

Aus dem Bereich Rechtsmedizin
Klinische Medizin
der Medizinischen Fakultät
der Universität des Saarlandes, Homburg/Saar
(Leiter: Univ.-Prof. Dr. Jochen Wilske)

**Beitrag zur Lösung perspektivischer Probleme bei der
Identifizierung von Personen
unter Verwendung der 3-D-Laserscantechnik**

Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin

der Medizinischen Fakultät

der UNIVERSITÄT DES SAARLANDES

2010

vorgelegt von: Sebastian Antes
geb. am: 2. April 1983 in Kaiserslautern

Tag der Promotion:

Dekan:

Berichtersteller:

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Zusammenfassung (deutsch und englisch)	5
2. Einleitung	10
3. Material und Methodik	15
3.1. Probandenkollektiv	15
3.2. Methodik	16
3.2.1. Ablauf der Untersuchung	16
3.2.2. Erstellen der Fotografien	17
3.2.3. Erstellen der dreidimensionalen Modelle	18
3.2.4. Ausrichten des 3-D-Modells anhand der Fotografie	19
3.2.5. Validierung des Anpassungsvorganges mittels computergestützter Bildanalyse	23
3.2.6. Herleitung und Verwendung der Differenzierungsmaße	25
3.3. Statistische Methoden	27
4. Ergebnisse	29
4.1. Vergleich zwischen manueller und computergestützter Anpassung der 3-D-Modell-Projektionen an die Frontal- aufnahmen	29
4.2. Vergleich zwischen manueller und computergestützter Anpassung der 3-D-Modell-Projektionen an die Seit- aufnahmen	36
4.3. Zusätzliche Untersuchungen	41
5. Diskussion	43
5.1. Hintergrund	43
5.2. Prinzipielle Eignung des Verfahrens unter Berück- sichtigung der Voraussetzungen beim Bildvergleich	44
5.3. Vergleich zwischen manueller und computergestützter Anpassung der 3-D-Modell-Projektionen an die Fotografien	47

	Seite
5.3.1. Anpassung an die Frontalaufnahmen	47
5.3.2. Anpassung an die Seitenaufnahmen	53
5.4. Differenzierung zwischen perspektivischen Abbildungs- unterschieden und methodisch bedingten Fehlern	56
5.5. Fazit, Übertragbarkeit und Vorausschau	60
6. Literaturverzeichnis	63
7. Anhang	67
Anhang A	67
Anhang B	72
Anhang C	77
Anhang D	89
Anlage: CD-ROM	
Danksagung	90
Lebenslauf	91

1. Zusammenfassung

Der Vergleich zwischen Bildern nimmt bei der Feststellung der Personenidentität im Rahmen der forensischen Sachverhaltserforschung eine bedeutende Rolle ein. Unabhängig davon, ob zur Identifizierung eines Täters deskriptive oder anthropometrische Methoden eingesetzt werden, treten oftmals bestimmte Einflussfaktoren auf, die zu Schwierigkeiten bei der Erstellung einer gutachterlichen Aussage führen. Besonders Unterschiede hinsichtlich der Kameraposition, des Aufnahmewinkels und der Kopfhaltung sind beim Bild-Bild-Vergleich als limitierend anzusehen. Im Rahmen der vorgestellten Arbeit soll überprüft werden, ob sich die genannten perspektivischen Störfaktoren durch Anwendung eines 3-D-Laserscansystems, in Verbindung mit einer für dieses Vorhaben extern entwickelten Software, ausblenden bzw. minimieren lassen.

Durch einen in der Software integrierten Kalibrierungs-Algorithmus können dreidimensionale Kopfmodelle perspektivisch anhand von standardisierten Fotografien ausgerichtet werden. Die Bewerkstellung dieses Vorgangs wird durch Positionieren von sog. morphologischen Landmarks in den korrespondierenden Abbildungen – 3-D-Modell und Fotografie – realisiert. Anhand der entstehenden Landmark-Muster auf den Bildformaten errechnet das Programm eine möglichst sich perspektivisch mit der jeweiligen Fotografie deckende 3-D-Modellansicht (=computergestützte Anpassung).

In der vorgestellten Versuchsreihe werden dreidimensionale Kopfprojektionen von 39 bzw. 20 Probanden mittels computergestützter Anpassung anhand entsprechender Frontal- bzw. Profilfotografien (als Referenzen) ausgerichtet. Unter Verwendung einer bildanalytischen Methode erfolgt anschließend eine rechnerische Überprüfung dieser Anpassungsvorgänge. Mittels metrischem Vergleich zwischen der Referenzfotografie und dem entsprechend ausgerichtetem 3-D-Modell werden noch vorhandene Bildunterschiede unter Berechnung des sog. Gesamtdifferenzierungsmaßes $D(X;Y)$ quantifiziert.

Zur Bewertung dieser Differenzierungsmaße und somit der Funktionalität des Softwareverfahrens werden Vergleichswerte benötigt. Hierzu erfolgt eine manuelle Ausrichtung der dreidimensionalen Kopfmodelle anhand der entsprechenden und bereits zuvor verwendeten Referenzfotografien (Frontal- und Profilfotografien). Unter optischer Kontrolle des Benutzers wird mittels Computermaus durch Drehen und Wenden des Modells eine zur Fotografie kongruente Ansicht erzeugt. Analog zu den computergestützten Anpassungen erfolgt hiernach ebenfalls die bildanalytische Bestimmung der einzelnen Gesamtdifferenzierungsmaße. Folglich resultieren aus den beschriebenen Arbeitsschritten pro Probandenmodell und verwendeter Fotografie (Frontal- bzw. Seitenaufnahme) jeweils zwei Gesamtdifferenzierungsmaße (manuelle bzw. computergestützte Modellausrichtung), die sich zum Vergleich einander gegenüberstellen lassen.

Beim Vergleich der perspektivischen Anpassungen der 3-D-Modell-Projektionen an die zugehörigen Frontalaufnahmen zeigt sich in 35 von 39 Fällen (89,7%) ein präziseres Gesamtdifferenzierungsmaß der computergestützten Methode. Eine nahezu gleiche Überlegenheit des Softwareverfahrens gegenüber der manuellen Methode präsentiert sich auch bei den Angleichungen an die Seitenaufnahmen. Hier ergibt sich in 17 von 20 Fällen (85%) ein genaueres $D(X;Y)$ -Maß zugunsten des computergestützten Verfahrens. Diese Unterschiede sind gemäß den durchgeführten analytischen Untersuchungen nicht auf zufällige Werteschwankungen, sondern auf die differente Verfahrensweise zwischen manueller und computergestützter Anpassungsmethode zurückzuführen.

Durch die beschriebene Vorgehensweise treten einige Einflussfaktoren auf, die möglicherweise Auswirkungen auf die Resultate, insbesondere das hier verwendete Gesamtdifferenzierungsmaß, haben. Eine Unterscheidung zwischen methodisch bedingten Fehlern bzw. Einflussfaktoren und tatsächlicher Abbildungsverschiedenheit anhand des Gesamtdifferenzierungsmaßes gestaltet sich jedoch schwierig. Während die Einflussfaktoren qualitativ erfasst werden können, ist eine quantitative Differenzierung der Einzelkomponenten kaum möglich.

Insgesamt ist anhand der Ergebnisse festzuhalten, dass der Einsatz der computergestützten Ausrichtung eines dreidimensionalen Kopfmodells an eine

Fotografie im Rahmen eines forensischen Gutachtens durchaus Vorteile mit sich bringt. So besteht unter Nutzung der 3-D-Laserscantechnik und der verwendeten Software die Möglichkeit, perspektivische Einflussfaktoren auszublenden bzw. zu minimieren. Hinsichtlich der Praxistauglichkeit müssten jedoch weitergehende Untersuchungen durchgeführt werden.

Contribution to Solve Perspective Problems in Human Identification Using the 3D Laser Scan Technology

Abstract

Within the scope of forensic investigations, comparisons between images play a significant part in questions about human identity. Whether descriptive or anthropometric methods are used to identify a suspect, there are often certain influence factors which can lead to complications in an expert report. Especially differences concerning camera position, camera angle and the posture of the head are considered to be limiting factors. This study examines whether it is possible to minimize or neutralize the abovementioned perspective problems by using a 3D laser scanner and specially developed software.

With the aid of the software, a perspective adaptation of three-dimensional head models (3D-image) to standardized photographs (2D-image) can be rendered. To realize that kind of adjustment, it is necessary to set defined points (landmarks) on corresponding locations both on the three-dimensional image and the photograph. By using a mathematical algorithm, the software arranges the resulting landmark-samples and as a consequence the 3D- and the 2D-image very congruently (=computer-assisted adaptation).

For this purpose three-dimensional head models and standardized photographs of 39 persons were created. In a first series of experiments all 3D models were adapted to their respective frontal photographs. In a second series a 3D model alignment to a 20°-profile photograph was performed for 20 persons. To evaluate the accuracy of these procedures, a metric comparison between the adjusted head model and the corresponding photograph was accomplished for each computer-assisted adaptation by means of image analysis. Residual differences were calculated by using a standard geometric equation (Gesamtdifferenzierungsmaß $D(X;Y)$ = "Differentiation degree"). The smaller the value of the equation the more exact the alignment.

To assess these values and consequently the functionality of computer-assisted adaptation, it is necessary to have comparatives. Therefore the abovementioned procedures were repeated without software support. This means that the 3D models were aligned manually to their corresponding (and previously used) photographs (39 to the frontal photographs, 20 to the profile photographs). Analogous to the computer-assisted adaptations, the metric comparisons to determine the manual “Differentiation degrees” were also performed. Finally, to evaluate which method (computer-assisted vs. manual) produces the more accurate results, the several “Differentiation Degrees” both of the alignments to the frontal- and to the 20°-profile photographs can be compared.

The computer-assisted perspective alignments of the 3D models to their respective frontal photographs showed more accurate results in 35 of 39 cases (89.7%). Likewise, the results of the software procedure were superior to the manual method when applied to the profile photographs: The computer-assisted alignment was more accurate in 17 of 20 cases (85%). The statistical analyses of the results demonstrate that the observed differences (between computer-assisted and manual method) are not coincidental. The better results of the software-process are due to the different method.

Several factors can influence the results obtained. However, it is difficult to distinguish between methodical errors and actual image differences by using the value of the geometric equation. Whereas the influence factors can be identified qualitatively, a quantitative differentiation of individual components is only possible to a limited extent.

The results of the present study suggest that the use of computer-assisted perspective alignments of three-dimensional head models to photographs could be helpful in forensic investigations. By using 3D laser scan technology and specially developed software, it is possible to neutralize or minimize perspective influence factors. However, further research is needed to assess the value of the method in practical casework.

2. Einleitung

Die Identifizierung von Personen erlangte in den unterschiedlichsten Gesellschaftsstrukturen früh an Bedeutung. Bereits im 13. Jahrhundert veröffentlichte die Körperschaft der heiligen Inquisition Listen mit Namen mutmaßlicher Verbrecher und Ketzer, die zu Fahndungszwecken verbreitet wurden. Eigentliche Personensteckbriefe, inhaltlich vor allem von Beschreibungen der Kleider oder getragener Wappen geprägt, treten dahingegen erst im 15. Jahrhundert in Erscheinung. Mitte des 19. Jahrhunderts wurden schließlich Fotografien als Beweismittel in amerikanischen Gerichten legitimiert, 1905 trug erstmals ein Fingerabdruck zur Aufklärung eines Mordes bei [MADISON 1984, WEIHE 2002]. Bis heute werden ständig neue und verbesserte Methoden erarbeitet, die der Personenidentifizierung dienlich sind.

Unter dem Begriff „Identifizieren“ im wissenschaftlichen Sinn versteht man ein objektives Beweisen der Identität unter Berücksichtigung möglichst vieler morphologischer Einzelheiten. Als die Prämisse methodisch erfüllend konnte sich hierbei der Vergleich zwischen Abbildern (Bild-Bild-Vergleich) etablieren, auf welchen jene Einzelheiten dargestellt sind [KNUSSMANN 1983, BRINKER 1985, SCHOTT et al. 1996].

Das „Wiedererkennen“ stellt hiervon eine klar abzugrenzende Begrifflichkeit dar. Im Gegensatz zum Identifizieren steht hier nicht die detaillierte Analyse von morphologischen Einzelheiten im Vordergrund, vielmehr basiert das Wiedererkennen auf subjektivem Erinnerungsvermögen unter ganzheitlicher Wahrnehmung [KNUSSMANN 1983, BRINKER 1985]. Auch wird die Frage nach Identität beim Wiedererkennen im Allgemeinen schnell beantwortet, mit persönlicher Tendenz zu einer der beiden Möglichkeiten: Identität kann bejaht oder verneint werden. Die drei Faktoren „Ganzheitlichkeit – Geschwindigkeit – Prägnanztendenz“ sind hingegen beim wissenschaftlichen Identifizieren klar zu vermeiden [RÖSING 1999]. So bietet es sich an, als Ergebnis eines Vergleichsgutachtens Wahrscheinlichkeitsaussagen hinsichtlich der Frage nach Identität bzw. Nicht-Identität zu treffen (sog. Beurteilungsstufen oder Prädikatsklassen) [SCHWARZFISCHER 1992].

Der gegenwärtigen forensischen Sachverhaltserforschung steht zur Feststellung von Personenidentität eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Verfügung. Neben dem in dieser Arbeit thematisierten Vergleich von Gesichtern anhand von Bilddokumenten, der in der heutigen Zeit neben der Fingerbildererkennung eine herausragende Rolle spielt, finden die Iriserkennung, Sprechererkennung, Unterschrifterkennung u.a. große Anwendungsbereiche [BEHRENS et al. 2001].

Jedes methodische Prinzip zur Identifizierung von Personen unterliegt der Voraussetzung der Vergleichbarkeit und der Überprüfbarkeit [BRINKER 1985]. Dabei ist unerheblich, ob als Vergleichsmethode die Deskription von morphologischen Merkmalen, also beispielsweise das genaue (wissenschaftliche) Beschreiben einer „Nase“ hinsichtlich deren Größe, Form, Lage, Achse etc., [KEITER 1934, SCHADE 1968, GOLDSTEIN et al. 1971, RÖHM 1973, HAMMER et al. 1981, KNUSSMANN 1983, KNUSSMANN 1991, SCHWARZFISCHER 1992, PORTER et al. 1998, PORTER et al. 2000] oder anthropometrische Verfahren, wie etwa die Erfassung von Körpergröße und -proportionen, [STONER 1955, NEGER 1959, RECHE 1965, FURTMAYR 1971, HAUTVAST 1971, RÖHM 1973, LOVESEY 1974, FURTMAYR 1975, JÜRGENS 1978, FARKAS et al. 1980, JACOBSHAGEN 1980, HAMMER et al. 1981, FARKAS et al. 1987, CATTERICK 1992, ERICHSEN et al. 1993, FARKAS 1994, PORTER et al. 1998, PORTER et al. 2000, BEHRENS et al. 2001, HALBERSTEIN 2001, KREUTZ et al. 2002, JÜRGENS 2004, VERHOFF et al. 2006] eingesetzt werden.

Gerade hinsichtlich kriminalistischer Fragestellungen muss die Identifizierung von Personen einer nachvollziehbaren methodischen Vorgehensweise folgen. Alphonse Bertillon (1853-1914) entwickelte zu Lebzeiten eine Identifizierungskartei, welche neben Fotografien Krimineller sowohl metrische als auch deskriptive Merkmalsbeschreibungen in standardisierter Form enthielten [GLOOR 1979, KREUTZ et al. 2002]. Er forderte bereits damals, dass zu vergleichende Personenabbildungen bestimmte Voraussetzungen erfüllen müssten, um die Vergleichbarkeit herzustellen. Was Bertillon noch als „Gleichförmigkeit der Porträts“ beschrieb, ist nahezu charakteristisch für heutige Erfordernisse [RECHE 1965, MAAT 1989, CATTERICK 1992, PORTER et al. 1998, KNÄPPER 2002, KREUTZ et al. 2002, NOUAK et al. 2009]:

1. Größenanpassung der zu vergleichenden Abbildungen und
2. Entsprechung der Kamera- und der Täterposition

Ferner ist heute bekannt, dass Unterschiede in der umgebenden Beleuchtung, der Filmbelichtung, der Fotoschärfe- und Körnung, der Kameraqualität, der Gesichtsmimik und der Kopfhaltung störende Einflussfaktoren beim Identifizieren darstellen [FURTMAYR 1975, HAMMER et al. 1981, KNUSSMANN 1983, MADISON 1984, SCHWARZFISCHER 1992, PORTER et al. 2000, LU et al. 2005, SCHOTT et al. 2006, VERHOFF et al. 2006, BUSCH et al. 2007, HÄHNEL 2007, PRETZEL et al. 2007, NOUAK et al. 2009].

Ein prominentes Beispiel aus der jüngsten Vergangenheit unterstreicht einige der oben genannten Sachverhalte. Im Winter 2006 / 2007 wurde am Mainzer – Hauptbahnhof unter Leitung des Bundeskriminalamtes das Projekt „Foto – Fahndung“ durchgeführt. Untersucht wurden drei automatische 2-D-Gesichtserkennungssysteme, welche unter Nutzung biometrischer Merkmale ein Identifizieren von zuvor 200 ausgewählten Testpersonen ermöglichen sollte. Insgesamt konnten hierbei durchschnittliche Erkennungsraten zwischen 17% und 29% erreicht werden. Die niedrig erscheinenden Erkennungsraten ließen sich jedoch dadurch erklären, dass tageszeitabhängige Beleuchtungsverhältnisse sowie von der Frontalansicht des Gesichtes abweichende Kopfhaltungen wesentliche negative Einflussfaktoren beim Erkennungsvorgang darstellten [PRETZEL et al. 2007].

Mit dem technischen Fortschritt einhergehend existieren mittlerweile eine Fülle an Experimenten und Studien, die methodisch einen 3-D-Laserscanner zur Rekonstruktion von Gesichtern bzw. Köpfen einsetzen. Im Vordergrund stehen bei diesen Projekten vor allem die Erarbeitung von Möglichkeiten zur anthropometrischen Bestimmung von morphologischen Merkmalen und deren mehrdimensionalen Lage zueinander [COWARD et al. 1997]. Darüber hinaus interessiert auch, ob diese Vermessungen hinsichtlich der Identitätsklärung Bedeutung erlangen [YOSHINO et al. 2002, YOSHINO et al. 2003, LU et al. 2005, OTTEN 2006, BUSCH et al. 2007, NOUAK et al. 2009]. In diesem Zusammenhang wurde bereits mehrfach postuliert, dass die Verwendung von dreidimensionalen Daten bei der biometrischen Identifizierung einen erheblichen Informationsgewinn im

Vergleich zur alleinigen Nutzung von 2-D-Bilddaten mit sich bringt [LU et al. 2005, OTTEN 2006, BUSCH et al. 2007, DRÄGER 2008, NOUAK et al. 2009]. Die Personenidentifizierung anhand von dreidimensionalen Merkmalen ist mitunter Forschungsschwerpunkt renommierter wissenschaftlicher Institutionen wie beispielsweise dem Fraunhofer-Institut (IGD, Institut für grafische Datenverarbeitung) in Darmstadt. Nicht zuletzt ist ein durch die Europäische Kommission gefördertes internationales Projekt unter dem Arbeitstitel „3D Face“ in den Fokus des öffentlichen Interesses gerückt. Die Erwartungen an die resultierenden Ergebnisse sind hoch. Neben deutlich gesteigerten Erkennungsraten durch Nutzung von 3-D-Informationen bei der Personenidentifizierung bzw. -verifizierung in öffentlichen Gebäuden wie Flughäfen (z.B. zur Grenzkontrolle) verspricht man sich neue, fälschungssichere Aufnahmetechniken [BUSCH et al. 2007]. Mehrere Studien hatten in der Vergangenheit gezeigt, dass sich 2-D-Erkennungssysteme leicht überlisten lassen [BUSCH et al. 2007, DRÄGER 2008, TURBA 2008, NOUAK et al. 2009].

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird versucht, unter Verwendung eines 3-D-Laserscanners, einige der zuvor genannten Störfaktoren zu beseitigen. Im Besonderen sollen Differenzen hinsichtlich des perspektivischen Unterschieds, das heißt der Kameraposition, des Aufnahmewinkels und der Kopfhaltung, egalisiert werden. Hierzu werden von 23 weiblichen und 16 männlichen Probanden frei drehbare räumliche Kopfmodelle (3-D-Modelle) sowie standardisierte Fotografien erstellt. Die 3-D-Modelle bzw. deren Projektionen werden perspektivisch an die zu vergleichenden Fotografien angepasst. Dieser Anpassungsvorgang wird sowohl von Hand (= manueller Anpassungsvorgang), als auch mit Unterstützung einer eigens für diese Arbeit entwickelten Computersoftware (= computergestützter Anpassungsvorgang) durchgeführt und schließlich unter Verwendung bildanalytischer Methoden überprüft.

In den meisten vorliegenden Schriften, welche anthropometrische Methoden zum Bildvergleich verwenden, werden Strecken, deren Verhältnisse und Winkel bestimmt [STONER 1955, NEGER 1959, HAUTVAST 1971, FURTMAYR 1975, JÜRGENS 1978, FARKAS et al. 1980, FARKAS et al. 1987, FARKAS 1994, BEHRENS et al. 2001, HALBERSTEIN 2001]. Diese Arbeit beschränkt sich, ähnlich wie die von

YOSHINO et al. [2003] publizierte Studie, auf die Verwendung einzelner via Koordinatensystem quantifizierter Gesichtspunkte (Landmarks).

Folgende Fragestellungen ergeben sich:

1. Ist es möglich, mittels der eigens hierfür entwickelten Software ein 3-D-Modell anhand einer Fotografie auszurichten?
2. Kann der computergestützte Anpassungsvorgang die Fotografie hinsichtlich der Perspektive präziser nachstellen als die manuelle Vorgehensweise?
3. Ist es möglich, bei der am Ende eines Bildvergleiches resultierenden Differenz zwischen perspektivischen Abbildungsunterschieden und methodisch bedingten Fehlern zu unterscheiden?

3. Material und Methodik

3.1. Probandenkollektiv

Zur Verfügung stehen insgesamt 39 Probanden, davon 23 weiblich und 16 männlich. Nahezu alle Testpersonen zählen hinsichtlich ihrer Herkunft zum europäischen Formenkreis mit heller Hautfarbe, lediglich eine Probandin ist asiatischer Abstammung. Das Durchschnittsalter beträgt 25 Jahre, der jüngste Proband ist am Tag der Aufnahme 20 Jahre, der älteste 32 Jahre alt.

Kosmetische Zusätze oder Veränderungen bei den weiblichen Probanden, wie beispielsweise Lidschatten, Wimperntusche oder Lippenstift werden belassen. Ebenso werden bei den männlichen Testpersonen Barthaare vor den Aufnahmen nicht entfernt. Lediglich Kopfschmuck wie Ohrringe, Piercings oder Kopfbedeckungen jeglicher Art müssen vor Beginn der Untersuchungsreihe abgelegt werden.

Längere Haare, die Gesicht oder Ohren bedecken, werden mittels Haarspangen oder Haarbändern zurückgebunden. Einzelne Strähnen oder insbesondere die Stirn bedeckende Haare stellen für die spätere Auswertung kein Ausschlusskriterium dar.

Hinsichtlich des Alters, der Haar- oder Augenfarbe wird keine spezielle Aufteilung der Testpersonen in verschiedene Gruppen vorgenommen. Lediglich für bestimmte Fragestellungen erfolgt später eine Trennung bezüglich der Geschlechtszugehörigkeit.

3.2. Methodik

3.2.1. Ablauf der Untersuchung

Der folgende Abschnitt beschreibt am Beispiel einer fiktiven Person X den Ablauf einer Untersuchung. Die genaue Vorgehensweise einzelner Schritte wird in den nachfolgenden Kapiteln detailliert dargestellt.

Inhalt dieser Arbeit ist es, eine normale Fotografie, welche naturgemäß zweidimensional abgebildet ist, mit einer dreidimensionalen Aufnahme zu vergleichen. Zunächst wird daher von Person X mit einer handelsüblichen Digitalkamera eine Serie von Fotografien aus verschiedenen Aufnahmewinkeln angefertigt (siehe Kapitel 3.2.2.). Die daraus resultierenden 19 Aufnahmen werden als *2-D-Bildsatz* gesichert. Nachfolgend wird von der gleichen Person schrittweise eine dreidimensionale Abbildung erzeugt (siehe Kapitel 3.2.3.), analog zu den Fotografien erfolgt eine Sicherung als *3-D-Bildsatz*.

