

Aus der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie
der Ludwig-Maximilians-Universität München
Direktor: Prof. Dr. med. dent. Reinhard HICKEL

Dreidimensionale Untersuchungen zur Morphologie der oberen Frontzähne

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

vorgelegt von
Florian Andreas Probst

aus
Dachau

2007

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter: Prof. Dr. Dr. A. Mehl

Mitberichterstatter: Priv. Doz. Dr. M. Stöckelhuber
Priv. Doz. Dr. K. A. Herrmann

Dekan: Prof. Dr. D. Reinhardt

Tag der mündlichen Prüfung: 09.10.2007

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	7
2	LITERATURÜBERSICHT	9
2.1	Die Frontzahnrestauration	9
2.1.1	Aufgaben	9
2.1.2	Okklusion	9
2.1.3	Einflussparameter auf die dentale Ästhetik	11
2.1.4	Herstellungsverfahren	19
2.2	Morphologie – Gestalt und Struktur (engl. shape)	21
2.3	Odontometrie – Größe von Zähnen (engl. size)	24
2.3.1	Dimensionen	26
2.3.1.1	Länge, Breite und Dicke von Zähnen	27
2.3.1.2	Abhängigkeiten der Dimensionen vom Geschlecht	27
2.3.1.3	Symmetrievergleiche der Dimensionen	28
2.3.2	Proportionen	28
2.3.2.1	Proportionen innerhalb eines Zahnes	29
2.3.2.2	Proportionen zwischen den Zähnen	30
2.3.2.3	Proportionen zwischen Ober- und Unterkiefer	31
2.3.2.4	Proportionen der Gingiva	32
2.3.2.5	Proportionen zwischen Zähnen und Gesicht	32
2.3.2.6	Abhängigkeiten der Proportionen vom Geschlecht	33
2.3.2.7	Symmetrievergleiche der Proportionen	34
2.4	Biogenerisches Zahnmodell (Mehl 2003)	34
2.5	Ähnlichkeitsbestimmungen der Zahnmorphologie	36
2.6	Ziele der Arbeit	39

3	MATERIAL UND METHODE	41
3.1	Erstellen einer Zahnbibliothek	41
3.1.1	Probandengut	41
3.1.2	Abformung und Herstellen von Kiefer- und Einzelzahnmodellen	42
3.1.3	Vermessung mit einem 3D-Laserscanverfahren	44
3.1.3.1	Vorbereitungen zur Vermessung	44
3.1.3.2	Prinzip des 3D-Laserscanverfahrens	45
3.1.4	Datenverarbeitung	47
3.2	Oberflächenvergleich der Vestibularflächen oberer Frontzähne	50
3.2.1	Ähnlichkeit symmetrisch gegenüberliegender Zähne jeweils eines Probanden	52
3.2.2	Ähnlichkeit innerhalb der drei Frontzahntypen unterschiedlicher Probanden	54
3.2.3	Ähnlichkeitsvergleich zwischen symmetrisch gegenüberliegenden und beliebigen Zähnen gleicher Frontzahntypen	54
3.2.4	Vergleich unterschiedlicher Frontzahntypen	55
3.2.5	Vergleich verschiedener Ähnlichkeitsmaße	55
3.2.6	Visuelle Beurteilung von Ähnlichkeiten zwischen Frontzähnen und multivariate Analyse	56
3.3	3D-Untersuchungen zur Spiegelsymmetrie	60
3.3.1	3D-Oberflächenvergleich von symmetrisch gegenüberliegenden Frontzähnen eines Zahntyps	60
3.3.2	Spiegelsymmetrischer Ersatz	62
3.3.3	Vergleich des spiegelsymmetrischen Ersatzes mit der Originalsituation	63
3.3.3.1	Approximale Passung	63
3.3.3.2	Okklusale Passung zu den Unterkieferschneidezähnen	64
3.3.3.3	Visueller Eindruck von Spiegelsituation und Originalsituation	64

3.4	Statistische Auswertungen	65
4	ERGEBNISSE	66
4.1	Oberflächenvergleich der Vestibularflächen oberer Frontzähne	66
4.1.1	Ähnlichkeit symmetrisch gegenüberliegender Zähne jeweils eines Probanden	66
4.1.2	Ähnlichkeit innerhalb der drei Frontzahntypen unterschiedlicher Probanden	70
4.1.3	Ähnlichkeitsvergleich zwischen symmetrisch gegenüberliegenden und beliebigen Zähnen gleicher Frontzahntypen	74
4.1.4	Vergleich unterschiedlicher Frontzahntypen	76
4.1.5	Vergleich verschiedener Ähnlichkeitsmaße	78
4.1.6	Visuelle Beurteilung von Ähnlichkeiten zwischen Frontzähnen und multivariate Analyse	81
4.2	3D-Untersuchungen zur Spiegelsymmetrie	86
4.2.1	3D-Oberflächenvergleich von symmetrisch gegenüberliegenden Frontzähnen eines Zahntyps	86
4.2.2	Spiegelsymmetrischer Ersatz	91
4.2.3	Approximale und okklusale Passung der spiegelsymmetrischen Rekonstruktion	91
4.2.4	Visuelle Bewertung von Spiegelsituation und Originalsituation	98

5	DISKUSSION	100
5.1	Diskussion von Material und Methode	100
5.2	Diskussion der Ergebnisse	102
5.2.1	Oberflächenvergleich der Vestibularflächen oberer Frontzähne	102
5.2.2	3D-Untersuchungen zur Spiegelsymmetrie	108
5.3	Ausblick	110
5.4	Schlussfolgerungen	112
6	ZUSAMMENFASSUNG	114
7	LITERATURVERZEICHNIS	116
8	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	133
9	LEBENS LAUF	135
10	DANKSAGUNGEN	136

1 EINLEITUNG

„Sind die Zähne schon allein zur Erhaltung der Gesundheit wichtig, so sind sie für die Sprache, für die Aussprache und Artikulation der Worte und zur Zierde des Gesichtes absolut notwendig.“ (Pierre Fauchard, 1678 – 1761)

Die Frontzähne tragen einen wichtigen Teil zum Erscheinungsbild des menschlichen Gesichtes bei. Kommt es durch einen Krankheitsprozess oder durch Verletzung zu Veränderungen, Zerstörungen oder gar einem totalen Verlust von Frontzähnen, so ist eine prothetische Versorgung indiziert. Die Rehabilitation durch Prothesen, Kronen, Brücken oder Veneers sollte sich in das orofaziale Gesamtgefüge harmonisch einfügen. Funktionelle und werkstoffkundliche Überlegungen können dabei bereits während der prothetischen Planung den ästhetischen Gesichtspunkten diametral gegenüberstehen. Um eine Rehabilitationsmaßnahme in diesem Spannungsfeld erfolgreich durchführen zu können, bedarf es bei der konventionellen Herstellung von Zahnrestorationen eines großen Wissens und entsprechender klinischer Erfahrung. Bei solchen, bis heute üblichen, indirekten Verfahren erfolgt als erstes die Präparation und Abformung von Zähnen. Das weitere Vorgehen findet im zahntechnischen Labor statt, in dem zuerst ein Gipsmodell erstellt wird. Unter Berücksichtigung der Gegenbeziehung und Zuhilfenahme von Artikulatoren, die Kieferbewegungen imitieren, kann die entsprechende Zahnrestauration angefertigt werden. Entsprechende Arbeitsschritte sind das Aufwachsen bzw. Sintern, Einbetten, Gießen oder Pressen, Ausarbeiten, Aufpassen und Polieren. Durch die hohe Anzahl von Schritten und die beschränkten technischen Möglichkeiten im zahntechnischen Labor können sich Verarbeitungsfehler einschleichen, die die Qualität der Restauration vermindern (Mehl 1998).

Die konventionelle Herstellungsweise wird zunehmend von computergestützten Prozessen – vornehmlich CAD/CAM-Verfahren – abgelöst. Folgende Schritte werden hierbei durchlaufen:

- 1) dreidimensionale intra- oder extraorale Datenerfassung der Präparation
- 2) Erzeugung einer virtuellen Zahnrestauration mittels Computer-Aided-Design (CAD)
- 3) Erstellen der realen Restauration gemäß der errechneten Daten mittels computergesteuerter Fräs- und Schleifsysteme (CAM, Computer-Aided-Manufacturing)

Die auf dem Markt befindlichen Systeme haben jedoch das Problem, dass sie zur Gestaltung der Zahnform entweder in hohem Maße die Interaktion des Bedieners erfordern, oder die automatische Rekonstruktion zu stereotypen bzw. zahnuntypischen Rekonstruktionen führt, deren Oberflächen nicht natürlichen morphologischen Kriterien entsprechen. Durch die Beschreibung des biogenerischen Zahnmodells (Mehl 2003) ist es im Seitenzahnbereich möglich geworden, natürliche Zahnoberflächen nahezu vollautomatisch rekonstruieren zu können. In der Literatur existierten bisher keine Ansätze zur Morphometrie der Oberflächen oberer Frontzähne, die für automatische Rekonstruktionsverfahren verwertbar wären.

Um computergestützte Herstellungsverfahren im Frontzahnbereich zu verbessern, wurde in dieser Arbeit die Morphometrie der oberen Frontzähne eingehend dreidimensional analysiert.

2 LITERATURÜBERSICHT

2.1 Die Frontzahnrestauration

2.1.1 Aufgaben

Grundlegendes Ziel einer Zahnrestauration ist die Wiederherstellung der natürlichen Ausgangssituation. Dabei muss eine Restauration im Frontzahnbereich folgende Aufgaben erfüllen (Reiber 1992):

- mastikatorische Funktion
- okklusale Funktion
- phonetische Funktion
- physiognomische und psychosoziale Funktion
- ästhetische Funktion

Der Schlüssel zum Erreichen dieser Aufgaben liegt in der Gestaltung der Oberfläche. Schematisierend kann man feststellen, dass die palatinale Gestaltung oberer Frontzähne die Okklusion beeinflusst, wohingegen die vestibuläre Gestaltung den entscheidenden Einfluss auf die Ästhetik hat.

2.1.2 Okklusion

Gestaltet man die palatinale Fläche der oberen Frontzähne, so ist zu berücksichtigen, dass diese als mechanisches und sensorisches Führungselement für die störungsfreie Funktion des stomatognathen Systems von wesentlicher Bedeutung sind (Lotzmann 1998).

Es existieren folgende Arten an dynamischen Okklusionsformen:

- Front- und eckzahngeführte Okklusion
- Unilateral balancierte Okklusion
- Bilateral balancierte Okklusion

Als Standard für festsitzende Versorgungen gilt das Konzept der frontzahngeschützten Okklusion (Strub et al. 1999). Dabei kommt es zu dynamischen Okklusionskontakten im Bereich der Front- und Eckzähne sowohl bei der Laterotrusion als auch bei der Protrusion. Bei der Protrusion führen unter normaler Belastungsverteilung alle sechs oberen Frontzähne, bei der Lateroprotrusion die Eckzähne zusammen mit den Schneidezähnen der Arbeitsseite und bei der Laterotrusion alleine die Eckzähne. Die Seitenzähne diskluieren nach Einsetzen der Frontzahnführung und werden somit vor exzentrischen Belastungen geschützt. Andererseits nehmen die horizontalen Kauflächen der Seitenzähne die statischen Kräfte im Schlussbiss auf und schützen dadurch die Frontzähne vor protrusiver Überbelastung (Motsch 1978, Schulte 1983, Bauer und Gutowski 1984, Körber 1995). Diese sogenannte wechselseitige Schutzokklusion ist bei Laterotrusionsbewegungen die häufigste Form der natürlichen Okklusion des Menschen mittleren Alters bei intakter Eckzahnführung und gilt als Leitbild für die Kronen- und Brückenprothetik. Prothetische Indikationen sind u.a. die therapeutische Okklusionsform nach Kiefergelenksbehandlung und Restaurationen, die überwiegend parodontal abgestützt sind (Körber 1995).

Zwischen Schneidezahnführung und Gelenkbahnwinkel besteht ein Zusammenhang, der bei der Gestaltung der Länge und Steilheit der Front- und Eckzahnführung zu beachten ist (Körber 1995). Als Anhaltspunkt kann gelten, dass die Frontführung ca. 5-10° steiler als die initiale Kondylenbahnneigung sein sollte (Lotzmann 1998).

Bei einer unilateral balancierten Okklusion sind auf der Laterotrusionsseite neben dem Eckzahn auch die Prämolaren und oft auch die Molaren an der Führung beteiligt. Besonders bei Menschen mit Schliffacetten und Abrasionen ist dieser Okklusionstyp häufig. Ihre Indikation hat dieses Prinzip u.a. bei flacher inzisaler Führung (Celenza 1981), bei insuffizientem Eckzahnparodont zur Unterstützung der Eckzahnführung und bei nicht realisierbarer Eckzahnführung (Motsch 1978, Koeck 1989).

Eine bilateral balancierte Okklusion sollte nur in Sondersituationen zur Anwendung kommen (Motsch 1978, Koeck 1989). Diese Okklusionsform kann beispielsweise bei frontal offenem Biss oder bei schweren Klasse II oder Klasse III Fällen indiziert sein (Celenza 1981).

2.1.3 Einflussparameter auf die dentale Ästhetik

Die in der Literatur beschriebenen Konzepte und Einflussfaktoren zur dentalen Ästhetik sind vielfältig. Prinzipien wie Symmetrie, Dominanz, Form, Dimension und Proportion, Stellung, Farbe und Oberflächentextur können dabei auf unterschiedlichen Ebenen beschrieben werden (Abb.1).



Abb. 1: Parameter der dentalen Ästhetik; selbst erstellte Graphik

- rechte Spalte – Grundprinzipien
- linke Spalte – Ästhetikebenen

Oberste mit der Ästhetik interagierende Ebene ist der Patient als Individuum, der im Rahmen von soziokulturellen Einflüssen eine subjektive Vorstellung von dentaler Ästhetik hegt, die bei der Planung restaurativer Maßnahmen berücksichtigt werden sollten. Konkrete Einflussparameter, des gesamten menschlichen Körpers auf dentale Parameter, wie Statur oder Körpergröße sind kaum von Bedeutung (Perzigian 1981).

Den wichtigsten Teil zur Attraktivität des Menschen trägt das Gesicht bei (Mueser et al. 1984). Wie aber kann man Schönheit messen und was ist entscheidend, damit ein Gesicht als schön eingestuft wird? Schon im vierten Jahrhundert v. Chr. versuchten griechische Künstler Regeln für ideal proportionierte Gesichter (Kopf und Körper der Aphrodite) aufzustellen. Ihnen folgten römische Künstler und Architekten (Vitruvius) und im Zeitalter der Renaissance

stellten weitere namhafte Künstler (da Vinci, Dürer, della Francesca) Regeln auf, die ideale Proportionen und beste Ästhetik und Harmonie beschrieben und teilweise bis heute in der Kieferorthopädie und Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie Bedeutung besitzen. Dies sind etwa das Maßverhältnis von 0,6180 des goldenen Schnittes oder die gleichmäßige vertikale Dreiteilung des Gesichtes. Methoden der Objektivierung fazialer Attraktivität sind die Fotodokumentation, die kephalometrische Analyse (Björk 1947, Ricketts 1960) sowie die Anthropometrie, also die direkte Vermessung am lebenden Objekt. In der aktuellen Literatur werden Studien, bei denen die anthropometrische Messung verwendet wird, zunehmend häufiger (Choe et al. 2004, Farkas 1996, Porter 2004). Dies liegt u.a. daran, dass diese Methode einfach durchzuführen, non-invasiv, dreidimensional, billig und valide ist (Edler 2001, Landes et al. 2002).

Ist bereits die Definition von Normwerten sehr schwierig, so ist es noch schwieriger festzulegen, was nicht nur der Norm entspricht, sondern zusätzlich auch noch als attraktiv gilt (Pogrel 1991). Ein vieldiskutiertes Prinzip ist hierfür die Symmetrie. Allerdings scheint es so, dass die Symmetrie zwar zur Attraktivität von Gesichtern beiträgt, allerdings nicht dafür maßgeblich ist (Cellerino 2003, Hönn und Göz 2007).

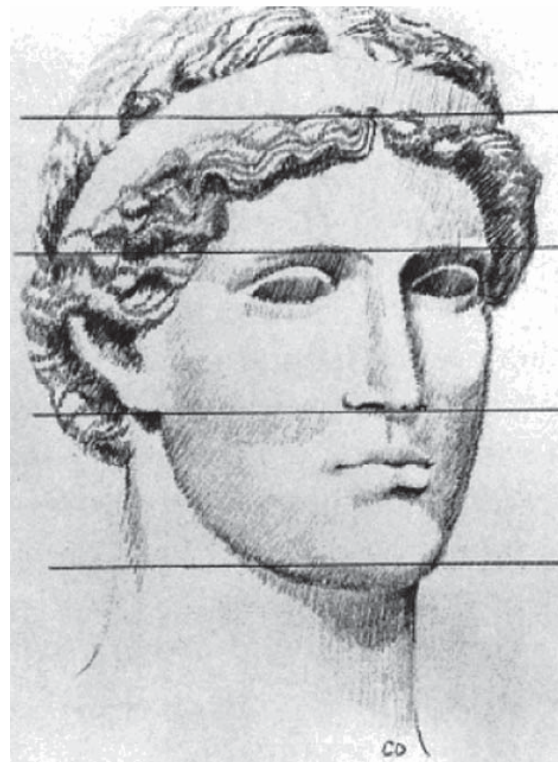


Abb. 2: Dreiteilung des Gesichts nach Vitruvius; Quelle: siehe Abb.-Verzeichnis

Manche Autoren behaupten sogar, die Symmetrie habe gar keinen Einfluss auf die Attraktivität, bzw. verlören erst stark asymmetrische Gesichter an

Attraktivität (Langlois et al. 1987, Shackelford und Larsen 1997). Relativ sicher ist zumindest, dass absolut symmetrische Gesichter nicht als attraktiver bewertet werden (Faure et al. 2002, Swaddle und Cuthill 1995). Seit Anfang und Mitte des 20. Jahrhunderts dominiert die Meinung, die Durchschnittlichkeit sei der Hauptfaktor für die Attraktivität des Gesichtes (Symons 1979, Treu 1914), was in jüngerer Zeit durch digitale Techniken untermauert wurde (Jefferson 1996, Langlois et al. 1987, Sergl et al. 1998, Spyropoulos und Halazonetis 2001). Insgesamt sind durchschnittliche Gesichter zwar attraktiv, allerdings zählen sie nicht zu den besonders attraktiven (Cellerino 2003, Perrett et al. 1994). Zusammenfassend bedeutet das, dass schöne Gesichter durchschnittlich und symmetrisch sind, aber erst durch besondere Merkmale außerordentliche Attraktivität erlangen (Cellerino 2003, Johnston 1993, Perrett et al. 1994). Entscheidende Regionen für die Gesichtsästhetik sind Augen, Nase, Mund und Kinn, wobei der Nase eine Schlüsselrolle zukommt (Rudzki-Janson und Thedens 2000).

Die Ausprägung dieser Merkmale ist abhängig vom Geschlecht zu werten. Frauengesichter sollten sich u.a. durch prominente Wangenknochen, kleine Nase, kleines Kinn und hohe geschwungene Augenbrauen auszeichnen. Die entscheidenden Merkmale für Männergesichter, wie z.B. große Kiefer und starkes Kinn sind dagegen umstritten (Cellerino 2003, Edler 2001, Tatarunaite et al. 2005). Weiterhin sollte beachtet werden, dass das Schönheitsideal gewissen modischen Schwankungen unterworfen ist (Hönn und Göz 2007).

Für Rehabilitationsmaßnahmen im Frontzahnbereich ist ästhetisch wichtigen Bezugspunkten und -linien, wie Pupillenlinie, Gesichtsmittellinie, nasolabialer Winkel oder E-Linie und relevanten Gesichtsproportionen, Aufmerksamkeit zu schenken (Ciche und Pinault 1994, Fradeani 2005, Koeck und Besford 2005, Lombardi 1973, Mack 1996, Rufenacht 1990, Tjan et al. 1984).

