

Aus dem Universitätsklinikum Münster
Klinik und Poliklinik für Mund- und Kiefer- Gesichtschirurgie
-Direktor Univ.-Prof. Dr. med. Dr. med. dent. Dr. h. c. Ulrich K. Joos-

**Evaluation einer Methode zur quantitativen
Erfassung dreidimensionaler
Gesichtsasymmetrien**

INAUGURAL – DISSERTATION
zur
Erlangung des doctor medicinae
der Medizinischen Fakultät
der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster

vorgelegt von Krückemeier, Kim
aus Porta Westfalica

2012

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der Westfälischen
Wilhelms-Universität Münster

Dekan: Univ.-Prof. Dr. med. Dr. h. c. Wilhelm Schmitz

1. Berichterstatter: Prof. Dr. med. Dr. med. dent. J. Kleinheinz
2. Berichterstatter: Priv.-Doz. Dr. rer. nat. D. Dirksen

Tag der mündlichen Prüfung: 23.10.2012

Eidesstattliche Erklärung

Ich gebe hiermit die Erklärung ab, dass ich die Dissertation mit dem Titel:
Evaluation einer Methode zur quantitativen Erfassung dreidimensionaler
Gesichtsasymmetrien

in der/im (Klinik, Institut, Krankenanstalt):
Klinik und Poliklinik für Mund- und Kiefer- Gesichtschirurgie

unter der Anleitung von:
Prof. Dr. med. Dr. med. dent. J. Kleinheinz

1. selbständig angefertigt,
2. nur unter Benutzung der im Literaturverzeichnis angegebenen Arbeiten angefertigt und sonst kein anderes gedrucktes oder ungedrucktes Material verwendet,
3. keine unerlaubte fremde Hilfe in Anspruch genommen,
4. sie weder in der gegenwärtigen noch in einer anderen Fassung einer in- oder ausländischen Fakultät als Dissertation, Semesterarbeit, Prüfungsarbeit, oder zur Erlangung eines akademischen Grades, vorgelegt habe.

Ort, Datum:

Unterschrift

Aus dem Universitätsklinikum Münster
Klinik und Poliklinik für Mund- und Kiefer- Gesichtschirurgie
-Direktor Univ.-Prof. Dr. med. Dr. med. dent. Dr. h. c. Ulrich K. Joos-
Referent: Prof. Dr. med. Dr. med. dent. J. Kleinheinz
Koreferent: Priv.-Doz. Dr. rer. nat. D. Dirksen

ZUSAMMENFASSUNG

Evaluation einer Methode zur quantitativen Erfassung dreidimensionaler
Gesichtsasymmetrien

Krückemeier, Kim

Das menschliche Gesicht ist nicht nur ein besonders komplexes Segment des menschlichen Körpers, sondern es bestimmt auch maßgeblich den Eindruck und die Wirkung, die ein Individuum hinterlässt. Insbesondere in der philosophischen Literatur wird als wesentliches Kriterium für die Bewertung von ästhetischen Gesichtern deren Symmetrie positiv herausgestellt. Bisher hat sich jedoch keine quantitative Parametrisierung der fazialen Symmetrie bzw. Asymmetrie etabliert, anhand derer man einen Norm-Wert bzw. Abweichungen von einem solchen Norm-Wert quantifizieren könnte.

Die in dieser Arbeit betrachtete Methode basiert auf aktiver Photogrammetrie und Streifenprojektionstechnik und dient der dreidimensionalen Oberflächenerfassung. Anhand der Vermessung von 50 Probanden wurde untersucht, ob und in wieweit sich die vorgestellte Methode zur Evaluation bzw. Quantifizierung der fazialen Asymmetrie in Form eines entsprechenden Indexes eignet. Darüber hinaus wurde geprüft, ob sich ein Richtwert für das Ausmaß der Asymmetrie in Normalgesichtern, insbesondere im Hinblick auf Geschlechtsunterschiede, ergibt.

Die Anwendung der Methode ergab einen individuellen Wert „INDEXasym“, der als einzelne skalare Maßzahl den Grad der jeweiligen fazialen Asymmetrie ausdrückt. Aufgrund der geringen Anzahl an untersuchten Probanden konnte jedoch kein signifikanter Normwert ermittelt werden. Auch wurden keine signifikanten Abweichungen dieser Maßzahl im Bezug auf Geschlechtsunterschiede festgestellt, jedoch wurden Häufungen der geschlechtsspezifischen INDEX-Werte in unterschiedlichen Bereichen ermittelt.

Tag der mündlichen Prüfung: 23.10.2012

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Fotografie	1
1.2	Röntgen.....	9
1.3	Stereophotogrammetrie.....	13
1.4	Zielsetzung.....	15
2	Material und Methode	17
2.1	Probanden.....	17
2.2	Datenerhebung	18
2.2.1	Aufbau	18
2.2.2	Messprinzip	19
2.2.2.1	Triangulation.....	19
2.2.2.2	Streifenprojektionstechnik	21
2.2.3	Durchführung und Bearbeitung.....	22
2.2.4	Berechnung des Asymmetrieindex.....	25
2.3	Statistische Auswertung	29
3	Ergebnisse	30
3.1	Ergebnisse der Patientenauswahl	30
3.2	Normalverteilungstests.....	31
3.3	Darstellung der Ergebnisse als farbkodierte topographische Abbildung ..	32
3.3.1	Beispiele für sehr symmetrische Gesichter des Probandengutes.....	32
3.3.2	Beispiele für durchschnittlich symmetrische Gesichter des Probandengutes	33
3.3.3	Beispiele für sehr asymmetrische Gesichter des Probandengutes....	33
3.4	Deskriptive Statistik	35
3.4.1	Darstellung der Ergebnisse der Messreihe.....	35

3.4.1.1	Mittlerer Abstand	35
3.4.1.2	Gesichtsdurchmesser	35
3.4.1.3	INDEXasym	35
3.4.2	Vergleich Männer vs. Frauen	37
3.4.2.1	Mittlerer Abstand	37
3.4.2.2	Gesichtsdurchmesser	37
3.4.2.3	INDEXasym	38
3.5	Explorative Statistik	39
4	Diskussion	42
4.1	Diskussion der Methode	42
4.2	Diskussion des Zielparameters INDEXasym	46
4.3	Diskussion der Messergebnisse	48
5	Zusammenfassung	51
6	Literaturverzeichnis	53
	Danksagung	57

1 Einleitung

Um die Symmetrie eines Gesichtes zu erfassen und systematisch auszuwerten, werden Methoden angewendet, die in Fachgebieten der Kieferorthopädie, der Mund- Kiefer- Gesichtschirurgie und der plastisch-ästhetischen Chirurgie unter anderem auch zur Diagnostik, Therapieplanung und Prognose der fazialen Hart- und Weichgewebsveränderungen herangezogen werden.

Die folgenden Unterkapitel sollen einen Überblick über den aktuellen Stand der Erfassungs- und Vermessungstechniken des menschlichen Gesichts geben.

1.1 Fotografie

Fotografien dienen zur Weichteilanalyse des Gesichts und werden in Fachrichtungen wie der Mund- Kiefer- Gesichtschirurgie, der plastischen Chirurgie oder der Kieferorthopädie eingesetzt. Sie tragen maßgeblich zur Indikationsstellung, Planung, Dokumentation und Überprüfung des Therapieerfolges operativer oder kieferorthopädischer Maßnahmen bei (13, 36).

Entscheidend für die Aussagekraft der Fotografien ist, in sowohl analoger als auch digitaler Technik, eine konstant hohe Qualität und Reproduzierbarkeit, die unter anderem durch eine standardisierte Aufnahmetechnik erreicht werden kann. Hierzu wurden bereits 1919 von SIMON (Simon 1922), als auch darauffolgend von verschiedenen anderen Autoren wie STRAUSS und SCHWARZ Richtlinien verfasst, die beispielsweise den Einsatz eines Kephalostats und die Ausrichtung des Patientenkopfes nach definierten Schädelebenen vorsahen (26, 33).

Auch andere, im Anschluss erschienene Vorschläge zur Standardisierung von Fotoaufnahmen, beziehen sich auf die Kopfposition des Patienten, verwendete technische Utensilien wie Kamera, Linse und deren Position sowie Aus- und Beleuchtung des aufzunehmenden Objekts und dessen Hintergrund (11, 12, 19, 38).

Zusammengefasst und präzisiert wurden diese Aspekte in 2006 von ETTORE et al (16). Die Autoren beziehen sich auf die 2005 von der European Association of Cranio- Maxillofacial Surgery veröffentlichten Richtlinie zur Standardisierung klinischer Fotografie (16).

Sie beschreiben neben der nötigen Ausrüstung, wie eine Digitalkamera, einem digitalen Speicherchip, Chipkartenleser und PC inklusive einer Fotobearbeitungs- und Speichersoftware auch die Notwendigkeit geeigneter Kameralinsen und Belichtungsverhältnisse.

Bezüglich der Aufnahmetechnik werden konventionelle Bilderreihen von ergänzenden unterschieden. Zu den konventionellen zählen nach ETTORE et al. (16) die enface-, die Halbprofil- und die Profil- Aufnahme (Abb. 1-1). Die Frankfurter Horizontale stellt die Orientierungslinie zur Ausrichtung des Kopfes in allen Einstellungen dar. Für die enface- Aufnahme bildet die Kreuzung der Frankfurter Horizontalen mit der Mittellinie das Zentrum des Bildes. Eventuelle Neigungen des Kopfes werden vermieden, indem die Interpupillarlinie horizontal ausgerichtet wird. Im Halbprofil wird der Patient aus einer um 45° rotieren Position aufgenommen. Der Bildmittelpunkt wird aus der Kreuzung der Frankfurter Horizontalen mit der Senkrechten des lateralen Kanthus gebildet. Für das Profilbild wird der Patient in 90° Rotation positioniert, der Bildmittelpunkt liegt auf der Frankfurter Horizontalen, mit gleichem Abstand zum Tragus und lateralem Kanthus.

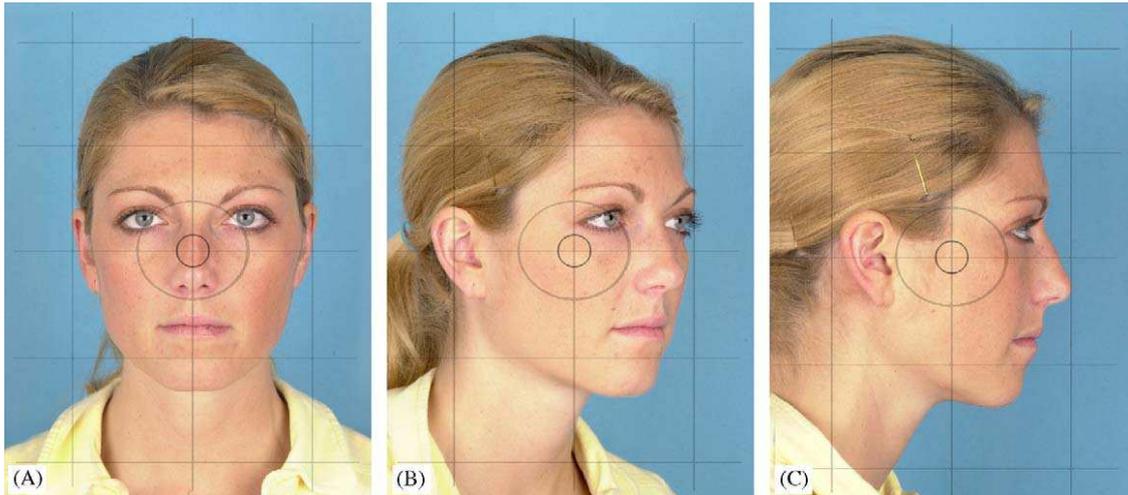


Abb. 1-1: Konventionelle Bilderreihe mit enface- (A), Halbprofil- (B) und Profilaufnahme (C) (16)

Die ergänzenden Bilderreihen sehen Variationen dieser konventionellen Einstellungen vor, beispielsweise einen lachenden Gesichtsausdruck, geschlossene Augen oder die Reklination des Kopfes, die für spezielle Fragestellungen notwendig sein können (Abb. 1-2).

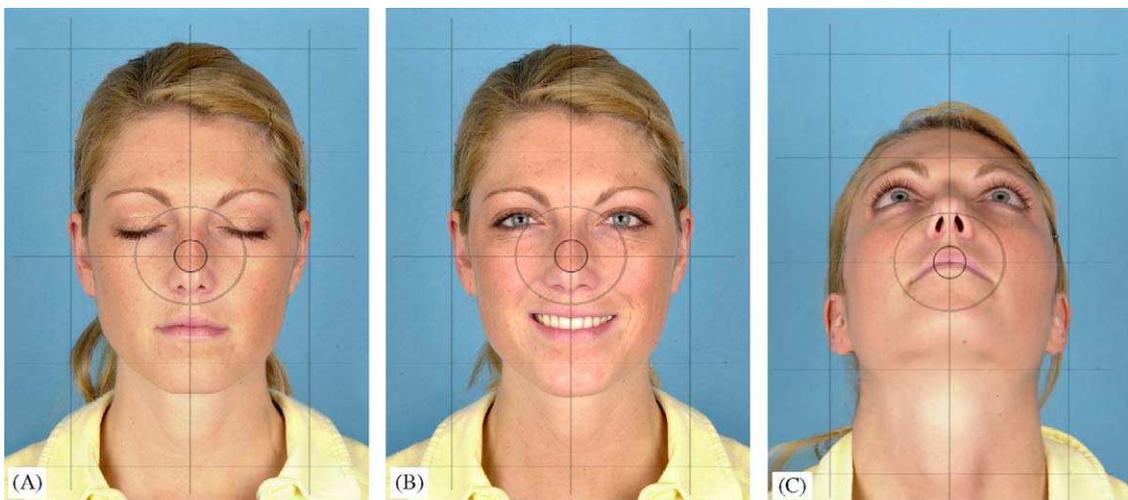


Abb. 1-2: Ergänzende Bilderreihe mit geschlossenen Augen (A), lachendem Gesichtsausdruck (B) und rekliniertem Kopf (C) (16)

Zur Analyse der Fotografien werden, ähnlich wie bei der Analyse von Fernröntgenbildern, bestimmte Bezugspunkte und Linien benötigt. Anhand des Profilbildes werden Proportionen in vertikaler und sagittaler Ebene betrachtet. SCHWARZ bezieht sich zur Einteilung bzw. Feststellung eines bestimmten Gesichtstyps auf die Lage der Referenzpunkte im Bezug auf das Kieferprofilfeld. Dieses wird, wie in Abb. 1-3 dargestellt, begrenzt durch die Frankfurter Horizontale, die Orbitalsenkrechte sowie die Nasionsenkrechte. Liegt der Subnasalpunkt beispielsweise auf der Nasionsenkrechten und das Weichteilpogonion in der Mitte des Kieferprofilfeldes, spricht man von einem Durchschnittsgesicht. Die Lage der Subnasale im Bezug auf die Nasionsenkrechte erlaubt die Einteilung in Vor- und Rückgesicht. Gerade und schiefe Gesichter werden unterschieden anhand der Lage des Weichteilpogonions im Verhältnis zum Subnasalpunkt (24).

