsmaske, die sich je nach regionaler Dicke der Gipsschicht unterschiedlich stark auswirken. Außerdem kann die Gipsschicht durch ihr Gewicht während der Abformung das faciale Weichgewebe verdrücken. Dasselbe gilt für die Beatmungsröhrchen, die den Naseneingang deformieren können. Der zufällige Fehler hatte seine Ursachen in technischen Fehlern des Behandlers und Technikers (z.B. zu großzügige Gipsabtragung mit der Fräse bei der nachträglichen Entfernung von Gipsperlen), aber auch in Zufallsbewegungen des Probanden während der Abformung. Die Abweichungen zwischen Probandengesicht und korrespondierender Gipsmaske waren an Stirn, Glabella und Nasenrücken gering, an Nasenspitze, Mund und Kinnbereich jedoch erheblich.

4.3. Klinischer Fall

Bei einer Patientin wurden exemplarisch die Oberflächenveränderungen im Rahmen einer Dysgnathie-Operation untersucht. Die Patientin zeigte präoperativ in der FRS-Analyse eine mandibuläre Prognathie und eine maxilläre Retrognathie. In der bignathen Operation wurde der Unterkiefer um 7 mm nach posterior und der Oberkiefer um 5 mm nach anterior skelettal verlagert. Die Gesichtsoberfläche der Patientin wurde einmal präoperativ und einmal postoperativ digitalisiert und die beiden Punktwolken miteinander verglichen (siehe Abb.74 und Abb.75, S.68). Da die skelettalen Verschiebungen durch einen Vergleich zwischen prä- und postoperativem FRS bekannt waren (Oberkieferverlagerung um 5 mm und Unterkiefernachverlagerung um 7 mm), konnte jetzt durch Vermessung der geschnittenen ineinandergematchten prä- und postoperativen Punktwolken (siehe Abb.77, S.69 und 78, S.70) beurteilt werden, zu welchem Prozentsatz die Weichteile den skelettalen Veränderungen postoperativ gefolgt sind (siehe Abb.79, S.68): Das Weichteilkinn ist zu 100%, die Unterlippe zu 60% und die Oberlippe zu 74% den skelettalen Veränderungen gefolgt (siehe Abb.79, S.71).

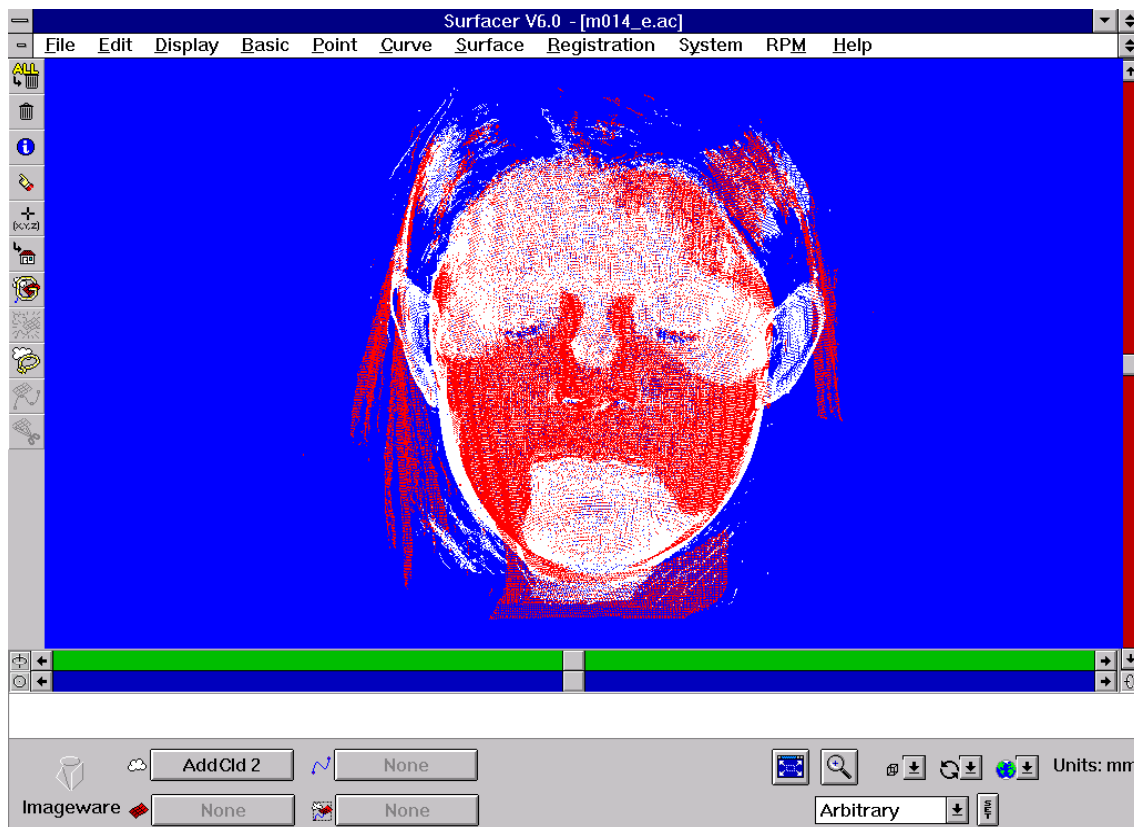


Abb.74: Prä- (weiß) und postoperative (rot) Punktwolken, die miteinander gematcht wurden (Ansicht von frontal).

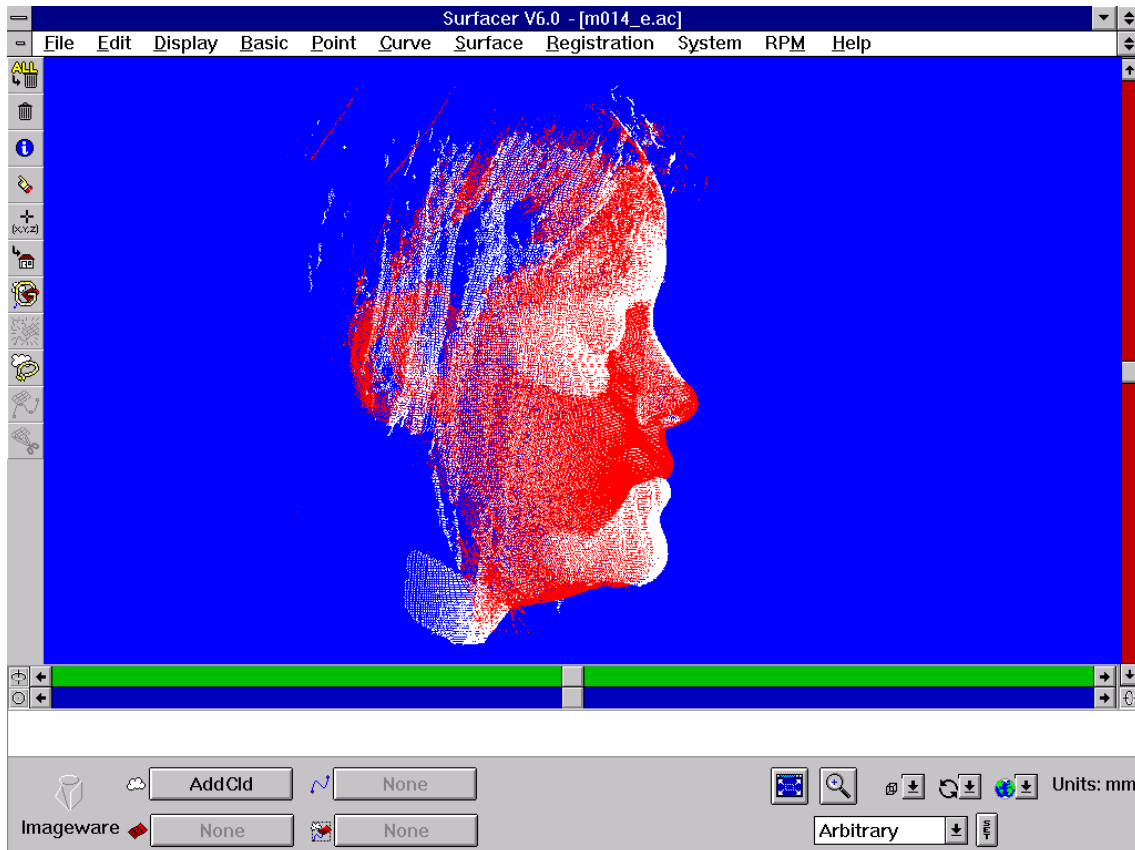


Abb.75: Gleiche Punktwolken wie in Abb.74, S.67 (Ansicht von lateral).