Die Ebene der Zähne kann mit den sie umgebenden Lippen als dentolabialer Komplex (Fradeani 2005) aufgefasst werden, da die Präsentation der Zähne abhängig von der mimisch beeinflussten Lippenposition ist (Magne et al. 2003, Morley und Eubank 2001). Parameter sind die Sichtbarkeit der Zähne in Ruheposition (Vig und Brundo 1978, Arnett und Bergman 1993), Wölbung und Profil der Schneidekanten, die Position der Lachlinie (Ciche und Pinault 1994, Owens et al. 2002, Rufenacht 1990, Tjan et al. 1984), der unteren Lippenlinie und des labialen Korridors (Fradeani 2005, Magne et al. 2003), Interinzisallinie (Kokich 1993, Miller et al. 1979, Morley und Eubank 2001, Owens et al. 2002) und die Okklusionsebene (Padwa et al. 1997, Ricketts et al. 1982).



Abb. 3: Dentolabialer Komplex mit Lachlinie (blau) und unterer Lippenlinie (grün)

Den Kern dentaler Ästhetik bilden Form und Größe der Frontzähne. Je umfangreicher die Rehabilitationsmaßnahme, desto wichtiger, aber auch komplexer wird es, diese beiden Parameter zu definieren. Als eine Art Faustformel zur Formauswahl dient die von Williams (1914) aufgestellte „Dreiformentheorie“. Sie beschreibt einen Zusammenhang zwischen Gesichts- und Zahnform. Diese Theorie wird heute, v.a. vor dem Hintergrund der Anwendbarkeit auf ältere Menschen, kritisch gewertet (Horn 1985), bzw. wurde in Untersuchungen als unzutreffend charakterisiert (Ibrahimagic et al. 2001, Varjao et al. 2006). Das ebenfalls verbreitete typenharmonische System von Hörauf (1958) stellt eine Beziehung zwischen der Zahnform und dem Konstitutionstyp nach Kretschmer her. Allerdings fällt gerade bei alten oder übergewichtigen

Patienten die Zuordnung zu einem Konstitutionstyp nicht leicht. Weitere teils ältere Formentheorien sind beschrieben (Frush und Fisher 1955, Gysi 1948, Horn 1991, Modrach 1958). Ob es „weibliche“ und „männliche“ Zahnformen gibt, ist umstritten (Berksun et al. 2002, Burchett und Christensen 1988, Frush und Fisher 1955, Preston 1984, Tanzer 1956). Sicher ist, dass in der Rechtsmedizin die Zahnform nicht zur Identifizierung des Geschlechts herangezogen werden kann (Koek und Besford 2005). Allerdings ist bekannt, dass insbesondere Frauen ovale Zahnformen als besonders ästhetisch empfinden (Brisman 1980, Carlsson et al. 1998). Die Dimensionen und Proportionen oberer Frontzähne sind vielfach beschrieben und Gegenstand von Kapitel 2.3. Wichtige Dimensions- bzw. Proportionsmerkmale sind u.a. das Längen-/Breitenverhältnis eines Zahnes, das Breitenverhältnis zwischen Zähnen und Dimensionsverhältnisse zwischen Zähnen und Gesicht. So wurde zur Bestimmung der mesio-distalen Breite der oberen Frontzähne lange Zeit die Nasenbreite oder der Eckzahnbogenabstand herangezogen (Gerber 1965, Krajicek 1960, Lee 1962). Aktuelle Untersuchungen dagegen betrachten den Abstand der inneren Lidpunkte bzw. den Abstand der Pupillen als maßgebend (Abdullah 2002, Al Wazzan 2001, Gomes et al. 2006). Ein Punkt, der bei der Form- und Proportionsbestimmung berücksichtigt werden muss, ist das Alter des Patienten, dem das Ausmaß der Schneidekantenabrasion entsprechen sollte. Diese beeinflusst u.a. die Länge der klinischen Krone, die Stufe zwischen den Schneidekanten der mittleren und lateralen Inzisivi sowie die Scharfkantigkeit des Winkelmerkmals. Alte Photographien des Patienten geben ebenfalls wertvolle Hinweise zur Wahl von Form und Größe. Unter Berücksichtigung der Harmonie des dentolabialen Komplexes ist die Stellung der Frontzähne ein weiterer wichtiger Aspekt dentaler Ästhetik. Noch heute maßgebend für eine ästhetische wie funktionelle Ausformung der Zahnbögen stellen die von Andrews (1972) postulierten „sechs Schlüssel der Okklusion“ dar. Aktuelle Studien zeigen, dass mittlere Schneidezähne mit idealer Achsenneigung als sehr attraktiv beurteilt werden und nur

kleine Achsenveränderungen der lateralen Schneidezähne keine negativen Auswirkungen haben (Brunzel et al. 2006, Wolfart et al. 2004). Deutliche Engstände oder Lücken beeinflussen die Ästhetik negativ (Berg 2001, Kerosou et al. 1995, Schlosser et al. 2005). Neben den genannten zahneigenen Faktoren dentaler Ästhetik spielen die Farbe und Oberflächentextur der Frontzähne und die damit erzeugten optischen Effekte eine nicht zu vernachlässigende Rolle.

Das Erscheinungsbild parodontaler Strukturen ist erheblich von ihrem Gesundheitszustand abhängig, der Farb- und Formverhältnisse stark beeinflussen kann. Besonders bei Patienten mit hoher Lachlinie muss die Gingiva einige wichtige Voraussetzungen erfüllen. Der Gingivasaum sollte regelmäßig und parallel zur Verbindungslinie der oberen Schneidekanten und zur Unterlippe verlaufen (Belser 1982, Fradeani 2005) und an den oberen Eckzähnen und mittleren Schneidezähnen weiter apikal als an den seitlichen Schneidezähnen liegen (Ciche und Pinault 1994). Die apikalen Scheitelpunkte des Gingivasaums sollten sich distal der jeweiligen Zahnachse befinden (Wheeler 1961, Smukler und Chaibi 1997). Desweiteren sind die Interdentalpapillen für die typische girlandenförmige Ausprägung der Gingiva verantwortlich. Sind diese normal ausgeprägt, ist es nötig, dass der vorgesehene Zahnersatz weitgehend der Kontur des ursprünglichen Zahnes oder der vorhergehenden Restauration entspricht, damit einer Entzündungsreaktion der Gingiva vorgebeugt wird (Kois 1996, Tarnow et al. 1992, Wheeler 1961).

Weitere Aspekte, die bei der restaurativen Planung berücksichtigt werden müssen, sind die Vorstellungen des Patienten und die Phonetik.

Was sich auf all den genannten Ebenen wieder findet, sind gewisse übergeordnete Prinzipien, wie Symmetrie, Durchschnittlichkeit, Proportion und Dominanz bzw. Kontrast (Ciche und Pinault 1994, Levin 1978, Lombardi 1973, Magne et al. 2003, Morley und Eubank 2001, Rufenacht 1990, Snow 1999).

Aktuelle Untersuchungen zeigen beispielsweise, dass eine symmetrische Anordnung der Frontzähne einen wesentlichen Einfluss auf die dentale Attraktivität hat (Brunzel et al. 2006, Kokich 2006).

Es existieren einige Konzepte, die dem praktizierenden Zahnarzt als eine Art Leitfaden bei der Herstellung von ästhetischen Restaurationen dienen sollen (Chiche und Pinault 1994, Lombardi 1973, Magne et al. 2003, Magne und Belser 2004, Morley und Eubank 2001, Rufenacht 1990, Snow 1999). Einen sehr bekannten, umfangreichen und gut strukturierten Leitfaden für die Planung und Umsetzung natürlicher ästhetischer Frontzahnrestaurationen vollziehen Magne et al. (2003) anhand einer ästhetischen Checkliste, die 14 grundlegende relativ objektive Kriterien aufführt. Als objektivstes der Kriterien werden die relativen Zahndimensionen angeführt, da diese einfach und physikalisch zu bestimmen seien.

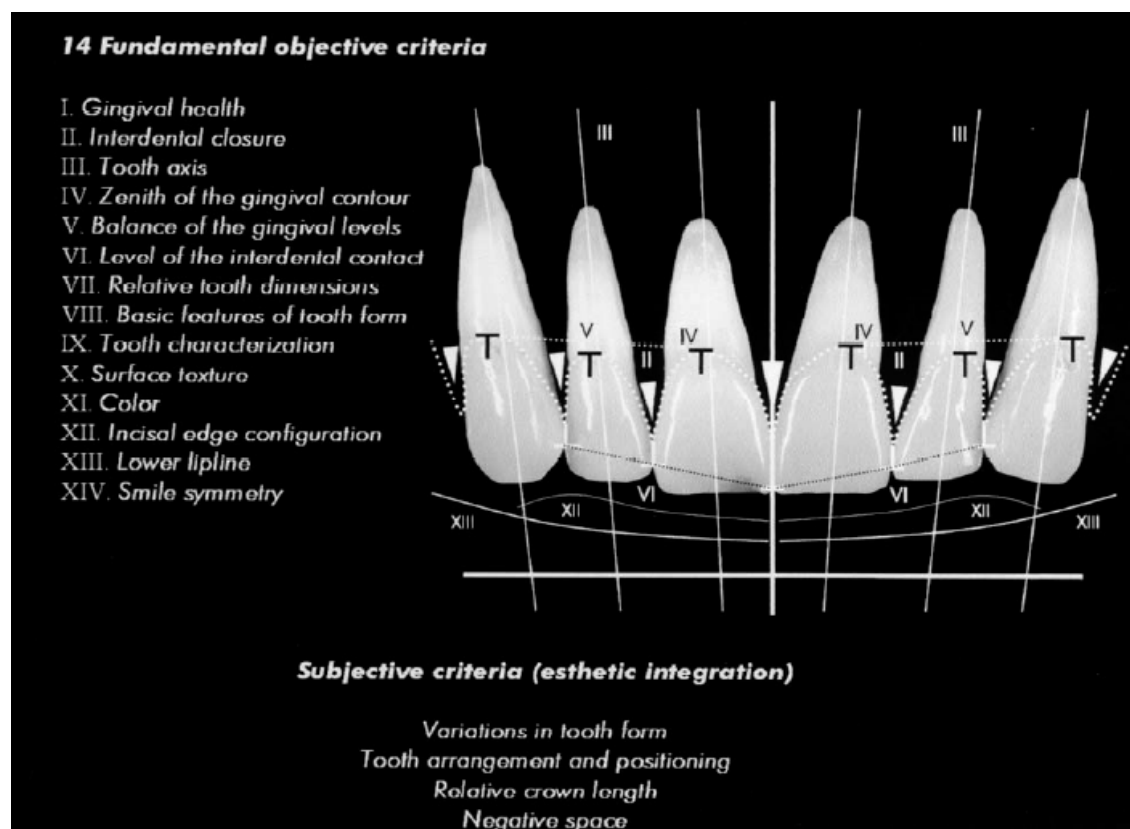


Abb. 4: Ästhetische Checkliste nach Magne et al. (2003)

Von den vielen genannten Einflussparametern einer gelungenen ästhetischen Rehabilitation kommt der Struktur und Größe (Kap. 2.2, 2.3) eine Schlüssel-funktion bei der Zahnrekonstruktion zu. Besonders Dimensionen und Propor-tionen morphometrischer Parameter (Kap. 2.1.4) sind mit mathematischen For-meln beschreibbar und können als Informationsbasis für computergestützte, maschinelle Restaurationsverfahren wertvoll sein.

2.1.4 Herstellungsverfahren

Bei der Herstellung von Zahnrestaurationen unterscheidet man grundsätzlich zwischen der konventionell additiven und der subtraktiv maschinellen Herstel-lungsweise.

Die konventionellen Verfahren, sind dabei mit etlichen Problemen behaftet. Die große Anzahl der Arbeitsschritte und die beschränkten Möglichkeiten im zahn-technischen Labor führen zu Verarbeitungsfehlern, nicht optimaler Material-qualität und zu einem Ausschluss gewisser Materialien (z.B. Zirkonoxid-keramiken). Der hohe Zeitaufwand führt außerdem zu hohen Kosten. Schließ-lich hängt die konventionelle Modellation von Zahnoberflächen stark von sub-jektiven Faktoren, wie Erfahrung und Vorwissen des Erstellers (zumeist des Zahntechnikers) ab, was dazu führt, dass die entstandene Zahnoberfläche oft-mals dessen Handschrift trägt und deshalb von der eigentlich gewünschten na-türlichen Form abweichen kann (Mehl 2003).

Auswege können computergestützte, maschinelle Verfahren weisen, die es er-möglichen, bei relativ geringem Zeitaufwand und Kosten, Zahnersatz mit immer gleichbleibender Qualität zu produzieren. Darüberhinaus können neue Werk-stoffe mit hervorragenden Materialeigenschaften, wie Zirkonoxidkeramiken, zum Einsatz kommen.

Bei den ersten auf dem Markt eingeführten CAD/CAM-Systemen ergaben sich anfangs jedoch qualitative Einbußen, v.a. im Bereich der Zuverlässigkeit und Passgenauigkeit (Stoll und Stachniss 1990). Aktuelle Systeme zeichnen sich dahingegen durch hohe Zuverlässigkeit und Restaurationsrandspalten aus, die im Bereich von Randspalten konventionell gefertigter Restaurationen liegen (Bindl und Mörmann 2005). Ein ungelöstes Problem besteht aber weiterhin in der automatischen Berechnung der Zahnoberfläche. Das wird daran deutlich, dass die verschiedenen zurzeit angebotenen Verfahren zur Oberflächengestaltung entweder ein sehr hohes Maß an Interaktion seitens des Anwenders erfordern oder bei automatischer Rekonstruktion stereotype, zahnuntypische und großteils für die jeweilige Restauration unpassende Oberflächen aufweisen, die nicht natürlichen morphologischen Kriterien entsprechen. Ziel ist somit ein möglichst weitgehendes automatisches Herstellungsverfahren, das eine nach statischen, funktionellen und natürlichen, morphologischen Kriterien gestaltete Außenfläche von Restaurationen erstellen kann. Diesem Ziel ist man durch ein spezielles mathematisches Modell näher gekommen, das Zahnoberflächen vollständig in einer allgemeinen Art und Weise beschreibt, so dass man aus dessen Kenntnis die fehlenden Anteile einer Zahnoberfläche rekonstruieren kann (Mehl 2003). Dieses sogenannte Biogenerische Zahnmodell wurde bereits im Seitenzahnbereich an Inlaysituationen getestet (Richter 2006), mit dem Ergebnis, dass in allen Fällen eine vollautomatische Rekonstruktion möglich war. Weitere Tests zur Anwendung des Biogenerischen Zahnmodelles verdeutlichten dessen Flexibilität (Litzenburger 2007).

Für computergestützte Rekonstruktionen sind in erster Linie morphometrische Beziehungen von Bedeutung, welche maßgebend zu der Auswahl und Modellation von Zahnoberflächen beitragen. Morphometrie bezeichnet die quantitative Erfassung und vergleichende Analyse von biologischen Formen (Zollikofer 2002), wobei grundlegend zwischen der Gestalt oder Struktur (engl. shape) und der Größe (engl. size) differenziert wird. Eine gängige Definition

von Gestalt und Struktur lautet folgendermaßen: Zwei Erscheinungsformen haben die gleiche Gestalt und Struktur nur dann, wenn sie allein durch Rotation, Translation und Skalierung Merkmalspunkt für Merkmalspunkt überlagert werden können. Die Größe ist indessen ein Maß, das strukturunabhängig lediglich die Ausdehnung beschreibt. Gestalt oder Struktur und die Größe legen letztlich die Erscheinungsform (engl. form) eines Körpers fest (Mehl 2003).

2.2 Morphologie – Gestalt und Struktur (engl. shape)

Literatur zur Gestalt und Struktur der oberen Frontzähne existieren fast ausschließlich in Form deskriptiver Darstellungen.

Bemerkenswert ist das Buch „Dental Morphology“ (Carlsen 1987), das sich deutlich von vorhergehenden Arbeiten unterscheidet und heute als Standardwerk gilt. Werden die Zahnoberflächen gewöhnlich nur in Bezug auf die jeweiligen Ansichten (von vestibulär, inzisal, palatinal, etc.) beschrieben, so schildert Carlsen den Aufbau der anatomischen Krone aus elementaren makroskopischen Bausteinen. Dies ermöglicht es, ein für alle Zahntypen gemeinsam anwendbares Beschreibungssystem zu entwickeln. Vier Bausteine, darunter der Lobus (Höcker), der Randleistenkomplex, das Cingulum-Derivat und die überzählige Kronenstruktur werden genannt. Jede Zahnkrone stellt eine Kombination dieser, in der Anzahl variierenden Einzelmerkmale dar, weist jedoch immer mindestens einen Lobus auf. Jeder dieser Bausteine wird beschrieben und wiederum in verschiedene Strukturkomponenten aufgeteilt.

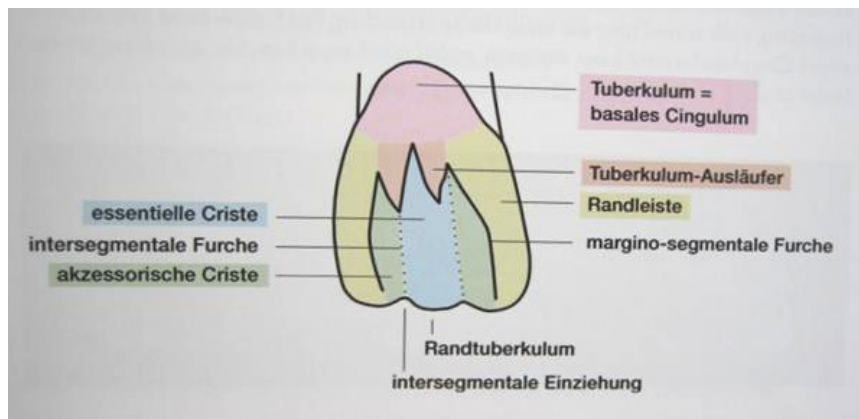


Abb. 5: Grundaufbau der Palatinalfläche des mittleren oberen Inzisivus nach Carlsen

Variablen dieser Beschreibungsmethode sind u.a die Zahngrößen und Zahnproportionen (Kap 2.3), Höckeranzahl und -lage, Cristen-System, Furchen-Fossa-System, Randleisten und die auf Flächen bzw. Elemente bezogenen Variablen Äquator, Neigung, Krümmung. Weitere qualitative Beschreibungen der Struktur der oberen Frontzähne nennen Begriffe wie Inzisalkante, (beim Eckzahn der Kronenspitze entsprechend), Tuberkulum dentale oder Cingulum (beim Eckzahn evtl. als Nebenhöcker ausgeprägt), Foramen caecum, Längsrillen, Mamelons (engl. Bez. für Erhebungen auf der Schneidekante), Winkelmerkmal, Krümmungsmerkmal etc. (Alt und Türp 1996, Jordan et al. 1992, Schumacher 1995, Scott und Turner 1997, Ash 2003, Lehmann und Hellwig 2005).

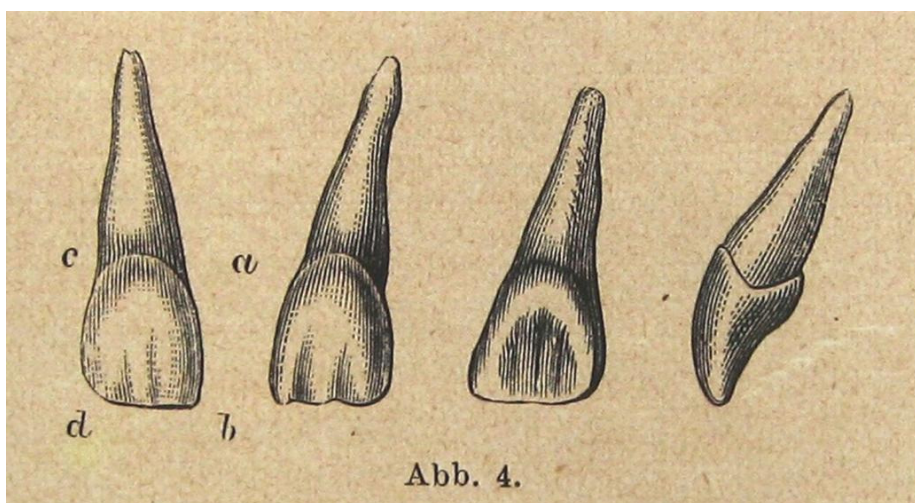


Abb. 4.

Abb. 6: Oberer erster Schneidezahn nach Mühlreiter

Häufig werden auch Variationen der Struktur von Zahnkronen beschrieben. Sie können die gesamte Größe betreffen oder auf Proportionsänderungen beruhen. Bei den Frontzähnen wird dem Shoveling (engl. Bez. für die Ausprägung des schaufelförmigen Charakters der Schneidezähne) die größte Aufmerksamkeit geschenkt. Weitere Beispiele sind die Ausbildung von Längsrillen der Fazialfläche und deren Unterteilung der Inzisalkante in Mamelons, sowie die Ausprägung des Tuberculum dentale, und des Foramen caecum. Im Frontzahnbereich zeigt der laterale Inzisivus die höchste, der Eckzahn die geringste Variabilität (Schumacher 1995).

