

Technische Universität München
Klinik und Poliklinik für Plastische Chirurgie und Handchirurgie,
Klinikum rechts der Isar
(Direktor: Univ.- Prof. Dr. H.- G. Machens)

**Dreidimensionale Vermessung der
Oberflächengeometrie und
Quantifizierung der Asymmetrie des
Gesichtes**

Judith Ellen Ludwig

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Medizin der Technischen Universität
München zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Medizin
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.- Prof. Dr. D. Neumeier

Prüfer der Dissertation:

1. Priv.- Doz. Dr. L. Kovacs- Hintz
2. Univ.- Prof. Dr. H.- G. Machens

Die Dissertation wurde am 10.11.2009 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät für Medizin am 28.04.2010 angenommen.

Meiner Familie

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	S. 1
1.1	Durchschnittlichkeit	S. 3
1.2	Symmetrie	S. 5
1.3	Ästhetik in der Philosophie	S. 6
1.4	Der goldene Schnitt	S. 7
1.5	Historische Proportionslehren	S. 11
1.5.1	Ägypten	S. 11
1.5.2	Griechenland	S. 12
1.5.3	Römisches Reich	S. 13
1.5.4	Renaissance	S. 13
1.5.5	Neuzeit	S. 15
1.6	Erfassungsmethoden fazialer Symmetrien	S. 17
1.6.1	Zweidimensional	S. 17
1.6.1.1	Anthropometrie	S. 17
1.6.1.2	Fotografie	S. 20
1.6.1.3	Röntgenografie/ Radiografie	S. 20
1.6.2	Dreidimensional	S. 21
1.6.2.1	Abdruckverfahren	S. 21
1.6.2.2	Schnittbildgebung	S. 22
1.6.2.2.1	Computertomografie	S. 22
1.6.2.2.2	Magnetresonanztomografie	S. 23
1.6.2.3	Meßbildverfahren	S. 25
1.6.2.3.1	Photogrammetrie	S. 25
1.6.2.3.2	Moiré- Fotografie	S. 26
1.6.2.3.3	Streifenprojektion	S. 27
1.6.2.4	Triangulationsverfahren	S. 29
1.6.2.4.1	Trackingverfahren	S. 29
1.6.2.4.2	Laserscanning/ Lichtschnittverfahren	S. 30
1.7	Anwendungsgebiete	S. 32
1.8	Ziel dieser Arbeit	S. 34
2.	Material und Methodik	S. 35
2.1	Datenerfassung und Berechnung	S. 35
2.1.1	Laserscanner	S. 35
2.1.2	Software	S. 36
2.1.3	Flächenberechnung	S. 37
2.2	Erstellung des Gittermodells in 3D	S. 38
2.3	Anwendung des Gittermodells	S. 43
2.3.1	Modellüberprüfung an einem symmetrischen Puppenkopf	S. 43
2.3.2	Modellanwendung an normalsymmetrischen Probanden	S. 44
2.3.3	Modellanwendung anhand von klinischen Beispielen	S. 44
2.4	Statistik	S. 45

3.	Ergebnisse	S. 46
3.1	Gittermodell	S. 46
3.2	Überprüfung des Modells anhand der Puppe	S. 48
3.3	Anwendung auf Probanden	S. 51
3.4	Anwendung auf Patienten	S. 61
3.4.1	Gesichtsasymmetrien	S. 61
3.4.1.1	Weichteilatrophy linksmandibulär, Zustand nach Zahnextraktion	S. 61
3.4.1.2	Hemi-faziale Weichteilatrophy rechts, Zustand nach Unfall	S. 66
3.4.2	Nasale Region	S. 71
3.4.2.1	Ästhetische Septorhinoplastik	S. 71
3.4.2.2	Nasenrekonstruktion, Zustand nach Verbrennung	S. 75
4.	Diskussion	S. 79
4.1	Ausblick	S. 96
5.	Zusammenfassung	S. 97
6.	Literaturverzeichnis	S. 100
7.	Abbildungsverzeichnis	S. 109
8.	Tabellenverzeichnis	S. 112
9.	Danksagung	S. 117
10.	Lebenslauf	S. 119

1. Einleitung

Die komplexeste, anatomische Region an uns ist das Gesicht. Wir drücken damit unsere Emotionen und Gedanken aus. Mit einem Blick in das Gesicht anderer erkennen wir das ungefähre Alter und können oft auch aus der Mimik lesen, wie es dem Gegenüber geht. Ein schönes Gesicht fasziniert Menschen.

Was schön ist, wird im Alltag gern damit verwechselt, auch gut zu sein. Hübsche Menschen werden im Allgemeinen gern als sympathischer, erfolgreicher und kommunikativer eingeschätzt. Diese Wechselbeziehung von der Verpackung auf den Inhalt zu schließen, verschafft ihnen beruflich und sozial im Sinne einer sich selbst erfüllenden Prophezeiung einen großen Vorteil. Daher verwundert es nicht sonderlich, dass viele Menschen nach einem attraktiven Äußeren streben.

Doch was genau macht ein Gesicht schön? Ist es überhaupt möglich, ein übereinstimmendes Urteil darüber zu finden, was eigentlich schön oder zumindest attraktiv ist?

Die Aussage "Beauty [...] exists merely in the mind which contemplates them" [104] würde einem objektiv fassbaren Standard von Schönheit entgegenstehen. In interkulturellen Vergleichen wird allerdings deutlich, dass es eine große Übereinstimmung ethnischer Gruppen und Altersklassen gibt über das, was als attraktiv wahrgenommen wird [17, 69].

Selbst Babys ziehen bei zuvor schon von Erwachsenen als „attraktiv“ und „nicht-attraktiv“ bewerteten Personen die attraktiven Gesichter vor [70].

Es muß also etwas geben, was in der Struktur des Gesichtes universell als attraktiv gilt. Die Frage zu beantworten, welche Kriterien dabei eine Rolle spielen, ist seit hunderten von Jahren ein Anliegen verschiedenster Disziplinen der Wissenschaft [20, 79, 105].

Symmetrie erscheint als das Zauberwort für die Beschreibung von Schönheit.

Beurteilen wir die Qualität eines Gesichtes, so vergleichen wir seine Architektur in Hinblick auf das ausgeglichene Zusammenspiel seiner Einzelteile. Harmonie erscheint dann gegeben, wenn die Proportionen zueinander in der richtigen Beziehung stehen [24].

Kann man Schönheit messen? Und wenn ja, welche Parameter muß man dafür messen, welche Methode wäre dafür die am besten geeignete?

Wir sollten ein System anstreben, in dem nicht das Auge des Betrachters bestimmt, sondern eine klar definierte Technik, die passende Werte für Messungen hervorbringt, eine einfache, nicht in die Körpersphäre des Patienten eingreifende Methode, um gleichförmige Messdaten zu gewinnen, die die Symmetrie des Gesichtes richtig wiederzugeben vermögen.

Bei Operationen in der plastisch-rekonstruktiven Chirurgie sowie in der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie ist eben nicht nur die Wiederherstellung der Funktion von Bedeutung, sondern auch die Erzielung eines ästhetisch ansprechenden Äußeren. Für eine objektive Bewertung dessen ist die subjektive Beurteilung durch den Chirurgen unzureichend [18]. Es wäre also an der Zeit, eine neue Methode hinsichtlich der Messbarkeit von Symmetrie zu etablieren.

Dabei sollte ein Verfahren entwickelt werden, das die Geometrie des Gesichtes korrekt wiedergibt und das in der Lage wäre, strecken – und flächenhafte Veränderung zu quantifizieren. Eine Technik, die bei Operationsplanung, Verlaufskontrolle und Objektivierbarkeit des Resultates nach erfolgtem Eingriff wertneutrale, miteinander vergleichbare Zahlenwerte hervorbrächte, wäre hierbei effektiv.

Der Aspekt, der also zu quantifizieren wäre, ist die faziale Symmetrie. Dabei muß eine objektive Unterscheidbarkeit zwischen verschiedenen Graden der Abweichung von der Symmetrie angestrebt werden.

Das menschliche Gesicht wird dann als attraktiv beurteilt, wenn es zumindest drei wichtige Eigenschaften besitzt – Symmetrie [101], Durchschnittlichkeit [69] und individuelle Merkmale [15].

Ein Faktor mit großem Gewicht scheint dabei die Durchschnittlichkeit zu sein. Symmetrie und bestimmte Merkmale wie zum Beispiel bei Frauen ein kleines Kinn, hohe Wangenknochen und große Augen spielen ebenfalls eine wichtige Rolle. Diese Merkmale weisen auf ein Optimum an Kindlichkeit, Jugendlichkeit, Reife und Ausdruck hin [15, 16, 84].

Nicht nur wegen ihrer Abweichungen von der Symmetrie scheinen asymmetrische Gesichter unattraktiv zu sein. Symmetrische Gesichter sind in ihren Proportionen auch durchschnittlicher, und auf dem Hintergrund dieser Durchschnittlichkeit wirken sie attraktiv [90].

Fehlen also grobe Abweichungen vom Durchschnitt, wird ein Gesicht grundsätzlich als attraktiv eingestuft [90].

Ob und welche Abweichungen als attraktiv oder unattraktiv bewertet werden, wird von dem vom Durchschnitt abweichenden Merkmal und der Richtung, in die es abweicht, bestimmt.

Manche Abweichungen vom Durchschnitt betreffen nämlich nicht die Gesichtssymmetrie an sich. Das wäre beispielsweise so bei enger zusammenstehen, weiter auseinanderstehenden, niedriger oder höher liegenden Augen als es im Durchschnittsgesicht der Fall wäre.

Dieses Gesicht wird aber trotz seiner Symmetrie als unattraktiv empfunden [90], genauso wie eines mit asymmetrischer Augenhöhe.

Ebenso können Gesichtsmerkmale wie Augen oder Mund in ihrer Größe vom Durchschnitt abweichen. Diese Abweichungen vom Durchschnittsgesicht machen sie aber gerade attraktiver. Trotz ihrer Abweichungen vom Durchschnitt sind sie daher die attraktivsten Gesichter [84, 91].

Die Vergrößerung mancher Gesichtsmerkmale scheint Rückschluß auf den biologischen Reproduktionswert zu geben [15, 17]. Bei Frauen ist ein hohes Östrogen- Testosteron-Verhältnis, welches in der Pubertät für Vergrößerung der Lippen und Wangen sorgt, ein Ausdruck dafür, dass ihr Immunsystem stark genug war, sich gegen den immunsuppressiven Einfluß des Testosterons wehren zu können. [15, 17, 62, 100].

Denkbar wäre auch, dass Menschen solche Gesichter als attraktiv empfinden, die ihren eigenen ähneln. Gleich und gleich gesellt sich gern, wie es so schön im Deutschen heißt. Bereczkei [5] fand heraus, daß Probanden Gesichter attraktiv fanden, die ihren Eltern ähnlich sahen, wobei Männer Frauengesichter bevorzugten, die ihrer Mutter ähnelten, Frauen hingegen diejenigen, die ihren Vätern gleichkamen. Penton-Voak [82] stellte aus Fotografien das gegengeschlechtliche Pendant her. Er kam dabei zu dem Ergebnis, dass zwar eine Korrelation zwischen Ähnlichkeit zum eigenen Gesicht und Attraktivität bestand, dies jedoch aufgrund der verwendeten Technik auf den Effekt der Durchschnittlichkeit zurückführbar sein könnte.

1.1 Durchschnittlichkeit

1879, bei dem eigentlichen Versuch, das ultimative „Schurkengesicht“ zu kreieren, indem er viele Fotografien von Gefangenen übereinanderlegte, entdeckte Galton, dass dieses Durchschnittsresultat nun viel besser aussah als die einzelnen Portraits

[45]. Aus verschiedenen individuellen Gesichtern zusammengesetzte Einheitsgesichter (composite faces) werden grundsätzlich als attraktiv wahrgenommen und meistens auch als attraktiver als die Mehrzahl der einzelnen, darin eingeflossenen Gesichter [47, 69].

Wieso sollte also Durchschnittlichkeit des Gesichtes attraktiv sein? Heutzutage ist das Wort „durchschnittlich“ doch eher negativ belegt. Ein durchschnittliches Gesicht anziehend zu finden, korreliert allerdings mit dem Verhalten des Menschen, Prototypen von etwas zu bilden, um sich dementsprechend diesen gegenüber verhalten und Unterschiede treffen zu können, eine sehr normale Verhaltensweise also. Ein durchschnittlich attraktives Gesicht erscheint vertraut, da es der erlernten Kategorie in einem Mittelwert entspricht [71].

Durchschnitt wird mit einem guten Phänotyp assoziiert, das heißt, hier wird der stabilisierende Effekt natürlicher Selektion von bestimmten Gesichtern wahrgenommen. Auch könnte ein durchschnittliches Aussehen etwas über die Heterozygotizität seines Trägers verraten [101].

Um zu untersuchen, inwieweit Durchschnittlichkeit als Faktor das Schönheitsempfinden beeinflusst, wurden mithilfe des Morphingverfahrens durchschnittliche Gesichter erzeugt. Dabei wird, wie oben schon erwähnt, aus zwei verschiedenen Fotografien natürlicher Gesichter ein neues konstruiert. Man kann diesen Prozeß beliebig oft wiederholen. Dabei kam heraus, dass, je mehr Gesichter man zu einem verschmilzt, desto mehr gewinnt dieses fusionierte Gesicht an Attraktivität. Perrett et al [84] fanden allerdings, dass ein Composite aus 60 Frauen unattraktiver war als das Composite aus einem Set von 15 an sich schon sehr attraktiven Frauen. Das legt den Schluß nahe, dass, wenn man attraktive Gesichter zusammenbaut, das gemorphte Bild auch attraktiv(er) bleibt. Unattraktive Gesichter, die zu einem Gesicht verschmolzen werden, bleiben auch unattraktiv(er).

Allerdings verschwinden durch das Morphen der Gesichter auch Unregelmäßigkeiten im Hautbild wie Falten und Rötungen, so dass die Haut rein und ohne Makel erscheint.

In der Studie von Langlois und Roggmann waren nur wenige Gesichter attraktiver als die gemorphten. Diese außergewöhnlich schönen Gesichter besitzen noch dazu die Merkmale Kindlichkeit, Reife (hohe Wangenknochen) und Ausdruckskraft, durch welche sie dann als noch attraktiver wahrgenommen werden [15, 16, 84].

Jenes durch Morphing gewonnene Montagegesicht besitzt aber sowohl Durchschnittlichkeit als auch besonders große Symmetrie, da es sich ja aus mehreren Gesichtern zusammensetzt. Folglich ist es gerade nicht Durchschnitt in Bezug auf seine Symmetrie. Durch das Verfahren des Zusammensetzens aus vielen Gesichtern verschwinden deren eigene Asymmetrien [69, 70, 91].

Also ist es vielleicht auch die Symmetrie, die ein Gesicht attraktiv macht.

1.2 Symmetrie

Es wird angenommen, daß bilaterale Symmetrie deswegen ein positives Urteil in Bezug auf Schönheit hervorruft, weil diese Symmetrie für den Besitz gesunder Gene seines Trägers steht [83]. Biologische Forscher stellten dabei die Hypothese auf, daß diese Charakteristika für eine erhöhte Resistenz gegen Parasiten stehen [92, 101].

Ein durchschnittliches, symmetrisches Gesicht wirkt sozusagen wie ein Gesundheitsattest. Abweichungen davon zeigen Umwelteinflüsse oder genetische Probleme an [97, 100, 101].

Zur Herstellung symmetrischer Gesichter gibt es mehrere Möglichkeiten:

Die häufigste Methode ist das Anfertigen eines sogenannten Chimären- Gesichtes. Dabei wird ein aus der Frontalperspektive aufgenommenes Gesicht vertikal über die Mittellinie gespiegelt. Man erhält dann ein neues Gesicht aus entweder zwei linken oder zwei rechten Gesichtshälften. Meist steht man dann allerdings vor dem Problem, dass das erzeugte Gesicht entweder zu gestaucht oder zu breit erscheint, da in der Regel die beiden natürlichen Einzelhälften nicht genau gleich breit sind. Auch verdoppeln sich bei diesem Verfahren Asymmetrien wie zum Beispiel die unterschiedliche Augen- und Augenbrauenhöhe der einzelnen Seiten [100].

Um ein natürlicheres Ergebnis zu erzielen, ist es daher besser, ein Originalgesicht mit seiner über die senkrechte Mittellinienachse gespiegelten Kopie zu morphen. So erhält man ein ebenfalls vollkommen symmetrisches Gesicht und entgeht den Schwierigkeiten, die bei der Produktion eines Chimären- Gesichtes entstehen. Das Gesicht behält dabei seine natürliche Breite, Asymmetrien auf beiden Seiten werden ausgeglichen [100].

Einige Studien besagen, dass Symmetrie die Attraktivität erhöhe [46, 47, 101]. Symmetrie reflektiert dabei phänotypische und genetische Ausstattung [56, 108].

Dabei gibt es auch Studien, die zu dem Ergebnis kommen, dass Symmetrie nicht der entscheidende Faktor sei. Nur geringen Einfluß auf die Attraktivität bescheinigen

Farkas [20] und Jones [56]. Keinen Einfluß wollen Langlois [71] und Shackelford [97] gefunden haben.

In einigen Studien wurde sogar das asymmetrische Normalgesicht einzeln für attraktiver befunden als die symmetrischen Composites der asymmetrischen Gesichter [68, 93, 98]. Allerdings benutzen Kowner und Samuels die oben schon erwähnten gespiegelten Chimärengesichter. Swaddle benutzte die zweite Methode, dabei achtete er aber nicht auf den Gesichtsausdruck. Als die Studie von Rhodes [89] wiederholt wurde, achtete man auf einen neutralen Ausdruck des Gesichts. In diesem Test waren die Composite Gesichter attraktiver, was für die Symmetrie spricht.

In der Summe ergibt sich also eine sehr widersprüchliche Diskussion. Festzustellen bleibt aber, dass Symmetrie Auswirkung auf die Attraktivität hat. Das multidimensionale Modell von Cunningham [15, 17] scheint daher eine gute Lösung zu bieten, Attraktivität zu erklären. In welchem Abhängigkeitsverhältnis Symmetrie und Durchschnittlichkeit genau zueinander stehen, ist dennoch weiterhin unklar.

1.3 Ästhetik in der Philosophie

Seit der Antike gibt es in der Philosophie den Versuch, Schönheit zu ergründen. Gemäß ihrem Motto „Alles ist Zahl“ wollten die Pythagoreer einen Zusammenhang zwischen Schönheit und mathematischen Verhältnissen herstellen [48]. Das Symbol der Pythagoreer war das Pentagramm. Hippasos von Metapont machte bei der Untersuchung dieses Fünfecks dabei die Entdeckung, dass die Ratio zwischen Diagonale und Kantenlänge nicht durch einen Bruch aus ganzen Zahlen darstellbar war: sie steht nämlich im Verhältnis des goldenen Schnitts. Die Pythagoreer aber glaubten daran, dass sich die Welt vollkommen durch ganze Zahlen beschreiben ließe, was nun ausgerechnet durch ihr Symbol widerlegt war. Zur Strafe dafür ertrank Hippasos im Meer. Angeblich war dies die göttliche Rache für den Verrat an Pythagoras.

Die philosophische Disziplin der Ästhetik als eigenständiges Fach und Pendant zur Logik wurde von Alexander Gottlieb Baumgarten begründet [49]. Durch sein Werk „Aesthetica“ wurde auch Kant beeinflusst. In „Kritik der Urteilskraft“ (1790) bezeichnet Kant die Schönheit als Objekt der Urteilskraft und nennt diese Tätigkeit der Urteilskraft das „ästhetische Urteil“ bzw. „Geschmacksurteil“. Solcherlei Urteil gründet auf subjektiven Empfindungen wie Lust und Unlust, Gefallen und Abneigung.

Ästhetische Urteile sind zwar subjektiv, erheben hierbei aber Anspruch auf allgemeine Gültigkeit. Dabei wird unterstellt, dass das Urteil über Schönheit auch von anderen zustimmend geteilt wird. So ist Schönheit von subjektiver Allgemeinheit. Im Urteil über das Schöne dürfen allerdings persönliche Interessen nicht berücksichtigt werden. Daraus resultiert Kants berühmte Definition der Schönheit als interesseloses Wohlgefallen [50].

1.4 Der Goldene Schnitt

Als Inbegriff von Harmonie, Ästhetik und mathematischer Schönheit werden in Architektur und Kunst Streckenverhältnisse, die diese idealtypischen Proportionen des goldenen Schnittes aufweisen, angewandt.

Das Verhältnis des Goldenen Schnittes lässt sich wie folgt beschreiben:

Wenn sich der größere Zahlenwert einer Strecke zu dem der kleineren Strecke so verhält wie die Summe der beiden zur größeren Strecke, dann stehen diese beiden Strecken zueinander in einer Beziehung des Goldenen Schnittes.



a verhält sich zu b, wie a+b zu a

Der Verhältniswert Phi, auch als goldenene Zahl bezeichnet, beträgt ungefähr 1,618.

Dabei gilt:

$\Phi(\text{Phi}) =$

$$\frac{a}{b} = \frac{a+b}{a} = 1 + \frac{b}{a} \quad \text{wobei:} \quad \Phi = 1 + \frac{1}{\Phi}$$

Daraus ergibt sich:

$$\Phi = \frac{a}{b} = \frac{(1 + \sqrt{5})}{2} = 1,618033988\dots$$

Wenn man von der längeren Strecke die kürzere abzieht, erhält man eine weitere Strecke, die noch kürzer ist. Zu dieser noch kürzeren Strecke steht die Strecke mit der mittleren Länge (von den drei Strecken) wieder im Verhältnis des Goldenen Schnittes. Man kann die Strecke also stets weiter teilen und erhält immer das gleiche Verhältnis von 1,618.

Es ist nicht möglich, die Zahl Φ durch ein Verhältnis zweier ganzer Zahlen darzustellen. Ebenfalls ist es auch schwierig, sie durch ein Verhältnis zweier ganzer Zahlen anzunähern.

Wenn die Zahl vor dem Plus-Zeichen besonders klein ist, ist die Approximation schlecht (wobei als kleinste Zahl die Eins zulässig ist). Man kommt im Ergebnis immer auf einen Bruch aus zwei direkt aufeinander folgenden Zahlen der Fibonaccifolge, wenn man die Kettenbruch-Zerlegung an irgendeiner Stelle abbricht.

$$\Phi = 1 + \frac{1}{\Phi} = 1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{\Phi}} = \dots = 1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \dots}}}$$

Im Zusammenhang mit dem Goldenen Schnitt seien demzufolge die Fibonacci-Zahlen erwähnt: 0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, 233, 377... Diese unendliche Zahlenreihenfolge wurde von Leonardo da Pisa, bekannt als Filius Bonacci, begründet.

Die Folgezahl errechnet sich immer aus der Summe der beiden vorangehenden Zahlen. Innerhalb dieser Folge stehen zwei benachbarte Zahlen annähernd im Verhältnis des goldenen Schnittes zueinander. Je höher man in der Folge geht, umso näher liegt dieses Verhältnis an Φ . Die Brüche (zwischen den benachbarten Zahlen der Fibonacci-Folge) sind dabei alternierend größer und kleiner als der Goldenen Schnitt.

Erstaunlicherweise kann man diese mathematische Relation auch in der Natur beobachten. Ein faszinierendes Beispiel für die Verwirklichung des goldenen Schnittes findet sich in der Anordnung der Blätter von Blüten mancher Pflanzen.

Zwei nacheinander wachsenden Blättern richten sich zueinander in einem Winkel von 137,5 Grad aus und teilen so den Vollkreis im Verhältnis des goldenen Schnittes.

Die Pflanze kann damit ihre Blätter in optimalen Abstand zueinander halten und einen idealen Lichteinfall garantieren.

Sogenannte Fibonacci-Spiralen, wie zum Beispiel bei Sonnenblumen zu beobachten, werden nicht von nacheinander wachsende Blättern geformt, sondern von Blättern mit einem bestimmten Abstand voneinander. Dabei entspricht dieser Abstand einer Zahl aus der Fibonacci-Folge. Die Blätter dazwischen gehören wiederum zu einer anderen Spirale, dabei ist die Richtung des Drehsinnes zufällig.

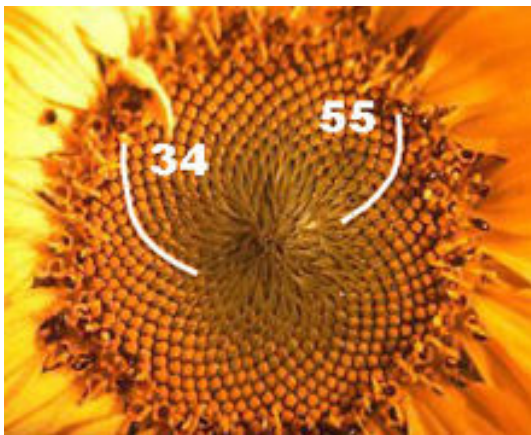


Abb. 1: Fibonacci-Spiralen einer Sonnenblume, aus: www.computerbase.de

Von Euklid (300 v. Chr.) stammt die erste bekannte Abhandlung über den goldenen Schnitt. Er spricht in seinem Werk „Die Elemente“ allerdings noch nicht in dieser Terminologie, sondern von stetig geteilten Strecken. Eine Definition davon ist im VI. Buch zu finden, in dem er eine durch C geteilte Linie AB folgendermaßen definiert: $AB : AC = AC : CB$.



Das beschreibt exakt den Goldenen Schnitt: $a+b$ zu a wie a zu b . (siehe oben)

In Buch XIII, Satz 8 beweist er, dass die Seiten eines Pentagramms wechselseitig im Verhältnis des goldenen Schnittes zueinander stehen (lat. „proportio habens medium et duo extrema“ = Teilung im inneren und äußeren Verhältnis).

Die Verwendung des Begriffes „goldener Schnitt“ wird wahrscheinlich erstmals 1835 von dem Mathematiker Martin Ohm eingeführt [81].

Der Philosoph Adolf Zeising war überzeugt, dass es ein ästhetisches Naturgesetz geben müsse, dessen Grundlage der goldene Schnitt sei. Er versuchte, die menschlichen Proportionen in Hinsicht auf den goldenen Schnitt einzuteilen und setzte dabei Bauchnabel, Körpergröße, Knie und Extremitäten in diesem Verhältnis zueinander in Bezug [113].

Das Ansinnen Stephen Marquardts war es, das menschliche Gesicht nach dem Schema des goldenen Schnittes zu gliedern [76, 77].

Er benutzte hierzu eine primäre Zehneck-Matrize, in die er 42 weitere gleichartige sekundäre Dekaedern-Matrizen eingeschloß.

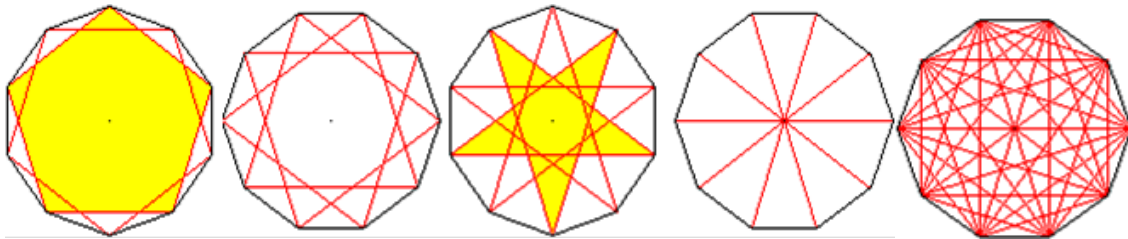


Abb. 2: Dekaedern-Matrize mit weiteren, darin eingebrachten Zehneckern, aus: [76]

Dabei werden Linien des Gesichtes ersichtlich, die sich durch Kantenstrahlen der eingefügten Zehnecke oder Überschneidungen solcher miteinander oder Überschneidungen mit der primären Mutter-Matrix ergeben.

Aus den durch die übereinandergelagerten Zehnecke gewonnenen Streckenteilen setzt sich dann die Maske zusammen.

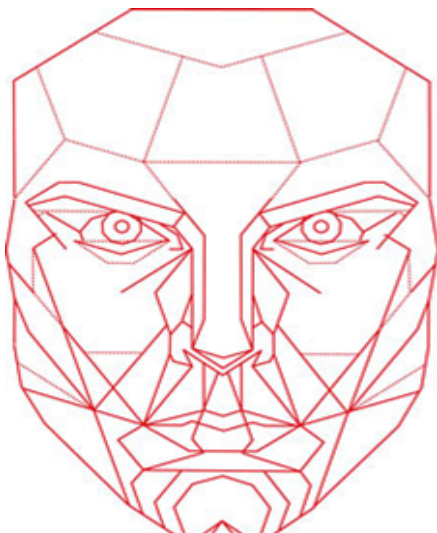


Abb. 3: Marquardt – Maske, aus: [76]

1.5 Historische Proportionslehren

1.5.1 Ägypten

Der älteste uns bekannte Proportionskanon datiert aus der Pharaonenzeit, circa 3000 Jahre vor Christus. So lange also schon beschäftigt sich die Menschheit mit den Proportionen des menschlichen Körperbaus. Dieser erste Kanon teilt die Höhe einer Figur in genau sechs Fußlängen. In einer Weiterentwicklung teilt ein darauf folgender Kanon die Fußlänge in drei Teile. Man erhält so ein Raster von 18 Quadraten. In der Ptolemäerzeit dann nahm man eine Fußlänge hinzu, was dann 21 Quadrate ergab [114]. Im Zuge einer religiösen Umbruchzeit hin zu einem Monotheismus, veränderte sich während der sogenannten Amarnazeit auch das sonst übliche, starre Proportionschema, in dem Farben, Pose und Linienführung festgelegt waren.

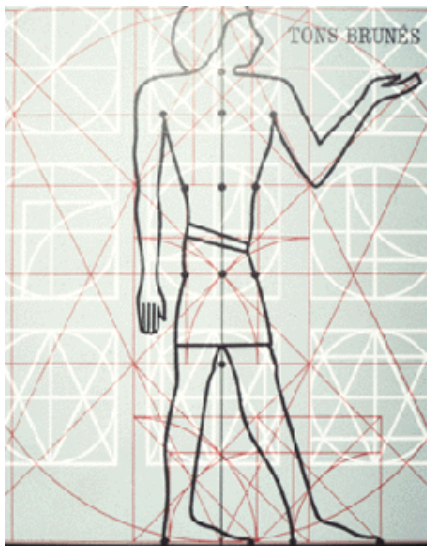


Abb. 4: Ägyptisches Zeichenschema, aus:
Brunés, Tons: The secrets of ancient geometry- and its use

Der neue ägyptische Stil war weit realistischer, zumindest was den individuellen Ausdruck des Gesichts und die Form des Körpers anbelangt. Die Perspektivlosigkeit auf Reliefs und Wandmalereien, in der Arme und Schultern von vorn, Beine und auch meistens der Kopf im Profil dargestellt wurden, galt allerdings immer noch.

Die Büste der Nofretete wird als zeitlos schön in ihrer Vollkommenheit angesehen. Ihre Proportionen sind mathematisch exakt, ihre Maße passen perfekt in das ägyptische Rastersystem: eine Fingerbreite entspricht 1, 875 cm des Rasters.



Abb. 5: Büste der Nofretete, aus: www.info.univ-tours.fr

Borchardt schreibt über seine Entdeckung in sein Tagebuch: "Farben wie eben aufgelegt. Arbeit ganz hervorragend. Beschreiben nützt nichts, ansehen." [13].

1.5.2 Griechenland

Klassische griechische Regelwerke über Proportionen legen den Grundstein für alle weiteren, heute noch benutzten Abhandlungen.

Die berühmteste Statue des Polyklet ist der Doryphoros (etwa: Speerträger). In ihm wird der sich an dieser Statue orientierende „polykletische Kanon“ perfekt umgesetzt.

Der Kanon symbolisierte eine Proportionslehre, die auf bestimmten Verhältnissen der Gliedmaße zueinander aufbaute [19]. Die Relation von Kopf zu Körper betrug beispielsweise ein Siebtel. Das Vollkommene besteht danach annähernd aus dem Verhältnis vieler Zahlen. Aber nicht nur für Künstler war der polykletische Kanon von Bedeutung. Ärzte und Philosophen beriefen sich auf dieses Werk, wenn sie damit unterstreichen wollten, dass ein Grundprinzip in ihrem eigenen Fachgebiet allgemein gültig sei.

Das richtige Maß, welches in diesem Kanon zu beschreiben gesucht wird, kann gleichfalls auch durch eine gewisse Haltung und Emotion erreicht werden. Die Statue wird eben deswegen als ein Meisterwerk griechischer Plastik angesehen, weil durch ihre natürliche Körperhaltung nicht nur Idealmaße des Körpers, sondern auch die geistige Schönheit zum Ausdruck gebracht wird.

Möglicherweise wurde auch der Verhältniswert Phi des goldenen Schnittes nach einem griechischen Bildhauer benannt, Phidias, der diese Ratio häufig in seinen Statuen anwendete. Die von ihm erschaffene Statue des Zeus von Olympia zählte zu den sieben Weltwundern der Antike.

1.5.3 Römisches Reich

Marcus Vitruvius Pollio, genannt Vitruvius, war ein römischer Baumeister und Schriftsteller.

Die Passage über den homo bene figuratus (= wohlgeformter Mensch) stellt einen wichtigen Teil in Vitruvius' Werk dar. Hier werden die menschlichen Proportionen auf geometrische Formen zurückgeführt:

„Den Körper des Menschen hat die Natur so geformt, daß das Gesicht vom Kinn bis zum oberen Ende der Stirn und dem untersten Rande des Haarschopfes $\frac{1}{10}$ beträgt, die Handfläche von der Handwurzel bis zur Spitze des Mittelfingers ebensoviel, der Kopf vom Kinn bis zum höchsten Punkt des Scheitels $\frac{1}{8}$ [...]. Vom unteren Teil des Kinns aber bis zu den Nasenlöchern ist der dritte Teil der Länge des Gesichts selbst, ebensoviel die Nase von den Nasenlöchern bis zur Mitte der Linie der Augenbrauen. Von dieser Linie bis zum Haaransatz wird die Stirn gebildet, ebenfalls $\frac{1}{3}$.“ [103]

Dieser Kanon stimmt in der Einteilung des Gesichtes (ein Zehntel) und der des Fußes (ein Sechstel) mit dem des Polyklet (Polykleitos) überein, über das Verhältnis des Kopfes (ein Achtel bei Vitruv, bei Polyklet etwas geringer) besteht Uneinigkeit [106].

1.5.4 Renaissance

Albrecht Dürer berechnete die Körpermaße des Menschen ebenfalls nach Kopf-, Gesichts- und Fußlängen die zueinander in Beziehung gesetzt und dabei immer weiter unterteilt wurden [19]. Im Mittelalter gebräuchliche Einheiten zur Messung einer bestimmten Länge waren Fuß und Elle. Während die Maßeinheit der Elle heutzutage verschwunden ist, hat sich das „Fuß“-Maß im angelsächsischen Sprachraum und in der Luftfahrt auch weiterhin behauptet.

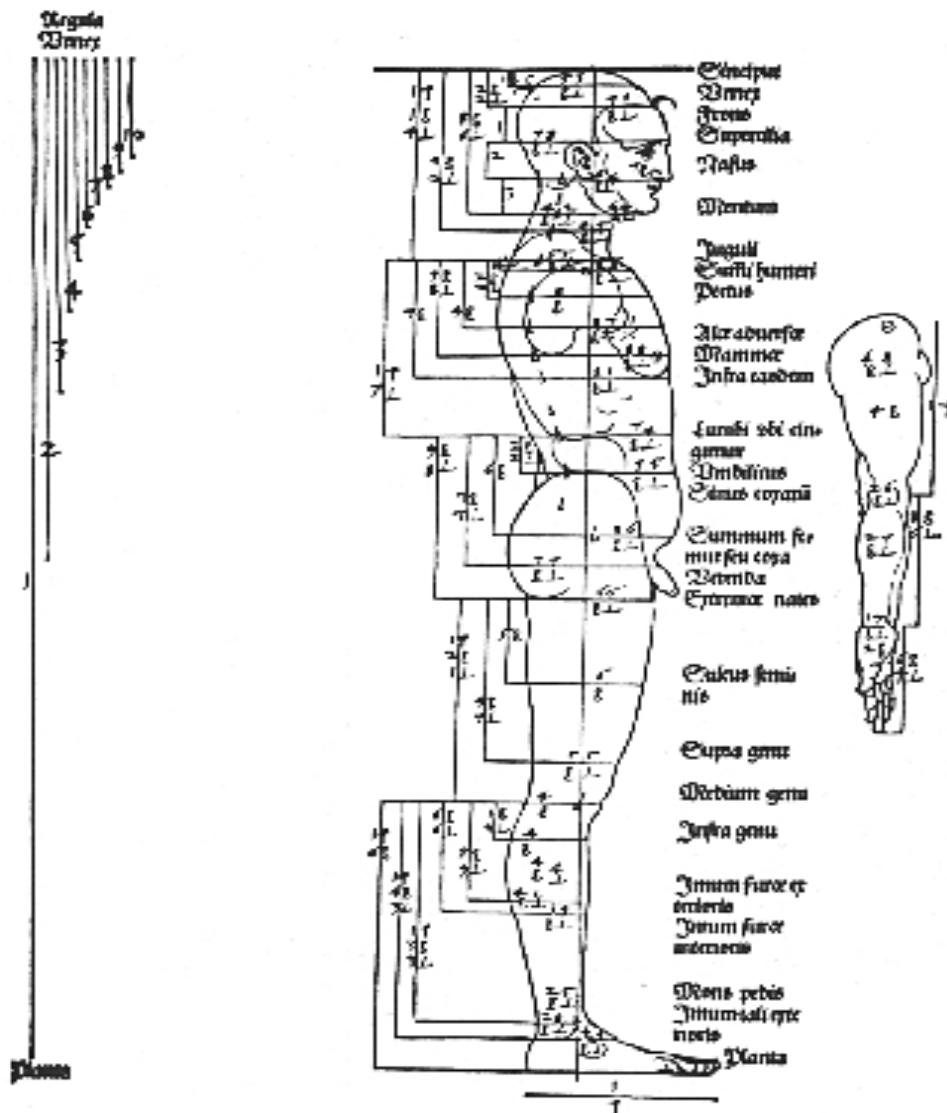


Abb. 6: Albrecht Dürers Einteilung der menschlichen Proportionen, aus: www.PiMath.de

Inspiriert von Vitruv fertigte Leonardo da Vinci seine berühmte Skizze eines stehenden Mannes an, der sowohl von einem Kreis als auch von einem Quadrat umgeben ist, der „vitruvianische Mensch“.

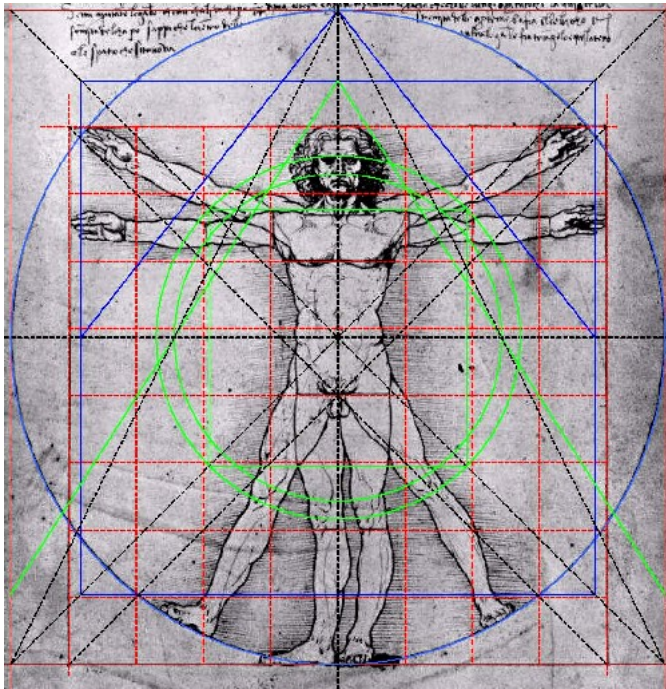


Abb. 7: Der vitruvianische Mensch nach einer Zeichnung von Leonardo da Vinci, aus: www.PiMath.de

Der Kreismittelpunkt ist hierbei, wie von Vitruv gefordert, der Bauchnabel, so dass Arme und Beine den Kreis innen tangieren. Das Quadrat ergibt sich durch gleiche Kantenlänge von ausgestreckten Armen bzw. Beinen und der Höhe der Person. Im Übrigen weicht das Verhältnis von einer Seite des Quadrats zum Radius des Kreises nur 1,7 Prozent vom goldenen Schnitt ab.

Als bedeutendes Symbol für die Renaissanceästhetik kann man dieses Motiv noch heute zum Beispiel auf der italienischen Ein-Euro-Münze bewundern.

1.5.5 Neuzeit

Der schweizerisch-französische Architekt Le Corbusier erfand ein Proportionsschema, das auf dem goldenen Schnitt beruhte: der Modulor. Es ist ein Versuch, die Architektur an das Maß des Menschen anzulehnen.

Zunächst teilte Le Corbusier den Menschen in drei Teilbereiche auf und erhielt ein Intervall vom Fuß bis zum Solarplexus, vom Solarplexus bis zum Kopf, vom Kopf bis zu den Fingerspitzen des um 90 Grad gehobenen Armes. Die Intervalle sollen in ihrem Verhältnis zueinander den Goldenen Schnitt widerspiegeln, indem sie eine Fibonacci-Zahlenfolge ergeben [72].

Als Standardkörpergröße setzte er zunächst 175cm, dann 183 cm an. Dieser Wert dient als Ausgangsgröße für alle späteren, am goldenen Schnitt orientierten Folgewerte.

Die rote Reihe wird vom Ausgangswert der angenommenen Gesamtkörpergröße 1,83m immer weiter durch die goldene Zahl 1,618 geteilt, der erhaltene Wert wird auf- bzw. abgerundet: 183, 113 (Nabel), 70, 43, 27 cm. Wenn man die Werte ab 113cm verdoppelt, so erhält man die sogenannte blaue Reihe: 226 (Körpergröße mit erhobenem Arm), 140, 86, 53 cm usw. [72].

Die Fibonacci-Zahlenfolge 1, 2, 4, 6, 10, 16, 26, 42, 68, 110, 178 wird in Näherung für die rote Reihe erreicht (1, 2, 4, 6, 10, 16, 27, 43, 70, 113, 183), dasselbe gilt für die blaue Reihe. Die blaue Reihe ist für den praktischen Gebrauch nicht geeignet, weil die in ihr enthaltenen Zahlenwerte viel zu groß sind.