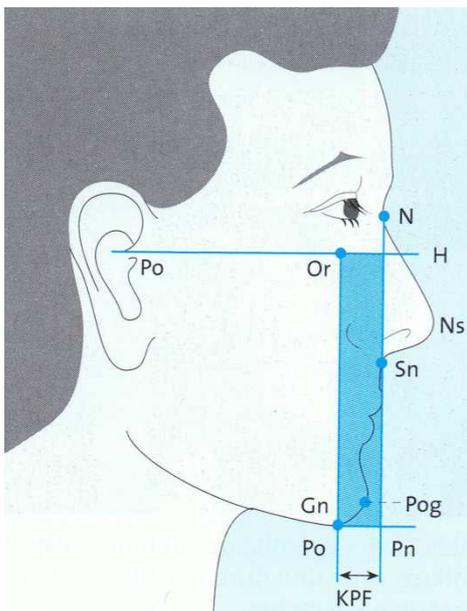


Abb. 1-3: Fotometrische Vermessungen im Profil nach SCHWARZ (24)

Die enface- Aufnahme erlaubt die Beurteilung von Symmetrie und Proportionen in transversaler und vertikaler Ebene. Nach RAKOSI und JONAS werden hierzu eine vertikale und zwei horizontale Bezugsebenen eingezeichnet (siehe Abb. 1-4). Die vertikale Bezugsebene ergibt sich durch die Verbindung des

Subnasalpunktes mit dem Nasionpunkt. Die obere Horizontale stellt die Bipupillarlinie dar, die untere Horizontale verläuft hierzu parallel durch das Stomion (24).

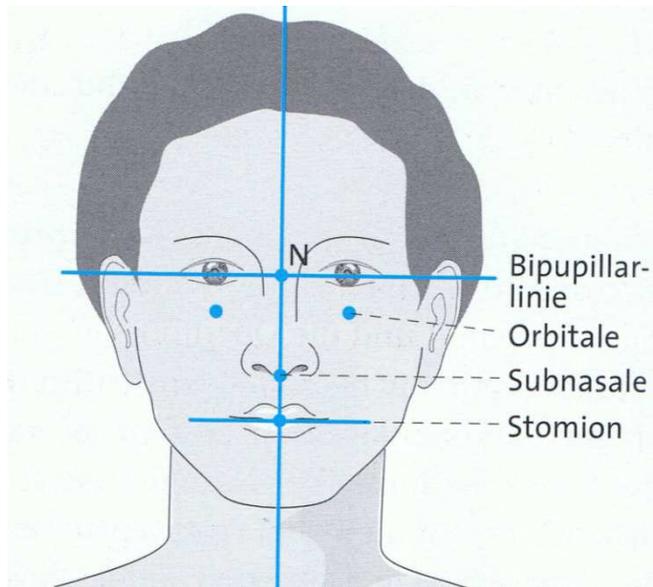


Abb. 1-4: Fotometrische Vermessungen enface nach RAKOSI und JONAS (24)

Ebenfalls üblich ist die Einteilung des Gesichts in drei Drittel (Abb. 1-5) Dabei werden die Grenzen des oberen Drittels gebildet von Haarlinie und Glabella, Glabella und Subnasale wiederum begrenzen das mittlere Drittel und das untere Drittel wird umfasst von Subnasion und Menton. Ein Gesicht wird als harmonisch betrachtet, wenn diese Drittel anteilmäßig gleichgroß sind (24).

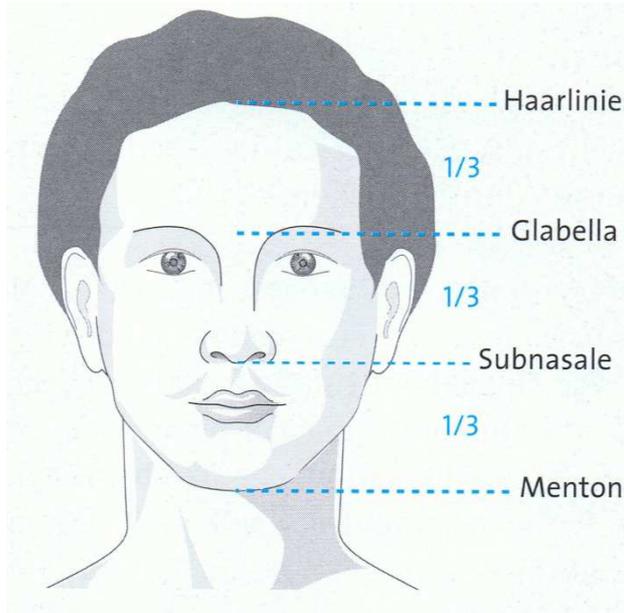


Abb. 1-5: Einteilung des Gesichts in drei Drittel nach RAKOSI und JONAS (24)

Die Aufteilung des Gesichts in drei gleichgroße Teile geht auf den römischen Architekten VITRUV zurück, der in seinen „Zehn Büchern über Architektur“ unter anderem auch eine „Theorie des wohlgeformten Menschen“ formulierte. Er beschreibt darin das Verhältnis menschlicher Körperteile zueinander (23). In der Zeichnung „Der vitruvianische Mensch“ (siehe Abb. 1-6 a) wurden diese Beschreibungen 1492 von LEODARDO DA VINCI illustriert. Die Abbildung „Proportionsstudie“ (Abb. 1-6 b) zeigt ebenfalls eine Zeichnung DA VINCIs, in der er die Proportionen eines Gesichts skizziert. Darin beschreibt er unter anderem die Länge des Gesichts als ein Achtel der gesamten Körpergröße.

Auch ALBRECHT DÜRER befasste sich im 16. Jahrhundert mit der Proportionslehre des menschlichen Körpers und insbesondere des Gesichts (27).

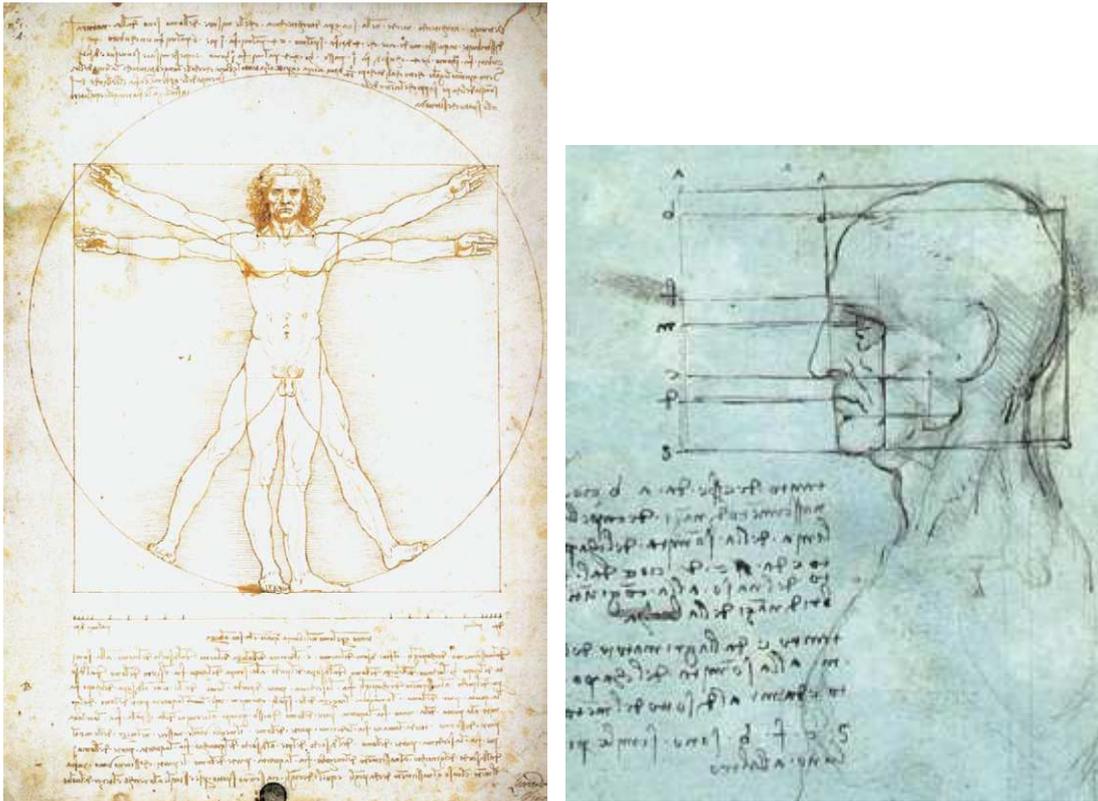


Abb. 1-6 a: „Der vitruvianische Mensch“ (links) (30) und b: „Proportionsstudie“ (39) von DA VINCI

Die Vorteile der digitalen Fotografie gegenüber der analogen, liegen in der Zeit- und Kostenersparnis durch die schnellere Verfügbarkeit der digitalen Bilder und die damit sofort mögliche Kontrolle der Qualität, beispielsweise bezüglich des Bildausschnitts oder der Schärfe ohne nennenswerten Materialverbrauch. Ebenso können mithilfe von Bildbearbeitungsprogrammen, nachträglich Nahaufnahmen durch Vergrößerung bereits gewonnener Fotografien gewonnen werden (16).

Die Einfachheit der digitalen Nachbearbeitung von Fotografien bietet hingegen auch die Gelegenheit zu einer Manipulation, die über eine durchaus übliche und auch zulässige Bildbearbeitung zur besseren Darstellung hinausgeht. Da nachträgliche Veränderung der digitalen Bilddaten laut NOURAEI schlecht nachzuvollziehen sind, stellt auch hier eine Standardisierung der Aufnahmebedingungen, wie Beleuchtung und Art der verwendeten Kamera,

eine Möglichkeit dar, um möglichem Missbrauch vorzubeugen und zu erschweren (28).

1.2 Röntgen

Nach Einführung der Fernröntgen-Aufnahmetechnik durch HOFRATH und BROADBENT (6, 21) 1931 entwickelte sich das Fernröntgenseitenbild (FRS) zu einem der wichtigsten diagnostischen Mittel in der Kieferorthopädie. Neben den seitlichen Aufnahmen, die nur die sagittale und vertikale Ebene abbilden, sind auch Aufnahmen in der frontalen Ebene (FRF) üblich, wobei die Anfertigung eines FRF deutlich seltener Anwendung findet (Abb. 1-7).

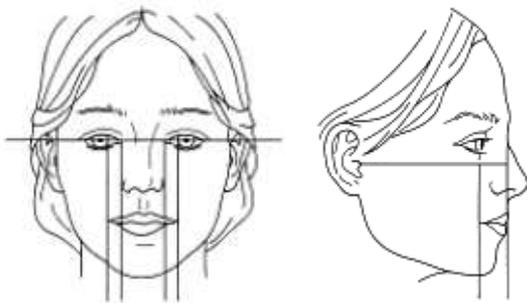


Abb. 1-7: Ansichten und Ebenen der Fernröntgenbilder, links frontal, rechts seitlich

Beiden Aufnahmeperspektiven ist gemein, dass sie eine planare, zweidimensionale Abbildung relevanter, dreidimensionaler, skelettaler Strukturen des Schädels produzieren. Mit Hilfe eines Aluminium- oder Kupferfilters, der in den Strahlengang eingebracht wird, können auch Weichteilkonturen auf dem Röntgenfilm sichtbar gemacht werden (22, 31, 34). Durch die Strahlendivergenz der Röntgenstrahlen werden bei der Aufnahme filmferne Strukturen größer und unschärfer dargestellt als filmnahe, was besonders bei paarig angelegten Strukturen zu Doppelkonturen in der Abbildung führen kann. Dieser Projektionsfehler wird als Parallaxenfehler bezeichnet (1). Der Parallaxenfehler verringert sich, je weiter man den Abstand zwischen Film und Röntgenröhre wählt. Da jedoch die benötigte Strahlenenergie im Verhältnis zum Film-Fokus Abstand im Quadrat ansteigt, hat man sich auf eine Aufnahme-Distanz von mindestens 1,5 m geeinigt und die dadurch entstehende Abbildungsvergrößerung von 7% in Kauf genommen (13).

Ein weiterer Fehler, der bei Aufnahme eines Röntgenbildes beachtet werden muss, ist der Verzerrungsfehler. Dieser entsteht, wenn Objekt- oder Bildebene von der Senkrechte des Zentralstrahls abweichen. Verringert wird der Verzerrungsfehler durch Verwendung eines Kephalostats, der den Kopf des Patienten über eine Nasenstütze und zwei Ohroliven in einer möglichst korrekt ausgerichteten Haltung stützen soll (13).