Aus dem Bestreben heraus, Patienten möglichst harmonische Rekonstruktionen der Frontzahnform zukommen zu lassen, wurden verschiedene Theorien zu Zusammenhängen zwischen Zahnform und Gesichtsform, Körperform bzw. Geschlecht entwickelt (Kap 2.1.3). Trotz aller Bestrebungen ist es bisher nicht gelungen ein hinlängliches System zur Charakterisierung von Frontzahntypen aufzustellen. Dies mag u.a. daran liegen, dass die Beschreibungen der Form von Zähnen einen individuell sehr unterschiedlich ablaufenden Prozess darstellen. So wies Varjao et al. (2006) darauf hin, dass Experten bei dem Versuch der Charakterisierung von Zahnformen zu keiner zufriedenstellenden Übereinkunft kamen.

2.3 Odontometrie – Größe von Zähnen (engl. size)

Ein Zweig der allgemeinen Zahnanatomie beschäftigt sich mit den genauen metrischen Dimensionen der Zähne und deren Proportionen. Dies wird in der Literatur mit dem Begriff der Odontometrie beschrieben (Kieser 1990). Erste Vermessungen von Zahngrößen starteten im letzten Quartal des 19. Jahrhunderts.

Verschiedene Fachbereiche beschäftigen sich mit odontometrischen Daten. Zähne sind aufgrund ihrer chemischen Struktur noch vor den Knochen das alterungsbeständigste Gewebe des menschlichen Körpers. Daher sind sie unverzichtbar für Anthropologen, Archäologen und forensische Experten. Zahnängen und Zahnbreiten entsprechen den am meisten dokumentierten Merkmalen in der Anthropologie (Scott und Turner 1997, Alt und Türp 1996, Alt 1997). Meist liegen hier genetische Fragestellungen zu Grunde, die sich mit der Klärung von Verwandtschaftsverhältnissen verschiedenster ethnischer Gruppen beschäftigen (Kondo et al. 1998, Adeyemi und Isiekwe 2003). In der Rechtsmedizin können odontometrische Daten eine wichtige Rolle bei der Identifikation von Leichen spielen. Durch sie kann es möglich sein, das Alter und die Volkszugehörigkeit zu bestimmen (Lund und Mornstad 1999). Für den Kieferorthopäden gehören Größenvermessungen ebenfalls zur täglichen Arbeit, was sich in einer großen Anzahl an odontometrischen Veröffentlichungen in diesem Fachbereich widerspiegelt. Beispiel hierfür ist die Bolton-Analyse (Bolton 1962), bei der die Summe der Breiten der Oberkieferinzisivi in Relation zur Summe der Breiten der Unterkieferinzisivi gesetzt wird.

Die subjektivste Möglichkeit, die Größe von Zähnen zu bestimmen ist eine grobe Einteilung der Zahngrößen durch visuelles Abschätzen nach „groß“, „mittelgroß“ und „klein“. Solch non-metrische Verfahren sind für wissenschaftliche Untersuchung von Zahngrößen und Zahnproportionen nur bedingt

geeignet. Zu diesem Zwecke hat sich die Odontometrie etabliert. Der Begriff der Odontometrie beinhaltet die metrischen Größenabmessungen von Zähnen. Dies ist möglich mit:

- Lineal und Stechzirkel
- Schieblehre (analog oder digital)
- Messmikroskopen (Van der Linden et al. 1972)
- Photographie und Messung mit Bildverarbeitungsprogrammen (Magne et al. 2003)
- einer 3D-Laserscan-Vermessung (Mehl et al. 1996, 1997, 1998)



Abb. 7: Odontometrie mit dem Lineal; Quelle: siehe Abb.-Verzeichnis

2.3.1 Dimensionen

Erste Vermessungen von Zahngrößen fanden im letzten Quartal des 19. Jahrhunderts statt (Mühlreiter 1874, Parreidt 1884). Standardwerk ist heute das Buch „Human adult odontometrics“ (Kieser 1990), in dem Autoren wie Hanihara, Lundström oder Moorrees zitiert werden.

Ein Problem beim Vergleich älterer odontometrischer Daten resultiert aus der uneinheitlichen Terminologie. Das zeigt sich z.B. daran, dass der mesiodistale Diameters u.a. als „width“ (Seipel 1946), „breadth“ (Selmer-Olsen 1949) oder „length“ (Schamschula et al. 1972) bezeichnet wird. In der aktuellen internationalen Literatur hat es sich durchgesetzt, einfach nur vom mesiodistalen Diameter zu sprechen (Kieser 1990). In Hinsicht auf Proportionsverhältnisse wird der Begriff des Längen-Breiten-Verhältnisses (width/length-ratio, width-to-length proportion) vielfach benutzt (Sterrett et al. 1999, Magne et al. 2003). Es drückt das Verhältnis der größten mesiodistalen Strecke (engl. width) im Verhältnis zur längsten inziszervikalen Strecke (engl. length) eines Zahnes aus.

Unterschiede in der Wahl der Referenzpunkte sind ein weiteres Problem beim Vergleich odontometrischer Daten. Heute sind die Techniken für den mesiodistalen und vestibuloralen Diameter, die Seipel (1946) und Moorrees (1957) vorschlugen und von Kieser (1990) übernommen wurden, üblich. Dabei ist der mesiodistale Diameter der größte Abstand zwischen den Approximalflächen der Krone, der parallel zu den okklusalen und vestibulären Zahnoberflächen gemessen wird. Der vestibulorale Diameter wird definiert als größte Strecke zwischen vestibulären und oralen Zahnoberflächen, die sich in einer senkrechten Ebene zur mesiodistalen Dimension befindet. Bezüglich des inziszervikalen Diameters können als apikale Referenzpunkte sowohl der tiefste Punkt der Grenze zwischen Zahn und Gingiva (klinische Kronenhöhe), als auch der tiefste

Punkt der Schmelz-Zement-Grenze (anatomische Kronenhöhe) herangezogen werden.

2.3.1.1 Länge, Breite und Dicke von Zähnen

Die einschlägigen Werke der Literatur über die Anatomie der Zähne bedienen sich ganz unterschiedlicher Quellen. So zitiert das in Nordamerika am meisten benutzte Buch der Zahnanatomie – „Wheeler’s dental anatomy, physiology and occlusion“ (2003) bisher in jeder Auflage die unveränderten Originaldaten von Black (1915). In seinen Büchern „Odontographie“ (1995) sowie in „Anatomie und Biochemie der Zähne“ (1990) präsentiert Schumacher Daten nach Inke und Giesecke, die 1969 ermittelt und von Schumacher veröffentlicht wurden. Das innerhalb der Reihe „PdZ spezial“ erschienene Buch „Ästhetik in der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde“ (Hupfaut und Nolden 1995) beruft sich neben Schumacher (1990) auf Garn et al. (1964, 1966, 1968) und Sanin und Savara (1971). Die Daten von Mühlreiter (1912) werden in „Einführung in die restaurative Zahnheilkunde“ (Lehmann, Hellwig 2005) wiedergegeben.

Schumacher (1990, 1995) gibt in seiner Tabelle der Zahndimensionen auch Flächengrößen von Zähnen an. Diese wurden aus dem Produkt von mesiodistaler Breite und vestibuloraler Länge für jeden Zahn errechnet.

2.3.1.2 Abhängigkeiten der Dimensionen vom Geschlecht

Es herrscht allgemeine Übereinkunft, dass der mesiodistale, vestibulorale sowie inziszervikale Diameter männlicher Zähne durchschnittlich größer ist als bei Frauen (Haralabakis et al. 2006). Die Canini des Oberkiefers zeigen dabei den größten Geschlechtsunterschied (Garn et al. 1964, Moorrees 1957, Lavelle 1971). Neuere Untersuchungen kommen zu vergleichbaren Ergebnissen (Lund, Mornstad 1999). Der vestibulorale Dimorphismus zeigt dabei eine stärkere Tendenz als der mesiodistale (Harris und Burris 2003).

2.3.1.3 Symmetrievergleiche der Dimensionen

Vergleicht man die Mittelwerte verschiedener Dimensionsparameter zwischen linken und rechten Schneidezähnen eines Zahntyps anhand der Grundgesamtheit, so unterscheiden sich diese nicht signifikant voneinander (Garn et al. 1967, Mavroskoufis und Ritchie 1980, Al Wazzan 1995). Allerdings lassen sich bei symmetrisch gegenüberliegenden Zähnen innerhalb eines Individuums bei 41%-63% substantielle Größenunterschiede feststellen (Mavroskoufis und Ritchie 1980, Al Wazzan 1995).

2.3.2 Proportionen

Wie schon erwähnt, haben bereits vor über 2000 Jahren Künstler und Architekten versucht, Proportionen zu definieren, die besonders ästhetisch wirken. Am besten bekannt ist der goldene Schnitt, der durch das Verhältnis 1:1,682 definiert ist. Beispiele in der Natur lassen sich in der Musterung von Schmetterlingen oder in der Anordnung von Blattadern auf einem Blatt (Coxeter 1953, Levin 1978) finden. Aber auch andere harmonische Verhältnisse wurden vorgeschlagen, wie z.B. „die schöne Proportion“ von Plato, die dem Zahlenwert 1:1,733 entspricht (Rufenacht 1990). Die Möglichkeit der Anwendung des Goldenen Schnittes in der Zahnmedizin wurde erstmals von Lombardi (1973) erwähnt. Dessen praktische Umsetzung auf die Breitenverhältnisse der oberen Frontzähne zueinander oder auf die Längen-Breiten-Verhältnisse von einzelnen Frontzähnen ist beschrieben (Levin 1978, Shoemaker 1987, Snow 1999). Aktuelle Untersuchungen zeigen jedoch, dass der Goldene Schnitt, in diesen Fällen unnatürlich ist (Ali Fayyad et al. 2006, de Castro et al. 2006, Hasanreisoglu et al. 2005, Mahshid et al. 2004, Preston 1993). Die Attraktivität wird zudem nicht durch eine bestimmte Proportion definiert, sondern bewegt sich in einer gewissen Spanne verschiedener Verhältnisse (Ward 2001, Wolfart et al. 2005).

2.3.2.1 Proportionen innerhalb eines Zahnes

Die w/l-Ratio ist die wichtigste Proportion innerhalb eines Zahnes und bezeichnet das Verhältnis zwischen mesiodistaler Breite eines Zahnes und inziszervikaler Kronenhöhe desselben. Dieses Verhältnis trifft eine Aussage ob ein Zahn eher lang und schmal oder breit und kurz ist, bzw. können zwei eigentlich gleichbreite Zähne durch unterschiedliche Längen unterschiedlich breit wirken (Lombardi 1973). Die w/l-Ratio der mittleren Schneidezähne liegt zwischen 78% und 90% und ist im Vergleich zu der des lateralen Schneidezahnes und des Eckzahnes größer. Diese liegt zwischen 73% und 83% (Gillen et al. 1994, Sterrett et al. 1999, Magne et al. 2003).

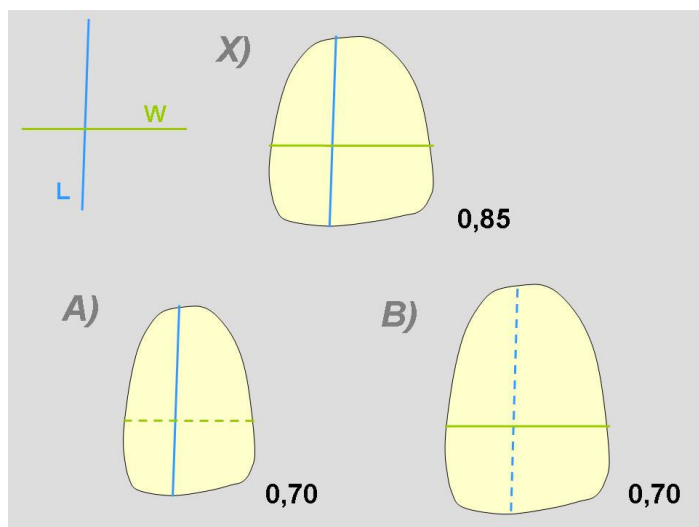


Abb. 8: X) Der obere Zahn besitzt eine w/l-Ratio von 0,85. Diese wird durch A) Verminderung der Breite (B) oder B) durch Erhöhung der Länge (L) auf 0,7 verkleinert, wodurch die entstehenden Zähne schmaler wirken.

Als besonders attraktiv werden Längen-Breiten-Verhältnisse mittlerer Schneidezähne von 75-85 % bewertet (Wolfart et al. 2005).

Der von Le Huche (1971) eingeführte Mesiodistal-Index ist definiert als die Differenz zwischen dem größten Durchmesser der Zahnkrone und demjenigen des Zahnhalses in mesiodistaler Richtung. Der Mesiodistal-Index findet Anwen-

dung, um vor der Präparation von Zähnen den mesiodistalen Substanzabtrag zu ermitteln und damit Indikationen oder Kontraindikationen für Kronenarten besser abzusichern. Er wird am Röntgenbild ermittelt.

2.3.2.2 Proportionen zwischen den Zähnen

Beurteilungen von Zahnproportionen sind vom Betrachtungspunkt abhängig. Die aus der Frontalansicht gesehenen mesiodistalen Breiten unterschieden sich damit wesentlich von den mesiodistalen Breiten im odontometrischen Sinn, wie sie zuvor definiert wurden (Kieser 1990).

Längenverhältnisse und Breitenverhältnisse zwischen verschiedenen Frontzähnen (l/l-Ratio, w/w-Ratio)

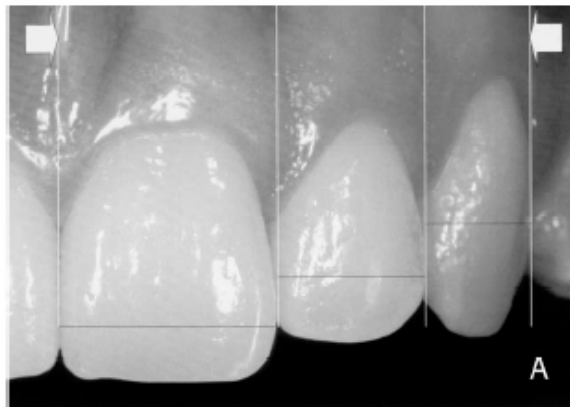
Laterale Schneidezähne sind annäherungsweise um 20% kürzer als mittlere Schneidezähne und Eckzähne. Die mittleren Schneidezähne sind 25% breiter (mesiodistaler Diameter) als die seitlichen Schneidezähne und 10% breiter als die Eckzähne (Gillen et al. 1994).

Breitenverhältnisse verschiedener Frontzähne aus der Frontalansicht

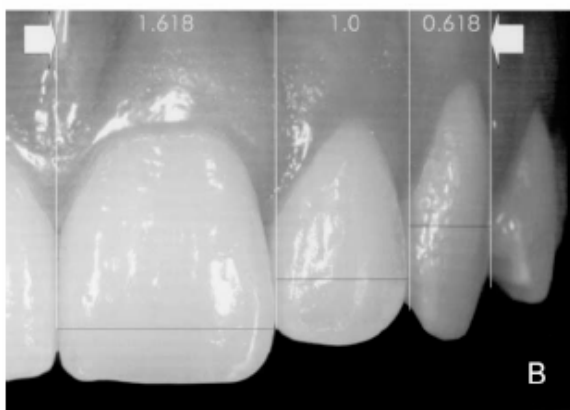
Als wichtigste Proportion zwischen den verschiedenen Zähnen gilt das Breitenverhältnis unterschiedlicher Frontzähne aus der Frontalansicht.

Einige Zeit war es populär, das Verhältnis des Goldenen Schnittes als bestes Breitenverhältnis v.a. zwischen mittlerem und lateralem Schneidezahn anzusehen (Levin 1978, Shoemaker 1987, Snow 1999). Jüngst wurde jedoch gezeigt, dass der Goldene Schnitt diesbezüglich nicht natürlich vorkommt (Ali Fayyad et al. 2006, de Castro et al. 2006, Hasanreisoglu et al. 2005, Mashid et al. 2004, Preston 1993). Das in der Natur vorkommende Verhältnis wird u.a. mit 0,80 (Brisman 1980) bzw. 0,78 (Wolfart et al. 2005) angegeben. Die Attraktivität

wird weder ausschließlich durch den Goldenen Schnitt noch durch eine andere bestimmte Proportion definiert, sondern bewegt sich in einer gewissen Spanne verschiedener Verhältnisse (Rosenstiel et al. 2000, Ward 2001, Wolfart et al. 2005), die von 0,62-0,80 (Rosenstiel et al. 2000) bzw. 0,56-0,68 (Wolfart et al. 2005) reicht.



Original



**Goldener Schnitt
durch
digitale Modifikation**

Abb. 9: A) Originalansicht B) gleiches Bild, aber derart digital modifiziert, dass die Breite der Frontzähne im Goldenen Schnitt zueinander steht; es resultiert der Eindruck eines zu engen Zahnbogens; Quelle: siehe Abb.-Verzeichnis

2.3.2.3 Proportionen zwischen Ober- und Unterkiefer

Mesiodistale Breitenverhältnisse zwischen Oberkiefer- und Unterkieferfrontzähnen sind vor allem für die Kieferorthopädie von Interesse. Empirische Relationen der Breitensummen der Frontzähne von Ober- zu Unterkiefer ermittelten u.a. Tonn (1937), von Fleischer-Peters und Stürmer (1972) und McCorckle (1983). Die Korrelationsanalysen von Bolton (1962) erstrecken sich im Front-

zahnbereich jeweils von Eckzahn zu Eckzahn. Bei der Bolton-Analyse wird das Breitenverhältnis der sechs oberen zu den sechs unteren Frontzähnen (anterior ratio) errechnet.

Das Verhältnis der mesiodistalen Breiten des oberen mittleren Schneidezahnes zu denen des mittleren Unterkieferschneidezahnes steht nur in 3% der Fälle im Goldenen Schnitt zueinander. Das durchschnittliche Verhältnis beträgt 1:1,41 (Preston 1993).

2.3.2.4 Proportionen der Gingiva

Neben den Proportionen der Zähne gehören auch Proportionen, die sich auf gingivale Verhältnisse beziehen, zu den Einflussparametern auf die dentale Ästhetik. Sowohl unter konventionellen prothetischen, aber auch unter implantologischen Gesichtspunkten ist das Wissen um eine natürliche Dimensionierung der Interdentalpapillen von Bedeutung. Hier finden sich in der Literatur wenige Angaben. Die durchschnittliche Höhe mesial von oberen Frontzähnen gelegener Papillen beträgt zwischen 4 und 4,5 mm. Berechnet man aus diesem Wert und den angegebenen inzisivozervikalen Kronenlängen ein Verhältnis, ergeben sich Relationen von 2,44 bis 2,78 (Chang et al. 1999, Olsson et al. 1993). Als Maß für die Krümmung der marginalen Gingiva ist ein gingivaler Winkel („gingival angle“ = GA) beschrieben worden (Olsson et al. 1993).

2.3.2.5 Proportionen zwischen Zähnen und Gesicht

Einen signifikanten Zusammenhang zwischen verschiedenen Gesichtsgrößen, wie Eckzahnbogenabstand (circumferential arc distance between the distal surface of the canines, ARCD), Nasenflügelweite (interalar width of the nose, IAW) oder anderen Gesichtsparametern und der mesiodistalen Breite der mittleren Schneidezähne, sowie der von vorn sichtbaren Weite der Oberkieferfront konnte Scandrett (1982) nachweisen. Er stellte aber fest, dass stets mehr

als eine Variable nötig war, um Vorhersagen zu treffen und musste daher auf mehrere Regressionsgleichungen zurückgreifen. Es existieren weitere Untersuchungen diesbezüglich mit vergleichbaren Ergebnissen (Hoffman 1986, Keng 1986, Al-el-Sheikh 1998).

Aktuelle Arbeiten ziehen als Referenzpunkte v.a. die inneren Lidpunkte (inner canthal distance, ICD), teilweise auch die Pupillen (interpupillary distance) heran und vermessen den Abstand (inner canthal distance, ICD und interpupillary distance, IPD). Es konnten dabei signifikante Beziehungen zwischen der ICD und anderen Parametern und der mesiodistalen Breite der mittleren Schneidezähne bzw. der Weite der Oberkieferfront (ARCD) ermittelt werden (Abdullah 2002, Al Wazzan 2001, Gomes et al. 2006).