Nach Ausmessen der gematchten Punktwolken (siehe Abb.74, S.67) konnten für die Meßpunkte folgende Differenzen (in mm) ermittelt werden (siehe Abb.76).

	Postoperative Veränderung	Richtung
Stirn	0,3 mm	posterior
Glabella	0,4 mm	posterior
Nasentrücken	1,0 mm	kaudal
Nasenspitze	0,7 mm	anterior
Subnasale	2,5 mm	anterior
rechte Wange	4,7 mm	anterior
linke Wange	3,0 mm	anterior
Oberlippe	3,7 mm	anterior
Unterlippe	4,5 mm	posterior
Kinn	7,0 mm	posterior
Submentale	3,4 mm	kaudal

Abb.76: Postoperative Veränderung der Weichteilpunkte.

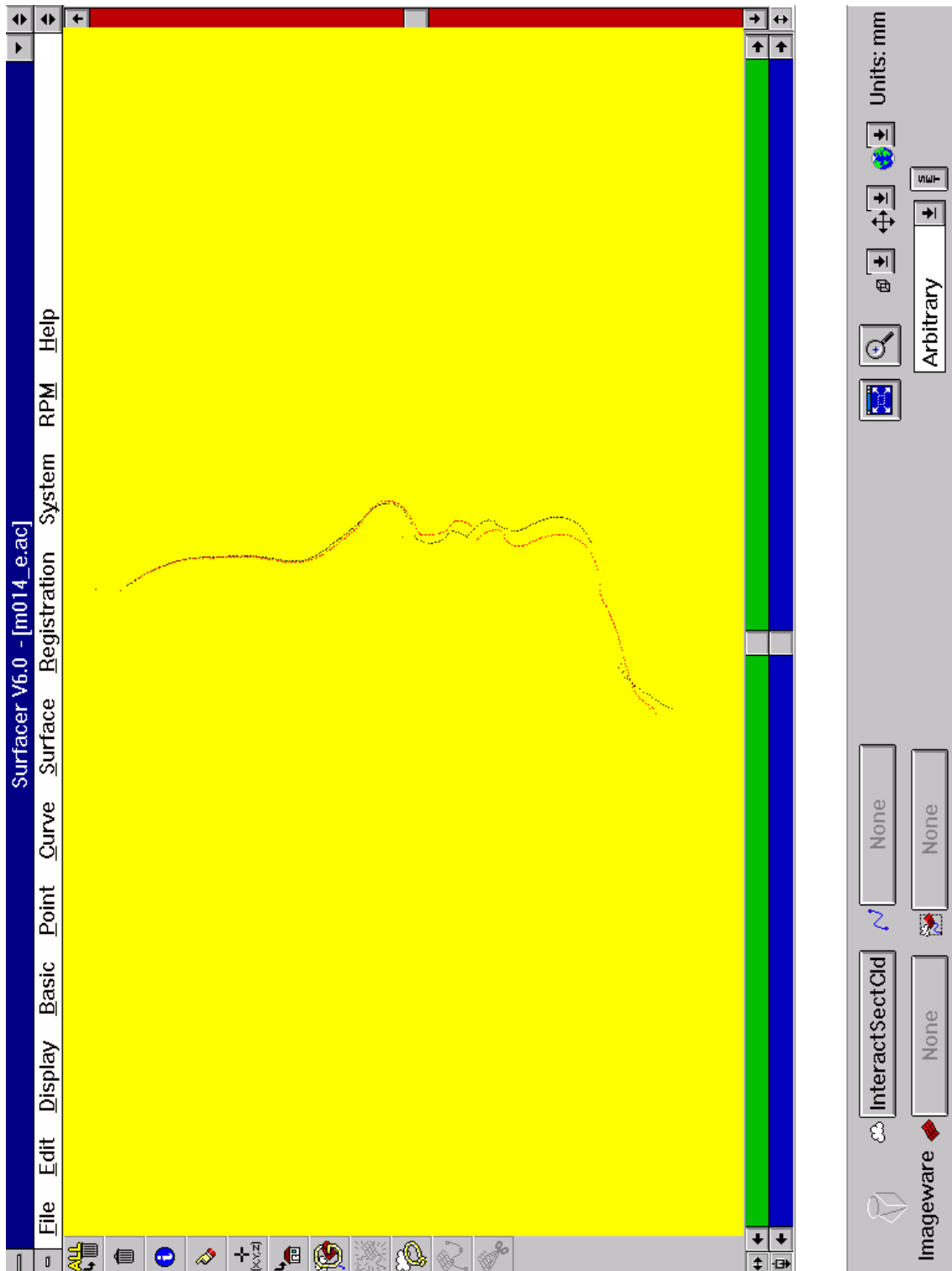


Abb.77: Sagittale Cross-section der gematchten Punktwolken aus Abb. 74. Die schwarze Linie zeigt die präoperative, die rote Linie die postoperative Lage der Weichteiloberfläche. Für die verschiedenen Meßpunkte (z.B. Stirn, Nasenspitze, Kinn) konnten nun die Differenzen (in mm) gemessen werden (siehe Abb.76, S.68 und Abb.79, S.71).