Nimmt man allerdings für die blaue Reihe die Fibonacci-Zahlenfolge von 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, 233, 377 an und überträgt diese wiederum auf die rote Reihe, also die Hälfte der blauen Reihe, so erhält man bei einem Ausgangswert von 188,5 cm Körpergröße gute Maße, ein Tisch müsste dann die Höhe von 72cm haben, ein Stuhl 44,5 cm Sitzhöhe. (188,5 - 116,5 - 72 - 44,5 usw.).

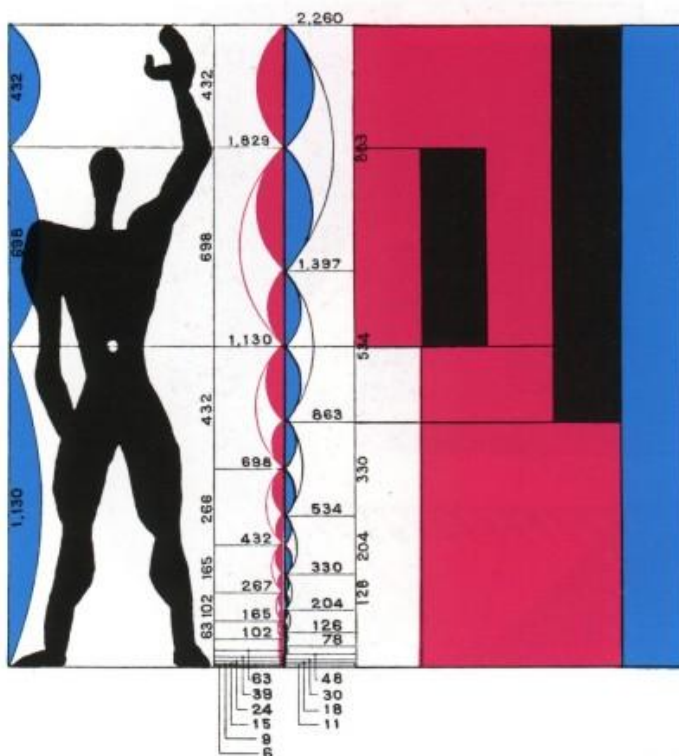


Abb. 8: „Modulor“, aus: www.esfcastro.pt

Das Schema ist, wie schon beim vitruvianischen Menschen, an einem Mann orientiert, die Maße eines Frauenkörpers fließen folglich nicht in das System ein.

In der Kunst läßt sich die Proportionslehre des goldenen Schnittes auch in der Neuzeit wieder finden. Die Werke „Die Madonna von Portlligat“ oder „Leda Atomica“ spiegeln die klassische Periode des Salvador Dalí wieder, in der er nach diesem Schema arbeitete.

1.6 Erfassungsmethoden fazialer Symmetrien

1.6.1 Zweidimensional

1.6.1.1 Anthropometrie

Anthropometrie kommt aus dem Griechischen und meint wörtlich die Vermessung des Menschen. Die Messungen können an den Körperweichteilen (Somatometrie) und am Knochen (Osteometrie) erfolgen. Man kann dies dann noch weiter aufteilen, als Untergruppe der Knochenmessung ließe sich die Kraniometrie (Messung am Schädel) und als Untergruppe der Körpermessung die Cephalometrie (Kopfmessung) aufführen.

Von Prothagoras stammt der Satz: „Aller Dinge Maß ist der Mensch“. Doch was ist das Maß des Menschen?

Adolphe Quételet war ein belgischer Astronom und Statistiker. Er leitete Untersuchung zu Werten des Brustumfanges, um eine Normalverteilung gewinnen zu können (l'homme moyen). Der von ihm erfundene Quételet-Index, heute besser bekannt unter dem Namen Body-Mass-Index, findet auch heute noch eine große Verbreitung. Seinen Arbeiten beeinflussten den französischen Gelehrten Alphonse Bertillon, der ein Identifikationssystem ersann, welches auf dem unveränderlichen Charakter bestimmter Maße des menschlichen Körpers beruhte. Er fand heraus, dass einige physische Merkmale und Dimensionen bestimmter knöcherner Strukturen bis in das Erwachsenenalter hinein praktisch konstant blieben. Daraus schloß er, dass mittels dieser Messungen, systematisch katalogisiert, sich jedes Individuum perfekt von anderen unterscheiden ließe. Für die Methode etablierte sich bald der Name „Bertillonage“, nachdem sie bei der Polizei zum Einsatz kam.

Zu den verwendeten Merkmalen des Kopfes gehörte die Kopflänge (Scheitel bis Stirn), Kopfbreite (Schläfe zu Schläfe), Länge des rechten Ohres, Wangenbreite, als Körpermaße die gesamte Größe, Länge des linken Fußes, linke Elle, der linke

Mittelfinger und kleiner Finger, Rumpflänge, der Abschnitt linke Schulter zu rechtem Mittelfinger bei gehobenem Arm.

Nachdem die Anthropometrie also zuerst Verwendung in der Kriminologie fand, wollte man ihre Ansätze auf Rassenunterschiede anwenden.

William Sheldon meinte mit seinen „somatotypes“, einen Zusammenhang zwischen Physiognomie und Charaktereigenschaften vorhersagen zu können, während Cesare Lombroso eine Korrelation zwischen krimineller Neigung und Gesichtszügen herstellen wollte.

Farkas hat in seinem Buch „Anthropometric facial proportions in medicine“ den Versuch unternommen, sämtliche messbaren Strecken im Gesicht zu definieren und miteinander zu vergleichen, um eine Aussage darüber treffen zu können, welche Symmetrieverhältnisse in der Ebenmäßigkeit der Gesichtszüge ein attraktives Gesicht ausmachen [23].

Zu diesem Zwecke verglich er die Einteilung der Gesichtsproportionen nach neoklassizistischem Kanon mit den Messungen der tatsächlichen Proportionen seiner untersuchten Probanden.

Dabei kam heraus, dass im Vergleich mit dem Renaissance-Menschen ein Unterschied im Verhältnis von Kopf zu Gesicht zu Tage tritt. Das Gesicht der von Farkas gemessenen Männer war insgesamt länger, wobei hiervon vor allem das Untergesicht länger als vom Proportionskanon vorgeschrieben war. Die vitruvische Teilung des Gesichts unterhalb der Nase in drei gleiche Teile konnte bei den Meßergebnissen von Farkas nicht bestätigt werden. Die Messungen ergaben, dass das Untergesicht größer als der Mittelgesichtsteil war.

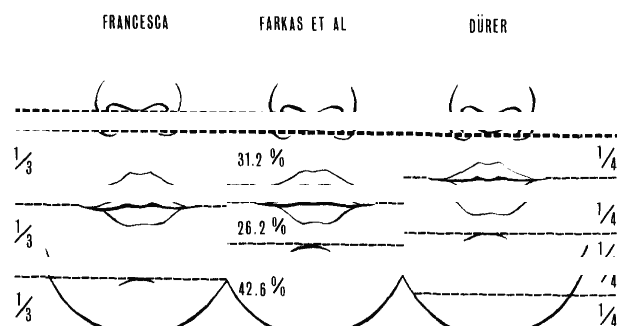


Abb. 9: Vergleich von Proportionsschemata, aus: [22]

Auch war die Nase kürzer als das Ohr und der Abstand zwischen den Augen größer als eine Augenlänge (von Fissur zu Fissur).

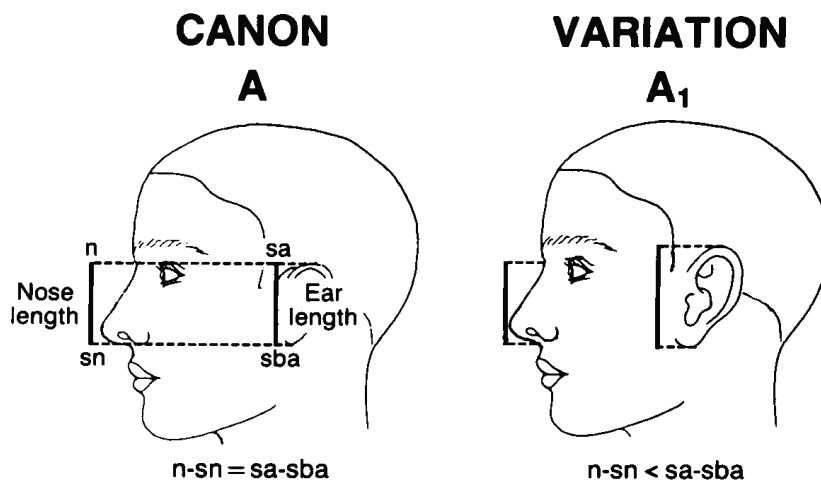


Abb.10: Vergleich Proportionskanon zur Normalbevölkerung, aus: [21].

Man darf allerdings nicht vergessen, dass sich hierin vielleicht auch Unterschiede in der Entwicklung des Gesichtes zeigen, immerhin liegen zwischen den beiden Messreihen ein paar Hundert Jahre.

Auch Lehocky [74] beschreibt verschiedene neoklassizistische Kanons und ihre Unterschiede hinsichtlich der proportionalen Einteilung des Gesichtes.

Die Anthropometrie ist ein leicht anwendbares, maßstabgerechtes und nicht-invasives Verfahren. Allerdings müssen die Messungen per Hand abgenommen werden, was einen geschickten Untersucher, der sich auch gut in der Anatomie auskennt, voraussetzt, ansonsten können die Strecken zwischen den Meßpunkten nicht korrekt bestimmt werden. Einige Landmarks sind nicht einfach zu identifizieren, zum Beispiel dann, wenn viel Fettgewebe über den knöchernen Strukturen aufliegt. Bei sehr asymmetrischen Gesichtern ist außerdem die exakte Lokalisation der Landmarks erschwert. Die genaue Position der Mittellinie zu bestimmen, kann dabei ein Problem darstellen. Bei der Beurteilung der abgenommenen Maße müssen Faktoren wie Alter, Geschlecht und Rasse berücksichtigt werden. Abgesehen davon sind die gewonnenen Ergebnisse der Strecken und Winkel nur zweidimensional und abhängig von der Kopfposition.

1.6.1.2 Fotografie

Die Fotografie ist ein optisches Verfahren, in dem ein Bild auf ein lichtempfindliches Medium projiziert wird. Dort wird es entweder analog dauerhaft auf der Filmfolie gespeichert, oder es wird elektronisch umgewandelt und anschließend digital gespeichert. Die Digitalfotografie verwendet im Gegensatz zur analogen Fotografie keine chemischen Filme mehr. Um die Lichtwellen in ein digitales Signal umzuwandeln, kommen als Bildsensoren Halbleiterstrahlungsdetektoren (CCD/CMOS) zur Anwendung.

Durch diese neue digitale Bildverarbeitung ist die Fotografie schnell, einfach und praktisch zu handhaben. Nachteilig ist die nicht maßstabsgetreue, zweidimensionale Darstellung von Objekten. Abhängig von den Lichtverhältnissen stellen sich Gesichtskonturen möglicherweise anders als in der Realität gegeben dar [85, 99]. Hormozi [54] benutzte für die Einführung seiner Methode der Rhinometrie Fotografien zur Dokumentation der Resultate von Rhinoplastien in einem Prä- zu Post-OP-Vergleich.

1.6.1.3 Röntgenografie/ Radiografie

Das zu untersuchende Objekt wird von einer Röntgenquelle durchstrahlt, und im Anschluß daran auf einem für Röntgenstrahlung eingestellten fotografischen Film dargestellt (bildgebendes Verfahren).

Dabei wird ein Volumen auf eine Fläche projiziert. Die Informationen über die Dicke, also die dritte Raumgröße, entfallen dabei. Bei der späteren Auswertung des Röntgenfilms kann demzufolge dann auch keine genaue Aussage mehr darüber getroffen werden, ob die Helligkeit im Bild, das heißt also die Schwächung der Strahlung, durch ein dichteres Material des durchleuchteten Körpers oder schlicht durch eine höhere Schichtdicke verursacht wurden.

Je nach zu untersuchendem Gewebe wird die Röntgenstrahlung unterschiedlich absorbiert und kann so zu einem erhöhten Krebsrisiko beitragen.

Abgesehen von der nur zweidimensionalen Abbildbarkeit ist dies der größte Minuspunkt. Außerdem kann hier meist nur eine Aussage über die knöcherne Symmetrie des Schädels getroffen werden, da die Weichteile nur unscharf auf der Röntgenaufnahme darstellbar sind. Von der Art der verwendeten Strahlung hängt es ab, wie gut man die Weichteile darstellen kann. Bei der Mammografie wird weiche Strahlung verwendet, um das Gewebe besser darzustellen. Harte Strahlung dringt

leichter durch das Gewebe, so dass Kontrastunterschiede abgemildert werden. Dies ist aber wenig hilfreich bei der Beurteilung von Weichteilsymmetrien.

Mithilfe von Röntgenbildern aus verschiedenen Perspektiven führte Arvystas eine quantitative Analyse bei einem noch im Wachstum befindlichen Patienten mit progressiver Gesichtasymmetrie durch. Eine einseitige und vorzeitige Synostose der Sutura coronalis führte dazu, dass das Mittelgesicht nach links in Richtung der Synostose wuchs, während das Untergesicht sein Wachstum in die entgegengesetzte Richtung fortsetzte. Diese Verzerrung wurde mithilfe der Röntgenaufnahmen quantifiziert [3].

Die Cephalometrie ist ein noch heute gebräuchliches und anerkanntes Meßverfahren an lebenden Individuen, um die dentale und skeletale Entwicklung zu beurteilen.

Ferrario verwendete eine radiografische Technik, um auf den späteren Röntgenaufnahmen cephalometrische Messungen mittels darauf positionierter Landmarks durchzuführen. Mithilfe darauf aufgelegter Fotografien konnte er dann die Röntgenaufnahme an die natürliche Kopfhaltung anpassen [34]. In der Folge ermittelte er ein aus den Landmarks bestehendes Normgitter, das er als Vergleichsmaßstab für das individuelle Gitter von Patienten nahm und die Abweichungen quantifizierte[30].

1.6.2 Dreidimensional

1.6.2.1 Abdruckverfahren

Bei diesem Maßabnahmeverfahren wird von dem zu untersuchende Gesicht eine Alginatmaske abgenommen. Diese Maske wird mit Gips ausgegossen, so dass man ein lebensechtes Kopfmodell erhält. Dabei entsteht eine dreidimensionale Abbildung des Objektes, bei der die Geometrie entweder manuell vermessen werden oder mit einem Laserscanner digital gescannt werden kann.

Man erhält hierbei zwar reale Modelle, die nicht nur virtuell im Computer existieren, aber durch das Anlegen der Maske kann es zu einer Weichteildeformation kommen. Außerdem arbeitet diese Technik nicht kontaktlos. Sie verursacht dem Patienten einige Unannehmlichkeiten durch die Präparation vor dem Gipsen und dem anschließenden Auftrag der Alginatmischung. Das Verfahren ist zwar billig, aber sehr zeitintensiv, da der Patient erst vorbereitet werden muß, indem man die Haare und Augenbrauen schützt. Holberg untersuchte die Genauigkeit der Methode, indem er

Patienten und Gipsmasken miteinander verglich. Nachdem beide mit einem 3D Streifenprojektions-Laserscanner digital erfasst wurden, stellte sich heraus, dass das Verfahren nicht hinreichend genau und somit für eine morphometrische Analyse ungeeignet ist [52].

1.6.2.2 Schnittbildgebung

1.6.2.2.1 Computertomographie

Die Computertomographie, abgekürzt als CT, ist ein schnittbildgebendes Verfahren. Dabei werden per Computer möglichst viele, aus unterschiedlichen Winkeln erfasste Röntgenaufnahmen des zu untersuchenden Gegenstandes ausgewertet, so dass hierbei ein dreidimensionales Abbild des Objektes entsteht.

Im Gegensatz zum konventionellen Röntgen kann also mithilfe des CT's im Nachhinein die Volumeninformationen durch Rückprojektion wiedergewonnen werden, da man die Aufnahmen aus ganz verschiedenen Richtungen gemacht hat.

Durch die Einzelschnitte ist es möglich, für jedes dieser Voxel (Volumenelemente des Gegenstandes) die Dichte zu bestimmen [12].

Heutige Computertomographen arbeiten im Multisliceverfahren, wodurch sich die Geschwindigkeit der Aufnahmen erhöhen lässt, und somit weniger Artefakte durch Bewegungen des Patienten entstehen. Durch isotrope Voxel, welche die gleiche Kantenlänge in allen drei Richtungen des Raumes haben, sind auch gekrümmte (oblique) Aufnahmen möglich.

Nachteilig bei dem CT-Verfahren ist jedoch, dass die Strahlung das 1000fache einer Thorax-Röntgenaufnahme beträgt, so daß CT's in Zukunft die Ursache für circa zwei Prozent der Krebserkrankungen darstellen könnten [9].

Im Gegensatz zum Röntgen kann mit dieser Methode jedoch eine bessere Aussage zur Weichteilsymmetrie gemacht werden. Außerdem ist das Verfahren sehr präzise, hat eine gute Auflösung und stellt die Physiognomie dreidimensional dar.

Die Technik ist dabei aber sehr kosten- und personalintensiv.

Mittels CT Schnittbildern kann man ebenso stereolithografische Modelle aus Acryl herstellen, die für Operationsplanung und -durchführung hilfreich sein können [1].

Xia [111, 112] entwickelte eine CT-gestützte Methode, bei der er aus Fotografien, CT-Schnittbildern und einem daran angepassten Gitternetz ein dreidimensionales Modell herstellte. Ein unspezifisches Gitternetz wurde an die zuvor durch Computertomographie gewonnene Topographie des Gesichtes angepasst. Durch

Auflagerung einer Fotografie auf die 3D Weichteilrekonstruktion bekam das Modell seine Farbinformation. Diese Methode ist allerdings nicht hinreichend valide und genau, zudem ist das Verfahren recht kompliziert.

1.6.2.2.2 Magnetresonanztomographie

In der Magnetresonanztomographie, oder auch Kernspintomographie genannt, werden ebenfalls Schnittbilder erzeugt. Es eignet sich besonders gut zur Darstellung von Weichteilen. Als Grundlage dieser Technik dient die Tatsache, dass Atomkerne mit ungeraden Neutronen- und Protonenzahlen einen Spin (Eigendrehimpuls) ungleich null besitzen. Zuerst wird ein stark magnetisches, statisches Feld angelegt, das zur Ausrichtung der Kerne dient. Der rotierende Kern richtet sich also nach diesem Feld hin aus, so dass die Achse der Rotation in Richtung des angelegten statischen Feldes dreht (präzediert), zusätzlich zu seiner Eigendrehachse. Die Frequenz, mit der er sich dreht, heißt Präzessionsfrequenz. Schaltete man das Feld aus, so würde der Kern in seine Ruhelage zurückkehren.

Im rechten Winkel zum ersten Feld wird ein zweites Feld, ein sogenanntes Transversalfeld, welches ein hochfrequentes (Radiowellen-) Wechselfeld ist, angelegt. Das Wechselfeld führt zu einer andauernden Präzession und verhindert damit das Zurückfallen in den Gleichgewichtszustand. Die Rotation findet in der x- und y- Ebene statt, z (Longitudinalmagnetisierung) ist gleich null.

Das führt dazu, dass sich die Kerne nun aus der Richtung des ersten statischen Magnetfeldes auskippen in Richtung der Achse des Transversalfeldes, um nach Ende des Hochfrequenzimpulses wieder in die statische Achse auszulernen.

Resonanz des Hochfrequenzsignals wird ausgelöst, wenn dieselbe Frequenz wie die Präzessionsfrequenz der Protonen getroffen wird. Bei Aussendung des HF-Signals werden gleichzeitig zur Auslenkung in die andere Achsenrichtung die Protonen in den energiereichen, antiparallelen Zustand gehoben, sie werden angeregt und synchronisiert. Klingt das Signal ab, so fallen auch die Protonen wieder in den energieärmeren, parallelen Zustand zurück. Dieses Zurückfallen in einer bestimmten Abklingzeit ergibt das Antwortsignal, wieder im Hochfrequenzbereich.

Die Zunahme der Längsmagnetisierung (entspricht der statischen Hauptmagnetfeldachse) nennt man T1 Relaxation (Spin-Gitter- Relaxation), wohingegen die Abnahme in der Quermagnetisierung als T2- Relaxation (Spin-Spin-Relaxation) bezeichnet wird.

Die Längsrelaxation kommt durch das Zurückfallen der Protonen in ihren energiearmen Zustand zustande. Bei der Querrelaxation sind die Protonen nicht mehr in Phase, das heißt, sie sind nicht mehr synchronisiert um das Hauptmagnetfeld in der Transversalebene. Die zuvor aufgenommene Energie wird als Radiowelle abgestrahlt, was dann im MRT bildgebend verarbeitet werden kann. Eine reine Bestimmung der beiden T-Phasen ist demzufolge nicht möglich, man spricht daher von Wichtung.

Der Bildkontrast kommt dann dadurch zustande, dass die Kerne in den verschiedenen Geweben unterschiedliche Zeiten brauchen, bis sie wieder in ihren unangeregten Grundzustand zurückfallen und folglich unterschiedliche Signale, im Bild als Hyper- oder Hypodensität zu sehen, abgeben. Außerdem ist die Menge der Wasserstoffatome je nach Gewebeart verschieden.

Die Vorteile des MRT sind zum einen die gute Erkennbarkeit von Weichteilen, zum anderen, dass diese Technik ohne schädliche ionisierende Strahlung funktioniert.

Nachteilig sind dabei die hohen Kosten durch die Anschaffung der Geräte und immensen Stromverbrauch. Außerdem nimmt die Aufnahme einer Bildsequenz sehr viel Zeit in Anspruch. Des Weiteren lässt sich die MRT nicht bei Patienten durchführen, die ein älteres Metallimplantat tragen, da durch Erwärmung oder potentielle Verlagerung (z.B. bei Metallsplintern im Gesicht) des Fremdkörpers große Gefahren für den zu Untersuchenden ausgehen. Moderne Titanprothesen stellen dahingegen kein Hindernis dar. Ebenfalls ist bei Menschen mit Klaustrophobie anzunehmen, dass ihnen die Röhre des Gerätes Schwierigkeiten bereiten wird. Durch die Lärmpegel und die Größe der Geräte müssen spezielle Räume zur Verfügung gestellt werden. Auch bei großflächigen Tätowierungen ist von einem MRT abzuraten, da sich metallhaltige Farbpigmente während der Aufnahmesequenzen erwärmen und so zu höhergradigen Verbrennungen führen können [107].

Verglichen mit der Computertomographie sind Artefakte beim MRT auch häufiger anzutreffen und störender bei der Betrachtung des fertigen 3D Bildes.

Im Bereich von stark unterschiedlichen Signalen im Übergang von Gewebe zu Gewebe kann es zum Beispiel zu Kantenartefakten kommen, oder bei unterschiedlicher Präzessionsfrequenz von Wasser- und Fettprotonen (Wasserstoff bindet an Fettsäuren oder befindet sich im Zellwasser) zu chemical-shift-Artefakten [59].

In der plastischen Chirurgie findet das Magnetresonanzverfahren aufgrund der guten Weichteilbildgebung unter anderem Anwendung in der Erfassung von prä- zu postoperativen Veränderungen des fazialen Fettgewebes [75]. Le Louarn [73] untersuchte mithilfe von MRT-Bildern den Alterungsprozeß im Gesicht durch die Verschiebung von submuskulärem Fettgewebe bei muskulären Mimikkontrakturen, so dass sich die ursprünglich konvexe Form des Muskels begradigt und verkürzt.

1.6.2.3 Meßbildverfahren

1.6.2.3.1 Photogrammetrie

Unter Photogrammetrie versteht man ein indirektes physikalisches Meßverfahren zur Bestimmung von Form, Größe und Lage eines Objektes aus fotografischen Bildern.

Die Messung erfolgt berührungslos. Die eigentliche Messung ist zeitlich und räumlich unabhängig von der Informationsgewinnung und kann sich auf selektive Messung und Verarbeitung der im Bild enthaltenen (geometrischen und semantischen) Informationen beschränken. Diese Art der Informationsgewinnung wird als Fernerkundung (Remote Sensing) bezeichnet.

Das geometrische Modell der Photogrammetrie ist die Zentralperspektive.

Schaut man mit nur einem einzigen Auge, so funktioniert dies wie eine Lochkamera, das Prinzip der Zentralprojektion arbeitet genauso. Dabei wird ein dreidimensionales Objekt auf eine zweidimensionale Bildebene gebracht.

Das Objekt wird durch Lichtstrahlen von einem Projektionszentrum (Irisblende des Auges, Lochblende der Kamera), welches in endlichem Abstand liegt, auf die Bildebene (beim Auge die Netzhaut, bei der Kamera der fotografische Film) projiziert. Die Bildebene liegt dabei hinter dem Projektionszentrum. Das auf der Netzhaut/ dem Film ankommende Bild ist dann folglich umgekehrt, weil die Projektionsstrahlen über das Zentrum hinaus verlängert werden.

Die Zentralperspektive ist keine eindeutige Abbildung, d.h. jedem Objektpunkt entspricht ein eindeutiger Bildpunkt, aber nicht umgekehrt. Die Rekonstruktion aus einer Perspektive (photogrammetrische Aufnahme) mit nur einer Kamera ist daher nur für den Sonderfall eines ebenen Objektes möglich.

Die ursprüngliche Lage eines Objektes im Raum wird also aus zwei oder mehreren Bildern rekonstruiert, analog zur Stereoskopie. Dazu nehmen gleichzeitig mindestens zwei Kameras aus verschiedenen Blickwinkeln das Objekt auf, so dass mindestens zwei sich teilweise überdeckende Bilder entstehen.

Die Rekonstruktion des Strahlenbündels einer zentralperspektivischen Abbildung ist dann eindeutig möglich, wenn die räumliche Lage des Projektionszentrums in Bezug auf die Bildebene bekannt ist. Die Koordinaten des Projektionszentrums in Bezug auf die Bildebene heißen auch Elemente der inneren Orientierung. Sind die Elemente der inneren Orientierung bekannt, spricht man von einem Meßbild.

Die räumliche Lage von zwei Bildern zueinander wird bei der relativen Orientierung nur relativ nachkonstruiert. Die Koordinaten der beiden Bilder ergeben zusammen die neuen, relativen Modellkoordinaten.

Zur Rekonstruktion der räumlichen Richtungen der Projektionsstrahlen aus einer Abbildung muß man neben den Elementen der inneren Orientierung auch die Raumlage des Aufnahmestrahlenbündels kennen. Sind also äußere und innere Orientierung bekannt, so lassen sich die Raumkoordinaten eines beliebigen Punktes des abzubildenden Gegenstandes aus den Bildkoordinaten berechnen.

In der Medizin wird vornehmlich die Zweibildphotogrammetrie angewendet. Das Verfahren wird in der medizinischen Literatur zuerst von Thalman Degen beschrieben und später von Burke und Beard [10] weiterentwickelt. Rasse [88] wandte die Methode bei einem Patienten mit Gesichtsasymmetrie an, um den Effekt der Korrekturoperationen dreidimensional evaluieren zu können. Dabei markierte er Referenzpunkte mit festen Koordinaten auf dem Patientengesicht. Die anschließend aufgenommenen Stereofotografien wurden anhand der Referenzpunkte per Computer in ein dreidimensionales Koordinatensystem überführt, so dass auch der Rest des Gesichtes dreidimensional erfasst werden konnte. Auch Ras et al verwendeten die Stereophotogrammetrie, um faziale Asymmetrien bei Patienten mit einseitigen Lippen-Gaumenspalten darzustellen, wobei die senkrechte Achse als Vergleichsebene diente [86, 87].

Kobayashi [63] untersuchte mithilfe photogrammetrisch gewonnener 3D Datensätze Volumenänderungen im Kieferweichteilgewebe nach erfolgter Korrekturoperation der Mandibula. Sawyer [94] führte später eine stereophotogrammetrische Analyse des Lippenvolumens durch.

1.6.2.3.2 Moiré-Fotografie

Die Moiré-Fotografie legt vom Prinzip her den Grundstein für die im Anschluß unten noch erwähnte Streifenprojektion.

Der Moiré-Effekt (von frz. moirer: „marmorieren“) entsteht, wenn man Raster oder Linien überlagert und sich dabei neue Raster bzw. Linienmuster bilden. Man kann dies beim Einscannen von Bildern mit sich regelmäßig wiederholenden Strukturen beobachten. Eigentlich stellt dieser Effekt einen Störfaktor in der Digitalfotografie dar, der durch Wechselwirkung von Objekt- und Sensorstruktur hervorgerufen wird.

Beim Verfahren der Moiré-Fotografie macht man sich diesen Effekt zunutze. Man überträgt symmetrisch um eine gemeinsame Mitte geordnete Strukturen auf die Oberfläche des Gesichtes. Das dabei entstandene Moiré-Muster wird fotografiert und dann in einen Rechner eingescannt. Aus den übereinandergelagerten Mustern kann man so die drei Raumkoordinaten der gescannten Oberfläche ermitteln [61].

Ikeda führte eine Untersuchung durch, in der er die Ausprägung des zygomatischen Winkels mittels MRT maß. Anschließend verglich er diese Ergebnisse, indem er in der infraorbitalen Region die Anzahl der Moiréstreifen auf Fotografien zu den MRT Ergebnissen in Bezug setzte [55].

Kawai vermaß 60 japanische Studenten, um den Unterschied in der Symmetrie zwischen linker und rechter Gesichtshälfte bei Normalgesichtigen festzustellen. Dies sollte als Richtwert für die Rekonstruktion beider Seiten von Lippen- und Gaumenspalten dienen [60].

1.6.2.3.3 Streifenprojektion

Dieses Verfahren, auch Streifenlichttopometrie genannt, stellt eine optische Messmethode dar, bei der aus Bilderfolgen die Oberfläche dreidimensional erfasst werden kann.

Prinzipiell besteht ein Streifenprojektionssensor aus einem Projektor, vorstellbar als Diaprojektor und ein oder zwei Kameras. Muster von dunklen und hellen Streifen, die parallel zueinander, aber von verschiedener Breite sind, werden dann in einer bestimmten Zeitsequenz vom Projektor auf das zu vermessende Objekt projiziert.

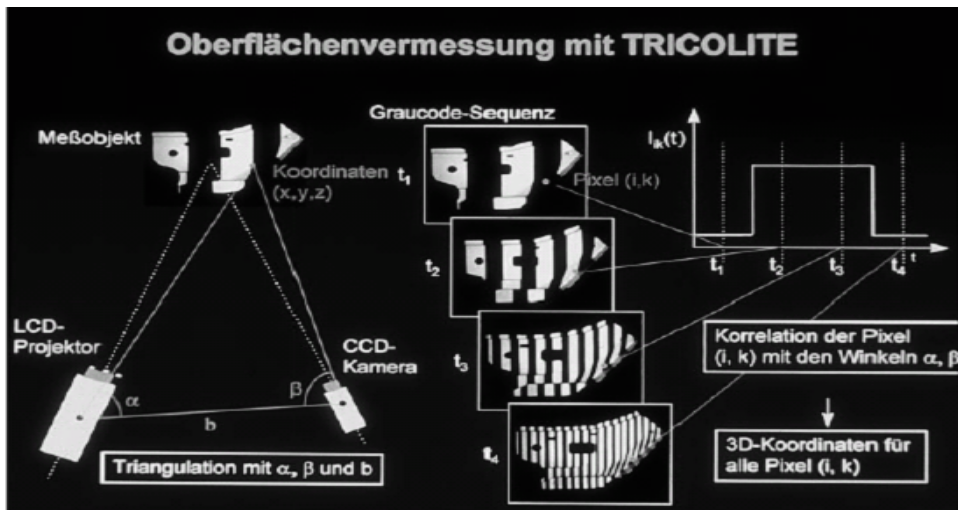


Abb. 1. Funktionsprinzip des Meßverfahrens. Das Objekt wird mit einem Projektor beleuchtet und von einer Kamera beobachtet. Durch Triangulation wird für jeden Kamerapunkt eine x-y-z-Koordinate berechnet

Abb. 11: Streifenprojektionsverfahren TRICOLITE

Die in einem bestimmten Winkel zum Objekt positionierten Kameras registrieren dann dieses Streifenmuster. Von jedem Muster wird von jeder Kamera ein Bild gemacht. Jeder Bildpunkt der beiden Kameras bekommt so eine zeitliche Sequenz von verschiedenen Helligkeitswerten zugeordnet.

Legt man ein Gitternetz bestehend aus den Zeilen aus den oben genannten Lichtstreifen und den Spalten aus der Abtastreihenfolge der Kamerapixel über das Messobjekt, so verzerrt sich dieses Gitter je nach Oberfläche des Objektes.

Diese Verzerrung kann in der Kamera gemessen werden.

Damit die Koordinaten der Oberfläche berechnet werden können, müssen die Projektorkoordinaten bekannt sein. Die Bildkoordinaten im Bild der Kamera sind von jedem Punkt des Objektes bekannt.

Die Lage eines Oberflächenpunktes im Raum wird erstens bestimmt durch die Nummer des Lichtstreifens, auf dem er liegt, zweitens durch seine Bildkoordinaten auf dem Sensorchip der Kamera und drittens durch die bekannte geometrische Lagebeziehung zwischen Projektor und Sensor. Jeder Punkt der Oberfläche entspricht exakt einem Punkt auf dem Sensorchip der Kamera.

Die Streifennummer kann aus den Sequenzen der Helligkeitswerte ermittelt werden. Mittels eines Gray-Codes (binär) kann die Streifennummer im Projektor gespeichert werden. Mit Hilfe des Phase-Shift-Verfahrens kann man allerdings eine bessere Genauigkeit erzielen.

Die Phase des Signals wird mindestens zweimal um einen bekannten Wert verschoben, während an einem Punkt die Intensität gemessen wird. Aus mehreren dieser Punkte kann dann die Phasenlage errechnet werden. Die projizierten Streifen erscheinen aus einer um den Triangulationswinkel verschobenen Blickrichtung durch die Form der Oberfläche verbogen, d.h. die Information über die Höhe bzw. Tiefe wird in die Phase des verformten Streifenmusters transformiert.

Diese Information kann dann wieder rückübersetzt werden.

Mit der kontaktlosen Messmethode der Streifenlichtprojektion erhält man dreidimensionale Datensätze. Nachteilig ist aber, dass, um einen Punkt auf der Oberfläche zu erfassen, dieser vollständig sichtbar sein muß. Ist das Objekt sehr komplex, sind Sensorerfassungen aus vielen verschiedenen Winkeln erforderlich, was sehr aufwendig ist. Schwenger [95] fand in einer Studie, in der sie Dysgnathiepatienten vor und nach einer Operation verglich, dass die Methode zuverlässig und valide ist. Das Verfahren hat eine kurze Aufnahmezeit von 1,7 Sekunden, arbeitet mit 500000 Meßpunkten sehr präzise und kann auch bei geöffneten Augen des zu erfassenden Patienten angewendet werden [51].

1.6.2.4 Triangulationsverfahren

1.6.2.4.1 Trackingverfahren

Zur Verfügung stehen auch diverse Trackingverfahren, es gibt sowohl optoelektronische, elektromechanische als auch elektromagnetische.

Optoelektronische Systeme bestehen zumeist aus mehreren Kameras, die Markierungen beispielsweise mittels Infrarotstrahlung erfassen. Man verwendet für die Markierungen spezielle Reflektorfolien, aber auch farblich unterscheidbare Muster sind für diesen Zweck ausreichend. Die Position der Kameras zueinander und die Position der Markierungen im Gesicht ergeben dann die 3D Koordinaten.

Bei elektromechanischen oder elektromagnetischen Trackern wird ein speziell zur Erfassung der Punkte hergestellter Stift benutzt, mit dem man die Punkte auf dem Gesicht berühren muß.

Zur Einführung einer neuen Methode indirekter, dreidimensionaler Anthropometrie benutzte Ferrario anfänglich ein optoelektronisches System, das mit zwei charged-coupled Infrarotkameras arbeitete[36, 38, 40, 41, 43].

Aus den erfassten Landmarks konnte so im Nachhinein ein geometrisches Gitternetz, bestehend aus den markierten Punkten im Gesicht, rekonstruiert werden[39, 42]. Aus

diesem Gitter wurden dann mithilfe von verschiedenen Softwareprogrammen Werte wie Winkel, Strecken und Volumina berechnet.

Später dann verwendete er zur Herstellung dieses Gitters einen elektromagnetische Digitalisierer, um ebenso die fazialen Asymmetrien bei Lippen-Gaumen-Spalten-Patienten quantitativ zu erfassen [31-33, 44]. Er verglich das konstruierte Gitter von Übergewichtigen mit denen Normalgewichtiger [28] und errechnete einige Flächen und Volumina bei ectodermaler Dysplasie [27].

Bei Patienten mit Down Syndrom benutzte er die Variante eines elektromechanischen Digitizers [26, 29]. Dabei untersuchte er lineare Distanzen, Winkel, Flächen und Volumen der Lippen und der Nase im Vergleich zu Normalgesichtigen. Flächen und Volumina wurden hierbei aus den zu Dreiecken (bzw. Tetraeder bei der Volumenberechnung) verbundenen Landmarks in Annäherung an die natürliche Gestalt der Nase bzw. Lippen errechnet [25].

Von Nachteil ist, dass das Gerät für jeden Messvorgang neu kalibriert werden muß, da sonst elektromagnetische Interferenzen den Messvorgang beeinträchtigen können. Die Erfassung der gesamten Gesichtsoberfläche wäre zwar möglich, aber da der Stift eben nur punktuell eingesetzt werden kann, recht zeitaufwendig. Durch das zur Messung notwendige Berühren der Gesichtsoberfläche kann es zu Verformungen der Weichteile kommen, was zu Verzerrungen der realen Koordinaten führen könnte.

1.6.2.4.2 Laserscanning/ Lichtschnittverfahren

Laserscanning dient der dreidimensionalen Bilderzeugung und Vermessung der Oberflächengeometrie, indem es diese mit einem Laserstrahl abscannt, und sie somit digital erfasst.

Die angewendete Technik ist hierbei die Triangulation. Aus der Entfernung und dem Winkel zum Laser können die Koordinaten des Objektes ermittelt werden.

Eine Laserlichtquelle beleuchtet unter einem bestimmten Winkel α (zu einem dazu waagrecht liegenden Basisstrahl) die Objekt Oberfläche. Ein Sensor empfängt dann das von der Oberfläche zurückreflektierte Licht und kann so aus der gemessenen Zeitdifferenz die Entfernung zum Gegenstand berechnen. Der Basisstrahl bildet einen 90 Grad Winkel zum Objektpunkt. Dabei kommt es zur Bildung eines Dreiecks (lat. Triangulum: „Dreieck“).

Bei bekannten Winkeln zwischen den Seiten eines Dreiecks und bei einer bekannten Seitenlänge lassen sich damit die Längen der anderen Seiten berechnen. Man erhält dann die Lage der Punkte im Dreieck in einem Koordinatensystem.

Um die x, y, z - Koordinaten zu erhalten, muß das Objekt vom Laserstrahl vertikal und horizontal erfaßt werden.

Man spricht bei dieser Linienprojektion auch von Lichtschnittverfahren. Die Streifenprojektion wurde oben schon besprochen.

Die dabei entstehende Punktwolke besteht aus vielen einzelnen dreidimensionalen Punkten. Indem man die einzelnen Punkte miteinander zu Dreiecken vermascht (Meshing), kann die Oberfläche des Gegenstandes als geschlossen visualisiert werden.

Das Verfahren ist schnell und einigermaßen kostengünstig, außerdem ist die Berührungslosigkeit der Messung angenehm für den Patienten. Man erhält ein detailgetreues, dreidimensionales Bild, in dem man sich leicht orientieren kann. Wichtig sind allerdings die Lichtverhältnisse, denn wenn die Hautoberfläche das Licht zu sehr reflektiert, können Störungen im Bild entstehen. Dabei spielt auch die Hautfarbe des Patienten eine Rolle. Auch bestimmte anatomische Strukturen, wie zum Beispiel die Unterfläche der Nase, sind teilweise schwierig zu erfassen. Da die Laserscanner ursprünglich in der Automobilindustrie benutzt wurden, deren Modelle statisch sind, können bei einer Anwendung im medizinischen Bereich Fehlerquellen durch Bewegungsartefakte entstehen. Neuere Generationen von Scannern sind jedoch in ihrer Aufnahmegeschwindigkeit deutlich schneller, so dass auch diese Verzerrungen minimiert werden können.

Die aus den Datensätzen gewonnenen 3D Modelle können im Gegensatz zum CT oder MRT farbig wiedergegeben werden, was eine realistischere Vorstellbarkeit ermöglicht. Die Genauigkeit, mit der das Relief der Oberfläche bestimmt werden kann, beträgt bis zu 0,03 mm. Konturen und Oberflächenstrukturen können dabei präzise und zuverlässig erfasst werden.

Arridge [2] und Moss [80] fanden, dass der Laserscan eine zuverlässige Methode sei, in der rekonstruktiven Chirurgie die Morphologie des Gesichtes dreidimensional zu erfassen. Ebenso hat Kovacs die Genauigkeit der Methode als hinreichend evaluiert [65]. Coward [14] zeigte, dass es möglich ist, die Landmarks an Ohr und Gesicht auf dreidimensional eingescannten Personen zu identifizieren. Die Methode erwies sich damit als verlässlich. Zum gleichen Ergebnis kam Aung [4], als er

Landmarks, die auf das dreidimensionale Modell gesetzt wurden, mit der herkömmlichen anthropometrischen Methode verglichen. Wettstein machte eine Verlaufskontrolle bei Patienten, bei denen nach einer Tumorentfernung eine einseitige Rhytidektomie vonnöten war, um den Defekt zu schließen. Dabei konnte mittels über die Mittellinie gespiegelter Scans gezeigt werden, dass sich die zunächst bestehende unilaterale Asymmetrie auf beiden der gelifteten Gesichtshälfte nach einem Jahr wieder zurückgebildet hatte [109].

Ebenso wurde bei schweren Verbrennungen gezeigt, dass die durch den Laserscanner dreidimensional erstellten Bilder hilfreich bei der Planung der Wiederherstellungsoperation waren. Durch die Möglichkeit der Visualisierung des Sollergebnisses konnten die zu rekonstruierenden Teile in 3D simuliert werden [67].

1.7 Anwendungsgebiete

In der plastischen Chirurgie werden für Diagnostik und Therapieplanung sowohl Fotografien zur Dokumentation als auch stereophotogrammetrische Verfahren angewendet. Dabei ist die Fotografie zwar eine einfache und schnelle Methode, gerät aber wegen ihrer Zweidimensionalität und daher schlechterer Beurteilbarkeit im Hinblick auf zum Beispiel die Operationsplanung zunehmend ins Hintertreffen.