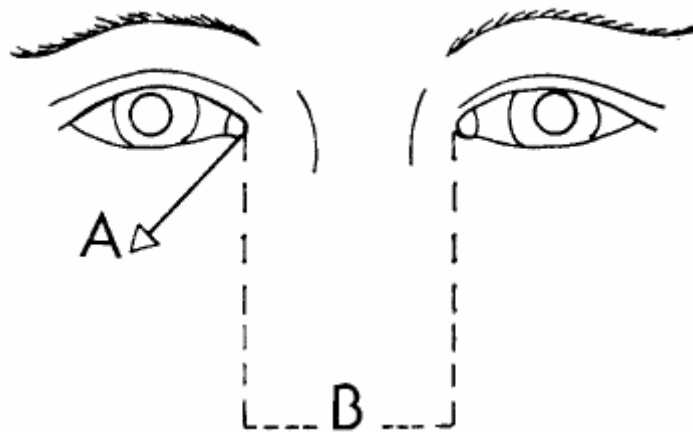


Abb. 10: A) innerer Lidpunkt B) inner canthal distance (ICD); Quelle: siehe Abb.-Verzeichnis

2.3.2.6 Abhängigkeiten der Proportionen vom Geschlecht

Zur Abhängigkeit der Proportionen vom Geschlecht gibt es nur wenige Daten. Hinsichtlich der w/l-Ratio besteht ein signifikanter Geschlechtsunterschied beim Eckzahn und mittleren Schneidezahn (Gillen et al. 1994) bzw. nur beim Eckzahn (Sterrett et al. 1999). Die Daten weisen darauf hin, dass die Zähne bei Frauen bezüglich der w/l-Ratio relativ breiter wirken.

2.3.2.7 Symmetrievergleiche der Proportionen

Wie bei der Abhängigkeit der Proportionen vom Geschlecht gilt, dass auch in diesem Bereich wenige Kenntnisse vorliegen. Vergleicht man die Mittelwerte der w/l-Ratio zwischen linken und rechten Frontzähnen eines Zahntyps anhand der Grundgesamtheit, so unterscheiden sich diese nicht signifikant voneinander (Gillen et al. 1994, Sterrett et al. 1999).

2.4 Biogenerisches Zahnmodell (Mehl 2003)

Das biogenerische Zahnmodell ermöglicht die mathematische Beschreibung aller Zähne eines Zahntyps (z. B. mittlerer oberer Schneidezahn) und bedarf einer Korrespondenzanalyse und Hauptkomponentenanalyse.

Die Korrespondenzanalyse gewährleistet, dass ohne a priori Wissen jeweils gleichartige morphologische Zahnstrukturen (Korrespondenzen) mittels Algorithmen gefunden und objektiv miteinander verglichen werden (z. B. Inzisalkante zu Inzisalkante, Cingulum zu Cingulum). Somit können die Zähne als Vektorfeld im dreidimensionalen Raum dargestellt und ausgehend von einem Referenzzahn und dem entsprechenden Vektorfeld alle anderen Zähne der Bibliothek abgebildet werden. Nachdem eine solche automatische Zuordnung aller Punkte zwischen den Zahnoberflächen der Bibliothek erfolgt ist, werden die jeweils korrespondierenden Punkte gemittelt und somit der Durchschnittszahn berechnet. Dieser weist alle Merkmale auf, die aus der Literatur als charakteristisch für den jeweiligen Zahntyp angesehen werden können (Mehl 2003).

Nach dieser Analyse können im nächsten Schritt durch Hauptachsentransformation die Abweichungen der Bibliothekszähne vom Durchschnittszahn ermittelt werden. Bei der Hauptachsenanalyse wird versucht, die Beschreibung

einer gegebenen variablen Grundmenge auf die wichtigsten Faktoren zu reduzieren. Im Prinzip wird dabei eine geringe Anzahl neuer Vektoren gesucht, die durch Linearkombination einen möglichst großen Anteil des von allen Zähnen gebildeten Vektorraums aufspannen.

Es lassen sich Oberflächenmodelle erstellen, die weniger oder mehr Freiheitsgrade besitzen, je nachdem ob eine größere oder kleinere Zahl von Hauptkomponenten miteinbezogen wurde. Mit den ersten fünf Hauptkomponenten lassen sich bereits 50% aller Variationen der Zahnbibliothek beschreiben, für die ersten 20 Hauptkomponenten waren dies bereits über 80% (Mehl 2003). Somit können mit 20 Parametern bereits die Mehrheit der natürlich vorkommenden Zahnoberflächen synthetisiert werden. Für die Kombination aus Durchschnittszahn und Hauptkomponenten wurde der Begriff des biogenerischen Zahnmodells eingeführt. Dies ist ein Modell für eine Art deformierbaren Zahn, dessen Deformation so erfolgt, dass die wesentlichen Eigenschaften der jeweiligen Grundmenge (z. B. obere mittlere Schneidezähne) berücksichtigt werden und das Ergebnis mit hoher Wahrscheinlichkeit wieder ein Teil der Grundmenge ist.

Soll letztlich eine Zahnoberfläche rekonstruiert werden, so muss in einem dritten Schritt das biogenerische Zahnmodell an die Restzahnsubstanz bzw. den Nachbarzahn angeglichen werden. Zum Teil genügen wenige Konstruktionspunkte, um die Zahnoberfläche eindeutig und optimal auf die eben beschriebene Art zu rekonstruieren (Mehl 2005).

2.5 Ähnlichkeitsbestimmungen der Zahnmorphologie

Zahnoberflächen können als Vektorfeld im dreidimensionalen Raum dargestellt werden. Ähnlichkeitsmaße bzw. Distanzfunktionen können den Grad der Übereinstimmung von Vektoren und folglich auch denjenigen von Zahnoberflächen beschreiben.

Ähnlichkeitsbestimmungen vorausgehend sind die metrische Erfassung und die möglichst gute Übereinanderlagerung (Matching) der beiden zu vergleichenden Oberflächen. Es gibt verschiedene Methoden die Ähnlichkeit von Oberflächen miteinander zu vergleichen. Dazu zählt u.a.

die Euklidische Distanz

$$d(\underline{x}, \underline{y}) = \|\underline{x} - \underline{y}\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

die Tschebyschow-Distanz

$$d(\underline{x}, \underline{y}) = \max \{|x_i - y_i|, 1 \leq i \leq n\}$$

und die Mahalanobis-Distanz.

$$d(\underline{x}, \underline{y}) = \sqrt{(\underline{x} - \underline{y})^T S^{-1}(\underline{x} - \underline{y})}$$

Ähnlichkeitsbestimmungen zwischen verschiedenen Zahnoberflächen können folgende Ziele haben:

- Bewertungen von Rekonstruktionsmethoden
- Mustererkennung von Struktur- und Formmerkmalen
- Clusterbildung (Typisierung etc.)

Bei zahnmedizinischen Rekonstruktionen sind durch Ähnlichkeitsbestimmungen Bewertungen verschiedener Rekonstruktionsmethoden möglich. Dabei kann die Oberfläche der Originalsituation mit der Oberfläche der rekonstruierten Situation verglichen werden.

Weiterer Anwendungsbereich von Ähnlichkeitsbestimmungen ist die mögliche Ableitung von relevanten Strukturmerkmalen, die eine Charakterisierung der Morphologie von Zähnen zulässt. Überbegriff für diesen Vorgang ist die Mustererkennung, die u.a. den Teilbereich der Merkmalsreduktion beinhaltet. Dabei soll geprüft werden, welche Merkmale für eine Klasseneinteilung relevant sind. Unterschiedliche multivariate Verfahren können hierfür zum Einsatz kommen, darunter die Diskriminanzanalyse, die Hauptkomponentenanalyse, die Clusteranalyse, die multidimensionale Skalierung (multidimensional scaling, MDS) und die mehrdimensionale Entfaltung (multidimensional unfolding, MDU) (Backhaus 1996, Borg 2005, Spät 1977).

Durch das Prinzip der multidimensionalen Skalierung werden Zähne in einem Raum latenter Dimensionen auf Basis ihrer Ähnlichkeit angeordnet (Borg und Groenen 2005). Daraufhin können gewisse Eigenschaften von Zähnen hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Morphologie interpretiert werden und somit ein Ansatz geschaffen werden, herauszufinden welche Merkmale für den Eindruck der subjektiven Ähnlichkeit von Zahnoberflächen verantwortlich sind. Ziel des Verfahrens ist es also zum einen die latenten Dimensionen zu beurteilen. Zudem möchte man herausfinden, wie gut gewisse Ähnlichkeitsmaße der visuellen Einschätzung von Zahnärzten entsprechen. Unterschiede in der Konfiguration zwischen den Versuchspersonen und dem verwendeten Ähnlichkeitsmaß könnten einen Hinweis auf dessen Güte geben.

Auf der Grundlage der mehrdimensionalen Entfaltung können Rangfolgevergleiche hinsichtlich der Ähnlichkeit von Zähnen zu einem Referenzzahn

ausgewertet werden. Damit ist es möglich, dass bewertende Personen (z.B. Zahnärzte) und bewertete Zähne im gleichen Raum dargestellt werden können. Je näher ein Zahn bei der entsprechenden Person liegt, desto ähnlicher beurteilt diese Person den Zahn zum Referenzzahn. Durch dieses Verfahren möchte man ebenfalls herausfinden, wie gut bestimmte Ähnlichkeitsmaße den visuellen Eindrücken von Experten entsprechen und ob verschiedene Zahnärzte einen vergleichbaren Wahrnehmungsraum der Ähnlichkeitsbeurteilung von Zahnoberflächen besitzen.

Der letzte und wesentlichste Schritt der Mustererkennung besteht in der Klassifikation der herausgearbeiteten Merkmale in Klassen. Dies kann auch mit den Begriffen Clusterbildung oder Typisierung beschrieben werden.

Die MDS und die MDU sind in der Psychologie und Marktforschung etablierte Verfahren, die versuchen, subjektiv wahrgenommene Unterschiede zwischen Empfindungen messbar zu machen.

2.6 Ziele der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit sollen verschiedene dreidimensionale morphometrische Untersuchungen von Frontzahnoberflächen durchgeführt werden, bei denen Analysen zur Spiegelsymmetrie eine Schlüsselfunktion einnehmen. Die metrisch gewonnenen Ergebnisse werden mit dem visuellen Eindruck von Experten verglichen und diese Beobachterdaten zu einer explorativen Analyse von subjektiv als relevant erscheinenden Strukturen der Zahnoberfläche genutzt.

Folgende Aufgaben und Fragestellungen wurden bearbeitet:

1. Erstellen einer Zahnbibliothek für obere Frontzähne
2. Oberflächenvergleich der Vestibularflächen oberer Frontzähne
 - a) Bestimmung der Ähnlichkeit symmetrisch gegenüberliegender Frontzähne jeweils eines Probanden
 - b) Bestimmung von Ähnlichkeiten innerhalb der drei Frontzahntypen unterschiedlicher Probanden
 - c) Weisen die oberen Frontzähne eines Zahntyps (z.B. Zahn 11 und Zahn 21 oder Zahn 12 und Zahn 22) der rechten und der linken Seite eines Probanden jeweils eine höhere Ähnlichkeit auf, als Frontzähne eines Typs beliebiger Probanden?
 - d) Wenn sich zwei obere Frontzähne eines Zahntyps eines Probanden ähnlich sind, sind sich auch die Zähne der anderen Zahntypen dieses Probanden ähnlich? Beziehungsweise kann man aus der Ähnlichkeit zweier oberer Frontzähne eines Zahntyps verschiedener Probanden

auf die Ähnlichkeit zwischen den anderen Zahntypen bei diesen Probanden schließen?

- e) Vergleich von Ähnlichkeitsmaßen
 - f) Visuelle Beurteilung von Ähnlichkeiten zwischen Frontzähnen
 - g) Versuch der Merkmalsextraktion mittels multivariaten Analysemethoden
3. 3D-Untersuchungen zur Spiegelsymmetrie
- a) 3D-Oberflächenvergleich von symmetrisch gegenüberliegenden Zähnen eines Zahntyps
 - b) Dreidimensionaler spiegelsymmetrischer Ersatz von Frontzähnen
 - c) Bewertung der approximalen und okklusalen Passung des spiegelsymmetrischen Ersatzes
 - d) Visuelle Bewertung von gespiegelter Ansicht und Originalsituation.

3 MATERIAL UND METHODE

3.1 Erstellen einer Zahnbibliothek

Um die in dieser Arbeit vorgenommenen Untersuchungen durchführen zu können, wurde eine große Bibliothek natürlicher Zahnoberflächen oberer Frontzähne angelegt, welche sowohl in Form von Gipsmodellen als auch in Form digitalisierter, dreidimensionaler Datensätze vorliegt.

3.1.1 Probandengut

Hauptkriterium bei der Erstellung der Zahnbibliothek war es, eine möglichst unveränderte, natürliche Oberflächenmorphologie zu erfassen. Deshalb sollten die Probanden folgende Kriterien erfüllen:

1. kariesfreie, restaurationsfreie Oberkieferfrontzähne
2. keine vorliegenden Gingivo- oder Parodontopathien bzw. abgelaufene parodontale Therapien, keine Taschensondierungstiefe über 3 mm
3. keine momentane oder frühere Einnahme von Medikamenten, die bekanntermaßen zu Gingivahyperplasien führen können
4. keine starken Zahnfehlstellungen der Oberkieferfrontzähne; Angle Klasse I
5. vollständiger Zahndurchbruch
6. keine fehlenden Frontzähne

Um diese Kriterien erfüllen zu können, schien es sinnvoll, die Probanden hauptsächlich in einer Altersgruppe von ca. 16 bis 25 Jahren auszuwählen.

Unter den genannten Bedingungen wurden vor allem Probanden an verschiedenen Schulen in München und Leipzig sowie Studenten der Zahnmedizin der Ludwig-Maximilians-Universität München ausgewählt. Die Auswahl erfolgte mit den üblichen Hilfsmitteln einer zahnärztlichen Inspektion. Es konnten 86 Schüler und Studenten gefunden werden, die bereit waren, bei vorliegender Studie mitzuwirken. Die Sammlung wurde mit 39 Modellen aus zahnärztlichen Praxen ergänzt. Die Eltern minderjähriger Probanden wurden mittels Aufklärungsbogen informiert und um eine schriftliche Einverständniserklärung gebeten. Für jeden Probanden wurde ein entsprechender Dokumentationsbogen mit Registriernummer angelegt.

3.1.2 Abformung und Herstellen von Kiefer- und Einzelzahnmodellen

Bei den Probanden wurde der gesamte Ober- und Unterkiefer mit konfektionierten Metalllöffeln abgeformt. Um eine möglichst hohe Genauigkeit zu erreichen, wurde die Polyetherabformmasse Impregum Soft ® (3M ESPE, Seefeld, Deutschland) verwendet. Die Löffel wurden mit Kerr-Masse individualisiert (Sybron Dental Specialties, Newport Beach, USA) und durch ein Polyetheradhäsiv vorbehandelt (3M ESPE). Vor dem Einbringen der gefüllten Abformlöffel kam eine Applikationsspritze zur Anwendung, um möglichst blasenfreie Abformungen zu erhalten. Zusätzlich wurden statische Bissregistrare mit dem Material Regisil PB (Fa. Dentsply DeTrey, Konstanz, Deutschland) gewonnen. Nach ca. 24 Stunden wurden die Abformungen mit Superhartgips Typ IV (Zahnkranzgips Z280 - weiß, Picodent, Wipperfürth, Deutschland), entsprechend den Herstellerangaben ausgegossen. Nach zwei Stunden konnten die Gipsmodelle auf eine geeignete Größe getrimmt werden. Die einzelnen Zähne des Oberkiefers wurden mit einer diamantbesetzten Metalltrennscheibe herausgesägt und entsprechend der Registriernummer beschriftet. Besonders im Bereich der Approximalkontakte musste sehr behutsam vorgegangen werden, um die natürliche Morphologie weitgehend zu erhalten.



Abb. 11: Oberkiefermodell



Abb. 12: Einzelzahnmodell

Bei den so entstandenen Einzelzahnmodellen wurde eine Stufe am Übergang von der klinischen Krone zur Gingiva eingefräst, um bei der Datenerfassung durch das 3D-Scansystem zu gewährleisten, dass lediglich die zu analysierende Oberfläche des Zahnhartgewebes (Kronenbereich) erfasst wird. Die Einzelstumpfmodelle wurden mit einem Bürstchen gesäubert, kleine Gipsperlen wurden weggesprengt. Aus Dokumentationsgründen wurde jede Abformung ein zweites Mal ausgegossen und ausgearbeitet und die kompletten Kiefermodelle sowie die Einzelzahnmodelle entsprechend der Registriernummer aufbewahrt.

<i>Zahn</i>	Anzahl	<i>Zahn</i>	Anzahl
<i>11</i>	120	<i>21</i>	120
<i>12</i>	119	<i>22</i>	119
<i>13</i>	122	<i>23</i>	122

Tab. 1: Zahnbibliothek

3.1.3 Vermessung mit einem 3D-Laserscanverfahren

Nicht nur die im Rahmen dieser Arbeit benötigten Einzelzahnmodelle wurden vermessen, auch die dazugehörigen Ober- und Unterkiefergipsmodelle wurden komplett dreidimensional digitalisiert, damit die Daten für andere Fragestellungen auch nach längerer Zeit noch ausgewertet werden können.

Zur 3D-Datenerfassung wurden die kompletten Kiefermodelle und die jeweils entsprechenden Oberkiefer-Einzelzahnmodelle mit einem optischen 3D-Sensor vermessen.



Abb. 13: Laserscanner es1 der Firma Etkon (Gräfelfing, Deutschland), mit Einzelzahnmodell und Oberkiefergesamtmodell

3.1.3.1 Vorbereitungen zur Vermessung

Die Kiefermodelle wurden auf einem entsprechend dimensionierten Rotationsteller vermessen, nachdem sie mit plastilin-ähnlichen Massen fixiert und abhängig von der Zahnbogenform bzw. -breite mittels einer Schablone positioniert wurden. Die Positionierung erfolgte dabei so, dass möglichst wenige untersichgehende Stellen auftraten.

Die Einzelzahnmodelle wurden in separate Zylindertöpfe eingebracht und ebenfalls mit einer plastilin-ähnlichen Masse fixiert.

3.1.3.2 Prinzip des 3D-Laserscanverfahrens

Das Scansystem besteht aus einem Laserscanner es1 (Abb. 13 und 15) der Firma Etkon (Gräfelfing, Deutschland) und der dazugehörigen Software etkon-visual 2001 in der Version 2.070, welche auf einem Computer (Pentium III, 933 MHz) mit dem Betriebssystem SuSe Linux 8.0 installiert ist. Der Scanner ist mit einem Laser der Klasse 1M ausgerüstet.

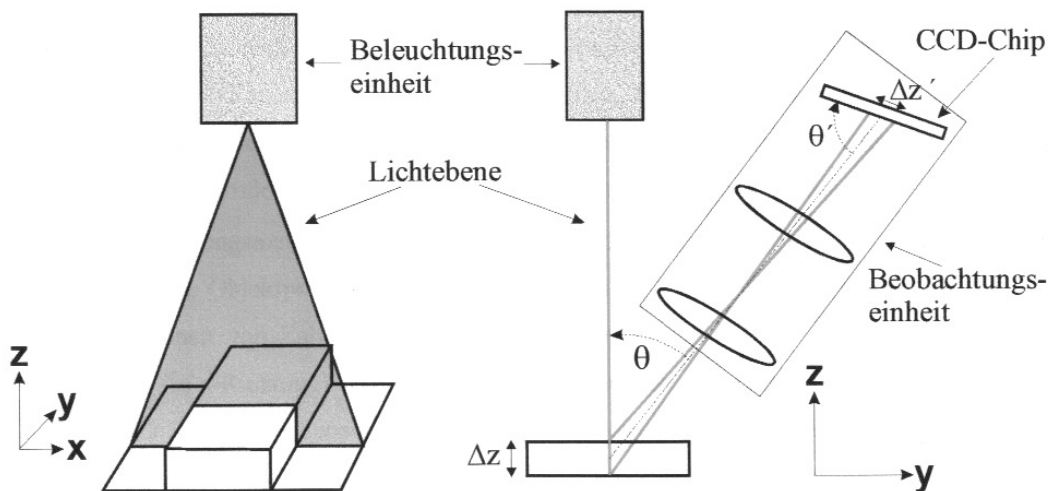


Abb. 14: Triangulationsanordnung des Scanners nach Mehl (1998)

Die Beleuchtungseinheit des Systems, in Form einer Halbleiter-Laserdiode (670nm), wird über eine spezielle Linienoptik in eine Lichtlinie umgewandelt, die auf die zu vermessende Objektoberfläche projiziert wird. Das resultierende Profil wird unter dem Triangulationswinkel auf einen CCD-Chip abgebildet. Die Information des Höhenunterschiedes liegt dabei in dem seitlichen Versatz der einzelnen Oberflächenpunkte. Durch Auswertung der einzelnen Pixel des CCD-Chips lässt sich das Höhenprofil ermitteln. Die gesamte 3D-Oberfläche erhält man, indem durch schrittweises Verfahren des Objektes auf einem Verschiebetisch in y-Richtung Lichtlinie für Lichtlinie abgetastet und ausgewertet wird.