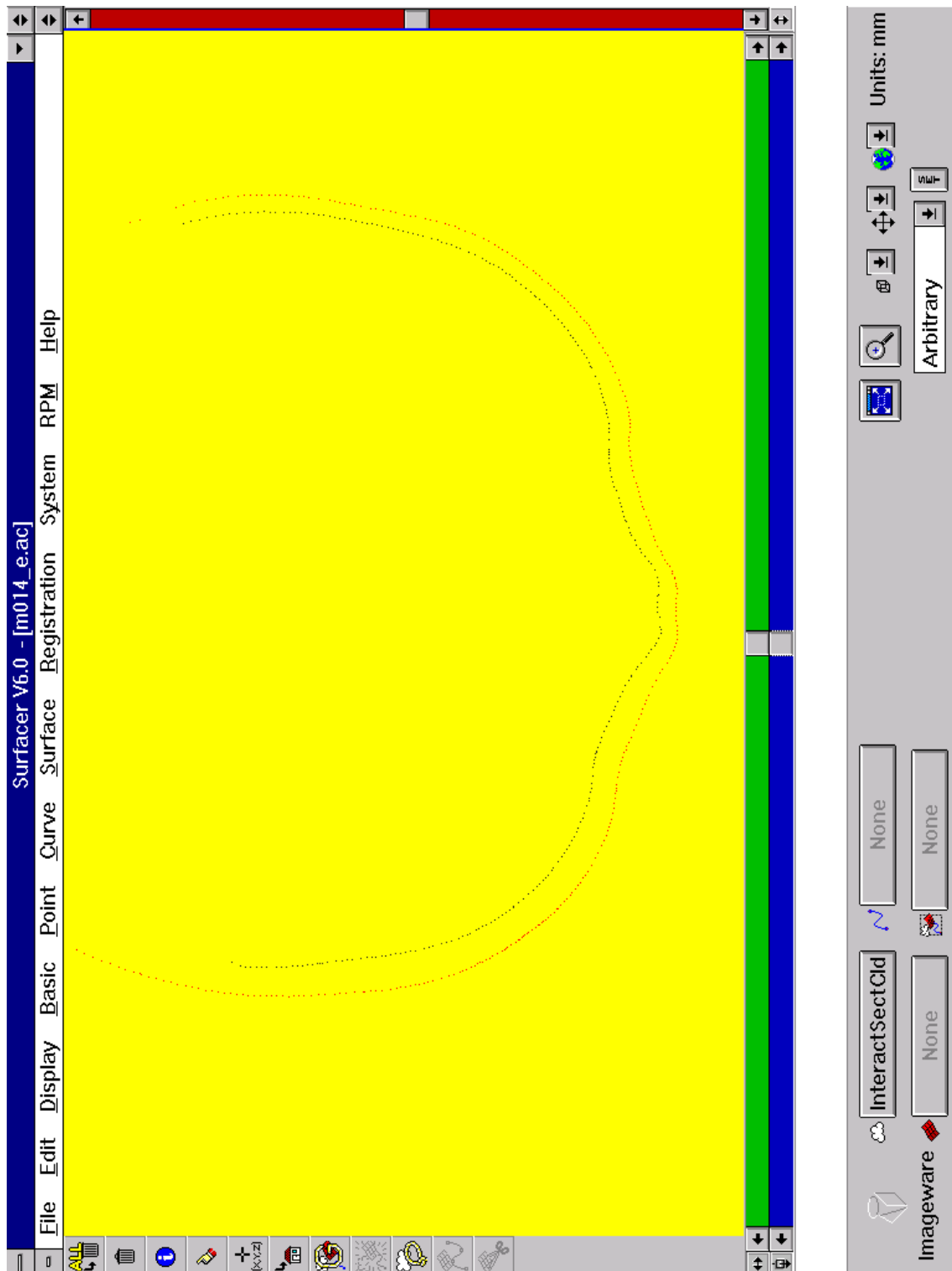


Abb.78: Horizontale Cross-section der gematchten Punktwolken aus Abb. 74, S.67. Der Horizontalschnitt liegt zwischen Subnasale und Lippenrot der Oberlippe. Er zeigt den postoperativen (rot) und präoperativen (schwarz) Verlauf der facialen Weichteiloberfläche.

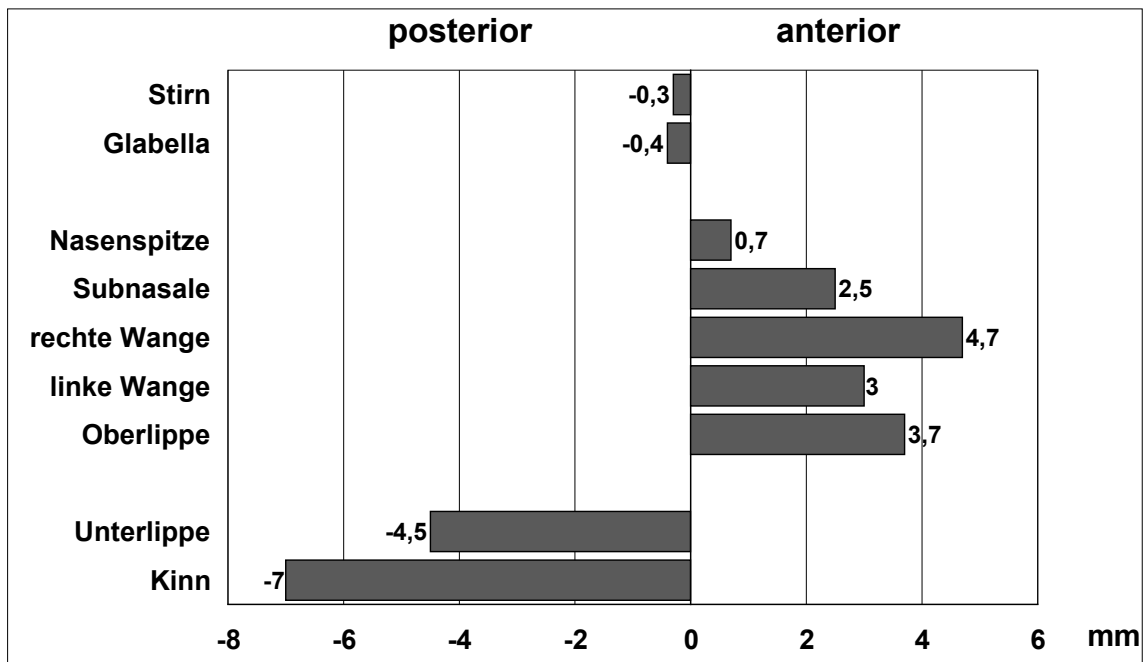


Abb.79: Darstellung der Diskrepanzen zwischen prä- und postoperativer Punktwolke an den einzelnen Meßpunkten. Die Meßpunkte im Einflußbereich des Oberkiefers haben sich postoperativ nach anterior, die im Einflußbereich des Unterkiefers stehenden haben sich dagegen nach posterior bewegt.

5. Diskussion

Die Validität und Reliabilität des Tricolite-Verfahrens bei der fazialen Oberflächenerfassung sind sehr gut. Im klinischen Einsatz bei der prä- und postoperativen Vermessung eines Patienten zeigte das Verfahren in Bezug auf Meßgenauigkeit und Anschaulichkeit der Ergebnisse exemplarisch seine Stärken. Im Gegensatz zu vielen etablierten Verfahren ist eine dreidimensionale Weichteildarstellung und -vermessung möglich, so daß nicht nur das Profil, sondern auch die für das ästhetische Erscheinungsbild so wichtigen Halbprofile einer objektiven Messung zugänglich sind. Mit Hilfe des Tricolite - Verfahrens konnte in dieser Arbeit ferner gezeigt werden, daß Gesichtsmasken aus Gips bei der fazialen Weichteilvermessung nur sehr eingeschränkt als indirekte Meßgrundlage in Frage kommen, da der Übertragungsfehler für das mittlere und untere Gesichtsdrittel bei der Maskenherstellung relativ groß und kaum beherrschbar ist (siehe Kapitel 5.3.).

5.1. Das Tricolite - Verfahren im Vergleich

Wie in der Literaturübersicht beschrieben wurden bislang verschiedenste Verfahren zur Weichteilvermessung und -analyse des menschlichen Gesichts entwickelt. Neben den etablierten zweidimensionalen Verfahren, die auf der Auswertung von Fotos (Fotostat-Verfahren) und seitlichen Röntgenbildern (FRS- Kephalmetrie) beruhen, sind dies im wesentlichen dreidimensionale Interpolierungen dieser etablierten Verfahren (Stereophotogrammetrie und 3-dimensionale Berechnungen aus FRS und FRF). Einzelpunktmessungen an den Gesichtsweichteilen im dreidimensionalen Raum sind der methodische Ansatz beim Digigraph und der Infrarotmethode (Ferrario und Sforza,1996), während bei der Moiré-Fotographie und beim Einsatz eines Lasers (Cyberware) die komplette digitale Oberflächenerfassung des Gesichts möglich ist.

Im Vergleich mit diesen Methoden der Weichteilerfassung erweist sich das in dieser Arbeit untersuchte Tricolite-Verfahren in vielen Punkten, auf die in den folgenden Unterkapiteln eingegangen wird, als überlegen.

5.1.1. Meßgenauigkeit

5.1.1.1. Validität

Wie bei allen Meßverfahren, die mit strukturiertem Licht arbeiten, ist auch bei TRICOLITE die Meßgenauigkeit abhängig von der Auflösung. Meßfeldgröße und Dimensionierung des Meßobjekts sind hierbei die limitierenden Faktoren (Strutz und Riechmann, 1996). Je kleiner das Meßobjekt ist, desto geringer ist der systematische Fehler beim Einsatz von strukturiertem Licht, wobei dies nur bis zu einer bestimmten Mindestgröße gelten kann, da bei deren Unterschreiten Beugungserscheinungen die Meßgenauigkeit drastisch einschränken. Diese überproportionale Zunahme des Meßfehlers gilt ebenso für besonders große Meßobjekte, bei denen die Leistungsfähigkeit des Projektors und die Hintergrundhelligkeit limitierende Faktoren darstellen. Bei der Vermessung von Gesichtern liegt die erforderliche Meßfeldgröße und damit die erreichbare Auflösung dagegen in einem optimalen Bereich, in dem weder Beugungserscheinungen auftreten noch die Projektorleistung an ihre Grenzen stößt.