Die Computertomographie kommt zwar häufig zum Einsatz, da dieses Equipment in jedem größeren Krankenhaus zur Verfügung steht. Die hohe Strahlenbelastung macht das Verfahren aber gerade für rein ästhetische Zwecke nicht zum Mittel erster Wahl. Sie wird von für diesen Bereich nützlicheren Verfahren wie Laserscanning abgelöst, die durch verbesserte Hardwaretechnologie und hervorragende Softwareprogramme eine realistischere Einschätzung des Patientenmodells erlauben, das mehr Objektivität garantiert.

Auch in anderen medizinischen Disziplinen wie der Dermatologie und der Orthopädie kommt die Lasertriangulation zum Einsatz.

Kau verwendete in der Mund-Kiefer- Gesichtschirurgie einen Konica Minolta Vivid VI 300 Laserscanner, um mit diesen dreidimensionalen Bildern die faciale Topographie eines am Binder-Syndrom leidenden Kindes zu untersuchen [57]. Dabei wurde ein aus 42 normalgesichtigen Jungen kreiertes Durchschnittsgesicht zum Vergleich auf das Gesicht des Binder-Patienten aufgelagert, um das weitere Vorgehen in der Behandlung zu beurteilen. So konnte man in den 3D Bildern gut erkennen, dass der

Nasenrücken zu flach war, und die Maxilla ebenfalls eine defizitäre Protrusion aufwies.

In einer weiteren Studie stellte er aus 40 weiblichen und 40 männlichen zwei Durchschnittsgesichter her [58]. Diese dienten ihm als Vergleich zu zwei Normalgesichtern mitfazialer Asymmetrie und Malokklusion.

In der Rechtsmedizin werden ebenfalls optische Laser Scanning Systeme verwandt. Damit wird der Schädel schnell und kontaktlos eingescannt, so dass die Knochensubstanz keinen Schaden nimmt. Danach wird versucht, aus dem so gewonnenen virtuellen Kopf mittels graphischer Computerprogramme die dazu passenden Weichteile und die Haut des Gesichts zu rekonstruieren, indem man die Haut über den Schädelscan positioniert. Hierbei werden verschiedene Landmarks, die auf dem Knochen zu finden sind, zur Hilfe genommen und mit den Landmarks eines in einer Datenbank gespeicherten Gewebes übereingebracht. Die verschiedenen Gewebedicken wurden anhand von lebenden Menschen ermittelt.

Bei diesem Verfahren ist es auch möglich, die direkte Distanz zwischen knöchernen Landmarks und den korrespondierenden Weichteil-Landmarks zu ermitteln. Die Distanz auf der Oberfläche kann jedoch aufgrund der verwendeten Computersoftware nicht angegeben werden [102, 110].

1.8 Ziel dieser Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methode, mit der man einen quantitativen Vergleich der Geometrie des Gesichts durch dreidimensionale gewonnene Daten ausführen kann.

Hierzu wurde das von Ferrario konstruierte, zweidimensionale Gittermodell zu einer dreidimensionalen Maske weiterentwickelt, um auch die komplexe Oberflächenstruktur des Gesichtes zu erfassen. Zusätzlich wurde im Rahmen dieser Arbeit eine objektive Methode zur Bestimmung der Gesichtssymmetrie mittels Flächenvergleich zwischen den zweidimensionalen Strecken und den dreidimensionalen Oberflächenverläufen angestrebt.

Anhand eines symmetrischen Puppenkopfes wurde das Verfahren auf seine Genauigkeit überprüft.

Dabei sollte gezeigt werden, dass sich mit dieser neuen Methode Symmetrien präzise erfassen lassen.

Das Modell wurde im Anschluß an durchschnittlich symmetrische Probanden angewendet, um herauszufinden, ob und in welchem Maße deren Symmetrie von dem ideal ebenmäßigen Puppengesicht abweicht.

Der klinische Nutzen wurde im folgenden an Patienten getestet, um herauszufinden, ob diese Methode eine Quantifizierung der individuellen Gesichtsgeometrie ermöglicht und in der Lage ist, eine objektive Beurteilung über das Ausmaß der Gesichtssymmetrie im Vergleich von linker zu rechter Gesichtshälfte zu liefern.

2. Material und Methodik

2.1 Datenerfassung und Berechnung

2.1.1 Laserscanner

Für die dreidimensionale Erfassung der Objekte wurde ein kontaktloser 3D Laserscanner der Firma Minolta, Typ Vivid 910® (Konica Minolta, Inc., Osaka, Japan) verwendet. Das Basisprinzip hierfür ist die Lasertriangulation. Zur Ermittlung der Oberflächenkoordinaten wird in einer Ebene Licht aus der Blende des Scanners zum Objekt hin ausgesandt. Diese Lichtebene wird dann durch einen Galvanometerbetriebenen Spiegel quer über das Sichtfeld bewegt. Das von der gescannten Oberfläche reflektierte Licht wird nun durch eine CCD Kamera wieder eingefangen. Von den Höhenlinien der jeweils reflektierten Scanstrahlen wird nun die Gestalt des Objektes abgeleitet.

Die Erfassung der Daten benötigt 2,5 Sekunden und wird in einem Gitter von bis zu 300.000 Vektoren in einer Punktwolke verarbeitet.

Genauigkeit und Reliabilität des technischen Verfahrens wurde bereits von Kovacs et al [64-66] dokumentiert.

Tabelle 1: Technische Daten des Konica Minolta Vivid 910 Laserscanners

Typ	3 D Laserscanner (berührungsfrei)
Methode	Lasertriangulation
Auto Fokus	Aktive Oberflächen AF (Kontrastmethode)
Optik	3 auswechselbare Objektive Tele (f=25mm), Mittel (f=14mm), Weitwinkel (f=8mm)
Distanz zum Objekt	0,6m bis 1,2m
Scanbarer Bereich (x/y)/distanzabhängig	Min 111mm x 83mm Max 1196mm x 897mm
Geometrische Auflösung (Z,typ.)	+/- 0,008mm (Fine)
Messwerte pro Scan	307.000 Punkte (Fine) 76.800 Punkte (Fast)
Scanzeit	0,3 s (Fast), 2,5s (Fine), 0,5s (Color)
Umgebungslicht	< 500lux
Speicherkarte	Compact Flash Memory Card (128MB)
Schnittstelle	Fast SCSI
Laser	Class 1 (FDA) Class 2 (IEC 60825-1), 'Eye safe'
Farb-Lcd	5,7 Zoll Farb-TFT LCD (320x240 Pixel)
Dateigrößen	1,6MB (Fast) bis 3,6MB (Fine)

Ausgabeformate	3D: Minolta-Format & STL, DXL, OBJ, ASCII (Exportprogramme der Polygon-Editing-Software (Standardzubehör) Textur: RGB, 24bit Farbtiefe
Maße	213mm x 413mm x 271mm (BxHxT)
Gewicht	Ca. 11kg
Arbeitsumgebung	10°- 40°C, RH < 65% / keine Kondensation
Lagerungsumgebung	-10°- +50°C, RH < 85% / keine Kondensation

Die Aufnahmen erfolgten unter standardisierten Raumlichtverhältnissen in einem Kameraabstand von 1,1 Meter. Die Probanden wurden in sitzender Position gescannt, wobei der Kopf in einem Winkel von zehn Grad nach kranial geneigt war. Dabei wird der Winkel zwischen der Horizontalen und der „Frankfort Line“, eine imaginäre Linie vom äußeren Ohrkanal zum unteren Orbitarand, gemessen. Die Gesichter wurden aus drei verschiedenen Perspektiven, jeweils von frontal und in einem Profilwinkel von jeweils 30 Grad von der linken und der rechten Seite, erfasst.

2.1.2 Software

Diese drei daraus resultierenden Oberflächenscans wurden dann in einem Registrierungsprozeß zu einem einzigen dreidimensionalen, virtuellen Bild des eingescannten Gesichts verrechnet. Zum Zusammenfügen sind sich entsprechend überlappende Punkte auf jeder der drei Teiloberflächenscans nötig, die dann automatisch zusammengeführt werden.

Für diese Bildverarbeitung wurde als Software Raindrop Geomagic Studio 7.0 (Raindrop Geomagic Inc., NC, U.S.A.) benutzt.

Die in Geomagic erstellten 3D Gesichter wurden dann in eine spezielle Software (RapidForm 2006, INUS Technology Inc., Seoul, Südkorea) zur weiteren Datenanalyse übertragen.

Es wurden 46 definierte Merkmalspunkte, sogenannte Landmarks, auf die Gesichter aufgetragen (Tab. 2). 127 verschiedene Strecken, immer zwischen zwei benachbarten Landmarks, wurden dann zur Berechnung festgelegt (Tab. 3).

Das Auftragen der Landmarks und die anschließende Berechnung der Strecken zwischen diesen Merkmalspunkten wurde mithilfe von RapidForm 2006 (INUS Technology Inc., Seoul, Südkorea) durchgeführt.

Zur automatischen Erstellung aller Streckenverhältnisse wurde die Automeasure – Funktion verwendet.

Diese Funktion ermöglicht die Erstellung eines Scriptes, welches nach Eingabe der Landmarks und der zu bestimmenden Distanzen alle zu messenden Strecken für das jeweilige Gesicht automatisch berechnet.

Ebenso wurde die zwischen den direkten und oberflächlich verlaufenden Strecken eingeschlossene Fläche erfasst. Die Berechnung geschah mit Hilfe der Software AutoCAD (Autodesk Inc., San Rafael, U.S.A.) und MicroStation V8 (Bentley Systems, Exton, Pennsylvania, U.S.A.).

Nach erfolgter Streckenberechnung wurden für die Flächenberechnung zunächst einmal die Koordinaten der Landmarks als .igs Format gespeichert und in MicroStation importiert. Dort wurden sie weiter in ein .dwg Format umgewandelt, so dass es möglich war, sie in das AutoCad Programm einlesen zu können.

Die einzelnen 3D Shells der Gesichter wurden als .dxf Datei gespeichert und in AutoCad übertragen.

Anschließend wurden Gesichter und zugehörige Landmarks wieder in einem Koordinatensystem zusammengefügt und die Punkte mit ihrer Namensbezeichnung versehen.

2.1.3 Flächenberechnung

Jede Shell besteht aus mehreren tausend Punkten, die zu Dreiecken vermascht sind. Drei unmittelbar benachbarte Punkte ergeben dabei ein flächiges Dreieck. Aus allen gebildeten Dreiecken lässt sich somit die Oberfläche der Shell in Quadratmillimeter errechnen. Da die Dreiecke ausreichend klein sind, stellen sie in guter Näherung die Krümmung der Oberfläche dar.

Das Prinzip der Flächenberechnung beruhte auf der Messung von Höhenprofilen.

Man erhält eine direkte Strecke zwischen zwei Punkten A und B. Senkrecht oberhalb oder unterhalb davon befindet sich die Oberfläche der Shell. Schneidet man diese, so erhält man eine gekrümmt verlaufende, dreidimensionale Linie. Jeder Punkt auf den beiden Linien besitzt somit eine X, Y, Z- Koordinate.

Gemessen wurde nun also von jedem Punkt der direkten Linie zwischen A und B die Höhe zu dem dazu jeweils sich senkrecht befindlichen Punkt der Oberflächenlinie der Shell. Diese Punkte sind entweder Eckpunkte der Dreiecke oder auch Schnittpunkte der mit einer der bei der Vermaschung gebildeten Verbindungslinien zwischen den Dreieckseckpunkten.

Da die Formel für die gekrümmte Oberflächenlinie unbekannt ist, lassen sich aus den so gewonnenen Abständen mithilfe der Gaußschen Flächenformel alle Trapezflächen zu einer Gesamtfläche zwischen der geraden Linie und der Linie auf der Oberfläche errechnen.

2.2 Erstellung des Gittermodells in 3D

In Anlehnung an das von Ferrario entwickelte Gittermodell, welches zweidimensionale Streckenverbindungen enthält, wurde ein Gitternetz aus 46 Landmarks anhand eines Puppenmodells (Abb. 12) erstellt.

Die 46 verwendeten, standardisierten Landmarks wurden von Farkas und Ferrario aus ihren anthropometrischen Forschungen übernommen (Tab. 2).

Davon befinden sich zehn Punkte in der Mittellinie des Gesichtes, die restlichen 36 Punkte sind auf beiden Gesichtshälften symmetrisch zueinander.

Sie wurden per Hand mittels Mausclick auf die dreidimensionale Oberfläche der gescannten Puppe eingefügt. Somit bekam jeder dieser Punkte eine dreidimensionale Koordinate auf der Shell zugeordnet.

Zwischen jeweils zwei Einzelpunkten wurden 127 Strecken gewonnen und in ihrer direkten Verbindung und der auf der Oberfläche verlaufenden vermessen (Tab.3). Diese Strecken bilden dabei zusammen das Gitternetz (Abb.13 und 14).

Das hier konstruierte Gitter enthält jedoch im Gegensatz zu der von Ferrario erstellten Maske zudem die dreidimensionalen, oberflächlichen Verbindungslinien zwischen den einzelnen Landmarks. Damit wird die Krümmung der Gesichtsoberfläche miterfasst (Abb.14).

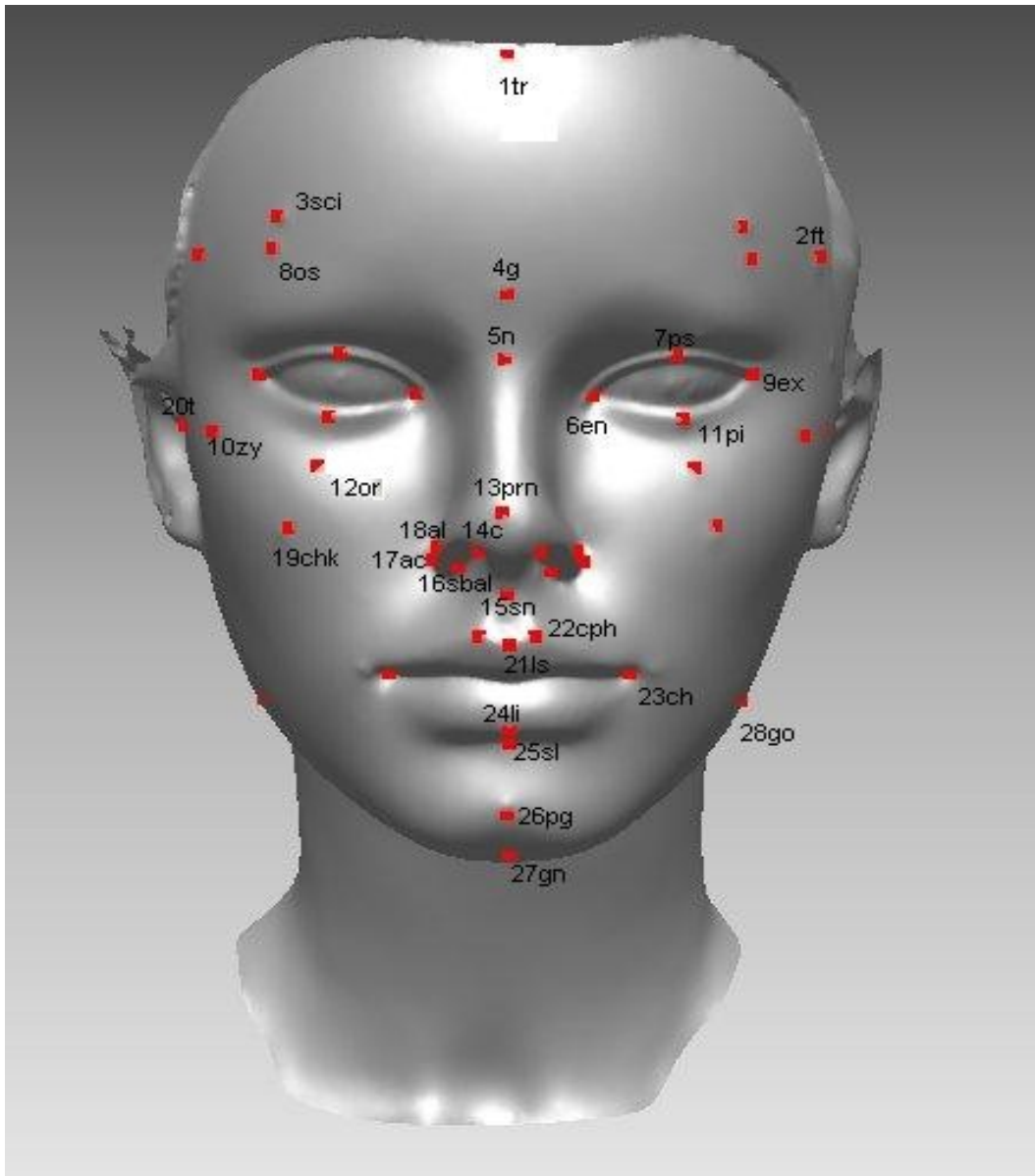


Abb.12: gescanntes Puppenmodell mit gekennzeichneten Punkten

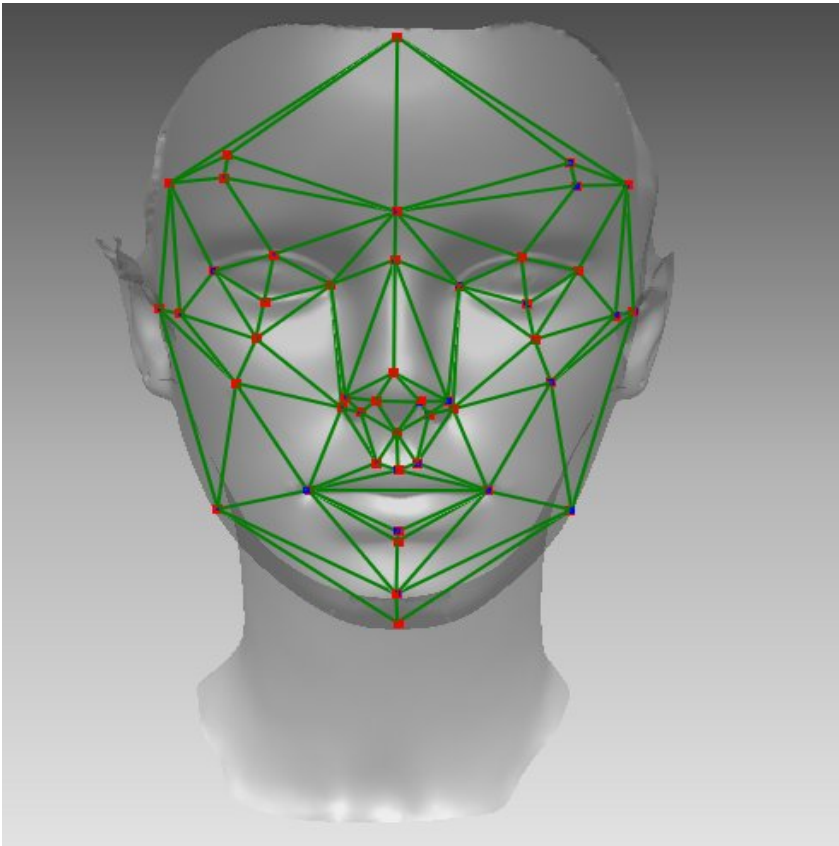


Abb. 13: Gitternetz bestehend aus direkten Streckenverbindungen

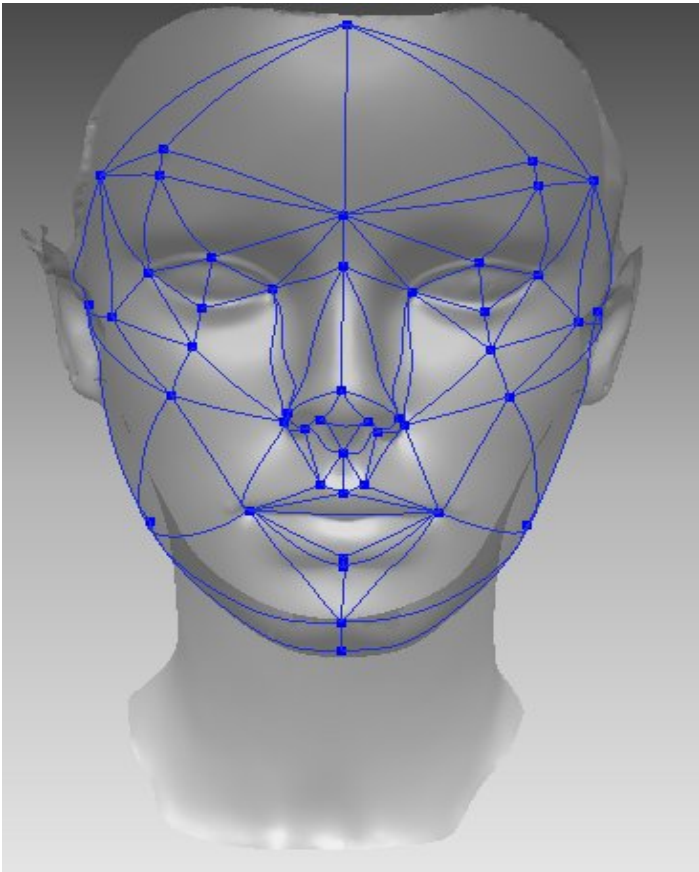


Abb.14: Oberflächenverlauf des Gitters

Tabelle 2: Landmarks

1tr	Trichion	in der Mittellinie der Stirn am Beginn des Haaransatzes
2ftre	Frontotemporale rechts	Stirn beidseits, lateral der Erhebung der Linea temporalis, korrespondiert mit dem Niveau der Endpunkte der Augenbrauen
2ftli	Frontotemporale links	
3scire	Superciliare rechts	höchster Punkt im Mittelbereich der oberen Grenzlinie der Augenbraue
3scili	Superciliare links	
4g	Glabella	prominentester Punkt in der Mittellinie zwischen den Augenbrauen, identisch mit dem knöchernen Glabella-Punkt
5n	Nasion	in der Mittellinie der Nasenwurzel und der Sutura nasofrontale, identisch mit dem knöchernen Nasion
6enre	Endocanthion rechts	an der inneren Kommissur der Augenfissur, etwas lateral vom knöchernen Endocanthion
6enli	Endocanthion links	
7psre	Palpebrale superius rechts	der höchstliegende Punkt im Mittelbereich des oberen Augenlides
7psli	Palpebrale superius links	
8osre	Orbitale superius rechts	höchster Punkt am Unterrand der Augenbraue nahe dem höchsten knöchernen Punkt des Oberrandes der Orbita
8osli	Orbitale superius links	
9exre	Exocanthion rechts	an der äußeren Kommissur der Augenfissur, etwas medial vom knöchernen Exocanthion
9exli	Exocanthion links	
10zyre	Zygion rechts	lateralster Punkt des Jochbogens
10zyli	Zygion links	
11pire	Palpebrale inferius rechts	der unterste Punkt im Mittelbereich des freien Randes des unteren Augenlides
11pili	Palpebrae inferius links	
12orre	Orbitale rechts	der unterste Punkt am unteren Rand der Augenhöhle, identisch mit dem knöchernen Orbitale
12orli	Orbitale links	
13prn	Pronasale	der am weitesten vorstehende Punkt an der Nasenspitze
14cre	Columella rechts	auf Höhe des zur Nasenspitze hinreichenden Endes des Nasenlochs
14cli	Columella links	
15sn	Subnasale	Mittelpunkt des Winkels an der Basis der Columella zwischen Untergrenze des Nasenseptums und Oberfläche der Oberlippe
16sbalre	Subalare rechts	an der unteren Grenze der alaren Basis, wo es nach unten in die Haut der Oberlippe übergeht
16sballi	Subalare links	
17acre	Alar crest rechts	lateralster Punkt in der gekrümmten Basis des Nasenflügels, wo es seitlich in Haut des Gesichtes übergeht
17aclli	Alar crest links	
18aire	Alare rechts	lateralster Punkt am Nasenflügel
18alli	Alare links	
19chkre	Cheek rechts	Schnittpunkt zwischen ac-t und ex-ch
19chkli	Cheek links	
20tre	Tragion rechts	Einkerbung am oberen Rand des Tragus
20tli	Tragion links	

21ls	Labiale superius	Mittelpunkt der oberen Lippenrotgrenze
22cphre	Crista philtri rechts	Punkt über dem erhöhten Rand des Philtrums oberhalb der Lippenrotgrenze
22cphli	Crista philtri links	
23chre	Cheilion rechts	lateralster Punkt der Lippenkommissur
23chli	Cheilion links	
24li	Labiale inferius	Mittelpunkt der unteren Lippenrotgrenze
25sl	Sublabiale	determiniert die untere Grenze der Unterlippe oder die obere Grenze des Kinns in der mentolabialen Mittellinie
26pg	Pogonion	der am weitesten nach vorn reichende Punkt an der Kinnoberfläche, identisch mit dem knöchernen Pogonion
27gn	Gnathion	der unterste von vorn sichtbare Punkt an der Untergrenze des Kiefers, identisch mit dem knöchernen Gnathion
28gore	Gonion rechts	lateralster Punkt des Mandibularwinkels nahe dem knöchernen Gonion
28goli	Gonion links	

Landmarks übernommen von Farkas und Ferrario

Aus: [20] und für Punkt 19 chk: [37]

Tabelle 3: 127 direkte und Oberflächen-Streckenmessungen

STRECKEN		
1tr-2ftre	5n-6enre	23chre-21ls
1tr-2ftli	5n-6enli	23chli-21ls
1tr-3scire	4g-5n	23chre-24li
1tr-3scili	5n-13prn	23chli-24li
1tr-4g	5n-18alre	23chre-25sl
2ftre-3scire	5n-18alli	23chli-25sl
2ftli-3scili	18alre-13prn	23chre-26pg
4g-3scire	18alli-13prn	23chli-26pg
4g-3scili	6enre-18alre	23chre-28gore
4g-8osre	6enli-18alli	23chli-28goli
4g-8osli	6enre-17acre	28gore-26pg
2ftre-8osre	6enli-17accli	28goli-26pg
2ftli-8osli	17acre-18alre	28gore-27gn
3scire-8osre	17accli-18alli	28goli-27gn
3scili-8osli	18alre-14cre	12orre-6enre
2ftre-9exre	18alli-14cli	12orli-6enli
2ftli-9exli	13prn-14cre	12orre-11pire
2ftre-10zyre	13prn-14cli	12orli-11pili
2ftli-10zyli	14cre-14cli	12orre-9exre
2ftre-20tre	14cre-16sbalre	12orli-9exli
2ftli-20tli	14cli-16sballi	12orre-10zyre
8osre-9exre	18alre-16sbalre	12orli-10zyli
8osli-9exli	18alli-16sballi	12orre-17acre
8osre-7psre	17acre-16sbalre	12orli-17accli
8osli-7psli	17accli-16sballi	12orre-19chkre
4g-7psre	16sbalre-15sn	12orli-19chkli
4g-7psli	16sballi-15sn	19chkre-10zyre
7psre-9exre	15sn-14cre	19chkli-10zyli
7psli-9exli	15sn-14cli	19chkre-20tre
9exre-10zyre	15sn-21ls	19chkli-20tli

9exli-10zyli	15sn-22cphre	19chkre-17acre
10zyre-20tre	15sn-22cphli	19chkli-17acli
10zyli-20tli	16sbalre-22cphre	19chkre-23chre
4g-6enre	16sballi-22cphli	19chkli-23chli
4g-6enli	22cphre-17acre	19chkre-28gore
7psre-6enre	22cphli-17acli	19chkli-28goli
7psli-6enli	22cphre-21ls	20tre-28gore
9exre-11pire	22cphli-21ls	20tli-28goli
9exli-11pili	22cphre-23chre	24li-25sl
11pire-6enre	22cphli-23chli	25sl-26pg
11pili-6enli	17acre-23chre	26pg/27gn
7psre-11pire	17acli-23chli	
7psli-11pili	23chre-23chli	

2.3 Anwendung des Gittermodells

2.3.1 Modellüberprüfung an einen symmetrischen Puppenkopf

Um zu gewährleisten, dass das aus den Verbindungslinien zwischen den Landmarks konstruierte Gitter die Symmetrie korrekt vermisst, wurde anhand eines industriell gefertigten, sehr symmetrischen Schaufensterpuppenkopfes (Abb. 15) die Symmetrie beider Seiten des Gesichtes vermessen.

Durch die symmetrischen Gesichtsproportionen des Modells konnte die Anwendbarkeit der Streckenmessungen für Asymmetrieuntersuchungen sichergestellt werden.

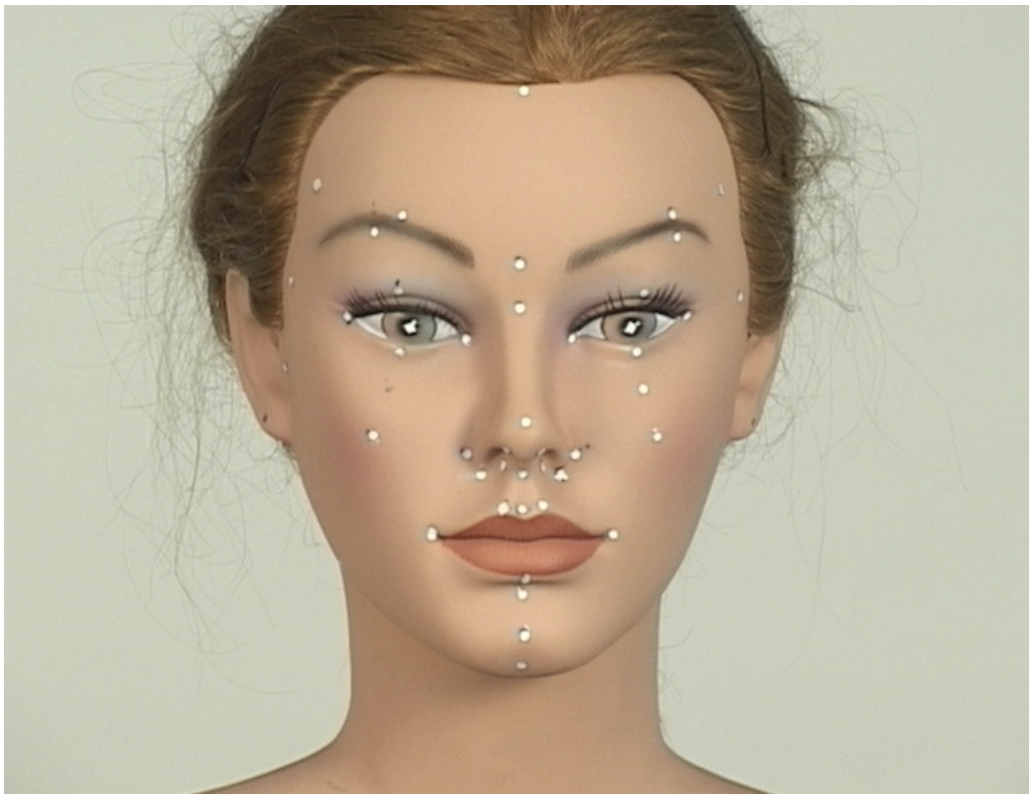


Abb. 15: Puppenmodell

2.3.2 Modellanwendung an normalsymmetrischen Probanden

Um Reproduzierbarkeit und eine Aussage bezüglich der Anwendbarkeit zu gewährleisten, wurde das so generierte Modell anschließend an dreizehn, weißhäutigen Probanden getestet. Jeweils sieben weibliche und sechs männliche, durchschnittlich symmetrische Probanden wurden hierzu eingescannt.

Die Symmetrie wurde zuvor anhand des optischen Eindrucks von Untersucher und medizinischem Fachpersonal eingeschätzt.

Für die Frauen zwischen 23 und 31 Jahren ergab sich ein Durchschnittsalter von 27,9 Jahren mit einer Standardabweichung von +/- 2,9 Jahren. Die Männer im Alter von 25 bis 31 waren im Durchschnitt 29,2 Jahre alt mit einer Standardabweichung von +/- 2,2 Jahren.

Das mittlere Gewicht der Frauen in einem Bereich zwischen 50 kg und 60 kg betrug 57,1 kg bei einer Standardabweichung von +/- 3,7 kg.

Bei den Männern zwischen 75 kg und 92 kg lag der Durchschnitt bei 83,7 kg mit einer Standardabweichung von +/- 7,4 kg.

Die durchschnittliche Körpergröße der weiblichen Probandinnen zwischen 1,65 m und 1,78 m belief sich auf 1,71 m bei einer Standardabweichung von +/- 5,1 cm.

Die Männer zwischen 1,79 m und 1,85 m waren durchschnittlich 1,82 m groß bei einer Standardabweichung von +/- 3,0 cm.

Für jede der dreidimensionalen Aufnahmen wurde ein an die Gesichtsphysiognomie angepasstes Gitternetz bestehend aus den Landmarks erstellt und die Symmetrie beider Gesichtshälften vermessen und verglichen.

2.3.3 Modellanwendung anhand von klinischen Beispielen

Validiert und auf seine klinische Anwendbarkeit überprüft wurde das Modell anhand von Symmetrieuntersuchungen von vier kaukasischen Patienten. Sie wurden jeweils vor und nach der Operation via Scan bildlich festgehalten.

Von diesen vier Patientinnen unterzog sich eine der Prozedur einer Septorhinoplastik, zwei Patientinnen kamen zur Behandlung von Gesichtsasymmetrien durch Weichteilatrophy, die mit Eigenfett- Lipofillings behoben wurde.

Die vierte Patientin hatte sich Verbrennungen dritten Grades zugezogen. Die massiven Weichteil- und Knochendefekte wurden mit diversen Lappenplastiken

korrigiert, um unter anderem die Wiederherstellung der Nasenarchitektur zu erreichen.

2.4 Statistik

Die statistische Datenauswertung wurde mittels des Software-Programms Microsoft Excel (Microsoft Corp., Redmont, Washington, U.S.A.) und SSPS (SSPS Inc., Chicago, Illinois, U.S.A.) ausgeführt. Studiendesign und Analyse der Daten geschah mit Hilfe eines Statistikers (Institut für Medizinische Statistik und Epidemiologie, TU München).

3. Ergebnisse

3.1 Gittermodell

Bestehend aus 46 Landmarks wurde eine Maske entwickelt. In Weiterentwicklung des zweidimensionalen Modells von Ferrario entstand eine um die dreidimensionalen Oberflächendistanzen erweiterte Maske (Abb. 16 und 17).

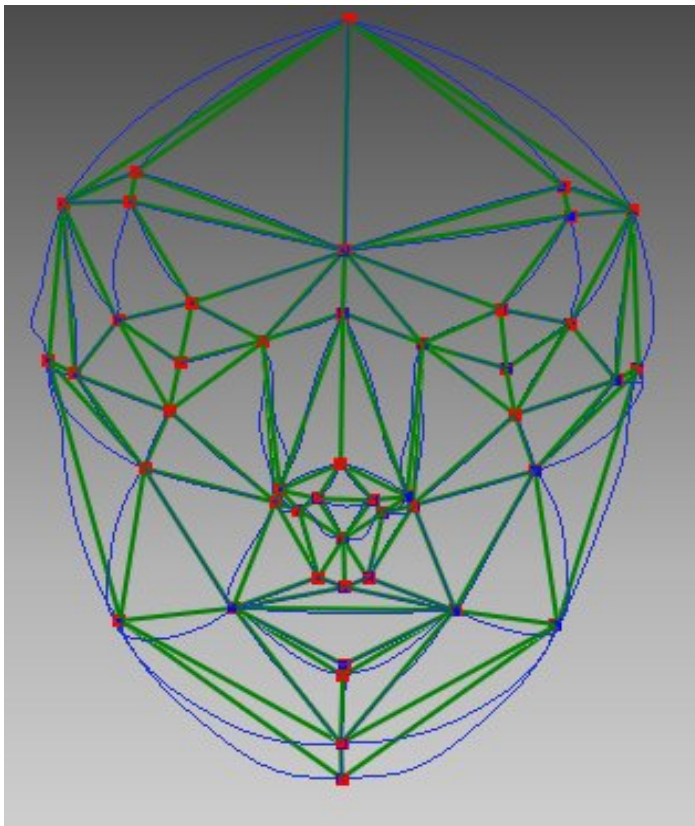


Abb.16: Gittermodell von frontal, in grün: direkte 2D Strecken, in blau: 3D Oberflächenverläufe

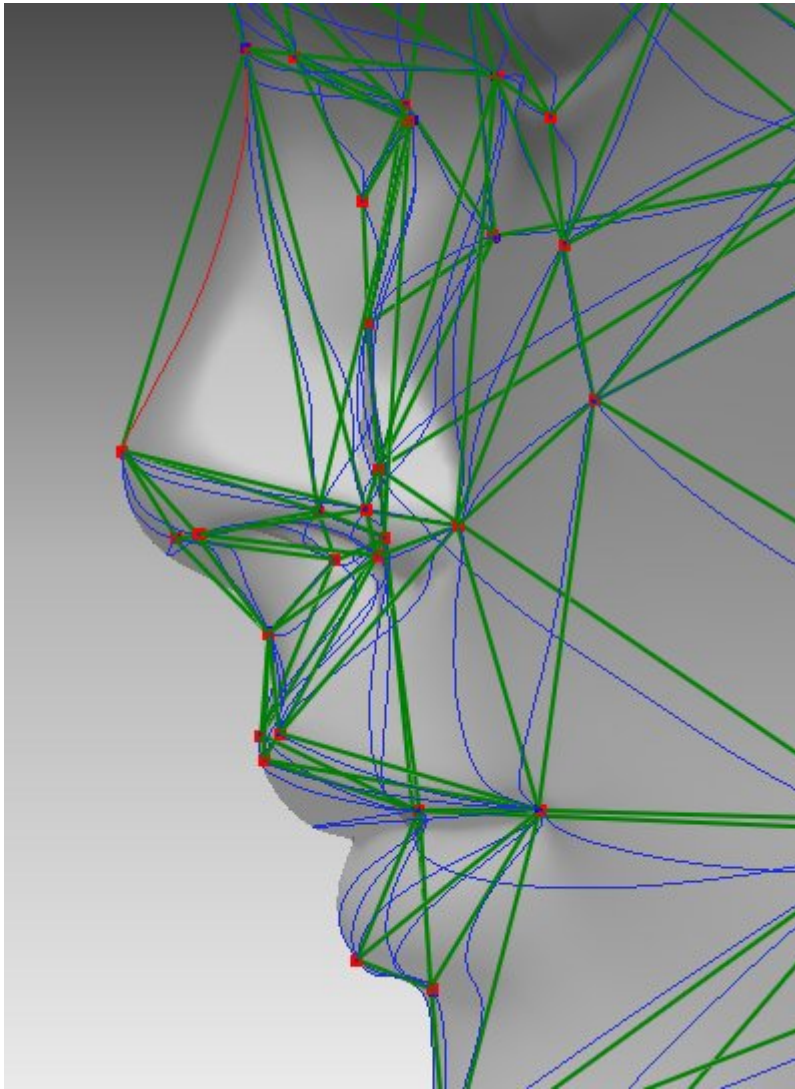


Abb. 17: Seitenansicht mit eingezeichneten 2D und 3D Strecken

Die Rechts-Links-Symmetrien wurden durch eine Gegenüberstellung der Abweichungen von der linken Gesichtshälfte zur rechten Seite dargestellt. Es wurden die beidseits korrespondierenden zweidimensionalen Strecken, die dreidimensionalen Verläufe auf der Scan-Oberfläche und die zwischen den 2D- und 3D-Strecken eingeschlossenen Flächen verglichen (Prinzip siehe auch Abb. 40 und 41).

Dabei kam heraus, daß die zweidimensionalen und dreidimensionalen Streckenverläufe und die Flächenberechnung sehr präzise die Symmetrie vermessen und bei asymmetrischen Patienten das Operationsergebnis zu dokumentieren vermögen.

3.2 Überprüfung des Modells anhand der Puppe

Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Strecken- bzw. Flächenmessungen von Puppe und Probanden zu ermöglichen, wurde in den statistischen Grafiken größtenteils einer prozentualen Darstellung der Werte der Vorzug gegeben, da die Puppe einen etwas kleineren Gesichtsmaßstab als eine reale Person besitzt.

Diese anteilige Änderung der Abweichung von der absoluten Symmetrie wurde jeweils für die direkten Strecken, für die dreidimensionalen Distanzen auf der Oberfläche der Scans und für die Flächen, die zwischen der direkten und der oberflächlichen Distanz eingeschlossen werden, berechnet.

Die Daten wurden also zum einen als absolute, d.h. reine Zahlenwerte erfasst und zum anderen in einer relativen, d. h. prozentualen Darstellung.

Gemessen und verglichen wurde die Abweichung der Symmetrie von linker zu rechter Gesichtshälfte. Die rechte Gesichtshälfte bildet also den Vergleichsmaßstab.

Der Bereich der Null repräsentiert in der Grafik die absolute Symmetrie, d.h., es sind keine Abweichungen der linken verglichen mit der rechten Gesichtshälfte zu vermerken. Die Anzahl der Strecken, die sich in diesem Bereich bewegen, wird durch die Höhe des Balkens angezeigt.

Wie in der Abbildung 18 ersichtlich, bewegen sich die Messungen der zweidimensionalen, direkten Strecken sehr nah an der absoluten Symmetrie.

Der Mittelwert der gemessenen Werte der Abweichungen von der absoluten Symmetrie betrug dabei 0,72%, das heißt, die rechten Strecken waren im Mittel um 0,72% länger als die Strecken der linken Seite.

Die Standardabweichung der prozentualen Rechts-Links-Symmetrie lag bei 5,73%. Die Anzahl der beidseits gemessenen Streckenpendants belief sich auf $n = 59$ (Abb. 18).

Eine Streckenmessung (18aI-16sbal) befand sich weiter außerhalb des symmetrischen Bereichs. Die Messung ergab 3,826 mm rechts zu 5,129 mm links, was einen absoluten Millimeter-Unterschied von 1,303 mm ausmacht.

Drei weitere Mess-Paare zeigten eine absolute Rechts-Links-Differenz von über 1,5 mm (7ps-6en, 19chk -23ch, 19chk-28go) (siehe Tabellenanhang, Tab. 12).

50 Streckenpaare lagen in einem Bereich von weniger als 1mm Abweichung.

Bei den dreidimensionalen Oberflächenverläufen bezifferte sich der Mittelwert auf 0,81%, die Standardabweichung auf +/- 6,1%. Hierbei wurden ebenfalls 59 paarige Oberflächenverläufe miteinbezogen (Abb. 19).

Auch hierbei zeigte sich in der oberflächlichen Distanz 18a1-16sba1 eine leichte Abweichung der Symmetrie von 4,558 mm rechts zu 6,199 mm links.

Die Flächen der rechten Seite waren im Mittel 8,26% kleiner als die linken Flächen. Als Standardabweichung ergab sich ein Wert von +/- 109,092%. Verglichen wurden 59 Flächen jeweils links- und rechtsseitig (Abb. 20).

Die Puppe zeigt demnach im Gesamtbild aller 2D und 3D- Strecken sowie der Flächen ein Ebenmaß, das sich unweit der absoluten Symmetrie befindet.