Der Abstand und die Anzahl der einzelnen Schritte können mit Hilfe der Steuer-
software eingestellt werden (Mehl 1998).

Die Erfassung mehrerer Profilschnitte entlang einer linearen Bewegungsachse,
ergibt zusammen eine Ansicht des Objektes. Der Abstand zwischen den ein-
zelnen Schritten beträgt 30 μm , so dass zusammen mit der lateralen Auflösung
ein Messraster von 30 μm x 30 μm entsteht. Für eine Zahnoberfläche sind dies
ca. 150.000 Messpunkte. Die Achsen der Beleuchtungs- und Beobachtungsoptiken
bilden einen Winkel von ca. 45° zum Lot der Okklusionsebene, ver-
messen also das Modell mehr von der Seite als von oben, um vestibuläre und
orale Flächen besser und genauer erfassen zu können (Mehl 1998).

Aufgrund der Triangulationsanordnung des Sensors wird man in einer einzelnen
Ansicht nie ein komplexes dreidimensionales Zahnmodell vermessen können, da
Abschattungen und Hintergründe auftreten. Daher muss ein Objekt aus mindes-
tens zwei unterschiedlichen Richtungen gescannt werden. Die einzelnen An-
sichten werden anschließend automatisch durch die Scannersoftware zu einer
Gesamtansicht zusammengelegt.

Bei der Vermessung des Gesamtkiefers wird das Modell aus fünf verschiedenen
Ansichten nach einer jeweiligen Rotation um 30° vermessen. Dies benötigt ca.
90 Sekunden und liefert 1,2-1,6 Millionen Datenpunkte.

Die Einzelzahnmodelle werden beim vorliegenden Verfahren von acht Seiten
aus einem Winkel von 45° abgetastet und anschließend zusammengelegt. Nach
jeder Vermessung einer Ansicht wird der Zylindertopf mit dem Einzelzahn-
modell computergesteuert um 45° um die eigene Achse gedreht. Die Scandauer
beträgt etwa 45 Sekunden. Es werden pro Stumpf ca. 150.000 Datenpunkte
generiert. Jeder Oberflächenpunkt wird dabei aus drei verschiedenen Richtungen
vermessen. Die Messtoleranz wird mit 10 μm angegeben (Datenblatt Fa. Etkon).

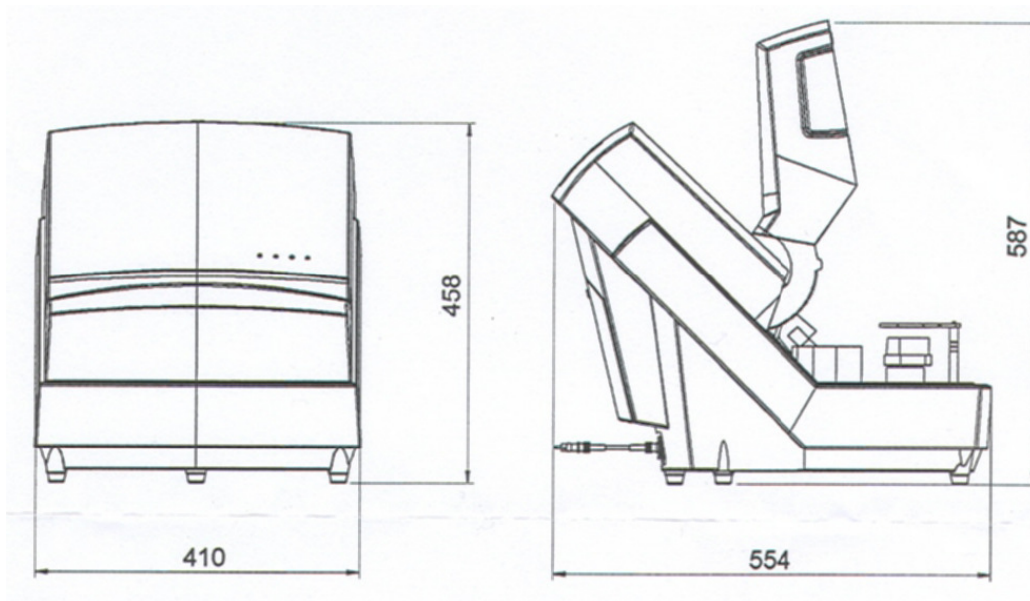


Abb. 15: Schemazeichnung des Laserscanners es1 der Firma Etkon

3.1.4 Datenverarbeitung

Die vermessenen Gesamtkiefermodelle werden im STL-Datenformat gespeichert und folgendermaßen benannt:

- [Probandenregistriernummer]_[OKfront].stl
- [Probandenregistriernummer]_[UKfront].stl

Während des Scanvorganges wird folgende Datei erstellt:

- *.i3d: Scandaten des jeweiligen Gesamtkiefermodells

Die eingelesenen Einzelzahnmodelle werden durch die Software etkon-visual 2001 Version 2.070 automatisch dem entsprechenden Kiefermodell zugeordnet. Dieser Vorgang wird Referenzierung genannt. Damit werden Datenlücken im virtuellen Oberkiefergesamtmodell durch Informationen aus den Einzelzahnmodellen gefüllt. Solche Lücken entstehen, da trotz optimaler Ausrichtung bei den meisten Kiefermodellen nicht abbildbare Bereiche vorhanden sind. Die jeweilige Zuordnungsgenauigkeit wird in der Datei lscan3d.log gespeichert. Es ist mit einer mittleren Genauigkeit von $13,88 \mu\text{m}$ ($\pm 3,43 \mu\text{m}$) zu rechnen, was im Bereich der Herstellerangabe des Laserscanners von $10 \mu\text{m}$ liegt (Stummbaum 2005). Gleichzeitig zur Überlagerung erfolgen die Erkennung der zuvor eingefrästen Stufe am Übergang von der klinischen Krone zur Gingiva und das Abtrennen des Hintergrundes.

Nach der Referenzierung werden die gescannten Daten mit dem Befehl „Alles Visualisieren“ und „Modellierung“ dargestellt. In der Darstellung Modellierung werden die einzelnen Stümpfe nacheinander markiert und im STL-Datenformat gespeichert. Es wurden folgende Benennungen festgelegt:

[Probandenregistriernummer]_[Zahn].stl

Es werden während des Scanvorganges folgende Dateien erstellt:

- *.i3d: Scandaten des Einzelzahnes
- *.i3d-ref.txt: Referenzierungsdaten des Einzelzahnes
- *.ls3d: Scandaten mit Referenzierungsdaten zur Einordnung des Einzelzahnes in das Koordinatensystem des Kiefermodells
- lscan3d.log: Statistische Auswertung der Referenzierung

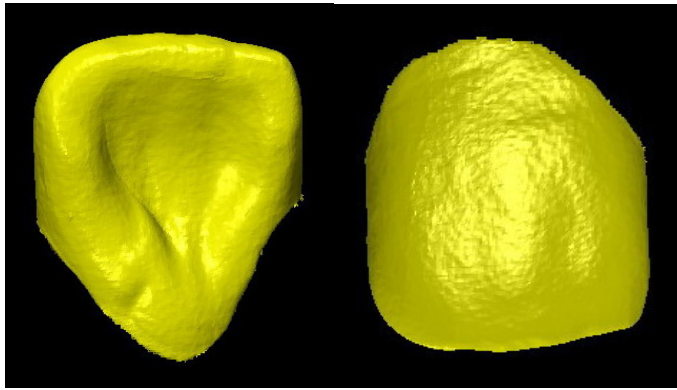


Abb. 16: 3D-Darstellung eines Einzelzahnmodells im STL-Format von vestibulär und palatinal (DentVisual 1.5, Mehl 2002)

Die generierten und im STL-Format gespeicherten dreidimensionalen Daten wurden für die Untersuchungen der kompletten Frontzahnoberflächen verwendet. Zur Analyse der Vestibularflächen oberer Frontzähne wurden die STL-Daten mit der Software 3D BioGeneric DentVisual in der Version 1.5 (Mehl 2002) weiterverarbeitet (Abb. 16,17). Dazu wurden die Daten der Einzelzahnmodelle durch Projektion in z-Richtung in das XV-Datenformat umgewandelt, wobei jedem Punkt der Oberfläche (x, y) genau ein z-Wert zugeordnet wird und damit nur die Flächen der Vestibularflächen zur Verfügung stehen. Die Daten bekommen dadurch zweieinhalbdimensionalen Charakter. Die Einzelzähne mussten separat geladen und der Befehl „Export stl as xv-file“ durchgeführt werden. Als Auflösung wurde eine Gitterweite von 50 μm gewählt. Es wurde folgende Bezeichnung festgelegt:

[Probandenregistriernummer]_[Zahn].xv

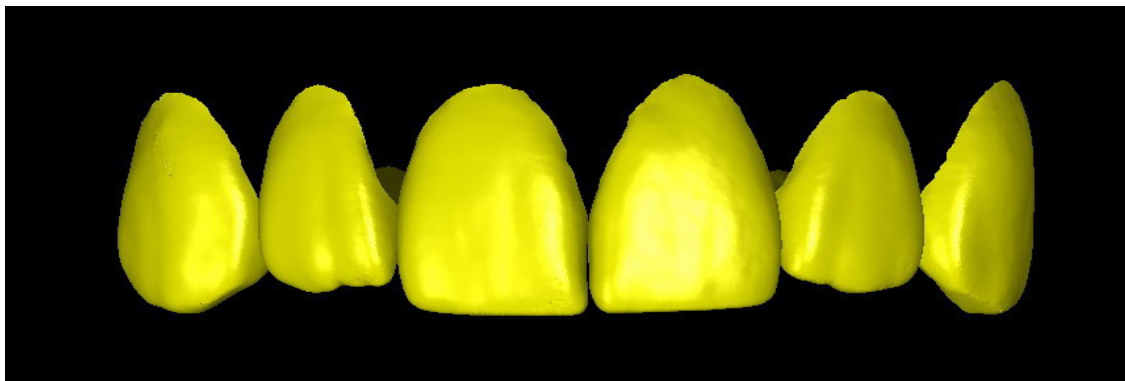


Abb. 17: 3D-Darstellung der zum Oberkiefermodell referenzierten Einzelzähne im STL-Format (DentVisual 1.5, Mehl 2002)

3.2 Oberflächenvergleich der Vestibularflächen oberer Frontzähne

Der Oberflächenvergleich der Vestibularflächen erfolgte anhand der im XV-Datenformat generierten Einzelzähne durch das Softwareprogramm Match3D 2.5 (Gloger 2004). Vor dem Vergleich wurden alle Zähne des zweiten Quadranten achsengespiegelt. Anschließend wurde jeweils ein Vergleichspaar in einem Minimierungsprozess durch Rotation und Translation möglichst deckungsgleich übereinander gelegt. Nach erfolgter Superposition wurde jeder Punkt (x, y, z_1) der einen Zahnoberfläche mit dem entsprechenden Punkt (x, y, z_2) der anderen Zahnoberfläche verglichen, was anhand eines Differenzbildes veranschaulicht werden kann (Abb. 18).

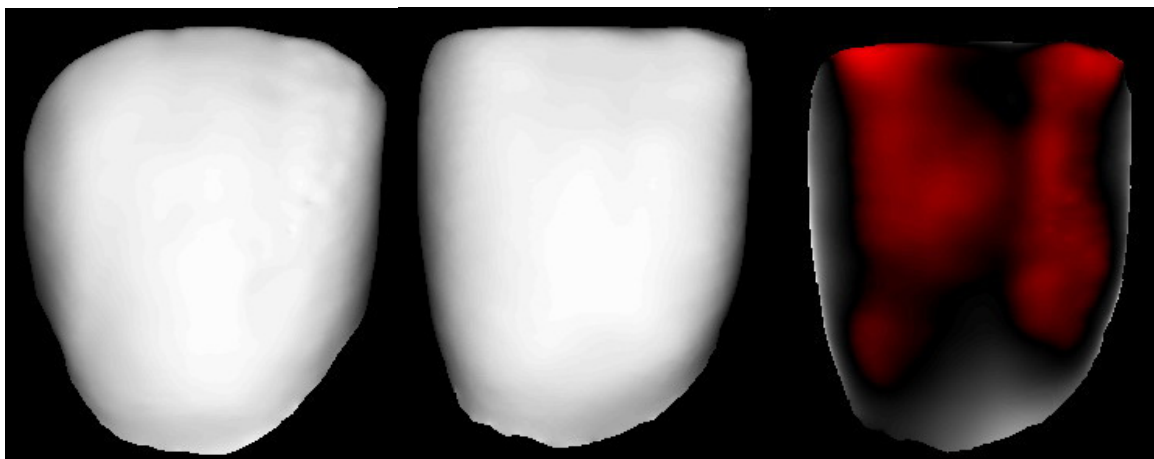
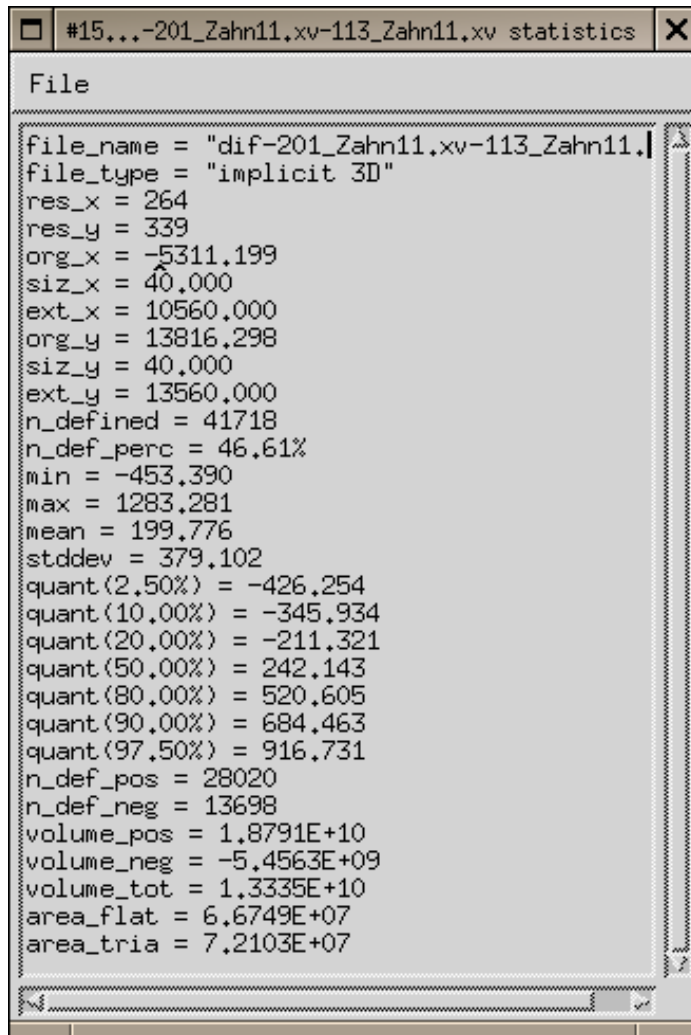


Abb. 18: Differenzbild zweier mittlerer Frontzähne eines Zahntyps (XV-Datenformat)

Aus der Differenz der jeweiligen z-Werte erfolgte u.a. die Berechnung des 10% Quantils, des 20% Quantils, des 80% Quantils und des 90% Quantils. All diese Werte wurden in einer separaten Datei im Format *.stat abgespeichert (Abb. 19).



```
#15...-201_Zahn11.xv-113_Zahn11.xv statistics X
File
file_name = "dif-201_Zahn11.xv-113_Zahn11.|"
file_type = "implicit 3D"
res_x = 264
res_y = 339
org_x = -5311,199
siz_x = 40,000
ext_x = 10560,000
org_y = 13816,298
siz_y = 40,000
ext_y = 13560,000
n_defined = 41718
n_def_perc = 46,61%
min = -453,390
max = 1283,281
mean = 199,776
stddev = 379,102
quant(2,50%) = -426,254
quant(10,00%) = -345,934
quant(20,00%) = -211,321
quant(50,00%) = 242,143
quant(80,00%) = 520,605
quant(90,00%) = 684,463
quant(97,50%) = 916,731
n_def_pos = 28020
n_def_neg = 13698
volume_pos = 1,8791E+10
volume_neg = -5,4563E+09
volume_tot = 1,3335E+10
area_flat = 6,6749E+07
area_tria = 7,2103E+07
```

Abb. 19: Statistik eines Differenzbildes

Dieses Verfahren des Oberflächenvergleiches führt gerade im Randbereich der Objekte zu vereinzelt sehr hohen Abweichungen, die jedoch nicht als repräsentativ für die Ähnlichkeit (Homöomorphologie) zweier Objekte betrachtet werden können. Aus diesem Grunde wurden die größten Abweichungen aus der Analyse herausgenommen und nur jene 60% der Werte betrachtet, welche die geringsten Distanzen aufweisen. Dies erfolgte mit Hilfe der Ermittlung des 20% und 80%-Quantils. Die halbe Differenz der beiden Grenzwerte ergab den Z-Differenzwert.

$$\text{Z-Differenzwert} = \frac{Q_{80} - Q_{20}}{2}$$

Dieser Wert wird folgend auch als Quant_80_20_halbe bezeichnet. Er ist, für die Berechnungen der vestibulären Flächen, das zur Standardabweichung alternative Ähnlichkeitsmaß.

3.2.1 Ähnlichkeit symmetrisch gegenüberliegender Zähne jeweils eines Probanden

Die Zähne der rechten und der linken Seite eines Probanden besitzen jeweils eine sehr hohe Ähnlichkeit (siehe Abb. 20). Anhand des Ähnlichkeitsmaßes Quant_80_20_halbe soll gezeigt werden, inwieweit sich diese Symmetrie metrisch ausdrücken lässt. Zur Anzahl der Vergleichspaare siehe Tab. 2.