Die kephalometrische Analyse der Fernröntgenbilder erfolgt, nachdem verschiedene definierte Referenzpunkte manuell festgelegt worden sind (Abb. 1-8). Im Bezug auf Durchschnittsgrößen können verschiedene Streckenverhältnisse und Winkel zwischen diesen Punkten besser bewertet werden als absolute Abstandswerte, um Unterschiede im Alter oder im Geschlecht zu berücksichtigen (4, 24). Hierzu sind von verschiedenen Autoren manuelle Auswertungstechniken beschrieben worden, gängig ist heutzutage jedoch der Einsatz von computergestützten Analyseverfahren. Die Beurteilung der Asymmetrie anhand von FRF ist jedoch nur grob möglich (14).

1.3 Stereophotogrammetrie

Die Technik der Stereophotogrammetrie wurde bereits zur Landschaftsvermessung und Landkartenerstellung genutzt, bevor sie 1922 von MANNSBACH, 1924 von THALMANN-DEGEN und 1939 von ZELLER erstmals für die Medizin und Zahnmedizin eingesetzt wurde. Im weiteren Verlauf wurde das Verfahren stetig fortentwickelt, beispielsweise 1954 von BJÖRN et al., 1957 von HERZBERG et al. sowie 1965 von SAVARA und 1967 von BURKE und BEARD (8).

Um dreidimensionale Daten zu erhalten wird das Patientengesicht von Kameras aus zwei verschiedenen Winkeln aufgenommen. Mithilfe der optischen Triangulation wird aus den zwei Fotos per Computersoftware eine dreidimensionale Abbildung errechnet und kann auf dem Bildschirm wiedergegeben werden. Diese Darstellung kann in ihrer Position beliebig verändert (rotiert, geneigt, etc.) werden und entweder als Gitternetz oder als Konturliniendiagramm dargestellt werden (siehe Abb. 1-10) (25, 29).

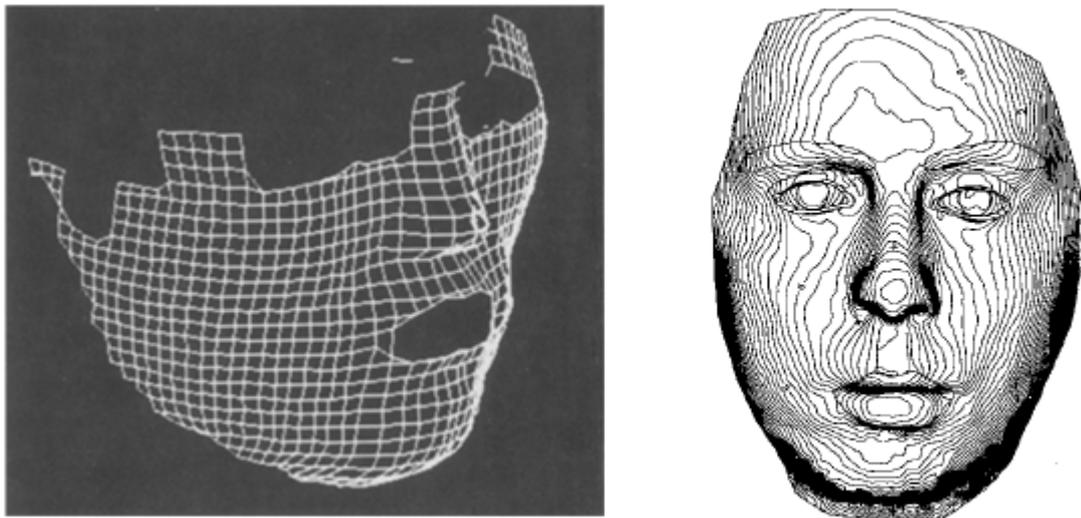


Abb. 1-10: Darstellung der 3D-Daten zur Analyse links als Gitternetz (25) oder rechts als Konturliniendiagramm (29)

Die Stereophotogrammetrie dient zur Erstellung von dreidimensionalen Kontur- und Profilliniendiagrammen und kann somit zur Vermessung und Darstellung von Gesichtsproportionen und -volumina eingesetzt werden. Auch die Veränderungen während des Gesichtswachstums oder nach chirurgischen Eingriffen wurden vielfach anhand dieser Technik dokumentiert und quantifiziert (9, 25).

Anhand der dreidimensionalen Darstellungsmöglichkeit können Analysen zu verschiedenen Fragestellungen wie zur Symmetrie, zu Volumenänderungen oder postoperativer Veränderungen durchgeführt werden (9, 17, 29).

Die maßgebliche technische Weiterentwicklung des Zubehörs hat die Praktikabilität und Einfachheit der Nutzung weiter gesteigert. Beispielsweise werden in aktuellen Studien statt Fotokameras vermehrt Charge-coupled-device (CCD-) Kameras eingesetzt, Konturliniendiagramme werden statt per Hand gezeichnet auf Bildschirmen wiedergegeben, wodurch eine digitale Bearbeitung und Auswertung ermöglicht wird (18).

Im Vergleich zu anderen Verfahren zur dreidimensionalen Darstellung von Gesichtern, wie Laserscans, MRT oder 3D-Computertomographie, bietet dieses Verfahren wesentliche Vorteile wie beispielweise geringe Kosten, schnelle Durchführbarkeit und vermiedene Strahlenbelastung, was es zu einem geeigneten Verfahren insbesondere auch für Kinder macht (29).

1.4 Zielsetzung

Das menschliche Gesicht ist nicht nur ein besonders komplexes Segment des menschlichen Körpers, sondern es ist auch bei jeder physischen Begegnung für den oder die jeweiligen Kommunikations- und Interaktionspartner unmittelbar visibel und bestimmt maßgeblich den Eindruck und die Wirkung, die ein Individuum hinterlässt. Annähernd jede Form von sozialer Wechselwirkung ist von der Ästhetik der beteiligten Individuen geprägt und Aktionen und Reaktionen sind hierdurch wechselseitig beeinflusst. Hierbei ist der Begriff Ästhetik im traditionellen Sinne als „Lehre von der wahrnehmbaren Schönheit“ verstanden. Ästhetische Menschen gelten als erfolgreicher und sympathischer und verfügen durch das Wissen um ihr Erscheinungsbild zudem häufig über ein gestärktes Selbstbewusstsein, wodurch ihr Erfolgsstreben zusätzlich unterstützt wird. Auf der Basis dieser allgemein gültigen Annahmen ist es für menschliche Individuen durchaus erstrebenswert, ästhetisch zu wirken. Insbesondere in der philosophischen Literatur wird als wesentliches Kriterium für die Bewertung von ästhetischen Gesichtern deren Symmetrie positiv herausgestellt. Unter anderem Thornhill et al. (37) heben hervor, dass faziale Symmetrie eine positive Beurteilung des Äußeren fördert. Deshalb wird bei der Behebung kraniofazialer Anomalien, pathologischer Fehlentwicklungen oder Verletzungen (z.B. durch Unfälle) neben der funktionalen Rekonstruktion bzw. Optimierung möglichst auch die Wiederherstellung der jeweiligen fazialen Symmetrie angestrebt.

Bislang hat sich jedoch keine numerische Parametrisierung der fazialen Symmetrie bzw. Asymmetrie etabliert, anhand derer man einen Norm-Wert bzw. Abweichungen von einem solchen Norm-Wert quantifizieren könnte.

Da zum Beispiel bei zur klinischen Behandlung eingelieferten, verunfallten Patienten mit fazialen Verletzungen oder bei Patienten mit kraniofazialen Fehlbildungen keine Nullkontrollen der vorherigen Gesichtsasymmetrie vor den jeweiligen reparierenden oder korrigierenden orthognath-chirurgischen Eingriffen verfügbar sind, erscheint es generell sinnvoll, zum einen eine Methodik zur generellen Quantifizierung der fazialen Asymmetrie und zum zweiten statistische Nulldaten (relative bzw. geschlechts-, alters- oder

herkunftsspezifische Normwerte) für eine „normale/durchschnittliche“ Gesicht asymmetrie von gesunden Patientengruppen zu ermitteln. Durch die Abweichung von solchen Normwerten wäre eine Möglichkeit zur Quantifizierung des Schweregrads einer Anomalie bzw. Verletzung verfügbar.

Vor diesem Hintergrund widmet sich die vorliegende Arbeit den folgenden Fragestellungen:

- 1.) Bietet die in dieser Arbeit verwendete Methode ein geeignetes Messverfahren für die Erfassung der mehrdimensionalen fazialen Asymmetrie?
- 2.) Lässt ein definierter Asymmetrie-Index Aussagen über das Ausmaß dreidimensionaler Unterschiede zweier Gesichtshälften eines Gesichts zu und kann das Maß räumlicher Abweichungen in der Symmetrie der Gesichtshälften durch einen entsprechenden Index quantifiziert werden, der dann eine einzelne Maßzahl für die faziale Asymmetrie liefern würde?
- 3.) Gibt es einen Richt- oder Erwartungswert für den Grad von Asymmetrie in Normalgesichtern?
- 4.) Sind mittels der Analyse signifikante geschlechtsspezifische Differenzen im Asymmetrie-Index ableitbar?
- 5.) Ist die Methodik für die Erfassung auch größerer Probandenzahlen handhabbar und lässt sich hieraus die Machbarkeit der Untersuchung größerer Fallzahlen absehen, die notwendig wären, um nachhaltige Normwerte für die faziale Asymmetrie zu bestimmen?

2 Material und Methode

2.1 Probanden

Die Probanden für die Studie wurden nach Alter und Geschlecht zufällig ausgesucht, wobei jedoch eine Symmetrie der Geschlechtsverteilung sichergestellt wurde.

Das Auswahlkriterium zur Teilnahme war ein „normales Gesicht“. So durften keine besonderen, auffälligen Merkmale oder auffällige Asymmetrien bestehen. Patienten mit kraniofazialen Fehlbildungen genetischer oder traumatischer Ursache wurden ebenfalls ausgeschlossen. Darüber hinaus durften in der Vorgeschichte keine Operationen im Sinne von posttraumatischen sowie elektiven Korrekturen vorgenommen worden sein. Nicht einbezogen wurden ebenfalls Probanden mit fazialen neurologischen Störungen wie Fazialisparese oder Horner-Syndrom.

2.2 Datenerhebung

2.2.1 Aufbau

Das verwendete 3D-Messsystem basiert auf der Streifenprojektionstechnik (3). Es setzt sich aus einem Messkopf und einem Steuerungsrechner zusammen. Der Messkopf besteht aus 3 CCD-Kameras (Imaging Source) mit einer Auflösung von 1024*768 Bildpunkten sowie einem Videoprojektor zur Streifenprojektion. Die vier Elemente des Messkopfes sind auf einer Schiene auf einem Stativ befestigt. Um möglichst viele Anteile der Gesichtsoberfläche perspektivisch zu erfassen, werden die drei Kameras auf horizontaler Ebene so angeordnet, dass sie die Gesichter der Probanden einmal aus zentraler Sicht und zusätzlich aus zwei seitlichen, ca. 30°-großen Winkeln, aufnehmen können. Die beiden äußeren Kameras nehmen dabei nur Schwarz-Weiß-, die mittlere auch Farbinformationen auf (Abb. 2-1).



Abb. 2-1: Blickwinkel der drei Kameras der Messeinheit.

2.2.2 Messprinzip

Das hier verwendete Messsystem bedient sich der Technik der Photogrammetrie. Diese dient zur „dreidimensionalen Rekonstruktion der Lage und Form von Objekten aus Fotografien“ (15).

2.2.2.1 Triangulation

Eines der Grundprinzipien der Photogrammetrie ist die Triangulation. Wird ein Punkt P aus zwei verschiedenen Perspektiven angepeilt (wie z.B. von einem Augenpaar = O_1 und O_2), kann bei bekanntem Abstand der beiden Beobachtungspunkte (B = Basislänge) und des Winkels Alpha die Position des Punktes errechnet werden (Abb. 2-2).

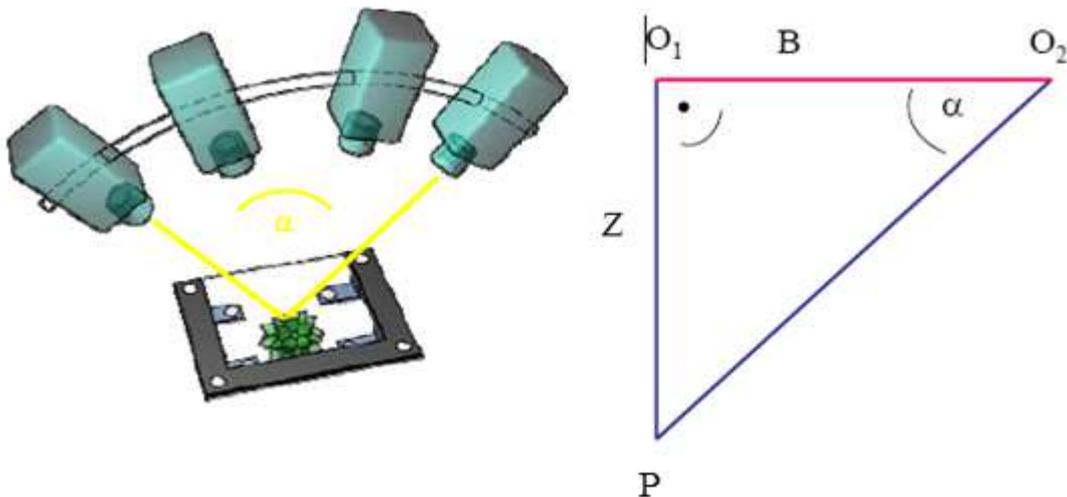


Abb. 2-2: Darstellung der Triangulation. O_1 , O_2 : Beobachtungspunkte; P: Objektpunkt; B: Basislänge; Z: gesuchte Entfernung; $Z=B \cdot \tan(\alpha)$.