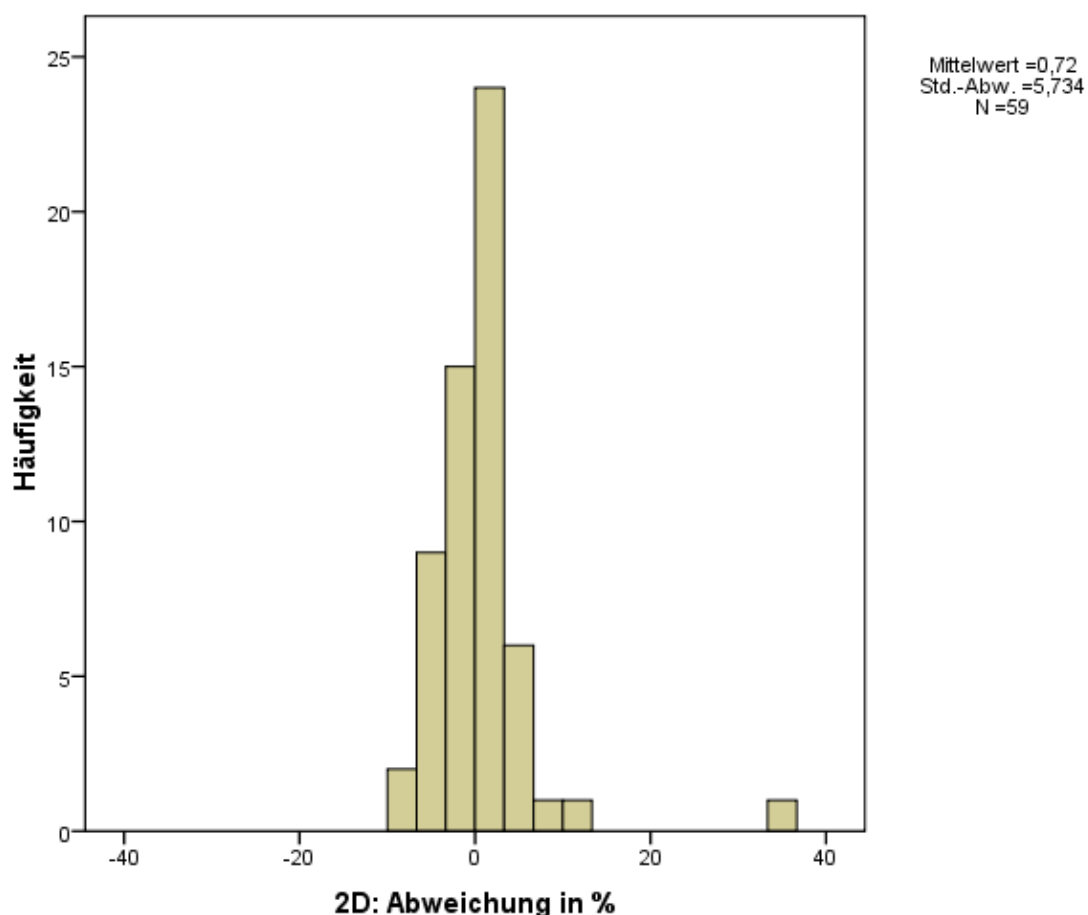


Abb.18: Rechts-Links- Vergleich der direkten 2D Strecken des Puppenmodells

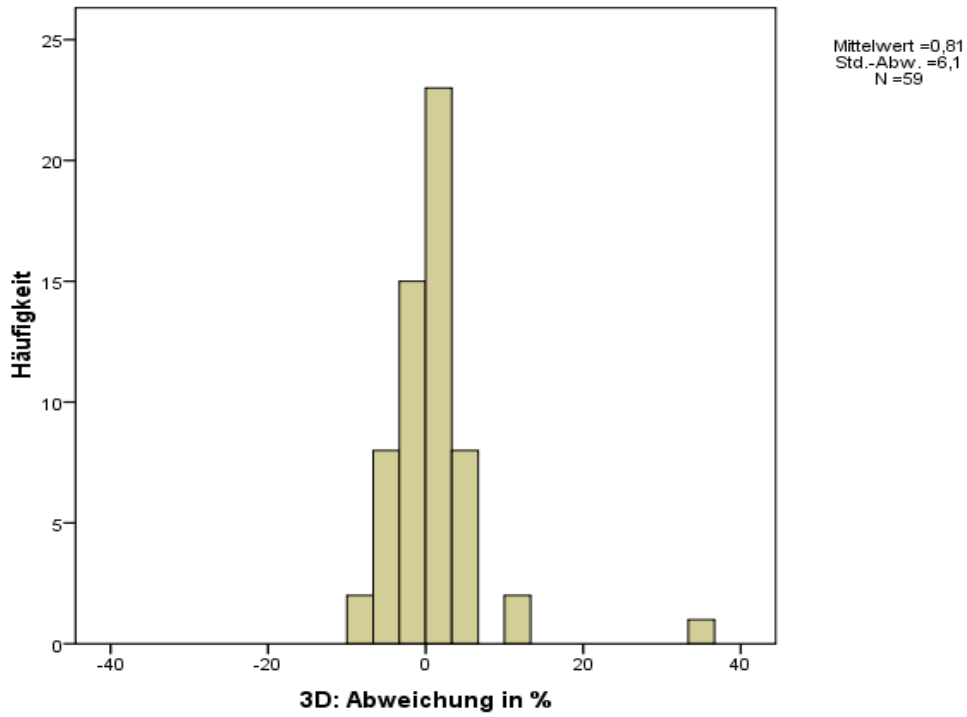


Abb.19: Vergleich der 3D Oberflächenstrecken des Puppenmodells

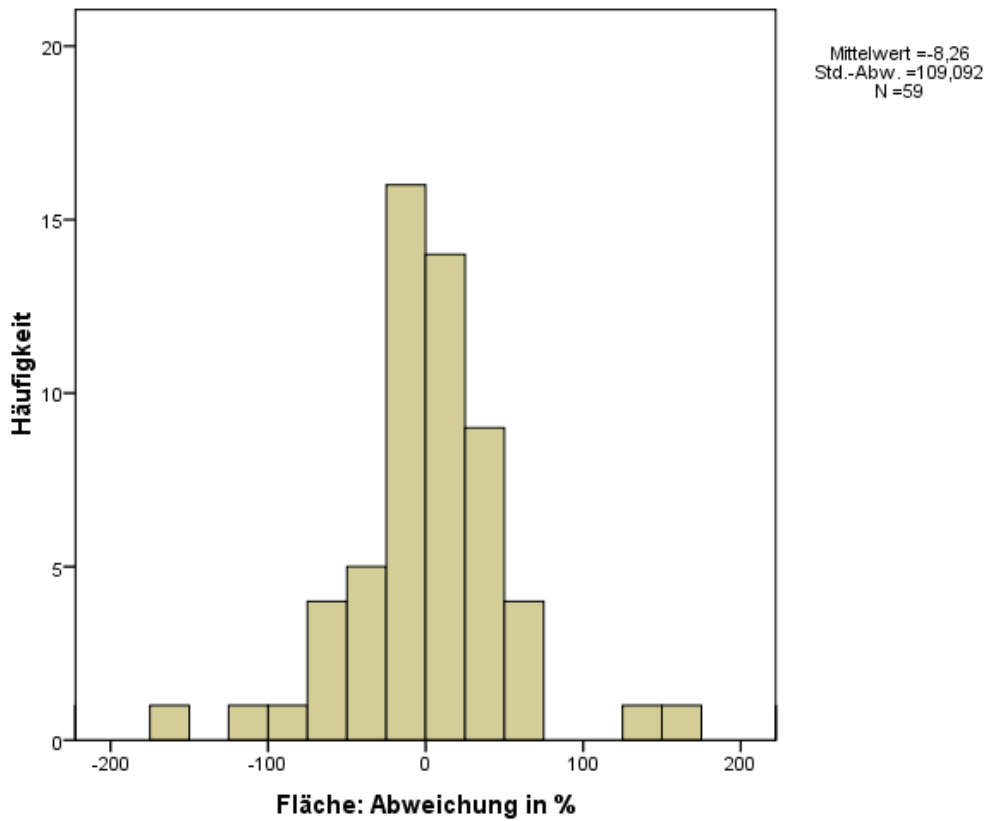


Abb. 20: Rechts-Links-Vergleich der Flächen des Puppenmodells

3.3 Anwendung auf Probanden

Es wurden sechs Histogramme erstellt, die getrennt nach Geschlecht einerseits alle weiblichen und andererseits alle männlichen Probanden/ -innen erfassen.

Um eine übersichtliche Grafik zu erstellen, wurden wenige, weiter außerhalb des Symmetriebereichs liegende Strecken und Flächen nicht in der zeichnerischen Darstellung erfaßt. Beispielsweise wurden im nasalen Bereich größere, prozentuale Abweichungen vermerkt, da bei dem Vergleich sehr kurzer Strecken auch kleinste absolute Änderungen der Rechts-Links-Symmetrie prozentual größer ins Gewicht fallen. Diese Ausreißer wurden der Anschaulichkeit halber nicht mit in die Grafik aufgenommen. Alle Werte sind jedoch in Mittelwert und Standardabweichung erfasst. Bei den Histogrammen für die männlichen Probanden wurde für den direkten Streckenvergleich bei einem Mittelwert von 0,7% eine Standardabweichung von +/- 9,093% bei 354 (6x59) erfassten Strecken ermittelt. Die Standardabweichung der dreidimensionalen Oberflächendistanzen betrug 12,506% bei einem Mittelwert von 0,42% (Abb. 21 und 23).

Für die Flächen ergab sich eine Standardabweichung von +/- 391,5% bei einem Mittelwert von 29,62% (N=354 (6x59)).

Die weiblichen Probanden hatten bei dem 2D Rechts-Links-Vergleich einen Mittelwert von 0,95% mit einer Standardabweichung von +/- 8,54%. Für die dreidimensionalen Streckenverläufe belief sich der Mittelwert auf 3,05% bei einer Standardabweichung von +/- 15,3% (Abb. 22 und 24).

Die Standardabweichung bei den Flächen betrug +/- 1059,45% bei einem Mittelwert von -1,44%. Vermessen wurden 413 (7x59) Strecken.

Betrachtet man die absolute Differenz der Flächen im Rechts-Links-Vergleich, dann erhält man einen Mittelwert für die männlichen Probanden von 2,52 mm² und eine Standardabweichung von +/- 55,212 mm² (Abb.27). Für die weiblichen Probandinnen ergibt sich ein Mittelwert von 4,9 mm² mit einer Standardabweichung von +/- 56,601 mm² (Abb. 28).

In den Histogrammen für die direkten 2-D Streckenmessungen (Abb. 21 und 22) und den direkt auf der Oberfläche gemessenen 3 D- Strecken (Abb. 23 und 24) sowie der Flächen (Abb. 25-28) wurde beidseits eine gute Symmetrie zum Ausdruck gebracht.

Im direkten Vergleich mit der Puppe beschreiben die Histogramme jedoch eine flachere, breiter gestreute Gauß'sche Glockenkurve. Daraus wird die gemessen an der Puppe schlechtere Symmetrie augenscheinlich.

Ebenfalls wurden Histogramme der jeweils 59 zu vermessenden Strecken und Flächen für einen männlichen und eine weibliche Einzelproband/-in erstellt.

Die Standardabweichung vom Mittelwert 0,84% des männlichen Probanden betrug dabei für die 2D Strecke +/- 9,23%, für die 3D Distanz +/- 14,116% bei einem Mittelwert von -0,23% (Abb. 29 und 30).

Der negative Mittelwert von -0,23% bedeutet, dass hier die linken Strecken im Mittel um 0,23% länger als die Strecken der rechten Seite waren.

Der Mittelwert der Fläche belief sich dabei auf 72,99% mit einer Standardabweichung von +/- 320,84%.

Die Mittelwerte der weiblichen Probandin lagen bei 1,91% für die 2D Strecken, 3,97% für die 3D Distanzen und -12,62% für die Flächen.

Die Standardabweichungen waren +/- 8,19% für die direkten Strecken, +/- 13,018% für die 3D Oberflächenverläufe und +/- 546,05% für die Fläche (Abb.33-35).

Für die absoluten Flächen-Differenzen ergaben sich bei der weiblichen Probandin als Mittelwert 2,75 mm² mit einer Standardabweichung von +/- 31, 203 mm² (Abb. 36).

Der männliche Proband lag bei einem Mittelwert von 5,37 mm² und einer Standardabweichung von +/- 75, 358 mm² (Abb. 32).

Bei beiden Einzelgesichtern war das Resultat also ebenfalls eine weniger gute Symmetrie in Gegenüberstellung mit dem Puppenmodell.

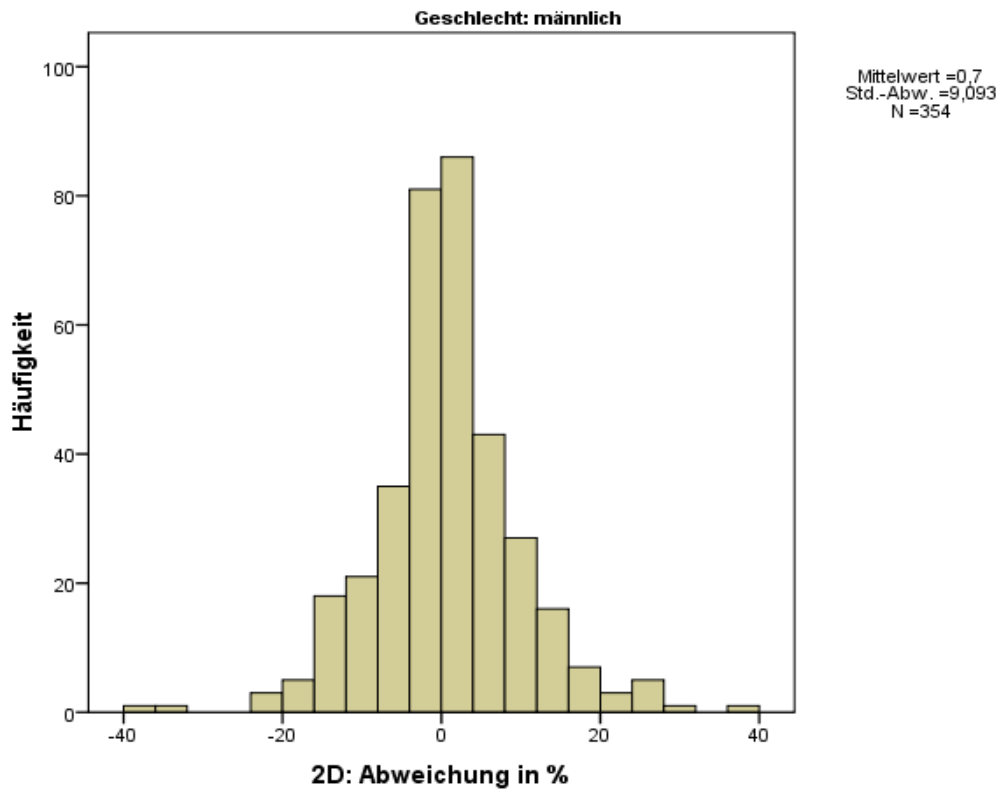


Abb. 21: Vergleich der direkten 2D Strecken aller männlichen Probanden

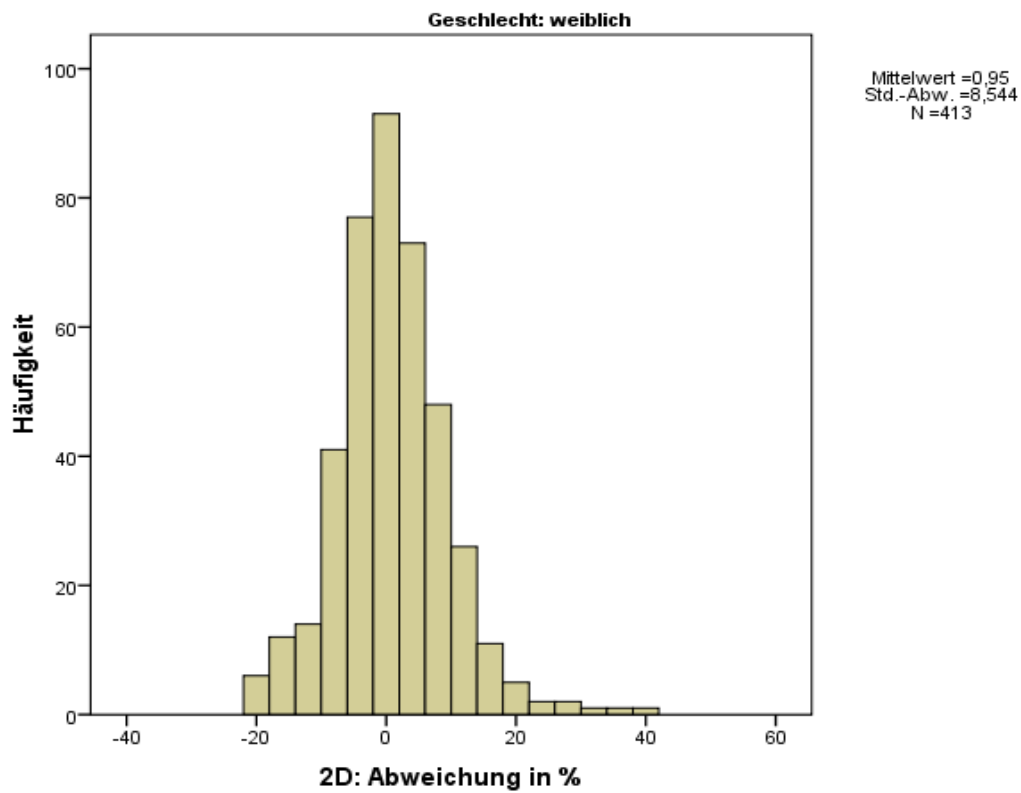


Abb. 22: Vergleich der direkten 2D Strecken aller weiblichen Probandinnen

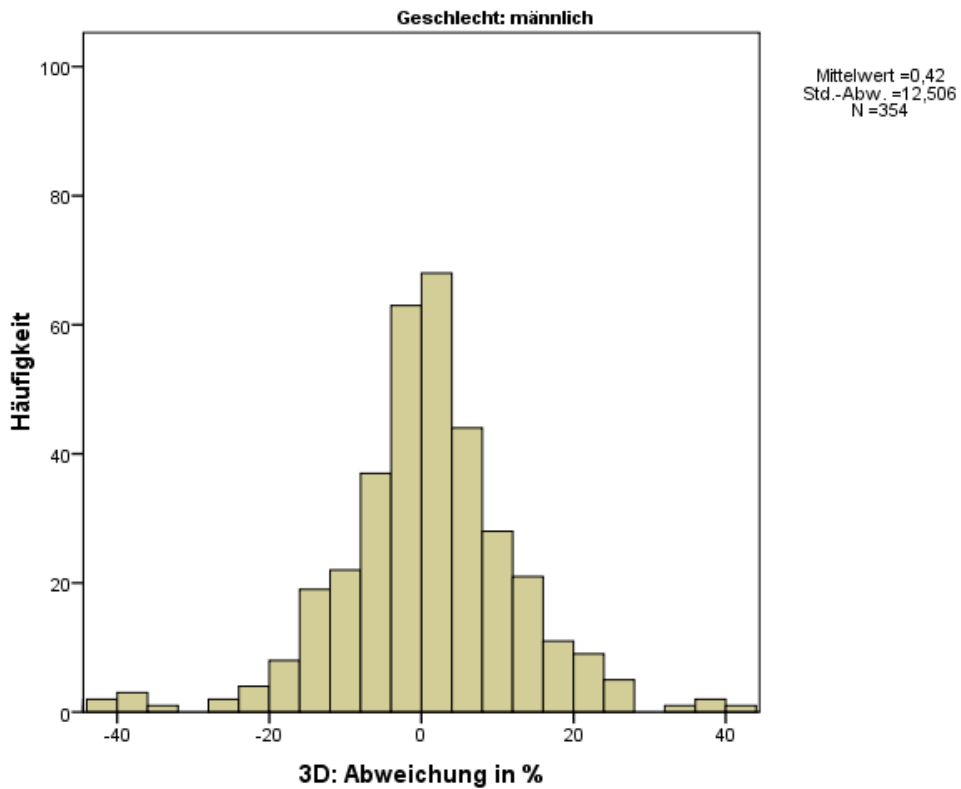


Abb. 23: Rechts-Links-Vergleich der 3D Strecken aller männlichen Probanden

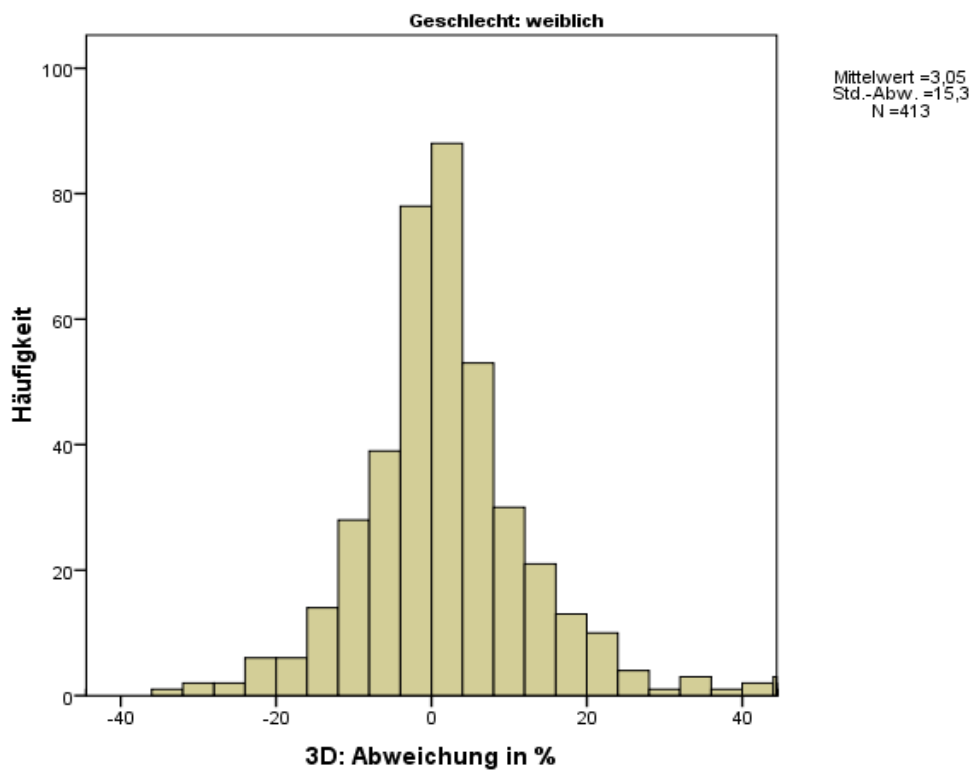


Abb. 24: Rechts-Links-Vergleich der 3D Strecken aller weiblichen Probandinnen

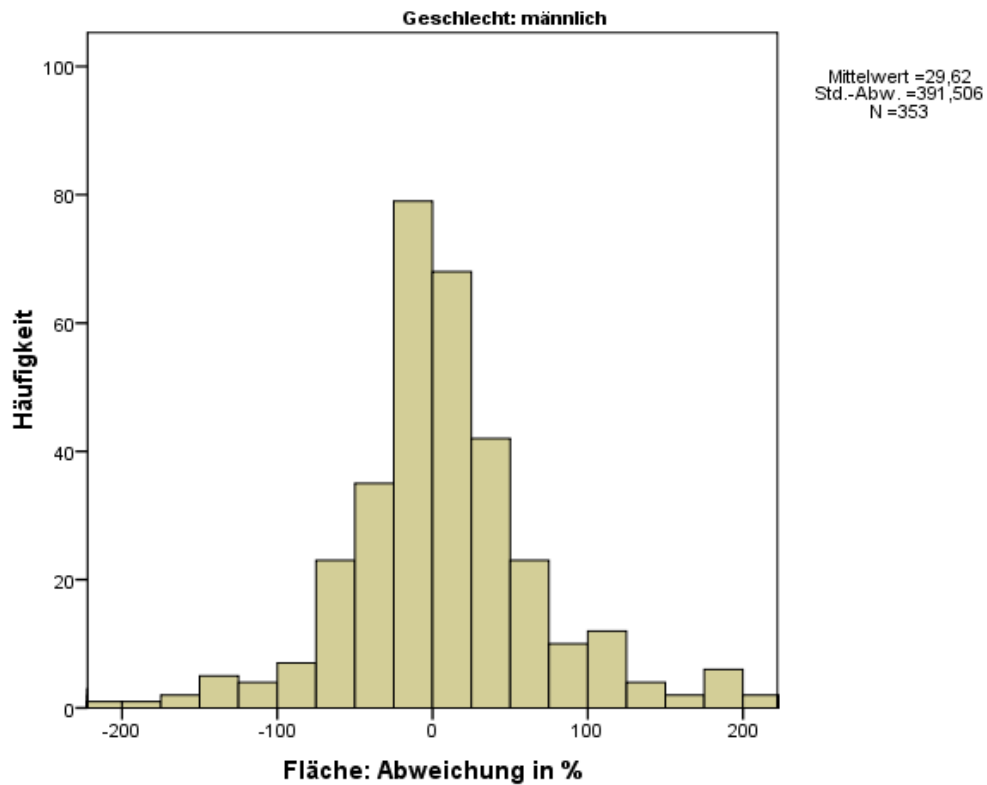


Abb. 25: Rechts-Links-Vergleich der Flächen aller männlichen Probanden

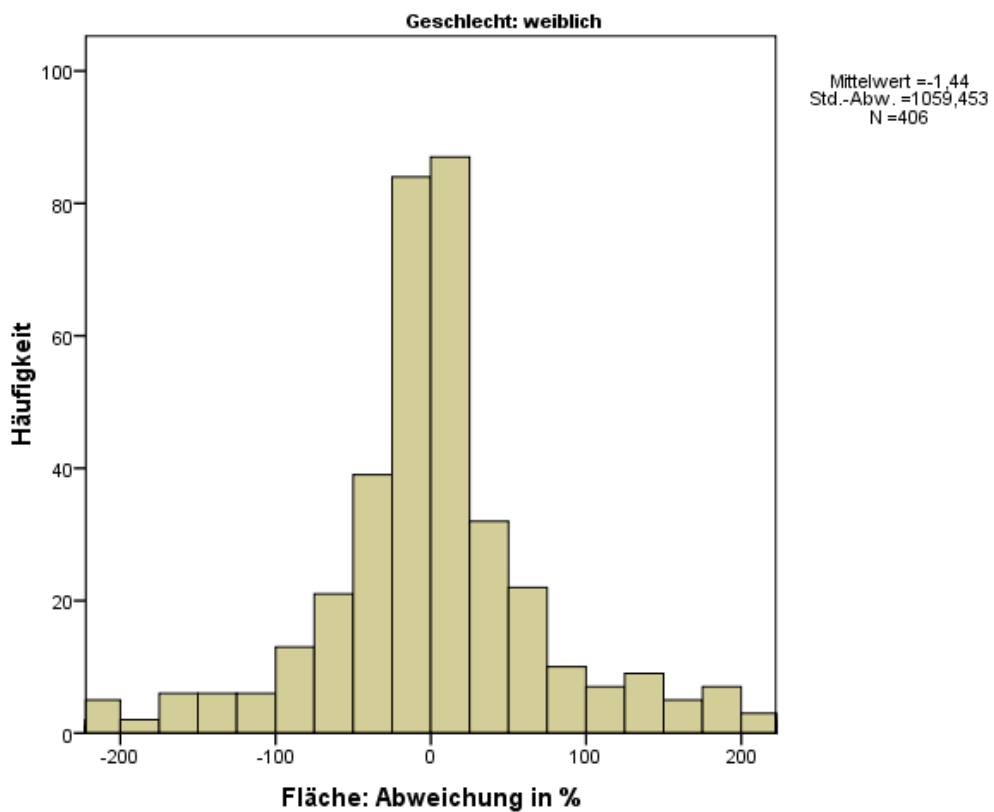


Abb. 26: Rechts-Links-Vergleich der Flächen aller weiblichen Probandinnen

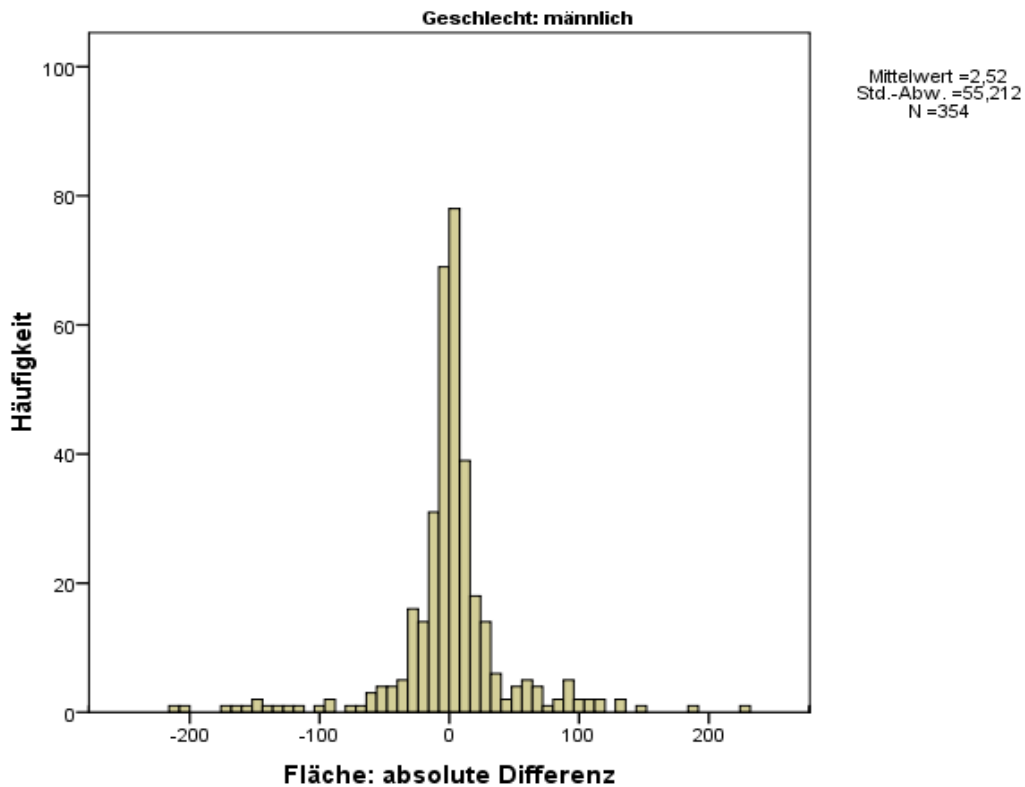


Abb. 27: Absolute Flächen-Differenz im Rechts-Links-Vergleich der Flächen über alle männlichen Probanden, in mm^2

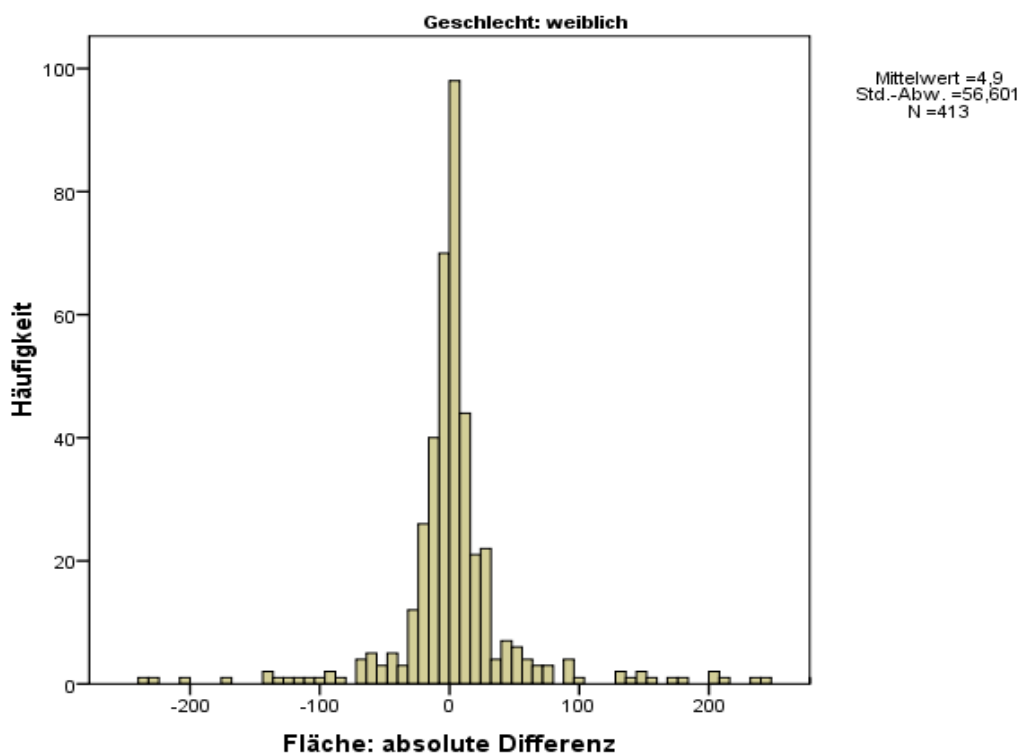


Abb.28: Absolute Flächen-Differenz im Rechts-Links-Vergleich der Flächen über alle weiblichen Probandinnen, in mm^2

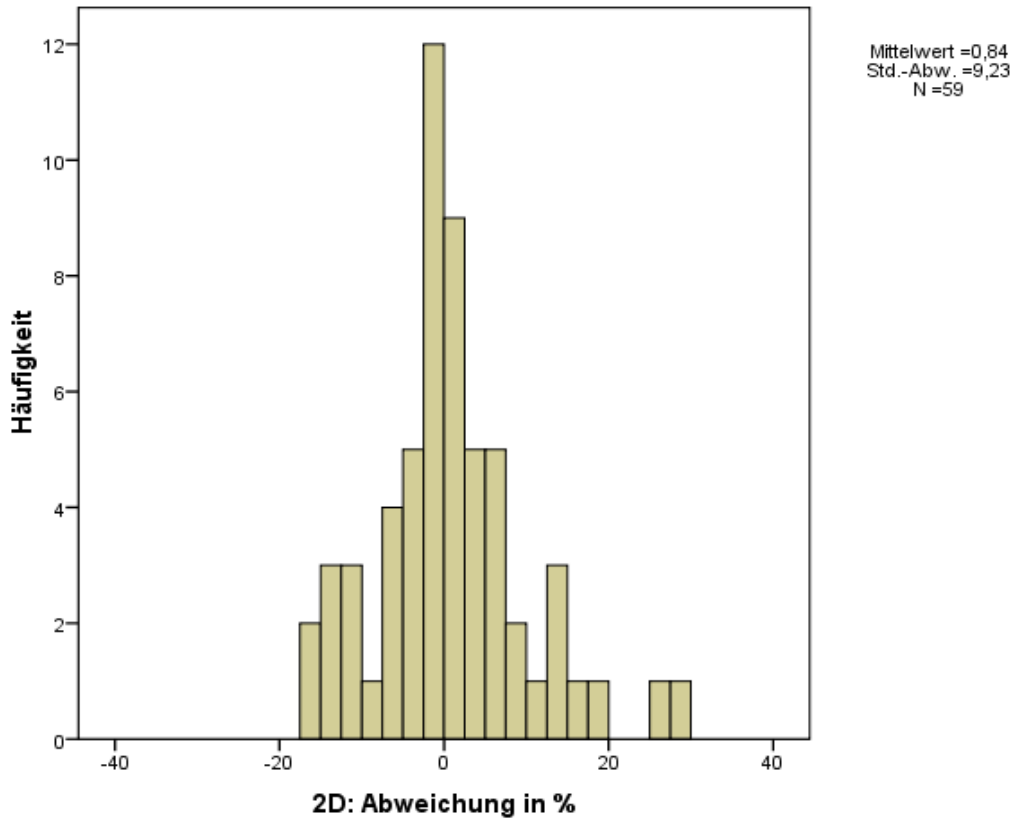


Abb. 29: Rechts-Links-Vergleich der direkten Strecken, männlicher Proband

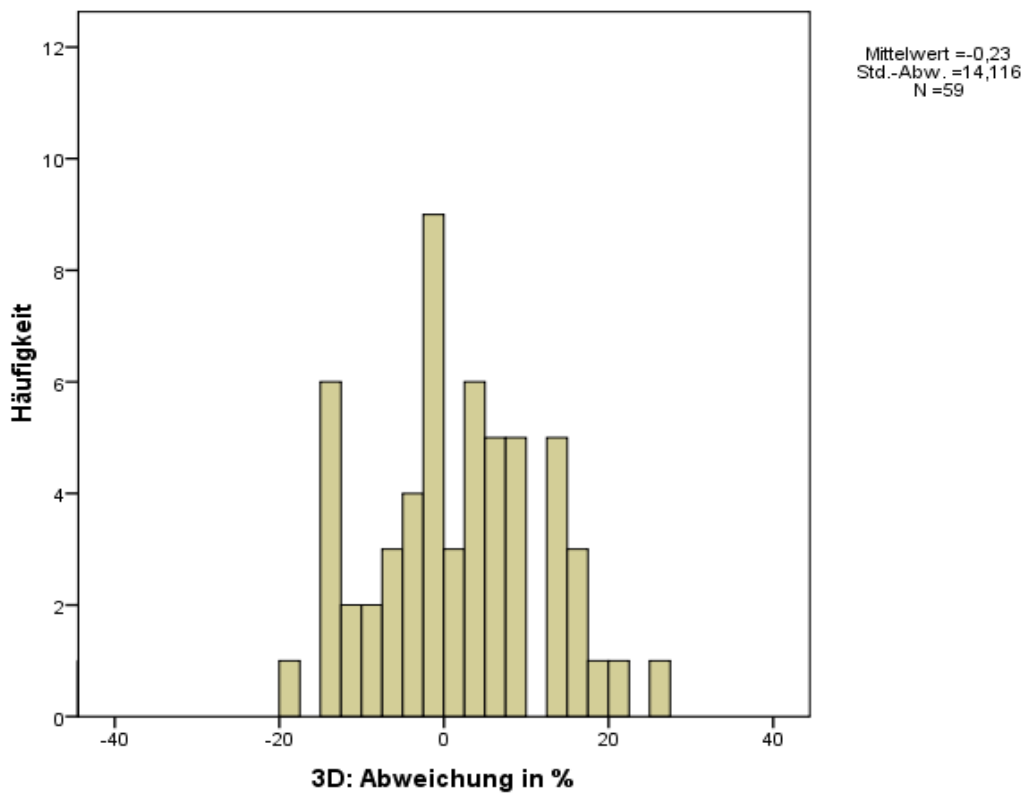


Abb. 30: Rechts-Links-Vergleich Oberflächenstrecken, männlicher Proband

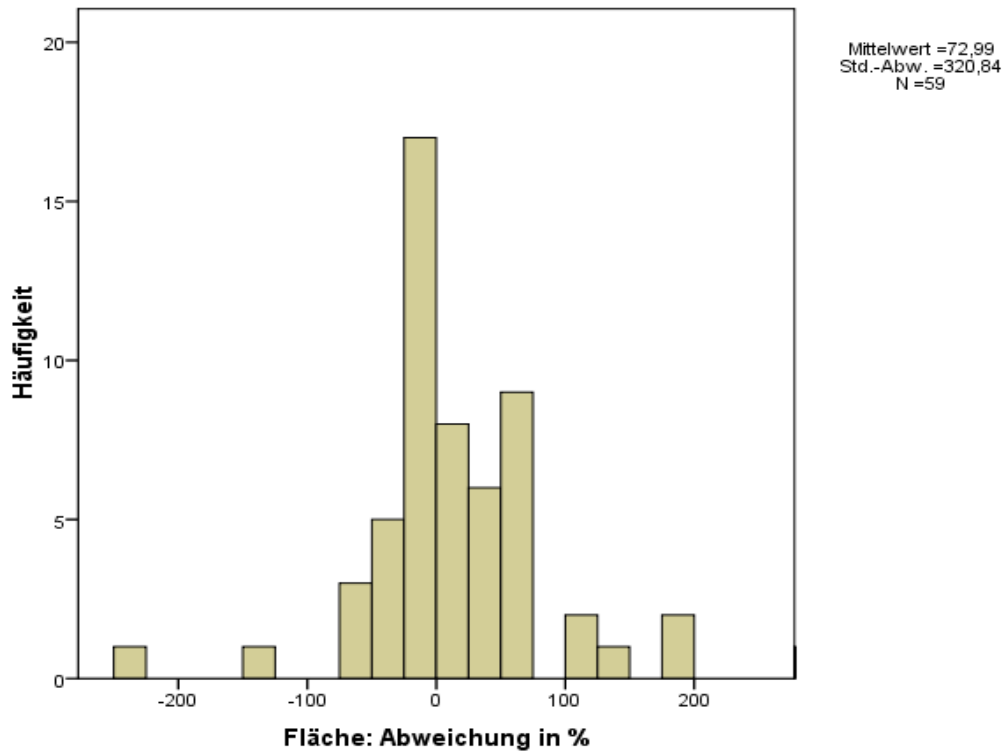


Abb. 31: Rechts-Links-Vergleich der Flächen, männlicher Proband

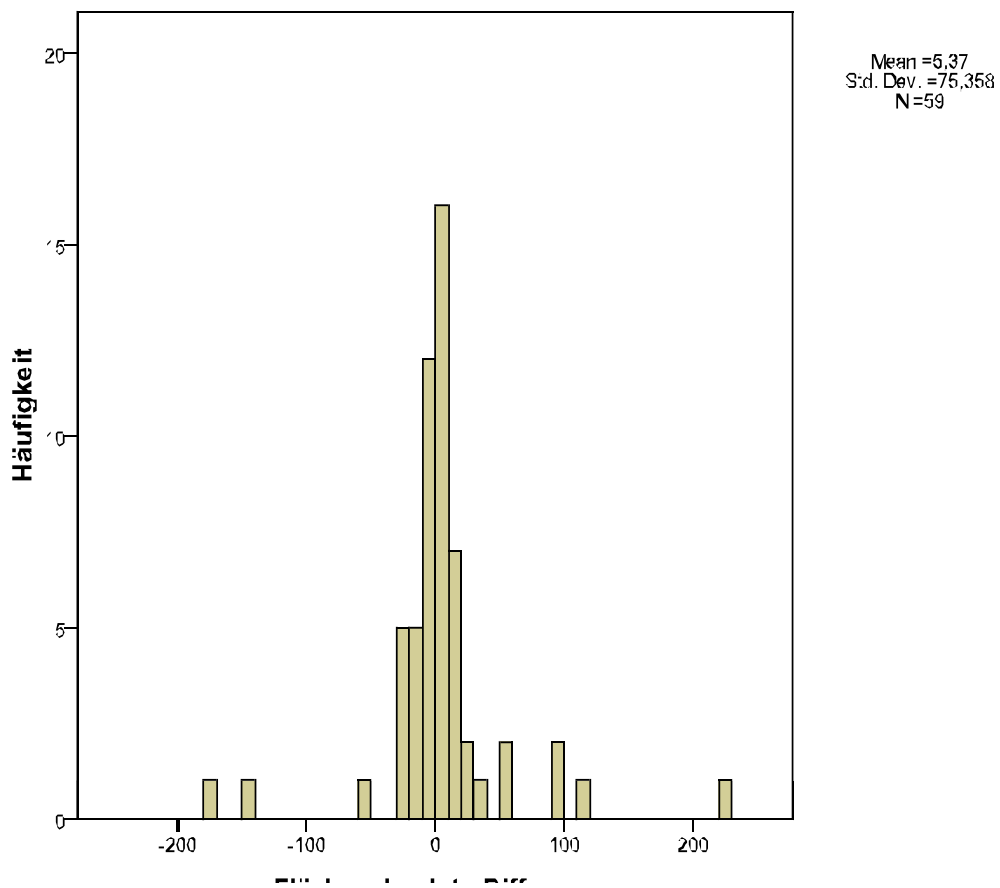


Abb. 32: Absolute Flächen-Differenz im Rechts-Links-Vergleich der Flächen in mm², männlicher Proband