Der systematische Fehler, der vor allem ein Maß für die physikalischen Grenzen des Tricolite-Verfahrens ist, liegt bei der Vermessung von Gesichtern mit durchschnittlich 0,2 mm in einem Bereich, der für Diagnose-, Analyse- und Prognosezwecke tolerierbar, ja sogar vernachlässigbar klein ist. Exakte Aussagen zum systematischen Fehler bei anderen fazialen Meßverfahren existieren in der Literatur leider nicht.

Moiré - Fotografie

Da die Moiré-Fotografie ebenfalls auf der Anwendung von strukturiertem Licht beruht, dürften für sie, zumindest theoretisch, die gleichen physikalischen Grundlagen zur Entstehung und Auswirkung des systematischen Fehlers gelten. Doch im Gegensatz zum Tricolite-Verfahren beschränkt sich die Moiré - Fotografie, die vor allem im japanischen Schrifttum beschrieben wurde, auf die Darstellung und Verdeutlichung von Gesichtsasymmetrien und -veränderungen (Kawai et al., 1990). Eine exakte digitale Erfassung

und Speicherung der Gesichtsoberfläche ist mit der Moire-Fotographie, die konzentrische Lichtkreise auf das Gesicht projiziert (Kawai et al., 1990), noch nicht möglich.

Laser (Cyberware)

Im Gegensatz dazu ermöglicht ein spezielles Laserverfahren (Cyberware) ähnlich wie bei unserem Verfahren die komplette digitale Erfassung und Speicherung der Gesichtsoberfläche (Girod et al., 1993). Obwohl es zum systematischen Fehler des Laser-Verfahrens leider noch keine gesicherten Aussagen gibt, dürfte er sich in einem ähnlichen Bereich wie beim Tricolite-Verfahren bewegen. Durch die relativ lange Meßzeit bei der Laser-Abtastung (10 s und länger) können jedoch durch Patientenbewegungen (z.B. Augenzwinkern, Schlucken usw.) Meßartefakte auftreten, die den zufälligen Fehler der Messung drastisch erhöhen dürften.

Digigraph und Infrarotmethode

Über den systematischen Fehler bei punktuell arbeitenden Meßmethoden wie Digigraph und Infrarotmethode (Ferrario und Sforza, 1996) ist in der Literatur ebenfalls nichts bekannt. Sicherlich ist er in beiden Verfahren nicht sehr groß, da die Ultraschall-Distanzmessung (beim Digigraph) und die Infrarot-Distanzmessung in der Meßtechnik schon lange etablierte und zuverlässige Meßverfahren sind. Bei beiden Verfahren liegt die Schwachstelle dagegen im Bereich des zufälligen Fehlers, da bei Meßzeiten von ca. 5 Minuten für die Einzelerfassung der 40 Meßpunkte Bewegungsartefakte durch den Patienten trotz spezieller Kopfhalterungen (Cephalostat) wohl kaum in den Griff zu kriegen sind.

FRS - Kephalmetrie

Bei der zweidimensionalen Kephalmetrie (FRS) ist der systematische Fehler sicherlich nicht mehr zu vernachlässigen. Gerade bei skelettalen Meßpunkten entstehen häufig nicht unerhebliche Identifizierungsprobleme (anatomische Überlagerungen, suboptimale Belichtungszeit), die neben aufnahmebedingten

Verzerrungs- und Vergrößerungseffekten die Meßgenauigkeit deutlich beeinträchtigen. Für die computergestützte FRS-Auswertung gilt dasselbe, da die entscheidende Problematik, nämlich die Meßpunkterkennung durch das menschliche Auge, bisher noch nicht befriedigend gelöst ist. Bei der Weichteilanalyse im FRS dagegen ist die Identifizierung der Meßpunkte, die allerdings auf den Bereich der Mitt-Sagittalen beschränkt bleiben, weit besser möglich als im skelettalen Bereich, da eine Erkennung nach Bariumsulfatbeschichtung der Weichteile frei von Überlagerungseffekten ist. Auch die Einstellung des Kopfes vor der FRS-Aufnahme stellt eine wesentliche Fehlerquelle bei der Datenaquisition dar.

Zusammenfassend kann die Validität des Tricolite-Verfahrens als sehr gut bezeichnet werden, da der systematische Fehler von lediglich 0,2 mm durch andere Meßverfahren nur schwer zu unterbieten ist. Ermöglicht wurde diese Präzision erst durch die Einführung eines speziellen Codierungsverfahrens (GRAY-CODE), das jedem einzelnen der 250000 zu digitalisierenden Oberflächenpunkte eine individuelle unverwechselbare Kennung zuweist. Zusammen mit dem Phasenshift, der eine exaktere Identifizierung der Hell-Dunkel-Übergänge ermöglicht, konnte so die Meßgenauigkeit beim Tricolite-Verfahren gegenüber herkömmlichen, nicht lichtcodierten Triangulationsverfahren nochmals um den Faktor 10 verbessert werden (Strutz und Riechmann, 1996).

5.1.1.2. Reliabilität

Wie in den vorigen Abschnitten bereits erwähnt hängt die Meßgenauigkeit eines Verfahrens nicht nur vom systematischen Fehler, der meist durch die physikalischen Grundlagen determiniert wird, sondern auch von Größe und Richtung des zufälligen Fehlers ab, der vor allem durch Bewegungsartefakte des Meßobjekts (z.B. Augenzwinkern, Schlucken) und aus Bedienungsfehlern der Meßapparatur resultiert. Da es sich bei der Fehleraddition um eine vektorielle Addition handelt, summieren sich die beiden Fehler im ungünstigsten Falle in ihrer skalaren Größe, im günstigsten Falle jedoch können sie sich sogar gegenseitig aufheben.

Die für die Größe des zufälligen Fehlers so entscheidenden Bewegungsartefakte lassen sich durch eine möglichst kurze Meßzeit minimieren. Beim Tricolite-Verfahren liegt diese unter einer Sekunde und ermöglicht so selbst die Messung bei kleinen Kindern und

unruhigen Patienten. Im Vergleich dazu liegen die Meßzeiten beim Laser-Verfahren (Cyberware) bei mindestens 10 Sekunden und beim Digigraph sogar bei 5 Minuten. Lediglich bei der dreidimensionalen Stereophotogrammetrie liegt die Meßzeit unter 0,1 Sekunden, so daß der zufällige Fehler durch Bewegungsartefakte hier sicherlich vernachlässigbar klein ist. Das zentrale Problem der Stereophotogrammetrie liegt jedoch im systematischen Bereich, da eine sichere und zuverlässige Pixel-Identifizierung nur für wenige Meßpunkte im Gesicht gewährleistet werden kann und diese einzelnen Meßpunkte noch vor der eigentlichen Messung auf die Gesichtshaut gemalt werden müssen (Kobayashi et al., 1990). Gerade bei der eindeutigen Identifizierung der einzelnen Meßpunkte zeigt das Tricolite-Verfahren durch die Gray-Codierung, bei der ca. 250000 Meßpunkte in Sekundenbruchteilen erkannt und codiert werden, seine Überlegenheit. Nur diese schnelle und zuverlässige Codierung ermöglicht während der Triangulation eine eindeutige Kommunikation zwischen den beiden Kameras und der Software über einzelne Gesichtspunkte und deren Zuordnung im dreidimensionalen Koordinatensystem.