Die perspektivische Abbildung eines dreidimensionalen Objektes in eine zweidimensionale Bildebene kann mit dem mathematischen Modell der Zentralprojektion (Abb. 2-3) errechnet werden (3). Dieses Modell besteht lediglich aus einer Bildebene, die den Sensor einer Kamera repräsentiert und

einem Projektionszentrum, welches näherungsweise dem Zentrum der Blende des Objektivs entspricht. Die Bildkoordinaten eines Punktes auf der Objektoberfläche werden dann ermittelt, indem man einen Strahl von diesem Punkt durch das Projektionszentrum legt und seinen Schnittpunkt mit der Bildebene bestimmt. Das Projektionszentrum kann in endlicher Entfernung hinter der Bildebene liegen, oder aber zwischen Objekt und Bildebene. Ist ersteres der Fall, so schneiden die Projektionsstrahlen die Bildebene und produzieren dort ein aufrechtes Abbild des Objektes. Im zweiten Fall, wie in Abb. 2-3 dargestellt, entspricht der Aufbau zum Beispiel dem Funktionsprinzip des menschlichen Auges oder einer Lochkamera. Die Projektionsstrahlen müssen über das Projektionszentrum (z.B. Pupille) hinaus verlängert werden und geben ein umgekehrtes Bild auf der Bildebene (z.B. Netzhaut) ab. Die Bildebene kann dabei zur Objektebene eine parallele oder verkippte bzw. rotierte Position einnehmen.

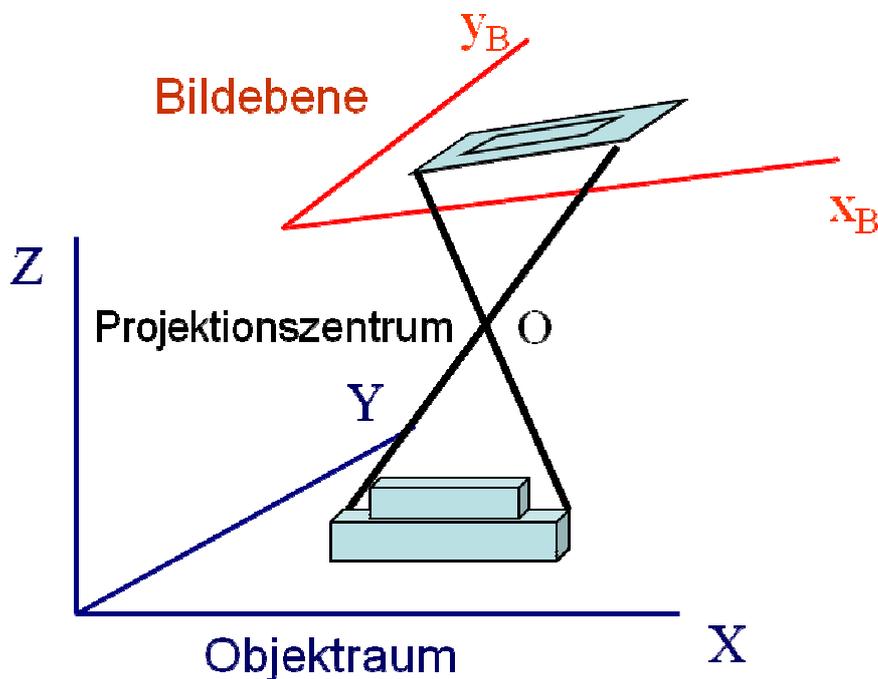


Abb. 2-3: Darstellung der Zentralprojektion.

Um nun aus zwei oder mehreren Abbildungen eines Objektes dreidimensionale Koordinaten von Objektpunkten zu ermitteln, müssen in den Abbildungen die jeweiligen korrespondierenden Bildpunkte aufgefunden werden. Anstelle einer aufwändigen, manuellen Zuordnung dieser Punkte wird hier die Streifenprojektion genutzt, durch die ein automatisches Zuordnen ermöglicht wird.

2.2.2.2 Streifenprojektionstechnik

In dem eingesetzten Verfahren wurden zwei aktive, d.h. auf der Projektion von Mustern beruhende, photogrammetrische Messtechniken miteinander kombiniert. Es wurde zunächst eine Sequenz verschiedener binärer Muster (Abb. 2-4) und anschließend eine Sequenz verschiedener sinusförmig modulierter Streifenmuster auf das Versuchsobjekt projiziert.

Durch die Beleuchtung des Objekts mit strukturiertem Licht ergibt sich für jeden Punkt eine spezifische Schwarz/Weiß-Reihenfolge. Aus den Ergebnissen der Binär-Sequenz, zusammen mit den Werten der sich unmittelbar anschließenden sinusoidalen Phasenschiebe-Profilometrie, kann jeder Punkt des Objektes einer Spalte des Bildes zugeordnet werden. Um nun die Festlegung der Bildzeile zu ermöglichen, wird die Epipolargeometrie einbezogen. Hierbei handelt es sich um eine Randbedingung hinsichtlich der Lage der homologen Punkte, die sich aus der Abbildungsgeometrie ergibt (20). Dadurch können die genauen Koordinaten der homologen Punkte eindeutig errechnet werden.

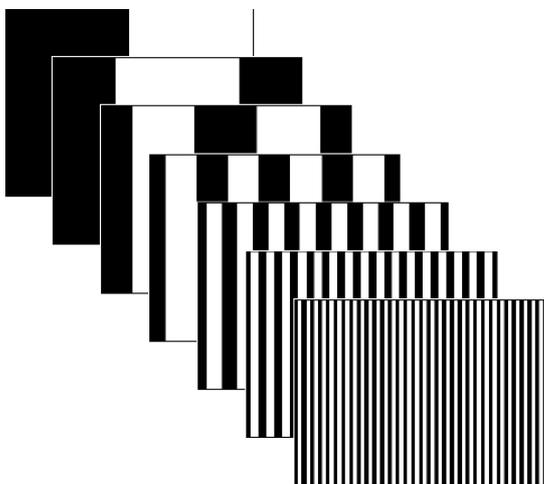


Abb. 2-4: Beispiel einer Abfolge von Binärmustern.

2.2.3 Durchführung und Bearbeitung

Bevor eine Messung durchgeführt werden konnte, musste das System kalibriert werden, hierzu muss der Standort der Kameras bekannt sein. Ebenfalls wichtig sind Abbildungsparameter wie Brennweite und Verzeichnung, die möglichst genau bestimmt werden müssen. Diese Größen wurden zur Kalibrierung durch das System ermittelt. Dafür wurde ein planares Messpunktfeld aus verschiedenen Perspektiven aufgenommen und die Abbildungsparameter durch numerische Näherungsverfahren bestimmt.

Im Anschluss an Aufbau und Kalibrierung fand die Vermessung des Gesichtes statt. Während des Messvorgangs befand sich der Proband ruhig sitzend in einem abgedunkelten Raum in aufrechter Haltung und mit leicht rekliniertem Kopf vor einem dunklen Hintergrund. Er wurde so positioniert, dass sich der Kopf in der Mitte eines ca. 80x80cm großen Messfeldes befand. Der Proband wurde unmittelbar vor der Aufnahme gebeten, die Gesichtsmuskeln möglichst entspannt zu lassen und die Lippen locker aufeinander zu legen. Das Gesicht des Probanden wurde von einer im Abstand von ca. 1,5m gegenüberstehenden Messeinheit aufgenommen, die zuvor so auf das Gesicht des Patienten ausgerichtet wurde, dass dieses sich im Zentrum des Messfeldes befand. Die bei der Messung gewonnenen Rohdaten wurden anschließend an einen Computer weitergeleitet und dort mit der, im Institut für Biophysik der Universität Münster entwickelten Software „gMeasure“ und „gView“ bearbeitet und ausgewertet.

Die Projektion der Folge von Streifenmustern auf das Gesicht des Probanden lief nach einer von der Software vorgegebenen und gesteuerten Reihenfolge ab und war nach ca. 1,5-2,0 Sekunden abgeschlossen (Abb. 2-5). Der Proband wurde gebeten, seine Position in dieser Zeit zu halten und insbesondere Gesichtsbewegungen (wie z. B. Wimpernschlag) auf ein Minimum zu reduzieren. Die Auswertung schloss sich daran unmittelbar an.

Die gewonnenen Daten bestanden aus 3D Datenpunkten und Dreiecksflächen; Informationen zu Farbe und Textur des zu beobachtenden Objektes waren ebenfalls enthalten.



Abb. 2-5: Verschiedene Zeitpunkte der Phasenschiebeprofilometrie aus allen drei Blickwinkeln der Messeinheit.

Auf dem Computerbildschirm wurden die Gesichter mit Hilfe des Programms „gView“ als 3D-Punktwolken (Cloud) oder triangulierte Oberflächen dargestellt (Abb. 2-6). An vereinzelt Stellen des Gesichts, die nicht von allen 3 Kameras gleichzeitig erfasst werden konnten, wie z.B. der seitliche, untere Nasenflügel oder der innere Augenwinkel, traten Fehlstellen auf. Diese Bereiche erschienen in der Punktwolke als kleine Lücken. Diese konnten automatisch durch eine in der Software enthaltenden Funktion geschlossen werden (Abb. 2-7).

Eine weitere Softwarefunktion war die Beleuchtung der triangulierten Oberfläche mit gerichtetem Licht. Dabei konnte die Position der Lichtquelle beliebig verändert werden. Auf diese Weise konnten eventuell während der Messung entstandene Artefakte, die sich als Unebenheiten in der Punktwolke im Sinne einzelner Ausreißer zeigten, sichtbar gemacht werden, und die Messung konnte gegebenenfalls erneut durchgeführt werden.

Im nächsten Arbeitsschritt wurden die Punktwolken auf die für die Untersuchung relevanten Gesichtsbereiche reduziert. Der zu untersuchende Ausschnitt verlief, wie in Abb. 2-6 und Abb. 2-7 jeweils rechts dargestellt, horizontal ca. 1cm oberhalb der Augenbrauen, aus seitlicher Sicht vor dem Ohr entlang und anschließend dem unteren Kieferrand folgend.

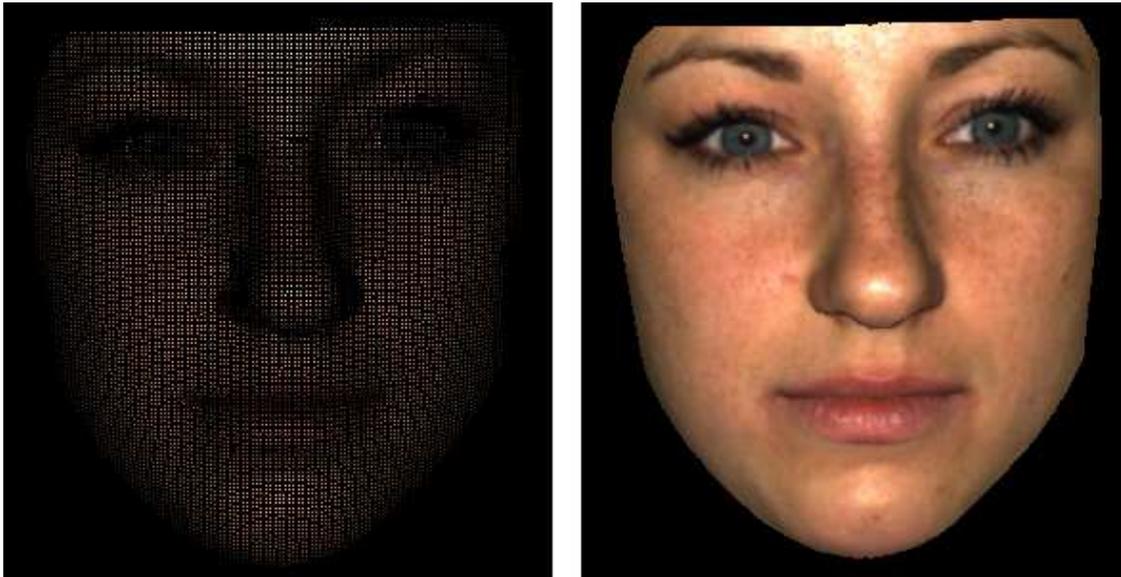


Abb. 2-6: Darstellung der Daten als 3D-Punktwolke (links) und als triangulierte Oberfläche (rechts).



Abb. 2-7: Datensatz vor (linkes Bild) und nach (rechts Bild) Eliminierung der Fehlstellen mit der Software gView.

2.2.4 Berechnung des Asymmetrieindex

Die Ermittlung der gesuchten Kenngröße für die Asymmetrie erfolgte anhand der triangulierten und vorverarbeiteten 3D-Datensätze. Dafür wurde zunächst mit dem von Benz und Laboureux beschriebenen Ansatz die Sagittalebene als Symmetrieebene ermittelt (2). An dieser wurde dann die Gesichtsoberfläche gespiegelt (Abb. 2-8).



Abb. 2-8: Räumliche Spiegelung des Datensatzes an der Symmetrieebene.

Im nächsten Schritt wurden das Original und die gespiegelte Version nun „gematched“ (Abb. 2-9) (3). Das bedeutet, dass beide Oberflächen passend übereinander gelegt wurden, was mit Hilfe einer Grob- und Feinabstimmung vom Computerprogramm geleistet wurde, wobei für den Matching-Prozess der ICP-Algorithmus zum Einsatz kam (10).