Da sich die Formate der beiden Bildsätze unterscheiden, ist ein „Instrument“ notwendig, welches einen derartigen Bildvergleich ermöglicht. Eigens für dieses Vorhaben wurde im Vorfeld eine spezielle Software entwickelt. Mit Hilfe dieses Programms werden eine Aufnahme des 2-D-Bildsatzes (z.B. die Frontalaufnahme) sowie der komplette 3-D-Bildsatz der Person X nebeneinander geladen (siehe Kapitel 3.2.4). In einem ersten Schritt wird nun die dreidimensionale Abbildung mittels Computermaus manuell so gedreht und gewendet, bis die Ansicht (Projektion) augenscheinlich (unter optischer Kontrolle) der der Fotografie (=Referenz) entspricht. In einem zweiten Schritt wird unter Zuhilfenahme von sog. Landmarks und der Verwendung eines mathematischen Algorithmus eine computergestützte 3-D-Modellprojektion generiert, welche analog zum vorherigen Schritt die Ansicht der Fotografie abbilden soll.

Somit existieren nun für Person X sowohl ein manuell-ausgerichtetes 3-D-Modell sowie ein computergestützt-ausgerichtetes 3-D-Modell, jeweils unter Verwendung einer Aufnahme des 2-D-Bildsatzes als Vorlage.

Hiernach stellt sich hauptsächlich die Frage, wie genau die beiden 3-D-Modellprojektionen der Fotografieansicht tatsächlich entsprechen. Zur Beantwortung erfolgt mittels Bildbearbeitungsprogramm ein metrischer Vergleich (Bildanalyse) zwischen 3-D-Ansicht und Fotografie (siehe Kapitel 3.2.5.). Folgerichtig müssen **zwei** Vergleiche durchgeführt werden, zum einen zwischen manueller Ausrichtung und Referenzfotografie und zum anderen zwischen computergestützter Ausrichtung und Referenzfotografie. Die jeweils erhaltenen metrischen Daten werden in einem letzten Schritt zu einem pro Vergleich individuellen Parameter, dem Gesamtdifferenzierungsmaß, zusammengefasst (siehe Kapitel 3.2.6.). Letztendlich kann durch Gegenüberstellung der beiden Gesamtdifferenzierungsmaße entschieden werden, welche 3-D-Modellprojektion hinsichtlich metrischer Betrachtungsweise die präzisere darstellt: die manuelle oder die computergestützte.

Im Rahmen dieser Arbeit werden für alle 39 Probanden unter Verwendung der jeweiligen Frontalfotografie als Referenz eine manuelle und eine computergestützte 3-D-Modellansicht erzeugt und anschließend per Bildanalyse überprüft. Um nicht nur Ergebnisse über die Anpassungen an eine einzige Perspektive zu erhalten, wird in einer zweiten Untersuchungsreihe eine 20°-Seitenaufnahme (Sicht auf die rechte Gesichtshälfte) als Referenz verwendet. Aufgrund der enormen Datenmenge werden hierfür jedoch nur 20 Personen (10 männlich, 10 weiblich) aus dem Probandenkollektiv ausgewählt.

3.2.2. Erstellen der Fotografien

Alle Aufnahmen werden unter nahezu gleichen Rahmenbedingungen durchgeführt. Auf die Verwendung der Blitzfunktion wird verzichtet, fotografiert wird nur bei Tageslicht. Eine direkte Sonneneinstrahlung in den Untersuchungsraum liegt zu keinem Zeitpunkt vor (d.h. keine Blendung der Probanden).

Von jeder Person werden 19 standardisierte Fotografien angefertigt, wovon eine die Frontalperspektive darstellt. Die restlichen Bilder werden aus seitlich abweichenden Aufnahmewinkeln in 5°-Schritten angefertigt. So entstehen für jede Gesichtshälfte 9 Fotografien, jeweils aus Aufnahmewinkeln zwischen 5° und 45°.

Die Testpersonen nehmen auf einem höhenverstellbaren Stuhl Platz, an dessen Rückenlehne zur Fixierung des Hinterkopfes eine Halterung angebracht ist. Die Probanden werden angewiesen, bei der Aufnahme aus der Frontalperspektive direkt ins Kameraobjektiv zu schauen, bei den Fotografien aus seitlichem Winkel einen bestimmten, zuvor mit einem Kreuz markierten Punkt an der Wand (hinter der Kamera) zu fixieren. Als Stativ für die Digitalkamera (Modell: Fujifilm ® Fine Pix S6500 fd, maximaler optischer Zoom [Linsenbrennweite = 300 mm], Auflösung: 2848 × 2136 Pixel) dient eine am Boden befestigte Holzkonstruktion, welche alle Aufnahmen aus den zuvor beschriebenen Winkeln ermöglicht. Die Fotografien entstehen in einer Höhe von 135 cm und in einer Entfernung zum Probanden von etwa 355 cm (Anhang A, Konstruktionsplan). Während der Fotoserie wird darauf geachtet, dass die Probanden die festgelegte und eingenommene Position nicht mehr verändern. Bei unbeabsichtigten Veränderungen, z.B. der Kopfhaltung, wird die Fotoserie gänzlich neu angefertigt. Ferner werden die Testpersonen instruiert, einen möglichst neutralen und konstanten Gesichtsausdruck „einzunehmen“ und beizubehalten. Ein neutraler Gesichtsausdruck resultiert aus der subjektiven Nichtbeanspruchung der mimischen Muskulatur.

3.2.3. Erstellen der dreidimensionalen Modelle

Das Erstellen des räumlichen Modells erfolgt durch einen 3-D-Laserscanner von Konica Minolta ® (Vivid-910, Linsenbrennweite 14mm, Auflösung 640 x 480 pixel) und der entsprechenden Scan- und Bearbeitungssoftware (Konica Minolta ® Polygon Editing Tool; Version 2.21). Die Arbeitsweise des Geräts basiert auf Grundlage der sog. Lasertriangulation. Das heißt, eine Laserlinie wird mittels galvanischem Spiegel zeilenweise (von oben nach unten) über die Probanden bewegt. Durch Reflexion dieses Laserstrahles kann die interne CCD-Kamera den gescannten Bereich aufnehmen. Pro Aufnahme können 307 200 Messpunkte registriert werden, was einer Auflösung von 640 x 480 Pixeln entspricht. Gemäß den Herstellerangaben wird eine Abbildungsgenauigkeit im 0,1 mm – Bereich erreicht.

Der Laserscanner wird auf einen fahrbaren Untersatz montiert, auf welchem zur kompletten Ausleuchtung des Gesichts zwei schwache Halogen-Strahler (Goliath ®

Pro K1, 38 Watt) angebracht sind. Bei den Aufnahmen besteht zwischen Proband und Scanner ein konstanter Abstand von 100 cm (optimale Scan-Distanz gemäß Hersteller: 0,8 – 1,2 m). Jeder Kopf wird insgesamt aus drei Perspektiven aufgenommen (frontal, 45° links, 45° rechts). Mit der Bearbeitungssoftware (Konica Minolta ® Polygon Editing Tool; Version 2.21) werden die drei dabei entstehenden Einzelteile (Scanfragmente) zusammengefügt, so dass sich am Ende eine frei drehbare und komplett dreidimensionale Kopfnachbildung ergibt. Mit den Seitenaufnahmen soll gewährleistet werden, dass die seitlichen Gesichts- und Kopfpartien, wie Wangen und Ohren, komplett abgebildet sind, denn vor allem die Ohren besitzen hinsichtlich der Individualität einer Person einen herausragenden Stellenwert [BURKHARDT 1974, COWARD et al. 1997].

Das Zusammenfügen der Einzelfragmente erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird die Aufnahme aus der Frontalperspektive mit der Aufnahme der linken Gesichtshälfte kombiniert, danach das neu entstandene Fragment mit der rechten Gesichtshälfte zusammengefügt. Dazu müssen auf den verschiedenen Bildteilen je drei korrespondierende Punkte mittels Mausclick ausgewählt werden. Um sich diesen Arbeitsschritt zu erleichtern, wird jeder Proband vor den Scanneraufnahmen an individuellen Stellen mit sechs Styroporkügelchen (drei auf jeder Gesichtshälfte) versehen. Nach Erstellen des nun komplett dreidimensionalen Modellkopfes gibt die Bearbeitungssoftware zwei Fehlerwerte an, die aufgrund von Ungenauigkeiten beim zweistufigen Zusammenbau der Einzelfragmente entstehen (Anhang B, Tabelle 1).

3.2.4. Ausrichten des 3-D-Modells anhand der Fotografie

Zur computergestützten Ausrichtung eines dreidimensionalen Kopfes anhand einer Fotografie wurde von Dr. Jörg Haber (Bayerisches Landeskriminalamt) eine spezielle Software entwickelt. Dieses Programm ermöglicht es, zunächst sowohl das 3-D-Modell als auch eine der 19 Fotografien nebeneinander in zwei Bearbeitungsfenstern darzustellen. Hier besteht die Möglichkeit, die räumliche Abbildung mittels Computermaus in alle Richtungen frei zu drehen.

Unter Ausnutzung dieser Funktion wird der dreidimensionale Datensatz anhand der benachbarten Fotografie hinsichtlich der Kopfhaltung ausgerichtet. Die Ansicht der manuell angeglichenen Kopfprojektion wird anschließend über eine im Programm integrierte Snapshot-Funktion (Ansicht des 3-D-Modells wird abfotografiert) abgespeichert.

Zur Verwirklichung der computergestützten Anpassung müssen abwechselnd auf dem 3-D-Modell und der Fotografie korrespondierende Punktepaare gesetzt werden. Dazu bedient man sich 22 definierter Landmarks im Gesicht, wovon die meisten auch in der Anthropologie üblicherweise verwendet werden [FARKAS 1994]. Die zusätzlich definierten Punkte erhöhen die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Daten, außerdem wird der Software zur späteren Berechnung mehr Information zur Verfügung gestellt, was die Optimierung der zu berechnenden Kameraparameter vereinfacht (siehe unten). Bei den Anpassungen an die Frontalaufnahmen werden pro Abbildung jeweils 22 Landmarks verwendet, bei den Anpassungen an die Seitenaufnahmen (Sicht auf die rechte Gesichtshälfte) müssen jeweils zwei Landmarks, die sich auf dem nicht sichtbaren linken Ohr befinden, wegfallen. Im Folgenden sind die verwendeten Landmarks und deren Abkürzungen aufgelistet. Sofern die in der Arbeit und die in der anthropologischen Wissenschaft benutzten Landmarks übereinstimmen, findet sich noch die in der Anthropologie übliche Abkürzung in Klammer:

AEA	Äußere Augenbrauenbegrenzung links und rechts
IA	Innere Augenbrauenbegrenzung links und rechts
AeL (ex)	Äußerer Lidwinkel links und rechts, Zusammentreffen von lateralem Oberlid- und Unterlidrand
IL (en)	Innerer Lidwinkel links und rechts, Zusammentreffen von medialem Oberlid- und Unterlidrand
PM (p)	Pupillenmitte links und rechts

UN (sn)	Unterrand Nasenseptum
NF (al)	Nasenflügel links und rechts, weiteste laterale Ausdehnung der Nase
Ph (cph)	Philtrum links und rechts, höchste Stelle der Oberlippe als laterale Begrenzung der dazwischen liegenden Kerbe (Amorbogen)
MW (ch)	Mundwinkel links und rechts, laterales Zusammentreffen des Lippenrotes der Ober- und Unterlippe
KU (gn)	Kinnmitte Unterrand, Mitte der unteren Kinnkontur
UO (sba)	Unterrand Ohrläppchen links und rechts
OO (sa)	Oberrand Ohr links und rechts

Die 20 bzw. 22 Landmarks auf der Fotografie befinden sich nach dem Platzieren auf der sog. Bildebene, anschaulich in Form einer 2-D-Punktewolke. Sie besitzen daher zweidimensionale Koordinaten (Bildkoordinaten). Die entsprechenden Punkte auf dem 3-D-Modell hingegen liegen tatsächlich im dreidimensionalen Raum; so befindet sich z.B. ein Punkt auf einem Ohr weiter „hinten“ als ein Punkt auf der Nase. Die Landmarkkoordinaten besitzen folglich auch drei Dimensionen, folglich entsteht eine 3-D-Punktewolke.

Im nächsten Schritt müssen die beiden Punktewolken möglichst deckungsgleich miteinander arrangiert werden. Dazu berechnet die Software die (unbekannte) Position und Orientierung einer virtuellen Kamera, die die perspektivische Abbildung der 3-D-Punktewolke möglichst kongruent auf die 2-D-Punktewolke in der Bildebene projiziert. Ziel ist es, jene Konfiguration zu ermitteln, bei welcher der Projektionsfehler für alle korrespondierenden Punktpaare am stärksten minimiert wird. Die rechnerische Bewerkstellung dieses Vorgangs basiert auf einem von Roger Tsai entwickelten Algorithmus [TSAI 1986, TSAI 1987]. In einem iterativen Prozess berechnet das Programm Näherungswerte für die sog. intrinsischen (Brennweite) und extrinsischen (Position, Orientierung) Kameraparameter und bestimmt letztlich

die für die benutzte Kamera spezifischen Kenngrößen hinsichtlich deren Position, Orientierung und Brennweite. Durch die berechneten Parameter lässt sich nun eine Ansicht des 3-D-Modells generieren, welche optimal an die Ansicht der Fotografie angepasst ist. Den noch verbleibenden Projektionsfehler (gemittelter und maximaler Lageunterschied der korrespondierenden Landmarks sowie die Standardabweichung) gibt das Programm für jede computergestützte Anpassung in Pixel- und mm-Einheiten an (Anhang B, Tabellen 2 und 3).

Zu berücksichtigen ist jedoch, dass beim Generieren der virtuellen Fotografie des 3-D-Kopfes die radiale Verzerrung des (realen) Kameraobjektivs aus technischen Gründen nicht einberechnet werden kann. Durch diese Gegebenheit resultieren zwischen ausgerichtetem 3-D-Modell und Fotografie Konturdifferenzen vor allem der peripheren Gesichtspartien wie beispielsweise der Ohren. Während in der Fotografie Bildteile nahe der Bildmitte (der optischen Achse) nahezu unverzerrt dargestellt werden, wirkt sich die Verzerrung zum Bildrand hin stärker aus.

Zur Veranschaulichung zeigen die folgenden Abbildungen jeweils die manuelle sowie computergestützte Ausrichtung eines dreidimensionalen Probandenmodells anhand einer Frontlaufnahme (Abbildung 1) und einer Seitenaufnahme (Abbildung 2):



Abb.1: Anhand der in der Mitte dargestellten Frontalfotografie wird das 3-D-Modell zum einen manuell (links) und zum anderen computergestützt (rechts) ausgerichtet. Es ist erkennbar, dass sich die manuell-angepasste Modellansicht (links) hinsichtlich der Größe gegenüber der Referenzfotografie unterscheidet. Zum nachfolgenden metrischen Vergleich (Bildanalyse) zwischen den Abbildungen wird daher in einem nächsten Schritt zusätzlich eine Skalierung zur Größenanpassung vorgenommen (siehe Kapitel 2.3.5.).



Abb. 2: Dargestellt sind eine manuelle (links) und eine computergestützte (rechts) 3-D-Modellausrichtung anhand einer 20°-Seitenaufnahme (Mitte) als Referenz. Weniger deutlich als in der vorherigen Abbildung zeigt sich auch hier ein (marginaler) Größenunterschied zwischen Fotografie und manuell-angepasster Modellprojektion (links), der jedoch in einem nachfolgenden Arbeitsschritt per Skalierung noch ausgeglichen wird (siehe Kapitel 3.2.5).

Wie bereits am Ende des Kapitels 3.2.1. erwähnt, wird für alle 39 Probanden sowohl eine manuelle als auch eine computergestützte 3-D-Modell-Projektionsangleichung an die zugehörige Frontalfotografie durchgeführt. Für 20 Probanden aus dieser Gruppe wird zusätzlich eine 3-D-Modellausrichtung anhand einer 20°-Seitenaufnahme (Sicht auf die rechte Gesichtshälfte) vorgenommen.

3.2.5. Validierung des Anpassungsvorganges mittels computergestützter Bildanalyse

Untersucht werden muss nun, welche Anpassung zu späteren Identifikationszwecken geeigneter erscheint - die manuelle oder die computergestützte.

Alle im vorherigen Schritt angepassten und mittels Snapshot-Funktion abfotografierten 3-D-Kopf-Projektionen werden im Adobe ® Photoshop 6.0 neu geladen. Parallel hierzu wird die passende Fotografie aufgerufen. Jeder in dieser Arbeit durchgeführte Vergleichstest stellt eine Gegenüberstellung von Abbildungen identischer Personen dar. Inwiefern ein Anpassungsvorgang des Modellkopfes der Person A an eine Fotografie der Person B funktioniert, soll nicht Gegenstand dieser Untersuchung sein.

Pro Person und Aufnahmewinkel werden zwei metrische Vergleichstests durchgeführt:

1. manuell-ausgerichtetes Modell gegen Referenz (Fotografie)
2. computergestützt-ausgerichtetes Modell gegen Referenz (Fotografie)

Die zuvor bereits verwendeten und unter Kapitel 3.2.4. aufgelisteten Landmarks werden nun auf die Vergleichspaare – Modellansicht (manuell) und Referenz bzw. Modellansicht (computergestützt) und Referenz – gesetzt. Da der Photoshop über ein integriertes Koordinatensystem verfügt, lassen sich für jeden Landmark Koordinaten erheben und registrieren. Die Differenzen, die zwischen den paarweise erhobenen Koordinaten auftreten, werden pro Vergleichstest zu einer Gesamtdifferenz, dem sog. **Gesamtdifferenzierungsmaß** (siehe Kapitel 3.2.6.), summiert.

Um einen Vergleich der Abbildungen überhaupt zu ermöglichen, ist es zuvor jedoch notwendig sowohl in der Referenz- als auch in der Modellfotografie einen Nullpunkt zu definieren und eine Angleichung beider Bildgrößen durchzuführen.

Als Nullpunkt wird die tiefste Stelle der mittig liegenden Oberlippenkerbe (Amorbogen) gewählt. Mit diesem werden die restlichen Koordinaten verrechnet, um komparable (normierte) Daten zu erhalten [COWARD et al. 1997, BELLMANN 2004].

Zur Angleichung der Bildgrößen erfolgt eine sog. Skalierung [RECHE 1965, MAAT 1989, PORTER et al. 1998, PORTER et al. 2000] der **manuell** angepassten Modellprojektionen. An den Bildformaten selbst werden dabei keine Veränderungen vorgenommen. Zunächst werden anhand der Koordinaten in beiden Abbildungen jeweils folgende Strecken in x- und y-Richtung berechnet:

- | | | | | |
|----|------------|---|-----------|-----------------|
| 1. | IL rechts | - | IL links | (x-Koordinaten) |
| 2. | AeL rechts | - | AeL links | (x-Koordinaten) |
| 3. | NF rechts | - | NF links | (x-Koordinaten) |
| 4. | KU | - | UN | (y-Koordinaten) |
| 5. | UN | - | IL rechts | (y-Koordinaten) |
| 6. | UN | - | IL links | (y-Koordinaten) |

Die korrespondierenden Strecken werden zueinander ins Verhältnis gesetzt, die sechs resultierenden Maße gemittelt und ein pro Vergleichstest individueller Skalierungsfaktor bestimmt. Auch hier stellt die Fotografie die Referenz dar, die Größenangleichung erfolgt durch Multiplizieren der x- und y-Koordinaten des 3-D-Bildes mit dem errechneten Faktor.

Die eben beschriebene Skalierung kann sich nur auf den Vergleich zwischen manuell ausgerichtetem Kopf und Fotografie beziehen. Da durch den Tsai-Algorithmus die Brennweite der Kamera bestimmt und auf die virtuelle Fotografie des 3-D-Kopfes übertragen wird, entfällt beim Vergleich zwischen computergestützt-angepasster Modell-Projektion und Fotografie dieser Vorgang. Die Normierung der Koordinaten durch Festlegung des Nullpunktes wird jedoch auch hier vorgenommen.

3.2.6. Herleitung und Verwendung der Differenzierungsmaße

Wie bereits im vorherigen Abschnitt dargelegt, liegen sowohl zur Analyse der manuellen als auch der computergestützten Angleichungen der 3-D-Modell-Projektionen an die zugehörigen Fotografien komparable Koordinaten für jeden Probanden vor (siehe auch CD-ROM). Pro Person und Aufnahmewinkel werden insgesamt zwei Vergleichstests der Bildpaare vorgenommen.

Je Vergleich wird eine Gesamtdifferenz ermittelt, das sog. **Gesamtdifferenzierungsmaß $D(X;Y)$** , welches erstmals in der Arbeit von COWARD et al. [1997] praktische Anwendung fand. Es errechnet sich aus den Lageunterschieden der x- und y-Koordinaten der korrespondierenden Landmarks.

Dieses Maß gibt den Grad der metrischen Übereinstimmung zweier Abbildungen an. Je kleiner der Wert, desto metrisch ähnlicher sind sie sich [BELLMANN 2004].

Zwischen allen korrespondierenden Landmarks, so z.B. zwischen Unterrand Nasenseptum (UN) des 3-D-Modells und Unterrand Nasenseptum der Referenzfotografie, bestehen mehr oder weniger große Differenzen hinsichtlich ihrer Lage im Koordinatensystem:

$$DX_{UN}^{(i,j)} = |x_{UN}(i) - x_{UN}(j)| \quad \text{Differenz des Landmarks in x-Richtung}$$

$$DY_{UN}^{(i,j)} = |y_{UN}(i) - y_{UN}(j)| \quad \text{Differenz des Landmarks in y-Richtung}$$

$$DX,y_{UN}^{(i,j)} = \sqrt{(DX_{UN}^{(i,j)})^2 + (DY_{UN}^{(i,j)})^2} \quad \text{Gesamtdifferenz eines Punktpaares}$$

Die Parameter i und j stehen in den Gleichungen für die gegenübergestellten Gesichter. Da ein Vergleich nicht nur aus einem, sondern aus insgesamt 20 bzw. 22 Punktpaaren besteht, setzt sich letztlich das Gesamtdifferenzierungsmaß aus der Quadratwurzel der Summe der Quadrate aller Differenzen zusammen.

Die Formel für das **Gesamtdifferenzierungsmaß D(X;Y)** lautet somit:

$$D(X;Y) = \sqrt{(DX_{AEA_{re}}^2 + Dy_{AEA_{re}}^2) + (DX_{AEA_{li}}^2 + Dy_{AEA_{li}}^2) + \dots + (DX_{OO_{li}}^2 + Dy_{OO_{li}}^2)}$$

Analog hierzu wird noch getrennt eine Darstellung sowohl der x- als auch der y-Koordinaten angegeben (eindimensionale Differenzierungsmaße):

$$DX = \sqrt{(DX_{AEA_{re}}^2) + (DX_{AEA_{li}}^2) + (DX_{IA_{re}}^2) + \dots + (DX_{OO_{li}}^2)}$$

$$DY = \sqrt{(Dy_{AEA_{re}}^2) + (Dy_{AEA_{li}}^2) + (Dy_{IA_{re}}^2) + \dots + (Dy_{OO_{li}}^2)}$$

Die erhaltenen Werte sind ohne Einheit zu verstehen, da die verwendeten Landmarks als Koordinatenzahlen in die Rechnungen einfließen.

Das Gesamtdifferenzierungsmaß bzw. die x- und y-Differenzierungsmaße werden im Rahmen dieser Arbeit mehrfach verwendet. Wie bereits geschildert fungieren sie als quantitative Vergleichsparameter zur Feststellung der präziseren Anpassungsmethode (Kapitel 4.1. und 4.2.). Weiterhin wird in einer zusätzlich durchgeführten Untersuchungsreihe das Verhalten bzw. die zahlenmäßige Veränderung der Maße bei offensichtlich unpräziser Modellausrichtung aufgezeigt (Kapitel 4.3.). Eine solche Prozedur soll vor allem zur Veranschaulichung beitragen. Eine letzte Verwendung des Gesamtdifferenzierungsmaßes findet sich bei der Feststellung des sog. Bepunktungsfehlers, der beim Positionieren der Landmarks auf die Vergleichsabbildungen im Rahmen der Bildanalyse (vergleiche Kapitel 3.2.5.) auftritt. Hierzu werden zehnmal hintereinander auf zwei identische Fotografien jeweils 22 Landmarks gesetzt und anschließend (per Bildanalyse) das hieraus resultierende durchschnittliche Gesamtdifferenzierungsmaß bestimmt (Kapitel 4.3.).

3.3. Statistische Methoden

Im Rahmen dieser Arbeit werden die aus den Untersuchungen gewonnenen Daten mittels deskriptiver und analytischer Methoden untersucht. Im Einzelnen werden unter Nutzung des Statistikprogramms SPSS® 16.0 folgende Tests angewendet:

Zur **deskriptiven Darstellung** aller erhaltenen und anschließend kategorisierten Daten werden die entsprechenden Werte hinsichtlich ihres Mittelwertes, ihrer Spannweite, den Minima und Maxima sowie den Standardabweichungen untersucht. Die verwendeten Daten sind allesamt metrischer Natur.

Die aus den Untersuchungen resultierenden Ergebniswerte, insbesondere die Differenzierungsmaße, werden mittels **Kolmogorov-Smirnov-Test** auf Normalverteilung überprüft. Hinreichend normalverteilte Werte können somit zur Beantwortung bestimmter Fragestellungen weiteren analytischen Untersuchungen zugeführt werden (T-Test, siehe unten).