Um den zufälligen Fehler des Tricolite-Verfahrens näher zu bestimmen wurden serielle Messungen an ein und demselben Meßobjekt durchgeführt. Dieser zufällige Fehler, der für ein unbewegtes Meßobjekt (Gipsmaske) bei durchschnittlich 0,12 mm und für das bewegte Meßobjekt (Probandengesicht) bei 0,41 mm lag, ist somit auch ein Maß für Reproduzierbarkeit und Reliabilität des Meßverfahrens. Obwohl diese Werte im Vergleich zu anderen Verfahren noch tolerierbar sind, sollten dennoch alle Verbesserungsbestrebungen dorthin gehen, die Meßzeit noch weiter zu verkürzen, um mögliche Bewegungsartefakte während der Messung zu verhindern. Gerade die große Diskrepanz zwischen dem zufälligen Fehler bei bewegtem (0,41 mm) und unbewegtem Meßobjekt (0,12 mm) spricht für die große Bedeutung, die Muskeltonus, unwillkürliche Bewegungen und aktueller Wassergehalt des Gewebes im Gesicht für die Größe des zufälligen Fehlers besitzen. Betrachtet man die regionale Verteilung dieses zufälligen Fehlers, so stellt man fest, daß beim unbewegten Meßobjekt vor allem die Wangenregion, beim bewegten Meßobjekt dagegen Nase, Mund und Hals durch einen überdurchschnittlich hohen Fehlerwert auffallen.

Beim unbewegten Meßobjekt wird der Wangenfehler wahrscheinlich durch Abschattungseffekte der Nase verursacht, die so die exakte Pixelcodierung (Gray-Code) und dreidimensionale Pixelerfassung

(Triangulation) stören. Beim bewegten Meßobjekt (Proband) fällt die Wange dagegen nicht aus dem Rahmen, sondern Nase, Mund und Hals sind mit einem überdurchschnittlichen Fehler behaftet, Regionen, die besonders anfällig für Bewegungsartefakte durch den Patienten sind (Nasatmung, Mundatmung, Schlucken). Die Forderung nach Minimierung der Meßzeit sollte deshalb für jedes Meßverfahren im Gesicht gelten. Da sich der Gesamtfehler für das Tricolite-Verfahren aus der Vektoraddition von systematischem und zufälligem Fehler ergibt, liegt er für das bewegte Meßobjekt (Patient) im ungünstigsten Fall (skalare Addition!) bei 0,61 mm, wahrscheinlicher aber im Bereich unter 0,5 mm (vektorielle Addition) und ist somit für Diagnose-, Analyse- und Prognosemessungen nahezu unbedeutend.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die Meßgenauigkeit aller Methoden durch systematische und zufällige Fehler beeinträchtigt wird.

Mit Ausnahme des in dieser Arbeit vorgestellten Tricolite-Verfahrens hat kein dreidimensionales Meßverfahren beide Fehlerarten gleichzeitig im Griff. Eine exakte Fehleranalyse ist in der Literatur bei keinem der anderen Meßverfahren beschrieben. Aber auch beim Tricolite-Verfahren, das einen sehr kleinen systematischen Fehler von nur 0,2 mm aufweist, läßt sich der zufällige Fehler von 0,41 mm weiter durch Verkürzung der Meßzeit reduzieren. Die Validität und Reliabilität des Tricolite-Verfahrens sind gut.

5.1.2. Meßaufwand und Preis

Die Messungen in dieser Arbeit wurden an einem Prototypen, der normalerweise in der Autoindustrie (CAD-CAM) Verwendung findet, durchgeführt. Vor den eigentlichen Messungen mußte das System aufwendig kalibriert werden, was mit enormem technischen und zeitlichen Aufwand verbunden war. Gegenüber den anderen etablierten Meßverfahren ist der hohe Meßaufwand und der hohe Preis für den Prototypen (ca. 100000 DM) noch der entscheidende Nachteil der Methode. Alle zukünftigen Bestrebungen sollten deshalb dahingehen, die Bedienungsfreundlichkeit des Verfahrens zu verbessern und den Preis zu reduzieren.

5.2. Optimierung des Tricolite - Verfahrens

5.2.1. Meßzeit

Um die in Kapitel 5.1. erhobene Forderung nach einer weiteren Reduzierung der Meßzeit zu realisieren, bieten sich zwei mögliche Ansätze: einmal die schnellere Datenverarbeitung durch eine verbesserte Hardware-Konfiguration (größerer Arbeitsspeicher, schnellerer Prozessor) und zum anderen eine Reduzierung der Datenmenge, die während des Meßvorgangs erfaßt wird. Eine Beschränkung auf z.B. 100000 statt 250000 Meßpunkte würde sich auf die Diagnose- und Analysequalität praktisch nicht auswirken, aber zu einer deutlichen Verringerung der Meßzeit führen.

5.2.2. Abschattungseffekte

Da das menschliche Gesicht mathematisch gesehen eine Freiformfläche mit individuellen, steilen, ja teilweise sogar untersch-gehenden Regionen ist, stellen Schattenphänomene, die eine optoelektronische Tiefendatenerfassung behindern, ein großes Problem dar. Dem kann durch Integration einer zusätzlichen dritten Kamera in das Meßsystem begegnet werden, um die Meßqualität auch bei steilen Meßflächen sicherzustellen.

5.2.3. Ökonomie

Um aus dem momentan zur Verfügung stehenden Prototypen aus der Autoindustrie ein auf die Erfordernisse der Medizin abgestimmtes, bedienungsfreundliches und preisgünstiges Meßgerät zu entwickeln, müssen vor allem die beiden folgenden Entwicklungsschritte realisiert werden:

1. Entwicklung einer kompakten, platzsparenden und bereits vollständig kalibrierten Meßeinheit.
2. Entwicklung einer bedienungsfreundlichen und intuitiven Software zur Erfassung, zum Matchen und automatisierten Auswerten der Daten.

5.3. Gipsmaskengenauigkeit

Gipsmasken, die nach Alginatabformung des Patientengesichts hergestellt werden, können als indirekte Meßgrundlage bei der Gesichtsvermessung dienen. Gerade bei Meßverfahren, die eine lange Meßzeit haben und deswegen oft starke Bewegungsartefakte durch den Patienten in Kauf nehmen müssen, bietet sich eine indirekte Messung über die Gipsmaske an. Da bei der Herstellung einer Gipsmaske eine ganze Kette von fehlerträchtigen arbeitstechnischen Einzelschritten durchlaufen wird, stellt sich die Frage, wie genau eine Gipsmaske die tatsächlichen anatomischen Verhältnisse wiedergibt. Da die digitale Erfassung des Probandengesichts über den Zwischenschritt der Gipsmaskenherstellung jedoch zwei fehlerträchtige Schnittstellen (Gipsmaskenherstellung und Tricolite-Messung) aufweist, sind diese Messungen fehlerträchtiger als die direkte Digitalisierung des Probandengesichts. Auch wurde die Erstellung der Gipsmasken und die korrespondierende direkte Digitalisierung des jeweiligen Gesichts nicht zum selben Zeitpunkt durchgeführt, was zu zusätzlichen Fehlermöglichkeiten geführt hat (zum Beispiel circadiane Veränderungen des Hautturgors, eventuell Zunahme des Körpergewichts in der Zwischenzeit).

In dieser Arbeit wurden 15 Probandengesichter und die jeweils entsprechenden Gipsmasken mit Hilfe des Tricolite-Verfahrens digitalisiert und die Diskrepanzen der korrespondierenden Punktwolken im Computer vermessen. Bezogen auf insgesamt 11 Meßpunkte pro Gesicht fiel der durchschnittliche Maskenfehler (Definition des Maskenfehlers siehe Kapitel 3.4.2., S.32) mit 2,32 mm eher moderat aus, während die regionale Verteilung dieses Fehlers großen charakteristischen Schwankungen unterworfen war. Vor allem Nasenspitze, Mund-, Kinn- und Halsbereich lagen mit 3-4 mm Maskenfehler deutlich über dem Durchschnitt, während Stirn und Glabella Fehlerwerte meist sogar unter 1 mm aufwiesen. Je dicker die Weichteildecke einer Gesichtsregion und je exponierter diese ist, desto stärker wird sie bei der Abformung offenbar verformt. Gerade das Auftragen der relativ schweren Gipsschicht zur Stabilisierung der Alginatabformung kann sicherlich für einen Großteil der Deformierungen an Nasenspitze und Untergesicht verantwortlich gemacht werden. Neben dem Gewicht des Abformmaterials spielen aber auch durch die Beatmungsschläuche verursachte Deformierungen im Nasenbereich und die horizontale

Lage des Probanden bei der Abformung, die den Unterkiefer und damit das Kinn durch die Schwerkraft nach posterior sinken läßt, eine Rolle. Eine Fixierung der Okklusion wäre hier eine Möglichkeit diesen Störfaktor abzuschwächen. Auch die relativ lange Abbindezeit des Alginats sowie Kontraktions- und Expansionseffekte der einzelnen Materialien tragen zum Maskenfehler bei.