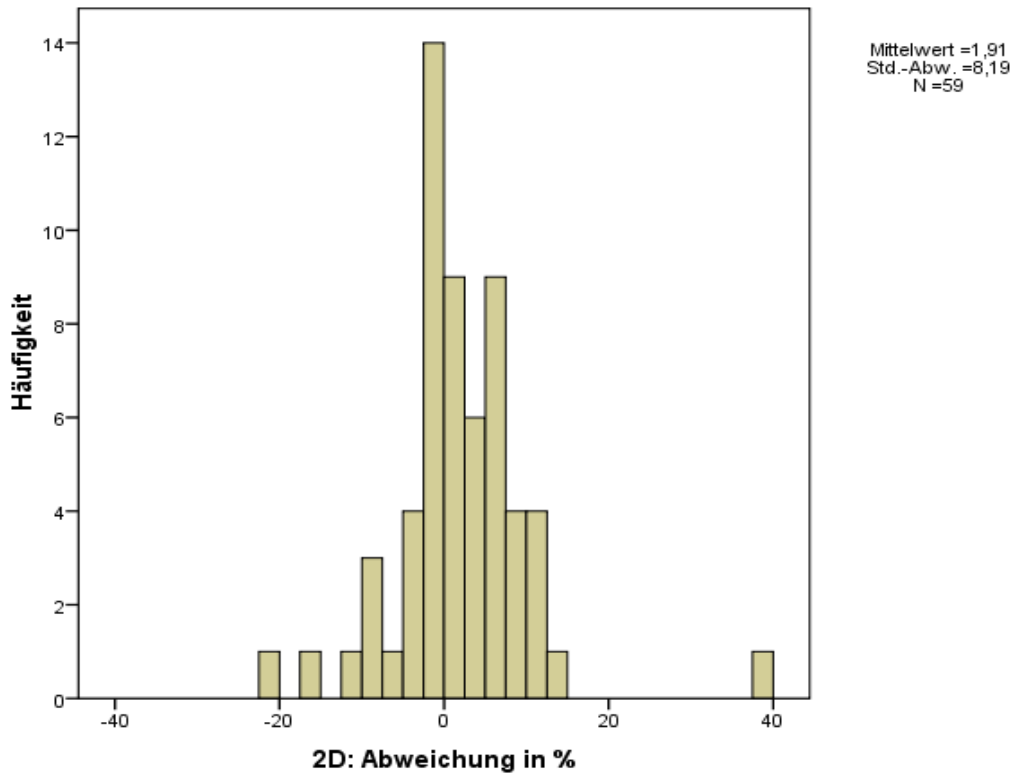


Abb. 33: Rechts-Links-Vergleich der direkten Strecken, weibliche Probandin

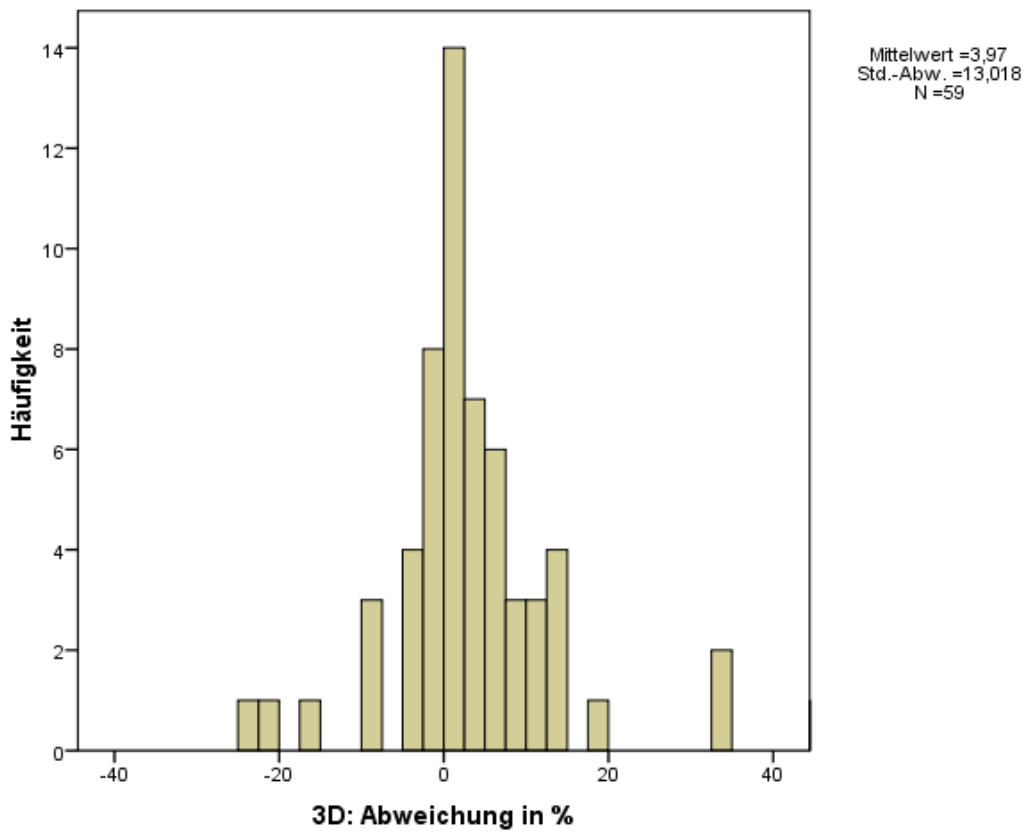


Abb.34: Rechts-Links-Vergleich der 3D Strecken, weibliche Probandin

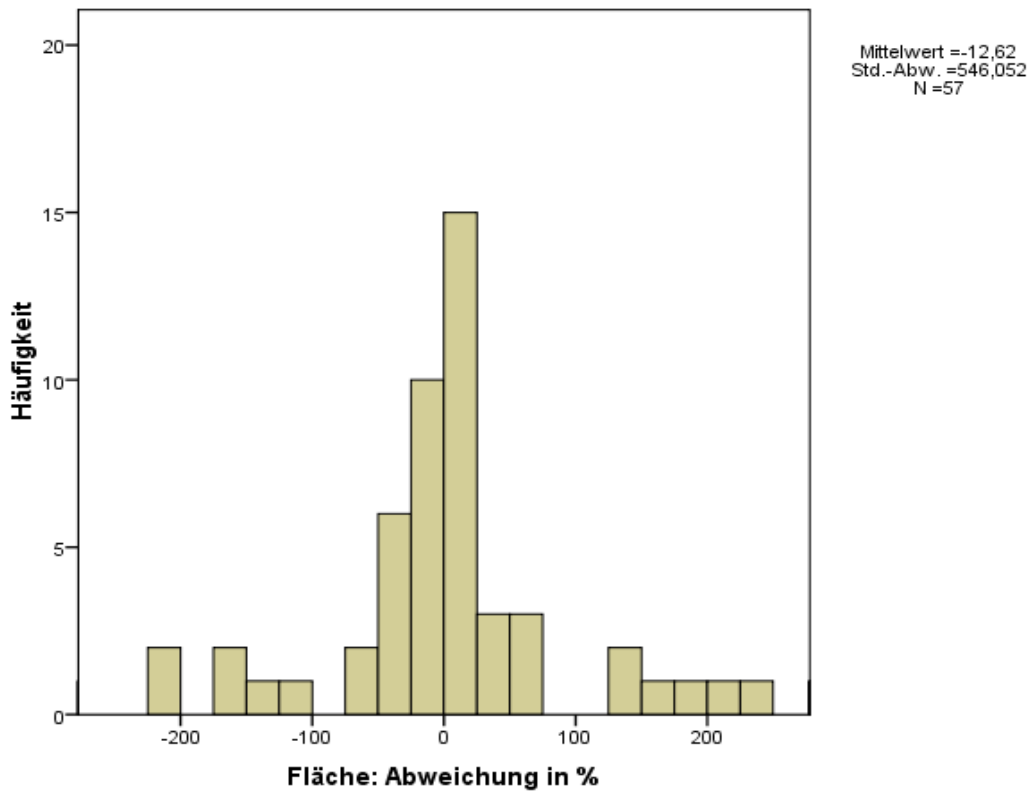


Abb.35: Rechts-Links-Vergleich der Flächen, weibliche Probandin

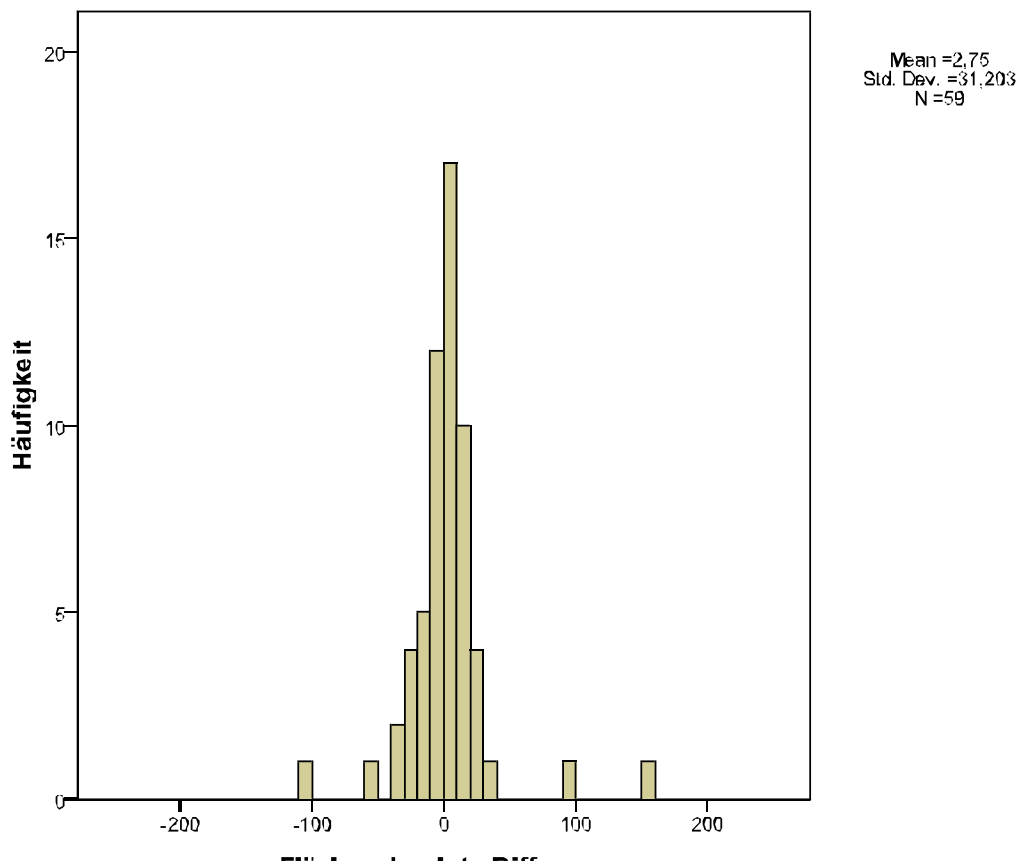


Abb. 36: Absolute Flächen-Differenz im Rechts-Links-Vergleich der Flächen in mm², weibliche Probandin

3.4 Anwendung auf Patienten

Für die klinische Anwendbarkeit des Modells wurden vier Patienten untersucht.

Zwei Patientinnen wurden wegen Gesichtsasymmetrien behandelt, eine davon lokalisiert im linksseitigen Kieferbereich, die andere Patientin besaß eine Asymmetrie auf der rechten Gesichtseite.

Zwei weitere Patientinnen erhielten eine Nasenplastik, davon eine ästhetische Korrektur im Rahmen einer Geschlechtsumwandlung. Bei der anderen handelte es sich um die Herstellung einer Neonase nach einem Verbrennungsunfall.

3.4.1 Gesichtsasymmetrien

3.4.1.1 Weichteilatrophie linksmandibulär, Zustand nach Zahnextraktion

Eine 21jährige Patientin litt an einer durch eine Zahnextraktion verursachten Weichteilatrophie im linken Kieferbereich, die mittels Eigenfettunterspritzung (sog. Lipofilling) aus der Bauchregion korrigiert wurde.

Abbildung 37 zeigt den Eingriffsbereich mit eingezeichneten, direkten Strecken.

Wie aus den Tabellen 4 und 5 zu ersehen ist, sind die prozentualen Verhältnisse der Symmetrie von linker zu rechter Gesichtshälfte durch die Unterspritzung sichtlich verbessert worden.

Beispielsweise ergab sich im Bereich der Strecke 28goli-26pg eine flächige Veränderung von $353,86\text{mm}^2$, so dass der Symmetrieunterschied der linken Seite zur rechten Seite bis auf fehlende $144,64\text{mm}^2$ wiederhergestellt werden konnte.

Die in den Profilbildern zwischen direkter und oberflächlich verlaufender Strecken eingeschlossenen Flächen unterstreichen, dass die rechte Seite unverändert blieb, während die Profile der linken Seite eine signifikante Änderung der Fläche nach erfolgtem Lipofilling erkennen lassen (Abb. 40 und 41).

Auch im Gesamtbild (Abb. 38 und 39) fällt die deutlich korrigierte Optik im linksmandibulären Bereich ins Auge.

Die Histogramme (Abb. 42 und 43) zeigen im Flächenvergleich postoperativ eine deutliche Verbesserung der Symmetrie. Gemessen wurden 21 Flächenpaare im Eingriffsbereich des Mittel- und Untergesichtes.

Vor der Eigenfettunterspritzung lässt sich eine Verschiebung zum negativen Bereich auf der X-Achse erkennen. Durch die linksseitige Asymmetrie und die daraus

resultierenden, kleineren Flächenareale auf dieser Seite liegt ein Übergewicht der rechtsseitigen Flächen vor (Abb. 42).

Nach der Behandlung wurde durch die Unterspritzung die linksmaxilläre Fläche vergrößert, mit der Folge, dass sich die Gauß'sche Kurve sich wieder in Richtung der symmetrischen Mitte hin zurückverlagert (Abb.43).

Tab. 4: Patientin Prae OP Eigenfettunterspritzung Kieferbereich links.

Abweichungen der Symmetrie rechts zu links, in Prozent

Strecke	2D	Abweichung %	3D	Abweichung %	Fläche	Abweichung %
23chre-26pg	31,688	1,03825	32,811	0,39926	14,931	-184,26763
23chli-26pg	32,017		32,942		-12,582	
23chre-28gore	73,977	-14,28147	82,403	-16,10378	764,828	-41,4539
23chli-28goli	63,412		69,133		447,777	
28gore-26pg	88,479	-8,64273	101,374	-10,55497	999,134	-52,10282
28goli-26pg	80,832		90,674		478,557	
28gore-27gn	88,154	-8,391	96,415	-13,55909	919,329	-55,39856
28goli-27gn	80,757		83,342		410,034	

Tab. 5: Patientin nach Lipofilling links maxillär.

Abweichungen der Symmetrie rechts zu links, in Prozent

Strecke	2D	Abweichung %	3D	Abweichung %	Fläche	Abweichung %
23chre-26pg	31,92	1,40977	33,573	-0,03276	14,509	-34,59232
23chli-26pg	32,37		33,562		9,49	
23chre-28gore	72,311	-11,38969	80,26	-7,67879	717,408	-3,12235
23chli-28goli	64,075		74,097		695,008	
28gore-26pg	87,803	-6,12849	96,107	-6,12234	977,064	-14,80425
28goli-26pg	82,422		90,223		832,417	
28gore-27gn	89,278	-6,40919	96,573	-7,67399	880,945	-23,04548
28goli-27gn	83,556		89,162		677,927	

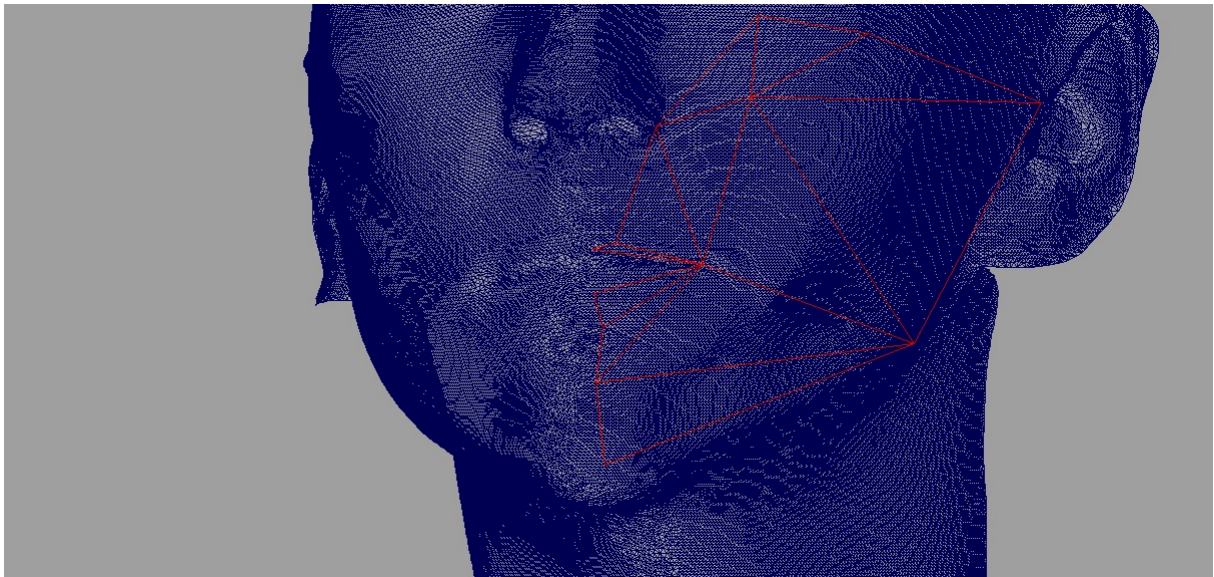


Abb. 37: Patientin vor Lipofilling. Rot eingezeichnet: direkte Streckenverbindungen

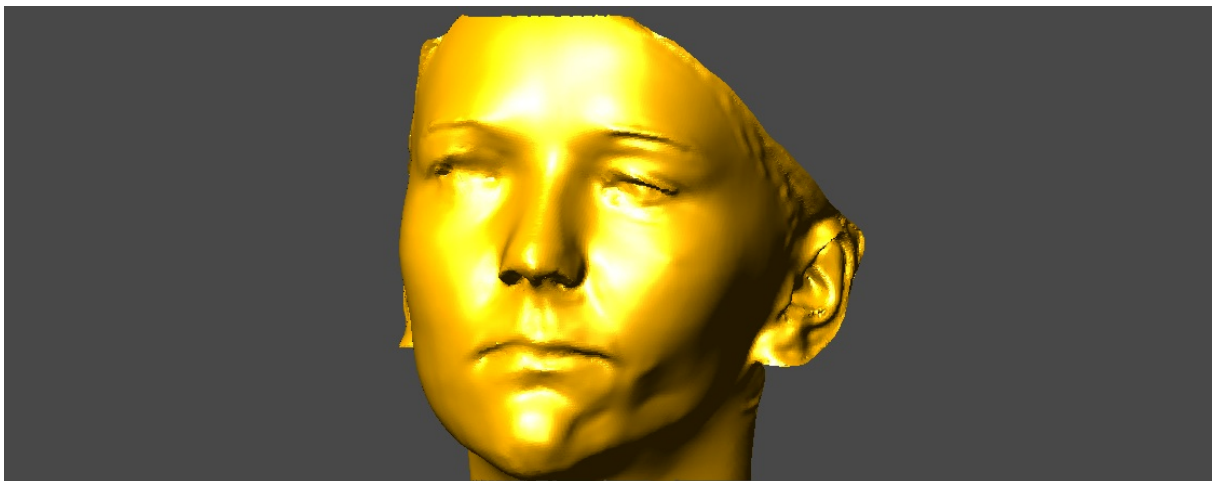


Abb. 38: Patientin vor Lipofilling links maxillär

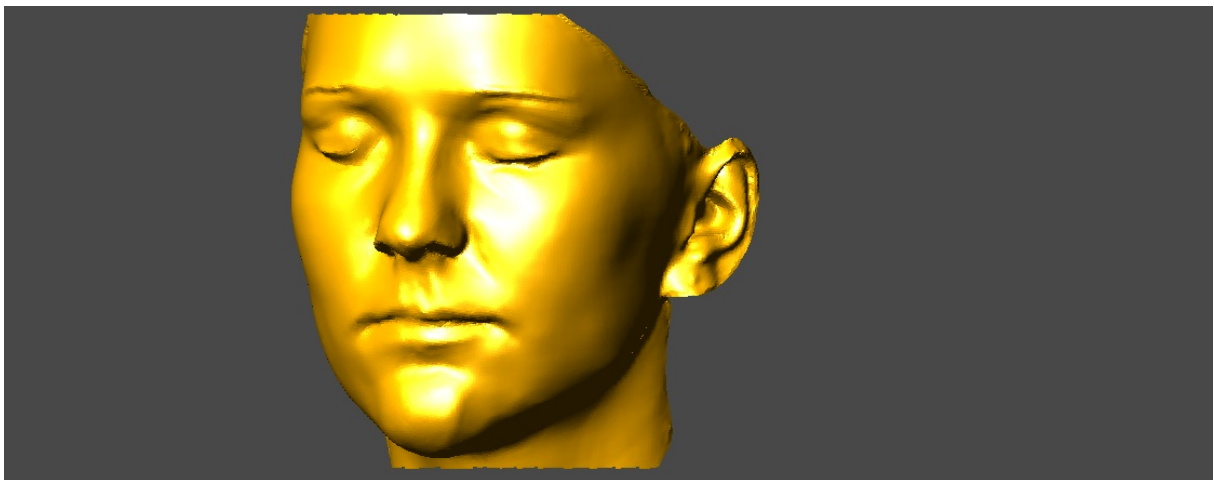


Abb. 39: Patientin nach Lipofilling links maxillär

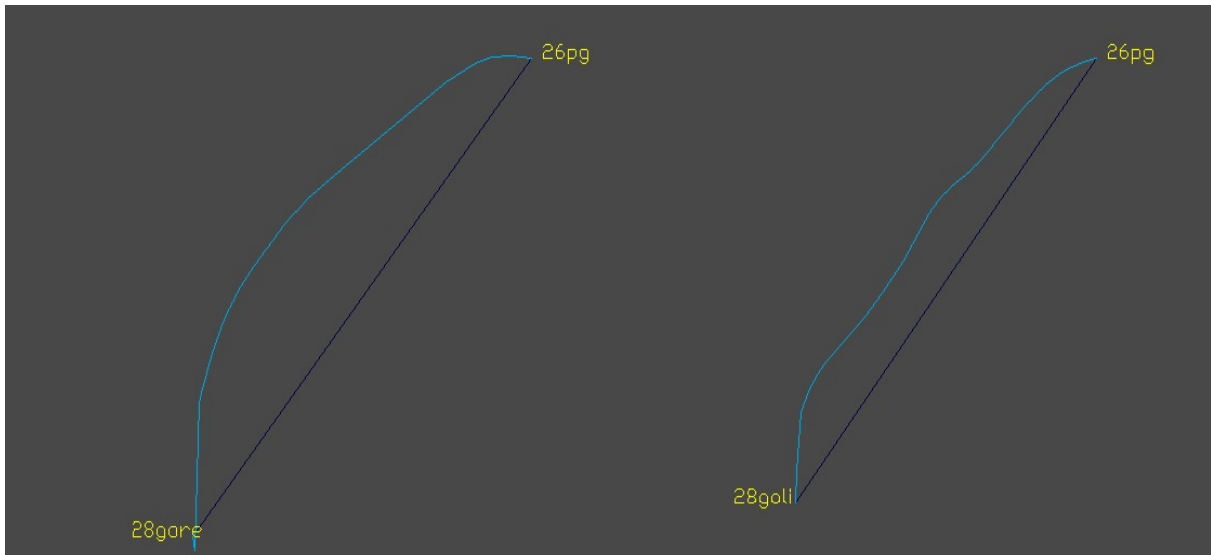


Abb. 40: Profil- Flächen von 28gore-26pg und 28goli-26pg, Prae OP.
Türkis gekennzeichnet sind die Oberflächenverläufe.

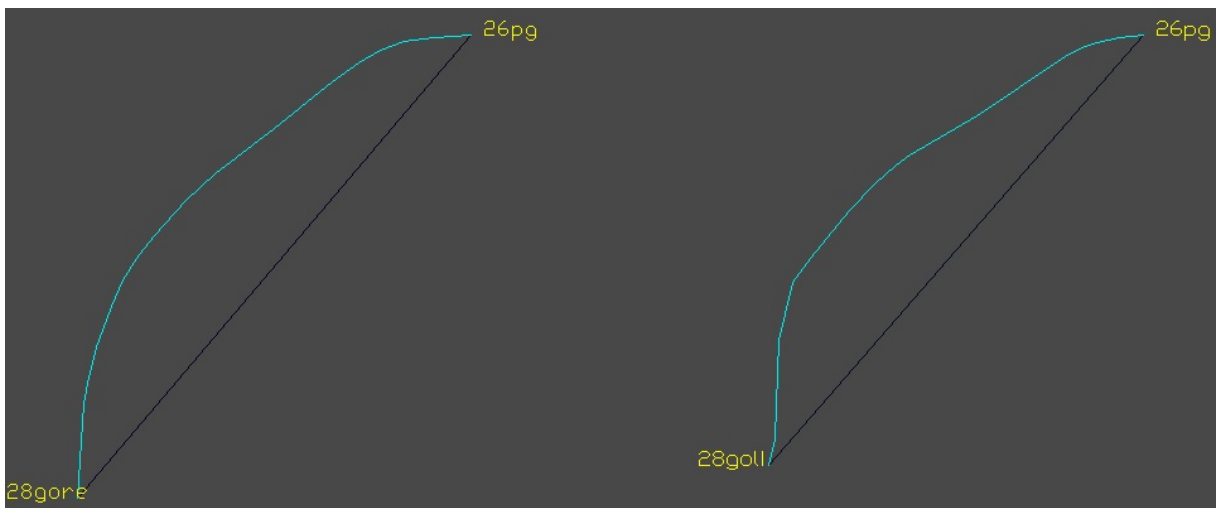


Abb. 41: Profil- Flächen von 28gore-26pg und 28goli-26pg, Post OP.
Türkis gekennzeichnet sind die Oberflächenverläufe.

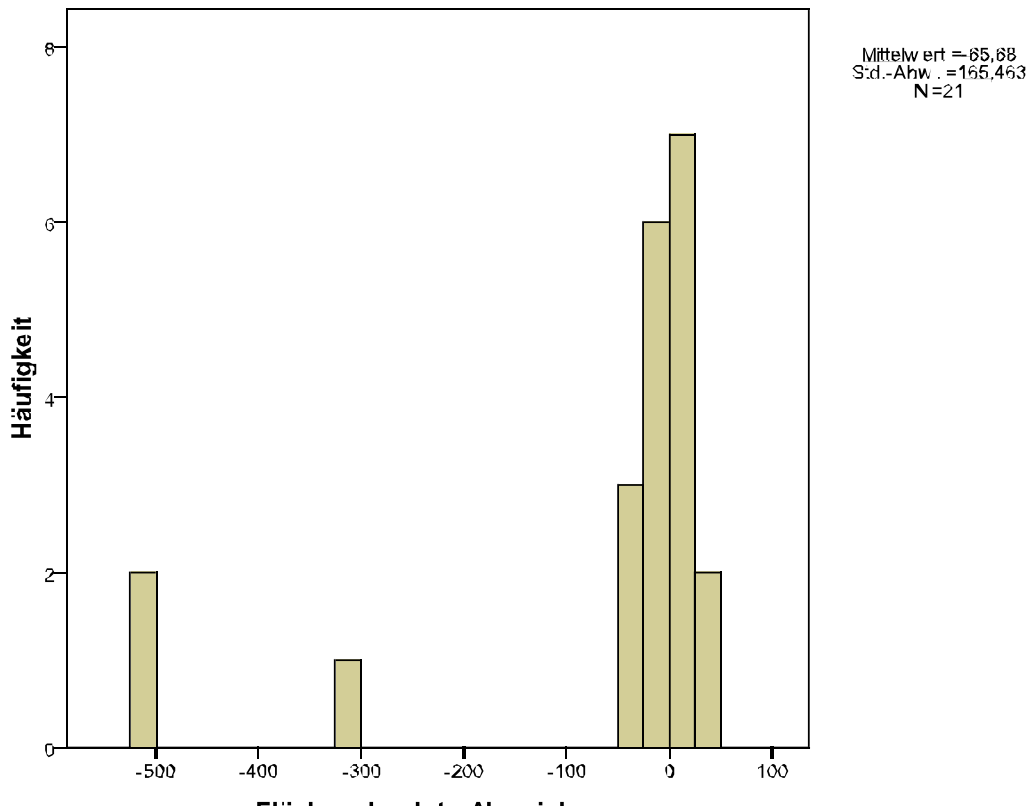


Abb. 42: Rechts- Links-Vergleich der absoluten Flächendifferenz vor Lipofilling, in mm^2

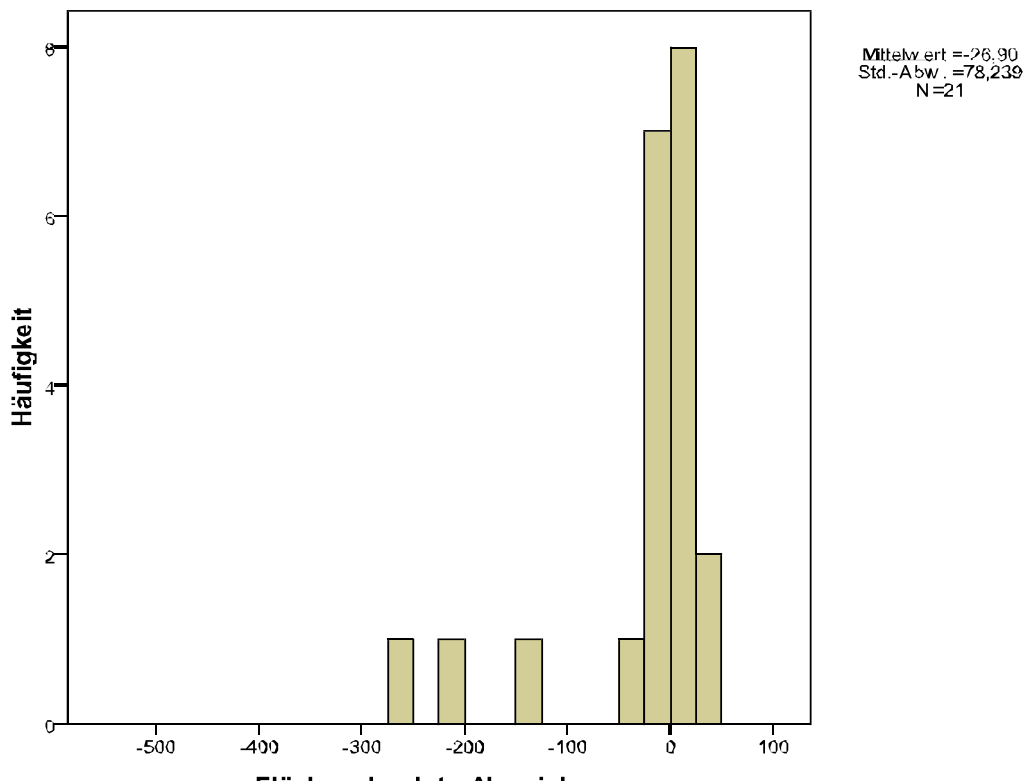


Abb. 43: Rechts-Links-Vergleich der absoluten Flächendifferenz nach Lipofilling, in mm^2

3.4.1.2 Hemi-faziale Weichteilatrophie rechts, Zustand nach Verkehrsunfall

Im zweiten Fall einer rechtsseitigen Gesichtsasymmetrie lässt sich ebenfalls eine prozentuale Verbesserung der Rechts-Links-Symmetrie nach Lipofilling erkennen.

Die 45jährige Patientin berichtete über einen 15 Jahre zurückliegenden Autounfall mit zahlreichen, stufig verheilten Frakturen, unter anderem der rechten Orbita und des rechten Kiefers. Vorstellig wurde sie mit einer rechtsseitig lokalisierten Hemiatrophie des Weichteilgewebes im Bereich der rechten Wange und des Os zygomaticums ohne Beteiligung der mimischen Muskulatur. Der Defekt wurde mit der Injektion von Eigenfett in die erforderlichen Gesichtsregionen behandelt.

In den Tabellen 6 und 7 zeigen sowohl die direkten Strecken als auch die dreidimensionalen Oberflächenverläufe ein deutlich verbessertes Symmetrie-Verhältnis beider Seiten zueinander. Die Änderung der absoluten, postoperativen Streckenlängen kommt durch Gewichtszunahme der Patientin zustande.

Ebenso bringen die Flächenwerte eine sichtbar positive Modifikation hinsichtlich der Symmetrie zum Ausdruck (Tab. 6 und 7).

Weiterhin kann man aus den Grafiken der dreidimensionalen Oberflächenverläufe (Abb.46 und 47) ersehen, dass die Werte vor dem Lipofilling in Richtung der positiven Seite der X-Achse ausbrechen. Dieser Effekt rührt von der rechtsseitigen Asymmetrie und dem daraus folgenden Ungleichgewicht der Strecken her, da die rechte Seite als Grundwert des prozentualen Vergleichs dient. Die Distanzen auf der rechten Seite sind durch die Asymmetrie geringer, so dass bei einem Rechts-Links-Vergleich die Balken des Histogramms mehr in den positiven Bereich hineintendieren. Betrachtet wurden 25 3D Strecken im Bereich der Fettunterspritzung (Tab.6 und 7).

Auch bei den Flächen (Abb. 48 und 49) lässt sich vor dem Lipofilling eine Tendenz in Richtung des positiven Bereichs der X-Achse verzeichnen, die nach der Weichteilkorrektur wieder eine symmetrischere, mittlere Verteilung annimmt.

Tab. 6: Patientin prae Lipofilling, Asymmetrie in der rechten Gesichtshälfte
Abweichungen rechts zu links in Prozent

I

Strecke	2D	Abw. %	3D	Abw. %	Fläche	Abw. %
23chre-28gore	61,493	24,02387	67,562	22,92561	484,686	48,61952
23chli-28goli	76,266		83,051		720,338	
28gore-26pg	89,11	11,07059	94,943	11,13721	797,126	20,01641
28goli-26pg	98,975		105,517		956,682	
28gore-27gn	82,458	22,20039	86,929	30,61119	623,283	121,78096
28goli-27gn	100,764		113,539		1382,323	
19chkre-10zyre	20,58	44,02818	20,792	46,43132	16,619	251,38697
19chkli-10zyli	29,641		30,446		58,397	
19chkre-20tre	80,836	12,77525	84,995	16,20684	563,156	67,73984
19chkli-20tli	91,163		98,77		944,637	
19chkre-23chre	34,403	0,5639	34,803	2,41359	40,996	58,8472
19chkli-23chli	34,597		35,643		65,121	

Tab. 7: Patientin post Lipofilling, Asymmetrie in der rechten Gesichtshälfte.
Abweichungen rechts zu links in Prozent

Strecke	2D	Abw. %	3D	Abw. %	Fläche	Abw. %
23chre-28gore	63,149	16,34705	72,847	11,62574	653,103	9,49621
23chli-28goli	73,472		81,316		715,123	
28gore-26pg	90,859	10,04193	98,308	7,60874	960,893	-3,66982
28goli-26pg	99,983		105,788		925,63	
28gore-27gn	85,782	19,69178	91,664	22,67521	771,758	63,2837
28goli-27gn	102,674		112,449		1260,155	
19chkre-10zyre	25,915	13,98418	26,454	14,01678	37,685	29,71209
19chkli-10zyli	29,539		30,162		48,882	
19chkre-20tre	89,707	1,21172	94,988	3,56677	735,361	31,90107
19chkli-20tli	90,794		98,376		969,949	
19chkre-23chre	36,216	-2,9545	36,933	-0,53611	72,118	19,14501
19chkli-23chli	35,146		36,735		85,925	