Zur Klärung, ob zwei unterschiedlich durchgeführte Anpassungsmethoden (manuell vs. computergestützt) bei der gleichen Person jeweils zu signifikant unterschiedlichen

Resultaten führen, wird der **T-Test bei gebundenen Stichproben** angewendet. Ferner wird mittels **T-Test bei ungebundenen Stichproben** ermittelt, inwiefern eine bestimmte Methode in unterschiedlichen Probandengruppen (hier männlich und weiblich) Unterschiede aufweist.

Weiterhin werden bestimmte Werte auf Zusammenhänge untersucht. Angewendet wird der **Korrelationstest nach Pearson**, der eine Aussage über Stärke und Signifikanz eines mutmaßlichen Zusammenhanges erbringt (Signifikanzniveaus und Korrelationskoeffizienten siehe unten). Zeigen sich unter bestimmten Variablen starke und wahrscheinliche Korrelationen, schließt sich eine **Regressionsanalyse** an. In dieser Arbeit wird nur auf einfach-lineare Regressionen hin untersucht.

Bei den zur Veranschaulichung aufgeführten grafischen Darstellungen handelt es sich um einfache Linien-, Balken- und Streu-Punkt-Diagramme.

Signifikanzniveaus:

Irrtumswahrscheinlichkeit:

$p > 0,05$

$p \leq 0,05$

$p \leq 0,01$

$p \leq 0,001$

Bedeutung:

nicht signifikant

signifikant

sehr signifikant

höchst signifikant

Korrelationskoeffizienten (nach Pearson):

Wert:

$\leq 0,2$

$\leq 0,5$

$\leq 0,7$

$\leq 0,9$

$> 0,9$

Interpretation:

sehr geringe Korrelation

geringe Korrelation

mittlere Korrelation

hohe Korrelation

sehr hohe Korrelation

4. Ergebnisse

4.1. Vergleich zwischen manueller und computergestützter Anpassung der 3-D-Modell-Projektionen an die Frontalaufnahmen

Beim Vergleich der Gesamtdifferenzierungsmaße der manuellen ($D(X;Y)$ -man) und der computergestützten ($D(X;Y)$ -auto) Anpassungen innerhalb des Probandenkollektivs (Anhang C, Tabelle 1) ergibt sich **in 35 von 39 Fällen ein geringeres Differenzierungsmaß des computergestützten Ausrichtens des 3-D-Kopfes**. Die vier davon abweichenden Fälle treten ausschließlich bei den weiblichen Probanden auf. Für den manuellen Vorgang ergibt sich ein durchschnittliches Differenzierungsmaß von 1,1267, für die halbautomatische (computergestützte) Verfahrensweise 0,7048. Dies entspricht einem Unterschied von 0,4219 (Abbildung 3).

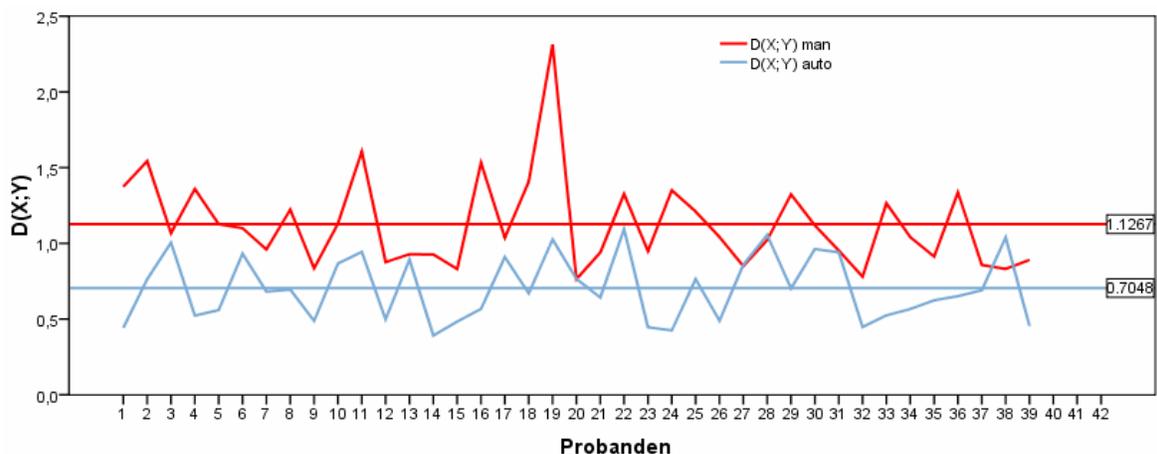


Abb. 3: Vergleich der Gesamtdifferenzierungsmaße $D(X;Y)$ der manuellen (man) und der computergestützten (auto) Anpassungen der 3-D-Modellansichten an die Frontalaufnahmen innerhalb des kompletten Probandenkollektivs. In vier Fällen zeigt sich ein niedrigeres Gesamtdifferenzierungsmaß seitens der manuellen Anpassungsvorgänge (Probanden 20, 27, 28 und 38).

Da die Gesamtdifferenzierungsmaße der manuellen und computergestützten Anpassungen im Kolmogorov-Smirnov-Test eine hinreichende Normalverteilung aufweisen (Anhang C, Tabelle 2), kann auf die $D(X;Y)$ -man- und $D(X;Y)$ -auto-Werte der T-Test bei gebundenen Stichproben angewendet werden (Anhang C, Tabelle 3).

Die Gesamtdifferenzierungsmaße $D(X;Y)$ -man und $D(X;Y)$ -auto weisen untereinander eine geringe Korrelation (Pearson-Korrelationskoeffizient = 0,2105, siehe Kapitel 3.3.) auf, jedoch präsentiert sich dieser Zusammenhang als nicht-signifikant ($p = 0,1983$). Der eigentliche T-Test zeigt einen **höchst signifikanten ($p = 0,0000$) Unterschied zwischen den Gesamtdifferenzierungsmaßen der manuellen und der softwaregestützten Anpassungsmethode**, sprich zwischen den beiden angewendeten Verfahren.

Bei Betrachtung der zugehörigen deskriptiven Statistik (Anhang C, Tabelle 4) zeigt sich, dass das Gesamtdifferenzierungsmaß des Vergleichs zwischen manuell angepasster 3-D-Modell-Projektion und Fotografie Werte zwischen 0,7638 und 2,312 annimmt, was einer Spannweite von 1,5482 entspricht. Analog hierzu beträgt die Spannweite der computergestützten D-Werte 0,7028, bei einem Minimum von 0,3915 und einem Maximalmaß von 1,0943. Als durchschnittlicher Projektionsfehler, der beim Kalibrieren der (virtuellen) Kamera im Rahmen der computergestützten Bildangleichung entsteht, errechnet sich ein noch verbleibender Lageunterschied der Landmarkmuster von 1,05 mm bzw. 6 Pixel. Die folgende Tabelle (Abbildung 4) zeigt zusammenfassend die wesentlichen Ergebnisse dieses Abschnitts:

	N	Spannweite	Minimum	Maximum	Mittelwert
$D(X;Y)$ -man	39	1,5482	0,7638	2,3120	1,1267
$D(X;Y)$ -auto	39	0,7028	0,3915	1,0943	0,7048
Kalibrierung (mm)	39	1,2	0,7	1,9	1,0462
Kalibrierung (pixel)	39	8,1	4,1	12,2	6,2513

Abb. 4: Ausschnitt der deskriptiven Statistik hinsichtlich der resultierenden Untersuchungsergebnisse bei den Anpassungsvorgängen aller 3-D-Modelle an die entsprechenden Frontalfotografien.

Die getrennte Untersuchung der männlichen und weiblichen Probanden bezüglich deren $D(X;Y)$ -Maße (Abbildung 5) ergibt, dass die auto-Werte der männlichen Probanden in allen Fällen kleiner als die entsprechenden Werte des manuellen Anpassungsvorganges sind. Beim weiblichen Probandenkollektiv zeigen sich die oben erwähnten vier Ausnahmen.

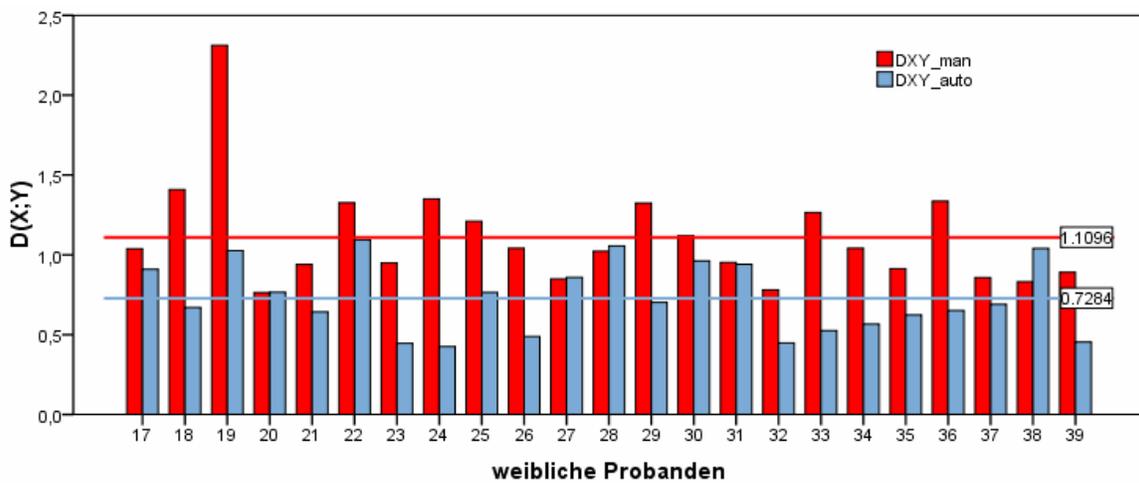
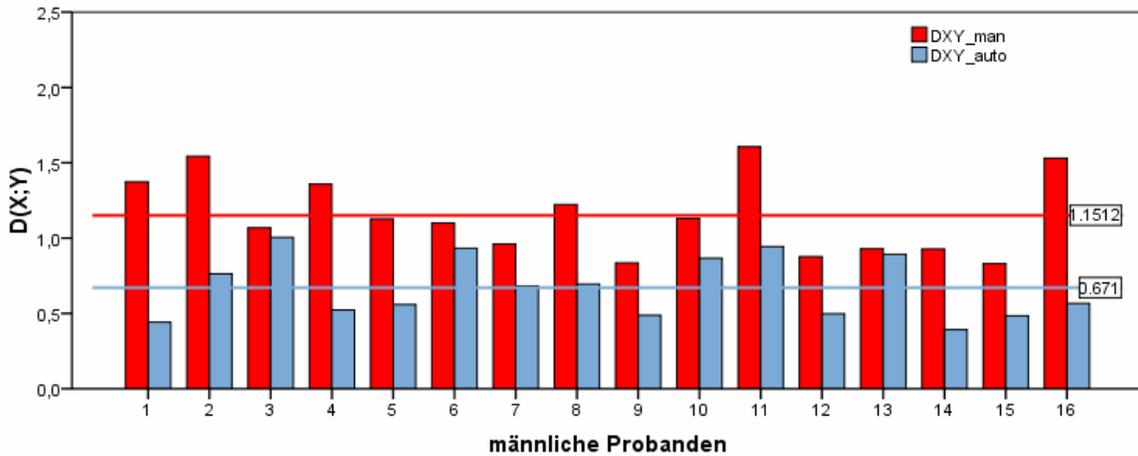


Abb. 5: Getrennte Darstellung der Gesamtdifferenzierungsmaße $D(X;Y)$ der männlichen bzw. weiblichen Probanden hinsichtlich deren 3-D-Modell-Anpassungen an die entsprechenden Frontalaufnahmen. Bei vier weiblichen Personen zeigen sich niedrigere manuelle Anpassungswerte (vergleiche Abb.3, S. 29).

Im Geschlechtervergleich (Anhang C, Tabellen 5 und 6) weisen die männlichen Testpersonen ein gegenüber den Frauen im Durchschnitt niedrigeres Gesamtdifferenzierungsmaß des Vergleiches „softwaregenerierte Modellansicht – Fotografie“ auf (0,671 vs. 0,7284). Umgekehrt ergibt sich bei der Gegenüberstellung „manuell angepasste 3-D-Modell-Projektion – Fotografie“ ein durchschnittlich niedrigeres Maß bei den weiblichen Probanden (1,1096 vs. 1,1512). Jedoch weisen die vermeintlich bessere softwaregestützte Ausrichtung der Männermodelle sowie die tendenziell bessere manuelle Ausrichtung der Frauenmodelle **keine signifikanten Geschlechtsunterschiede** bei gegebener Varianzhomogenität im T-Test bei ungebundenen Stichproben (Anhang C, Tabellen 7 und 8) auf ($D(X;Y)$ -auto männlich vs. weiblich: $p = 0,4140$; $D(X;Y)$ -man männlich vs. weiblich: $p = 0,6765$). Die Spannweite der manuellen Werte beträgt bei den Männern 0,7757, entsprechend

beläuft sich die Spannweite bei den Frauen auf 1,5482. Für die Gesamtdifferenzierungsmaße des computergestützten Anpassungsvorganges ergibt sich für die männlichen Testpersonen eine Spannweite von 0,613 im Vergleich zu 0,6687 bei den weiblichen Probanden. Die nachfolgende Tabelle (Abbildung 6) fasst die eben dargestellten Sachverhalte übersichtlich zusammen:

		N	Spannweite	Minimum	Maximum	Mittelwert
D(X;Y)-man	Männer	16	0,7757	0,8306	1,6063	1,1512
	Frauen	23	1,5482	0,7638	2,3120	1,1096
D(X;Y)-auto	Männer	16	0,6130	0,3915	1,0045	0,6710
	Frauen	23	0,6687	0,4256	1,0943	0,7284

Abb. 6: Ausschnitt der deskriptiven Statistik der resultierenden Untersuchungsergebnisse bei den Anpassungsvorgängen der männlichen und weiblichen 3-D-Modelle an die entsprechenden Frontalfotografien.

Die Gegenüberstellung der Methoden (man vs. auto) bezüglich der separat errechneten Differenzierungsmaße für die x- bzw. y-Werte (Abbildungen 7 und 8) zeigt für beide Dimensionen jeweils einen niedrigeren Durchschnittswert der computergestützten Methode. Die gemittelten Fehlerwerte beim manuellen Ausrichten des 3-D-Kopfes sind für beide Richtungen etwa gleichgroß, als DX-Maß ergibt sich 0,7728; als DY-Maß 0,7893. Die entsprechenden Werte des computergestützten Vorganges in x- bzw. y-Richtung differieren stärker und betragen 0,5432 (DX-Maß) bzw. 0,4409 (DY-Maß).

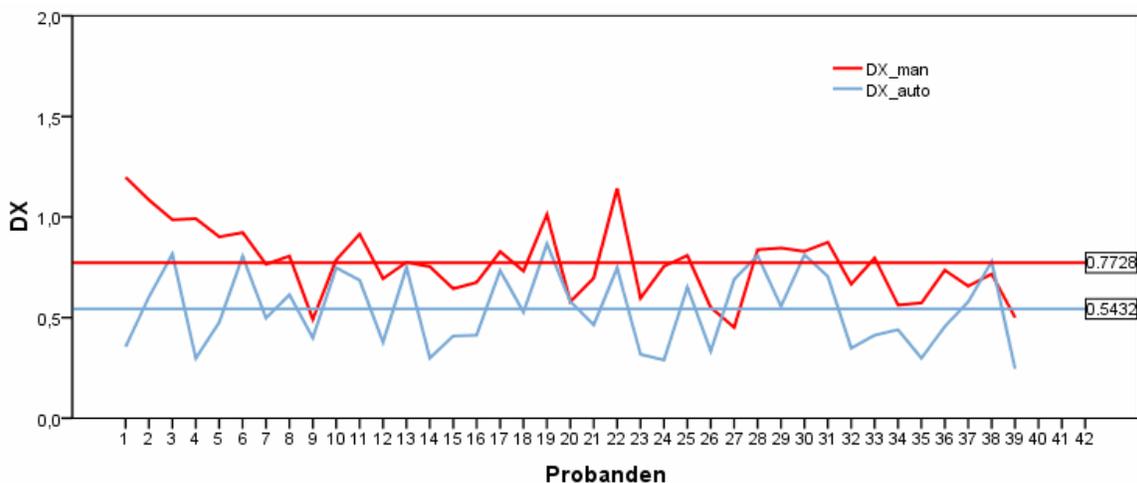


Abb. 7: Darstellung der Differenzierungsmaße in x-Richtung für das manuelle und das computergestützte Ausrichten des Modellkopfes an die Frontalaufnahmen.

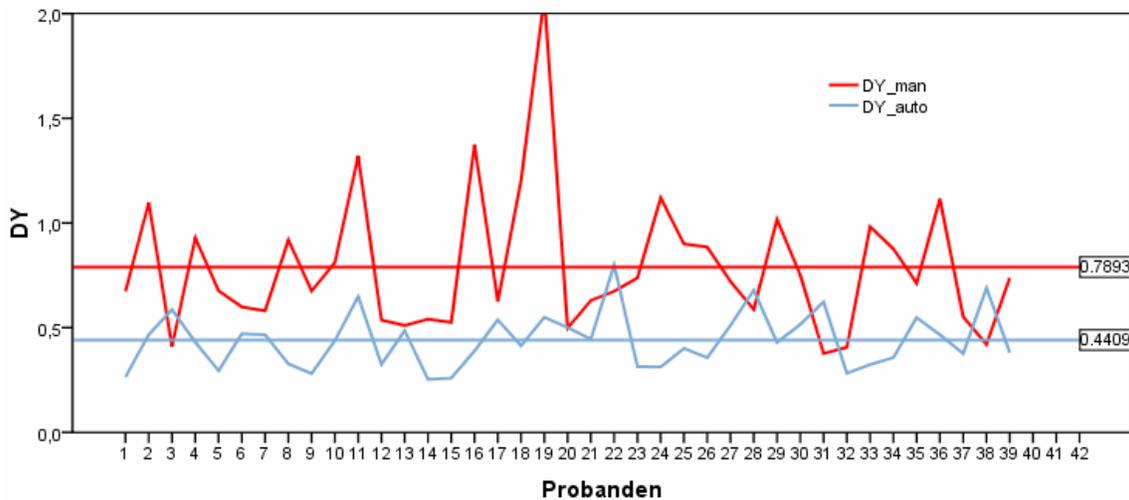


Abb. 8: Darstellung der manuellen und computergestützten Differenzierungsmaße in y-Richtung. Die Größenordnung des gemittelten manuellen DY-Wertes (0,7893) entspricht der des gemittelten manuellen DX-Wertes (0,7728, vergleiche auch Abb. 7, S. 32). Die computergestützten eindimensionalen Durchschnittswerte differieren stärker (DX = 0,5432, DY = 0,4409).

Weiterhin finden sich im Methodenvergleich größere Spannweiten der DX- und DY-Maße beim manuellen Anpassungsvorgang (Anhang C, Tabelle 4). Die größte Spannweite weist der DY-man-Wert auf (1,7017). Eine Übersicht ist in der folgenden Tabelle (Abbildung 9) dargestellt:

	N	Spannweite	Minimum	Maximum	Mittelwert
DX-man	39	0,7465	0,4511	1,1976	0,7728
DY-man	39	1,7017	0,3769	2,0786	0,7893
DX-auto	39	0,6198	0,2466	0,8664	0,5432
DY-auto	39	0,5464	0,2528	0,7992	0,4409

Abb. 9: Ausschnitt der deskriptiven Statistik hinsichtlich der eindimensionalen Differenzierungsmaße bei den Anpassungsvorgängen aller 3-D-Modelle an die entsprechenden Frontalfotografien.

Darüber hinaus werden Korrelationstests zwischen den x- und y-Differenzierungsmaße innerhalb einer Methode angewendet (Anhang C, Tabelle 9). DX-man und DY-man weisen einen sehr geringen (Pearson-Koeffizient = 0,1966) Zusammenhang auf, der darüber hinaus nicht-signifikant (p = 0,2302) erscheint. Hingegen zeigt das Vergleichspaar der computergestützten Methode, **DX-auto und DY-auto, einen Pearson-Korrelationskoeffizienten von 0,7109**, was einen hohen

Zusammenhang beschreibt. Der zugehörige p-Wert von 0,0000 typisiert diese Korrelation als höchst wahrscheinlich (höchst signifikant).

Um diesen Sachverhalt weiter zu beschreiben, erfolgt im nächsten Schritt eine Regressionsanalyse (Anhang C, Tabelle 10). Anhand der errechneten Parameter lässt sich folgende Regressionsgleichung aufstellen:

$$DY\text{-auto} = 0,5031 \times DX\text{-auto} + 0,1676$$

Als Wert für R^2 (Bestimmtheitsmaß) ergibt sich aus der Analyse 0,5054. Das heißt, etwa 50 % der Streuung der DY-Werte lässt sich durch lineare Abhängigkeit von DX „vorhersagen“. Das zugehörige Streu-Punkt-Diagramm (Abbildung 10) inklusive Regressionsgerade veranschaulicht den linearen Zusammenhang der x- und y-Differenzierungsmaße des computergestützten Anpassungsvorganges. Ebenfalls mit aufgeführt sind die Werte der manuellen Verfahrensweise, jedoch beträgt das entsprechende R^2 nur 0,039.

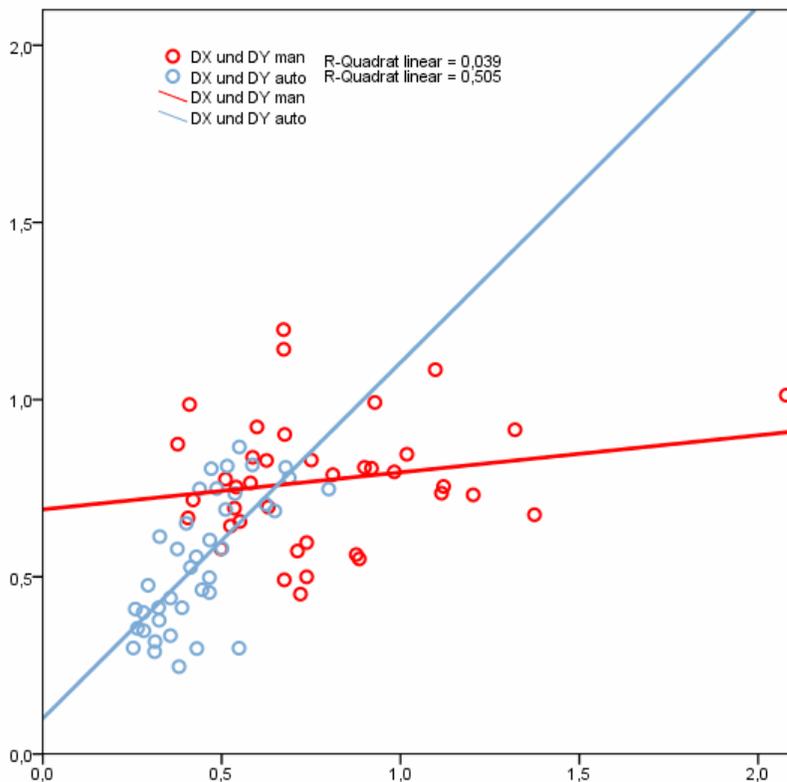


Abb. 10: Streu-Punkt-Diagramm der Regressionsanalyse zur Darstellung des linearen Zusammenhangs der x- und y-Dimension innerhalb einer Methode (man bzw. auto). Die aufgetragenen Geraden resultieren aus der jeweiligen Regressionsgleichung und dem Bestimmtheitsmaß R^2 der unterschiedlichen Verfahrensweisen.

Abschließend werden noch Korrelationstests (Typ Pearson) auf einige Variablenwerte der Anpassungsvorgänge der 3-D-Modell-Projektionen an die entsprechenden Frontalaufnahmen angewendet. Am Ende des Kapitels ist eine tabellarische Zusammenfassung der durchgeführten Tests dargestellt (Abbildung 11).

Zwischen den Gesamtdifferenzierungsmaßen der computergestützten Anpassungen und den Projektionsfehlern der virtuellen Kamerakalibrierung besteht ein signifikant ($p = 0,0147$) geringer Zusammenhang mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,3879 (Anhang C, Tabelle 11).

Zur Beurteilung, ob zwischen den Gesamtdifferenzierungsmaßen beider Methoden (man und auto) und den resultierenden Fehlern beim Zusammenfügen der Scanfragmente Verbindungen bestehen, werden letztere zur Summe aufaddiert (Scanfehler 1 + Scanfehler 2) und in den Korrelationstest eingebracht (Anhang C, Tabelle 12). Es ergeben sich für beide Tests - D(X;Y)-man mit Summe Scanfehler bzw. D(X;Y)-auto mit Summe Scanfehler - nicht signifikante, geringe Negativ-Korrelationen (Korrelationskoeffizienten: -0,1169 bzw. -0,005).