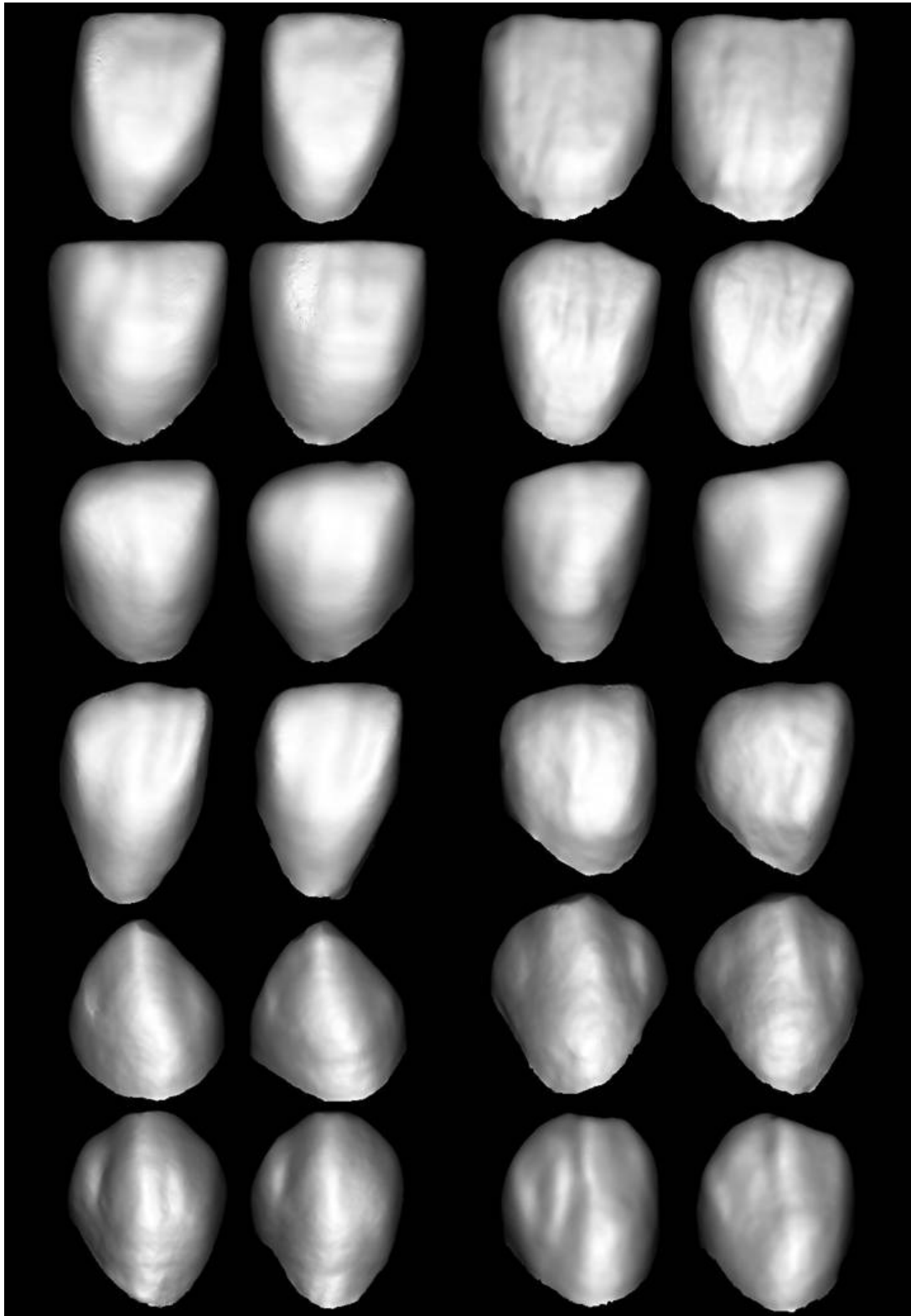


Abb. 20: Auszug aus der Zahnbibliothek: Symmetrisch gegenüberliegender Zahnpaare eines Probanden

Zeile 1,2 – mittlere Frontzähne

Zeile 3,4 – laterale Frontzähne

Zeile 5,6 – Eckzähne

3.2.2 Ähnlichkeit innerhalb der drei Frontzahntypen unterschiedlicher Probanden

Anhand von jeweils über 29000 Paarvergleichen (Tab. 2) wurden nicht symmetrisch gegenüberliegende mittlere Schneidezähne, laterale Schneidezähne und Eckzähne zwischen unterschiedlichen Individuen untersucht. Es wurde ebenfalls jeweils Quant_80_20_halbe ermittelt.

Zahntyp	Anzahl der Zähne	Anzahl der symmetrischen Vergleichspaare	Anzahl der beliebigen Vergleichspaare
<i>Mittlerer Schneidezahn</i>	240	120	29.862
<i>Lateraler Schneidezahn</i>	238	119	29.698
<i>Eckzahn</i>	244	122	30.259

Tab. 2: Anzahl der Vergleichspaare des jeweiligen Zahntyps

3.2.3 Ähnlichkeitsvergleich zwischen symmetrisch gegenüberliegenden und beliebigen Zähnen gleicher Frontzahntypen

Es wird allgemein angenommen, dass die oberen Frontzähne eines Zahntyps (z.B. Zahn 11 und Zahn 21 oder Zahn 12 und Zahn 22) der rechten und der linken Seite eines Probanden jeweils eine höhere Ähnlichkeit besitzen, als Frontzähne eines Typs beliebiger Probanden.

Jeweils für mittlere Frontzähne, laterale Frontzähne und Eckzähne wird die Gruppe der symmetrisch gegenüberliegenden Zähne mit der Gruppe der beliebigen Vergleichspaare verschiedener Probanden verglichen. Testparameter ist

dabei der den jeweiligen Gruppen eigene Mittelwert für Quant_80_20_halbe. Um das richtige Testverfahren zu nutzen, wurden beide Gruppen zuerst mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung geprüft. Da alle Gruppen nicht normalverteilt waren, wurde der U-Test nach Mann & Whitney herangezogen, um folgende Nullhypothese (Signifikanzniveau $p=0,01$) zu überprüfen: Es besteht kein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen mit symmetrisch gegenüberliegenden Zähnen (innerhalb eines Zahntyps) und beliebigen Zähnen verschiedener Probanden (innerhalb eines Zahntyps) bezüglich Quant_80_20_halbe.

3.2.4 Vergleich unterschiedlicher Frontzahntypen

Wenn sich zwei obere Frontzähne eines Zahntyps eines Probanden ähnlich sind, dann könnte es sein, dass sich auch die Zähne der anderen Zahntypen dieses Probanden ähnlich sind. Ebenfalls wäre es möglich, dass man aus der Ähnlichkeit zweier oberer Frontzähne eines Zahntyps verschiedener Probanden auf die Ähnlichkeit zwischen den anderen Frontzahntypen bei diesen Probanden schließen kann. Um diese Vermutung zu überprüfen, wurde jeweils der Wert für Quant_80_20_halbe eines bestimmten Vergleichspaares der mittleren Schneidezähne (q8020h_1er) mit dem Wert der lateralen Schneidezähne (q8020h_2er) der jeweils gleichen Quadranten korreliert. So wurde beispielsweise die Ähnlichkeit des Paares Zahn 21/Proband X – Zahn 21/ Proband Y mit dem Vergleichspaar Zahn 12/Proband X – Zahn 12/Proband Y miteinander korreliert. Dies wurde getrennt für Vergleichspaare innerhalb eines Probanden und für Vergleichspaare verschiedener Probanden untersucht. Statistische Verfahren waren eine Korrelationsanalyse nach Pearson und eine Darstellung als Streudiagramm.

3.2.5 Vergleich verschiedener Ähnlichkeitsmaße

Bestimmt man das 10% und 90%-Quantil als Grenzwerte der z-Werte, so werden nur 20% der ermittelten z-Werte aus der Analyse verworfen. Die halbe Differenz der beiden Grenzwerte ergibt das alternative Ähnlichkeitsmaß $Quant_{90_10_halbe}$.

Um einen Vergleich der Ähnlichkeitsmaße $Quant_{80_20_halbe}$ mit $Quant_{90_10_halbe}$ durchzuführen, wurde ein Streudiagramm der beiden Variablen angefertigt und der parametrische Spearman Rangkorrelationskoeffizient (Signifikanzniveau $p=0,01$) ermittelt.

3.2.6 Visuelle Beurteilung von Ähnlichkeiten zwischen Frontzähnen und multivariate Analyse

Als multivariate Analysemethoden für die Untersuchung der subjektiven Beurteilung der Ähnlichkeit von Zahnoberflächen werden die multidimensionale Skalierung, sowie das Verfahren der mehrdimensionalen Entfaltung benutzt.

Multidimensionale Skalierung (multidimensional scaling, MDS)

Zehn Zahnärzte beurteilten Bilder verschiedener mittlerer Frontzähne (Abb. 21) untereinander bezüglich ihrer Ähnlichkeit. Es war eine notenähnliche Bewertungsskala von null bis zehn Punkten vorgegeben, wobei die Bewertung mit null Punkten dem Vergleich zweier maximal ähnlicher Zähne und die Bewertung mit zehn Punkten dem Vergleich zweier maximal unähnlicher Zähne entsprach. Die Ergebnisse aller 45 resultierenden Vergleichspaare wurden in eine Tabelle (Tab. 3) eingetragen und mittels multidimensionaler Skalierung (MDS) nach dem INDSCAL-Verfahren in SPSS 14.0 analysiert. Dies geschah durch den Programmaufruf „Multidimensionale Skalierung (ALSCAL)“ und der Auswahl von „Euklidischer Abstand mit individuell gewichteten Differenzen“

im Menüpunkt „Modell“. Folgende Einstellungen werden weiter im Menüpunkt „Modell“ gewählt:

- für das „Meßniveau“ die Einstellung „Ordinalskala“
- für die Konditionalität die Einstellung „Matrix“ mit zwei „Dimensionen“

Beim Menü „Optionen“ werden folgende Punkte ausgewählt:

- „Gruppendiagramme“
- „Individuelle Subjekt-Diagramme“
- „Zusammenfassung von Modell und Optionen“

und bei den Kriterien folgende Werte eingestellt:

- „S-Stress-Konvergenz“: 0,001
- „Minimaler S-Stress-Wert“: 0,005
- „Iterationen, max“: 30

Vor dem Analysestart werden im Hauptmenü „Multidimensionale Skalierung“ alle zehn beurteilten Zähne als Variablen ausgewählt und die Datenmatrix als „Quadratisch und symmetrisch“ bestimmt.

Als Resultat der Berechnungen erfolgte der Output mit der Graphik der gemeinsamen Konfiguration als Lösung des INDSCAL-Verfahrens. In dieser Konfiguration sind die einzelnen Zähne entsprechend der Ähnlichkeitsurteile in einem zweidimensionalen Raum angeordnet, was u.a eine Diskussion über die Bedeutung der Dimensionen zulässt. Danach werden die Graphik der abgeleiteten Subjektgewichte und die einzelnen individuellen Subjekt-Diagramme angezeigt. Zudem werden als Güte für die Anpassung der MDS-Lösung an die Rohdaten „STRESS“ und „RSQ“ angezeigt. Der Weiridness-Index weist auf Ausreißer von der durchschnittlichen Dimensionsgewichtung hin (Borg und Groenen 2005).

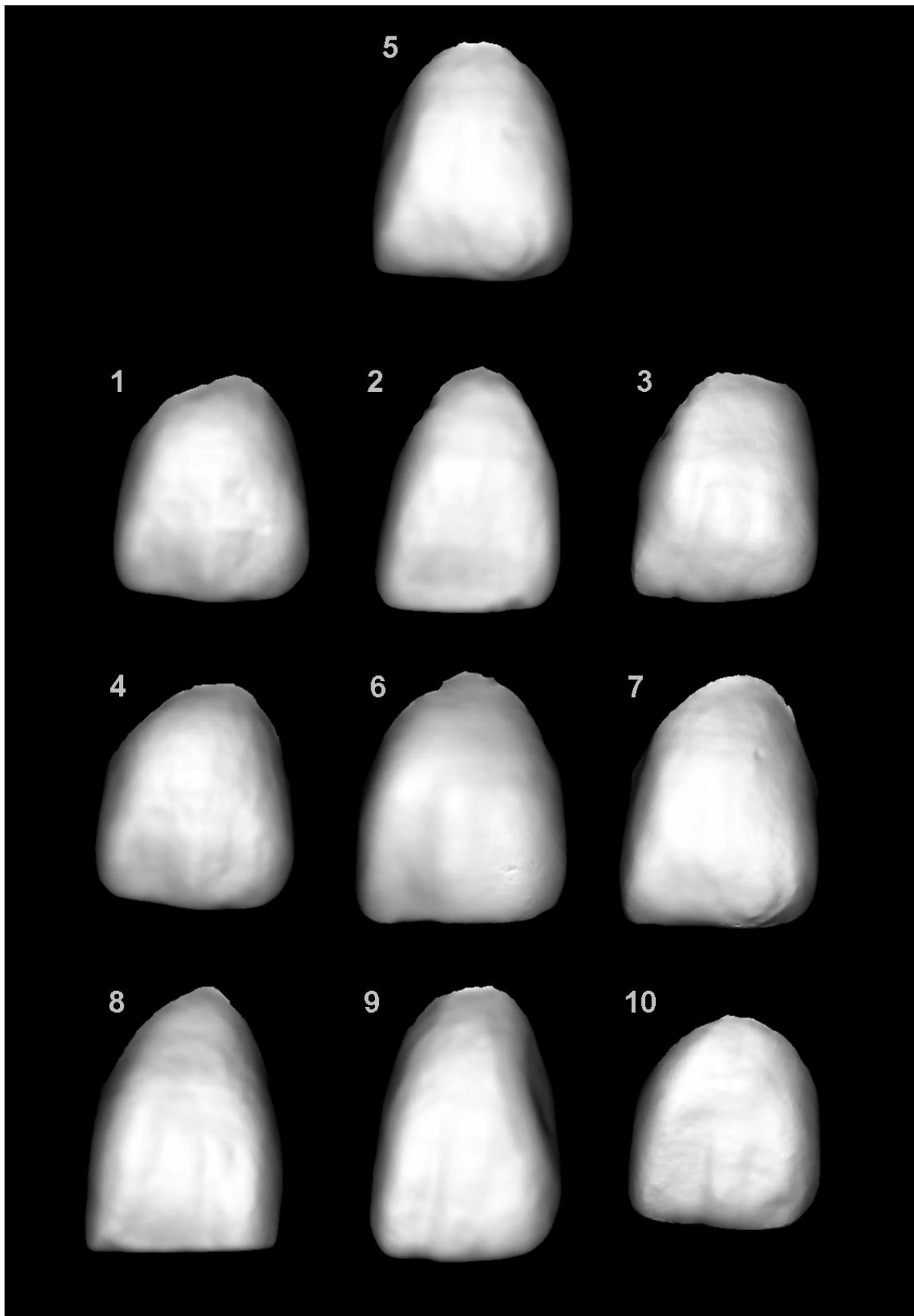


Abb. 21: Zehn mittlere Frontzähne, die Zahnärzte hinsichtlich ihrer Ähnlichkeit zueinander beurteilten; Zahn 5 ist Referenzzahn bei der mehrdimensionalen Entfaltung

Ein weiterer Durchgang mit analogem Verfahren wurde für die metrisch ermittelten Werte (Quant_80_20_halbe) durchgeführt.

Mehrdimensionale Entfaltung (multidimensional unfolding, MDU)

Für die MDU-Analyse wurde ein Zahn (Nr.5) als Referenz festgelegt und zehn Zahnärzte angewiesen neun andere Zähne hinsichtlich ihrer Ähnlichkeit zum Referenzzahn einzuordnen (Abb. 21). Diese subjektiven Rangfolgevergleiche der Ähnlichkeit von Zähnen zu einem Referenzzahn werden durch das statistische Verfahren der mehrdimensionalen Entfaltung ausgewertet. Dieses Vorgehen gestaltet sich analog zur MDS mit Ausnahme folgender Unterschiede:

- die Form der Datenmatrix ist rechteckig mit neun Zeilen (pro Zahnarzt eine Zeile und eine Zeile für die Werte von Quant_80_20_halbe)
- das Modell ist zeilenkonditional

Damit ist es möglich, dass bewertende Personen (z.B. Zahnärzte) und bewertete Zähne im gleichen Raum dargestellt werden können. Je näher ein Zahn bei der entsprechenden Person liegt, desto ähnlicher beurteilt diese Person den Zahn zum Referenzzahn.

Korrelationsbestimmung

Zur weiteren Beurteilung, ob die metrisch ermittelten Ähnlichkeiten auch mit dem visuellen Eindruck von Experten übereinstimmen, wurde eine Korrelationsbestimmung durchgeführt. Als Parameter wurde zum einen Quant_80_20_halbe bestimmt. Der andere Parameter wurde als „visuelle Ähnlichkeit“ bezeichnet und basiert auf den gleichen Werten, die zuvor für die MDS ermittelt wurden (Tab. 3). Das Ergebnis wird anhand eines Streudiagrammes und der Ausgabe des Spearman-Rho Korrelationskoeffizienten dargestellt.

Vergleich von zehn Zähnen hinsichtlich ihrer Ähnlichkeit zueinander.

	1								
2		2							
3			3						
4				4					
5					5				
6						6			
7							7		
8								8	
9									9
10									

Definierter Parameter: "visuelle Ähnlichkeit"

kontinuierliche Beurteilung von 0 = sehr ähnlich bis 10 = sehr verschieden

Tab. 3: „visuelle Ähnlichkeit“ – Tabelle zur Erhebung von Ähnlichkeitsurteilen

3.3 3D-Untersuchungen zur Spiegelsymmetrie

„Wie gut passt im Oberkiefer ein Frontzahn der einen Seite an die Stelle des korrespondierenden Zahntyps der gegenüberliegenden Seite?“. Von dieser grundsätzlichen Fragestellung ausgehend soll bewertet werden, ob eine spiegel-symmetrische Rekonstruktion von Frontzähnen, beispielsweise bei der automa-tischen Oberflächenrekonstruktion, eine sinnvolle Option darstellt.

3.3.1 3D-Oberflächenvergleich von symmetrisch gegenüberliegenden Frontzähnen eines Zahntyps

Zusätzlich zum Vergleich vestibulärer Frontzahnflächen mittels zweieinhalb-dimensionaler Daten (Kap. 3.2, Kap. 4.1) erfolgte eine Untersuchung, die zur Einschätzung der Brauchbarkeit einer dreidimensionalen Rekonstruktion mittels symmetrischer Spiegelung (Kap. 4.2) dienen soll. Diese Analyse wurde anhand dreidimensionaler Daten im STL-Format mit dem Bildanalyseprogramm Geomagic Qualify 7.0 (Geomagic GmbH, Köln, Deutschland) durchgeführt. Je 20 mittlere Frontzähne, laterale Frontzähne und Eckzähne des ersten Quadranten

wurden zuerst um ihre vertikale Achse gespiegelt (von vestibulär betrachtet) und anschließend zu ihrem im zweiten Quadranten korrespondierenden Zahn durch Rotation und Translation mittels „Best-Fit-Überlagerung“ (Befehl „Best-Fit-Alignment“) referenziert. Als Maß für die Ähnlichkeit wurde die Standardabweichung über den geringsten Abstand (stddev) herangezogen:

$$\text{stddev} = \sqrt{\frac{\sum_{i,j} [(x_{1i} - x_{2j}) + (y_{1i} - y_{2j}) + (z_{1i} - z_{2j})]^2}{n}}$$

Dabei wurden den einzelnen Oberflächenpunkten des einen Zahnes die am nächsten liegenden Punkte des Vergleichszahnes zugeordnet und die jeweiligen Abstände gemessen. Es wurden die maximale und minimale Abweichung, sowie die Standardabweichung aller Differenzen statistisch festgehalten. Der Oberflächenvergleich wurde anhand eines farblich kodierten Differenzbildes visualisiert, das Rückschlüsse auf die Lokalisierung von Bereichen hoher oder niedriger Abweichung zulässt (Abb. 22).