Bei der Untersuchung der Richtung des Maskenfehlers zeigte sich, daß die Nasenspitze in der Mehrzahl der Fälle nach kaudal, Kinn und Unterlippe vornehmlich nach posterior, die Submentalregion nach kranial, die Wangenregion nach medial und die Oberlippe in unterschiedlichste Richtungen verformt wurde.

Die Richtung der Deformierung hängt sicherlich vom Vektor der beeinflussenden Kraft ab und ist so in einem gewissen Rahmen von der Technik des Untersuchers, der das Abformmaterial und die stabilisierende Gipsschicht mit einem Spatel aufbringt, abhängig. Die oben aufgezeigten Hauptfehlerrichtungen der einzelnen Regionen lassen sich so durch den Kraftvektor, den der Untersucher während der Abformung ausübt, und den Vektor der Schwerkraft (Mandibula nimmt im Liegen eine posteriore Lage ein) erklären.

Die in Kapitel 4.2.5. (S.64) dargestellten möglichen Fehlerursachen bei der Herstellung der Gipsmasken sind lediglich hypothetisch. Um gesicherte Aussagen hierzu machen zu können, müßte man die Versuchsbedingungen bei der Gipsmaskenanfertigung systematisch variieren (zum Beispiel Verwendung von Kunststoff statt Gips oder von Gips mit verschiedenen Füllkörpern).

5.3.1. Atmungsabhängigkeit

Die Atmung wurde während der Abformung bei 12 Probanden durch Nasenröhrchen, bei dreien dagegen durch ein Mundröhrchen gewährleistet. Während bei den Nasenatmern der Maskenfehler im Bereich der Nase nur geringfügig erhöht war (3,28 mm an der Nasenspitze), betragen die Abweichungen bei den Mundatmern im Bereich des Untergesichts 8 mm und mehr. Dies verdeutlicht, daß die Mundatmung durch statische Anspannung der Muskulatur beim Halten der Rohre offenbar zu wesentlich stärkeren Weichteilbewegungen im Gesicht führt als die Nasenatmung. Aus diesem Grund sollte man bei allen Gesichtsabformungen darauf achten, daß der Patient durch die Nase und nicht durch den Mund atmet. Nur so kann man die Störfaktoren, die durch diese statische Anspannung

der Muskulatur beim Atmen während der Messung entstehen, zumindest teilweise entschärfen.

5.3.2. Geschlechtsabhängigkeit

Die bei der Maskenherstellung entstehenden Fehler sind offenbar unabhängig von geschlechtsspezifischen Merkmalen, da bei der Maskenherstellung keine Unterschiede zwischen den Geschlechtern bezüglich Fehlerhäufigkeit und Fehlerverteilung festgestellt werden konnten.

5.4. Klinische Anwendung des Tricolite - Verfahrens

Das Tricolite-Verfahren ist in der Zahnheilkunde bei der optischen Abformung eines präparierten Stumpfes und bei der Kronenherstellung bereits ein gut erprobtes Verfahren (Willer und Steinbichler, 1988). Um die Tauglichkeit des Tricolite-Verfahrens in der klinischen Anwendung bei der Gesichtsvermessung zu erproben wurde das Gesicht einer Patientin, die sich einer bignathen Dysgnathie- Operation unterzog, unmittelbar vor der Operation und ca. 2 Wochen nach der Operation digital durch die Tricolite-Methode erfaßt und die Differenz der beiden Punktwolken im Computer vermessen. Da es sich lediglich um **einen** Fall gehandelt hat und die postoperative Messung außerdem durch eine nicht vollständig abgeklugene Weichteilschwellung beeinflusst war, können die Meßergebnisse nicht verallgemeinert werden, wenn sie sich auch mit den Aussagen vieler Autoren bezüglich des Weichteilverhaltens nach skelettverlagernden Eingriffen decken. In diesem klinischen Fall hat das Tricolite-Verfahren eine hohe Anschaulichkeit der dreidimensionalen Meßergebnisse geboten und empfiehlt sich somit für den weiteren zukünftigen Einsatz am Patienten.

5.5. Ausblick

In der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, daß das Tricolite-Verfahren zur fazialen Weichteilvermessung im medizinischen Bereich sehr gut geeignet ist. Es steht uns ein berührungsloses, schnelles und ohne Röntgenstrahlung arbeitendes Meßverfahren zur Verfügung, das in Zukunft zur dreidimensionalen Weichteilanalyse und -prognose eingesetzt werden kann. Um eine zusätzliche Berücksichtigung der skelettalen Parameter zu realisieren, sollte als nächster Schritt versucht werden, nicht nur die Weichteiloberfläche des Gesichts, sondern auch die Oberfläche der knöchernen Schädelstrukturen zu digitalisieren und beide Punktwolken zu kombinieren. Die skelettalen Informationen könnten dabei aus CT-Daten gewonnen und die exakte Relation der beiden Punktwolken über sonographische Distanzmessungen an bestimmten Referenzpunkten ermittelt werden. Sogar ein totaler Verzicht auf das CT als Datenquelle erscheint möglich, wenn es gelingt, die interessierenden skelettalen Meßpunkte allein mit Hilfe der Sonographie anzusteuern.

Mit dieser Kombination aus skelettalen und Weichteildaten läßt sich nun über die Erstellung einer Datenbank ein Prognoseverfahren entwickeln, das die dreidimensionale Vorhersage der Weichteilveränderungen nach skelettverlagernden Eingriffen ermöglicht.

6. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein neues Verfahren zur dreidimensionalen Erfassung und Vermessung der Gesichtsoberfläche (TRICOLITE), das mit strukturiertem Licht arbeitet, auf Reliabilität und klinische Anwendbarkeit untersucht und mit den etablierten Verfahren verglichen. Es arbeitet berührungslos, ohne den Einsatz von Röntgenstrahlung und ist auch bei geöffneten Augen vollkommen unschädlich.

Die Validität des neuen Verfahrens ist bei einem durchschnittlichen systematischen Fehler von 0,2 mm auch im Vergleich mit anderen Methoden sehr gut.

Die Reliabilität der Methode hängt von der Reproduzierbarkeit und damit vom zufälligen Fehler der Meßergebnisse ab, dessen Größe vor allem durch Bewegungsartefakte während der Messung bestimmt wird. Um solche Störfaktoren zu minimieren sollte die Meßzeit daher möglichst gering sein. Im Vergleich mit anderen dreidimensionalen Meßverfahren, die mit einer Meßzeit zwischen 10 Sekunden (Laser) und 5 Minuten (Digigraph) arbeiten, ist das TRICOLITE-Verfahren bei einer Meßzeit unter einer Sekunde, in der 250 000 Oberflächenpunkte erfaßt werden, sehr schnell. Die Reliabilität ist bei einem durchschnittlichen Zufälligen Fehler von 0,4 mm zwar gut, in Zukunft jedoch durch weitere Beschleunigung der Tiefendatenakquisition durchaus noch verbesserbar.