Der letzte Test prüft einen eventuell bestehenden Zusammenhang zwischen den Scanfehlerwerten (Summe Scanfehler) und der durchschnittlichen Lagedifferenz der Punktwolken beim Kalibrieren der virtuellen Kamera (mean (mm)). Es zeigt sich ein minimaler Korrelationskoeffizient von 0,0606, bei einem p-Wert von 0,7139 (Anhang C, Tabelle 13).

	Korrelation nach Pearson	Signifikanz	Interpretation
D(X;Y)-auto <u>und</u> Kalibrierung (mm)	0,3879	0,0147	Signifikant <u>geringer</u> Zusammenhang
D(X;Y)-auto <u>und</u> Summe Scanfehler	-0,0050	0,9758	Kein Zusammenhang erkennbar
D(X;Y)-man <u>und</u> Summe Scanfehler	-0,1169	0,4784	Kein Zusammenhang erkennbar
Kalibrierung (mm) <u>und</u> Summe Scanfehler	0,0606	0,7139	Kein Zusammenhang erkennbar

Abb. 11: Zusammenfassung der angewendeten Korrelationstests.

Da sich bei keinem Korrelationstest ein starker und signifikanter Zusammenhang präsentiert, wird auf weitere Regressionsuntersuchungen verzichtet.

4.2. Vergleich zwischen manueller und computergestützter Anpassung der 3-D-Modell-Projektionen an die Seitenaufnahmen

Analog zu den Auswertungen im vorherigen Abschnitt sind im Folgenden die Ergebnisse für den Vergleich zwischen manueller und computergestützter Ausrichtung der 3-D-Modelle an 20 Fotografien in 20°-Seitansicht aufgeführt.

Der Vergleich der Gesamtdifferenzierungsmaße (Anhang C, Tabelle 14) zeigt einen im Durchschnitt um 0,4281 höheren Wert für die manuellen Anpassungen (auto: 0,6747; man: 1,1028). **In 17 von 20 Fällen ergeben sich niedrigere Einzelwerte für die computergestützte Methode** (Abbildung 12).

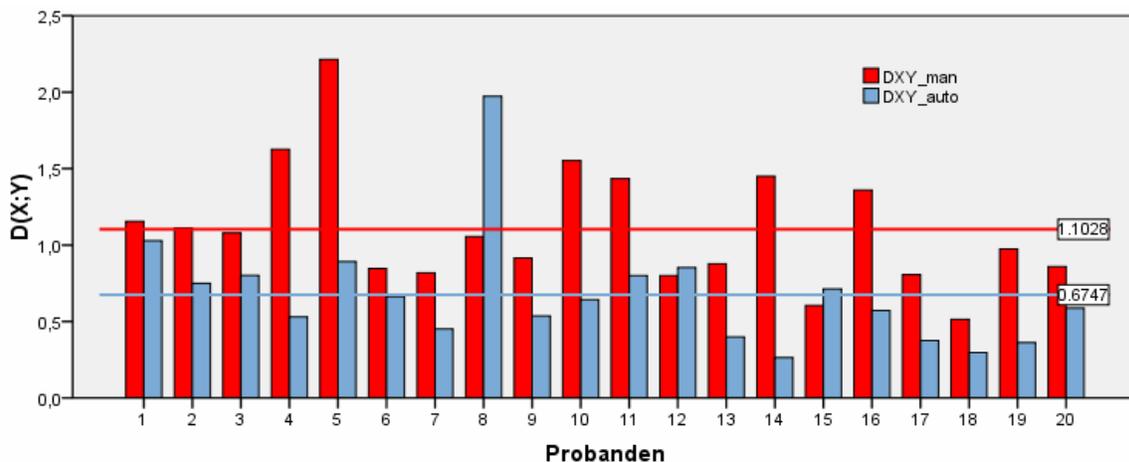


Abb. 12: Darstellung der Gesamtdifferenzierungsmaße $D(X;Y)$ der manuellen und computergestützten Ausrichtungen der 3-D-Modelle an die 20°-Seitenaufnahmen. In drei Fällen (Probanden 8, 12 und 15) ergeben sich niedrigere Werte seitens der manuellen Anpassungsvorgänge.

Für alle erhaltenen Differenzierungsmaße der Modellangleichungen an die 20°-Seitenaufnahmen wird wiederum der Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest durchgeführt (Anhang C, Tabelle 15). Da die Voraussetzung der Normalverteilung

gegeben ist, kann auch hier auf die Parameter $D(X;Y)$ -man und $D(X;Y)$ -auto der T-Test für gebundene Stichproben angewendet werden (Anhang C, Tabelle 16). Die Werte für die manuelle und computergestützte Methode erreichen zusammen einen Pearson-Korrelationskoeffizienten von 0,1521 bei einer Signifikanz von 0,5221. Beim T-Test ergibt sich **ein sehr signifikanter ($p = 0,0012$) Unterschied zwischen den Werten der beiden unterschiedlichen Methoden.**

Die deskriptive Statistik (Anhang C, Tabelle 17) zeigt, dass beide Methoden gleichartig hohe Spannweiten (man: 1,6986; auto: 1,7093) aufweisen. Der mittlere Lageunterschied der Punktwolken beim Kalibrieren der virtuellen Kamera beträgt 1,13 mm bzw. 7 Pixel. Eine kurze Zusammenfassung zeigt die folgende Tabelle (Abbildung 13):

	N	Spannweite	Minimum	Maximum	Mittelwert
D(X;Y)-man	20	1,6986	0,5149	2,2135	1,1028
D(X;Y)-auto	20	1,7093	0,2646	1,9739	0,6747
Kalibrierung (mm)	20	0,6	0,9	1,5	1,125
Kalibrierung (pixel)	20	4,2	5,3	9,5	6,875

Abb. 13: Ausschnitt der deskriptiven Statistik hinsichtlich der resultierenden Untersuchungsergebnisse bei den Anpassungsvorgängen der 3-D-Modelle an die entsprechenden Seitenaufnahmen.

Auch die Methodenvergleiche der separaten Differenzwerte in x- bzw. y-Richtung zeigen im Durchschnitt jeweils ein kleineres Maß der computergestützten Angleichungen (Abbildung 14):

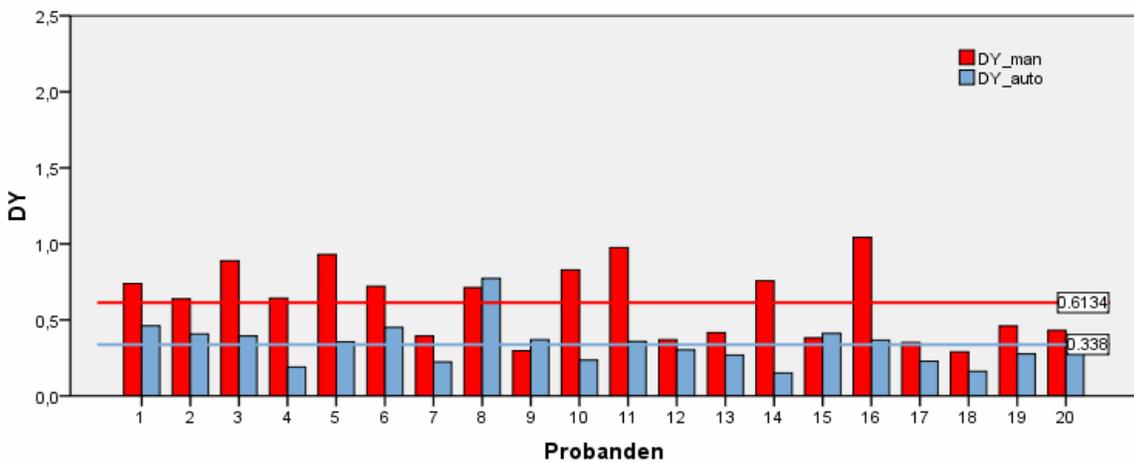
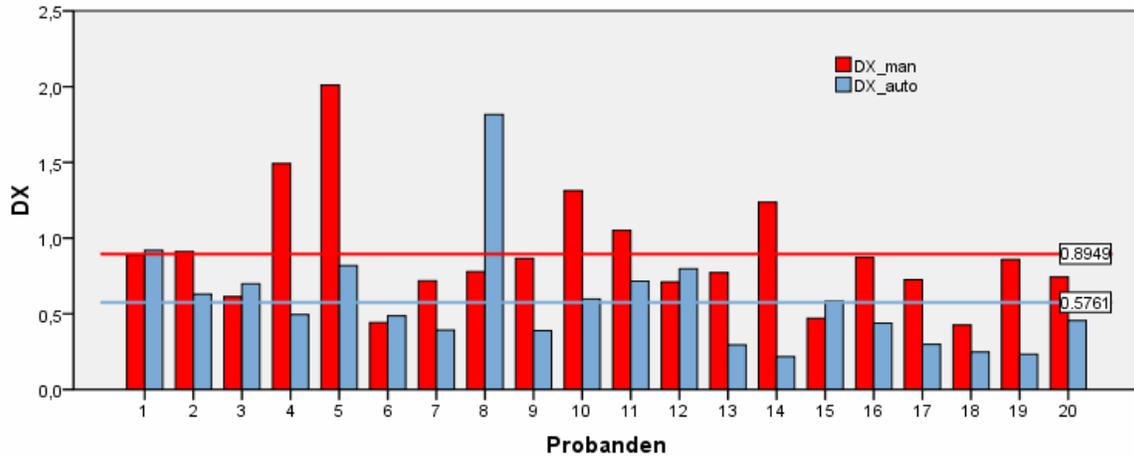


Abb. 14: Dargestellt sind die x- bzw. y- Differenzierungsmaße der beiden Methoden (man und auto). Es zeigt sich, dass innerhalb beider Methoden jeweils niedrigere Werte in y-Richtung resultieren ($DY_{man} < DX_{man}$, $DY_{auto} < DX_{auto}$).

Es ergibt sich im Mittel für das DX-Maß der manuellen Verfahrensweise ein Wert von 0,8949 im Vergleich zu 0,5761 für die Software-Methode (Differenz = 0,3188). Für die DY-Maße resultiert entsprechend ein Unterschied von 0,2754 bei einem gemittelten man-Wert von 0,6134 und einem auto-Wert von 0,338. Es zeigt sich somit, dass die Modellangleichung in y-Richtung für beide Methoden ein jeweils kleineres Differenzmaß aufweist. Anhand der deskriptiven Statistik (Anhang C, Tabelle 17) ist erkennbar, dass sowohl für den manuellen als auch für den computergestützten Anpassungsvorgang die Spannweiten der DX-Werte mit 1,5846 bzw. 1,5992 deutlich über denen der DY-Werte liegt (0,7526 bzw. 0,622). Eine tabellarische Kurzfassung dieser Auswertungen ist in der folgenden Übersicht gegeben (Abbildung 15):

	N	Spannweite	Minimum	Maximum	Mittelwert
DX-man	20	1,5846	0,4257	2,0103	0,8949
DY-man	20	0,7526	0,2898	1,0424	0,6134
DX-auto	20	1,5992	0,2168	1,8160	0,5761
DY-auto	20	0,6220	0,1517	0,7737	0,3380

Abb. 15: Ausschnitt der deskriptiven Statistik hinsichtlich der eindimensionalen Differenzierungsmaße bei den Anpassungsvorgängen der 3-D-Modelle an die entsprechenden Seitenaufnahmen.

Für die eindimensionalen Differenzwerte innerhalb einer Methode (man bzw. auto) werden gleichfalls Korrelationstests durchgeführt (Anhang C, Tabelle 18). Es zeigt sich, dass zwischen DX-man und DY-man ein Zusammenhang der Stärke 0,4902 (Typ Pearson) besteht, was einer geringen Korrelation entspricht ($p = 0,0282$; signifikant). Wesentlich stärker zeigt sich der **Zusammenhang der Differenzwerte der automatischen Verfahrensweise mit einem Pearson-Koeffizienten von 0,8418 (hohe Korrelation)**. Diese Verbindung präsentiert sich als **höchst signifikant ($p = 0,0000$)**.

Aufgrund des hohen Korrelationswertes erfolgt eine Regressionsanalyse der entsprechenden Parameter (Anhang C, Tabelle 19). Basierend auf den in der Analyse berechneten Werten lässt sich folgende Regressionsgleichung aufstellen:

$$DY\text{-auto} = 0,3273 \times DX\text{-auto} + 0,1494$$

Das Bestimmtheitsmaß (R^2) zur Beurteilung der Güte der Linearität zwischen DX-auto und DY-auto beträgt 0,7087. Die graphische Darstellung zur Veranschaulichung des linearen Zusammenhangs erfolgt wiederum mittels Streu-Punkt-Diagramm (Abbildung 16). Ebenfalls mit aufgeführt sind die eindimensionalen Differenzmaße des manuellen Anpassungsvorgangs ($R^2 = 0,24$).

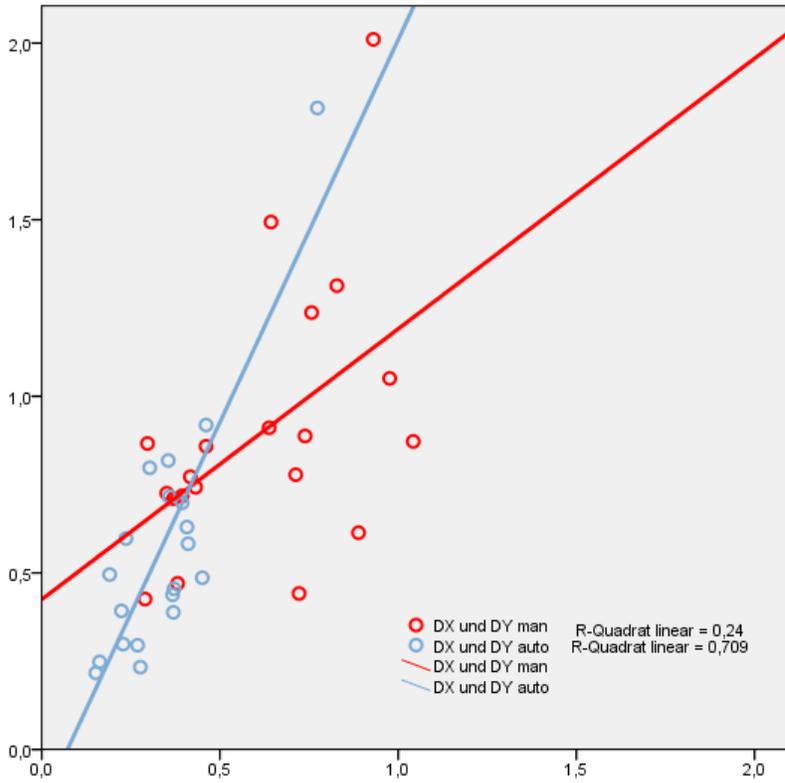


Abb. 16: Streu-Punkt-Diagramm zur Darstellung der Linearität zwischen den x- und y-Dimensionen innerhalb einer Methode (man bzw. auto) bei den Anpassungen an die Seitenaufnahmen. Das Bestimmtheitsmaß R^2 der x- und y- Werte der computergestützten Methode beträgt 0,7087.

4.3. Zusätzliche Untersuchungen

In diesem Abschnitt werden die am Ende von Kapitel 3.2.6. geschilderten zusätzlichen Untersuchungen behandelt.

Zur Veranschaulichung wird gezeigt, inwiefern sich das Gesamtdifferenzierungsmaß bei absichtlich abweichender Einstellung des 3-D-Kopfes im Vergleich zur in der Fotografie vorgegebenen Idealposition (hier Frontalaufnahme) verändert. Zunächst erfolgt eine computergestützte Ausrichtung des dreidimensionalen Modells anhand der entsprechenden Fotografie (Abbildung 17):

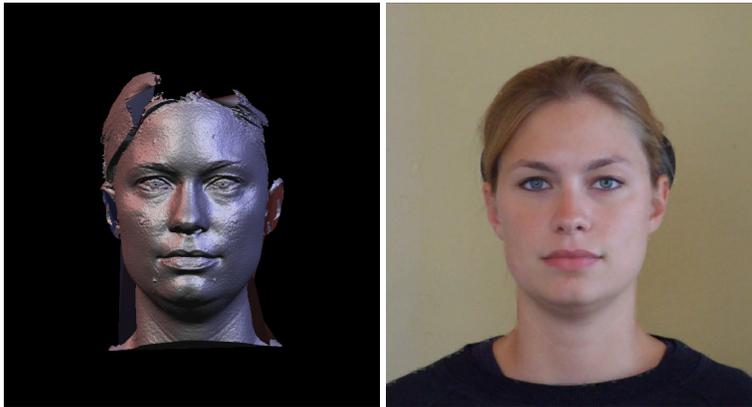


Abb. 17: Ergebnis einer computergestützten 3-D-Modell-Ausrichtung an die entsprechende Frontalfotografie.

Es errechnet sich hierbei bildanalytisch ein $D(X;Y)$ -Wert von 0,4462, das Differenzierungsmaß in x-Richtung beträgt 0,3170, in y-Richtung 0,3140. Im Folgenden wird der 3-D-Kopf so gedreht, dass er offensichtlich nach links, rechts, oben und unten blickt (Abbildung 18):



$D(X;Y) = 2,5460$ $D(X;Y) = 1,7554$ $D(X;Y) = 2,6704$ $D(X;Y) = 3,7202$
 $DX = 2,3036; DY = 1,0842$ $DX = 1,5638; DY = 0,7974$ $DX = 0,6004; DY = 2,6020$ $DX = 0,5452; DY = 3,6800$

Abb. 18: Darstellung der absichtlich von der Frontalfotografie abweichenden 3-D-Modellansichten. Die bei der Bildanalyse errechneten Gesamtdifferenzierungsmaße liegen über dem Referenzwert von 0,4462 (vergleiche Abb. 17). Die nach links bzw. rechts blickenden Köpfe weisen ein hohes Differenzierungsmaß in x-Richtung auf, die nach oben bzw. unten blickenden Köpfe einen hohen Wert in y-Richtung.

Bei Betrachtung der ermittelten Differenzierungsmaße (siehe Abbildung 18) ist festzustellen, dass diese sensibel auf Änderungen der Kopfhaltung reagieren. **Die perspektivischen Unterschiede zwischen den gedrehten Köpfen und der Referenzfotografie (in Abbildung 17) spiegeln sich entsprechend in den $D(X;Y)$ -Werten wider.** Es ist zudem ersichtlich, dass bei den Köpfen die nach links bzw. rechts blicken vor allem Differenzen zwischen den x-Koordinaten (DX-Werte) den hohen Abbildungsunterschied bedingen. Entsprechendes ist für die DY-Werte bei den nach oben bzw. unten blickenden 3-D-Modellen beobachtbar.

In einem weiteren Experiment wird zur Quantifizierung des „persönlichen Fehlers“, welcher beim Bepunkten der Abbildungen auftritt (Bepunktungsfehler), ein Bildvergleich zwischen **zwei identischen Fotografien** zehnmal hintereinander wiederholt und die jeweiligen Gesamtdifferenzierungsmaße bestimmt. Nach zehnmaligem Bepunkten zweier identischer Fotografien (Anhang C, Tabelle 20) zeigt sich als Durchschnittswert ein Gesamtdifferenzierungsmaß von 0,1281. Als Maß für die Lageunterschiede in x-Richtung ergibt sich 0,0907, in y-Richtung 0,0895.

Die Bedeutung der in diesem Abschnitt erhaltenen Resultate soll im nachfolgenden Diskussionsteil (Kapitel 5.4.) erörtert werden.

5. Diskussion

5.1. Hintergrund

Gegenwärtig steht der forensischen Sachverhaltserforschung eine Vielzahl an Möglichkeiten zur Identifizierung von Personen zur Verfügung. Neben der Fingerbildererkennung spielt vor allem der Vergleich von Bilddokumenten eine herausragende Rolle [BEHRENS et al. 2001]. Weltweit werden Gesichtsmerkmale aufgrund ihres hohen Informationsgehaltes und der individuellen Prägung zur Identifizierung eingesetzt [LEOPOLD 1998].

Der wissenschaftliche Vergleich von Gesichtern kann prinzipiell auf zwei verschiedene Arten erfolgen. Zum einen wird die Deskription einzelner morphologischer Merkmale eingesetzt [KEITER 1934, SCHADE 1968, GOLDSTEIN et al. 1971, RÖHM 1973, HAMMER et al. 1981, KNUSSMANN 1983, KNUSSMANN 1991, SCHWARZFISCHER 1992, PORTER et al. 1998, PORTER et al. 2000], zum anderen besteht die Möglichkeit, sich anthropometrischer Verfahrensweisen zu bedienen [STONER 1955, NEGER 1959, RECHE 1965, FURTMAYR 1971, HAUTVAST 1971, RÖHM 1973, LOVESEY 1974, FURTMAYR 1975, JÜRGENS 1978, FARKAS et al. 1980, JACOBSHAGEN 1980, HAMMER et al. 1981, FARKAS et al. 1987, CATTERICK 1992, ERICHSEN et al. 1993, FARKAS 1994, PORTER et al. 1998, PORTER et al. 2000, BEHRENS et al. 2001, HALBERSTEIN 2001, KREUTZ et al. 2002, JÜRGENS 2004, VERHOFF et al. 2006]. Welche Methode letztlich verwendet wird, ist unerheblich, solange sie der Voraussetzung der Vergleichbarkeit und der Überprüfbarkeit unterliegt [BRINKER 1985]. Nicht selten ist die Wahl wohl auch auf persönliche Präferenzen des Gutachters zurück zu führen.

In dieser Arbeit wird ein metrisches Verfahren eingesetzt, um einerseits den subjektiven Aspekt der deskriptiven Auswertung zurück zu drängen [JACOBSHAGEN 1980] und andererseits die Ergebnisse quantifizieren zu können. Grundsätzlich sind metrische Verfahren gegenüber deskriptiven Methoden als objektiver einzustufen [BELLMANN 2004].

Im Zuge des technischen Fortschritts tauchen zur Klärung von Identifizierungsfragen immer häufiger Experimente und Studien auf, die methodisch einen 3-D-Laserscanner einsetzen [COWARD et al. 1997, YOSHINO et al. 2002, YOSHINO et al. 2003, LU et al. 2005, OTTEN 2006, BUSCH et al. 2007, NOUAK et al. 2009]. Ziel dieser Projekte ist es, Verbesserungen und Fortschritte in der Personenerkennung zu erzielen.

Auch in der hier vorgestellten Arbeit soll ein Beitrag zur Identifizierungsthematik unter Nutzung der 3-D-Laserscan-Technik geleistet werden. Vor allem die Egalisierung von perspektivischen Problemen (Kameraposition, Aufnahmewinkel, Kopfhaltung), die beim (2-D-)Bild-Bild-Vergleich auftreten [FURTMAYR 1975, HAMMER et al. 1981, KUSSMANN 1983, MAAT 1989, CATTERICK 1992, PORTER et al. 1998, KNÄPPER 2002, LU et al. 2005, VERHOFF et al. 2006, BUSCH et al. 2007, HÄHNEL 2007, PRETZEL et al. 2007, NOUAK et al. 2009], ist Gegenstand der Untersuchung. Zur Ausblendung des bei Vergleichsgutachten häufig limitierenden Einflussfaktors „Perspektive“ wird eine speziell für diese Arbeit entwickelte Software verwendet, die die Angleichung einer 3-D-Modell-Projektion an eine Fotografie (der gleichen Person) bezüglich Kameraposition, Aufnahmewinkel und Kopfhaltung durchführt. Dabei interessiert vor allem, ob dieser computergestützte Anpassungsvorgang präziser funktioniert als ein von Hand durchgeführter Anpassungsvorgang.

5.2. Prinzipielle Eignung des Verfahrens unter Berücksichtigung der Voraussetzungen beim Bildvergleich

Beim wissenschaftlichen Vergleich zweier Gesichter sollten möglichst gleiche Medien (z.B. Fotografie vs. Fotografie) verwendet werden [JACOBSHAGEN 1980, KNUSSMANN 1996, RÖSING 1999]. Gerade beim Gebrauch anthropometrischer Methoden können Schwierigkeiten auftreten, wenn beispielsweise Messpunktübertragungen von einer Fotografie auf einen lebenden Menschen stattfinden [FARKAS et al. 1980, FARKAS 1994]. Durch Abfotografieren des 3-D-Modells entsteht in dieser Arbeit eine zur Normalfotografie kompatible Vergleichsdarstellung.

Der schon von Alphonse Bertillon geforderten Größenangleichung der Abbildungen wird durch Skalieren der Bildpaare Rechnung getragen. Während manche Autoren den Abstand beider Pupillen als Skalierungsstrecke verwenden [PORTER et al. 1998, PORTER et al. 2000], werden in der vorgestellten Versuchsreihe insgesamt sechs Strecken pro Abbildung gemessen und daraus ein gemittelter Skalierungsfaktor errechnet. Für die Hälfte aller Vergleiche (bei den Größenanpassungen der manuell angepassten Modellansichten an die Referenzfotografien) wird dieses Verfahren genutzt, bei allen übrigen Vergleichen übernimmt die speziell entwickelte Software beim Kalibrieren der (virtuellen) Kamera durch Errechnen der Brennweite die Größenanpassung.