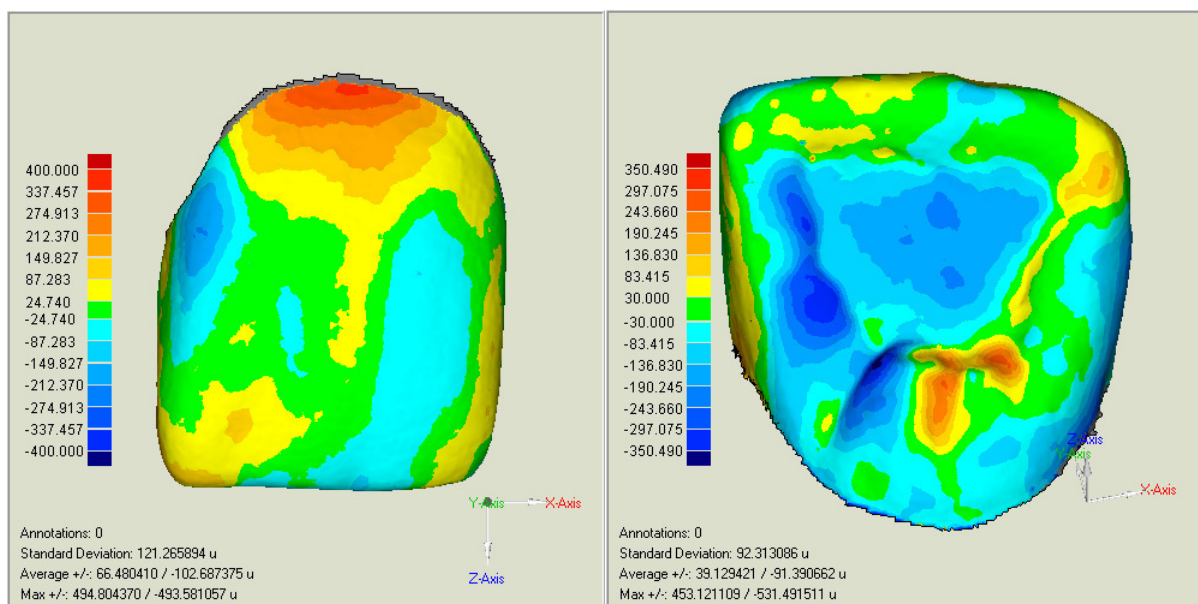


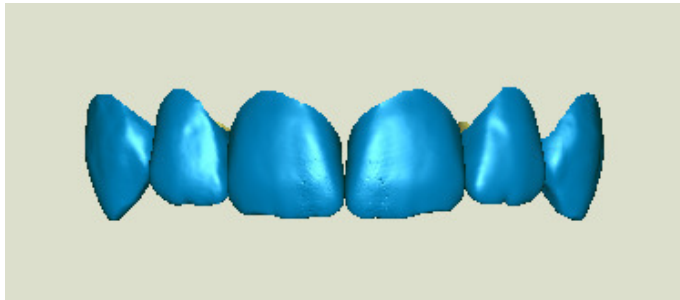
Abb. 22: Differenzbilder

Linkes Bild – lateraler Schneidezahn in der Ansicht von labial

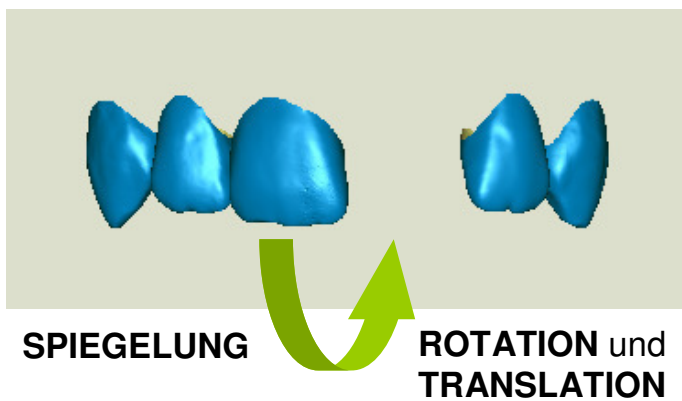
Rechtes Bild – mittlerer Schneidezahn in der Ansicht von palatinal

3.3.2 Spiegelsymmetrischer Ersatz

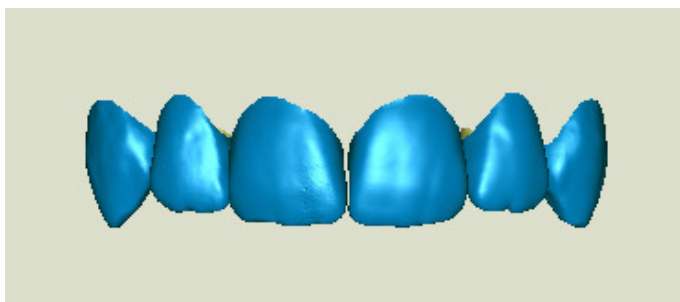
Zusätzlich zum direkten Vergleich zweier symmetrisch gegenüberliegender Zähne eines Typs soll auch geprüft werden, wie gut ein achsensymmetrisch gespiegelter Zahn seinen seitenkorrespondierenden Zahn ersetzen kann.



Originalsituation



Situation ohne Zahn 21



*Situation nach Achsen-
spiegelung,
Rotation und Translation
von Zahn 11*

Abb. 23: Achsenspiegelung, Rotation und Translation von Zahn 11 in die Position von Zahn 21

Dazu wurden entweder der Zahn 21, Zahn 22 oder Zahn 23 des Oberkiefergesamtmodells gelöscht und der entsprechende wie unter 3.3.1 beschrieben gespie-

gelte, rotierte und translatierte korrespondierende Zahn in die entstandene Lücke gesetzt (Abb. 23). Die beschriebenen Vorgänge erfolgten ebenfalls mit der Software Geomagic Qualify 7.0.

War die automatische Positionierung nicht zufriedenstellend, so musste eine manuelle Nachpositionierung erfolgen (Abb. 24).

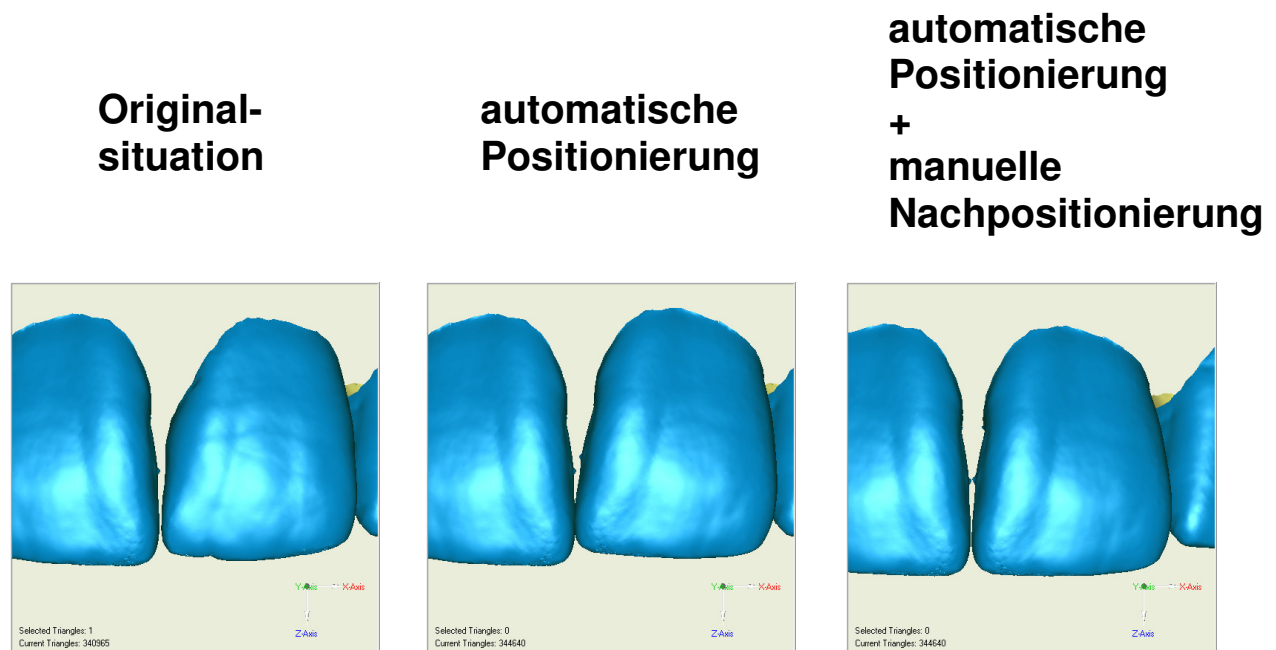


Abb. 24: Spiegelsymmetrischer Ersatz von Zahn 21 durch Zahn 11 eines Probanden

- linkes Bild – Originalsituation mit Zahn 21
- mittleres Bild – Zahn 11 des gleichen Probanden nach automatischer Achsenspiegelung, Rotation und Translation
- rechtes Bild – Zahn 11 des gleichen Probanden nach automatischer Achsenspiegelung, Rotation, Translation und manueller Nachpositionierung

3.3.3 Vergleich des spiegelsymmetrischen Ersatzes mit der Originalsituation

3.3.3.1 Approximale Passung

Bei der Rekonstruktion war es möglich, dass der Abstand des rekonstruierten Zahnes zum mesialen bzw. distalen Nachbarzahn entweder größer wurde, oder

aber es zur Überschneidung von Zähnen kam, die im folgenden als „Overlap“ bezeichnet wird. Abstände wurden im Original und in der Rekonstruktion vermessen (Overlap als positiver Wert, Abstand als negativer Wert) und die Differenz bestimmt.

3.3.3.2 Okklusale Passung zu den Unterkieferschneidezähnen

Die an den Probanden gewonnenen Bissregistraten (Kap. 3.1.2) wurden auf die Oberkiefermodelle aufgesetzt, mittels beschriebenen Laserscanverfahren vermessen (Kap. 3.1.3) und die gewonnenen Daten entsprechend ausgewertet (Kap. 3.1.4).

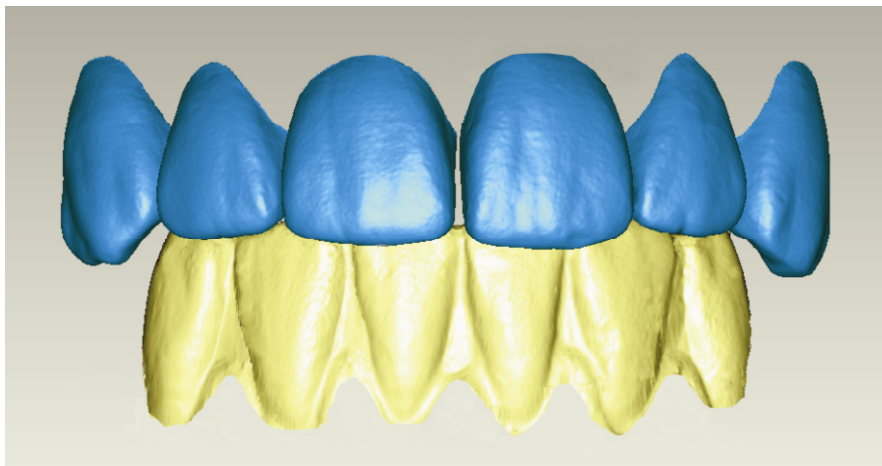


Abb. 25: Digitalisierte Oberkieferfront (blau) mit Unterkieferantagonisten (gelb)

Die jeweiligen Kontaktpunkte bzw. Stellen des geringsten Abstandes zwischen Antagonisten bei Nonokklusion wurden im Original bestimmt und zu den Abständen in der Rekonstruktion in Beziehung gesetzt. Auch hier war es prinzipiell möglich, dass Abstände entweder größer wurden oder dass ein Overlap auftrat.

3.3.3.3 Visueller Eindruck von Spiegelsituation und Originalsituation

Es wurden zehn originale Frontansichten und die zehn dazu, hinsichtlich den mittleren Frontzähnen, spiegelsymmetrisch rekonstruierten Ansichten zur Be-

wertung vorgelegt. Zehn Zahnärzte bekamen die Aufgabe zu beurteilen, wie harmonisch die insgesamt 20 Ansichten ihrer Meinung nach waren. Das Hauptaugenmerk sollte dabei auf die mittleren Schneidezähne gerichtet sein. Es bestand die Möglichkeit die Ansichten nach fünf Vorzeichen zu bewerten.

<i>Vorzeichen</i>	++	+	o	-	--
<i>Bedeutung</i>	sehr harmonisch	harmonisch	mäßig harmonisch	<u>un</u> harmonisch	sehr <u>un</u> harmonisch
<i>Bewertung</i>	5	4	3	2	1

Tab. 4: Visuelle Bewertung von Frontzahnansichten

Als statistischer Test wurde der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test verwendet, um festzustellen, ob die Originalansichten oder die gespiegelten Ansichten, als harmonischer angesehen werden bzw. ob sie vergleichbar harmonisch erscheinen. Das Ergebnis wird anhand eines Balkendiagramms veranschaulicht.

3.4 Statistische Auswertungen

Alle Längenangaben in Abbildungen, Diagrammen und Tabellen (z.B. für die Mittelwerte, Standardabweichung oder Quant_80_20_halbe, etc.) sind in μm angegeben.

Die Statistische Auswertung fand unter Windows XP mit SPSS 14.0 statt.

4 ERGEBNISSE

4.1 Oberflächenvergleich der Vestibularflächen oberer Frontzähne

4.1.1 Ähnlichkeit symmetrisch gegenüberliegender Zähne jeweils eines Probanden

Die Zähne der rechten und der linken Seite eines Probanden besitzen jeweils eine sehr hohe Ähnlichkeit (siehe Abb. 20, Kap. 3.2.1). Anhand der Untersuchung der Abweichung mittels z-Differenz soll gezeigt werden, inwieweit sich diese Symmetrie metrisch ausdrücken lässt.

Zwischen den rechten und den linken mittleren Frontzähnen jeweils eines Probanden beträgt der Mittelwert des Z-Differenzwertes über die 80%-20% Quantile (Quant_80_20_halbe) eines Probanden 44 μm (Abb. 26). In Abbildung 27 sind die Fälle herausgestellt, die sich sehr wenig ähnlich sind.

Ähnlichkeit symmetrisch gegenüberliegender mittlerer Frontzähne jeweils eines Probanden

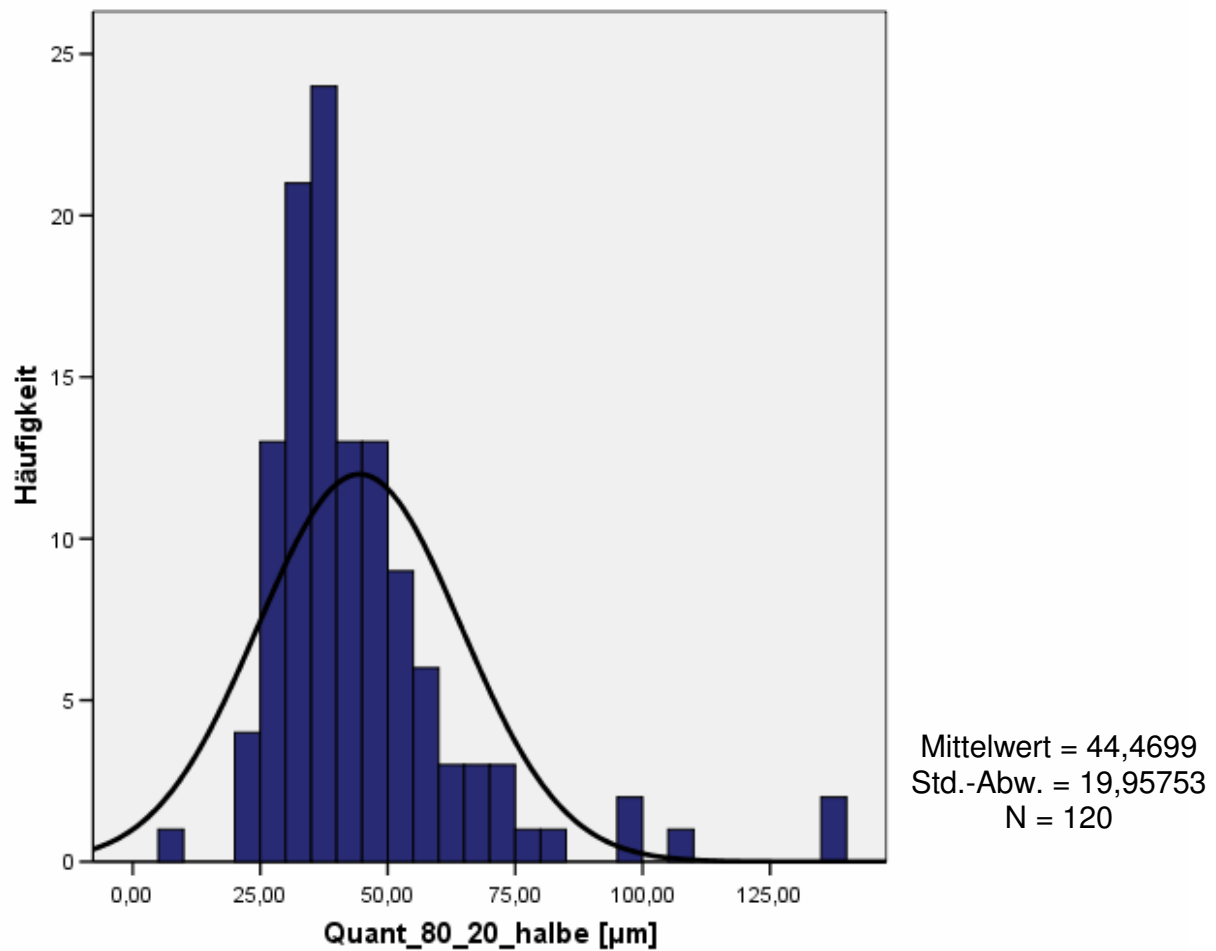


Abb. 26: Ähnlichkeit symmetrisch gegenüberliegender Zähne innerhalb eines Probanden; Histogramm von Quant_80_20_halbe

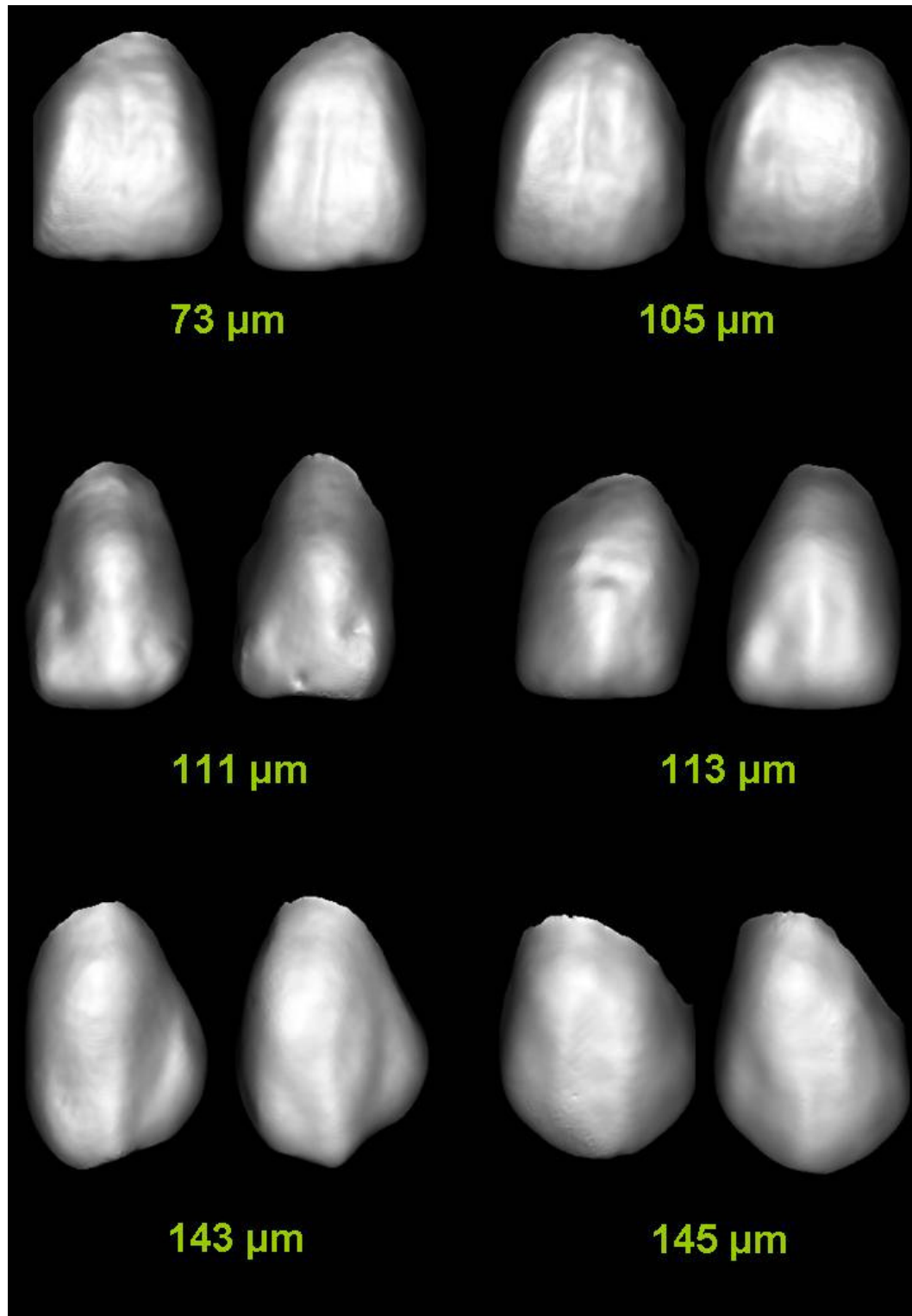
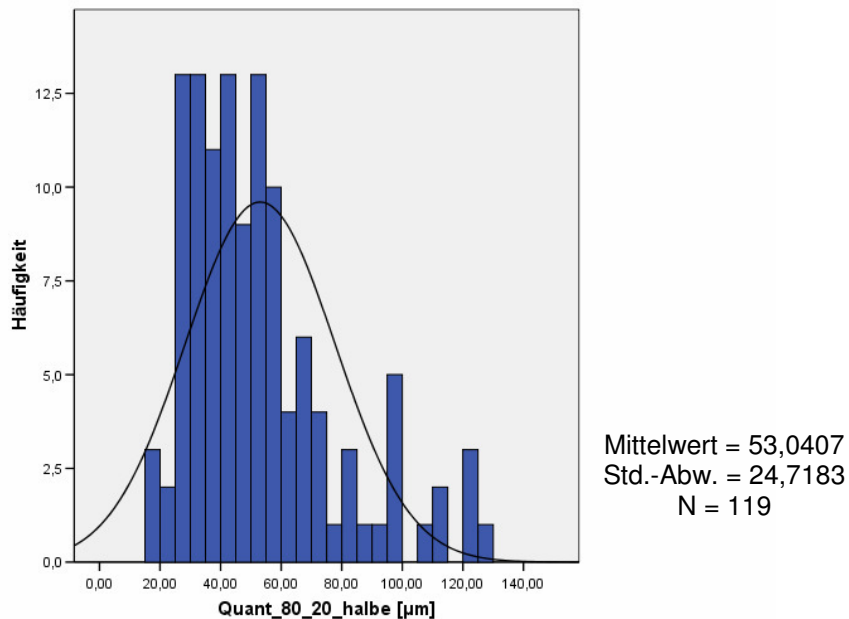


Abb. 27: Sehr unähnliche, symmetrisch gegenüberliegende Frontzähne eines Probanden, mit Angabe der entsprechenden metrischen Abweichung, ausgedrückt durch Quant_80_20_halbe

- mittlere Frontzähne (obere Zeile)
- laterale Frontzähne (mittlere Zeile)
- Eckzähne (untere Zeile)

Der Mittelwert von Quant_80_20_halbe des lateralen Schneidezahnes beträgt 53 μm , der Mittelwert bezüglich Quant_80_20_halbe des Eckzahnes liegt bei 51 μm (Abb. 28).