In der klinischen Anwendung hat das TRICOLITE-Verfahren eine hohe Anschaulichkeit der dreidimensionalen Meßergebnisse geboten und empfiehlt sich somit in Zukunft für den weiteren Einsatz am Patienten.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden mit Hilfe des TRICOLITE-Verfahrens Gesichtsmasken aus Gips vermessen und auf ihre Wiedergabegenauigkeit untersucht. Der Maskenfehler, der definiert ist als skalare Abweichung der Gipsmaske vom korrespondierenden Probandengesicht an den einzelnen Meßpunkten, betrug dabei im Durchschnitt 2,3 mm, unterlag in den einzelnen Gesichtsregionen jedoch charakteristischen Schwankungen. Vor allem Nasenspitze, Kinn- und Halsbereich lagen mit einem Fehler von 3-4 mm deutlich über dem Durchschnitt, während die Stirn sogar unter 1 mm lag. Dies läßt den Schluß zu, daß die Größe des Maskenfehlers neben der Exposition (Nasenspitze) von der Weichteildicke der Gesichtsregion abhängt. Die Richtung der Deformierung hängt dabei wahrscheinlich auch von der Technik des Untersuchers, der das Abform-

material mit einem Spatel aufbringt und vom Vektor der einwirkenden Schwerkraft ab. Während bei Mundatmung der Maskenfehler im unteren Gesichtsdrittel (Fehlerwerte 8 mm und mehr) groß ist, wirkt sich die Nasenatmung während der Abformung kaum deformierend aus.

7. Literaturverzeichnis

1. **BAHR CJ:** Proportion und Vermessung des Gesichts in Kunst und Medizin und der goldene Schnitt.
Dissertation, Universität Tübingen (1991)
2. **BELL WH, PROFFIT WR, WHITE RP:** Surgical correction of dentofacial deformities. Vols. I-III.
WB Saunders Philadelphia (1980)
3. **BIRR E, BEWERSDORFF A:** Der Digigraph: Cephalometrie ohne Röntgenstrahlung.
Praxis Comput 1: 40 (1993)
4. **BURKE PH, BANKS P, BEARD LFH, TEE JE, HUGHES C:** Stereophotografic measurement of change in facial soft tissue morphology following surgery.
Br J Oral Surg 21: 237-245 (1983)
5. **BURKE PH, BEARD LFH:** Stereophotogrammetry of the face.
Am J Orthodont 53: 769-782 (1971)
6. **CHACONAS S:** The Digigraph work station.
J Clin Orthodont 24: 360 (1990)
7. **CYBERWARE LABORATORY INCORPORATED:**
Cyberware Model 3030
Digitizer Manual, Monterey, CA (1991)
8. **DANN J, FONESCA R, BELL WH:** Soft tissue changes associated with total maxillary advancement: a preliminary study.
J Oral Surg 34: 19 (1976)

9. **DAUSCH-NEUMANN D:** Die vertikale Dreiteilung des Gesichts.
Fortschr Kieferortho 25: 301-304 (1964)

10. **EALLES EA, NEWTON C, JONES ML, SUGAR A:** The accuracy of computerized prediction of the soft tissue profile: a study of 25 patients treated by means of the Le Fort I osteotomy.
Int J Adult Orthognath Surg 9 :141-152 (1994)

11. **FARKAS LG:** Anthropometry of head and face in medicine.
Elsevier, New York (1981)

12. **FERRARIO VF, SFORZA C:** Effect of growth and development on human soft tissue facial shape: A Fourier analysis.
Int J Adult Orthod Orthognath Surg 11: 155-163 (1996)

13. **GIESEN J:** Dürer's Proportionsstudien im Rahmen der allgemeinen Kunstentwicklung.
Dissertation, Bonn (1929)

14. **GIROD S, KEEVE E, GIROD B:** Advances in interactive craniofacial surgery planning by simulation and visualisation.
Int J Oral Maxillofac Surg 24: 120-124, (1995)

15. **GIROD S, KEEVE E, GIROD B:** Soft tissue prediction in orthognathic surgery by 3D-CT and Laser scanning.
J Oral max Fac Surg 51: 167 (1993)

16. **HASUND A:** Klinische Kephalemetrie für die Bergen-Technik.
Universität Bergen, Norwegen (1973)

17. **HASUND A, JANSON I:** Der kieferorthopädische Behandlungsplan. Organisation und Dokumentation.
Hanser, München (1978)

18. **HOLDAWAY R:** A soft - tissue cephalometric analysis and its use in orthodontic treatment planning.
Am J Orthod, 84: 1-28 (1983)

19. **HOUSTON WJB:** The analysis of errors in orthodontic measurements.
Am J Orthod 83: 382-390 (1983)

20. **HUMPHREYS B:** Proportions of the aesthetic face.
Thieme-Stratton Inc., New York (1984)

21. **JEND-ROSSMANN I, FEINDT M, JEND HH:** Dreidimensionale Vermessung von Gesichtsasymmetrien mit Hilfe der Moiré-Topographie.
In: Pfeifer G (Hrg). Die Ästhetik von Form und Funktion in der plastischen und Wiederherstellungschirurgie. Springer Verlag Berlin, Heidelberg 1985 (S.474-479)

22. **KAWAI T, NATSUME N, SHIBATA H, YAMAMOTO T:** Threedimensional analysis of facial morphology using moiré stripes. Part I: Method.
Int J Oral Maxillofac Surg 19:356-358 (1990)

23. **KAWAI T, NATSUME N, SHIBATA H, YAMAMOTO T:** Threedimensional analysis of facial morphology using moiré stripes. Part II: Analysis of normal adults.
Oral Maxillofac Surg 19:359-362 (1990)

24. **KOBAYASHI T, UEDA K, HONMA K, SASAKURA H:** Three-Dimensional Analysis of Facial Morphology before and after Orthognathic Surgery.
J Cranio-Max-Fac Surg 18:68-73 (1990)

25. **KONSTANTOS KA, O'REILLY MT, CLOSE J:** The validity of the prediction of the soft tissue profile changes after Le Fort I osteotomy using the dentofacial planner (computer software). *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 105(3): 241-249 (1994)

26. **KRIENS O:** Das Montagefoto in der Planung kiefergesichts-chirurgischer Eingriffe. *In: Schwenzler N (Hrg). Fortschr Kiefer GesichtsChir* 17. Thieme Stuttgart 1974 (S.101-106)

27. **LINES P, STEINHÄUSER E:** Soft tissue changes in relationship to movements of hard structure in orthognathic surgery: a preliminary report. *J Oral Surg* 32: 891 (1974)

28. **LINES P, STEINHÄUSER E:** Diagnosis and treatment planning in surgical orthodontic therapy. *Am J Orthodont* 66:378 (1974)

29. **MANSOUR S, BURSTONE C, LEGAN H:** An evaluation of soft tissue changes resulting from Le Fort I maxillary surgery. *Am J Orthod* 84:37-47 (1983)

30. **PANOFSKY E:** Aufsätze zu Grundfragen der Kunstwissen-schaft. *Berlin* (1974)

31. **RADNEY NJ, JACOPSY D:** Soft tissue changes associated with surgical total maxillary intrusion. *Am J Orthod* 81:487-488 (1981)

32. **RASSE M, FORKERT G, WALDHÄUSL P:** Stereophotogrammetry of facial soft tissue. *Int J Oral Maxillofac Surgery* 20:163-166 (1991)