Weiterhin sollen zum einen Differenzen bezüglich der Kamera- und Täterposition [RECHE 1965, MAAT 1989, CATTERICK 1992, PORTER et al. 1998, KNÄPPER 2002, KREUTZ et al. 2002, NOUAK et al. 2009] und zum anderen Unterschiede in der Kopfhaltung [FURTMAYR 1975, HAMMER et al. 1981, KNUSSMANN 1983, MADISON 1984, MAAT 1989, SCHWARZFISCHER 1992, LU et al. 2005, SCHOTT et al. 2006, VERHOFF et al. 2006, BUSCH et al. 2007, HÄHNEL 2007, PRETZEL et al. 2007, NOUAK et al. 2009] minimiert werden. Der in der Software verwendete Tsai-Algorithmus ermittelt iterativ die spezifischen Kenngrößen hinsichtlich Position, Orientierung und Brennweite der bei den Normalfotografien verwendeten Digitalkamera [TSAI 1986, TSAI 1987]. Durch Übertragung dieser Parameter auf die virtuelle Kamera stimmen die oben geforderten Voraussetzungen auf beiden zu vergleichenden Bilddokumenten überein. Schwieriger gestaltet sich diese Problemlösung beim manuellen Anpassungsvorgang. Hier kann lediglich durch Größenangleichung per Skalierung und Drehung des Modells zur Anpassung der Kopfhaltung die Ansicht auf beiden Abbildungen (3-D-Modell-Projektion und Fotografie) einander angeglichen werden, was den Eindruck gleicher Kamera- und Täterposition vermittelt. Der Vorteil des softwaregestützten Verfahrens liegt also darin, dass die oben genannten perspektivischen Einflussfaktoren (unterschiedliche Kopfhaltung, Kamera- und Täterposition) automatisch in einem Schritt verarbeitet bzw. beseitigt werden.

Um Störungen durch unterschiedliche Mimik zu vermeiden [KNUSSMANN 1983, SCHWARZFISCHER 1992, PORTER et al. 2000, HÄHNEL 2007], werden die

Probanden vor den Aufnahmen aufgefordert, einen möglichst neutralen und konstanten Gesichtsausdruck einzunehmen und beizubehalten.

Einen weiteren negativen Einflussfaktor beim Identifizieren stellen unterschiedliche Beleuchtungsverhältnisse auf den zu vergleichenden Abbildungen dar [KNUSSMANN 1983, MADISON 1984, KREUTZ et al. 2002, LU et al. 2005, BUSCH et al. 2007, PRETZEL et al. 2007]. Um dies zu umgehen, werden die Fotografien und die Gesichterscans im gleichen Raum bei gleichen Lichtverhältnissen (immer bei Tageslicht, keine direkte Sonneneinstrahlung) angefertigt. Auch wird auf die Benutzung der Blitzfunktion der Digitalkamera verzichtet.

Zum metrischen Bildvergleich werden sog. Landmarks verwendet. Dabei handelt es sich um in der anthropologischen Wissenschaft definierte Punkte im Gesicht, die sich häufig an knöchernen Strukturen orientieren und oft nur durch Tasten am Lebenden eruierbar sind [KNUSSMANN 1988, FARKAS 1994]. Die in der Arbeit zum Teil selbst festgelegten Landmarks zeichnen sich dahingegen durch leichte Erkennbarkeit auf Fotoabbildungen aus, was die Reproduzierbarkeit und Genauigkeit der erhaltenen Daten gewährleistet. Auch andere Autoren, wie beispielsweise COWARD et al. [1997] und BELLMANN [2004], haben sich neu definierten und ihrer Untersuchung angepassten Markerpunkten bedient. Zum Vergleich der Landmarkmuster auf den Abbildungen werden die einzelnen Punkte per Koordinatensystem determiniert und anschließend die Lageunterschiede zwischen korrespondierenden Landmarks ermittelt. Die rechnerische Ausführung erfolgt durch Verwendung des unter Kapitel 3.2.6. vorgestellten Gesamtdifferenzierungsmaßes $D(X;Y)$.

Die Verwendung von Landmarks zur Feststellung der Identität ist in unterschiedlicher Art und Weise auch von anderen Autoren bereits beschrieben worden. So werden beispielsweise korrespondierende anatomische Punkte verbunden und die erhaltenen parallelen, kon- und divergierenden Linien zur Identitätsfeststellung herangezogen [RECHE 1965]. FURTMAYR [1975] beschreibt das sog. Koordinaten-Diagramm-Verfahren (KDV), bei welchem ebenfalls über anatomisch topographische Messpunkte im Gesicht Hilfslinien angelegt werden. Die Überschneidungspunkte dieser Linien werden auf die x-Achse eines festgelegten Koordinatensystems übertragen, so dass durch die unterschiedlich ausfallenden Abstände auf der Achse

ein sog. Koordinatendiagramm entsteht. Koordinatendiagramme unterschiedlicher Abbildungen lassen sich nun einander gegenüberstellen. Des Weiteren besteht die Möglichkeit Strecken, Proportionen und Winkel auf verschiedenen Abbildungen zu bestimmen und diese untereinander zu vergleichen [STONER 1955, NEGER 1959, HAUTVAST 1971, JÜRGENS 1978, FARKAS et al. 1980, FARKAS et al. 1987, FARKAS 1994, BEHRENS et al. 2001, HALBERSTEIN 2001].

An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass die in der Arbeit durchgeführten Vergleiche jeweils die Gegenüberstellung eines 3-D-Modells und einer Fotografie **der gleichen Person** darstellen. Der Wert des Gesamtdifferenzierungsmaßes in dieser Arbeit gibt somit keine Auskunft darüber, ob von Identität oder Nicht-Identität gesprochen werden kann. Vielmehr ist er eine quantitative Angabe darüber, wie „groß“ die (metrische) Übereinstimmung bezüglich der Kameraposition, des Aufnahmewinkels und der Kopfhaltung ist. Ein evtl. hohes Gesamtdifferenzierungsmaß wäre lediglich eine Information darüber, dass ein großer perspektivischer Unterschied zwischen den Bildern besteht.

5.3. Vergleich zwischen manueller und computergestützter Anpassung der 3-D-Modell-Projektionen an die Fotografien

Die folgenden Überlegungen stützen sich auf Ergebnisse, die sich durch Vergleiche von Landmarkkoordinaten (bzw. Differenzierungsmaßen) ergeben. Inwiefern andere metrische oder deskriptive Vergleichsverfahren gleichartige oder gegensätzliche Interpretationen zulassen, ist nicht untersucht.

5.3.1. Anpassung an die Frontalaufnahmen

Es zeigt sich als Hauptergebnis dieser Untersuchung, dass die computergestützte 3-D-Modell-Ausrichtung in 35 von 39 Fällen ein kleineres Gesamtdifferenzierungsmaß als die manuelle Verfahrensweise aufweist. Demnach ist in 89,7% das Softwareverfahren hinsichtlich der perspektivischen Bildangleichung (an die jeweilige Frontalaufnahme) überlegen. Zudem zeigt der Vergleich der Differenzierungsmaße

beider Methoden einen durchschnittlich um 60% höheren Wert der manuellen Anpassungen (1,1267 vs. 0,7048). Zur Klärung, ob die niedrigeren Maße der Softwaremethode auf die unterschiedliche Verfahrensweise oder auf zufällige Werteschwankungen zurückzuführen sind, wird der T-Test für gebundene Stichproben auf das manuelle und das computergestützte Gesamtdifferenzierungsmaß angewendet. **Dabei ergibt sich ein höchst-signifikanter Unterschied zwischen den man- und auto-Werten, wodurch letztendlich zufällige Werteschwankungen ausgeschlossen werden können** (Anhang C, Tabelle 3).

Der Vergleich der Spannweiten verdeutlicht die größere Streuung beim manuellen Vorgehen (1,5482 vs. 0,7028). Markante Ausreißer, die die Spannweite letztlich determinieren, zeigen sich bei den Gesamtdifferenzierungsmaßen der computergestützten Angleichungen nicht (vergleiche charakteristischen Kurvenverlauf in Abbildung 3, S. 29). Bei jeder manuellen Anpassung wird versucht, die vorgegebene Fotografie bestmöglich nachzustellen; so wird die 3-D-Modell-Projektion erst dann abfotografiert (mittels Snapshot-Funktion), wenn zwischen beiden Abbildungen eine für das Auge fehlerfreie Übereinstimmung bezüglich der perspektivischen Komponenten besteht (optische Kontrolle). Dennoch kann es vorkommen, dass große (metrische) Bildunterschiede (vergleiche Proband 19, Anhang C, Tabelle 1, $D(X;Y)\text{-man} = 2,312$) vom menschlichen Auge nicht erfasst werden. Die Software hingegen verrechnet und assimiliert die vorgegebenen Landmarks bzw. deren Koordinaten und richtet hiernach das 3-D-Modell aus. Eine „optische Irreführung“ wie beim Menschen tritt nicht auf. Diese geringere „Störanfälligkeit“ der Software spiegelt sich letztlich in den zuvor genannten Spannweiten wider.

In vier Fällen (d.h. bei einer von zehn Personen) ergeben sich allerdings niedrigere und somit bessere $D(X;Y)$ -Werte beim manuellen Anpassen. Diese Ausnahmen sind allesamt den weiblichen Testpersonen zuzuordnen. Bei genauerer Betrachtung dieser Fälle zeigen sich jedoch nur geringfügig niedrigere $D(X;Y)\text{-man}$ -Werte (Abbildung 19):

	Proband 20	Proband 27	Proband 28	Proband 38
D(X;Y)-man	0,7638	0,8498	1,0225	0,8312
D(X;Y)-auto	0,7661	0,8588	1,0559	1,0400
Differenz	0,0023	0,0090	0,0334	0,2088

Abb. 19: Auflistung der Probanden mit niedrigeren Gesamtdifferenzierungsmaßen bei Anwendung der manuellen Anpassungsmethode.

Umgekehrt existieren auch Beispiele, bei denen die computergestützte Methode nur minimal bessere Werte aufweist (Abbildung 20):

	Proband 3	Proband 13	Proband 31
D(X;Y)-man	1,0683	0,9284	0,9523
D(X;Y)-auto	1,0045	0,8931	0,9408
Differenz	0,0638	0,0353	0,0115

Abb. 20: Auflistung der Probanden mit nur geringfügig niedrigeren Gesamtdifferenzierungsmaßen bei Anwendung der computergestützten Anpassungsmethode.

Wahrscheinlich kann in den aufgeführten Fällen bei Betrachtung der Differenzen von gleichwertigen Anpassungen ausgegangen werden. Dass jedoch gerade die eingangs erwähnten vier Ausnahmen beim weiblichen Personenkollektiv auftreten und dass sich generell bei den Frauen ein gegenüber den Männern im Durchschnitt niedrigeres Gesamtdifferenzierungsmaß des Vergleichs „manuell-ausgerichtetes 3-D-Modell – Fotografie“ (1,1096 vs. 1,1512) ergibt, muss vor Betrachtung der statistischen Auswertung diskutiert werden. Ein Erklärungsansatz für die bessere manuelle „Angleichbarkeit“ der Frauen könnte im typischerweise geschlechterdifferenten Phänotyp liegen. Oftmals dienen hervorstechende Haarbüschel, Locken und Strähnen als ideale Anhalts- und Vergleichspunkte zum Ausrichten des Frauenkopfes. Dieser „Haarvorteil“ konnte bei den meisten Männern nicht genutzt werden. Ein weiterer Erklärungsansatz wäre die Überlegung, inwieweit Frauengesichter symmetrischer als die hier betrachteten Männergesichter sind. Auch hierbei würde man von besseren optischen Anhaltspunkten profitieren. Interessanterweise zeigt sich bei den computergestützten Anpassungen ein tendenziell mänderspezifischer Vorteil. So beträgt das durchschnittliche Gesamtdifferenzierungsmaß der Gegenüberstellung „softwaregenerierte Modellansicht – Fotografie“ bei den männlichen Testpersonen 0,671, bei den weiblichen Testpersonen 0,7284.

Statistisch betrachtet zeigen die geschlechterspezifischen Besonderheiten keine signifikanten Unterschiede der Gesamtdifferenzierungsmaße (siehe Kapitel 4.1., S. 31). Auch in der vorliegenden Literatur konnte ein bewiesener Erklärungsansatz für dieses Phänomen nicht gefunden werden. Möglicherweise würde ein größerer Stichprobenumfang endgültig Aufschluss über die vermeintlichen Geschlechter-Trends geben, hier liegen jedoch zufällige Werteschwankungen vor.

Bei Betrachtung der separat errechneten Differenzierungsmaße der x- bzw. y-Werte weist wiederum die computergestützte Methode hinsichtlich beider Dimensionen einen jeweils niedrigeren Wert auf (siehe Abbildung 9, S. 33; DX: 0,5432 vs. 0,7728; DY: 0,4409 vs. 0,7893). Die möglichen Ursachen für die im Vergleich zu den DX-Werten geringer ausfallenden DY-Werte der computergestützten Methode werden unter dem Abschnitt 5.3.2. diskutiert. Auch zeigt die computergestützte Methode kleinere Werteschwankungen für beide Dimensionen (DX-Spannweite: 0,6198 vs. 0,7465; DY-Spannweite: 0,5464 vs. 1,7017). Vor allem die manuelle Einstellung in y-Richtung (Spannweite: 1,7017) gestaltet sich sehr variabel, demgegenüber erscheint die Modelleinstellung in x-Richtung konstanter (Spannweite: 0,7465). Das gleiche Phänomen wurde bereits von BELLMANN [2004] beschrieben. Die Ursache, weshalb sich das Ausrichten in x-Richtung stabiler gestaltet, könnte in der Symmetrie der linken und rechten Gesichtshälfte liegen. Zumindest ergeben sich hierbei mehr morphologische Orientierungspunkte (z.B. gleichmäßige Abbildung der Ohren) als zwischen oberer und unterer Gesichtshälfte. Laut PORTER et al. [2000] bedingen aber vor allem Fehlpositionen in der y-Achse Schwierigkeiten beim Identifizieren. Die hier verwendete Software umgeht gerade dieses „menschliche Orientierungsproblem“ durch die Verrechnung von Landmarkkoordinaten und weist ähnlich der Gegenüberstellung der D(X;Y)-Spannweiten (vorheriger Abschnitt) niedrigere Werte auf.

Zur Feststellung von eventuell bestehenden Zusammenhängen zwischen verschiedenen Variablen werden Korrelationstests angewendet. Die Prüfungen von Korrelationen in dieser Arbeit gehen vor allem der Frage nach, ob sich eine gewisse Systematik zwischen resultierenden und teilweise aufeinander aufbauenden Untersuchungsergebnissen herauskristallisiert. Kausale Zusammenhänge können jedoch anhand der angewendeten Korrelationstests nicht sicher bestätigt oder

verworfen werden. Vielmehr sollen bestimmte Tendenzen erkenntlich werden und zum Verständnis beitragen.

Als höchst-signifikant präsentiert sich der Zusammenhang zwischen DX-auto und DY-auto mit einer Stärke von 0,7109 (entspricht hoher Korrelation; Typ Pearson). Des Weiteren interessiert neben der Stärke auch die Art des Zusammenhangs. In dieser Arbeit werden mittels Regressionsanalyse und entsprechendem Streu – Punkt – Diagramm (Abbildung 10, S. 34) DX-auto und DY-auto auf einen linearen Zusammenhang hin untersucht. Die Abbildung zeigt, dass sich die aufgetragenen Differenzierungsmaße des computergestützten Vorganges an die ermittelte Regressionsgerade schmiegen. Das zugehörige Bestimmtheitsmaß (R^2) von 0,5054 weist darauf hin, dass sich bei bekannten DX-auto-Maßen etwa die Hälfte (50,54%) der DY-auto-Maße mittels Regressionsgleichung „vorhersagen“ lassen. Diese Sachverhalte lassen erkennen, dass sich die D-Werte in x- und y-Dimension beim computergestützten Vorgang in die gleiche Richtung entwickeln, die Software also einen Ausgleich bezüglich der Landmark-Lagedifferenzen in beiden Dimensionen errechnet. Das heißt, der Softwarealgorithmus erzwingt keinen niedrigen DX-Wert und riskiert somit eventuell einen hohen DY-Wert (oder umgekehrt). Diese gleichartige Nivellierung der Landmark-Lagedifferenzen in x- und y-Richtung überträgt sich auf die komplette 3-D-Modellansicht und generiert infolgedessen eine ausgleichende Kopfhaltung.

Im Gegensatz hierzu beträgt R^2 bei der Regressionsanalyse der DX- und DY-Maße der manuellen Methode nur 0,039. Eine Linearität zwischen den manuellen Maßen und somit eine gleichartige Richtungstendenz ist demnach nicht erkennbar. Entsprechendes zeigt sich bei Betrachtung des Streu – Punkt – Diagramms, auf welchem sich die sehr geringe Güte der Anpassung der Regressionsgeraden an die Variablenwerte abzeichnet. Gewissermaßen kann hier eine Parallelität zu den zuvor aufgestellten Vermutungen hinsichtlich der menschlichen „Störanfälligkeit“ gezogen werden. Da sich Abweichungen bei der Einstellung der 3-D-Modellposition in einer oder beiden Dimensionen (x- und/oder y-Richtung) dem Auge entziehen können (siehe oben), werden fehlerhafte Ansichten vom Benutzer akzeptiert. Es resultieren somit manuelle Modellpositionierungen, die entweder hohe DX-Maße bei niedrigem DY-Wert, hohe DY-Maße bei niedrigem DX-Wert oder gleichfalls hohe bzw. niedrige

x- und y-Maße aufweisen (= vier Konstellationen). Allen Konstellationen ist jedenfalls gemeinsam, dass sie Endresultate der manuellen Methode sind und vom Benutzer unter optischer Kontrolle als bestmögliche Anpassung gewertet werden. Anhand des R^2 -Wertes von 0,039 ist nun zu erkennen, dass vom Menschen kein systematischer Fehler (z.B. immer hohe Abweichung in x-Richtung bei geringer Abweichung in y-Richtung) begangen wird, vielmehr treten die vier Fehlerkonstellationen nebeneinander auf, weshalb letztendlich kein linearer Zusammenhang zwischen DX- und DY-man besteht. Eine bezüglich den x- und y-Koordinaten ausgleichende Kopfausrichtung ist durch Einstellung per Hand demnach schwer erreichbar.

Der Korrelationstest zwischen dem Gesamtdifferenzierungsmaß $D(X;Y)$ -auto und dem Durchschnittswert der Kamerakalibrierung (mean (mm)) geht der Frage nach, ob beispielsweise aus schlechter Übertragung der Kameraparameter auf die virtuelle Fotografie des 3-D-Modells (= Grundlage des computergestützten Anpassens) automatisch eine größere metrische Abbildungsverschiedenheit zwischen (computergestützt-angepasster) Modell-Projektion und Fotografie resultiert. Es zeigt sich tatsächlich ein signifikanter, jedoch nur geringer Zusammenhang zwischen beiden Variablen (Pearson-Korrelationskoeffizient = 0,3879). Rein hypothetisch wäre ein größerer Einfluss der Kamerakalibrierung auf das Gesamtdifferenzierungsmaß zu erwarten gewesen. Andererseits ist somit festzuhalten, dass aus einer „schlechten“ Kamerakalibrierung nicht unmittelbar eine schlechte 3-D-Modell-Ausrichtung resultiert. Ein hoher Kalibrierungsfehler kann demnach bei der Interpretation der Endergebnisse vernachlässigt werden.

Ebenso denkbar wäre, dass sich die Fehlerwerte, die beim Zusammenbau der 3-D-Modelle aus den Einzelfragmenten entstehen (siehe Kapitel 3.2.3), entweder auf das Kalibrieren der virtuellen Kamera oder auf die beim Bildvergleich errechneten Gesamtdifferenzierungsmaße (man und auto) auswirken. Rein statistisch betrachtet lassen sich keine Auswirkungen der von der Konica Minolta ® Software ausgegebenen Fehlerwerte auf die nachfolgenden Arbeitsschritte feststellen. Jedoch kann hierbei noch keine endgültige Aussage über die „Qualität“ der (zusammengesetzten) 3-D-Scans getroffen werden. Die „Qualität“ der Aufnahmen wird in dieser Arbeit als möglicher negativer Einflussfaktor deklariert und

entsprechend bei der Analyse der methodischen Fehler (Kapitel 5.4.) nochmals kritisch bewertet.

5.3.2. Anpassung an die Seitenaufnahmen

Analog zur Anpassung der Modell-Projektionen an die Frontalaufnahmen zeichnet sich auch hier eine Überlegenheit der computergestützten Angleichungsmethode ab. In 17 von 20 Fällen (85%) weist das Gesamtdifferenzierungsmaß $D(X;Y)$ -auto einen niedrigeren Wert auf. Im Durchschnitt liegen die Werte der manuellen Vorgehensweise etwa 61% über den Werten der Softwaremethode (auto: 0,6747; man: 1,1028). Beim T-Test für gebundene Stichproben ergibt sich wiederum ein sehr signifikanter Unterschied zwischen den Werten für $D(X;Y)$ -man und $D(X;Y)$ -auto. **Gleichfalls zur Feststellung im vorherigen Abschnitt kann der Unterschied hier auf die differente Methode zurückgeführt werden.** Zwar erscheinen im Vergleich zur Anpassung an die Frontalaufnahmen die Gesamtdifferenzierungsmaße für beide Methoden (man und auto) geringer (Frontalaufnahmen: man 1,1267, auto 0,7048; Seitenaufnahmen: man 1,1028, auto 0,6747), jedoch ist für beide Versuchsreihen (Frontal- und Seitenaufnahme) die methodische Differenz $D(X;Y)$ -man – $D(X;Y)$ -auto nahezu identisch. Bei den Frontalaufnahmen errechnet sich ein Unterschied von 0,4219, bei den Seitenaufnahmen 0,4281. Diese Differenz von 0,42 bzw. 0,43 zeigt den gesamtheitlichen Unterschied zwischen manueller und computergestützter Anpassungsmethode auf. Die Hauptresultate der Anpassungen an die Frontal- und Seitenaufnahmen sind tabellarisch in der folgenden Abbildung (Abbildung 21) dargestellt:

	Methode	N	$D(X;Y)$ - Mittelwerte	D-Wert-Differenz	T-Test-Signifikanz
Anpassungen an Frontalaufnahmen	manuell	39	1,1267	0,4219	0,0000
	computergestützt	39	0,7048		
Anpassungen an Seitenaufnahmen	manuell	20	1,1028	0,4281	0,0012
	computergestützt	20	0,6747		

Abb. 21: Gegenüberstellung der unterschiedlichen Methoden bei den Modellanpassungen an die Frontal- und Seitenaufnahmen.

Bezüglich der Wertestreuung der Gesamtdifferenzierungsmaße zeichnet sich ein erheblicher Unterschied zum vorherigen Abschnitt ab. Während sich bei den Frontalaufnahmen eine mehr als doppelt so große Spannweite der manuellen Methode (1,5482) gegenüber der Softwaremethode (0,7028) zeigt, was auf die geringere Störanfälligkeit des Programms zurückgeführt wurde, präsentieren sich hier beide Spannweiten ähnlich hoch (man: 1,6986; auto: 1,7093). Die Betrachtung der Einzelwerte (Anhang C, Tabelle 14) verdeutlicht den Grund der hohen Wertestreuung der computergestützten Methode. Proband 8 weist ein $D(X;Y)$ -auto-Maß von 1,9739 auf, welches um 0,9459 über dem zweit höchsten auto-Maß liegt (Proband 1: 1,028). Die Ausklammerung von Proband 8 ergäbe eine Spannweite von 0,7634, wodurch Verhältnisse ähnlich dem vorherigen Abschnitt hergestellt würden. Jedoch zeigt gerade dieses eine hohe Gesamtdifferenzierungsmaß die Grenzen der computergestützten Verfahrensweise auf. Wahrscheinlich ist der hohe $D(X;Y)$ -auto-Wert bei Proband 8 nicht auf einen Berechnungsfehler der Software zurückzuführen. Vielmehr besteht die Möglichkeit, dass in einem solchen Fall ein oder mehrere Landmarks sehr ungenau gesetzt wurden. Letztendlich verwendet die Software alle Punkte (eben auch „falsche“) und errechnet eine hierfür optimale Position der Landmark-Wolke, aus welcher schließlich eine unpräzise 3-D-Modellansicht resultieren kann.