Abb. 2-9: Original und gespiegelte Version

Danach wurde für jeden Punkt der Originaloberfläche der Abstand zum nächstliegenden Punkt in der gespiegelten Kopie bestimmt. Als Ergebnis wurde der Mittelwert aller Punktabstände errechnet. Dieser skalare Wert gab zunächst nur die Abweichung zwischen rechter und linker Gesichtshälfte wieder. Da dieser Wert jedoch auch von der Größe des Gesichts beeinflusst wurde, musste dieser Einflussfaktor in der Berechnung des Asymmetrieindex berücksichtigt werden. Hierzu wurde der skalare Wert durch die Diagonale der die Punktwolke umschließenden „Bounding Box“ (Abb. 2-10) geteilt und der ermittelte Wert mit dem Faktor 1000 multipliziert, um so den Asymmetrieindex zu erhalten (3).

$$(a / d) \times 1000 = INDEX_{asym}$$

a = statistischer Mittelwert aller Abstände zwischen Originaloberfläche und gespiegelt und gematcheter Oberfläche.

d = Diagonale der Bounding Box.

INDEX_{asym} = Asymmetrieindex.

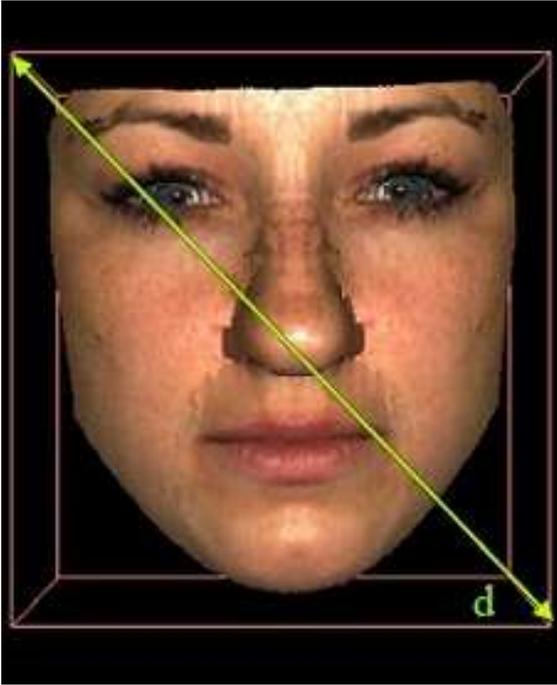


Abb. 2-10: Gematchede Oberfläche in ihrer Bounding Box mit eingezeichneter Diagonale.

Der Asymmetrieindex ließ somit Aussagen über das Ausmaß dreidimensionaler Unterschiede zweier Gesichtshälften eines Gesichts zu. Mit steigenden räumlichen Abweichungen in der Symmetrie der Gesichtshälften wuchs dieser Index. In einer Falschfarbendarstellung können die Unterschiede in den beiden Oberflächen anschaulich gemacht werden.

Die Farbskala der Falschfarbendarstellung erstreckte sich analog zum Spektrum des sichtbaren Lichts von dunkelblau über gelb und grün zu rot. Je wärmer der Farbton war (gelb bis rot) desto stärker war auch die Abweichung bzw. Asymmetrie in dieser Region. Symmetrischere Bereiche wurden in kalten (blau bis grün) Farben dargestellt (Abb. 2-11).

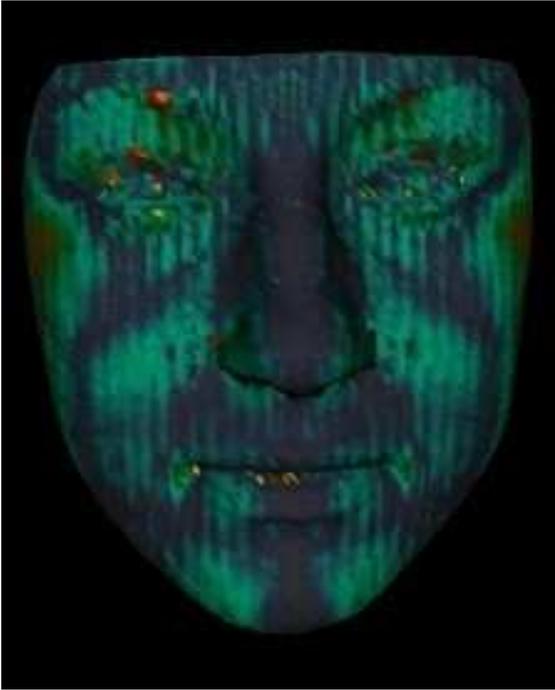


Abb. 2-11: Farbcodierte topographische Darstellung. Abweichungen wurden durch Farbtöne gekennzeichnet.

Im Gegensatz zu dem errechneten Indexwert, der eine quantitative Aussage über den Grad der Asymmetrie des Gesichts zuließ, konnte mit Hilfe der Falschfarbendarstellung die Asymmetrie qualitativ bzw. topographisch beurteilt werden. Anhand unterschiedlicher, vom Asymmetriewert abhängiger Einfärbungen der Gesichtsregionen, konnten Bereiche des Gesichts, in denen eine erhöhte Asymmetrie besteht, unmittelbar identifiziert werden. Die Abweichung konnte jedoch keiner der Gesichtshälften zugeordnet werden, da die Falschfarbendarstellung ausschließlich die Abstände der gematcheten Oberflächen sichtbar macht, aber nicht eine der Gesichtshälften als ideal betrachtet.

2.3 Statistische Auswertung

Für jeden einzelnen Patienten ergaben sich jeweils zwei Messwerte, aus denen der entsprechende Asymmetrieindex errechnet wurde. Dokumentiert wurden hierbei der absolute Wert des Abstandes „a“ der gespiegelten Gesichtshälften als „mean distance“, der individuelle Durchmesser des Gesichts „d“ als Referenz zur unterschiedlichen Gesichtsgröße und der sich daraus ergebende Index der Asymmetrie. Diese Werte wurden zunächst auf zwei Stellen nach dem Komma gerundet und in einer Tabelle zusammengefasst.

Diese Tabelle wurde anschließend in das Statistikprogramm SPSS für Windows (SPSS Inc., U.S.A.) übertragen und ausgewertet. Die Ergebnisse aus den statistischen Berechnungen wurden auf zwei Stellen nach dem Komma gerundet und werden im folgenden Kapitel veranschaulicht.

Die Darstellung der kontinuierlichen Variablen erfolgte als Mittelwerte und Mediane, während als Streumaße die Standardabweichungen, Standardfehler und Quartile gewählt wurden.

Für Vergleiche von zwei unabhängigen, normalverteilten Stichproben wurde der T-Test angewendet. Um vorher die Homogenität der Varianzen zu überprüfen wurde der Levene-Test durchgeführt.

Verbundene, normalverteilte Stichproben wurden mittels des T-Tests für gepaarte Stichproben verglichen.

Bei allen durchgeführten Tests erfolgte eine zweiseitige Signifikanzüberprüfung, wobei für alle statistischen Tests ein p-Wert $< 0,05$ als statistisch signifikant angenommen wurde.

In den grafischen Darstellungen, die ebenfalls mit SPSS erstellt wurden, wurden zur Veranschaulichung der Mittelwerte und der Unterschiede zwischen den Geschlechtern Boxplotdiagramme gewählt. Die Verteilung des Indexes wurde in Histogrammen aufgetragen.

3 Ergebnisse

3.1 Ergebnisse der Patientenauswahl

Für die Studie zur quantitativen Erfassung von Symmetrie in Gesichtern stellten sich insgesamt 50 Probandinnen und Probanden zur Verfügung. Das gesamte Probandengut bestand aus Studenten/innen unterschiedlicher Semester im Alter von 20 bis 30 Jahren. Das mittlere Alter der Probanden betrug 23 Jahre (Abb. 3-1).

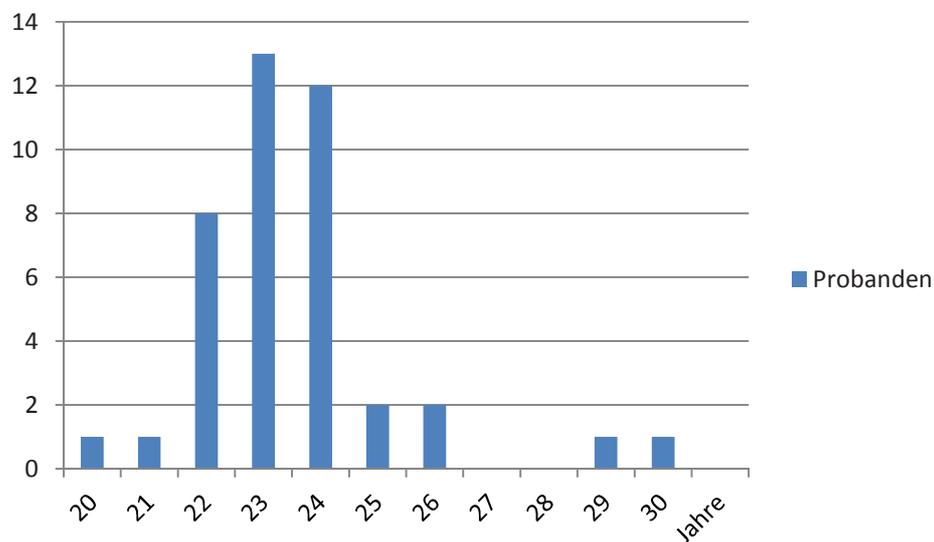


Abb. 3-1: Veranschaulichung der Altersstruktur der teilnehmenden Probanden

Die Geschlechterverteilung innerhalb des Probandenguts ist mit 25 weiblichen und 25 männlichen Probanden symmetrisch gehalten.

Alle Probanden entsprachen den unter 2.1. genannten Anforderungen.

3.2 Normalverteilungstests

Anhand des Shapiro-Wilk Tests geprüft, ergibt sich für alle getesteten Variablen eine Normalverteilung (siehe Tab. 3-1).

Tab. 3-1: Tests auf Normalverteilung

	Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz
Mittlerer Abstand (mm)	0,97	50	0,138
Gesichts- durchmesser (mm)	0,98	50	0,386
INDEXasym	0,96	50	0,050

3.3 Darstellung der Ergebnisse als farbkodierte topographische Abbildung

Zur Veranschaulichung der Ergebnisse werden jeweils ein weibliches und männliches Beispiel für verschiedene Symmetriegrade in Bezug auf den Mittelwert des INDEXasym von 2,96 abgebildet. Die farbcodierte topographische Darstellung verdeutlicht die asymmetrischen bzw. symmetrischen Bereiche des Gesichtes. Symmetrische Anteile werden in einem dunklen Blau dargestellt. Entlang der Farbskala wird der Farbton wärmer, je asymmetrischer die Gesichtsregion ist.

3.3.1 Beispiele für sehr symmetrische Gesichter des Probandengutes

Der INDEXasym für das in Abb. 3-2 abgebildete weibliche Gesicht beträgt 1,58, der des männlichen Beispiels beträgt 1,65.



Abb. 3-2 Beispiele für sehr symmetrische Gesichter

3.3.2 Beispiele für durchschnittlich symmetrische Gesichter des Probandengutes

Der INDEXasym des hier abgebildeten weiblichen Gesichtes beträgt 2,81, der des männlichen Gesichtes 2,79 (siehe Abb. 3-3).



Abb. 3-3: Beispiele für durchschnittlich symmetrische Gesichter

3.3.3 Beispiele für sehr asymmetrische Gesichter des Probandengutes

Für das in Abb. 3-4 gezeigte weibliche Gesicht beträgt der INDEXasym 4,06, der INDEXasym des männlichen Gesichtes beträgt 5,04.

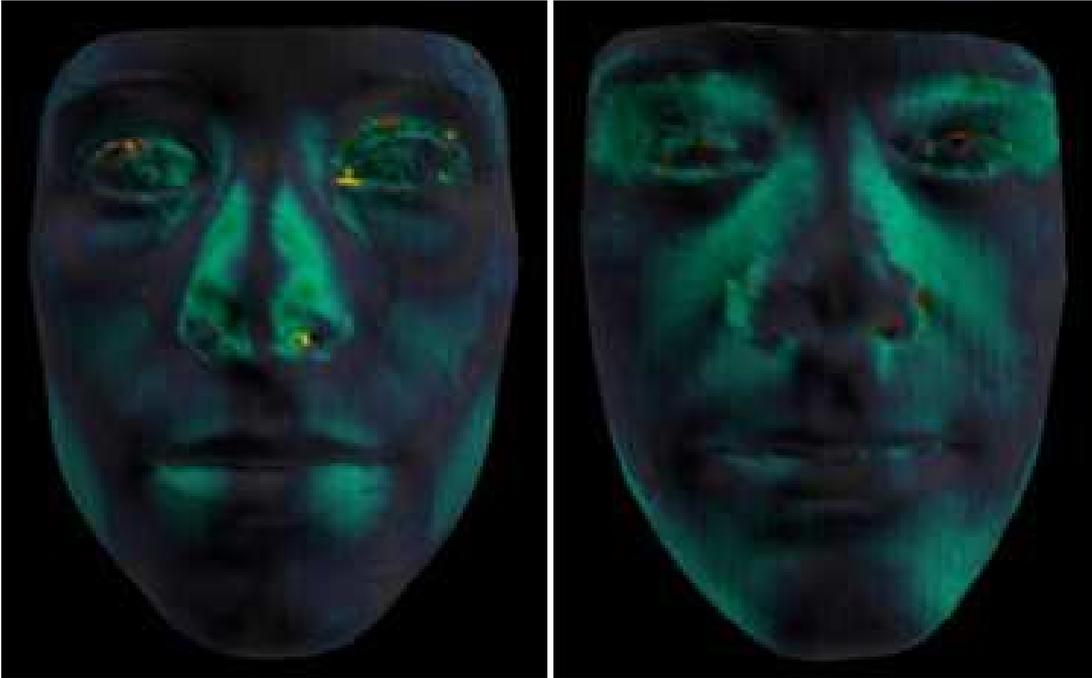


Abb. 3-4: Beispiele für sehr asymmetrische Gesichter

3.4 Deskriptive Statistik

3.4.1 Darstellung der Ergebnisse der Messreihe

Für jeden Probanden werden während des Messvorgangs die Variablen „Mittlerer Abstand“, „Gesichtsdurchmesser“ und „Index“ erhoben. Anhand der gewonnenen Daten der Messreihe wurden folgende Ergebnisse erlangt.