Abb. 44: Scan- Aufnahme Prae OP

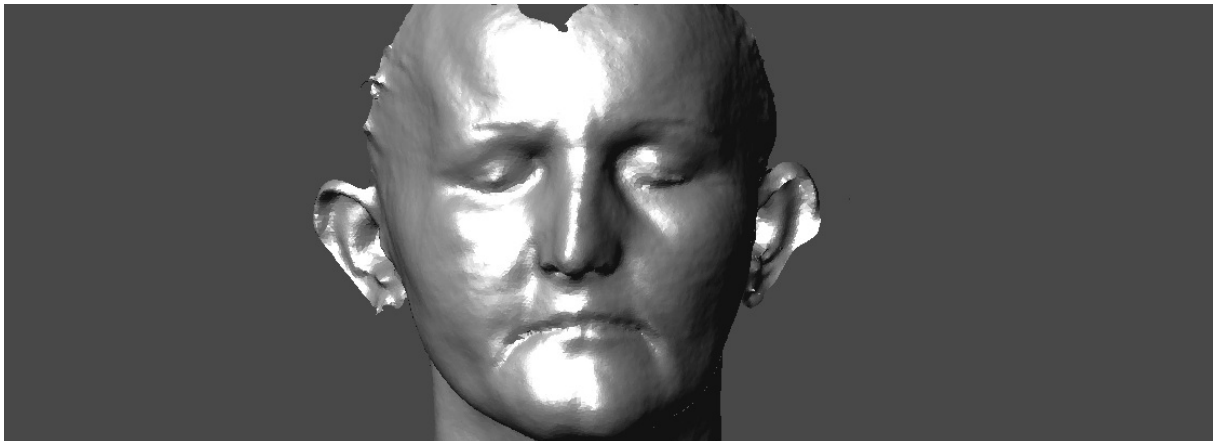


Abb. 45: Scan- Aufnahme Post OP

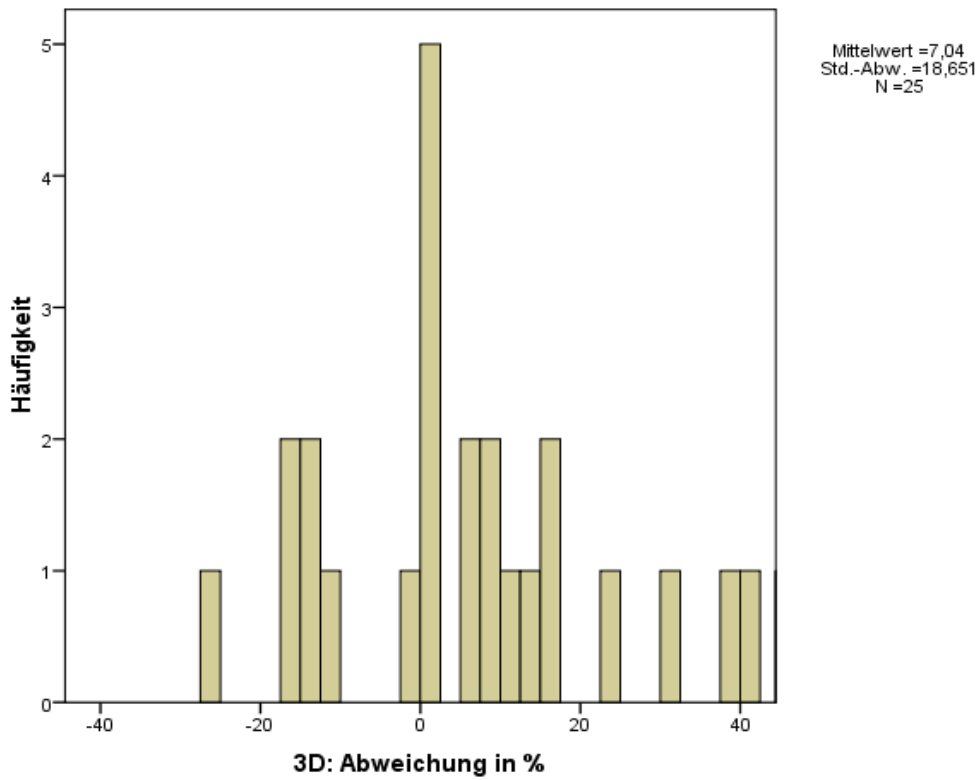


Abb. 46: Rechts-Links-Vergleich oberflächliche Strecken vor OP in %

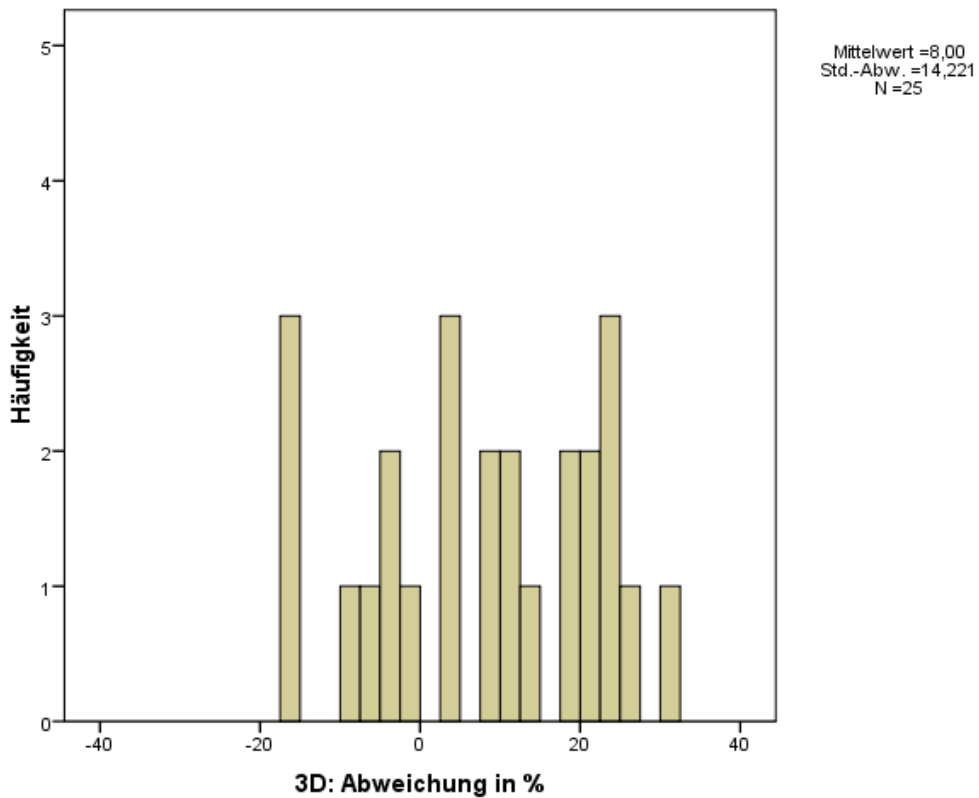


Abb. 47: Rechts-Links-Vergleich oberflächliche Strecken nach OP in %

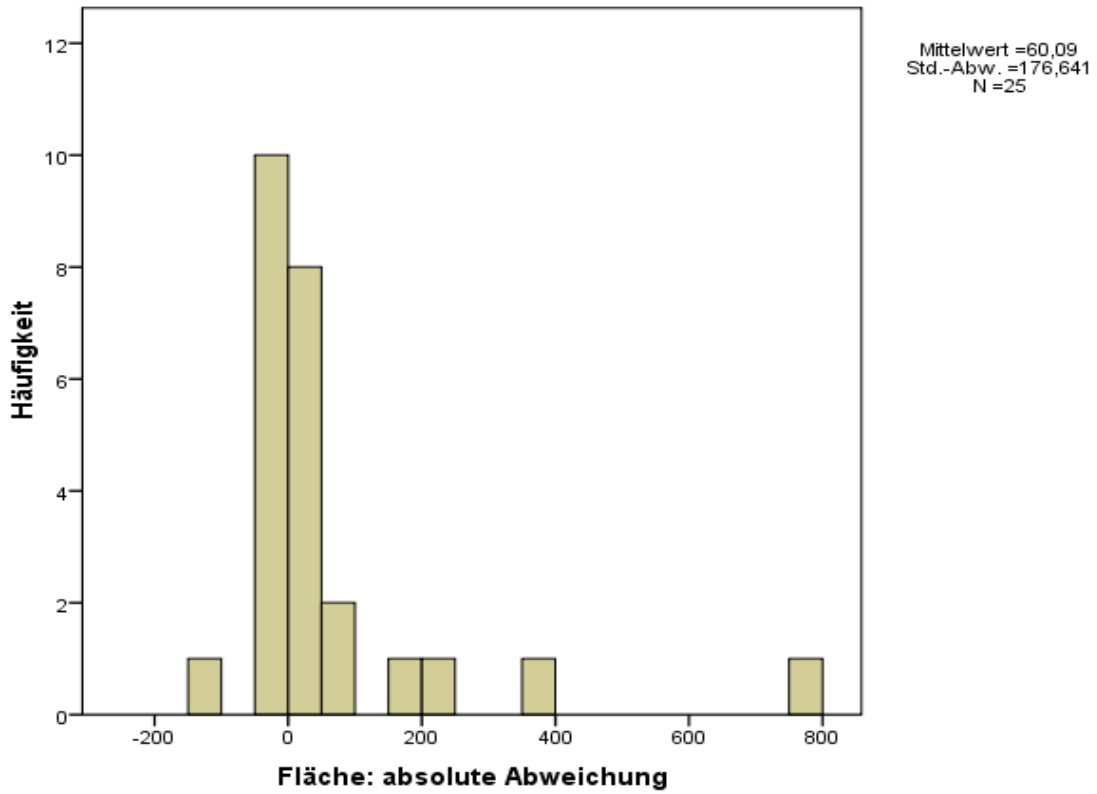


Abb. 48: Rechts-Links-Vergleich der absoluten Flächendifferenz vor OP , in mm²

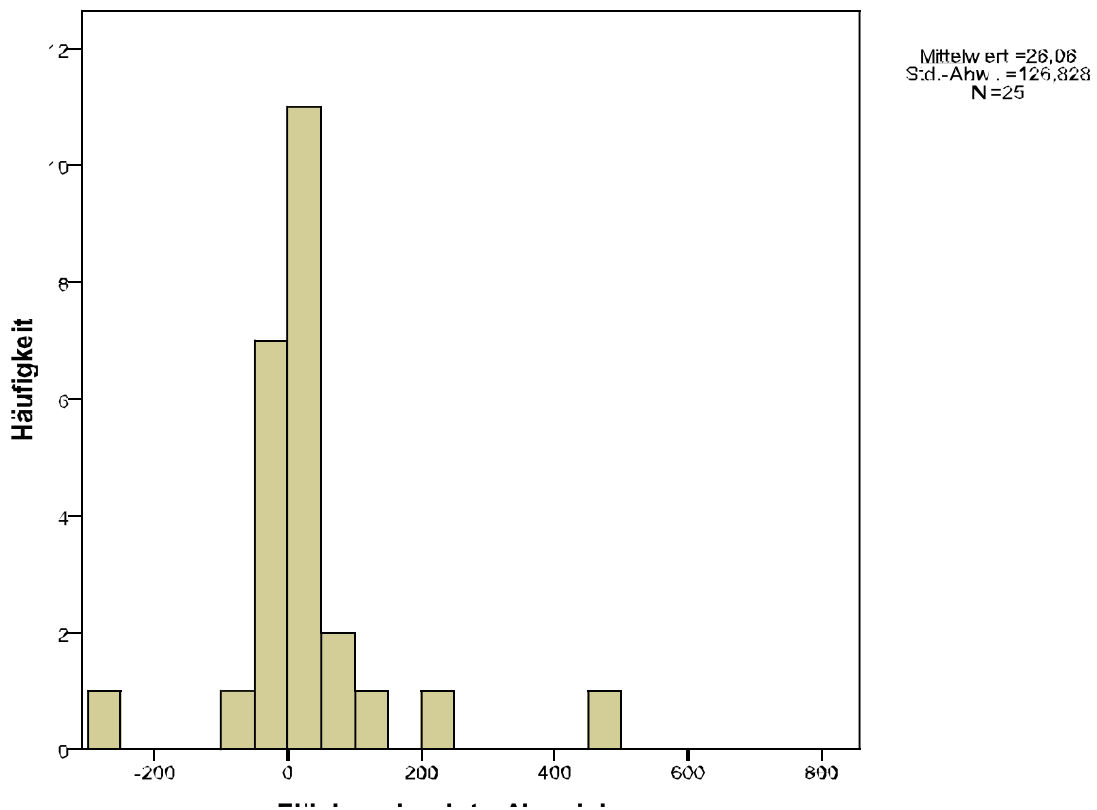


Abb. 49: Rechts-Links-Vergleich der absoluten Flächendifferenz nach OP , in mm²

3.4.2 Nasale Region

Das Modell wurde auch zur Überprüfung an der Nasenregion angewendet.

Es wurde eine Patientin mit einer ästhetischen Nasenkorrektur vor und nach der Operation vermessen. Die zweite Patientin erhielt eine Neonase nach totaler Gewebsdestruktion.

3.4.2.1 Ästhetische Septorhinoplastik

Die Septorhinoplastik wurde im Zusammenhang mit einer Geschlechtsumwandlung durchgeführt, um eine feminine Optik der Nase zu erreichen.

Dabei wurde beispielhaft die Strecke 5n -13prn verglichen, die oberhalb des Nasenrückens verläuft.

Der vorher leicht konvex gebogenen Nase (Abb. 50 und 51) wurde durch die Rhinoplastik eine konkave Form verliehen (Abb. 52).

In der Fläche brachte die Operation einen Unterschied von $-4,893 \text{ mm}^2$ zu $-46,511 \text{ mm}^2$ (Tab. 8 und 9).

Anhand der Profilbilder kann man sehen, dass die Oberflächenlinie der Strecke 5n -13prn nun weiter unterhalb der direkten Strecke verläuft als vor der Nasenoperation.

Die gemessene Fläche wird somit größer und weiter negativ, da die dreidimensionale Oberflächenlinie unterhalb der direkten Strecke liegt (Abb. 53 und 54).

Die absoluten Abweichungen der direkten und der oberflächlichen Strecken erwiesen sich nach der Operation als sehr symmetrisch (Tab. 9).

Tab. 8: Patientin prae Rhinoplastik

Strecke	2D	abs. Abw.	3D	abs. Abw.	Fläche	abs. Abw.
5n-13prn	46,812		47,582		-4,893	
18alre-13prn	26,527	-1,61	28,597	-1,635	69,481	-16,294
18alli-13prn	24,917		26,962		53,187	
6enre-18alre	39,453	2,315	40,521	2,627	-17,919	-35,888
6enli-18alli	41,768		43,148		-53,807	
17acre-18alre	8,738	2,708	13,097	-0,207	23,616	-8,76
17acli-18alli	11,446		12,89		14,856	
18alre-14cre	19,928	-4,414	20,86	-6,067	0,932	-0,876
18alli-14cli	15,514		14,793		0,056	
13prn-14cre	9,811	0,894	10,389	1,382	9,405	5,744
13prn-14cli	10,705		11,771		15,149	
14cre-16sbalre	19,075	-0,963	19,872	-1,131	-28,108	5,43
14cli-16sballi	18,112		18,741		-22,678	
15sn-14cre	16,659	-0,849	35,094	-5,802	-22,73	7,409
15sn-14cli	15,81		29,292		-15,321	

Tab. 9: Patientin post Rhinoplastik

Strecke	2D	abs. Abw.	3D	abs. Abw.	Fläche	abs. Abw.
5n-13prn	41,345		42		-46,511	
18alre-13prn	23,736	-0,469	25,212	-0,347	50,431	-0,809
18alli-13prn	23,267		24,865		49,622	
6enre-18alre	40,057	0,352	40,572	0,278	18,869	-20,119
6enli-18alli	40,409		40,85		-1,25	
17acre-18alre	8,77	2,986	12,097	2,102	20,991	1,042
17acli-18alli	11,756		14,199		22,033	
18alre-14cre	16,349	-0,811	16,839	-1,243	3,941	0,269
18alli-14cli	15,538		15,596		4,21	
13prn-14cre	10,823	-0,251	11,253	-0,211	9,428	-0,004
13prn-14cli	10,572		11,042		9,424	
14cre-16sbalre	16,895	0,633	17,578	0,327	-18,613	5,639
14cli-16sballi	17,528		17,905		-12,974	
15sn-14cre	14,895	-0,068	23,794	-0,821	-31,575	9,89
15sn-14cli	14,827		22,973		-21,685	

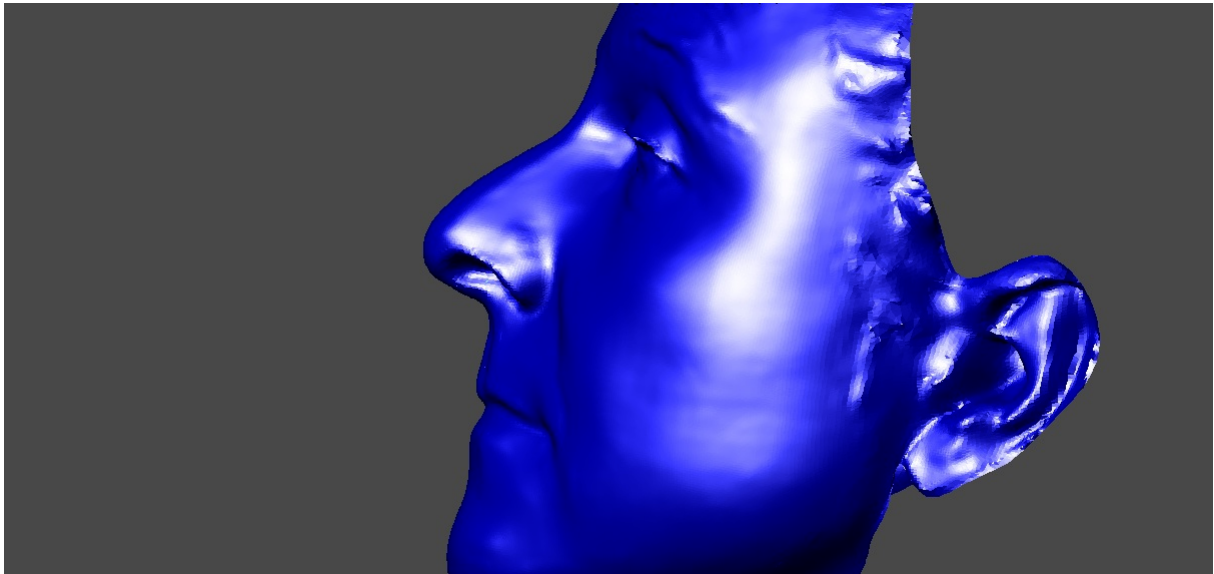


Abb. 50: Patientin, Ursprungszustand vor ästhetischer Nasenkorrektur.

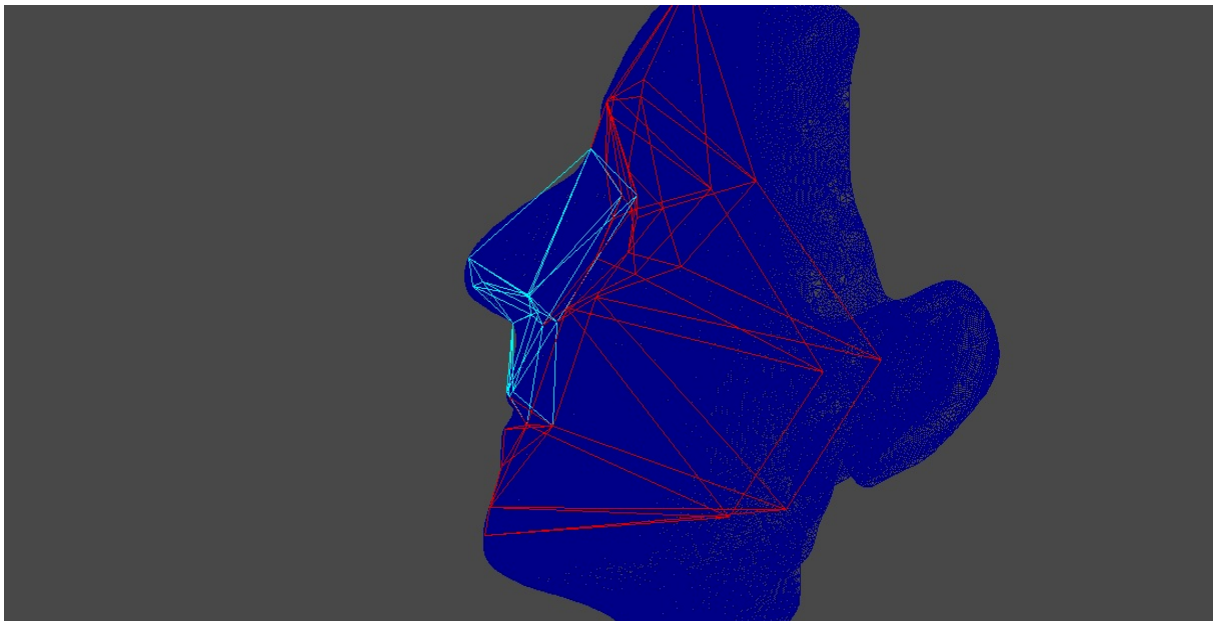


Abb. 51: Patientin prae Rhinoplastik. Farbig eingezeichnet sind die direkten Strecken.

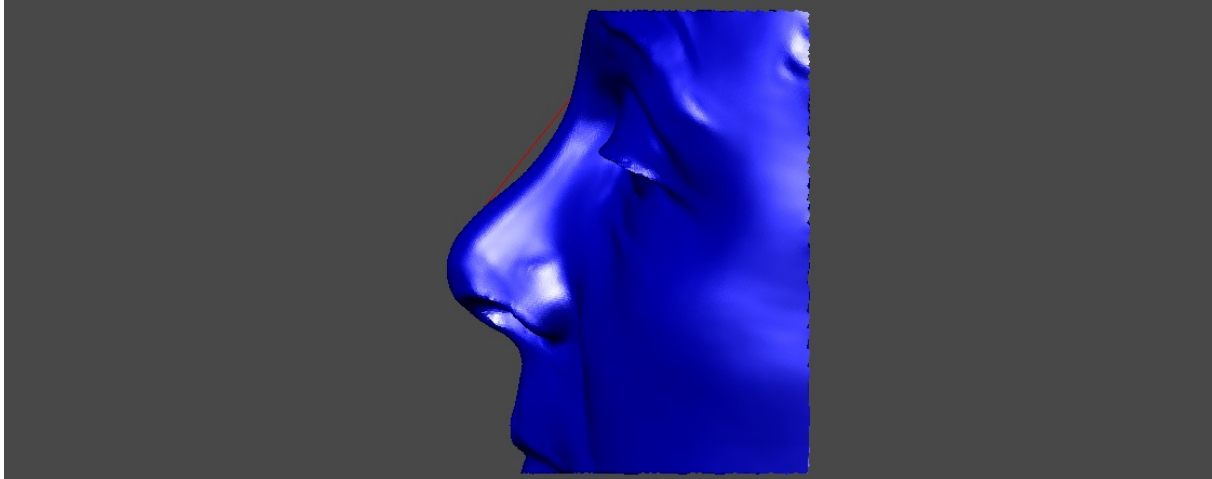


Abb. 52: Patientin post Rhinoplastik. Rot eingezeichnet ist die Strecke 5n-13prn.

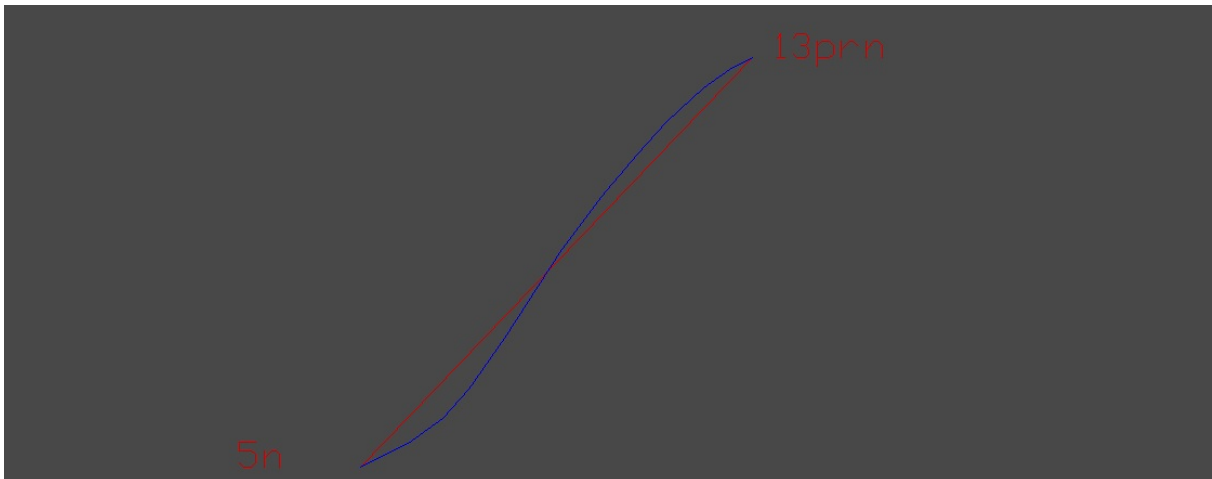


Abb. 53: Nasenprofil Prae OP. Blau eingezeichneter Oberflächenverlauf.
Die rote Linie stellt die direkte 2D Strecke dar.

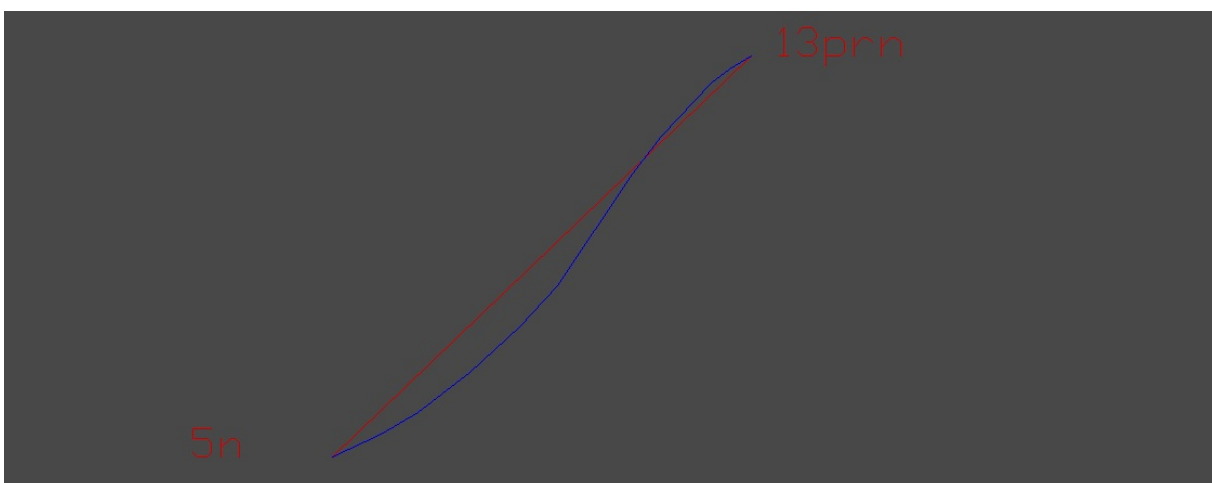


Abb. 54: Nasenprofil Post OP. Blau eingezeichneter Oberflächenverlauf.
Die rote Linie stellt die direkte 2D Strecke dar

3.4.2.2 Nasenrekonstruktion, Zustand nach Verbrennung

Die damals 14jährige, chinesische Patientin erlitt schwerste, viertgradige Verbrennungen im Bereich des Gesichtes, nach Bewusstlosigkeit in der Dusche und daraus resultierendem Fall auf einen heißen Heizstrahler. Dabei wurden große Strukturen des Mittelgesichts wie Nase, rechtes Auge, rechte Wange mit Eröffnung des Sinus maxillaris total zerstört.

Nach anfänglicher Behandlung und rezidivierenden bakteriellen Infekten in ihrem Heimatland kam die Patientin zur Defektdeckung nach Deutschland.

Für die Deckung wurde ein freier vertikaler Rectus abdominis Muskellappen (VRAM-flap) als Transplantat verwendet, als Nasengerüst diente subkutan eingesetztes, allogenes Knorpelgewebe, welches in einer vorherigen Operation zur Modellierung der komplexen Nasestruktur in die Bauchregion eingebracht worden war.

Es wurde versucht, unter anderem die Nasenarchitektur anhand eines virtuellen 3-D Computermodells zu rekonstruieren. Dieses durch alte Fotografien der Patientin vor dem Unfall und das durch mit Hilfe von Bildern der Mutter erstellte Soll-Modell (Abb. 57 und 60) dient als Vergleich zum erreichten Ergebnis.

Die in Tabelle 10 gelisteten Strecken und Oberflächenkurven zeigen ein annehmbares Symmetrieverhältnis nach abgeschlossener Behandlung.

Aus der Tabelle 11 ist zu entnehmen, dass die absoluten Abweichungen der Strecken und Flächen aber von denen des Soll-Gesichts differieren. Dies wird auch im Gesamteindruck augenscheinlich (Abb. 56 und 57).

Das neue Nasenprofil (Abb. 59, Tab. 10) mit einer Fläche von 32,738 mm² und einer Oberflächenlänge von 40,172 mm liefert ein vertretbares Resultat zur Ausgangsbasis (Abb. 55), weicht aber von der Soll-Nase in Fläche und Profil ab (Abb. 60, Tab. 11).

Tab. 10: Patientin post OP

Strecke	2D	abs. Abw.	3D	abs. Abw.	Fläche	abs. Abw.
5n-13prn	39,624		40,172		32,738	
17acre-18alre	8,611	1,763	17,705	-7,272	-5,104	8,162
17acli-18alli	10,374		10,433		3,058	
18alre-14cre	10,966	-1,329	19,281	-9,578	43,616	-41,62
18alli-14cli	9,637		9,703		1,996	
13prn-14cre	22,351	-8,65	15,009	-0,767	21,229	-6,015
13prn-14cli	13,701		14,242		15,214	
14cre-16sbalre	10,569	-2,364	0,866	8,446	0	-5,506
14cli-16sballi	8,205		9,312		-5,506	
18alre-16sbalre	9,27	0,517	21,061	-10,412	8,917	1,371
18alli-16sballi	9,787		10,649		10,288	
17acre-16sbalre	12,579	-5,517	22,669	-15,241	-13,642	18,163
17acli-16sballi	7,062		7,428		4,521	
16sbalre-15sn	12,348	-0,54	16,006	-0,037	-5,949	-0,098
16sballi-15sn	11,808		15,969		-6,047	

Tab. 11: Patientin, Sollgesicht rekonstruiert aus alten Fotos und dem Gesicht der Mutter

Strecke	2D	abs. Abw.	3D	abs. Abw.	Fläche	abs. Abw.
5n-13prn	42,3		42,508		-7,787	
17acre-18alre	7,738	1,137	9,661	1,401	10,868	5,559
17acli-18alli	8,875		11,062		16,427	
18alre-14cre	14,459	-1,021	15,506	-1,718	11,136	-1,566
18alli-14cli	13,438		13,788		9,57	
13prn-14cre	9,725	2,155	10,003	2,149	5,174	2,363
13prn-14cli	11,88		12,152		7,537	
14cre-16sbalre	13,71	-0,472	13,875	0,602	-5,849	-7,236
14cli-16sballi	13,238		14,477		-13,085	
18alre-16sbalre	8,499	-0,106	13,355	-2,722	19,154	-9,497
18alli-16sballi	8,393		10,633		9,657	
17acre-16sbalre	7,501	-0,344	8,513	-0,314	7,968	-2,027
17acli-16sballi	7,157		8,199		5,941	
16sbalre-15sn	12,431	0,515	13,067	0,115	-0,516	8,163
16sballi-15sn	12,946		13,182		7,647	

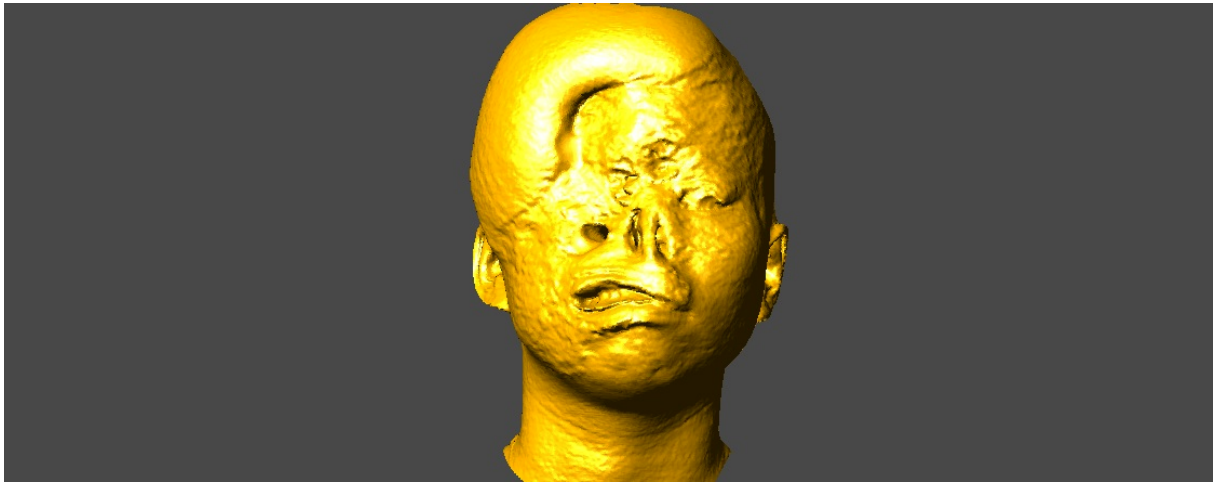


Abb. 55: Gesicht der Patientin nach Verbrennungsunfall

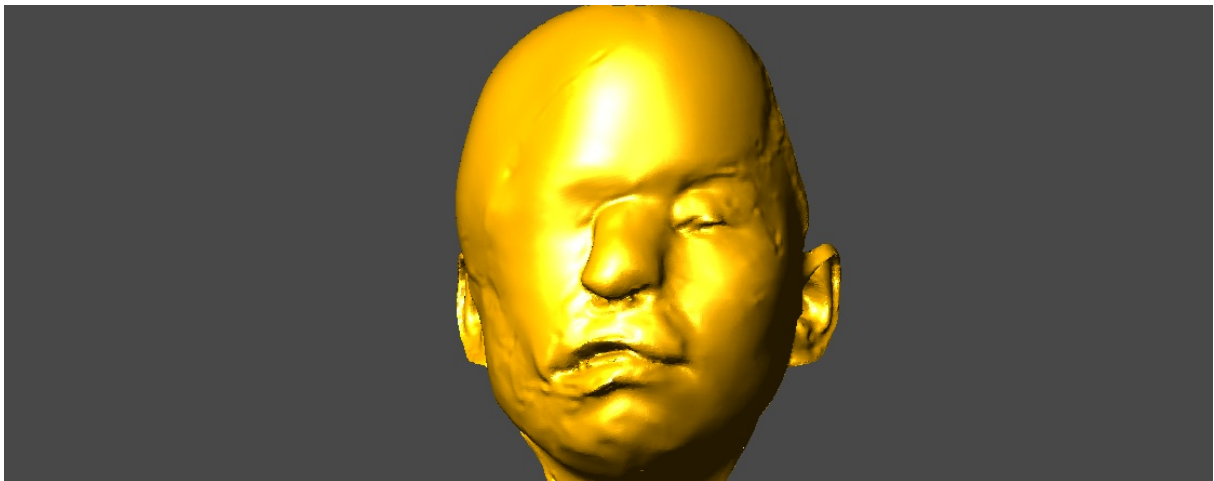


Abb. 56: Patientin nach erfolgter Nasenrekonstruktion

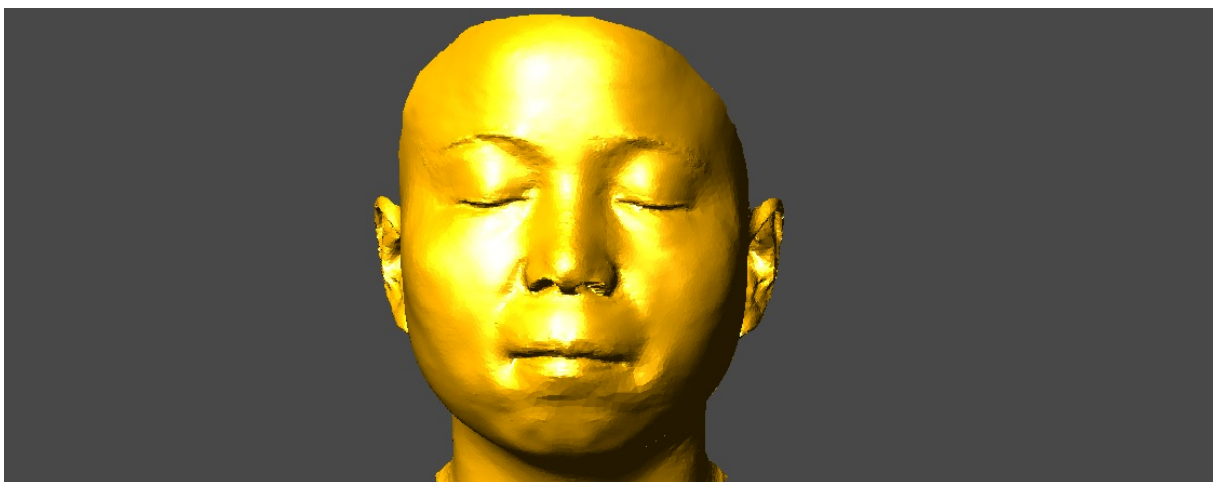


Abb. 57: Computervisualisierung des Soll-Gesichtes der Patientin, hergestellt aus alten Fotografien der Patientin vor dem Unfall und der Gesichtsphysiognomie der Mutter

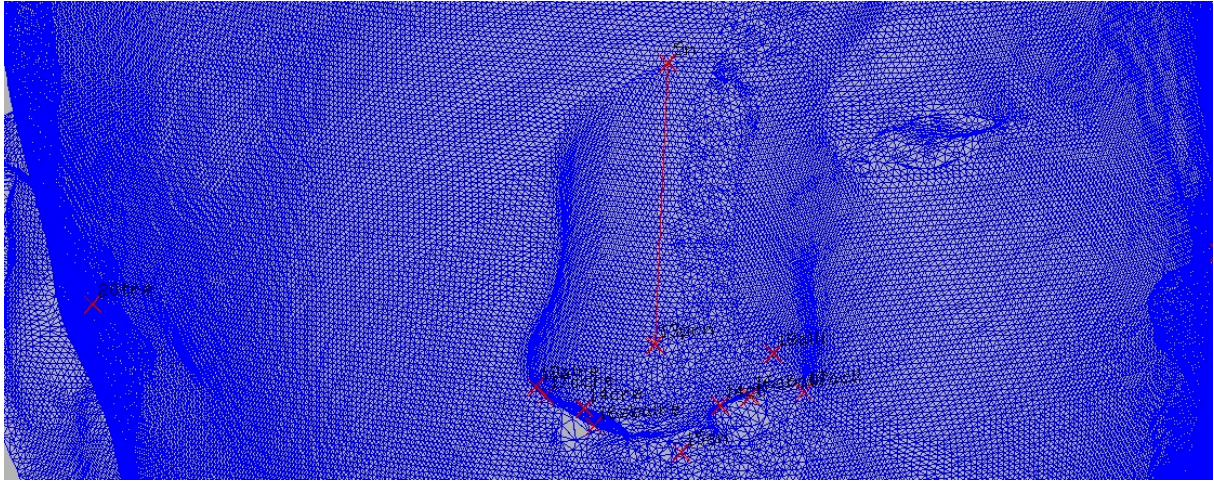


Abb. 58: Patientin nach Nasenplastik

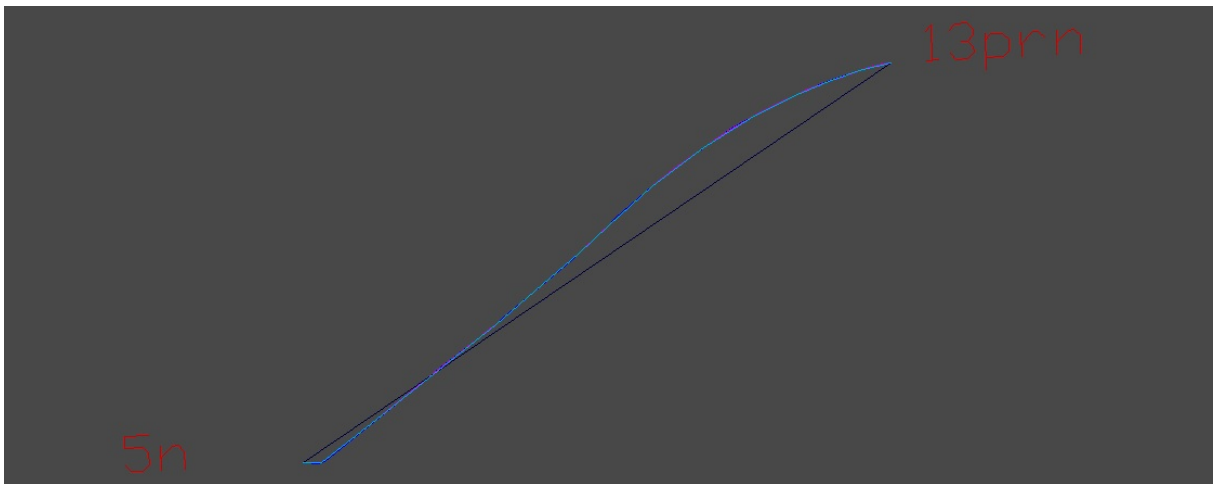


Abb. 59: Profil der Neonase

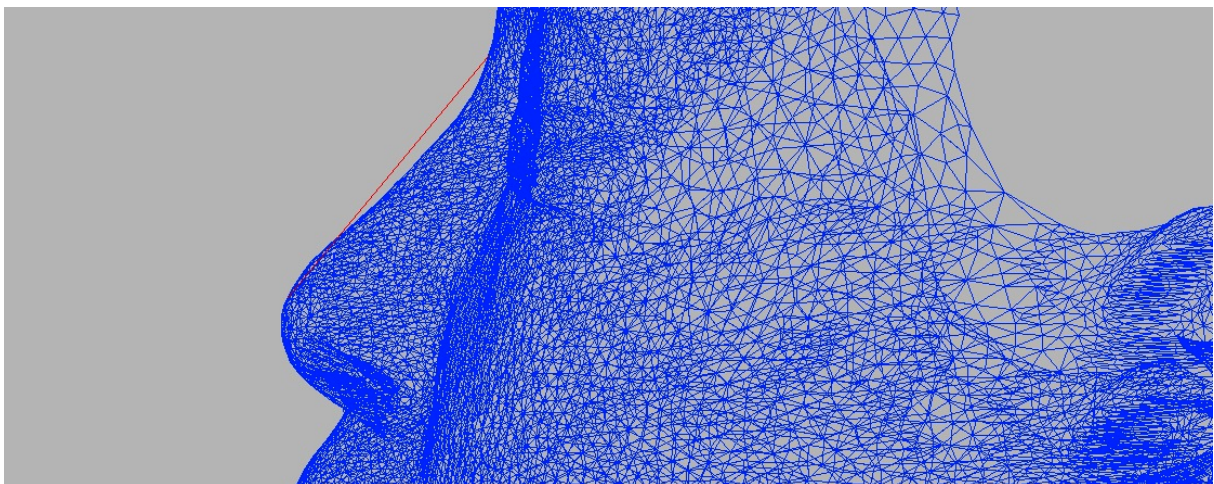


Abb. 60: Sollgesicht

4. Diskussion

Das Gesicht des Menschen repräsentiert wie keine andere Körperregion die Einzigartigkeit des Einzelnen, alle seine fünf Sinne sind darin enthalten. Allen Menschen ist es möglich, gewisse Merkmale im Gesicht des anderen zu erkennen und ihn als solchen individuell zu identifizieren. Bei emotionalen Reaktionen treten beispielsweise Asymmetrien im Gesicht auf [6-8].

Die Symmetrie des Gesichts macht einen großen Teil davon aus, ob wir jemanden als attraktiv empfinden oder nicht. Der Verlust dieser als normal empfundenen Struktur kann für die betreffende Person tiefgreifende seelische Folgen nach sich ziehen.

Glücklicherweise haben sich die Techniken zur Wiederherstellung dieser Gesichtsstruktur im Laufe der Zeit enorm verbessert. Noch vor ein paar Jahrzehnten schien zum Beispiel die Möglichkeit einer Gesichtstransplantation nichts als bloße Träumerei. Durch Weiterentwicklung der Operationstechniken und Medikamente zur klinisch vertretbaren Immunsuppression ist dies nun tatsächlich durchführbar geworden.

Ebenso verhält es sich mit anderen Wiederherstellungsoperationen, um Gesichtsasymmetrien auszugleichen oder das Gesicht nach Unfällen so gut wie möglich in seinen ursprünglichen Zustand zurückzusetzen [67].

Technische Operationssimulation und -planung könnte daher in nicht allzu ferner Zukunft auch für den medizinischen Bereich der Plastischen Chirurgie eine große Rolle spielen.

Der steigende Bedarf an plastischen Operationen macht es nun erforderlich, eine neue Methode der Evaluierung der Symmetrie als möglichst breitgefächert anzuwendendes Modell zu erarbeiten.

Vollständige und objektivierbare Beurteilbarkeit des Operationsergebnisses stellt eine große Herausforderung für traditionelle Methoden dar. Das größte Problem dabei ist, objektive Daten zu gewinnen, die unabhängig vom Operateur sind. Bis dato war es der Fall, dass das Ergebnis subjektiv der Zufriedenheit des Patienten und der Meinung des Arztes unterlag. Nach einer Operation ist von Interesse, ob das gewünschte Ergebnis erzielt wurde. Dies kann nun also mit dem hier vorgestellten Verfahren durch einen quantitativen Vergleich der postoperativen Gesichtsfläche mit der präoperativen Messung festgestellt werden.

Außerdem ist man hiermit in der Lage, die knöchernen und die Weichteilsymmetrie zueinander in Bezug zu setzen. Bisherige Messungen haben sich darauf beschränkt, entweder nur die knöchernen Symmetrie oder nur die Weichteilsymmetrie zu betrachten. Dadurch dass hier die Fläche zwischen einerseits der Verbindungslinie zwischen den knöchernen Merkmalspunkten und andererseits der Krümmung auf der Weichteil-Oberfläche zwischen den beiden Punkten berechnet wird, werden die Elemente der Craniometrie und die der Cephalometrie miteinander verknüpft.

State of the art ist derzeit die Fotografie, die durch kostengünstige und einfache Anwendung hervorstechen vermag. Ihre Zweidimensionalität ist jedoch nicht mehr zeitgemäß. Die fortschreitende Technik im Bereich dreidimensionaler Objekterfassung macht die Anwendbarkeit auch in der Medizin zwingend erforderlich. Bei vielen hochtechnisierten Verfahren wie der Computertomografie und der Magnetresonanztomografie sind die benötigten Informationen dabei aber nur sehr teuer zu gewinnen. Diese Techniken zeichnen sich zwar zweifelsohne durch eine hohe Präzision aus, sind aber, wie im Falle des CT, durch Strahlungsexposition schädlich für den Patienten. Auch ist die Benutzung von Kontrastmitteln oftmals vonnöten, weshalb non-invasive Verfahren vorzuziehen sind.

Das Laserscanning ist dabei besonders geeignet, die Oberfläche detailgetreu wiederzugeben. Schnelle Aufnahmezeiten und spezielle Softwarelösungen lassen dabei die Probleme aus der Anfangszeit, wie zum Beispiel große Bewegungsartefakte und lange Bearbeitungszeiten, vergessen.

Damit ist der Vorteil des photogrammetrischen Verfahrens, nämlich die sehr kurze Aufnahmezeit, hinfällig. Zudem leistet die Photogrammetrie eine etwas schlechtere Bildqualität als das Lichtschnittverfahren.

Die in dieser Studie erprobte Methode wurde entwickelt, um ein kostengünstiges, einfach zu verwendendes und schnelles Verfahren bei der Hand zu haben, das sich für den klinischen Alltag eignet und dadurch auch in der medizinischen Praxis Einzug erhält.