Die Ergebnisse der separat errechneten eindimensionalen Differenzierungsmaße (DX und DY) spiegeln insgesamt die Problematik dieser Versuchsreihe wider. Da das 3-D-Modell anhand einer Seitenaufnahme ausgerichtet wird, müsste sich erwartungsgemäß der Hauptfehler in den DX -Werten zeigen. Diese Vermutung trifft sowohl für die manuelle, als auch computergestützte Methode zu. In beiden Verfahren ist das Differenzierungsmaß in y -Richtung jeweils kleiner (DX -man: 0,8949; DY -man: 0,6134; DX -auto: 0,5761; DY -auto: 0,338). Weshalb sich auch ein besserer y -Wert bei den computergestützten Anpassungen abzeichnet, sollte diskutiert werden, zumal sich auch bei den Angleichungen an die Frontalaufnahmen ein tendenziell besserer DY -Durchschnittswert zeigt (DX -auto: 0,5432; DY -auto: 0,4409). Ein Erklärungsansatz dieses Phänomens könnte in der Verteilung der gewählten Landmarks liegen. Die Ausdehnung des Punktemusters in x -Richtung (rechtes Ohr – linkes Ohr bzw. linke äußere Augenbraue) gestaltet sich weiter als die Ausdehnung in y -Richtung (Augebrauen – Kinnunterrand). Hierdurch wirkt sich eine

Kopfdrehung zur Seite stärker auf die x-Koordinaten der peripheren Ohrenlandmarks als eine gleichartige Kopfkippung nach vorne oder hinten auf die y-Koordinaten der Augebrauenpunkte bzw. des Kinnunterrandpunktes.

Analog zum vorherigen Kapitel zeigt sich zwischen den eindimensionalen Differenzierungsmaßen (DX und DY) der computergestützten Methode eine hohe Korrelation (Pearson-Korrelationskoeffizient: 0,8418), die sich statistisch höchstsignifikant ($p = 0,0000$) darstellt. Die Regressionsanalyse ergibt ein Bestimmtheitsmaß von 0,7087, im dazugehörigen Streu – Punkt – Diagramm (Abbildung 16, S. 40) ist ein linearer Zusammenhang zwischen den aufgetragenen Variablen erkennbar. Deutlicher als in der vorherigen Versuchsreihe präsentiert sich hier zum einen die Vorhersagekraft (von DY-auto bei bekanntem DX-auto) von knapp 71% und zum anderen die im Streu – Punkt – Diagramm dargestellte Anpassung der Geraden an die Werte. Die größere Werteverianz der manuellen DX- und DY-Werte lässt sich ebenfalls aus der Abbildung erschließen, auch das zugehörige R^2 von 0,24 lässt einen linearen Zusammenhang kaum vermuten.

Zwischen den Anpassungen an die Frontalaufnahmen und den Anpassungen an die Seitenaufnahmen zeigen sich weitestgehend grundsätzliche Gemeinsamkeiten. **Als Schlussfolgerung ist festzuhalten, dass die Softwaremethode bezüglich aller Differenzierungsmaße der manuellen Methode überlegen ist.** Hinsichtlich der ersten beiden in der Einleitung (Kapitel 2) gestellten Fragen:

1. Ist es möglich, mittels der eigens hierfür entwickelten Software ein 3-D-Modell anhand einer Fotografie auszurichten?
2. Kann der computergestützte Anpassungsvorgang die Fotografie hinsichtlich der Perspektive präziser nachstellen als die manuelle Vorgehensweise?

sollte eine hinreichende Beantwortung erfolgt sein.

Zu berücksichtigen aber ist, dass die manuellen Anpassungsvorgänge ohne Hilfsmittel wie beispielsweise Bildraster oder Orientierungsgeraden durchgeführt werden. Andererseits lässt sich über die Genauigkeit des manuellen Ausrichtens

eines dreidimensionalen Kopfes mit Hilfe von Bildrastern oder ähnlichem keine zweckmäßige Literatur finden.

5.4. Differenzierung zwischen perspektivischen Abbildungsunterschieden und methodisch bedingten Fehlern

Wie bereits in der Einleitung dargestellt, können differente **perspektivische** Ansichten auf zwei zu vergleichenden Abbildungen, beispielsweise durch unterschiedliche Kopfhaltungen, zu Schwierigkeiten bei der Identifizierung führen [FURTMAYR 1975, HAMMER et al. 1981, SCHWARZFISCHER 1992, VERHOFF et al. 2006, BUSCH et al. 2007, HÄHNEL 2007, PRETZEL et al. 2007, NOUAK et al. 2009]. Zur Bestätigung dieses Sachverhaltes und Prüfung der Übertragbarkeit auf das in dieser Arbeit verwendete Gesamtdifferenzierungsmaß wurde in Kapitel 4.3. eine zusätzliche Untersuchungsreihe aufgeführt. Es hat sich hierbei erwartungsgemäß gezeigt, dass sich nach absichtlich fehlerhaftem Ausrichten des Modellkopfes deutlich höhere $D(X;Y)$ -Werte ergeben.

Demnach kann davon ausgegangen werden, dass sich nach manuellen oder computergestützten Anpassungsvorgängen noch vorhandene perspektivische Unterschiede in den Ergebnissen (den Differenzierungsmaßen) niederschlagen. Zur Beantwortung der dritten in der Einleitung gestellten Frage:

3. Ist es möglich, bei der am Ende eines Bildvergleiches resultierenden Differenz zwischen perspektivischen Abbildungsunterschieden und methodisch bedingten Fehlern zu unterscheiden?

müssen nun noch die methodisch bedingten Fehler bzw. Einflussfaktoren erfasst, diskutiert und deren Auswirkungen auf die Ergebnisse analysiert werden. Zunächst ist es sinnvoll, eine kategorische Aufteilung der einzelnen Komponenten vorzunehmen:

- Bepunktungsfehler
- Mimik
- Beleuchtungsverhältnisse
- Kosmetik
- „Qualität der 3-D-Modelle“
- Radiale Linsenverzeichnung

Als erstes gilt es den **Bepunktungsfehler** zu betrachten, der beim Setzen der Landmarks auf die beiden Abbildungen (3-D-Modell und Fotografie) im Rahmen der computergestützten Bildanalyse entsteht (siehe Kapitel 4.3.). Es ist notwendig diesen Fehler zu quantifizieren, da pro Vergleich (am Beispiel der Frontalperspektive) 44 von Hand gesetzte Landmark-Koordinaten (22 Punkte im 3-D-Modell, 22 Punkte in der Fotografie) in die Berechnung des Gesamtdifferenzierungsmaßes einfließen. Hinsichtlich der Reproduzierbarkeit dieser Punkte ist bereits beschrieben worden, dass starke Differenzen in allen Dimensionen auftreten können [COWARD et al. 1997]. Nach wiederholtem Setzen der Landmarks auf zwei identische Fotografien und konsekutiv ermittelten Differenzierungsmaßen zeigt sich ein Durchschnittswert von 0,1281. Das heißt, ohne dass eine metrische Ungleichheit vorliegt, resultiert aus dem „ungenauen“ Positionieren der Landmarks bereits ein Gesamtdifferenzierungsmaß von 0,1281. Dieser Sachverhalt erklärt zum einen, warum sich bei keinem Abbildungsvergleich ein $D(X;Y)$ -Wert von Null zeigt und zum anderen, dass alle in dieser Arbeit berechneten Gesamtdifferenzierungsmaße nach unten korrigiert werden müssten. Jedoch ist dieser Fehlerwert (0,1281) nicht einfach von allen Gesamtdifferenzierungsmaßen subtrahierbar. Eindeutiger wäre ein Bepunktungsfehler, der sich nach mehrfachem Bepunkten einer Fotografie und einer absolut identischen 3-D-Modellansicht ergäbe. Jedoch existiert ein derartiges 3-D-Abbild nicht bzw. kann nicht sicher beurteilt werden, welche (manuelle oder computergestützte) angepasste Modell-Projektion eine solche identische Referenz darstellt. Letztendlich kann aus diesem Grund der reale Bepunktungsfehler nicht präzise quantifiziert werden, doch gibt der hier errechnete Fehlerwert von 0,1281 zumindest eine Information über die ungefähre Größenordnung.

Unterschiede in der **Mimik** stellen beim Bildvergleich einen negativen Einflussfaktor dar [KNUSSMANN 1983, SCHWARZFISCHER 1992, PORTER et al. 2000, HÄHNEL

2007]. Da in dieser Untersuchung Fotografie und 3-D-Scan zweizeitig erstellt werden, können geringe Differenzen hinsichtlich der beanspruchten Gesichtsmuskulatur zu Abweichungen der Lage der Landmarks führen [KNUSSMANN 1983]. Die Probanden werden jedoch vor den Aufnahmen instruiert einen neutralen Gesichtsausdruck einzunehmen und möglichst ohne Veränderung beizubehalten. Da auch in der späteren Bearbeitung der Abbildungen keine wesentlichen mimischen Unterschiede zu erkennen waren, ist von einer untergeordneten Bedeutung dieses Einflussfaktors auszugehen.

Ein weiteres häufiges Problem bei der Feststellung der Identität einer Person stellen schlechte **Lichtverhältnisse** bzw. Unterschiede der **Beleuchtungsverhältnisse** auf den Vergleichsabbildungen dar [KNUSSMANN 1983, MADISON 1984, KREUTZ et al. 2002, LU et al. 2005, BUSCH et al. 2007, PRETZEL et al. 2007]. Die in dieser Arbeit unter standardisierten Bedingungen angefertigten Aufnahmen weisen dieses Defizit nicht auf. Alle Fotografien und Gesichts-Scans werden bei nahezu gleichen Bedingungen angefertigt (Tageslicht, keine direkte Sonneneinstrahlung, keine Blitzfunktion). Aus technischen Gründen wird zusätzlich bei der dreidimensionalen Datenerfassung die Testperson mit zwei schwachen Halogen-Strahlern à 38 Watt ausgeleuchtet. Eine Blendung der Probanden liegt dabei nicht vor. Durch die aufgeführten Maßnahmen sind die morphologischen Merkmale (Landmarks) auf beiden Bildformaten uneingeschränkt erkennbar und somit verwertbar. Die Gesamtdifferenzierungsmaße sollten folglich nicht durch den Faktor „Beleuchtung“ beeinflusst werden.

Hinsichtlich der **kosmetischen Veränderungen** ist ebenfalls kein Einfluss auf die Werte der Gesamtdifferenzierungsmaße zu erwarten. Es ist zwar anzunehmen, dass hierdurch eine (leichte) Abweichung zum nativen Phänotyp der jeweiligen Person auftritt, jedoch finden sich beispielsweise farbbetonte Augenbrauen sowohl auf den normalen Fotografien als auch auf den 3-D-Modellen. Eine Differenz zwischen den zu vergleichenden Abbildungen besteht also nicht. Problematisch könnte es allerdings werden, wenn zwischen den verschiedenen Aufnahmen ein Abschminken bzw. ein Auftragen kosmetischer Zusätze erfolgt. Ebenso ist im Hinblick auf ein realistisches Szenario kaum davon auszugehen, dass sowohl (fotografierter) Täter als auch Tatverdächtiger gleich geschminkt sind.

Schwer beurteilbar stellen sich mögliche Auswirkungen des Faktors „**Qualität der 3-D-Modelle**“ auf die Ergebniswerte dar. Es ist zu berücksichtigen, dass ein kompletter Modellkopf manuell aus drei Fragmenten zusammensetzt wird (vergleiche Kapitel 3.2.3.). Unter Zuhilfenahme von Styroporkügelchen, mit welchen die Probanden vor den Scan-Aufnahmen versehen werden, soll eine möglichst kongruente und unverfälschte dreidimensionale Abbildung nach Kombination der Einzelteile entstehen. Ob nun zwischen einer Fotografie und einer ideal angepassten Projektion eines 3-D-Modells noch Abbildungsunterschiede bestehen, ist dennoch nicht beantwortbar. Die Prüfung auf Korrelation zwischen den $D(X;Y)$ -Werten und den von der Konica Minolta ® - Software ausgegebenen Fehlerwerten weist zwar keinen signifikanten Zusammenhang auf (Anhang C, Tabelle 12), eine Kausalität lässt sich hieraus jedoch nicht ableiten. Insbesondere kann nicht festgestellt werden, wie hoch die tatsächliche Abbildungsgleichheit zwischen der Ansicht des zusammengefügt 3-D-Kopfes und der realen Person (bzw. deren Fotografie) ist. Laut Herstellerangaben gewährleistet der 3-D-Scanner eine Abbildungsgenauigkeit im 1/10 mm-Bereich, was allerdings nur für das einzelne Fragment Gültigkeit besitzt. Dass nun durch das Zusammenfügen von drei Einzelteilen eine wesentliche Bildverzerrung und Qualitätseinbuße auftritt, ist indessen kaum nachvollziehbar. Abschließend kann festgehalten werden, dass eine zahlenmäßige Auswirkung des Faktors „Qualität der 3-D-Modelle“ auf die einzelnen Gesamtdifferenzierungsmaße nicht ausgeschlossen werden kann. Da jedoch bei Anwendung der manuellen als auch der computergestützten Anpassungsmethode der jeweils gleiche 3-D-Kopf verwendet wird, ist zumindest die Vergleichbarkeit der resultierenden D-Werte gegeben.

In Kapitel 3.2.4. wurde bereits darauf hingewiesen, dass aus technischen Gründen eine Berücksichtigung bzw. Implementierung der **radialen Linsenverzeichnung** beim Generieren der 3-D-Modellansicht nicht möglich ist. Gemäß der vorliegenden Literatur ist jedoch von einer untergeordneten Bedeutung dieses Faktors auszugehen: Bei Verwendung handelsüblicher Digitalkameras sind aufgrund der Verzerrung in den Randbereichen der Aufnahmen lediglich Unterschiede von wenigen Pixeln zu erwarten [SIEBERT 2002, TÖNNIES 2005].

Die numerische Aufgliederung eines Gesamtdifferenzierungsmaßes in Einzelfaktoren ist nach den angestellten Überlegungen nicht möglich. Durch die vorgenommenen Standardisierungen und die verwendeten Methoden lässt sich den Faktoren „Mimik, Kosmetik, Beleuchtung und radiale Linsenverzeichnung“ eine nur geringe Beeinflussung der Ergebnisse zuordnen.

Rein hypothetisch stellt der $D(X;Y)$ -Wert einer anhand einer Fotografie angepassten 3-D-Modell-Projektion die Summe aus Bepunktungsfehler und tatsächlicher Abbildungsverschiedenheit, die neben einer eventuellen Einbuße durch die „Scan-Qualität“ nur perspektivisch bedingt sein kann, dar.

Eine zusammenfassende qualitative Einschätzung der Auswirkungen der Einflussfaktoren auf das Gesamtdifferenzierungsmaß ist abschließend in der folgenden Übersicht (Abbildung 22) wiedergegeben:

Einflussfaktor	qualitative Auswirkung auf das Gesamtdifferenzierungsmaß $D(X;Y)$
Setzen der Landmarks (Bepunktungsfehler)	mittel
Scanqualität	(wahrscheinlich) gering
Mimik	kein
Kosmetik	kein
Beleuchtung	kein
radiale Linsenverzeichnung	(wahrscheinlich) gering
tatsächliche Abbildungsverschiedenheit	entscheidend

Abb. 22: Qualitativ eingeschätzte Auswirkungen der Einflussfaktoren auf das Gesamtdifferenzierungsmaß $D(X;Y)$.

5.5. Fazit, Übertragbarkeit und Vorausschau

In Kapitel 5.3.2. wurde bereits resümiert, dass die computergestützte Ausrichtung eines 3-D-Modells anhand einer vorgegebenen Fotografie (der gleichen Person) der manuellen Anpassung überlegen ist.

Einige Aspekte sprechen dafür, dass die Software weniger „störanfällig“ als die Arbeit des Menschen ist. Während das manuelle Anpassen auf optisch-kontrollierter Vorgehensweise basiert, verwendet die Software einen mathematischen Algorithmus, der mit definierten Zahlen und Koordinaten arbeitet. Es hat sich gezeigt, dass aus dieser grundsätzlich differenten Arbeitsweise sehr unterschiedliche Ergebnisse resultieren, die letztendlich einen deutlichen Vorteil des computergestützten Verfahrens aufweisen. Trotzdem beinhaltet auch die computergestützte Methode noch Defizite; es zeigen sich sowohl Fälle, bei denen die manuelle Verfahrensweise bessere Ergebnisse erbringt, als auch Fälle, bei denen nicht abgeschätzt werden kann, welche Methode letztlich überlegen ist. Zudem ist die Software auf von Menschenhand gesetzte Landmarks angewiesen, grobe Fehler in diesem Schritt werden (unkorrigiert) übernommen und weiterverarbeitet.

Ebenso muss beachtet werden, dass die gewonnenen 2-D- und 3-D-Bilddaten unter optimalen Bedingungen und in standardisierter Form gewonnen werden und somit Experimentalcharakter (im Sinne einer Laborstudie) besitzen. Hinsichtlich der Übertragbarkeit auf den Alltag kann keine abschließende und verbindliche Aussage getroffen werden. So erhalten Gutachter beispielsweise keine hochauflösenden und standardisiert angefertigten Digitalfotografien als Vergleichsmedien. Inwiefern dem Alltag entnommene eher grobkörnige, unscharfe und schlecht beleuchtete Aufnahmen als Referenz zur 3-D-Modellangleichung verwendbar sind, müsste untersucht werden. Ebenso ist nicht abschätzbar, ob mimische oder kosmetische Unterschiede auf den Vergleichsabbildungen eine wesentliche Einschränkung bei Verwendung der vorgestellten Methode bedeuten. Das Erstellen der dreidimensionalen Kopfmodelle (unter Laborbedingungen) sollte hingegen auch im Rahmen eines forensischen Gutachtens keine Einschränkung darstellen. Es muss jedoch beachtet werden, dass das Anfertigen und Bearbeiten einer solchen Aufnahme sehr zeitaufwändig ist.

Weiterhin müsste untersucht werden, ob sich mit Hilfe der Software ein Kopfmodell der Person A anhand einer Fotografie der Person B ausrichten ließe. Hierbei wäre entscheidend, ein größeres Gesamtdifferenzierungsmaß zu erhalten, als bei der Gegenüberstellung von Modell und Fotografie der gleichen Person. Nur in diesem Fall hätte der Wert des Gesamtdifferenzierungsmaßes letztendlich eine Bedeutung bei der Klärung forensischer Identitätsfeststellungen. Konsequenterweise würde hiernach interessieren, ob sich ein bestimmter Grenzwert ermitteln ließe, ab welchem eine vermutete Identität abgelehnt bzw. bestätigt werden könnte. Möglicherweise wären dabei Wertebereiche eruierbar, die bestimmte Wahrscheinlichkeitsaussagen bezüglich der Frage nach Identität bzw. Nicht-Identität zuließen.

Anhand dieser Arbeit lässt sich abschließend postulieren, dass perspektivische und konsekutiv störende Einflüsse beim Bildvergleich unter Verwendung der 3-D-Laserscantechnik ausgeblendet bzw. minimiert werden können. Auf dieser Grundlage basierend, könnte sich ein nicht unbedeutendes Hilfsmittel bei der Klärung von Identifizierungsfragen herausbilden.

6. Literaturverzeichnis

1. Behrens M, Roth R (eds) (2001) Biometrische Identifikation. Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig Wiesbaden
2. Bellmann D (2004) Differenzierung von Personen mittels computergestützter Bildanalyse. Dissertation, Universität des Saarlandes
3. Brinker H (1985) Identifizieren und Wiedererkennen – Bemerkungen zum Unterschied und zur Beweisqualität. Archiv für Kriminologie 176:142-145
4. Bühl A (ed) (2008) SPSS 16 – Einführung in die moderne Datenanalyse. 11th ed. Pearson Studium, München
5. Burkhardt L (1974) Zur bilateralen Ähnlichkeit der menschlichen Ohrform – ein Beitrag zum Symmetrieproblem. Anthropologischer Anzeiger 34:102-111
6. Busch C, Nouak A (2007) Das EU-Projekt “3D Face” – 3D-Gesichtserkennung für die unbeaufsichtigte Grenzkontrolle. Beitrag zum 10. Deutschen IT-Sicherheitskongress des Bundesamtes für Sicherheit in der Informationstechnik
7. Catterick T (1992) Facial measurements as an aid to recognition. Forensic Science International 56:23-27
8. Coward TJ, Watson RM, Scott BJ (1997) Laser scanning for the identification of repeatable landmarks of the ear and face. British Journal of Plastic Surgery 50:308-314
9. Draeger A (2008) Fälschungssicherheit und Datenschutz – Biometrie in der 3. Dimension. Inspect Journal 1:62-63
10. Erichsen K, Jürgens HW (eds) (1993) Human Body Measures – Dynamic Body Measures. Wirtschaftsverlag, Bremerhaven
11. Farkas LG, Bryson W, Klotz J (1980) Is Photogrammetry of the Face Reliable? Plastic and Reconstructive Surgery 66:346-355
12. Farkas LG, Munro IR (eds) (1987) Anthropometric facial proportions in medicine. Charles C. Thomas Publisher, Springfield Illinois
13. Farkas LG (ed) (1994) Anthropometry of the Head and Face. 2nd ed. Raven Press, New York
14. Furtmayr MJ (1971) Gesicht und Schädel des Menschen als mögliche Grundlagen kriminalistischer Aufklärungsaktivierung. Kriminologische Aktualität 6:19-25

15. Furtmayr MJ (1975) Gesicht und Schädel des Menschen als mögliche Identifizierungsgrundlagen in Vergangenheit und Gegenwart. Archiv für Kriminologie 155:3-13
16. Gloor PA (1979) Bertillon's Method and Anthropological Research – a New Use for Old Anthropometric Files. Journal of the Forensic Science Society 20:99-101
17. Goldstein AJ, Harmon LD, Lesk AB (1971) Identification of Human Faces. Proceedings of the IEEE 59:748-760
18. Hähnel M (2007) Modellbasierte posen- und mimikinvariante Gesichtserkennung. Dissertation, Technische Hochschule Aachen
19. Halberstein RA (2001) The Application of Anthropometric Indices in Forensic Photography: Three Case Studies. Journal of forensic sciences 46:1438-1441
20. Hammer HJ, Hunger H, Leopold D (1981) Zur Anwendbarkeit morphologischer Gesichtsmerkmale bei der Identifikation. Kriminalistik und forensische Wissenschaften 44:111-120
21. Hautvast J (1971) Analysis of the Human Face by Means of Photogrammetric Methods. Anthropologischer Anzeiger 33:39-47
22. Jacobshagen B (1980) Grenzen konventioneller Techniken und Möglichkeiten alternativer Ansätze in der Anthropometrie. Zeitschrift für Morphologie und Anthropologie 71:306-321
23. Jürgens HW (1978) Zur Standardisierung anthropometrischer Methoden. Anthropologischer Anzeiger 36:208-218
24. Jürgens HW (ed) (2004) Erhebung anthropometrischer Maße zur Aktualisierung der DIN 33 402 – Teil 2. Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven
25. Keiter F (1934) Über Korrelation der Gesichtszüge. Anthropologischer Anzeiger 11:243-253
26. Knäpper L, Schröder D (2002) Digitaler Bild-Bild-Vergleich im Erkennungsdienst. Kriminalistik 12:745-748
27. Knussmann R (1983) Die vergleichende morphologische Analyse als Identitätsnachweis. Strafverteidiger 3:127-129
28. Knussmann R (ed) (1988) Bd. I Wesen und Methoden der Anthropologie, 1. Teil Wissenschaftstheorie, Geschichte, morphologische Methoden. Gustav Fischer, Stuttgart New York
29. Knussmann R (1991) Zur Wahrscheinlichkeitsaussage im morphologischen Identitätsgutachten. Neue Zeitschrift für Strafrecht 4:175-177

30. Knussmann R (ed) (1996) Vergleichende Biologie des Menschen. 2nd ed. Gustav Fischer, Stuttgart New York
31. Kreutz K, Verhoff MA (eds) (2002) Forensische Anthropologie. Lehmanns Media – LOB.de
32. Leopold D (ed) (1998) Identifikation unbekannter Toter. Schmidt Römhild, Lübeck
33. Lovesey EJ (1974) The development of a 3-dimensional anthropometric measuring technique. Applied Ergonomics 5:36-41
34. Lu X, Jain AK (2005) Integrating Range and Texture Information for 3D Face Recognition. Proceedings of the Seventh IEEE Workshops on Application of Computer Vision 1:156-163
35. Maat GJR (1989) The positioning and magnification of faces and skulls for photographic superimpositions. Forensic Science International 41:225-235.
36. Madison BV (1984) Seeing can be deceiving: Photographic evidence in a visual age – How much weight does it deserve? William and Mary Law Review 25:705-742
37. Neger M (1959) A quantitative method for the evaluation of the soft-tissue facial profile. American Journal of Orthodontics 45:738-751
38. Nouak A, Stricker A (2009) Aus 2-D wird 3-D: Ist die Technik schon reif? Sicherheitsforum 1:27-28
39. Otten B (2006) 3D-Gesichtserkennung – Merkmalsdetektion in 3D-Scans und merkmalsbasierter Vergleich von Gesichtern. Diplomarbeit, Universität Koblenz - Landau
40. Porter G, Doran G (1998) The Application of Forensic Photography for Facial Identification Methods. The Imaging Science Journal 46:175-176
41. Porter G, Doran G (2000) An anatomical and photographic technique for forensic facial identification. Forensic Science International 114:97-105
42. Pretzel, Lotz (2007) Forschungsprojekt „Foto-Fahndung“ – Gesichtserkennung als Fahndungsmittel. Abschlußbericht, Bundeskriminalamt Wiesbaden
43. Reche O (1965) Eine neue Methode zur Erleichterung der Beweisführung in Identifizierungsprozessen. Homo 16:113-116
44. Röhm E (1973) Forensische Anthropometrie. In: Röhm E Der vermessene Mensch. Heinz Moos, München, pp 147-149
45. Rösing FW (1999) Standards für die anthropologische Identifikation. Kriminalistik 4:246-248