33. **SAVARA BS:** A method for measuring facial bone growth in three dimensions.
Hum Biol 37:245 (1965)
34. **SCHENDEL S, EISENFELD J, BELL WH, EPKER BN:** Superior repositioning of the maxilla: stability and soft tissue osseus relations.
Am J Orthod 70: 663-674 (1976)
35. **SCHWARZ AM:** Die Röntgenostatik.
Urban und Schwarzenberg Verlag Wien (1958)
36. **SCHWENZER K, HOLBERG C, WILLER J, MAST G, EHRENFELD M:** 3-D-Erfassung der Gesichtsoberfläche durch Topometrie unter der Verwendung von projizierten Weißlichtstreifen.
Mund Kiefer GesichtsChir 2 [Suppl 1]: 130-134 (1998)
37. **SEEHOLZER H, WALKER R:** Kieferorthopädische und kieferchirurgische Behandlungsplanung mit dem Computer am Beispiel des Dentofacial Planner.
Informationsschrift der Firma Gemetek Erding (1992)
38. **SELLE G:** Die präoperative Fotografie als Hilfsmittel in der orthopädischen Kieferchirurgie.
In: Schwenzer N (Hrg). Fortschr Kiefer Gesichts Chir 18. Thieme Stuttgart, 1974 (S.106-111)
39. **SPEICH N:** Die Proportionen des menschlichen Körpers in Antike, Mittelalter und Renaissance.
Dissertation, Zürich (1957)
40. **STEINHÄUSER EW:** Weichteilveränderungen bei korrektiven Osteotomien im Kieferbereich.
Dtsch Zahnärztl Z 29: 1065 (1974)

41. **STEINHÄUSER EW, JANSON I:** Kieferorthopädische Chirurgie, Band 1
Quintessenz Verlag Berlin 1988 (S. 62-66)
42. **STEINHÄUSER EW, PALLUK EF:** Weichteilvorhersage bei bimaxillären Operationen.
In: Schwenzer N (Hrg). Fortschr Kiefer GesichtsChir 40. Thieme Stuttgart 1995 (S. 50-57)
43. **STEINHÄUSER EW, PAULUS G:** Weichteilveränderungen nach Kinnplastik.
In: Schwenzer N (Hrg). Fortschr Kiefer GesichtsChir 24. Thieme Stuttgart 1979 (S. 108-112)
44. **STRUTZ T, RIECHMANN W:** Tiefendatengewinnung mit dem Codierten Lichtansatz - Einsatzmöglichkeiten in der Automobilindustrie.
Volkswagen Konzernforschung, Wolfsburg (1996)
45. **THALMAN DEGEN P:** Die Stereogrammetrie - ein diagnostisches Hilfsmittel in der Kieferorthopädie.
Dissertation, Universität Zürich (1957)
46. **WILLER J:** Neues CAD/CAM-System zur Herstellung von festsitzendem Zahnersatz.
Zahnärztl Welt 107: 180 (1989)
47. **WILLER J, STEINBICHLER H:** Abdruckloses, optisches Verfahren zur Erfassung und Wiedergabe präparierter Zahnformen.
Zahnärztl Welt 97: 240 (1988)
48. **WILLER J, STEINBICHLER H:** In-vivo-Untersuchung zur Zahnbeweglichkeit und ihrer Messung.
Zahnärztl Prax 39: 162 (1988)

49. **WILLER J, STEINBICHLER H:** Dreidimensionale Formbestimmung von Prüfkörpern.
Dtsch Zahnärztl Z 44: 857 (1989)

8. Anhang

Differenz Gesicht - Maske (in mm):

Name des Probanden:

Nr.:

Codierung:

Abweichungen der Maske nach

<i>kranial</i>	= 1
<i>kaudal</i>	= 2
<i>ventral</i>	= 3
<i>dorsal</i>	= 4
<i>lateral</i>	= 5
<i>medial</i>	= 6

Ausmaß der Abweichung

<i>leicht (<1mm)</i>	= 1
<i>mittel (1-3mm)</i>	= 2
<i>stark (>3mm)</i>	= 3

1. Nasenspitze:	__ mm	Abweichung nach:	Ausmaß:
2. Nasenrücken:	__ mm	Abweichung nach:	Ausmaß:
3. Glabella:	__ mm	Abweichung nach:	Ausmaß:
4. Stirnmitte:	__ mm	Abweichung nach:	Ausmaß:
5. Subnasale:	__ mm	Abweichung nach:	Ausmaß:
6. Oberlippe:	__ mm	Abweichung nach:	Ausmaß:
7. Unterlippe:	__ mm	Abweichung nach:	Ausmaß:
8. Kinnpunkt:	__ mm	Abweichung nach:	Ausmaß:
9. Halspunkt:	__ mm	Abweichung nach:	Ausmaß:
10. Wange re.:	__ mm	Abweichung nach:	Ausmaß:
11. Wange li.:	__ mm	Abweichung nach:	Ausmaß:

Maximale Abweichungen:

1. Stirn:	__ mm	2. Nase:	__ mm
3. Mundbereich:	__ mm	4. Orbitalbereich:	__ mm
5. Kinnbereich:	__ mm	6. Wangenbereich:	__ mm
7. Halsbereich:	__ mm		

Formular zur Erfassung der gemessenen Differenzwerte (in mm) an den einzelnen Meßpunkten.

Bit	=	Binary Digit
CAD	=	Computer Aided Design
CAM	=	Computer Aided Manufacturing
CCD	=	Charged Coupled Device
CT	=	Computertomographie
FRF	=	Fernröntgenfrontalbild
FRS	=	Fernröntgenseitenbild
GB	=	Gigabyte
HDD	=	Harddisk
LCD	=	Liquid Crystal Display
MB	=	Megabyte
MMX	=	Multimediaextension
PC	=	Personal Computer
RAM	=	Random Access Memory
SCSI	=	Small Computer System Interface
TRICOLITE	=	Triangulation with Coded Light
ZNS	=	Zentrales Nervensystem

Verzeichnis der im Text verwendeten Abkürzungen

Steinbichler Optotechnik GmbH	Am Bauhof 4 83115 Neubeuern
Dentofacial Planner	Dr. Ulrichweg 1 85435 Erding
Cyberware, Inc.	2110 Del Monte Avenue Monterey California 93940, USA
Imageware, Inc.	2000 Eastman Drive Milford Ohio 45150, USA

Firmenverzeichnis

Die Messungen wurden durchgeführt am 20., 21. und 24.3.1997 bei der Firma Steinbichler, Am Bauhof 4 in 83115 Neubeuern. Dabei wurden ein TRICOLITE-Sensor und ein Standard-PC mit der Software „Comet“ der Firma Steinbichler verwendet. Die Messungen wurden dabei mit der Kamera F4 der Firma Nikon dokumentiert. Die Auswertung der Punktwolken erfolgte anschließend mit der Software „Surfacer“ der Firma Imageware, Inc., Eastman Drive, Milford, Ohio 45150, USA.

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt

Herrn Professor Dr. med. Dr. med.dent. N. Schwenger, ehemaliger Ärztlicher Direktor der Klinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie der Universität Tübingen für die Übernahme des Themas,

Frau Dr. Dr. K. Schwenger für die hervorragende Betreuung,

Herrn Dr. Steinbichler, Herrn Dr. Duwe und Herrn Pontai von der Firma Steinbichler für die technische Unterstützung bei der Durchführung der Messungen,

Herrn Klaus Lüben, Herrn Dietrich Lüben und Herrn Rolf Lüben von der Firma Lüben für die große Unterstützung im Hardware- und Softwarebereich, sowie für den Beistand bei der Überlistung der Systeme und

meinen Eltern für die moralische und finanzielle Unterstützung.

Lebenslauf

Name: Dr.med. Christof Holberg

Wohnort: Jochbergweg 1, 82393 Iffeldorf

geboren: 16.11.1966 in Seefeld

Staatsangehörigkeit: deutsch

Eltern: Franz Holberg, Rechtsanwalt
Eleonore Holberg, Hausfrau

Grundschule: 1973 - 1977 Volksschule Herrsching

Gymnasium: 1978 - 1986 Christoph-Probst-Gymnasium
in Gilching bei München

Abitur: Juni 1986

Studium: Von 1987 bis 1993 Studium der Medizin an
der Ludwig-Maximilians-Universität in
München

Von 1994 bis 1998 Studium der Zahnheil-
kunde an der Ludwig-Maximilians-Universität
in München

Zahnärztliche
Prüfung: 30.6.1998

Promotion: Promotion zum Dr.med. im Jahre 1994

Assistenzzeit: seit Mai 1998 wissenschaftlicher Assistent an
der Klinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer- und
Gesichtschirurgie der Ludwig-Maximilians-
Universität München