Die Bausteine der Methode kombinieren das Laserscan-Verfahren, um ein dreidimensionales Modell zu gewinnen, mit anthropometrischen Messungen.

Hierbei konzentriert sich die Messung nicht nur auf zweidimensionale, lineare Streckenmessung wie zuvor schon von Bush [11] betrieben. Dadurch werden lediglich relative Daten geliefert.

Durch Messung der Streckenverläufe an der Oberfläche des virtuellen Modells, wie in dieser Studie geschehen, erhält man absolute Daten mit dreidimensionalen Koordinaten.

Zwischen beiden Streckenverläufen wird gleichfalls die resultierende Fläche berechnet. Das Verfahren beruht auf einem einfachen Rechenprinzip, ist leicht zu verstehen, und die definierten Strecken und Flächen werden vollautomatisch berechnet. Somit ist es für die klinische Anwendung sehr gut geeignet.

In dieser Studie sollte gezeigt werden, dass für einen objektiven Vergleich der Symmetrie nicht nur lineare Streckenmessungen, sondern auch dreidimensionale Oberflächenmessungen vonnöten sind. Dies ergibt eine präzisere und realistischere Darstellung der Weichteile. Mit der Berechnung der dazwischenliegenden Flächenareale kann man das Resultat einer Operation konkret nach objektiven Maßstäben beurteilen.

Anhand einer symmetrischen Puppe wurde zuerst getestet, ob das Modell valide Daten über die Gesichtssymmetrie liefert. In einem zweiten Schritt prüften wir dann, ob sich das Gittermodell zuverlässig an normalsymmetrischen Probanden einsetzen läßt. Die klinische Relevanz wurde dann an vier Patienten gezeigt.

Zunächst einmal muß das dreidimensionale Modell am Computer erstellt werden. Verschattungseffekte in der Ebene des Laserstrahls und Reflektion von zu wenig oder zuviel Licht, beeinflusst durch Hautunebenheiten und Gesichtsgeometrie allgemein, können beim Scan- Prozeß zu Datenlöchern führen. Ebenfalls spielt die Position des Patienten eine Rolle, denn durch Bewegungs- und Atmungsartefakte können Verzerrungen entstehen. Dieser Fehler wurde durch die Verwendung des Puppenmodells ausgeschlossen und bei den Probanden und Patienten weitgehend durch eine festgelegte Sitzposition verringert.

Gewichtsschwankungen können den Vergleich von einer Prä- zu Postaufnahme erschweren, sind allerdings für den Gesichtsbereich nur bei sehr großer Schwankung des Körpergewichts von Belang.

Man kann das Gesicht nicht vollständig mittels eines einzigen Scans erfassen. Beim Zusammensetzen der einzelnen Profilshells ist die manuelle Registrierung daher eine potentielle Fehlerquelle. Um die Einzelaufnahmen zu einer einzelnen zu fusionieren, müssen dem Programm einige, sich auf beiden Shells überlappende Punkte gegeben werden, damit die Software die beiden Schalen zusammenfügen kann. Die Markierung der Punkte erfolgt untersucherabhängig. Die automatische Registrierung schließt den Faktor des Untersuchers aus, unterliegt dabei aber dem jeweiligen Programmalgorithmus.

Die Positionierung der Landmarks des Gitters geschieht durch den Untersucher. Dieser markiert manuell mit der Maus die gewünschten Punkte am virtuellen Modell im PC. Die Identifizierung ist daher abhängig von Erfahrung und Augenmaß.

Die Lokalisation der Landmarks an sich stellt eine Schwierigkeit dar. So sind Punkte an sehr markanten Stellen wie dem Augeninnen- und Augenaußenwinkel (6 enre/ enli; 9 exre/ exli) und denen in der Mundregion (23chre/ chli, 22cphre/ cphli; 21ls, 24ls, 25sl) einfacher zu setzen als beispielsweise die Punkte an der Unterseite der Nase (14 cre/ cli; 16 sbalre/ sballi, 17acre/ acli), welche sich durch Verschattungen schon als schwieriger beim Einscannen erweisen.

Die Punkte 1tr und 3scire/ scili hängen von der nach dem Einscannen guten Erkennbarkeit der Haarstruktur ab. Aus dem gleichen Grund kann die Markierung der Punkte 11 pire/ pili und 7psre/psli durch die Darstellung der Wimpern erschwert sein. Desweiteren sind einige Punkte leicht zu ertasten, weil sie über knöchernen Strukturen liegen (8 osre/ osli; 10 zyre/zyli;12 orre/ orli; 26 pg; 27 gn; 28 gore/goli). Am Computer ist ihre Identifikation daher etwas mühevoller.

Das Arbeiten am PC bietet die Möglichkeit, den Bildausschnitt extrem zu vergrößern und damit die Genauigkeit der Landmark-Positionierung zu verbessern. Dabei geht

aber der Gesamteindruck des Objektes verloren, was für das Setzen der Landmarks hinderlich sein kann.

Landmarks wie 2ftre/ ftli, 18alre/ alli und 19chkre/ 19chkli sind insgesamt schwierig zu markieren, obwohl man das virtuelle Kopfmodell zu allen Seiten drehen kann.

Das Lokalisieren der Landmarks in der Mittellinie (1tr; 4g; 5n; 13prn; 15sn; 26pg; 27gn) bei sehr asymmetrischen Gesichtern kann ebenso Probleme bereiten; bei einigermaßen normalsymmetrischen Gesichtern sind sie jedoch besonders leicht zu markieren. Außerdem kann man sich ausreichend Zeit nehmen, was so vom lebenden Patienten nicht toleriert werden würde.

Die Problematik der exakten Lokalisation der Merkmalspunkte tritt in dieser Form aber bei allen anthropometrischen Untersuchungen auf, siehe Farkas und Ferrario, und läßt sich durch einen geübten Untersucher minimieren.

Ferrario beispielsweise benutzte einen elektromagnetischen Stift und markierte die Punkte direkt am Patienten, läuft dabei aber Gefahr, die Weichteiloberfläche zu verformen [22, 23, 26-28, 30, 39].

Aung [4] verglich die Genauigkeit von manuell abgenommenen Landmarks mit der Markierung der Landmarks am PC und kam dabei zum Ergebnis, dass sie in einer Abweichung von bis zu 2 mm ausreichend verlässlich seien. Dabei ist auch zu bemerken, dass es sich bei einer manuellen Streckenmessung direkt am lebenden Patienten kaum vermeiden läßt, dass sich der Patient während der anthropometrischen Messungen unwillkürlich bewegt und so das Ergebnis verfälscht. Bush [11] führte ähnliche Messungen an einem Gipsmodell durch, wobei er zu Ungenauigkeiten von 0,6 bis 1 mm im Vergleich zur Markierung der Landmarks am PC kam.

Insgesamt ist also die Möglichkeit der Markierung der Landmarks am PC ein Fortschritt zur direkten Messung am Patienten. Für den Patienten hat es den Vorteil, dass er sich nicht der unangenehmen Prozedur unterziehen muß, einen Untersucher in dem sensiblen Bereich des Gesichtes Landmarks mit einem Marker setzen lassen zu müssen.

Mit der hier behandelten Methode kann die Identifizierung berührungslos am Computer erfolgen und ist damit auch zeitlich vom eigentlichen Scanprozeß entkoppelt.

Bei der Flächenberechnung wird das Areal zwischen der direkten Strecke zwischen zwei Landmarks und der auf der Oberfläche verlaufenden Kurve berechnet.

Hierzu werden die Höhenprofile zwischen Punkten auf der Geraden und den senkrecht dazu korrespondierenden Punkten auf der Kurve in einem vermaschten Saum von wenigen Zehnteln Millimeter gemessen. Die Punkte auf der Oberfläche stammen aus der eingescannten Punktwolke.

Die Höhenprofilberechnung erfolgt an einer schon durch Dreiecke vermaschten Oberfläche. Dabei werden nicht einzelne Punkte der Punktwolke erfasst, sondern nur Schnittpunkte mit den Seiten der Dreiecke oder die Dreieckseckpunkte selbst, wodurch die Linie des Oberflächenverlaufs glatt verläuft.

Verschiedene Fälle sind dabei denkbar. Befindet sich die Fläche, das heißt der Abstand in der Höhe zwischen der Geraden und der gebogenen Strecke, unterhalb der Linie, so trägt die Fläche ein negatives Vorzeichen.

Liegt die Fläche oberhalb der Geraden, dann ist sie positiv.

Liegen bei einem geschwungenen Oberflächenverlauf der 3D Linie beide Fälle vor, es verläuft also beispielsweise der erste Teil der 3D Linie oberhalb der Geraden und zieht dann in einem Bogen unterhalb der Geraden weiter, so erhalten wir eine negative und eine positive Fläche, welche beide zu einer Gesamtfläche zu verrechnen sind.

Bei sehr kleinen Abständen der Punkte wie zum Beispiel im Falle der Strecke 5n-6enre bzw. 6enli kann es in diesem Fall dazu kommen, dass bei dieser kleinen Fläche durch das Aufrechnen von positiver und negativer Fläche eine rechnerische Abweichung in der Rechts- Links- Symmetrie auftritt.

Liegt auf der linken Seite im Vergleich zur rechten eine Variation im Verhältnis der positiven zur negativen Fläche vor, kann dies durch die absolut sehr kleine Fläche zu einer prozentual größeren Symmetrie-Abweichung im Rechts-Links-Vergleich führen. Das Problem tritt in Abhängigkeit von der Länge des Oberflächenverlaufs zutage. Die Lage einzelner Punkte im Höhenprofil fällt bei einer sehr kurzen Strecke prozentual mehr ins Gewicht. Dementsprechend ist bei längeren Distanzen und größeren Flächen diese Problematik vernachlässigbar.

Mithilfe der detaillierten Profilbilder kann man die rechnerische Ungleichheit auch unproblematisch visualisieren.

Farkas kommt der Verdienst zu, Hunderte von anthropometrischen Strecken im Gesicht vermessen und an über tausend Probanden standardisiert zu haben.

Die direkte anthropometrische Messung beschränkt sich aber auf lineare Strecken und ist somit ungeeignet, einen dreidimensionalen Körper vollständig wiederzugeben.

Da auch jede Messung per Hand ausgeführt werden muß und für jeden einzelnen Patienten sehr zeitintensiv ist, scheidet diese Methode für eine Standard-Symmetrieprüfung an Patienten im Klinikalltag aus.

Das Verfahren des Laserscanning bietet nun die Möglichkeit der dreidimensionalen Darstellbarkeit, so daß das Messverfahren der Anthropometrie an die technischen Machbarkeiten angepasst werden kann.

Dabei steht mit dem Lichtschnittverfahren ein präzises, nicht- invasives und schnelles Verfahren zur Verfügung, welches digital dreidimensionale Daten einer topografischen Oberfläche liefert und dabei keinerlei Weichteildeformationen verursacht. Die Genauigkeit und Präzision des Verfahrens wurde schon von Kovacs et al. [65] untersucht.

Mit unserer Methode lassen sich nun nicht nur lineare Strecken messen, sondern auch die aussagekräftigen, dreidimensionalen Oberflächenverläufe zwischen zwei Landmarks berechnen.

Durch die Möglichkeit der Berechnung des Oberflächenverlaufes ist es ebenso möglich, eine Flächenberechnung zwischen der direkten Strecke und der Streckendistanz auf der Gesichtsoberfläche vorzunehmen.

Das in der Literatur von Ferrario beschriebene Verfahren ist wesentlich komplizierter in seiner Anwendbarkeit und schwierig zu reproduzieren.

Ferrario markierte die Landmarks mit einem elektromechanischen Stift direkt auf dem Patienten [27, 28, 31-33, 35, 44]. Damit konnte er zwar direkt die Koordinaten der jeweiligen Punkte erfassen, nicht jedoch das Gesicht als Gesamtes wiedergeben. Ein weiterer Nachteil dieses Trackingverfahrens besteht außerdem in der möglichen Weichteilverformung beim Aufsetzen des Stiftes im Gesicht. Dabei könnten die Koordinaten der Landmarks potentiell verzerrt werden.

Ferrario war es außerdem nur möglich, zweidimensionale Streckenverläufe zu vermessen. Daher rührt auch die lediglich sehr grobe Berechnungsform der Flächen. Mangels dreidimensionaler Linienverläufe können die natürlicherweise kurvigen Strecken der Oberfläche nicht hinreichend genau wiedergegeben werden.

Diese Ungenauigkeit findet sich folglich ebenso bei der Volumenberechnung.

Für seine Volumenberechnung beispielsweise der Nase verwendet er das Dreieck 5n-13prn-15sn als Basis und als Vektor nach oben 18al, jeweils rechts und links. Daraus resultiert ein Pyramidenkörper, dessen Volumen er dann näherungsweise für die anatomische Nasenregion setzte. Das entspricht nur in sehr grober Näherung der natürlich geschwungenen Nasenform. Im Vergleich mit den Resultaten, die die Wasserverdrängungsmethode erbrachte, lag der durchschnittliche Fehler seiner Methode bei 20 Prozent [43].

Bei der Berechnung von Flächen beschränkt sich Ferrario lediglich auf ein Oberflächenareal.

So vermaß er beispielsweise die Oberfläche des Auges innerhalb des Quadrates aus den Landmarks 9ex - 8os - 6en -12or. Die daraus resultierende Fläche ergibt kein sinnvoll verwertbares Resultat, auch weil die vier Eckpunkte keinerlei natürliche Krümmung des Ober- und Unterlides wiedergeben können [27].

Sforza berechnete die Gesamtgesichtsoberfläche in einem Bereich von 1tr-20tre-20tli-28gore-28goli [96].

Mit unserer Methode wäre es ebenso möglich, die resultierende Gesamtoberfläche des Gesichtes zu berechnen. Jeweils drei Landmarks des Gesichtes ergeben ein Oberflächendreieck. Indem man alle Dreiecke innerhalb des von uns kreierten Gitters aufsummiert, erhält man die Gesamtfläche des Gesichtes.

Die Schwierigkeit besteht aber darin, dass man für einen Prä/Post-Vergleich den genau gleichen Gesichtsausschnitt bei den Aufnahmen der Scans haben muß.

Ebenso gleichen sich bei einer solchen Berechnung der Gesamtfläche konkave und konvexe Krümmungen aus, so dass man im reinen Zahlenergebnis nicht erkennen kann, ob es sich um eine konvexe Flächenvergrößerung (zum Beispiel eine Schwellung) oder eine konkave Flächenvergrößerung (beispielsweise Lipodystrophie) handelt.

Visuell wäre dies sofort offensichtlich, aus dem rein rechnerischen Wert könnte man aber nicht exakt ableiten, wo und in welcher Art sich die Flächenänderung ergeben hat.

Daher kommt Ferrario auch bei der Berechnung der Gesamtoberfläche der Nase von Lippen-Gaumenspalten-Patienten zu keinem exakten Ergebnis.

Die breiteren, aber kürzeren Nasen der Patienten zeigen im Ergebnis flächenmäßig keinen Unterschied zu der Normalvergleichsgruppe, die eine schmalere, dafür längere Nase hat [33].

Die gleiche Art von Berechnungen führte er auch für die Fläche von Ober- und Unterlippe, sowie der Gesamtfläche der Lippe durch. Genau wie bei der Flächenberechnung der Nase bleibt auch dieser Versuch ein ungenaues Unterfangen. Die Lippe wird durch die jeweiligen Vierecke 23chre -21ls -23chli -sto (Mittelpunkt zwischen Ober- und Unterlippe) und 23chre – 24li – 23chli – sto (Punkt in der Mitte der Lippe, von uns nicht verwendet) in Ober- und Unterlippe unterteilt [38, 41].

Vor allen Dingen um faziale Asymmetrien zu berechnen, reicht es nicht aus, nur die Oberfläche anzugeben, weil man deren Richtungsänderung (Einbuchtung oder Ausbuchtung) nur anhand der Oberfläche nicht bestimmen kann.

Der Fokus unserer Methode liegt außerdem auf der Vergleichbarkeit von Weichteilsymmetrie und knöcherner Symmetrie.

Bisherige Studien haben sich meist darauf beschränkt, die knöcherner Symmetrie zu erfassen[34].

Zumeist, weil der Fokus der jeweiligen Fachbereiche, wie zum Beispiel der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie, auch darauf zu liegen kommt. Um Asymmetrien des Kiefers korrigieren zu können, ist ja auch zunächst einmal das Augenmerk auf die Replatierung des Knochens zu richten. In der plastischen Chirurgie jedoch spielt größtenteils die Weichteilssymmetrie eine Rolle. Um diese beiden wichtigen Aspekte miteinander zu verknüpfen, haben wir in unserer Studie einen Vergleich von Flächen und Strecken zwischen knöchernen Merkmalspunkten und Gewebe ermöglicht.

Für die Weichteilsymmetrie existieren wenig Daten. Die Krümmung der Oberfläche bzw. der Weichteile zu erfassen, erfolgte bisher unzulänglich.

Meist werden nur zweidimensionale Strecken vermessen, die die Oberfläche nicht richtig widerspiegeln.

Steven Marquardts Versuch, gemäß dem goldenen Schnitt eine Maske des Gesichtes zu konstruieren, wirkt recht starr.

Aus sogenannten „Golden Decagon Matrices“ werden dabei Konturlinien des Gesichtes herausgefiltert. Diese Konturlinien sind jedoch anhand von Fotografien abgeleitet und können daher keinen dreidimensionalen, plastischen Eindruck der Weichteile vermitteln [76, 78]. Marquardt versucht, sein geometrisches Modell in 3D darzustellen, bisher ohne Erfolg [76]. Die fehlende Flexibilität rührt daher, dass die dem goldenen Schnitt nachgeahmte Linienkonstruktion eben nur zweidimensionale Strecken bemisst, die sehr schwierig in eine weitere Dimension integriert werden können.

Desweiteren fehlen der Maske, um überhaupt einen Vergleich mit einem durchschnittlichen Gesicht anstellen zu können, anatomisch relevante Landmarks.

Marquardt will für einen solchen Vergleich die Maske und die Fotografie der damit zu vergleichenden Person übereinanderlagern. Dabei sollen der Abstand zwischen den Pupillen und die Distanz zwischen den Lippen an das Foto angeglichen werden.

Damit werden aber die Gesichtsbreite und- länge vernachlässigt.

Es läßt sich also sagen, dass die Maske für eine Anwendung im zweidimensionalen Bereich an sich nicht ausreichend ist. Für eine dreidimensionale Anpassung an das menschliche Gesicht müssten zweifelsohne mehr Kennzeichnungspunkte in dieser Konstruktion definiert werden, die zu der Krümmung der Gesichtsoberfläche ausgerichtet werden können. Da die Maske am goldenen Schnitt und nicht an den natürlichen Gegebenheiten des Gesichtes orientiert ist, könnte es technisch schwierig sein, die Schnittpunkte zwischen den einzelnen von Marquardt definierten Linien auf einer dreidimensionalen Abbildung zu lokalisieren.

Marquardt erhebt Anspruch darauf, dass seine Maske die Struktur des idealen Gesichtes beschreibe. Abweichungen von diesem Idealstandard könnten dann mithilfe der Linienführung der Maske sichtbar gemacht und definiert werden.

Die Methode Marquardts beschreibt aber keinesfalls das ideale Gesicht. Zum einen ist die Maske einem europäischen Gesicht entlehnt und vernachlässigt somit alle anderen Rassen mit anderen knöchernen Strukturen, insbesondere der der Nase.

Die Kritik besteht außerdem darin, dass die für Frauen entwickelte Maske viel zu maskulin in ihrer Erscheinung ist, vor allem in Anbetracht der Tatsache, dass sehr weibliche Frauengesichter von der Mehrheit vorgezogen werden.

Gesichtszüge wie zum Beispiel tief angesetzte Augenbrauen, eckiges Kinn, prominente supraorbitale Region und ein daraus resultierender stärkerer Winkel zwischen Stirn und Nasenwurzel sind dagegen weniger feminin, aber in dieser Form in Marquardt's Modell zu finden.

In der Tat wirkt in einer dreidimensionalen graphischen Visualisierung von Holland [53] das der Maske von Marquardt angepasste Modell weniger attraktiv als die bearbeitete, femininere Version.

In dieser Studie wurde das Modell zunächst anhand eines industriell hergestellten Puppenmodells getestet. Dabei ist anzunehmen, dass das Modell sehr symmetrisch gefertigt ist und sich für einen bilateralen Strecken- und Flächenvergleichstest bestens eignet. Die Modellerprobung an der Puppe bestätigte, dass die Strecken und kurvigen Oberflächenverläufe zwischen den einzelnen Landmarks auf beiden Seiten sehr symmetrisch waren.

Eine Strecke (18al-16sbal) lag etwas weiter außerhalb des symmetrischen Bereichs. Aufgrund der sehr kurzen Strecke beläuft sich das Rechts-Links-Verhältnis auf 34%, das bedeutet aber nur eine absolute Abweichung von 1,303 mm. Gerade diese beiden Landmarks des nasalen Bereichs sind schwierig zu lokalisieren, weil sie keiner knöchernen Struktur aufliegen.

Auch bei den Strecken 7ps-6en, 19chk-23ch und 19chk-28go wurde zwar eine hinreichende Symmetrie mit einer absoluten Recht-Links-Abweichung von 1,6 mm (7-6) bis zu -1,9 mm (19-28) erreicht, die jedoch verbesserungswürdig ist.

Die Strecken 2ft-20tr, 12or-9ex und 22cph-17ac wiesen eine rechts zu links Abweichung von +/- 1,3 mm auf, die Strecken 4g-7ps und 19chk-17ac eine Deviation von +/- 1,4 mm. Die Punkte 2ft, 12or, 17ac und 19chk sind wegen ihrer Lage, die nicht von einer leicht tastbaren Struktur unterstützt wird, erschwert zu markieren.

Alle anderen 50 Streckenpaare bewegten sich jedoch in einem absoluten Abweichungsbereich von maximal 1 mm, was eine sehr hohe Symmetrie bedeutet. Die kleinste Abweichung betrug dabei 0,003 mm (23ch-28go).

Die Puppe zeigte einen Mittelwert von 0,72%, das heißt die rechten Strecken waren um 0,72% länger als die Strecken der linken Gesichtshälfte. Dabei lagen 68,3% aller

Strecken in einem Normalverteilungsintervall von 0,72% +/- 5,734% und 95,5% zwischen 0,72 +/- 11,468% (Abb. 18).

Die dreidimensionalen Oberflächendistanzen wiesen einen 68,3%igen Bemessungsbereich von 0,81% +/- 6,1% auf, 95,5% der Messwerte lagen innerhalb von 0,81% +/- 12,2% (Abb.19).

In den Histogrammen des Puppenmodells liegt dann auch der erkennbare Streubereich bei etwa +/- 12 Prozent um die Mitte für die zweidimensionalen und dreidimensionalen Strecken. Dabei verlaufen alle Kurven sehr steil, was die Symmetrie der Puppe veranschaulicht.

Die Möglichkeit der Erfassung dreidimensionaler Oberflächenverläufe im Gegensatz zu zweidimensionalen Gittermodellen wie von Ferrario und Marquardt bietet zudem einen realistischeren Ansatz der Beurteilung einer Weichteiländerung, was vor allem in der Plastischen Chirurgie von Wichtigkeit ist.

Erst durch die Berechnung der Oberflächenkrümmung des Gesichtes ist es durchführbar, die Flächen zwischen den direkten, zweidimensionalen Strecken und der Weichteiloberfläche zu erfassen.

Sowohl die Darstellung der 3D Strecken als auch die der Flächen stellen also eine Erweiterung in der Kalkulierbarkeit von Gesichtssymmetrien dar.

Die dreidimensionalen Strecken des Puppenmodells zeigen im Vergleich absolute Abweichungen von 0,02 mm (17ac-16sbal) bis -1,9 mm (19chk-17ac).

Dabei verbesserten sich die Abweichungen insbesondere der Strecken, welche zuvor im 2D Vergleich nicht so gut abschnitten und über einem Millimeter lagen. Dies konnte bei den Strecken 19chk-17ac, 19chk-23ch, 22cph-17ac und 12or-9ex beobachtet werden (siehe Tabellenanhang, Tab. 12).

Auffällig verbesserte sich die 3D Abweichung im Vergleich zum zweidimensionalen Streckenverhältnis bei der Distanz 19chk-28go von 1,8 mm auf 0,604 mm.

Man kann hieraus folgern, dass die dreidimensionalen Streckenverläufe die Rechts-Links-Weichteilsymmetrie offensichtlich besser erfassen.

Im Flächenvergleich offenbarten sich dagegen mehr Abweichungen. Es zeigte sich eine 68,3%ige Normalverteilung von -8,26% +/- 109,092% (Abb. 20).

Die Methode misst sehr genau, so dass auch kleinste Schwankungen der Symmetrie erfasst werden.

Verläuft beispielsweise auf der linken Seite die Oberflächenlinie zwischen zwei Landmarks nur geringfügig anders als auf der rechten Seite, so resultieren zwei unterschiedliche Flächen auf beiden Seiten.

Alle gemessenen Höhenprofile zu einer konvexen Oberfläche, die oberhalb der direkten Strecke liegen, werden als positive Fläche verbucht, während die unterhalb der 2D Strecke liegende Fläche zu einer konkav verlaufenden Oberfläche als negative Fläche verrechnet werden. Beide Flächen werden subsummiert.

Ist also bei einem Profil die positive Fläche durch eine geringfügig differierende Oberflächenkrümmung etwas größer als das dazu passende Profil der Gegenseite, ergeben sich verschiedenartige Flächen. Selbst bei einem industriell gefertigten Puppenmodell kann davon ausgegangen werden, dass sich einige Unregelmäßigkeiten der Gesichtszüge bei der Herstellung ergeben.

Bei sehr kurzen 2D und 3D Strecken und den sich daraus ergebenden Flächen haben aber auch geringe absolute Abweichungen im Rechts-Links-Verhältnis der Symmetrie prozentual gesehen große Auswirkungen.

Dies tritt zum Beispiel bei der Strecke 19chk-17ac mit einer prozentualen Abweichung von -122,26% auf. Dies entspricht einer Fläche rechts von 6,314 mm² und links -1,406 mm². Ebenso weicht die Fläche der Strecken 16sbal-15n um 702,777% ab, dies kommt aber nur einer absoluten Fläche von -1,44 mm² rechts und 8,68 mm² links gleich und wird durch eine geringfügig anders verlaufende Oberfläche verursacht.

Je länger die gemessenen 2D und 3D Strecken sind, umso geringer ist die prozentuale Abweichung. Bei 28go-27gn betragen die Flächen 622,757 mm² rechts zu 643,936 mm² mit einer absoluten Differenz von 21,179 mm². Dies korrespondiert mit einer Abweichung von nur 3,4 % (Tab. 12).

Wir haben aber bewusst eine auch prozentuale Darstellung gewählt, um eine Vergleichbarkeit der Symmetrie mit den Probanden, an denen die Methode auf ihre klinische Anwendbarkeit untersucht wurde, zu gewährleisten.

Die zuvor an dem Schaufensterpuppenkopf getesteten Strecken und Kurven wurden dann in diesem zweiten Schritt an normalsymmetrischen Probanden und Probandinnen getestet.

Erwartungsgemäß kam dabei heraus, dass diese durchschnittlichen Gesichter zwar eine regelmäßige Symmetrie aufwiesen, jedoch nicht so perfekt symmetrisch wie das Puppenmodell waren.

Bei dem industriell gefertigten Puppenmodell sind wenige Abweichungen im Rechts-Links-Verhältnis gegeben. Normalsymmetrische Menschen verfügen aber natürlicherweise über keine vollkommene Symmetrie und weichen im absoluten Vergleich der rechten zur linken Gesichtshälfte stärker voneinander ab.

Dementsprechend sind die bei den Probanden sehr großen Standardabweichungen für die Flächenmessung eine Folge davon, dass die kurzen Strecken, wie zum Beispiel im nasalen und Augen-Bereich, mit hohen, prozentualen Abweichungen zu Buche schlagen.

Die Flächen der Strecken 7psre-11pire wichen bei einem Probanden um 615,748 % ab, das entsprach $0,127\text{mm}^2$ rechts und $0,909\text{mm}^2$ links, absolut gesehen also einer Abweichung von $0,782\text{mm}^2$.

Durch solcherlei Abweichungen in einigen Bereichen ergibt sich in der prozentualen Normalverteilung aller männlichen Probanden, dass sich 68,3% der Flächen in einem Intervall von 29,62% +/- 391,5% bewegen. Für die Frauen zeigte sich ein Bereich von -1,44% +/- 1059,5%.

Vergleicht man diese prozentuellen Werte mit denen der Puppe, so wird die schlechtere Symmetrie sofort offensichtlich (Abb. 20).

Um den Unterschied der Symmetrie noch anschaulicher zu machen, wurden in dieser Studie aber auch die absoluten Flächendifferenzen der männlichen und weiblichen Probanden/ -innen rechts zu links verglichen (Abb. 42, 43, 48, 49).

Dabei entfällt dann die Rolle der kleinen Distanzen, die meist für die größeren prozentualen Abweichungen verantwortlich sind.

Für die zweidimensionalen Streckenmessungen und die 3D Verläufe aller Männer und Frauen wurden prozentual sehr gute Mittelwerte erreicht. Auch die Standardabweichungen lagen in einem guten Bereich.

Für die männlichen Probanden ergab sich, dass sich 95,5 % aller 2D Streckenmessungen im Bereich von 0,7% +/- 18,186% bewegten, bei den 3D Messwerten lag diese Verteilung bei 0,42% +/- 25,012% (Abb. 21 und 23).

Bei den weiblichen Probanden befanden sich 95,5% der direkten Streckenwerte in einem Intervall von 0,95% +/- 17,08%, für die oberflächlichen Distanzen wurde ein Bereich von 3,05% +/- 30,6% erfasst (Abb. 22 und 24).

Damit waren die zweidimensionalen Messwerte der Männer in etwa gleich symmetrisch wie die der Frauen. Bei den 3D Messungen schnitten die Männer besser ab.

Wir untersuchten in der Folge zusätzlich zwei Einzelgesichter, jeweils ein männliches und ein weibliches.

Dabei ergab sich für den männlichen Probanden ein 95,5%iges Intervall der Normalverteilung von 0,84% +/- 18,46% für die zweidimensionalen Strecken (Abb. 29). Für die dreidimensionalen Strecken wurde eine 95,5%ige Streubreite von -0,23% +/- 28,232% ermittelt (Abb. 30).

Damit liegen das 2D und das 3D Intervall in etwa gleich mit der Untersuchung über alle männlichen Probanden.

Für das Frauengesicht wurde für die zweidimensionalen Strecken ein 95,5%iger Bereich von 1,91% +/- 16,38% ermittelt, die 3D Oberflächenverläufe ergaben eine Spanne von 3,97% +/- 26,036% (Abb. 33 und 34).

Das einzelne Frauengesicht war damit bei den zweidimensionalen Distanzen weniger symmetrisch als alle Frauengesichter zusammengenommen, die dreidimensionalen Verläufe zeigten sich hingegen den Durchschnittswerten ähnlich.

Die Fläche in der Untersuchung des männlichen Probanden ergab für das 68,3%ige Intervall 72,99 % +/- 320,84%, was schlechter als der Durchschnitt ist. Für die Flächen bei dem Frauengesicht zeigte sich ein 68,3%iges Normalverteilungs-Intervall von -12,62% +/- 546,05% (Abb. 31 und 35).

Anschaulicher wird dieser Vergleich der Flächen wegen der hohen, prozentualen Standardabweichungen allerdings, wenn man die absoluten Differenzen betrachtet.

Dabei wies das Gesicht der weiblichen Einzelprobandin mit einem 95,5%igen Normalverteilungsintervall von 2,75 mm² +/- 62,406 mm² (Abb. 36) im Gegensatz zu 4,9 mm² +/- 113,202 mm² des Durchschnitts aller weiblichen Probandinnen (Abb. 28) eine höhere Symmetrie auf.

Der männliche Einzelproband lag in einem 95,5%igen Bereich bei $5,37 \text{ mm}^2 \pm 150,716 \text{ mm}^2$ (Abb. 32) zu $2,52 \text{ mm}^2 \pm 110,424 \text{ mm}^2$ des Durchschnitts aller männlichen Probanden (Abb. 27). Damit wurde eine schlechtere Symmetrie im Vergleich zum Durchschnitt dokumentiert.

Alle Probanden, sowohl einzeln wie auch zusammengenommen, wiesen jedoch in allen Bereichen eine schlechtere Symmetrie gegenüber der des Puppenmodells auf.

Das hier vorgestellte Verfahren bietet also die Möglichkeit, die Symmetrien einzelner Gesichter mit dem Durchschnitt oder einem optimal symmetrischen Gesicht zu vergleichen, was in Gegenüberstellung zu dem Modell von Marquardt eine deutliche Verbesserung verkörpert.

Dabei stehen mit den dreidimensionalen Strecken und Flächen zusätzliche Möglichkeiten der vermessbaren Merkmale des Gesichtes zur Verfügung, die die Methode Ferrario's erweitern.

Anstatt nur in zwei Dimensionen vergleichende Untersuchungen anstellen zu können, ist es nun machbar, auch die Weichteile mithilfe der dreidimensionalen Distanzen am PC zu erfassen. So kann man gewünschte Teilbereiche herausnehmen und flexibel einzelne Strecken des operierten Bereiches betrachten.

Für die berechneten Flächenareale erscheint es daher sinnvoll, sich auch die einzelnen Flächen im Rechts-Links-Vergleich herauszugreifen. Es bleibt schwierig, anhand des rein rechnerischen Zahlenwertes die genaue Veränderung zu beurteilen, da positive und negative Flächen subsummiert werden. Gerade bei sehr wellenförmig verlaufenden Oberflächenkonturen ist der reine Zahlenwert der Flächen ein sehr diffizil zu interpretierendes Resultat.

Nur in den Profilbildern erkennt man den genauen Oberflächenverlauf und kann die sich durch eine Operation ergebenden Korrekturen erkennen.

Für einzelne Patienten ist es daher angebracht, nicht nur die prozentuale Veränderung zu begutachten, da dies bei kleinen Strecken und Flächen missverständlich sein könnte, sondern auch die absolute Abweichung.

Zu diesem Zweck wurden ausgewählte Bereiche von Patienten erfasst und verglichen. Bei einer Patientin, die durch eine Zahnextraktion eine Weichteilgewebsschwund auf der linken Seite im Bereich der Maxilla erlitten hatte, wurde Eigenfett injiziert um das fehlende Gewebe wieder aufzubauen.

Die linksseitigen Flächen verbesserten sich merklich gegenüber der rechten, normalen Gesichtshälfte.

In den Histogrammen (Abb. 42 und 43) wurde dann auch erwartungsgemäß für das betrachtete Eingriffsareal von 21 betroffenen Strecken vor der Operation eine Verschiebung der Kurve in den negativen X-Achsen-Bereich beobachtet.

Eine andere Patientin litt an einer rechtsseitigen Gesichtsasymmetrie, die durch Lipofilling verbessert wurde. Im Rechts-Links-Vergleich zeigte sich eine Annäherung der Symmetrie. Vor der Operation war hier die Kurve von 25 interessierenden Flächen durch die größeren Areale der gesunden Gesichtshälfte in die positive Richtung der X-Achse verschoben (Abb. 46-49).

Mithilfe der Histogramme kann man also auch leicht die betroffene Seite lokalisieren.

Eine weitere Patientin unterzog sich einer Nasenkorrektur. Bei der Rhinoplastik wurde eine leichte Konvexität des Nasenrückens korrigiert.

In den Ergebnissen ließ sich eine flächenhafte Veränderung von $-46,511 \text{ mm}^2$ quantifizieren (Abb. 53 und 54).

Anhand der Bilder ließ sich außerdem gut visualisieren, in welchem Bereich der Nase sich die Änderung ergeben hatte.

Eine weitere Patientin erlitt schwerste Verbrennungen bei einem Unfall. Dabei wurde ihr Weichteilgewebe weitgehend zerstört, unter anderem wurde die Nase sehr in Mitleidenschaft gezogen, so dass die Rekonstruktion einer Neonase vonnöten war.

Es konnte gezeigt werden, dass zwar das Soll-Ergebnis nicht erreicht wurde, die beidseitige Gesichtssymmetrie jedoch mit einem annehmbaren Ergebnis angesichts der Ausgangssituation wiederhergestellt wurde (Tab. 10 und 11).

Insgesamt stellt das Verfahren ein gutes Mittel dar, um Asymmetrien im Gesichtsbereich zu quantifizieren. Es ermöglicht, gesonderte Bereiche des Gesichtes in Gegenüberstellung zum vorherigen Zustand zu beurteilen.

Die Messungen der zweidimensionalen Strecken, dreidimensionalen Oberflächendistanzen sowie der dazwischenliegenden Flächen zeigten verlässliche Ergebnisse, die für die Beurteilung des Ergebnisses und die Operationsplanung sinnvoll sind.

Die Methode repräsentiert somit eine nützliche Erweiterung der Spannweite, Asymmetrien besser und objektiver zu bewerten.

4.1 Ausblick

Dieses Verfahren bietet in einigen Bereichen der Plastischen Chirurgie weitere Anwendungsmöglichkeiten.

Für die Erfassung von mimischen Asymmetrien wie beispielsweise bei Fazialispareesen ist eine nur zweidimensionale Darstellung unzureichend. Um diese Veränderungen festhalten zu können, erscheint eine flächenhafte Berechnung, wie hier geschehen, erforderlich.

Erweitert werden könnte dieses System mit der Finite-Elemente-Methode, um Bewegungsabläufe und Verformungen des Gesichtes zu erfassen, eine Art bewegtes Gitter also. Damit wäre man auch imstande, die mimischen Veränderung der betroffenen Gesichtsbereiche zu veranschaulichen und zu quantifizieren.

Ebenso könnte die hier angewandte Methode für Gesichtstransplantationen hilfreich sein. Denkbar wäre eine Anwendung für die Operationsplanung und -simulation.

Mithilfe des konstruierten Gitters ließe sich bei einer höheren Probandenzahl auch ein unabhängiger Koeffizient einer optimalen Gesichtssymmetrie entwickeln, der aus den einzelnen Strecken und 3D Oberflächenverläufe zu gewinnen wäre.

Außerdem ließen sich mit dem Verfahren der Höhenprofile nicht nur Flächen, sondern auch Volumina berechnen. Lagerte man die postoperative Scanaufnahme und die präoperative Aufnahme übereinander, so erhielte man je nach betreffender Operation in dem bestimmten Gebiet einen Höhenunterschied.

Dabei wären nun nicht die flächigen Dreiecke zu berechnen, sondern das eingeschlossene Volumen dieser geraden Prismen mit den Dreiecken als Grundflächen.

Die hier präsentierte Technik kann damit also für vielfältige Anwendungsbereiche erschlossen werden.

5. Zusammenfassung

Die Symmetrie der Gesichtszüge stellt ein wesentliches Merkmal für die Attraktivität und Lebensqualität eines Menschen dar.

Asymmetrien in diesem in besonderem Maße auffallenden Bereich des Körpers werden oft negativ wahrgenommen, so daß die Patienten aus dieser psychischen Belastungssituation heraus den Wunsch nach einer Korrektur äußern. Vielfach ist aber auch aus medizinischer Sicht die Wiederherstellung schwer beschädigter Gesichtspartien unverzichtbar.

In dieser Studie sollte gezeigt werden, dass sich faziale Symmetrien objektiv mit Hilfe eines dreidimensionalen Gittermodelles erfassen lassen.

Zweidimensionale als auch dreidimensionale Streckenverläufe wurden auf beiden Gesichtshälften vermessen, so daß Änderungen der Symmetrien des Gesichtes unter Verwendung einer objektiven Methode quantifiziert werden können.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ebenso die zwischen einer zweidimensionalen Strecke und dem dreidimensionalen Oberflächenverlauf eingeschlossene Fläche bestimmt und ein Symmetrievergleich angestrebt.

Hierzu wurde das zweidimensionale Gittermodell von Ferrario zu einer dreidimensionalen Gitter-Maske weiterentwickelt, um auch die Strecken auf der Oberfläche des Gesichtes räumlich darstellen zu können.

Die zwei- und dreidimensionalen Streckenverläufe wurden mithilfe der Software RapidForm 2006 (INUS Technology Inc., Seoul, Südkorea) vermessen.

Weiterhin wurde die zwischen der 2D- und 3D-Strecke eingeschlossene Fläche unter Anwendung der Programme AutoCAD (Autodesk Inc., San Rafael, U.S.A.) und MicroStation V8 (Bentley Systems, Exton, Pennsylvania, U.S.A.) berechnet.

An einem symmetrischen Puppenkopf wurde das Gitter als Musterstück erstellt.

Das an diesem Puppenmodell getestete System wurde an normalsymmetrischen Probanden angewendet, um Abweichungen von der Symmetrie aufzuzeigen.

Die klinische Relevanz wurde im folgenden an Patienten getestet, um die bestehenden Gesichtsasymmetrien von linker zu rechter Gesichtshälfte zu vergleichen.

Das Puppenmodell ergab eine sehr hohe Symmetrie der beiden Gesichtshälften zueinander, während die Gesichtssymmetrie der Probanden sich wie erwartet als geringer herausstellte als die des ebenmäßigen Puppenkopfes.

Ebenso wurde erreicht, die Asymmetrien der Patienten vor und nach einer Operation in einer objektiven Größenordnung zu beziffern.

Das Laserscanning bietet die Möglichkeit, das Gesicht non-invasiv und mit hoher Genauigkeit abzubilden. Die Arbeitsweise, die Landmarks am PC zu setzen, ist zudem sehr zeitsparend. Der Patient wird entlastet, indem die eigentlichen Arbeitsschritte der Landmark-Positionierung und der Streckenvermessung vom Scan-Prozeß abgekoppelt werden.

Die Weiterentwicklung von Ferrarios zweidimensionaler Gittermaske stellt durch die neuartige Berechnung auch oberflächlicher, dreidimensionaler Streckenverläufe eine Optimierung gegenüber dem herkömmlichen Verfahren dar. So können auch die Krümmungen der Gesichtswichteiloberfläche adäquat berücksichtigt werden, die bei einem allein auf zweidimensionalen Strecken basierenden Modell wie dem Ferrarios nicht miteinbezogen werden können.

Ein weiterer Schwerpunkt war die Berechnung von Flächen. Dies wurde in bisherigen Studien vernachlässigt und meist nur für die Oberfläche von Augen und Mund angewandt.

Mit der hier gezeigten Technik können nun Schnittflächen zwischen zweidimensionalen und dreidimensionalen Distanzen gebildet werden, was für künftige Operationsplanung und Verlaufskontrollen sehr hilfreich werden könnte.

Nicht einfach stellt sich hingegen die richtige Interpretation der Ergebnisse bei den Flächen dar.