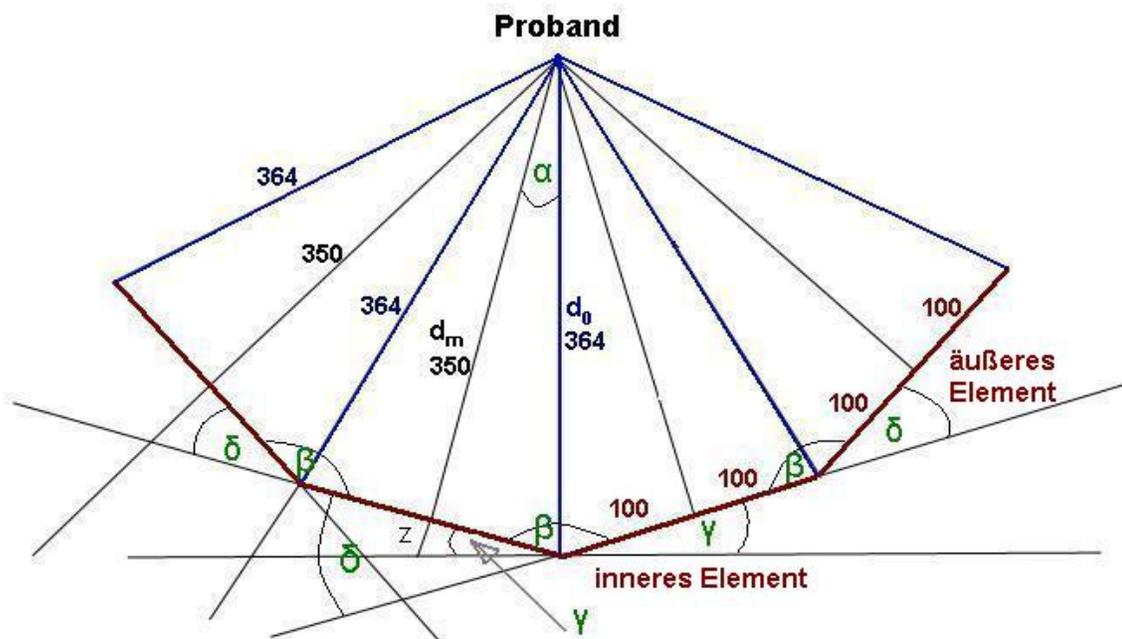
46. Schade H (1968) Zur Standardisierung morphognostischer Merkmale. *Anthropologischer Anzeiger* 30:287-293
47. Schott C, Walser B, Schwendinger N (1996) Anthropologische Identitätsgutachten. *Kriminalistik* 7:485-488
48. Schwarzfischer F (1992) Identifizierung durch Vergleich von Körpermerkmalen, insbesondere anhand von Lichtbildern. In: Kube E, Störtzer O, Timm J (eds) *Kriminalistik, Handbuch für Praxis und Wissenschaft*. Bd 1. Boorberg, Stuttgart, pp 735-761
49. Siebert D (2002) Ein Meßsystem zur präoperativen Planung und intraoperativen Kontrolle von Dysgnathieoperationen. Dissertation, Freie Universität Berlin
50. Stoner MM (1955) A photometric analysis of the facial profile. *American Journal of Orthodontics* 41:453-469
51. Tönnies KD (ed) (2005) *Grundlagen der Bildverarbeitung*. 1st ed. Pearson Studium
52. Tsai RY (1986) An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* 6:364-374
53. Tsai RY (1987) A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses. *IEEE Journal of Robotics and Automation* 3:323-344
54. Turba L (2008) 3-D-Gesichtserkennung – Innovativ denken und handeln. *Überflieger* 5:6-7
55. Verhoff MA, Kreutz K, Ramsthaler F, Schiwy-Bochat KH (2006) Forensische Anthropologie und Osteologie – Übersicht und Definitionen. *Deutsches Ärzteblatt* 103/12:782-788
56. Weihe C (2002) Die Geburt des Individuums aus dem Geist des Messens – Anthropometrie, Psychophysiognomik und Homöopathie. *In.form.alia* 4:17-32
57. Yoshino M, Noguchi K, Atsuchi M, Kubota S, Imaizumi K, Thomas CDL, Clement JG (2002) Individual identification of disguised faces by morphometrical matching. *Forensic Science International* 127:97-103
58. Yoshino M, Imaizumi K, Tanijiri T, Clement JG (2003) Automatic Adjustment of Facial Orientation in 3D Face Image Database. *Japanese Journal of Science and Technology for Identification* 8:41-47

7. Anhang

Anhang A

Konstruktionsplan:

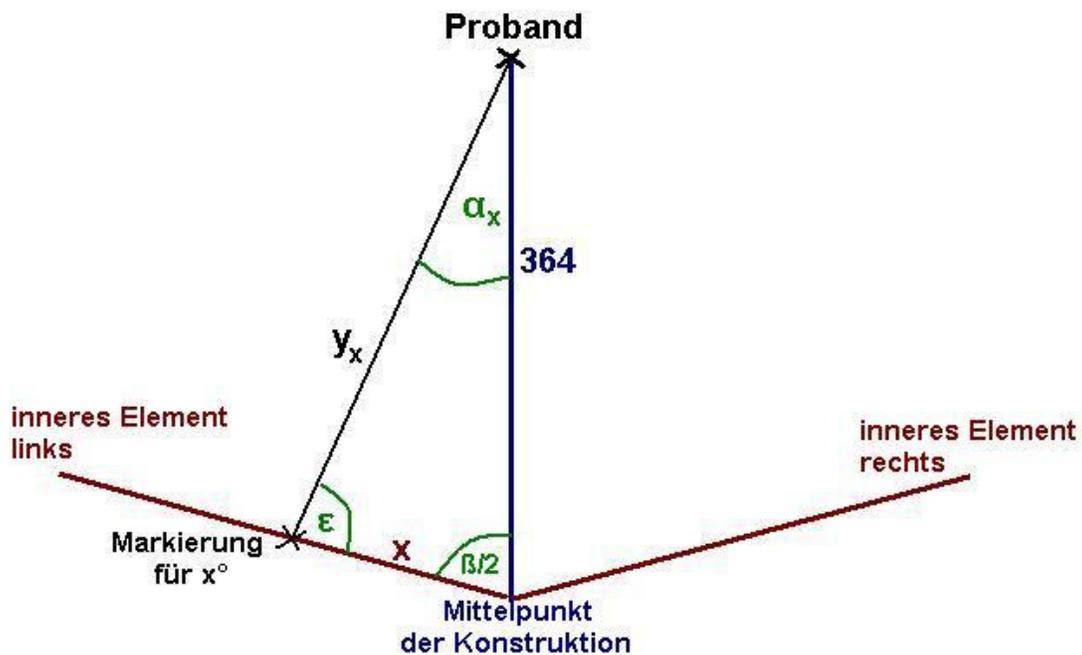
Das Stativ der Digitalkamera ist in Anlehnung an eine Kreisform aus vier jeweils 200 cm langen Leisten (Elementen) aufgebaut, die untereinander einen Winkel von 148° bestreiten. Die Polygonform der Konstruktion gewährleistet, dass alle Aufnahmen in nahezu gleichen Abständen erfolgen (zwischen 350 und 364 cm). Zudem werden auf den einzelnen Elementen Markierungen angelegt, die die Fotografien aus den seitlich abweichenden Aufnahmewinkeln ($5^\circ - 45^\circ$, links und rechts) ermöglichen.



Die Abbildung zeigt die oben beschriebenen vier, jeweils 200 cm messenden Elemente (zwei innere und zwei äußere), die untereinander jeweils den Winkel $\beta = 148^\circ$ haben. Dieser errechnet sich unter der Voraussetzung, dass der Mindestabstand „Kamera – Probant“ geringstenfalls $d_m = 350$ cm beträgt, wie folgt:

α	$\tan \alpha = \frac{100\text{cm}}{350\text{cm}}$	$\alpha = 15,95^\circ$
d_0	$\cos \alpha = \frac{350\text{cm}}{d_0}$	$d_0 = 364 \text{ cm}$
z	$\cos \alpha = \frac{364\text{cm}}{350\text{cm} + z}$	$z = 28,57 \text{ cm}$
γ	$\tan \gamma = \frac{z}{100\text{cm}}$	$\gamma = 15,94^\circ$
β	$\beta = 180^\circ - 2\gamma$	$\beta = 148,12^\circ (\approx 148^\circ)$

Durch Errechnen dieses Winkels und des Abstandes d_0 lassen sich die Positionen der Markierungen (auf den Elementen) für die Seitenaufnahmen ermitteln.



α_x stellt dabei die seitlichen Aufnahmewinkel, ausgehend von der Frontalperspektive, dar. D.h. für jedes α_x (5°; 10°; 15°; ...; 45°) muss die passende Strecke x , also der Abstand „Konstruktionsmittelpunkt – jeweilige Markierung“ errechnet werden. Wenn der Wert für x ab einem bestimmten Winkel größer als 200 cm wird, müssen die Markierungen auf den äußeren Elementen unter neuen Berechnungen fortgesetzt werden.

Es gilt für die inneren Konstruktionselemente der Sinussatz (vgl. Abbildung):

$$\frac{x}{\sin a_x} = \frac{364\text{cm}}{\sin \varepsilon} = \frac{y_x}{\sin \frac{\beta}{2}}$$

Somit errechnen sich für a_x von 5° - 30° folgende Werte für x :

$$\begin{array}{lll} a_x = 5^\circ & \frac{\beta}{2} = 74^\circ & \varepsilon = 101^\circ \\ & x = \frac{364\text{cm} \times \sin 5^\circ}{\sin 101^\circ} & \mathbf{x_1 = 32,3 \text{ cm}} \\ & y = \frac{364\text{cm} \times \sin 74^\circ}{\sin 101^\circ} & y = 356,5 \text{ cm} \end{array}$$

$$\begin{array}{lll} a_x = 10^\circ & \frac{\beta}{2} = 74^\circ & \varepsilon = 96^\circ \\ & x = \frac{364\text{cm} \times \sin 10^\circ}{\sin 96^\circ} & \mathbf{x_2 = 63,6 \text{ cm}} \\ & y = \frac{364\text{cm} \times \sin 74^\circ}{\sin 96^\circ} & y = 351,8 \text{ cm} \end{array}$$

$$\begin{array}{lll} a_x = 15^\circ & \frac{\beta}{2} = 74^\circ & \varepsilon = 91^\circ \\ & x = \frac{364\text{cm} \times \sin 15^\circ}{\sin 91^\circ} & \mathbf{x_3 = 94,2 \text{ cm}} \\ & y = \frac{364\text{cm} \times \sin 74^\circ}{\sin 91^\circ} & y = 350,0 \text{ cm} \end{array}$$

$$\begin{array}{lll} a_x = 20^\circ & \frac{\beta}{2} = 74^\circ & \varepsilon = 86^\circ \\ & x = \frac{364\text{cm} \times \sin 20^\circ}{\sin 86^\circ} & \mathbf{x_4 = 124,8 \text{ cm}} \\ & y = \frac{364\text{cm} \times \sin 74^\circ}{\sin 86^\circ} & y = 350,8 \text{ cm} \end{array}$$

$$a_x = 25^\circ \quad \beta/2 = 74^\circ \quad \varepsilon = 81^\circ$$

$$x = \frac{364 \text{ cm} \times \sin 25^\circ}{\sin 81^\circ} \quad x_5 = 155,8 \text{ cm}$$

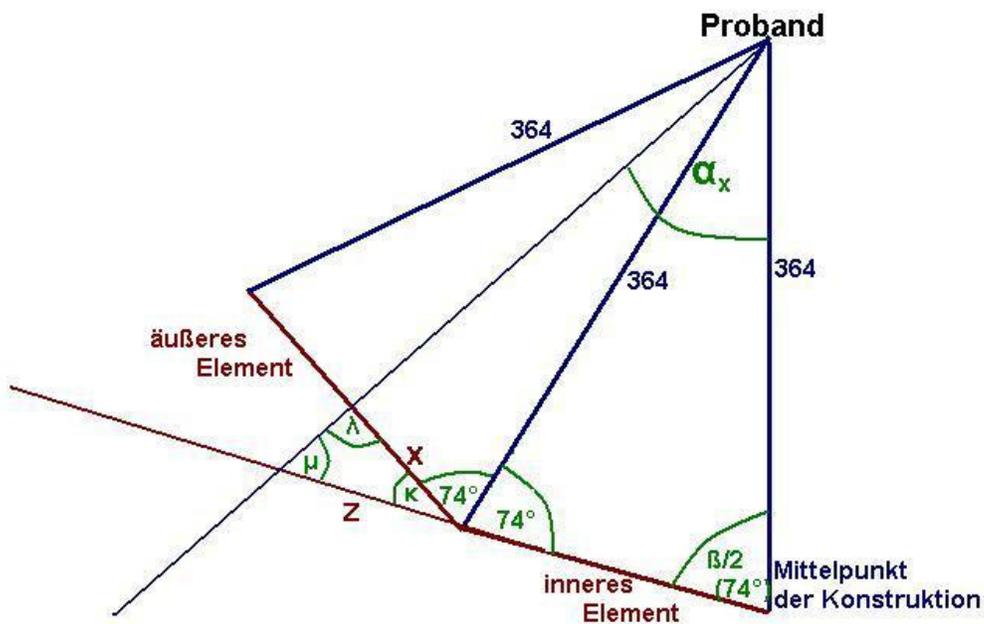
$$y = \frac{364 \text{ cm} \times \sin 74^\circ}{\sin 81^\circ} \quad y = 354,2 \text{ cm}$$

$$a_x = 30^\circ \quad \beta/2 = 74^\circ \quad \varepsilon = 76^\circ$$

$$x = \frac{364 \text{ cm} \times \sin 30^\circ}{\sin 76^\circ} \quad x_6 = 187,6 \text{ cm}$$

$$y = \frac{364 \text{ cm} \times \sin 74^\circ}{\sin 76^\circ} \quad y = 360,6 \text{ cm}$$

Für die Aufnahmewinkel von 35° bis 45° müssen die Markierungen auf die beiden äußeren Konstruktionsabschnitte gelegt werden.



Zur Berechnung der x-Werte auf den äußeren Elementen wird ebenfalls der Sinussatz angewendet. Im Folgenden werden zwei Hilfsdreiecke verwendet:

1. großes Dreieck mit den Winkeln: $a_x, \beta/2, \mu.$
2. kleines Dreieck mit den Winkeln: $\mu, \kappa, \lambda.$

$$a_x = 35^\circ \quad \text{großes Dreieck: } a_x = 35^\circ \quad \frac{\beta}{2} = 74^\circ \quad \mu = 71^\circ$$

$$\text{kleines Dreieck: } \mu = 71^\circ \quad \kappa = 32^\circ \quad \lambda = 77^\circ$$

$$z + 200 \text{ cm} = \frac{\sin a_x \times 364 \text{ cm}}{\sin \mu}$$

$$z = \frac{\sin 35^\circ \times 364 \text{ cm}}{\sin 71^\circ} - 200 \text{ cm} \quad z = 20,81 \text{ cm}$$

$$x = \frac{\sin \mu \times z}{\sin \lambda}$$

$$x = \frac{\sin 71^\circ \times 20,81 \text{ cm}}{\sin 77^\circ} \quad \mathbf{x_7 = 20,2 \text{ cm}}$$

$$a_x = 40^\circ \quad \text{großes Dreieck: } a_x = 40^\circ \quad \frac{\beta}{2} = 74^\circ \quad \mu = 66^\circ$$

$$\text{kleines Dreieck: } \mu = 66^\circ \quad \kappa = 32^\circ \quad \lambda = 82^\circ$$

$$z = \frac{\sin 40^\circ \times 364 \text{ cm}}{\sin 66^\circ} - 200 \text{ cm} \quad z = 56,12 \text{ cm}$$

$$x = \frac{\sin 66^\circ \times 56,12 \text{ cm}}{\sin 82^\circ} \quad \mathbf{x_8 = 51,8 \text{ cm}}$$

$$a_x = 45^\circ \quad \text{großes Dreieck: } a_x = 45^\circ \quad \frac{\beta}{2} = 74^\circ \quad \mu = 61^\circ$$

$$\text{kleines Dreieck: } \mu = 61^\circ \quad \kappa = 32^\circ \quad \lambda = 87^\circ$$

$$z = \frac{\sin 45^\circ \times 364 \text{ cm}}{\sin 61^\circ} - 200 \text{ cm} \quad z = 94,28 \text{ cm}$$

$$x = \frac{\sin 61^\circ \times 94,28 \text{ cm}}{\sin 87^\circ} \quad \mathbf{x_9 = 82,6 \text{ cm}}$$

Anhang B

Tabelle 1: Auflistung der beim Erstellen der 3-D-Modelle erhaltenen Scanfehler

Proband	Scanfehler 1	Scanfehler 2	Summe Scanfehler
1	0,254	0,213	0,467
2	0,215	0,274	0,489
3	0,149	0,134	0,283
4	0,367	0,294	0,661
5	0,333	0,226	0,559
6	0,458	0,254	0,712
7	0,480	0,308	0,788
8	0,318	0,159	0,477
9	0,165	0,150	0,315
10	0,139	0,164	0,303
11	0,227	0,200	0,427
12	0,145	0,238	0,383
13	0,230	0,292	0,522
14	0,205	0,202	0,407
15	0,260	0,303	0,563
16	0,219	0,191	0,410
17	0,300	0,284	0,584
18	0,173	0,142	0,315
19	0,227	0,184	0,411
20	0,161	0,175	0,336
21	0,259	0,136	0,395
22	0,267	0,215	0,482
23	0,249	0,173	0,422
24	0,271	0,239	0,510
25	0,265	0,360	0,625
26	0,196	0,275	0,471
27	0,193	0,199	0,392
28	0,256	0,231	0,487
29	0,269	0,183	0,452
30	0,289	0,139	0,428
31	0,460	0,230	0,690
32	0,236	0,330	0,566
33	0,211	0,267	0,478
34	0,145	0,224	0,369
35	0,358	0,388	0,746
36	0,291	0,285	0,576
37	0,188	0,187	0,375

38	0,434	0,177	0,611
39	0,293	0,367	0,660

Anmerkung: Beim Zusammenfügen eines 3-D-Modells aus drei Einzelfragmenten entstehen pro Person jeweils zwei Fehlerwerte, ausgegeben von der Konica Minolta® Bearbeitungssoftware. „Scanfehler 1“ ergibt sich bei Kombination der linken Gesichtshälfte mit der Frontalaufnahme. „Scanfehler 2“ entsprechend beim Zusammenfügen des neu entstandenen Fragments mit der rechten Gesichtshälfte. Die zusätzliche Variable „Summe Scanfehler“ (Scanfehler 1 + Scanfehler 2) wird zur Nutzung für spätere Korrelationstests mit aufgeführt.

Tabelle 2: Kalibrierung der virtuellen Kamera anhand der Frontalaufnahmen

Proband	Einheit	mittlerer Fehler (mean)	maximaler Fehler (max)	Standardab- weichung (std)
1	pixel	6,8	12,6	3,2
	mm	1,1	2,2	0,6
2	pixel	5,6	12,3	3,1
	mm	1,0	2,0	0,5
3	pixel	6,7	13,7	3,4
	mm	1,1	2,2	0,6
4	pixel	6,3	14,3	3,0
	mm	1,1	2,5	0,5
5	pixel	4,9	13,2	3,0
	mm	0,8	2,3	0,5
6	pixel	4,9	8,9	2,4
	mm	0,8	1,5	0,4
7	pixel	9,6	17,0	3,6
	mm	1,6	3,0	0,6
8	pixel	5,3	10,8	3,2
	mm	0,9	1,9	0,5
9	pixel	6,0	10,9	2,7
	mm	1,0	1,8	0,5
10	pixel	4,9	12,8	2,8
	mm	0,8	2,2	0,5
11	pixel	12,2	24,6	6,8
	mm	1,9	3,4	0,9
12	pixel	5,4	11,7	3,3
	mm	0,9	2,1	0,6
13	pixel	8,4	21,0	4,3
	mm	1,4	3,7	0,7
14	pixel	4,7	8,1	2,1
	mm	0,8	1,4	0,4
15	pixel	4,1	10,4	2,6
	mm	0,7	1,8	0,5

16	pixel	4,7	7,7	1,6
	mm	0,8	1,3	0,3
17	pixel	5,4	15,0	3,2
	mm	0,9	2,6	0,5
18	pixel	6,9	22,4	4,5
	mm	1,2	3,8	0,8
19	pixel	7,1	14,2	3,8
	mm	1,2	2,4	0,6
20	pixel	7,1	12,8	2,8
	mm	1,2	2,1	0,5
21	pixel	7,2	13,1	3,6
	mm	1,2	2,2	0,6
22	pixel	7,6	20,0	5,1
	mm	1,3	3,3	0,8
23	pixel	4,7	11,3	2,4
	mm	0,8	1,9	0,4
24	pixel	6,1	11,0	2,4
	mm	1,1	1,9	0,4
25	pixel	6,0	12,7	3,3
	mm	1,0	2,2	0,6
26	pixel	6,5	16,4	3,2
	mm	1,1	2,8	0,5
27	pixel	6,3	13,0	4,2
	mm	1,1	2,1	0,7
28	pixel	6,4	11,9	3,4
	mm	1,1	2,0	0,6
29	pixel	4,4	9,8	2,7
	mm	0,7	1,5	0,4
30	pixel	6,0	11,9	2,8
	mm	1,0	2,1	0,5
31	pixel	6,3	11,9	3,2
	mm	1,0	2,0	0,5
32	pixel	6,2	16,7	3,6
	mm	1,0	2,8	0,6
33	pixel	5,9	11,8	2,8
	mm	1,0	2,0	0,5
34	pixel	6,1	9,2	1,9
	mm	1,0	1,5	0,3
35	pixel	6,3	11,6	2,6
	mm	1,1	2,0	0,4
36	pixel	4,9	9,0	2,2
	mm	0,8	1,5	0,4
37	pixel	6,2	13,2	2,6
	mm	1,0	2,3	0,4

38	pixel	8,4	16,8	4,1
	mm	1,4	2,9	0,6
39	pixel	5,3	9,2	2,2
	mm	0,9	1,6	0,4

Tabelle 3: Kalibrierung der virtuellen Kamera anhand der 20°-Seitaufnahmen

Proband	Einheit	mittlerer Fehler (mean)	maximaler Fehler (max)	Standardab- weichung (std)
1	pixel	9,5	26,4	5,9
	mm	1,5	4,3	1,0
2	pixel	8,0	16,0	4,0
	mm	1,3	2,7	0,7
3	pixel	7,9	17,2	4,4
	mm	1,3	2,7	0,7
4	pixel	6,4	15,4	3,6
	mm	1,1	2,5	0,6
5	pixel	7,7	14,1	3,1
	mm	1,3	2,2	0,5
6	pixel	7,7	24,4	5,5
	mm	1,2	3,9	0,9
7	pixel	7,4	14,7	3,9
	mm	1,2	2,4	0,6
8	pixel	6,6	16,6	4,5
	mm	1,1	2,7	0,7
9	pixel	8,4	18,0	5,7
	mm	1,4	2,9	0,9
10	pixel	6,7	19,6	5,0
	mm	1,1	3,2	0,8
11	pixel	7,8	14,4	3,3
	mm	1,2	2,3	0,5
12	pixel	6,0	11,4	3,1
	mm	1,0	1,9	0,5
13	pixel	5,3	11,0	2,8
	mm	0,9	1,8	0,4
14	pixel	5,5	11,2	2,9
	mm	0,9	1,9	0,5
15	pixel	7,0	19,3	4,4
	mm	1,1	3,2	0,7
16	pixel	7,0	14,3	3,0
	mm	1,2	2,3	0,5

17	pixel	5,6	15,3	3,9
	mm	0,9	2,5	0,7
18	pixel	5,4	13,6	3,5
	mm	0,9	2,1	0,6
19	pixel	5,9	12,6	2,6
	mm	1,0	2,1	0,4
20	pixel	5,7	12,3	3,2
	mm	0,9	2,0	0,5

Anhang C

Tabelle 1: Vergleich der Differenzierungsmaße der manuellen (man) und computer-gestützten (auto) Anpassungen der 3-D-Modell-Projektionen an die Frontal-aufnahmen