3.4.1.1 Mittlerer Abstand

Der mittlere Abstand beschreibt den Mittelwert aller Abstände der einzelnen homologen Punkte der Punktwolken einer gespiegelten und einer nicht gespiegelten Gesichtsoberfläche in mm. Der Mittelwert des mittleren Abstandes des gesamten Probandenguts liegt bei 0,56 mm mit einer Standardabweichung von 0,15 (siehe Tab. 3-2).

3.4.1.2 Gesichtsdurchmesser

Der Gesichtsdurchmesser der vermessenen Probanden wurde erfasst, um die Unterschiedlichkeit der Gesichter hinsichtlich ihrer Größe in die Berechnung des INDEXasym einzubeziehen. Der Mittelwert der Gesichtsdurchmesser liegt bei 139,48 mm mit einer Standardabweichung von 10,75, (siehe Tab. 3-2).

3.4.1.3 INDEXasym

Der Index, der aus dem mittleren Abstand und dem Gesichtsdurchmesser als INDEXasym errechnet wird, liefert folgende Ergebnisse.

Der Mittelwert des INDEXasym liegt, wie aus Tab. 3-2 ersichtlich, bei 2,96, die Standardabweichung bei 0,84.

In Abbildung Abb. 3-5 wird die Streuung und Normalverteilung des INDEXasym veranschaulicht.

Tab. 3-2: Ergebnisse der Messreihe

	Mittlerer Abstand (mm)	Gesichtsdurchmesser (mm)	INDEXasym
N	50	50	50
Mittelwert	0,56	193,48	2,96
Standardabweichung	0,15	10,74	0,84

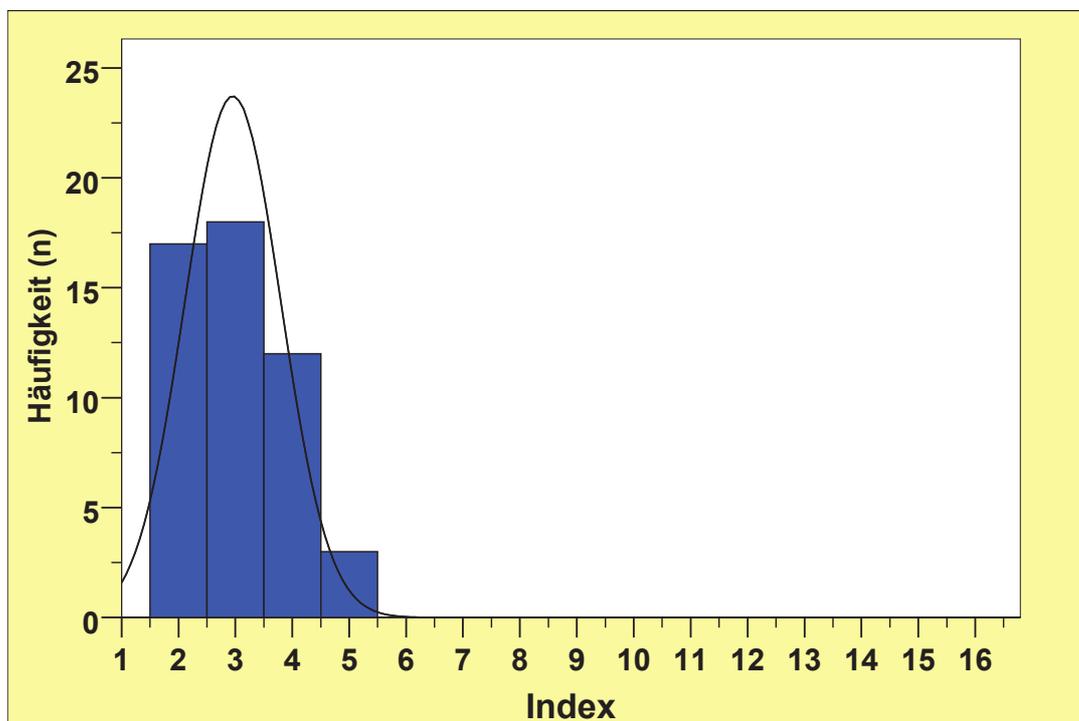


Abb. 3-5: Verteilung des INDEXasym

3.4.2 Vergleich Männer vs. Frauen

Die Messergebnisse der männlichen Probanden wurden denen der weiblichen gegenübergestellt.

In den folgenden drei Tabellen werden die Variablen „Mittlerer Abstand“, „Gesichtsdurchmesser“ und „INDEX“ im Hinblick auf einen möglichen geschlechtsspezifischen Unterschied betrachtet.

3.4.2.1 Mittlerer Abstand

Für den Mittleren Abstand ergibt sich bei den weiblichen Probanden ein Mittelwert von 0,53 mm, bei den männlichen ein ähnlicher Mittelwert von 0,6 mm (siehe Tab. 3-3).

Tab. 3-3: Mittlerer Abstand in mm

Geschlecht	Mittelwert	Standard-abweichung	Minimum	Maximum	N
Weiblich	0,53	0,13	0,30	0,75	25
Männlich	0,60	0,17	0,33	1,00	25
Insgesamt	0,56	0,15	0,30	1,00	50

3.4.2.2 Gesichtsdurchmesser

Der Gesichtsdurchmesser beträgt bei den weiblichen Probanden im Mittel 185,86 mm, bei den männlichen Probanden hingegen liegt der Mittelwert bei 201,1 mm (siehe Tab. 3-4).

Tab. 3-4: Gesichtsdurchmesser in mm

Geschlecht	Mittelwert	Standard- abweichung	Minimum	Maximum	N
Weiblich	185,86	6,90	172,40	198,62	25
Männlich	201,10	8,16	188,73	226,95	25
Insgesamt	193,48	10,74	172,40	226,95	50

3.4.2.3 INDEXasym

Der INDEXasym des weiblichen Kollektivs unterscheidet sich mit einem Mittelwert von 2,83 nur wenig von dem des männlichen Kollektivs. Dieser beträgt, wie aus Tab. 3-5 ersichtlich, 3,08. Diese Werte sind zur Veranschaulichung in Abb. 3-8 abgebildet.

Tab. 3-5: INDEXasym im Vergleich

Geschlecht	Mittelwert	Standard- abweichung	Minimum	Maximum	N
Weiblich	2,83	0,74	1,58	4,07	25
Männlich	3,08	0,93	1,65	5,04	25
Insgesamt	2,96	0,84	1,58	5,04	50

3.5 Explorative Statistik

Tab. 3-6 zeigt die Ergebnisse der T-Tests für unabhängige Stichproben. Nur für das Ergebnis für die Gesichtsdurchmesser ($p < 0,001$) findet sich ein Anhalt für einen signifikanten Unterschied zwischen den Geschlechtern, nicht aber für den mittleren Abstand und den INDEXasym.

Tab. 3-6: T-Test bei unabhängigen Stichproben

	Sig. (2-seitig)
Mittlerer Abstand (mm)	0,094
Gesichtsdurchmesser (mm)	0,000
INDEXasym	0,307

Anhand der Abb. 3-6 wird deutlich, dass, obwohl sich der Mittelwert nur wenig unterscheidet, es eine größere Spannbreite des Mittleren Abstandes der männlichen Gesichter gibt. Insgesamt ist der Unterschied jedoch nicht signifikant.

Die Abb. 3-7 stellt den signifikanten Unterschied des Gesichtsdurchmessers und damit der Gesichtgröße zwischen männlichen und weiblichen Probanden dar. Dieser Unterschied ist insofern entscheidend, als dieser Parameter in die Berechnung des INDEXasym direkt mit einfließt. Darüber hinaus ist bezüglich der Größe des Gesichts ein Ausreißer im Probandengut der Männer zu erkennen. Bei diesem Probanden beträgt der Gesichtsdurchmesser 226,95mm bei einem Mittelwert von 201,1 mm. Bei einem mittleren Abstand von 0,46 mm ergibt sich hieraus ein INDEXasym von 2,05 (Mittelwert: 3,08). Die Größe des

Gesichtes wirkt sich bei diesem Probanden positiv auf den Grad der Symmetrie aus.

In Abb. 3-8 ist zu erkennen, dass sich die Mittelwerte des INDEXasym der männlichen und der weiblichen Probanden nicht maßgeblich unterscheiden. Es ist jedoch zu sehen, dass, ähnlich wie in der Abbildung des Mittleren Abstandes, die Werte der männlichen Probanden in einer größeren Bandbreite streuen.

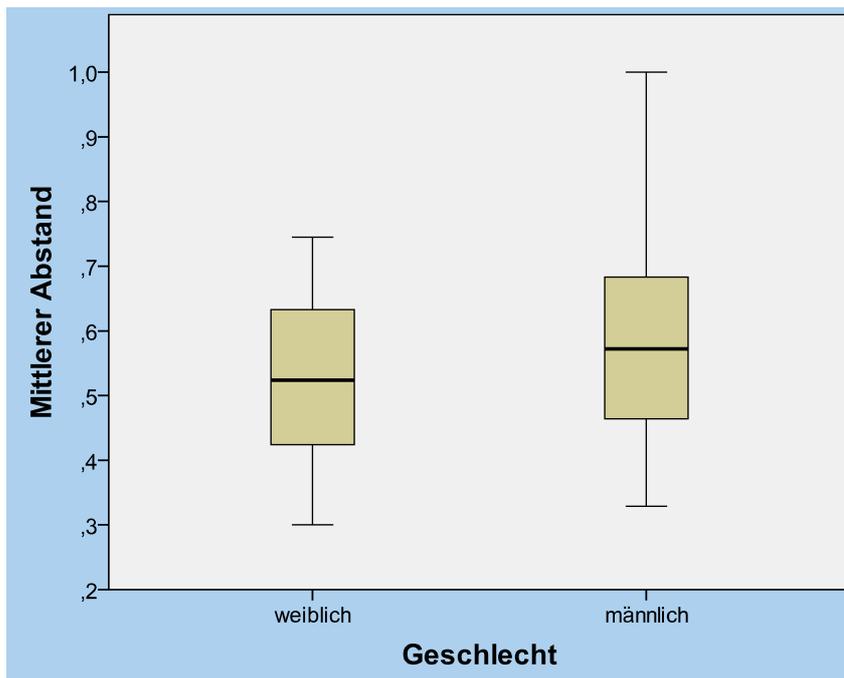


Abb. 3-6: Darstellung der Unterschiedlichkeit des mittleren Abstandes zwischen den Geschlechtern

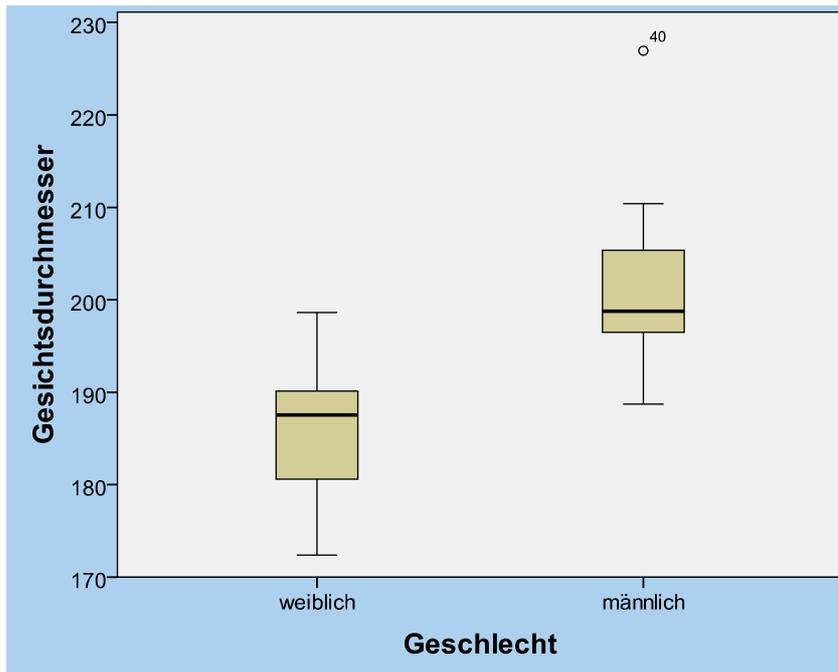


Abb. 3-7: Darstellung der Abweichungen des Gesichtsdurchmessers zwischen männlichen und weiblichen Probanden. Der Proband Nr. 40 wird hier als Ausreißer separat dargestellt

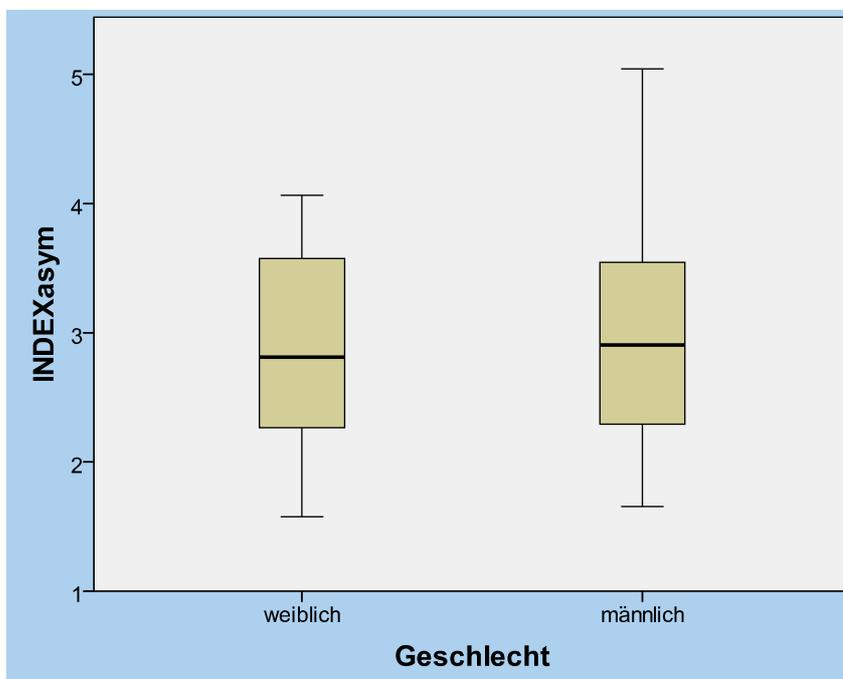


Abb. 3-8: Darstellung des Mittelwertes und des Standardfehlers des INDEXasym der weiblichen und männlichen Probanden

4 Diskussion

4.1 Diskussion der Methode

Die für diese Arbeit gewählte Methode sollte in ihrer Leistungsfähigkeit im Hinblick auf die 3D- Oberflächendarstellung und Evaluation der Asymmetrie hin untersucht und beurteilt werden.