Bei der Flächenberechnung werden negative und positive Flächen, die sich bei einer wellenförmig verlaufenden 3D Oberflächenlinie ergeben, subsumiert, so dass die Lokalisierung einer postoperativen Veränderung oft nur anhand des Profilbildes genau bestimmt werden kann.

Gerade in einer komplexen Körperregion wie der des Gesichtes geht es oft um Millimeter, die den Symmetrie-Eindruck verändern. Mithilfe der hier vorgestellten Technik lassen sich auch kleinste Abweichungen quantifizieren.

Dennoch bietet dieses System gerade für den Vergleich einzelner Strecken und Flächen in dem interessierenden Interventionsareal großes Potential für eine

objektive Beurteilung des Zustandes vor einer Operation und dem nachfolgenden Resultat. Derzeit steht auch keine alternative, vergleichbare Methode zur Verfügung. Insgesamt verkörpert das Verfahren somit einen Fortschritt gegenüber gängigen Methoden, Gesichtsasymmetrien und deren Behandlung genauer auswerten zu können.

6. Literaturverzeichnis

1. Anderl H, Zur Nedden D, Mühlbauer W, Twerdy K, Zanon E, Wicke K, Knapp R: Ideas and Innovations. CT-guided stereolithography as a new tool in craniofacial surgery. *Brit J Plast Surg* 47 (1994) 60-64
2. Arridge S, Moss JP, Linney AD, James DR: Three dimensional digitization of the face and skull. *J Maxillofac Surg* 13 (1985) 136-143
3. Arvystas MG, Antonellis P, Justin AF: Progressive facial asymmetry as a result of early closure of the left coronal suture. *Am J Orthod* 87 (1985) 240-246
4. Aung SC, Ngim RC, Lee ST: Evaluation of the laser scanner as a surface measuring tool and its accuracy compared with direct facial anthropometric measurements. *Br J Plast Surg* 48 (1995) 551-558
5. Bereczkei T, Hegedus G, Hajnal G: Facialmetric similarities mediate mate choice: sexual imprinting on opposite-sex parents. *Proc Biol Sci* (2008), in press
6. Borod JC, Kent J, Koff E, Martin C, Alpert M: Facial asymmetry while posing positive and negative emotions: support for the right hemisphere hypothesis. *Neuropsychologia* 26 (1988) 759-764
7. Borod JC, Koff E, White B: Facial asymmetry in posed and spontaneous expressions of emotion. *Brain Cogn* 2 (1983) 165-175
8. Borod JC, Koff E, Yecker S, Santschi C, Schmidt JM: Facial asymmetry during emotional expression: gender, valence, and measurement technique. *Neuropsychologia* 36 (1998) 1209-1215
9. Brenner DJ, Hall EJ: Computed tomography- an increasing source of radiation exposure. *N Engl J Med* 357 (2007) 2277-2284
10. Burke PH, Beard LFH: Stereophotogrammetry of the face. *Am J Orthod* 53 (1967) 769-782
11. Bush K, Antonyshyn O: Three-dimensional facial anthropometry using a laser surface scanner: validation of the technique. *Plast Reconstr Surg* 98 (1996) 226-235.
12. Buzug TM: Einführung in die Computertomographie. Mathematisch-physikalische Grundlagen der Bildrekonstruktion. Springer, Berlin, 2004, 2nd ed
13. Carstens P (2007): Nofretete: Wirbel um eine alte Dame. <http://www.geo.de/GEO/kultur/geschichte/53284.html>. Stand: 30.05.2009.
14. Coward TJ, Watson RM, Scott BJ: Laser scanning for the identification of repeatable landmarks of the ears and face. *Br J Plast Surg* 50 (1997) 308-314

- 15.** Cunningham MR: Measuring the physical in physical attractiveness: quasi-experiments on the sociobiology of female facial beauty. *J Pers Soc Psychol* 50 (1986) 925-935
- 16.** Cunningham MR, Barbee AP, Pike CL: What do women want? Facialmetric assessment of multiple motives in the perception of male physical attractiveness. *J Pers Soc Psychol* 59 (1990) 61-72
- 17.** Cunningham MR, Roberts AR, Wu CH, Barbee AP, Druen PB: "Their ideas of beauty are, on the whole, the same as ours": Consistency and variability in the cross-cultural perception of female physical attractiveness. *J Pers Soc Psychol* 68 (1995) 261-279
- 18.** Dagsys A: The use of proportions in planning surgical-orthodontic treatment in young adult patients. In: "Anthropometric facial proportions in medicine", Farkas, LG (Ed.), Charles C Thomas, Springfield, Il, 1987, 1st ed; 83-102
- 19.** Eco U: *Die Geschichte der Schönheit*. Deutscher Taschenbuch Verlag, München, 2006
- 20.** Farkas LG: *Anthropometry of the head and face*. Raven Press: New York, 1994, 2. ed; 20-26
- 21.** Farkas LG, Hreczko TA, Kolar JC, Munro IR: Vertical and horizontal proportions of the face in young adult North American Caucasians: revision of neoclassical canons. *Plast Reconstr Surg* 75 (1985) 328-338
- 22.** Farkas LG, Katic MJ, Hreczko TA, Deutsch C, Munro IR: Anthropometric proportions in the upper lip-lower lip-chin area of the lower face in young white adults. *Am J Orthod* 86 (1984) 52-60
- 23.** Farkas LG, Munro IR: Linear proportions in above- and below-average women's faces. In: "Anthropometric facial proportions in medicine". Charles C Thomas, Springfield, Il, 1987; 119-129
- 24.** Farkas LG, Munro IR: The Validity of Neoclassical Facial Proportion Canons. In: "Anthropometric facial proportions in medicine". Charles C Thomas, Springfield, Il, 1987; 57-66
- 25.** Ferrario VF, Dellavia C, Colombo A, Sforza C: Three-dimensional assessment of nose and lip morphology in subjects with down syndrome. *Ann Plast Surg* 53 (2004) 577-583

- 26.** Ferrario VF, Dellavia C, Serrao G, Sforza C: Soft tissue facial angles in Down's syndrome subjects: a three-dimensional non-invasive study. *Eur J Orthod* 27 (2005) 355-362
- 27.** Ferrario VF, Dellavia C, Serrao G, Sforza C: Soft-tissue facial areas and volumes in individuals with ectodermal dysplasia: a three-dimensional non invasive assessment. *Am J Med Genet A* 126 (2004) 253-260
- 28.** Ferrario VF, Dellavia C, Tartaglia GM, Turci M, Sforza C: Soft tissue facial morphology in obese adolescents: a three-dimensional noninvasive assessment. *Angle Orthod* 74 (2004) 37-42
- 29.** Ferrario VF, Dellavia C, Zanotti G, Sforza C: Soft tissue facial anthropometry in Down syndrome subjects. *J Craniofac Surg* 15 (2004) 528-532
- 30.** Ferrario VF, Sforza C, Dalloca LL, DeFranco DJ: Assessment of facial form modifications in orthodontics: proposal of a modified computerized mesh diagram analysis. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 109 (1996) 263-270
- 31.** Ferrario VF, Sforza C, Dellavia C, Tartaglia GM, Colombo A, Caru A: A quantitative three-dimensional assessment of soft tissue facial asymmetry of cleft lip and palate adult patients. *J Craniofac Surg* 14 (2003) 739-746
- 32.** Ferrario VF, Sforza C, Dellavia C, Tartaglia GM, Sozzi D, Caru A: A quantitative three-dimensional assessment of abnormal variations in facial soft tissues of adult patients with cleft lip and palate. *Cleft Palate Craniofac J* 40 (2003) 544-549
- 33.** Ferrario VF, Sforza C, Dellavia C, Vizzotto L, Caru A: Three-dimensional nasal morphology in cleft lip and palate operated adult patients. *Ann Plast Surg* 51 (2003) 390-397
- 34.** Ferrario VF, Sforza C, Germano D, Dalloca LL, Miani A, Jr.: Head posture and cephalometric analyses: an integrated photographic/radiographic technique. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 106 (1994) 257-264
- 35.** Ferrario VF, Sforza C, Poggio CE, Cova M, Tartaglia G: Preliminary evaluation of an electromagnetic three-dimensional digitizer in facial anthropometry. *Cleft Palate Craniofac J* 35 (1998) 9-15
- 36.** Ferrario VF, Sforza C, Poggio CE, Serrao G: Facial three-dimensional morphometry. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 109 (1996) 86-93
- 37.** Ferrario VF, Sforza C, Poggio CE, Tartaglia G: Facial morphometry of television actresses compared with normal women. *J Oral Maxillofac Surg* 53 (1995) 1008-1015

- 38.** Ferrario VF, Sforza C, Schmitz JH, Ciusa V, Colombo A: Normal growth and development of the lips: a 3-dimensional study from 6 years to adulthood using a geometric model. *J Anat* 196 (2000) 415-423
- 39.** Ferrario VF, Sforza C, Schmitz JH, Miani A, Jr., Serrao G: A three-dimensional computerized mesh diagram analysis and its application in soft tissue facial morphometry. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 114 (1998) 404-413
- 40.** Ferrario VF, Sforza C, Schmitz JH, Santoro F: Three-dimensional facial morphometric assessment of soft tissue changes after orthognathic surgery. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 88 (1999) 549-556
- 41.** Ferrario VF, Sforza C, Serrao G: A three-dimensional quantitative analysis of lips in normal young adults. *Cleft Palate Craniofac J* 37 (2000) 48-54
- 42.** Ferrario VF, Sforza C, Serrao G, Colombo A, Ciusa V: Soft tissue facial growth and development as assessed by the three- dimensional computerized mesh diagram analysis. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 116 (1999) 215-228
- 43.** Ferrario VF, Sforza C, Serrao G, Miani A, Jr.: A computerized non-invasive method for the assessment of human facial volume. *J Craniomaxillofac Surg* 23 (1995) 280-286
- 44.** Ferrario VF, Sforza C, Tartaglia GM, Sozzi D, Caru A: Three-dimensional lip morphometry in adults operated on for cleft lip and palate. *Plast Reconstr Surg* 111 (2003) 2149-2156
- 45.** Galton F: Composite portraits, made by combining those of many different persons in a single resultant figure. *Journal of the Anthropological Institute of Great Britain and Ireland* 8 (1879) 132-144
- 46.** Gangestad SW, Thornhill R, Yeo RA: Facial attractiveness, developmental stability, and fluctuating asymmetry. *Ethol Sociobiol* 15 (1994) 73-85
- 47.** Grammer K, Thornhill R: Human (*Homo Sapiens*) facial attractiveness and sexual selection: the role of symmetry and averageness. *J Comp Psychol* 108 (1994) 233-242
- 48.** Hauskeller M: Was das Schöne sei -Klassische Texte von Platon bis Adorno. Deutscher Taschenbuch Verlag, München, 1999, 3rd ed; 11
- 49.** Hauskeller M: Was das Schöne sei- Klassische Texte von Platon bis Adorno. Deutscher Taschenbuch Verlag, München, 1999, 3rd ed; 209-215
- 50.** Hauskeller M: Was das Schöne sei -Klassische Texte von Platon bis Adorno. Deutscher Taschenbuch Verlag, München, 1999, 3rd ed; 216-251

- 51.** Holberg C: Dissertation: Erfassung von Gesichtsoberflächen durch ein lichtcodiertes Triangulationsverfahren. Universitätsklinik für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde Tübingen; 2002.
- 52.** Holberg C, Schwenger K, Mahaini L, Rudzki-Janson I: Accuracy of facial plaster casts. A three dimensional scanner study. *Angle Orthod* 76 (2006) 605-611
- 53.** Holland E: Marquardt's phi mask: pitfalls of relying on fashion models and the golden ratio to describe a beautiful face. *Aesth Plast Surg* 32 (2008) 200-208
- 54.** Hormozi AK, Toosi AB: Rhinometry: an important clinical index for evaluation of the nose before and after rhinoplasty. *Aesth Plast Surg* 32 (2008) 286-293
- 55.** Ikeda T, Nakamura M, Itoh M: Sex differences in the zygomatic angle in Japanese patients analyzed by MRI with reference to moiré fringe patterns. *Aesth Plast Surg* 23 (1999) 349-353
- 56.** Jones D, Hill K: Criteria of facial attractiveness in five populations. *Hum Nat* 4 (1993) 271-296
- 57.** Kau CH, Hunter LM, Hingston EJ: A different look: 3-dimensional facial imaging of a child with Binder syndrome. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 132 (2007) 704-709
- 58.** Kau CH, Zhurov AI, Richmond S, Cronin A, Savio C, Mallorie C: Facial templates: a new perspective in three dimensions. *Orthod Craniofac Res* 9 (2006) 10-17
- 59.** Kauffmann GW, Moser E, Sauer R: Radiologie. Urban& Fischer, München, Jena, 2001, 2. ed
- 60.** Kawai N, Natsume T, Shibata H, Yamamoto T: Three-dimensional analysis of facial morphology using moiré stripes. Part II. Analysis of normal adults. *Int J Oral Maxillofac Surg* 19 (1990) 359-362
- 61.** Kawai N, Natsume T, Shibata H, Yamamoto T: Three-dimensional analysis of facial morphology using moiré stripes. Part I. Method. *Int J Oral Maxillofac Surg* 19 (1990) 356-358
- 62.** Keating CF: Gender and the physiognomy of the dominance and attractiveness. *Soc Psychol Q* 48 (1985) 61-70
- 63.** Kobayashi T, Ueda K, Honma K, Sasakura H, Hanada K, Tamio N: Three-dimensional analysis of facial morphology before and after orthognathic surgery. *J Cranio-Max-Fac Surg* 18 (1990) 68-73
- 64.** Kovacs L, Brockmann G, Zimmermann A: Precision and accuracy by scanning of the facial region with the Minolta-Vivid 910 2D Scanner. *Computer Assisted Radiology and Surgery - CARS*, Elsevier, Berlin, 2005.

- 65.** Kovacs L, Zimmermann A, Brockmann G: Accuracy and precision of the three-dimensional assessment of the facial surface using a 3-D laser scanner. *IEEE Trans Med Imaging* 25 (2006) 742-754
- 66.** Kovacs L, Zimmermann A, Brockmann G: Three-dimensional recording of the human face with 3D laser scanners. *J Plast Reconstr Aesthet Surg* 59 (2006) 1193-1202
- 67.** Kovacs L, Zimmermann A, Wawrzyn H: Computer aided surgical reconstruction after complex facial burn injuries - opportunities and limitations. *Burns* 31 (2005) 85-91
- 68.** Kowner R: Facial asymmetry and attractiveness judgment in developmental perspective. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 22 (1996) 662-675
- 69.** Langlois JH, Roggman LA: Attractive faces are only average. *Psychol Sci* 1 (1990) 115-121
- 70.** Langlois JH, Roggman LA: Infant preferences for attractive faces: rudiments of a stereotype? *Dev Psychol* 23 (1987) 363
- 71.** Langlois JH, Roggman LA, Musselman L: What is average and what is not average about attractive faces? *Psychol Sci* 5 (1994) 214-220
- 72.** Le Corbusier: *Der Modulor*. Deutsche Verlags-Anstalt, München, 1956, 2nd ed
- 73.** Le Louarn C, Buthiau D, Buis J: Structural aging: the facial recurve concept. *Aesth Plast Surg* 31 (2007) 213-218
- 74.** Lehocky B: Anthropometry and cephalometric facial analysis. In: "Plastic Surgery", Mathes SJ, Hentz VR, Saunders Elsevier, Philadelphia, 2006, 2nd ed; 1-30
- 75.** Liang MD, Narayanan K, Davis PL, Futrell JW: Evaluation of facial fat distribution using magnetic resonance imaging. *Aesth Plast Surg* 15 (1991) 313-319
- 76.** Marquardt SR (2001): Marquardt Beauty Analysis. available at: www.beautyanalysis.com. Stand: 25.10. 2006.
- 77.** Marquardt SR: United States Patent: Method and apparatus for analyzing facial configurations and components. U.S.A., 1997; 1-51.
- 78.** Marquardt SR: United States Patent: Method and apparatus for analyzing facial configurations and components. U.S.A., 1999; 1-84.
- 79.** McMahon JA: Beauty. In: "The Routledge Companion to Aesthetics", Routledge, London, New York, 2005, 2nd ed; 307-320

- 80.** Moss JP, Linney AD, Grindrod SR, Mosse CA: A laser scanning system for the measurement of facial surface morphology. *Optics and Engineering* 10 (1989) 179-190
- 81.** Ohm M: Lehrbuch der gesamten höhern Mathematik. Volckmar: Leipzig, 1835, Bd 2
- 82.** Penton-Voak IS, Perrett DI, Peirce JW: Computer graphic studies of the role of facial similarity in judgements. *Curr Psychol* 18 (1999) 104-117
- 83.** Perrett DI, Burt DM, Penton-Voak IS, Kieran JL, Rowland DA, Edwards R: Symmetry and human facial attractiveness. *Evolution and Human Behaviour* 20 (1999) 295-307
- 84.** Perrett DI, May KA, Yoshikawa S: Facial shape and judgements of female attractiveness. *Nature* 368 (1994) 239-242
- 85.** Persichetti P, Simone P, Langella M, Marangi GF, Carusi C: Digital photography in plastic surgery: how to achieve reasonable standardization outside a photographic studio. *Aesth Plast Surg* 31 (2007) 194-200
- 86.** Ras F, Habets LL, van Ginkel FC, Prahl-Andersen B: Method for quantifying facial asymmetry in three dimensions using stereophotogrammetry. *Angle Orthod* 65 (1995) 233-239
- 87.** Ras F, Habets LL, van Ginkel FC, Prahl-Andersen B: Quantification of facial morphology using stereophotogrammetry -demonstration of a new concept. *J Dent* 24 (1996) 369-374
- 88.** Rasse M, Forkert G, Waldhäusl P: Stereophotogrammetry of facial soft tissue. *Int J Oral Maxillofac Surg* 20 (1991) 163-166
- 89.** Rhodes G, Proffitt F, Grady JM, Sumich A: Facial symmetry and the perception of beauty. *Psychon Bull Rev* 5 (1998) 659-669
- 90.** Rhodes G, Sumich A, Byatt G: Are average facial configurations attractive only because of their symmetry? *Psychol Sci* 10 (1999) 52-58
- 91.** Rhodes G, Tremewan T: Averageness, exaggeration, and facial attractiveness. *Psychol Sci* 7 (1996) 105-110
- 92.** Rhodes G, Zebrowitz LA, Clark A, Kalick SM, Hightower A, McKay R: Do facial averageness and symmetry signal health? *Ev Hum Behav* 22 (2001) 31-46
- 93.** Samuels CA, Butterworth G, Roberts T, Graupner L, Hole G: Facial aesthetics: Babies prefer attractiveness to symmetry. *Perception* 23 (1994) 823-831

- 94.** Sawyer AR, See M, Nduka C: 3D Stereophotogrammetry Quantitative Lip Analysis. *Aesthetic Plast Surg* (2008), in press
- 95.** Schwenzer K, Holberg C, Willer J, Mast G, Ehrenfeld M: [3-D imaging of the facial surface by topometry using projected white light strips]. *Mund Kiefer Gesichtschir* 2 Suppl 1 (1998) S130-134
- 96.** Sforza C, Laino A, D'Alessio R, Grandi G, Tartaglia GM, Ferrario VF: Soft-tissue facial characteristics of attractive and normal adolescent boys and girls. *Angle Orthod* 78 (2008) 799-807
- 97.** Shackelford TK, Larsen RJ: Facial asymmetry as an indicator of psychological, emotional, and physiological distress. *J Pers Soc Psychol* 72 (1997) 456-466
- 98.** Swaddle JP, Cuthill IC: Asymmetry and human facial attractiveness: symmetry may not always be beautiful. *Proc R Soc Lond B Biol Sci* 261 (1995) 111-116
- 99.** Talamas I, Pando L: Specific requirements for preoperative and postoperative photos used in publication. *Aesth. Plast. Surg.* 25 (2001) 307-310
- 100.** Thornhill R, Gangestad SW: Facial attractiveness. *Trends Cogn Sci* 3 (1999) 452-460
- 101.** Thornhill R, Gangestad SW: Human facial beauty. Average, symmetry and parasite resistance. *Hum Nat* 4 (1993) 237-269
- 102.** Vanezis P, Vanezis M, McCombe G, Niblett T: Facial reconstruction using 3-D computer graphics. *Forensic Sci Int* 108 (2000) 81-95
- 103.** Vitruvius: *De architectura libri decem*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 1964, Bd. 3
- 104.** von der Lühe A: *David Humes ästhetische Kritik (Studien zum achtzehnten Jahrhundert)*. Meiner, Hamburg, 1995, Bd. 20; 216
- 105.** von Kutschera F: *Ästhetik*. De Gruyter, Berlin, New York, 1998
- 106.** von Steuben H: *Der Kanon des Polyklet. Doryphoros und Amazone*. Ernst Wasmuth, Tübingen, 1973
- 107.** Wagle WA, Smith M: Tattoo - induced skin burn during MR imaging. *AJR Am J Roentgenol* 174 (2000) 1795
- 108.** Waynforth D: Fluctuating asymmetry and human male life-history traits in rural Belize. *Proc R Soc Lond B Biol Sci* 265 (1998) 1497-1501
- 109.** Wettstein R, Kalbermatten DF, Rieger UM, Schumacher R, Dagorov P, Pierer G: Laser surface scanning analysis in reconstructive rhytidectomy. *Aesth Plast Surg* 30 (2006) 637-640

- 110.** Wilkinson C: Computerized forensic facial reconstruction:
A review of current systems. *Forensic Sci Med Pathol* 1 (2005) 173-177
- 111.** Xia J, Samman N, Yeung RW, Wang D, Shen SGF, Ip HHS, Tideman H:
Computer-assisted three dimensional surgical planning and simulation: 3D soft tissue
planning and prediction. *Int J Oral Maxillofac Surg* 29 (2000) 250-258
- 112.** Xia J, Wang D, Samman N, Yeung RW, Tideman H: Computer-assisted three-
dimensional surgical planning and simulation: 3D color facial model generation. *Int J*
Oral Maxillofac Surg 29 (2000) 2-10
- 113.** Zeising A: Entwicklung des eignen Systems. In: "Neue Lehre von den
Proportionen des menschlichen Körpers". Rudolph Weigel, Leipzig, 1854.
- 114.** Zeising A: Neue Lehre von den Proportionen des menschlichen Körpers.
Rudolph Weigel, Leipzig, 1854; 131-450.

7. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Fibonacci – Spiralen einer Sonnenblume, aus: www.computerbase.de

Abbildung 2: Dekaeder – Matrize mit weiteren, darin eingebrachten Zehneck

Abbildung 3: Marquardt - Maske

Abbildung 4: ägyptisches Zeichenschema, aus: Brunés, Tons: The secrets of ancient geometry- and ist use

Abbildung 5: Büste der Nofretete, aus: www.info.univ-tours.fr

Abbildung 6: Albrecht Dürers Einteilung der menschlichen Proportionen,
aus: www.PiMath.de

Abbildung 7: Der vitruvianische Mensch nach einer Zeichnung Leonardo da Vincis,
aus: www.PiMath.de

Abbildung 8: „Modulor“, aus: www.esfcastro.pt

Abbildung 9: Vergleich von Proportionsschemata

Abbildung 10: Vergleich Proportionskanon zur Normalbevölkerung

Abbildung 11: Streifenprojektionsverfahren TRICOLITE

Abbildung 12: Gescanntes Puppenmodell mit gekennzeichneten Punkten

Abbildung 13: Gitternetz bestehend aus direkten Streckenverbindungen

Abbildung 14: Oberflächenverlauf des Gitters

Abbildung 15: Puppenmodell

Abbildung 16: Gittermodell von frontal, in grün: direkte 2D Strecken, in blau: 3D
Oberflächenverläufe

Abbildung 17: Seitenansicht mit eingezeichneten 2D und 3D Strecken

Abbildung 18: Rechts-Links-Vergleich der direkten Strecken des Puppenmodells

Abbildung 19: Vergleich 3D Oberflächenstrecken des Puppenmodells

Abbildung 20: Rechts-Links-Vergleich der Flächen des Puppenmodells

Abbildung 21: Vergleich der direkten 2D Strecken aller männlichen Probanden

Abbildung 22: Vergleich der direkten 2D Strecken aller weiblichen Probandinnen

Abbildung 23: Rechts-Links-Vergleich der 3D Strecken aller männlichen Probanden

Abbildung 24: Rechts-Links-Vergleich der 3D Strecken aller weiblichen Probandinnen

Abbildung 25: Rechts-Links-Vergleich der Flächen aller männlichen Probanden

Abbildung 26: Rechts-Links-Vergleich der Flächen aller weiblichen Probandinnen in

Abbildung 27: Absolute Flächen-Differenz im Rechts-Links-Vergleich über alle
männlichen Probanden, in mm^2

Abbildung 28: Absolute Flächen-Differenz im Rechts-Links-Vergleich über alle weiblichen Probandinnen, in mm^2

Abbildung 29: Rechts-Links-Vergleich der direkten Strecken, männlicher Proband

Abbildung 30: Rechts-Links-Vergleich Oberflächenstrecken, männlicher Proband

Abbildung 31: Rechts-Links-Vergleich der Flächen, männlicher Proband

Abbildung 32: Absolute Flächen-Differenz im Rechts-Links-Vergleich in mm^2 , männlicher Proband

Abbildung 33: Rechts-Links-Vergleich der direkten Strecken, weibliche Probandin

Abbildung 34: Rechts-Links-Vergleich dreidimensionaler Strecken, weibliche Probandin

Abbildung 35: Rechts-Links-Vergleich der Flächen, weibliche Probandin

Abbildung 36: Absolute Flächen-Differenz im Rechts-Links-Vergleich in mm^2 , weibliche Probandin

Abbildung 37: Patientin vor Lipofilling. Rot eingezeichnet: direkte Streckenverbindungen

Abbildung 38: Patientin vor Lipofilling links maxillär

Abbildung 39: Patientin nach Lipofilling links maxillär

Abbildung 40: Profil- Flächen von 28gore-26pg und 28goli-26pg, Prae OP. Türkis gekennzeichnet sind die Oberflächenverläufe.

Abbildung 41: Profil- Flächen von 28gore-26pg und 28goli-26pg, Post OP. Türkis gekennzeichnet sind die Oberflächenverläufe.

Abbildung 42: Rechts-Links-Vergleich der absoluten Flächendifferenz vor Lipofilling, in mm^2

Abbildung 43: Rechts-Links-Vergleich der absoluten Flächendifferenz nach Lipofilling, in mm^2

Abbildung 44: Scan- Aufnahme Prae OP

Abbildung 45: Scan- Aufnahme Post OP

Abbildung 46: Rechts-Links-Vergleich oberflächliche Strecken vor OP, in %

Abbildung 47: Rechts-Links-Vergleich oberflächliche Strecken nach OP, in %

Abbildung 48: Rechts-Links-Vergleich der absoluten Flächendifferenz vor OP, in mm^2

Abbildung 49: Rechts-Links-Vergleich der absoluten Flächendifferenz nach OP, in mm^2

- Abbildung 50: Patientin, Ursprungszustand vor ästhetischer Nasenkorrektur
- Abbildung 51: Patientin prae Rhinoplastik. Farblich eingezeichnet sind die direkten Strecken
- Abbildung 52: Patientin post Rhinoplastik. Rot eingezeichnet ist die Strecke 5n-13prn
- Abbildung 53: Nasenprofil Prae OP. Blau eingezeichneter Oberflächenverlauf. Die rote Linie stellt die direkte 2D Strecke dar.
- Abbildung 54: Nasenprofil Post OP. Blau eingezeichneter Oberflächenverlauf. Die rote Linie stellt die direkte 2D Strecke dar.
- Abbildung 55: Gesicht der Patientin nach Verbrennungsunfall
- Abbildung 56: Gesicht der Patientin nach erfolgter Nasenrekonstruktion
- Abbildung 57: Computervisualisierung des Soll- Gesichtes der Patientin, hergestellt aus alten Fotografien der Patientin vor dem Unfall und der Gesichtsphysiognomie der Mutter
- Abbildung 58: Patientin nach Nasenplastik
- Abbildung 59: Profil der Neonase
- Abbildung 60: Sollgesicht

8. Tabellenverzeichnis:

Tabelle 1: Technische Daten des Konica Minolta Vivid 910 Laserscanners

Tabelle 2: Landmarks

Tabelle 3: 127 direkte und Oberflächen-Streckenvermessungen

Tabelle 4: Patientin prae OP Eigenfettunterspritzung Kieferbereich links.

Abweichungen der Symmetrie rechts zu links, in Prozent

Tabelle 5: Patientin nach Lipofilling links maxillär. Abweichungen der Symmetrie rechts zu links, in Prozent

Tabelle 6: Patientin prae Lipofilling, Asymmetrie in der rechten Gesichtshälfte.

Abweichungen rechts zu links, in Prozent

Tabelle 7: Patientin post Lipofilling, Asymmetrie in der rechten Gesichtshälfte.

Abweichungen rechts zu links, in Prozent

Tabelle 8: Patientin prae Rhinoplastik

Tabelle 9: Patientin post Rhinoplastik

Tabelle 10: Patientin post OP

Tabelle 11: Patientin, Sollgesicht rekonstruiert aus alten Fotos und dem Gesicht der Mutter

Tabelle 12: Puppenmodell, Werte

Strecke	2D	Abw. %	3D	Abw. %	Fläche	Abw. %
1tr-2ftre	70,537	-0,05104	74,517	0,31268	492,727	3,40838
1tr-2ftli	70,501		74,75		509,521	
1tr-3scire	50,75	0,99704	52,673	0,59423	206,449	-4,08285
1tr-3scili	51,256		52,986		198,02	
1tr-4g	45,277		46,047		107,27	
2ftre-3scire	26,216	0,27464	26,326	0,35326	17,835	6,16765
2ftli-3scili	26,288		26,419		18,935	
4g-3scire	44,419	2,16574	45,549	2,17129	124,492	5,13286
4g-3scili	45,381		46,538		130,882	
4g-8osre	42,799	1,97668	43,633	1,88160	101,462	3,23964
4g-8osli	43,645		44,454		104,749	
2ftre-8osre	26,124	1,12157	26,336	1,05939	24,032	-7,92277
2ftli-8osli	26,417		26,615		22,128	

3scire-8osre	5,532	5,82068	5,702	5,47176	1,335	-25,69288
3scili-8osli	5,854		6,014		0,992	
2ftre-9exre	30,202	-2,47666	30,974	-1,29141	55,55	16,28623
2ftli-9exli	29,454		30,574		64,597	
2ftre-10zyre	35,597	-2,80080	35,639	-2,80030	7	-97,82857
2ftli-10zyli	34,6		34,641		0,152	
2ftre-20tre	51,599	-2,65509	60,773	-2,56035	301,119	-4,60051
2ftli-20tli	50,229		59,217		287,266	
8osre-9exre	25,255	-3,36171	27,126	-1,07646	68,809	12,51580
8osli-9exli	24,406		26,834		77,421	
8osre-7psre	21,83	-3,51351	23,457	-3,18881	52,352	-3,28927
8osli-7psli	21,063		22,709		50,63	
4g-7psre	31,474	4,28925	31,709	4,62645	24,974	51,04108
4g-7psli	32,824		33,176		37,721	
7psre-9exre	20,185	-4,33986	20,459	-4,53590	8,674	44,76597
7psli-9exli	19,309		19,531		12,557	
9exre-10zyre	21,258	-4,60533	21,576	-4,85725	20,864	-15,97488
9exli-10zyli	20,279		20,528		17,531	
10zyre-20tre	31,596	-1,50335	31,815	-0,44947	22,378	130,22165
10zyli-20tli	31,121		31,672		51,519	
4g-6enre	29,042	1,01577	30,59	2,09873	63,154	28,32600
4g-6enli	29,337		31,232		81,043	
7psre-6enre	15,234	10,56847	15,44	11,58031	6,278	-164,19242
7psli-6enli	16,844		17,228		-4,03	
9exre-11pire	16,205	-1,49954	16,439	-1,74585	1,55	-65,80645
9exli-11pili	15,962		16,152		0,53	
11pire-6enre	15,854	4,11253	16,156	5,43451	9,06	-48,36645
11pili-6enli	16,506		17,034		4,678	
7psre-11pire	14,274	-3,60796	14,641	-2,74571	-8,659	29,31054
7psli-11pili	13,759		14,239		-11,197	
5n-6enre	22,862	2,27889	23,759	5,72415	15,918	166,77346
5n-6enli	23,383		25,119		42,465	
4g-5n	11,754		11,775		-2,139	

5n-13prn	32,22		32,819		-48,68	
5n-18alre	37,823	1,20562	38,057	1,56607	7,217	229,44437
5n-18alli	38,279		38,653		23,776	
18alre-13prn	18,47	-0,24364	20,184	0,86702	37,378	12,67055
18alli-13prn	18,425		20,359		42,114	
6enre-18alre	35,412	-1,09850	37,886	-2,07728	-85,642	-4,73016
6enli-18alli	35,023		37,099		-81,591	
6enre-17acre	36,736	0,34027	40,955	0,52008	23,859	8,75561
6enli-17acli	36,861		41,168		25,948	
17acre-18alre	6,799	0,23533	6,893	1,46525	1,873	45,80886
17acli-18alli	6,815		6,994		2,731	
18alre-14cre	10,777	-6,69017	10,844	-7,10992	-2,171	-58,68263
18alli-14cli	10,056		10,073		-0,897	
13prn-14cre	8,981	9,99889	9,601	11,91543	8,184	41,58113
13prn-14cli	9,879		10,745		11,587	
14cre-14cli	12,36		14,509		27,742	
14cre-16sbalre	11,964	-2,31528	12,231	-2,88611	-7,559	-24,20955
14cli-16sballi	11,687		11,878		-5,729	
18alre-16sbalre	3,826	34,05646	4,558	36,00263	2,196	51,86703
18alli-16sballi	5,129		6,199		3,335	
17acre-16sbalre	5,244	-1,02975	5,335	0,39363	1,3	28,23077
17acli-16sballi	5,19		5,356		1,667	
16sbalre-15sn	11,954	-5,77213	12,54	-5,55821	-1,44	-702,77778
16sballi-15sn	11,264		11,843		8,68	
15sn-14cre	8,633	3,99629	10,276	-4,35967	-11,805	-4,89623
15sn-14cli	8,978		9,828		-11,227	
15sn-21ls	13,097		13,916		-14,452	
15sn-22cphre	11,465	3,63716	12,413	0,89422	-14,224	-14,62317
15sn-22cphli	11,882		12,524		-12,144	
16sbalre-22cphre	15,689	-1,94404	16,813	-4,37756	-16,138	-43,77246
16sballi-22cphli	15,384		16,077		-9,074	
22cphre-17acre	17,781	-7,25494	18,221	-6,89315	-9,567	-19,53590
22cphli-17acli	16,491		16,965		-7,698	

22cphre-21ls	5,286	3,17821	5,322	2,63059	0,811	-61,52898
22cphli-21ls	5,454		5,462		0,312	
22cphre-23chre	23,274	2,64673	23,499	3,33206	20,306	35,86132
22cphli-23chli	23,89		24,282		27,588	
17acre-23chre	21,994	1,45494	23,852	1,97887	30,453	22,34591
17accli-23chli	22,314		24,324		37,258	
23chre-21ls	26,769	2,91008	27,021	4,05610	25,043	57,40127
23chli-21ls	27,548		28,117		39,418	
23chre-23chli	44,047		49,268		254,478	
23chre-24li	25,738	3,04997	26,882	3,88736	24,772	43,30696
23chli-24li	26,523		27,927		35,5	
23chre-25sl	26,608	2,79239	29,328	4,54855	58,521	12,60915
23chli-25sl	27,351		30,662		65,9	
23chre-26pg	33,668	1,33955	34,681	1,96938	21,089	-8,01366
23chli-26pg	34,119		35,364		19,399	
23chre-28gore	57,267	-0,00524	61,436	-0,53063	348,879	-4,44108
23chli-28goli	57,264		61,11		333,385	
28gore-26pg	75,543	0,32432	85,295	-1,49833	614,042	6,16570
28goli-26pg	75,788		84,017		651,902	
28gore-27gn	74,913	0,54730	81,131	0,85664	622,757	3,40084
28goli-27gn	75,323		81,826		643,936	
12orre-6enre	24,995	-1,73635	25,3	-1,76680	9,928	-41,03546
12orli-6enli	24,561		24,853		5,854	
12orre-11pire	11,297	1,54023	11,552	1,60145	-6,816	-20,20246
12orli-11pili	11,471		11,737		-5,439	
12orre-9exre	21,524	6,15127	21,772	5,74132	-10,383	17,22046
12orli-9exli	22,848		23,022		-12,171	
12orre-10zyre	30,646	0,75051	31,283	0,30368	54,257	-9,94710
12orli-10zyli	30,876		31,378		48,86	
12orre-17acre	32,3	-2,63777	32,852	-2,49604	3,472	-53,97465
12orli-17accli	31,448		32,032		1,598	
12orre-19chkre	11,663	-6,11335	11,736	-6,50988	3,992	-48,82265
12orli-19chkli	10,95		10,972		2,043	

19chkre-10zyre	33,822	1,62025	34,104	1,48663	41,691	-5,81900
19chkli-10zyli	34,37		34,611		39,265	
19chkre-20tre	59,091	0,70569	60,613	1,60857	208,756	27,95369
19chkli-20tli	59,508		61,588		267,111	
19chkre-17acre	29,935	-4,74027	30,65	-4,49266	6,314	-122,26798
19chkli-17acli	28,516		29,273		-1,406	
19chkre-23chre	32,973	-5,78959	33,475	-5,67588	14,378	20,44095
19chkli-23chli	31,064		31,575		17,317	
19chkre-28gore	57,919	3,16131	61,302	0,98529	234,574	51,32410
19chkli-28goli	59,75		61,906		354,967	
20tre-28gore	54,358	-0,11590	55,19	-0,86610	110,714	-14,15539
20tli-28goli	54,295		54,712		95,042	
24li-25sl	7,217		7,891		-4,842	
25sl-26pg	10,301		10,338		-0,303	
26pg-27gn	7,526		7,652		2,854	

9. Danksagung

Mein größter Dank gilt an dieser Stelle Herrn PD Dr. med. L. Kovacs- Hintz, leitender Oberarzt der Klinik für Plastische Chirurgie und Handchirurgie am Klinikum rechts der Isar, für die Bereitstellung dieser Arbeit und die Möglichkeit an einem spannenden, modernen Projekt mitzuarbeiten.

Herzlichster Dank geht an Herrn Prof. Dr. med. H.-G. Machens, Leiter der Klinik für Plastische Chirurgie und Handchirurgie am Klinikum rechts der Isar, der nach Übernahme der Abteilung die Fortführung dieser Arbeit unterstützt und es ermöglicht hat, sie in seiner Klinik abzuschließen.

Mein Dank gilt ebenfalls Prof. Dr. med. E. Biemer, ehemaliger Leiter der Klinik für Plastische Chirurgie und Handchirurgie am Klinikum rechts der Isar, der die Arbeit gefördert hat.

Außerdem möchte ich Herrn Prof. Dr. med. H. F. Zeilhofer, Direktor der Abteilung für Rekonstruktive Chirurgie auf dem Gebiet der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie an der Universität Basel, für die Erlaubnis der Datenauswertung in seinem Forschungszentrum danken.

Für die Unterstützung bei der technische Umsetzung der Arbeit möchte ich vor allem den Vermessungsbüros Ludwig & Schwefer GmbH, Soest und eagle eye technologies GmbH, Berlin danken, ohne deren rasche Hilfe diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Ganz besonderer Dank gilt meinem Vater, der mir bei dieser Arbeit bei allen mathematischen und technischen Fragestellungen sehr viel konstruktives Engagement entgegengebracht und mir durch Rat und Anteilnahme während der Fertigstellung beigestanden hat.

Für die schnelle Umsetzung der Statistik danke ich Herrn Dipl.-Stat. B. Haller.

Insbesondere bedanken möchte ich mich auch sehr bei meinen Probandinnen und Probanden, die sich große Mühe gemacht haben, dem Projekt 3D behilflich zu sein.

Ebenso danke ich den Mitarbeiterinnen im Fotolabor und allen anderen der Abteilung für die freundliche Aufnahme.

Darüber hinaus danke ich Frau G. Pinnen von der RWTH Aachen für die Literaturhilfe.

Außerdem sei auch allen vorhergehenden Doktoranden/- innen gedankt, deren Vorarbeit zu meiner Dissertation beigetragen hat.

10. Lebenslauf

Persönliche Daten:

Name: Judith Ellen Ludwig
Geburtstag: 12.05.1979
Geburtsort: Soest
Eltern: Dipl.-Ing. Robert Ludwig, *29.05.1941
Karin Ludwig, geb. Thomas, *07.11.1940
Geschwister: Dr. jur. Peter Ludwig, *14.08.1966 - 29.11.2002
Dr.-Ing. Johannes Ludwig, *15.04.1971

Ausbildung:

09/85 – 07/89: Petri – Grundschule in Soest

08/89 – 06/98: Städt. Aldegrever – Gymnasium in Soest

06/98 : Erwerb der Allgemeinen Hochschulreife

10/98 – 09/00: Studium der Rechtswissenschaften an der Rheinischen Friedrich -
Wilhelms- Universität Bonn

10/00 - 04/04: Studium der Humanmedizin an der Martin-Luther-Universität Halle-
Wittenberg

03/04: Ärztliche Vorprüfung

seit 04/04: Studium der Humanmedizin an der Technischen Universität München

seit 04/05: Studium der Philosophie an der Hochschule für Philosophie München

01/07: Abschluß des Baccalaureats in Philosophie

05/09: Abschluß des medizinischen Staatsexamens

seit 10/09: Promotion an der Hochschule für Philosophie München

Medizinisches Praktisches Jahr:

02/07- 06/07: Service d'O.R.L. (Prof, Dr. A. Gentine)

Hôpital de Hautepierre, Université de Strasbourg

Straßburg/ Frankreich

06/07- 08/07: Division Clinica Medica (Prof. Adj. Dr. C. Mangone, Dr. S. Levy)

Emergency Department (Dr. Jorge Sproviero, MD)

Hospital Santojanni, Universidad de Buenos Aires

Buenos Aires/ Argentinien

08/07- 10/07: Division of Respiratory (Dr. A. Hirsch, MD)

Division of Gastroenterology (Dr. A. Cohen, MD, FRCP(C))

General Jewish Hospital, McGill University

Montréal/ Kanada

10/07- 01/07: Abteilung für plastische Chirurgie (Prof. Dr. med. univ. M. Ninkovic)

Abteilung für Visceral-, Gefäß- und Thoraxchirurgie (Prof. Dr. med. W.
Heitland)

Klinikum Bogenhausen, München

Fremdsprachenkenntnisse:

Englisch

Französisch

Spanisch

Latein