Proband	Methode	D(X;Y)	DX	DY
1	man	1,3737	1,1976	0,6729
	auto	0,4425	0,3548	0,2644
2	man	1,5430	1,0847	1,0974
	auto	0,7631	0,6039	0,4665
3	man	1,0683	0,9864	0,4102
	auto	1,0045	0,8158	0,5860
4	man	1,3589	0,9922	0,9284
	auto	0,5235	0,2977	0,4307
5	man	1,1269	0,9015	0,6763
	auto	0,5596	0,4760	0,2943
6	man	1,1000	0,9229	0,5986
	auto	0,9325	0,8049	0,4709
7	man	0,9603	0,7651	0,5803
	auto	0,6817	0,4978	0,4657
8	man	1,2225	0,8062	0,9190
	auto	0,6953	0,6136	0,3271
9	man	0,8352	0,4915	0,6753
	auto	0,4883	0,3994	0,2809
10	man	1,1308	0,7880	0,8111
	auto	0,8669	0,7478	0,4386
11	man	1,6063	0,9151	1,3201
	auto	0,9438	0,6856	0,6485
12	man	0,8766	0,6936	0,5360
	auto	0,4981	0,3774	0,3251
13	man	0,9284	0,7753	0,5107
	auto	0,8931	0,7493	0,4860
14	man	0,9272	0,7531	0,5408
	auto	0,3915	0,2990	0,2528
15	man	0,8306	0,6437	0,5250
	auto	0,4841	0,4091	0,2588
16	man	1,5312	0,6750	1,3744
	auto	0,5671	0,4126	0,3891
17	man	1,0379	0,8283	0,6253
	auto	0,9099	0,7346	0,5370
18	man	1,4080	0,7314	1,2031
	auto	0,6696	0,5268	0,4134

19	man	2,3120	1,0124	2,0786
	auto	1,0261	0,8664	0,5497
20	man	0,7638	0,5792	0,4979
	auto	0,7661	0,5800	0,5005
21	man	0,9397	0,6970	0,6303
	auto	0,6423	0,4632	0,4450
22	man	1,3262	1,1422	0,6738
	auto	1,0943	0,7476	0,7992
23	man	0,9487	0,5966	0,7377
	auto	0,4462	0,3170	0,3140
24	man	1,3508	0,7550	1,1202
	auto	0,4256	0,2888	0,3126
25	man	1,2097	0,8088	0,8996
	auto	0,7645	0,6508	0,4010
26	man	1,0421	0,5504	0,8849
	auto	0,4888	0,3341	0,3568
27	man	0,8498	0,4511	0,7202
	auto	0,8588	0,6901	0,5112
28	man	1,0225	0,8375	0,5867
	auto	1,0559	0,8086	0,6790
29	man	1,3237	0,8460	1,0180
	auto	0,7025	0,5561	0,4292
30	man	1,1187	0,8293	0,7508
	auto	0,9622	0,8125	0,5154
31	man	0,9523	0,8745	0,3769
	auto	0,9408	0,7046	0,6235
32	man	0,7802	0,6661	0,4062
	auto	0,4479	0,3476	0,2825
33	man	1,2647	0,7963	0,9826
	auto	0,5246	0,4127	0,3239
34	man	1,0412	0,5626	0,8761
	auto	0,5664	0,4399	0,3568
35	man	0,9136	0,5728	0,7118
	auto	0,6243	0,2985	0,5483
36	man	1,3358	0,7358	1,1148
	auto	0,6515	0,4557	0,4655
37	man	0,8571	0,6563	0,5512
	auto	0,6902	0,5787	0,3762
38	man	0,8312	0,7171	0,4203
	auto	1,0400	0,7791	0,6889
39	man	0,8911	0,5000	0,7375
	auto	0,4537	0,2466	0,3808

Tabelle 2: Anwendung des Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest auf alle erhaltenen Differenzierungsmaße bei den Modellanpassungen an die Frontalaufnahmen

	D(X;Y)-man	DX-man	DY-man	D(X;Y)-auto	DX-auto	DY-auto	
N	39	39	39	39	39	39	
Parameter der Normalverteilung	Mittelwert	1,1267	0,7728	0,7893	0,7048	0,5432	0,4409
	Standardabweichung	0,3009	0,1765	0,3316	0,2125	0,1873	0,1325
Extremste Differenzen	Absolut	0,1356	0,0827	0,1615	0,1262	0,1160	0,0869
	Positiv	0,1356	0,0827	0,1615	0,1262	0,1160	0,0869
	Negativ	-0,1139	-0,0408	-0,1068	-0,0990	-0,1098	-0,0779
	Kolmogorov-Smirnov-Z	0,8466	0,5165	1,0089	0,7881	0,7247	0,5424
	Asymptotische Signifikanz (p; 2-seitig)	0,4705	0,9524	0,2606	0,5637	0,6699	0,9302

Tabelle 3: T-Test bei gebundenen Stichproben zum Vergleich der Gesamtdifferenzierungsmaße D(X;Y) beider Methoden (man und auto) bei den Anpassungen an die Frontalaufnahmen

Statistik bei gebundenen Stichproben

	Mittelwert	N	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes
Paar 1 D(X;Y)-man (Frontalaufnahme)	1,1267	39	0,3009	0,0482
D(X;Y)-auto	0,7048	39	0,2125	0,0340

Korrelationen bei gebundenen Stichproben

	N	Korrelation	Signifikanz
Paar 1 D(X;Y)-man & D(X;Y)-auto	39	0,2105	0,1983

T-Test bei gebundenen Stichproben

	Gepaarte Differenzen							
	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes	95% Konfidenzintervall der Differenz		T	df	Sig. (2-seitig)
				Untere	Obere			
Paar 1 D(X;Y)-man – D(X;Y)-auto	0,4219	0,3298	0,0528	0,3150	0,5288	7,9895	38	0,0000

Tabelle 4: Deskriptive Statistik der resultierenden Untersuchungsergebnisse bei den Anpassungsvorgängen aller 3-D-Modelle an die entsprechenden Frontalfotografien

	N	Spannweite	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standard-abweichung	Varianz
D(X;Y)-man	39	1,5482	0,7638	2,3120	1,1267	0,3009	0,0910
DX-man	39	0,7465	0,4511	1,1976	0,7728	0,1765	0,0310
DY-man	39	1,7017	0,3769	2,0786	0,7893	0,3316	0,1100
D(X;Y)-auto	39	0,7028	0,3915	1,0943	0,7048	0,2125	0,0450
DX-auto	39	0,6198	0,2466	0,8664	0,5432	0,1873	0,0350
DY-auto	39	0,5464	0,2528	0,7992	0,4409	0,1325	0,0180
mean (pix)	39	8,1000	4,1000	12,2000	6,2513	1,5186	2,3060
max (pix)	39	16,9000	7,7000	24,6000	13,2026	3,8189	14,5840
mean (mm)	39	1,2000	0,7000	1,9000	1,0462	0,2426	0,0590
max (mm)	39	2,5000	1,3000	3,8000	2,2256	0,6112	0,3740
Scanfehler 1	39	0,3410	0,1390	0,4800	0,2604	0,0887	0,0080
Scanfehler 2	39	0,2540	0,1340	0,3880	0,2306	0,0672	0,0050

Tabelle 5: Deskriptive Statistik der resultierenden Untersuchungsergebnisse bei den Anpassungsvorgängen der männlichen 3-D-Modelle an die entsprechenden Frontalfotografien

	N	Spannweite	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standard-abweichung	Varianz
D(X;Y)-man	16	0,7757	0,8306	1,6063	1,1512	0,2617	0,0685
DX-man	16	0,7061	0,4915	1,1976	0,8370	0,1786	0,0319
DY-man	16	0,9642	0,4102	1,3744	0,7610	0,2920	0,0853
D(X;Y)-auto	16	0,6130	0,3915	1,0045	0,6710	0,2040	0,0416
DX-auto	16	0,5181	0,2977	0,8158	0,5340	0,1826	0,0333
DY-auto	16	0,3957	0,2528	0,6485	0,3991	0,1201	0,0144
mean (pix)	16	8,1000	4,1000	12,2000	6,2812	2,1408	4,5830
max (pix)	16	16,9000	7,7000	24,6000	13,1250	4,5006	20,2553
mean (mm)	16	1,2000	0,7000	1,9000	1,0438	0,3306	0,1093
max (mm)	16	2,4000	1,3000	3,7000	2,2063	0,6748	0,4553
Scanfehler 1	16	0,3410	0,1390	0,4800	0,2603	0,1051	0,0110
Scanfehler 2	16	0,1740	0,1340	0,3080	0,2251	0,0578	0,0033

Tabelle 6: Deskriptive Statistik der resultierenden Untersuchungsergebnisse bei den Anpassungsvorgängen der weiblichen 3-D-Modelle an die entsprechenden Frontalfotografien

	N	Spannweite	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz
D(X;Y)-man	23	1,5482	0,7638	2,3120	1,1096	0,3300	0,1089
DX-man	23	0,6911	0,4511	1,1422	0,7281	0,1642	0,0270
DY-man	23	1,7017	0,3769	2,0786	0,8089	0,3617	0,1308
D(X;Y)-auto	23	0,6687	0,4256	1,0943	0,7284	0,2195	0,0482
DX-auto	23	0,6198	0,2466	0,8664	0,5496	0,1943	0,0377
DY-auto	23	0,5167	0,2825	0,7992	0,4700	0,1354	0,0183
mean (pix)	23	4,0000	4,4000	8,4000	6,2304	0,9261	0,8577
max (pix)	23	13,4000	9,0000	22,4000	13,2565	3,3723	11,3726
mean (mm)	23	0,7000	0,7000	1,4000	1,0478	0,1648	0,0272
max (mm)	23	2,3000	1,5000	3,8000	2,2391	0,5782	0,3343
Scanfehler 1	23	0,3150	0,1450	0,4600	0,2605	0,0778	0,0061
Scanfehler 2	23	0,2520	0,1360	0,3880	0,2343	0,0741	0,0055

Tabelle 7: T-Test bei ungebundenen Stichproben zum Vergleich der resultierenden Gesamtdifferenzierungsmaße der männlichen bzw. weiblichen Probanden beim computergestützten Anpassungsvorgang

Gruppenstatistiken

	Probanden	N	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes
D(X;Y)-auto	weiblich	23	0,7284	0,2195	0,0458
	männlich	16	0,6710	0,2040	0,0510

Test bei ungebundenen Stichproben

		Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
		F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	mittl. Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall d. Differenz	
									Untere	Obere
D(X;Y)-auto	Varianzen sind gleich	0,0724	0,7894	0,8262	37	0,4140	0,0574	0,0695	-0,0833	0,1981
	Varianzen sind nicht gleich			0,8374	33,89	0,4083	0,0574	0,0685	-0,0819	0,1967

Tabelle 8: T-Test bei ungebundenen Stichproben zum Vergleich der resultierenden Gesamtdifferenzierungsmaße der männlichen bzw. weiblichen Probanden beim manuellen Anpassungsvorgang

Gruppenstatistiken

	Probanden	N	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes
D(X;Y)-man	weiblich	23	1,1096	0,3300	0,0688
	männlich	16	1,1512	0,2617	0,0654

Test bei ungebundenen Stichproben

		Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
		F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	mittl. Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall d. Differenz	
									Untere	Obere
D(X;Y)-man	Varianzen sind gleich	0,0586	0,8100	-0,4206	37	0,6765	-0,0416	0,0990	-0,2423	0,1590
	Varianzen sind nicht gleich			-0,4386	36,27	0,6636	-0,0416	0,0950	-0,2342	0,1509

Tabelle 9: Korrelationstest zwischen den x- und y- Differenzierungsmaßen innerhalb einer Methode bei den Anpassungen an die Frontalaufnahmen

		DY-man	DY-auto
DX-man	Korrelation nach Pearson	0,1966	-
	Signifikanz (p; 2-seitig)	0,2302	-
	N	39	-
DX-auto	Korrelation nach Pearson	-	0,7109
	Signifikanz (p; 2-seitig)	-	0,0000
	N	-	39

Tabelle 10: Regressionsanalyse zur Prüfung eines linearen Zusammenhangs zwischen den x- und y- Werten der computergestützten Methode bei den Modellanpassungen an die Frontalaufnahmen

Modellzusammenfassung				
Modell	R (=Pearson)	R-Quadrat (R ²)	Korrigiertes R-Quadrat	Standardfehler des Schätzers
auto	0,7109	0,5054	0,4920	0,0944

Koeffizienten (abhängige Variable: DY-auto)						
Modell		Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Signifikanz
		B	Standardfehler	Beta		
auto	(Konstante)	0,1676	0,0469		3,5710	0,0010
	DX-auto	0,5031	0,0818	0,7109	6,1488	0,0000

Tabelle 11: Korrelationstest zwischen den Gesamtdifferenzierungsmaßen der computergestützten Anpassungsmethode und den Projektionsfehlern der virtuellen Kamerakalibrierung

		D(X;Y)-auto	mean (mm)
D(X;Y)-auto	Korrelation nach Pearson	-	0,3879
	Signifikanz (2-seitig)	-	0,0147
	N	-	39
mean (mm)	Korrelation nach Pearson	0,3879	-
	Signifikanz (2-seitig)	0,0147	-
	N	39	-

Tabelle 12: Korrelationstest zwischen den Gesamtdifferenzierungsmaßen beider Methoden (man und auto) und den entsprechenden Scanfehlerwerten

		Summe Scanfehler	D(X;Y)-auto	D(X;Y)-man
Summe Scanfehler	Korrelation nach Pearson	-	-0,0050	-0,1169
	Signifikanz (2-seitig)	-	0,9758	0,4784
	N	-	39	39
D(X;Y)-auto	Korrelation nach Pearson	-0,0050	-	-
	Signifikanz (2-seitig)	0,9758	-	-
	N	39	-	-
D(X;Y)-man	Korrelation nach Pearson	-0,1169	-	-
	Signifikanz (2-seitig)	0,4784	-	-
	N	39	-	-

Tabelle 13: Korrelationstest zwischen den Scanfehlerwerten und den Projektionsfehlern der virtuellen Kamerakalibrierung

		Summe Scanfehler	mean (mm)
Summe Scanfehler	Korrelation nach Pearson	-	0,0606
	Signifikanz (2-seitig)	-	0,7139
	N	-	39
(mean) mm	Korrelation nach Pearson	0,0606	-
	Signifikanz (2-seitig)	0,7139	-
	N	39	-

Tabelle 14: Vergleich der Differenzierungsmaße der manuellen (man) und computer-gestützten (auto) Anpassungen der 3-D-Modell-Projektionen an die Seitenaufnahmen

Proband	Methode	D(X;Y)	DX	DY
1	man	1,1548	0,8878	0,7386
	auto	1,0280	0,9188	0,4610
2	man	1,1119	0,9106	0,6382
	auto	0,7501	0,6298	0,4076

3	man	1,0802	0,6137	0,8889
	auto	0,8018	0,6984	0,3938
4	man	1,6258	1,4931	0,6433
	auto	0,5308	0,4955	0,1905
5	man	2,2135	2,0103	0,9307
	auto	0,8919	0,8182	0,3548
6	man	0,8463	0,4416	0,7220
	auto	0,6629	0,4861	0,4507
7	man	0,8189	0,7180	0,3936
	auto	0,4521	0,3928	0,2238
8	man	1,0551	0,7780	0,7127
	auto	1,9739	1,8160	0,7737
9	man	0,9156	0,8662	0,2968
	auto	0,5359	0,3883	0,3693
10	man	1,5527	1,3134	0,8281
	auto	0,6427	0,5976	0,2364
11	man	1,4341	1,0506	0,9761
	auto	0,8005	0,7158	0,3583
12	man	0,8006	0,7103	0,3695
	auto	0,8529	0,7973	0,3030
13	man	0,8775	0,7723	0,4167
	auto	0,3994	0,2953	0,2689
14	man	1,4503	1,2370	0,7570
	auto	0,2646	0,2168	0,1517
15	man	0,6055	0,4703	0,3813
	auto	0,7131	0,5828	0,4109
16	man	1,3592	0,8723	1,0424
	auto	0,5718	0,4383	0,3672
17	man	0,8060	0,7257	0,3508
	auto	0,3756	0,2983	0,2283
18	man	0,5149	0,4257	0,2898
	auto	0,2966	0,2482	0,1625
19	man	0,9745	0,8586	0,4608
	auto	0,3618	0,2332	0,2766
20	man	0,8587	0,7425	0,4314
	auto	0,5874	0,4552	0,3712

Tabelle 15: Anwendung des Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest auf alle erhaltenen Differenzierungsmaße bei den Modellanpassungen an die Seitenaufnahmen

		D(X;Y)-man	DX-man	DY-man	D(X;Y)-auto	DX-auto	DY-auto
N		20	20	20	20	20	20
Parameter der Normalverteilung ^a	Mittelwert	1,1028	0,8949	0,6134	0,6747	0,5761	0,3380
	Standardabweichung	0,4034	0,3806	0,2437	0,3709	0,3574	0,1390
Extremste Differenzen	Absolut	0,1487	0,2335	0,1844	0,1791	0,1574	0,1500
	Positiv	0,1487	0,2335	0,1844	0,1791	0,1491	0,1500
	Negativ	-0,1269	-0,1138	-0,1081	-0,1344	-0,1574	-0,0981
Kolmogorov-Smirnov-Z		0,6651	1,0445	0,8249	0,8008	0,7038	0,6707
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		0,7683	0,2254	0,5042	0,5428	0,7049	0,7592

Tabelle 16: T-Test bei gebundenen Stichproben zum Vergleich der Gesamtdifferenzierungsmaße D(X;Y) beider Methoden (man und auto) bei den Anpassungen an die Seitenaufnahmen

Statistik bei gebundenen Stichproben

		Mittelwert	N	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes
Paar 2 (Seitenaufnahme)	D(X;Y)-man	1,1028	20	0,4034	0,0902
	D(X;Y)-auto	0,6747	20	0,3709	0,0829

Korrelationen bei gebundenen Stichproben

		N	Korrelation	Signifikanz
Paar 2	D(X;Y)-man & D(X;Y)-auto	20	0,1521	0,5221

T-Test bei gebundenen Stichproben

	Gepaarte Differenzen							
	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes	95% Konfidenzintervall der Differenz		T	df	Sig. (2-seitig)
				Untere	Obere			
Paar 2 D(X;Y)-man – D(X;Y)-auto	0,4281	0,5048	0,1129	0,1919	0,6644	3,7929	19	0,0012

Tabelle 17: Deskriptive Statistik der resultierenden Untersuchungsergebnisse bei den Anpassungsvorgängen von 20 ausgewählten 3-D-Modellen an die entsprechenden Seitenaufnahmen

10 männliche und 10 weibliche Probanden

	N	Spannweite	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standard-abweichung	Varianz
D(X;Y)-man	20	1,6986	0,5149	2,2135	1,1028	0,4034	0,1627
DX-man	20	1,5846	0,4257	2,0103	0,8949	0,3806	0,1449
DY-man	20	0,7526	0,2898	1,0424	0,6134	0,2437	0,0594
D(X;Y)-auto	20	1,7093	0,2646	1,9739	0,6747	0,3709	0,1376
DX-auto	20	1,5992	0,2168	1,8160	0,5761	0,3574	0,1278
DY-auto	20	0,6220	0,1517	0,7737	0,3380	0,1390	0,0193
mean (pix)	20	4,2000	5,3000	9,5000	6,8750	1,1621	1,3504
max (pix)	20	15,4000	11,0000	26,4000	15,8900	4,1035	16,8388
mean (mm)	20	0,6000	0,9000	1,5000	1,1250	0,1803	0,0325
max (mm)	20	2,5000	1,8000	4,3000	2,5800	0,6606	0,4364
Scanfehler 1	20	0,1940	0,1390	0,3330	0,2294	0,0575	0,0033
Scanfehler 2	20	0,2330	0,1340	0,3670	0,2101	0,0666	0,0044

Tabelle 18: Korrelationstest zwischen den x- und y- Differenzierungsmaßen innerhalb einer Methode bei den Anpassungen an die Seitenaufnahmen

		DY-man	DY-auto
DX-man	Korrelation nach Pearson	0,4902	-
	Signifikanz (2-seitig)	0,0282	-
	N	20	-
DX-auto	Korrelation nach Pearson	-	0,8418
	Signifikanz (2-seitig)	-	0,0000
	N	-	20

Tabelle 19: Regressionsanalyse zur Prüfung eines linearen Zusammenhangs zwischen den x- und y- Werten der computergestützten Methode bei den Modellanpassungen an die Seitenaufnahmen

Modellzusammenfassung				
Modell	R	R-Quadrat	Korrigiertes R-Quadrat	Standardfehler des Schätzers
1	0,8418	0,7087	0,6925	0,0771

Koeffizienten (abhängige Variable: DY-auto)						
Modell	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Signifikanz	
	B	Standardfehler	Beta			
1	(Konstante)	0,1494	0,0333		4,4868	0,0003
	DX-auto	0,3273	0,0495	0,8418	6,6174	0,0000

Tabelle 20: Deskriptive Statistik der erhaltenen Differenzierungsmaße nach zehnmaligem Bepunkten zweier identischer Fotografien

persönlicher Fehler							
	N	Spannweite	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standard-abweichung	Varianz
D(X;Y)	10	0,0522	0,1005	0,1527	0,1281	0,0174	0,0003
DX	10	0,0488	0,0648	0,1136	0,0907	0,0192	0,0004
DY	10	0,0325	0,0700	0,1025	0,0895	0,0115	0,0001

Anhang D

Abkürzungsverzeichnis:

DX	Eindimensionales Differenzierungsmaß in x-Richtung
DX-auto	x-Differenzierungsmaß der computergestützten Anpassungsmethode
DX-man	x-Differenzierungsmaß der manuellen Anpassungsmethode
DY	Eindimensionales Differenzierungsmaß in y-Richtung
DY-auto	y-Differenzierungsmaß der computergestützten Anpassungsmethode
DY-man	y-Differenzierungsmaß der manuellen Anpassungsmethode
D(X;Y)	Gesamtdifferenzierungsmaß (zweidimensional)
D(X;Y)-auto	Gesamtdifferenzierungsmaß der computergestützten Anpassungsmethode
D(X;Y)-man	Gesamtdifferenzierungsmaß der manuellen Anpassungsmethode
max (mm)	Maximale Landmark-Lagedifferenz nach Kalibrierung in Millimetern
max (pix)	Maximale Landmark-Lagedifferenz nach Kalibrierung in Pixeln
mean (mm)	Durchschnittliche Landmark-Lagedifferenz nach Kalibrierung in Millimetern
mean (pix)	Durchschnittliche Landmark-Lagedifferenz nach Kalibrierung in Pixeln
p	Irrtumswahrscheinlichkeit eines Signifikanztests
R ²	Bestimmtheitsmaß einer Regressionsanalyse

Danksagung

Ich danke Herrn Prof. Dr. Jochen Wilske vom Institut für Rechtsmedizin für die Überlassung des Themas und seine Unterstützung.

Ein großer Dank gilt Frau Dr. Daniela Bellmann, die mich mit hervorragender Betreuung und stets kritischen und anregenden Bemerkungen wesentlich vorangetrieben und motiviert hat.

Weiterhin möchte ich Herrn Dr. Jörg Haber vom bayerischen Landeskriminalamt für die Entwicklung der Kalibrierungssoftware danken. Ohne seine mathematische und computertechnische Kompetenz wäre dieses Projekt nicht realisierbar gewesen.

Ein weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Thomas Krämer, der sich immer die Zeit nahm Lösungen für jegliche Probleme zu finden und darüber hinaus stets Ansprechpartner für unterschiedlichste Fragen war.

Vielen Dank an Frau PD Dr. Elisabeth Türk, die eine abschließende Korrektur der Arbeit vorgenommen hat.

Ganz herzlich danken möchte ich meiner Freundin und meinen Eltern, die mich vom ersten Tag an durch das Studium und die Dissertationsarbeit begleitet und unterstützt haben.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Sebastian Antes
Anschrift	Späthstrasse 16, 67655 Kaiserslautern
Geburtsdatum	02.04.1983
Geburtsort	Kaiserslautern
Familienstand	ledig
Eltern	Carmen Schary und Friedrich Karl Antes
Beruf der Mutter	Bürokauffrau
Beruf des Vaters	Versicherungskaufmann

Schulische Ausbildung

08/1989 – 06/1993	Grundschule Röhmschule, Kaiserslautern
08/1993 – 03/2002	Gymnasium am Rittersberg, Kaiserslautern
15.03.2002	Erwerb der allgemeinen Hochschulreife

Wehrdienst

07/2002 – 03/2003	4./FschJgBtl 263, Zweibrücken
-------------------	-------------------------------

Medizinische Ausbildung

06/2003 – 08/2003	Krankenpflegedienst, Westpfalz-Klinikum GmbH Standort I, Kaiserslautern
10/2003 – 12/2009	Studium der Humanmedizin Universität des Saarlandes, Homburg Abschluss: Zweiter Abschnitt der Ärztlichen Prüfung
Seit 04.01.2010	Arzt in Weiterbildung zum Facharzt für Neurochirurgie Neurochirurgische Klinik, Universitätsklinikum des Saarlandes, Homburg