Die klinische Fotografie zählt heute zu den viel verwendeten Methoden zur Weichteilanalyse des Gesichts, die in einigen Fachrichtungen der Medizin, wie auch in der Mund- Kiefer-Gesichtschirurgie eingesetzt wird. Sie dient der Indikationsstellung, Planung, Dokumentation und Überprüfung des Erfolgs verschiedener Therapien (13, 36). Die zur Sicherstellung ausreichender Qualität und Reproduzierbarkeit etablierten Standards und Richtlinien erhöhen den notwendigen Aufwand der Durchführbarkeit. Darüber hinaus sind je nach Fragestellung, die beantwortet werden soll, eventuell pro Patient mehrere Bilderreihen oder Zusatzaufnahmen nötig, bei denen es ebenfalls genaue Vorgaben bezüglich der Ausrichtung des Gesichts, dessen Neigungsgrad oder der Mimik des Patienten einzuhalten gilt (11, 16, 19, 38).

Durch die Entwicklung der digitalen Fotografie ist eine schnelle Überprüfbarkeit des Ergebnisses möglich, gewünschte Einstellungen, Ausschnitte oder Qualitätsmängel können unmittelbar korrigiert werden. Ebenfalls ist eine metrische Vermessung softwareunterstützt am Computerbildschirm möglich. Bildbearbeitungsprogramme bergen jedoch auch stets das Risiko einer Verfälschung bzw. einer zu intensiven Nachbearbeitung (16, 28). Zur Darstellung der zweidimensionalen Symmetrie eines Gesichts eignen sich insbesondere enface Aufnahmen. Durch die Hinzunahme von Profilaufnahmen lassen sich zwar visuelle Eindrücke aus einer orthogonalen Ebene und damit ein „pseudo-dreidimensionaler“ Eindruck gewinnen, jedoch erscheint dies nicht ausreichend, wenn die Zielsetzung lautet, die dreidimensionale Gesamtsymmetrie eines Gesichtes in einem einzigen Wert darzustellen.

Da die Morphometrie des Gesichtes sich auf drei Dimensionen erstreckt, ist es sowohl für die Parametrisierung, als auch für vergleichende Betrachtungen

höchst sinnvoll, eine große Zahl von Messpunkten in einem dreidimensionalen Koordinatensystem zu erheben. Bei der klinischen Fotografie können hingegen lediglich Streckenverhältnisse auf einer maßstabsverkleinerten Version des Gesichts aufgetragen werden, während reale Proportionen und räumliche Abstände vernachlässigt werden.

Zu ähnlichen Schlussfolgerungen führt ein Vergleich mit der Methode der Gesichtsanalyse anhand von Fernröntgenseiten- und Frontalaufnahmen (FRS, FRF).

Als eines der wichtigsten diagnostischen Mittel in der Kieferorthopädie findet die Anfertigung von FRS und FRF häufig Anwendung. Diese Methode bietet die Darstellung von sowohl knöchernen Schädelstrukturen als auch, durch Verwendung spezieller Filter, von profilbildenden Weichgewebsstrukturen (31, 34). Um die nötige Reproduzierbarkeit zu gewährleisten, ist die Fixierung des Patientenkopfes in einem Kephalostat erforderlich. Die Auswertung und Analyse erfolgt mittels manuell festgelegter Messpunkte und sich daraus ergebenden Streckenverhältnissen und Winkeln, wobei ebenfalls computergestützte Auswertungsverfahren zur Anwendung kommen (4, 14, 13, 24). Auch bei dieser Methodik ist die Beschränkung auf zwei Dimensionen als wesentlicher Nachteil zu nennen, denn die FRS stellen eine zweidimensionale Abbildung dreidimensionaler Strukturen auf eine planare Ebene dar. Somit sind ausschließlich die sagittale und die vertikale Ebene beurteilbar. Da durch die Aufnahmetechnik Abbildungsfehler, wie der Parallaxenfehler oder der Verzerrungsfehler, entstehen, ergeben sich weitere Ungenauigkeiten in der Abbildung, somit auch in der Bewertbarkeit der Bilder (1, 13). Darüber hinaus wird der Patient bei Anfertigung von FRS oder FRF einer Strahlenbelastung ausgesetzt. Laut Bundesamt für Strahlenschutz liegt die effektive Dosis bei unter einem Millisievert, was als relativ wenig eingestuft werden kann, jedoch insbesondere für Kinder einen entscheidenden Nachteil darstellt (7). Zudem muss nach wie vor jede Einwirkung ionisierender Strahlung auf den menschlichen Körper als schädlich betrachtet werden.

Die in dieser Arbeit vorgestellte und angewandte Methode nutzt hingegen strukturiertes, „weißes“ Licht und birgt daher kein Risiko einer Strahlenbelastung.

Ein weiterer, maßgeblicher Vorteil der in dieser Arbeit verwendeten Methode der Stereophotogrammetrie und Nutzung der Streifenprojektionstechnik resultiert aus der Möglichkeit, in sehr kurzer Zeit (2 - 3 Sekunden) an einem Probanden eine sehr große Zahl (> 100.000) von Messpunkten zu erheben, denen über Triangulierung jeweils drei räumliche Koordinatenwerte im realen Maßstab zugeordnet werden können, welche jeweils einen Punkt auf der Gesichtsoberfläche repräsentieren.

Die auf diesem Weg greifbare, vollwertige Dreidimensionalität des Auswertepinzips und somit der Messmethodik erweist sich für Berechnungen und Auswertungsmöglichkeiten als besonders vorteilhaft, da mit den triangulierten Werten maßstabgetreue, räumliche Proportionsmessungen vorgenommen werden können. Darüber hinaus ist eine Betrachtung einer aufgenommenen Oberfläche aus verschiedenen Perspektiven möglich, wodurch die Notwendigkeit mehrerer Aufnahmen entfällt.

Auf die gewonnenen Messdaten wird zudem ein mathematischer Algorithmus angewendet, der die Ermittlung eines einzigen Wertes zur Quantifizierung der gesamten fazialen Symmetrie erlaubt, was die Handhabung wesentlich erleichtert. Insbesondere ist so eine quantitative Beurteilung des durch operative Rekonstruktionen wiederhergestellten Grades der Symmetrie ermöglicht.

Der entsprechende Algorithmus ist in einer vom biophysikalischen Institut der Universität Münster entwickelten, speziellen Software für diese Messanordnung implementiert worden und liegt somit als verfügbares Softwareprogramm vor.

Auf der Basis dieser Überlegungen lässt sich die Anwendung der Streifenprojektionstechnik im Vergleich zur klinischen Fotografie und zu Methoden, die auf Röntgenaufnahmen basieren, als ein besonders geeignetes Messverfahren zur Erfassung der dreidimensionalen fazialen Symmetrie einstufen.

Im Vergleich zu anderen Verfahren zur dreidimensionalen Darstellung von Gesichtern, wie Laserscans, MRT- oder 3D-Computertomographie, bietet das für diese Arbeit gewählte Verfahren signifikante Vorteile wie beispielweise geringe Kosten, niedrigen apparativen Aufwand, schnelle Durchführbarkeit und umgangene Strahlenbelastung bzw. vermiedene potenzielle Netzhaut-Gefährdungen durch Laserlicht, weshalb dieses Verfahren für alle Patienten gefahrlos eingesetzt werden kann und insbesondere auch für Kinder geeignet ist (29).

4.2 Diskussion des Zielparameters INDEXasym

Bei der Planung, Dokumentation und Überprüfung operativer gesichts-chirurgischer oder kieferorthopädischer Maßnahmen fehlt heute hinsichtlich der Symmetriebeurteilung des gesamten Gesichtes ein Parameter, der den Symmetrie- bzw. den Asymmetriestatus des jeweiligen Gesichtes mittels einer einzelnen, einfach zu handhabenden Zahl, beispielsweise des INDEXasym, auszudrücken vermag. Anhand einer solchen Kennzahl wären nicht nur quantitative Aussagen zum Asymmetriestatus des Gesichtes vor und nach einem Eingriff möglich, sondern auf dieser Basis ließe sich auch ein Behandlungserfolg, im Sinne eines vor einer Operation geplanten, zu erreichenden Asymmetrie-Zielwertes, postoperativ messbar überprüfen.

INDEXasym

Die Ermittlung der gesuchten Kenngröße „INDEXasym“ erfolgt über einen Matching-Prozess unter Verwendung der triangulierten 3D-Datensätze. Die Sagittalebene bildet die Symmetrieebene, an der die Gesichtsoberfläche gespiegelt wird.

Die zugrunde liegende, mathematische Aufgabenstellung der Adjustierung der übereinander gelegten, gespiegelten und nicht-gespiegelten Oberflächen haben Chetverikov et al. (10) bearbeitet und hierfür den mittlerweile weit verbreiteten ICP- (Iterative Closest Point-) Algorithmus entwickelt, der auch hier Anwendung findet.

Aufgrund der Bewährtheit des zugrunde liegenden Algorithmus und insbesondere auch aufgrund der hohen Zahl von aufgenommenen und für die Ermittlung genutzten Messpunkte ist gewährleistet, dass der INDEXasym eine repräsentative Maßzahl für den Grad der räumlichen Unterschiedlichkeit zwischen rechter und linker Gesichtshälfte für den jeweilig vermessenen Probanden liefert.

Der gewonnene Asymmetrie-Index lässt Aussagen über das Ausmaß dreidimensionaler Unterschiede zweier Gesichtshälften eines Gesichts zu und kann

das Maß räumlicher Abweichungen in der Symmetrie der Gesichtshälften quantifizieren, wodurch eine einzelne dimensionslose Maßzahl für die faziale Asymmetrie verfügbar wird.

4.3 Diskussion der Messergebnisse

Um einen Richtwert für den Grad von Asymmetrie in Normalgesichtern anzunähern wurde eine Gruppe von 50 Probanden im Alter von 20 – 30 Jahren untersucht. Darüber hinaus sollte geprüft werden, ob geschlechtsspezifisch unterschiedliche Normwerte für den INDEXasym nachweisbar sind. Hierzu wurde eine symmetrische Geschlechtsverteilung mit jeweils 25 männlichen bzw. 25 weiblichen Probanden gewählt.

Nach Abschluss der Datensammlung wurden zunächst Mittelwerte über die Gesamtzahl $N=50$ aller Probanden gebildet. Der Mittelwert für den mittleren Abstand a wurde zu 0,56 mm bestimmt, wobei der Wert der Standardabweichung 0,15 betrug. Der mittlere Gesichtsdurchmesser wurde zu 193,48 mm mit einer Standardabweichung von 10,74 gemessen. Der aus beiden Werten abgeleitete INDEXasym betrug 2,96 mit einer Standardabweichung von 0,84. Dieser Wert könnte als erste Näherung eines Richtwertes für den Grad der Symmetrie in Normalgesichtern gelten, sollte aber durch Vergrößerung des Umfangs des Probandengutes präzisiert werden.

Während die Machbarkeit der Ermittlung eines Normwertes für den Grad der räumlichen Unterschiedlichkeit zwischen rechter und linker Gesichtshälfte in Form einer einzelnen skalaren Größe mit dem gewählten Verfahren somit als verifiziert angesehen werden kann, muss hinsichtlich der numerischen Ergebnisse eingeräumt werden, dass aufgrund der geringen Probandenzahl die relativen Fehlerbreiten eine nicht unerhebliche Unschärfe erzeugen.

Hierunter leidet insbesondere die Trennschärfe bei der Untersuchung, ob hinsichtlich des INDEXasym eine signifikante, geschlechtsspezifische Unterschiedlichkeit zu erkennen ist.

Lediglich das Ergebnis für den Gesichtsdurchmesser (Mittelwert [weiblich] = 185,86 mit Standardabweichung = 6,90; Mittelwert [männlich] = 201,10 mit Standardabweichung = 8,16) liefert (mit $p < 0,001$) einen als signifikant zu erkennenden Unterschied zwischen den Geschlechtern.

Hingegen wird keine Signifikanz bei der geschlechterspezifischen Gegenüberstellung von mittlerem Abstand a und INDEXasym beobachtet.

Die mittels einer erheblichen Vergrößerung der Probandenzahlen zu erwartende Verschlankung der Fehlerbreiten sollte unter Berücksichtigung der Tatsache betrachtet werden, dass auch Normalgesichter keine perfekte Symmetrie aufweisen. Daher ist zu erwarten, dass der Grad der Abweichung von einer perfekten Symmetrie auch bei Probanden ohne pathologische Veränderungen in einem gewissen Bereich streut. Somit werden die Fehlerbreiten auch bei bedeutend größeren Probandenzahlen nicht beliebig nahe gegen Null gehen können. Entsprechend sollte zukünftig für Normalgesichter auch eher ein begrenztes „Norm-Spektrum“ anstatt eines scharfen Normwertes anvisiert werden. Die erwartete Schwankungsbreite entspräche dem „biologischen Fehler“, - im Gegensatz zu dem, mit dem makroskopischen Messprozess verknüpften „physikalischen Fehler“.

Auf der Grundlage der mit dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen und Analysen empfiehlt es sich, bei unverändertem Messsystem fortlaufend weitere Messprozesse an Normalgesichtern durchzuführen. Durch weitere Datensammlung kann somit schrittweise eine Präzisierung der INDEXasym-Normwerte für weibliche und männliche Probanden erreicht werden. Auf der Basis eines deutlich vergrößerten Umfangs des Probandengutes wird sich möglicherweise eine signifikante, geschlechtsspezifische Differenz im INDEXasym beobachten lassen.

Auf der Basis der im Rahmen dieser Arbeit gesammelten Daten lässt sich lediglich feststellen, dass in der Verteilung des INDEXasym innerhalb der weiblichen Stichprobe eine Häufung zwischen den Werten 2 und 3 besteht. Im männlichen Probandengut hingegen wird eine Häufung zwischen 3 und 4 beobachtet.

Da die subjektive, optische Wahrnehmung der Gesichtssymmetrie von gesunden Probanden suggeriert, dass es möglicherweise auch altersspezifische Veränderungen im INDEXasym gibt, liegt es nahe, die zu akkumulierenden Messwerte zukünftig auch im Hinblick auf die Altersverteilung zu analysieren.

Hinsichtlich der Praktikabilität lässt sich abschließend ebenfalls feststellen, dass der apparative und zeitliche Aufwand für den hier untersuchten Messprozess ohne weiteres auch umfangreichere Reihenuntersuchungen zulässt, um entsprechend schärfere, quantitative Ergebnissen liefern zu können. Die Aufnahme von rund 500.000 Messpunkten pro Proband in einer reinen Messzeit von 2-3 Sekunden liefert, ebenso wie die Automatisierung des Auswerteverfahrens, eine günstige Voraussetzung für eine entsprechende Erweiterung der Probandenzahlen. Die jeweilige Positionierung der Probanden am Messplatz lässt sich ebenfalls mit einem vertretbaren Zeitaufwand durchführen, sodass die erforderliche Zeit für die Datenaufnahme pro Proband auf 10-15 Sekunden geschätzt werden kann. Die Praktikabilität des Verfahrens ist somit nochmals belegt.

Jedoch ist vor einer systematischen Akkumulation von über längere Zeiträume erfolgenden Mess-Perioden sicherzustellen, dass die regelmäßige und ordnungsgemäße Kalibrierung des Systems diesbezügliche Fehlerquellen von vorneherein ausschließt.

5 Zusammenfassung

- Die in dieser Arbeit untersuchte Methode erweist sich als ein besonders geeignetes Messverfahren zur Erfassung der dreidimensionalen fazialen Asymmetrie. Ein maßgeblicher Vorteil resultiert aus der Möglichkeit, in kurzer Zeit eine große Zahl (> 100.000) von Messpunkten zu erheben, denen über Triangulierung jeweils räumliche Koordinatenwerte im realen Maßstab zugeordnet werden können. Hieraus lässt sich mit dem INDEXasym ein einzelner Wert zur Quantifizierung der gesamten fazialen Asymmetrie ableiten. Maßstabgetreue, räumliche Proportionsmessungen und Betrachtungen der aufgenommenen Oberfläche aus verschiedenen Perspektiven sind möglich. Das genutzte Messsystem besteht aus verfügbaren Komponenten. Das Verfahren zeichnet sich zudem durch geringe Kosten, schnelle Durchführbarkeit und fehlende Strahlenbelastung, bzw. fehlende potenzielle Netzhaut-Gefährdungen durch Laser aus und kann somit für alle Patientengruppen, insbesondere auch für Kinder, gefahrlos eingesetzt werden.
- Die Ermittlung der gesuchten Kenngröße INDEXasym erfolgte über einen Matching-Prozess unter Nutzung der triangulierten 3D-Datensätze. An der Sagittalebene gespiegelte Gesichtsoberflächen wurden mittels ICP- (Iterative Closest Point-) Algorithmus gematched und für jeden Messpunkt der Originaloberfläche der Abstand zum nächstliegenden Punkt in der gespiegelten Kopie errechnet. Der Mittelwert aller Punktabstände lieferte einen skalaren Wert, der die morphometrische Abweichung zwischen rechter und linker Gesichtshälfte ausdrückt. Der Einfluss, den die Größe des Gesichtes hat, wurde durch Division mit der Diagonalen der Frontfläche der entsprechenden Bounding Box korrigiert. Der resultierende Wert wurde mit dem Faktor 1000 multipliziert und

liefert so den gesuchten Asymmetrie-Index INDEX_{Asym}. Mit wachsender räumlicher Unterschiedlichkeit zwischen rechter und linker Gesichtshälfte wächst auch der erhaltene Wert INDEX_{Asym}, wodurch eine einzelne skalare Maßzahl für die faziale Symmetrie verfügbar wird.

- Bei der Untersuchung einer Gruppe von 50 Probanden im Alter von 20 – 30 Jahren mit symmetrischer Geschlechtsverteilung wurde keine signifikante Abweichung des INDEX_{Asym} zwischen männlichem und weiblichem Probandengut gesehen. Dies kann aber aus den - aufgrund der limitierten Gesamtprobandenzahl - relativ großen Fehlerbreiten resultieren. Der INDEX_{Asym} für das gesamte Probandengut betrug 2,96 mit einer Standardabweichung von 0,84, wobei in der Verteilung des INDEX_{Asym} innerhalb des weiblichen Probandengutes eine Häufung des INDEX_{Asym} zwischen den Werten 2 und 3 und im männlichen Probandengut eine Häufung zwischen 3 und 4 beobachtet wurde.
- Aus der Untersuchung resultiert die Empfehlung bei unverändertem Messsystem fortlaufend weitere Messprozesse an Normalgesichtern durchzuführen, diese Werte zu akkumulieren und mit wachsender Probandenzahl schrittweise eine Präzisierung der INDEX_{Asym}-Normwerte für weibliche und männliche Probanden zu erreichen. Hinsichtlich der Praktikabilität lässt sich feststellen, dass der apparative und zeitliche Aufwand für den untersuchten Messprozess auch umfangreichere Reihenuntersuchungen zulässt, die entsprechend genauere quantitative Ergebnissen liefern sollten. Die Aufnahme von rund 500.000 Messpunkten pro Proband in einer reinen Messzeit von 2-3 Sekunden liefert ebenso wie die Automatisierung des Auswerteverfahrens eine günstige Voraussetzung für entsprechende Untersuchungen. Die Praktikabilität des Verfahrens ist somit nochmals belegt.

6 Literaturverzeichnis

1. Ahlquist J, Eliasson S, Welander U. „The effect of projection errors on cephalometric length measurement.“ *Europ J Orthodont*, 1986: 141.
2. Benz M, Laboureux X, Maier T, et al. „The Symmetry of Faces.“ *Proc. of Vision, Modeling and Visualization*, 2002: 43 - 50.
3. Bischhoff G, Böröcz Z, Proll C, et al. „Modular optical topometric sensor for 3D acquisition of human body surfaces and long-term monitoring of variations.“ *Biomed Tech*, 2007: 52:284-289.
4. Bishara, SE. „Longitudinal cephalometric standards from 5 years of age to adulthood.“ *Am J Orthodont*, 1981: 35-44.
5. Bock JJ, Fuhrmann RAW. „Die Evaluation vertikaler Parameter im Fernröntgenseitenbild.“ *J Orofac Orthop*, 2007: 210-222.
6. Broadbent, BH. „A new X-ray Technique and its application to Orthodontia.“ *The Angle Orthodontist*, 1931: 45-66.
7. Bundesamt für Strahlenschutz.
http://www.bfs.de/de/ion/faq/faq_roentgen.html/#6 (Zugriff am 14.03.2011).
8. Burke PH, Banks P, Beard LF, Tee JE, Hughes C. „Stereophotographic measurement of change in facial soft tissue morphology following surgery.“ *Br J Oral Surg*, 1983: 237-245.
9. Burke PH, Beard LFH. „Stereophotogrammetry of the face.“ *Am J Orthod*, 1967: 769-782.
10. Chetvericov D, Svirko D, Stepanov D. „The trimmed iterative closest point algorithm.“ *International Conference on Pattern Recognition*, 2002: 545-548.
11. Claman L, Patton D, Rashid R. „Standardized portrait photography for dental patients.“ *Am J Orthod Dentofac Orthop*, 1990: 197-205.

12. Davidson, T. „Photography in facial plastic and reconstructive surgery.“ J Biol Photogr, 1979: 59-67.
13. Diederich, P. Praxis der Zahnheilkunde "Kieferorthopädie I". Bd. 11/1. Urban und Fischer, 2000.
14. Diederich, P. Praxis der Zahnheilkunde "Kieferorthopädie III". Bd. 12. Urban und Fischer, 2002.
15. Dirksen, D. „Erfassung und Analyse von Tiefenbildern für Anwendungen in der Zahn- Mund- und Kieferheilkunde.“ 34-52. Shaker-Verlag, 2003.
16. Ettore G, Weber M, Schaaf H, Lowry JC, Mommaerts MY, Howaldt HP. „Standards for digital photography in cranio-maxillo-facial surgery- Part I: Basic views and guidelines.“ J Cranio Max Fac Surg, 2006: 65-73.
17. Ferrario VF, Sforza C, Miani A Jr, Serrao G. „A three-dimensional evaluation of human facial asymmetry.“ J Anat, 1995: 103-110.
18. Goellner M, Schmitt J, Karl M, Wichmann M, Holst S. „Photogrammetric measurement of initial tooth displacement under tensile force.“ Med Eng Phys, 2010.
19. Gordon P, Wander P. „Techniques for dental photography.“ Br Dent J, 1987: 307-316.
20. Hartley R, Zisserman A. In Multiple View Geometry in Computer Vision, 239-261. Cambridge University Press, 2004.
21. Hofrath, H. „Die Bedeutung von Röntgenfern- und Abstandsaufnahmen für die Diagnostik der Kieferanomalien.“ Fortschr. Orthodont., 1931: 232 ff.
22. Holdaway, RA. „A soft-tissue cephalometric analysis and its use in orthodontic treatment planning.“ Am J Orthodont, 1983: 1-28.
23. Hönn M, Göz G. „The Ideal of Facial Beauty: A Review.“ J Orof Orthop, 2007: 6-16.
24. Kahl-Nieke, B. „Einführung in die Kieferorthopädie.“ 121-177. Köln: Deutscher Zahnärzte-Verlag, 2010.

25. Kobayashi T, Ueda K, Honma K, Sasakura H, Hanada K, Nakajima T. „Three-Dimensional analysis of facial morphology before and after Orthognathic surgery.“ J Cranio-Max-Fac Surg, 1990: 68-73.
26. Müller G, Koch R. „Das Göttinger Fotostatverfahren.“ Fortschr Kieferorthop, 1973: 401-407.
27. Naini FB, Moss JP, Gill DS. „The enigma of facial beauty: Esthetics, proportions, deformity, and controversy.“ American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, 2006: 277-282.
28. Nouraei SAR, Frame J, Nduka C. „Uses and abuses of digital imaging in plastic surgery.“ International Journal of Surgery, 2005: 254-257.
29. Rasse M, Forkert G, Walshäusl P. „Stereophotogrammetry of facial soft tissue.“ Int J Oral Maxillofac Surg, 1991: 163-166.
30. reproarte
http://www.reproarte.com/files/images/V/vinci_leonardo_da/vitruvmann.jpg
(Zugriff am 23. Januar 2011).
31. Sander FG, Weinreich A, Wichelhaus A. „Die Aluminiumblende - ein nützliches Zubehör für die Fernröntgenaufnahme zur Verbesserung der Bildqualität.“ Prakt Kieferorthop, 1990: 219.
32. Savara, BS. „A Method for Measuring Facial Bone Growth in Three Dimensions.“ Hum Biol, 1965: 245-255.
33. Schwarz, AM. Lehrgang der Gebißregelung. Bd. 1 Untersuchungsgang (Diagnostik). Wien: Urban und Schwarzenberg, 1961.
34. Segner D, Hasund A. Individualisierte Kephalemetrie. Hamburg: Dietmar Segner Verlag, 1994.
35. Simon, P. Grundzüge einer systematischen Diagnostik der Gebiß-Anomalien. Berlin: Meusser, 1922.
36. Swamy RS, Most SP. „Pre- and Postoperative Portrait Photography: Standardized Photos for Various Procedures.“ Facial Plastic Surgery Clinics of North America, 2010: 245-252.

37. Thornhill R, Gangestad SW. „Human facial beauty. Averageness, symmetry and parasite resistance.“ 1993: 237-269.
38. Williams, R. „Positioning and lighting for patient photography.“ J Biol Photogr, 1985: 131-143.
39. Zöllner, F. Leonardo da Vinci. Sämtliche Gemälde und Zeichnungen. Köln: Taschen Verlag, 2003.

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Dr. Kleinheinz für die Überlassung des interessanten Themas sowie die freundliche und konstruktive Unterstützung und Zusammenarbeit.

Ebenfalls herzlich bedanken möchte ich mich bei Herrn Priv.- Doz. Dr. Dirksen für die Mitbetreuung und Beratung in physikalischen Belangen, sowie für die Übernahme der Zweitkorrektur.