Ähnlichkeit symmetrisch gegenüberliegender lateraler Frontzähne jeweils eines Probanden



Ähnlichkeit symmetrisch gegenüberliegender Eckzähne jeweils eines Probanden

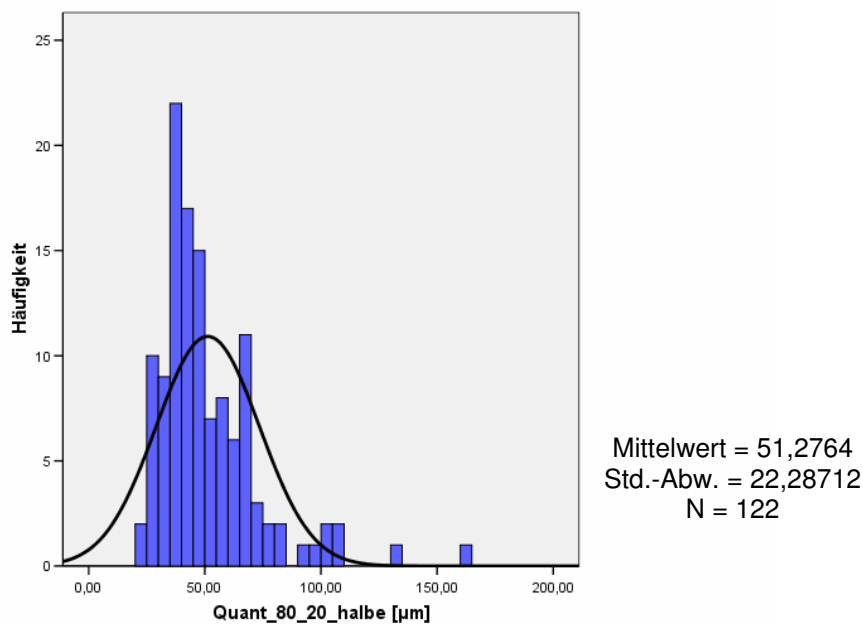


Abb. 28: Ähnlichkeit symmetrisch gegenüberliegender Zähne innerhalb eines Probanden
Histogramme von Quant_80_20_halbe für:

- laterale Frontzähne (oberes Histogramm)
- Eckzähne (unteres Histogramm)

4.1.2 Ähnlichkeit innerhalb der drei Frontzähntypen unterschiedlicher Probanden

Zwischen nicht symmetrisch gegenüberliegenden mittleren Schneidezähnen wurde ein Mittelwert des Z-Differenzwertes über die 80%-20% Quantile (Quant_80_20_halbe) von 94 μm ermittelt. Beim lateralen Schneidezahn beträgt dieser Wert 98 μm , beim Eckzahn 103 μm . Abbildung 31 zeigt sehr ähnliche Paare, Abbildung 32 sehr unähnliche Paare.

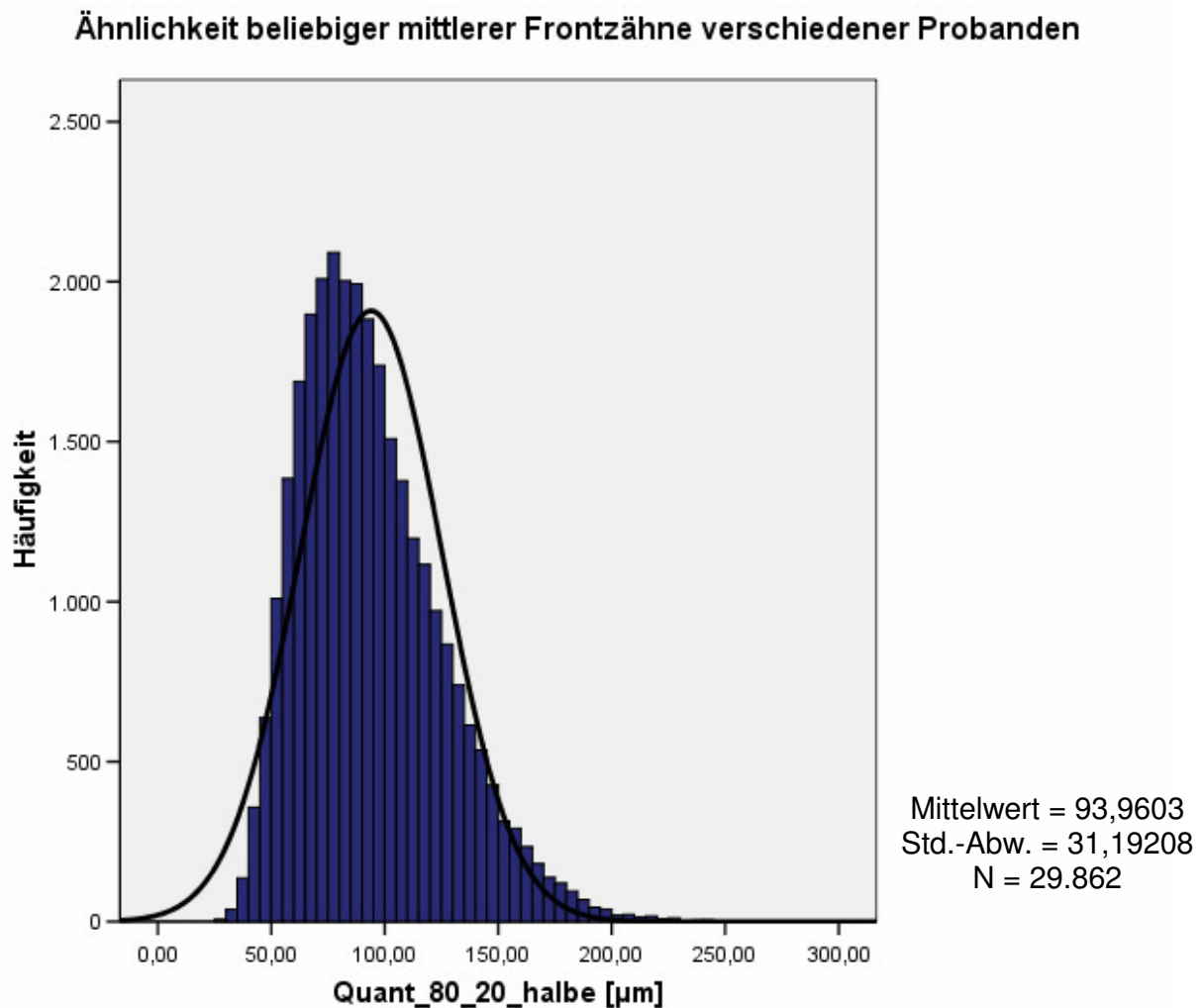


Abb. 29: Ähnlichkeit beliebiger mittlerer Frontzähne unterschiedlicher Probanden; Histogramm von Quant_80_20_halbe

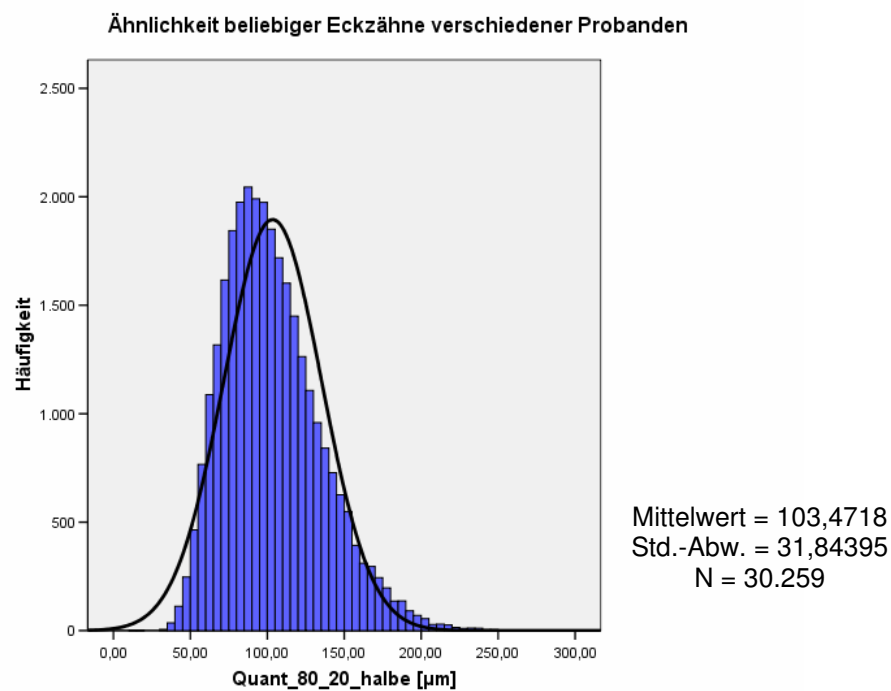
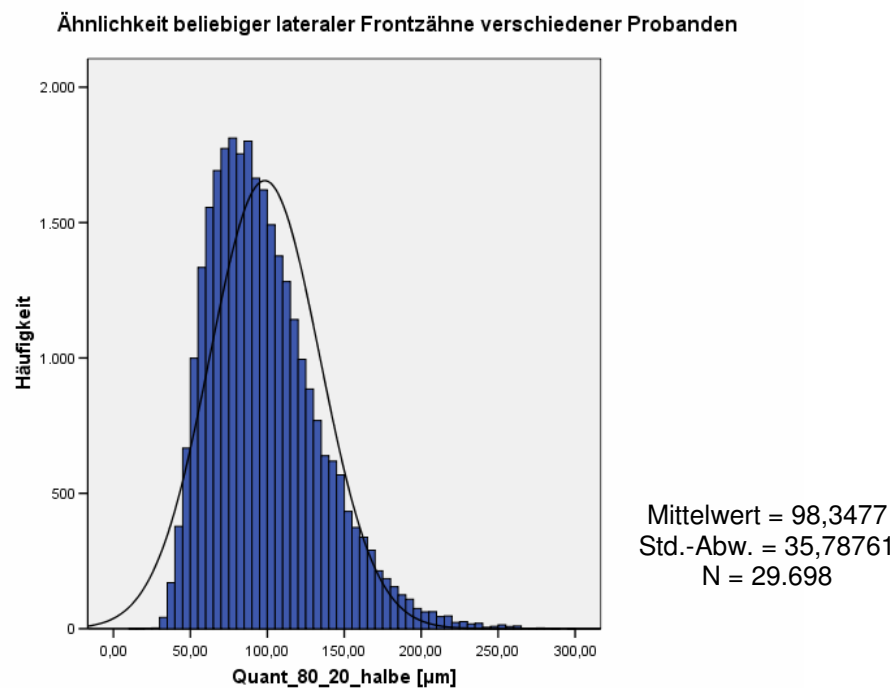


Abb. 30: Ähnlichkeit beliebiger Frontzähne unterschiedlicher Probanden;
Histogramme von Quant_80_20_halbe für:

- laterale Frontzähne (oberes Histogramm)
- Eckzähne (unteres Histogramm)

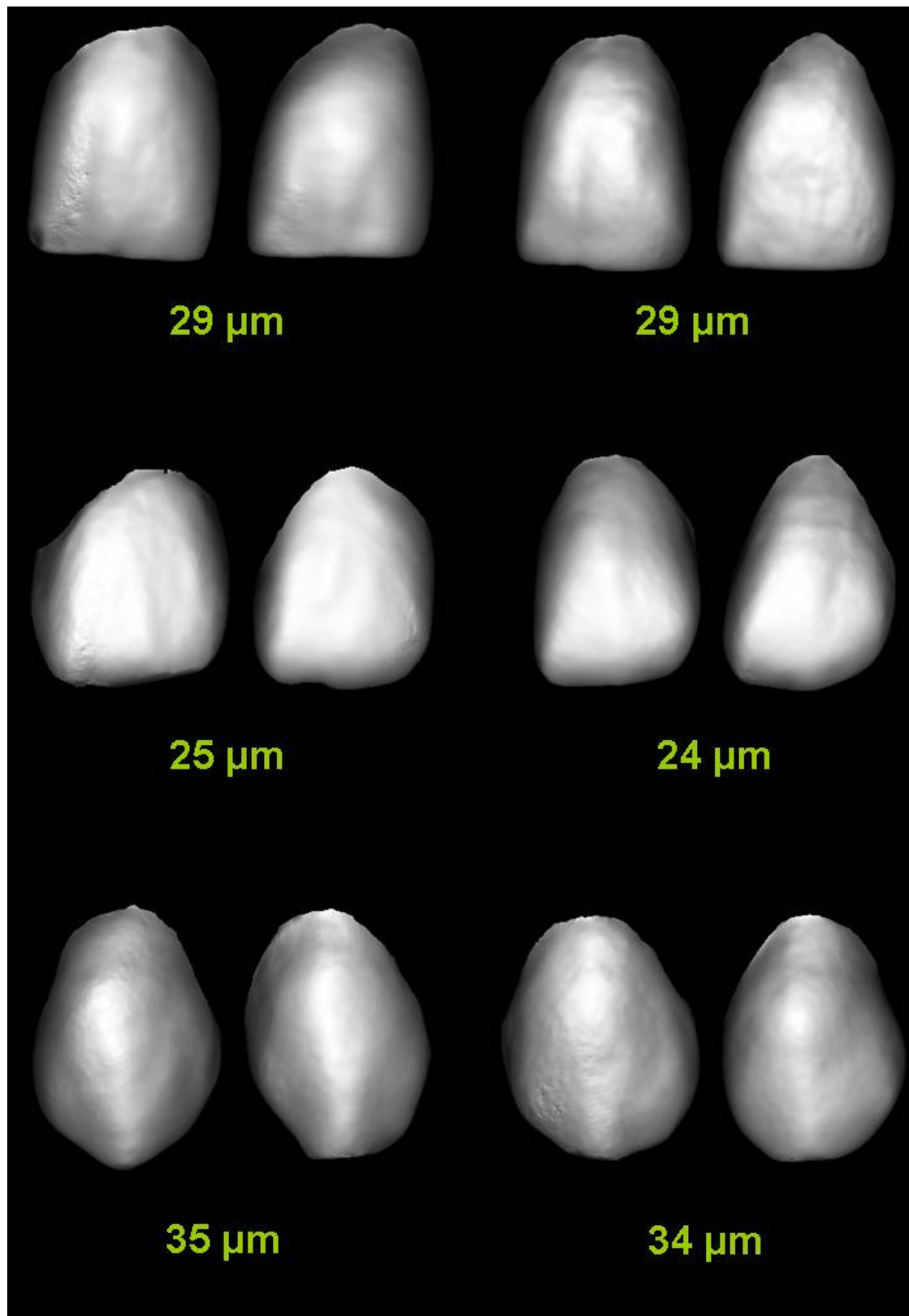


Abb. 31: Sehr ähnliche Vergleichspaare verschiedener Probanden, mit Angabe der entsprechenden metrischen Abweichung ausgedrückt durch Quant_80_20_halbe

- mittlere Frontzähne (obere Zeile)
- laterale Frontzähne (mittlere Zeile)
- Eckzähne (untere Zeile)

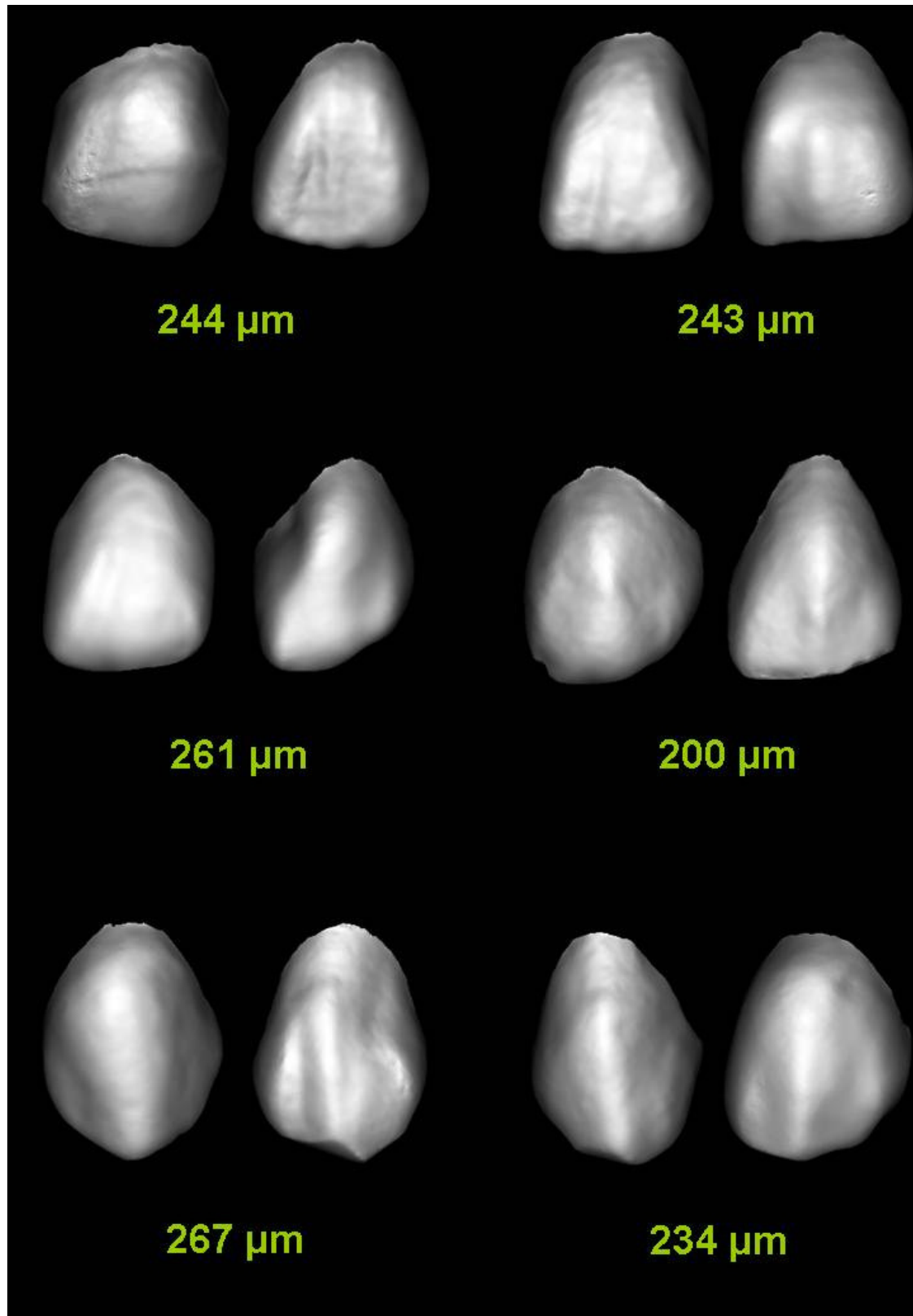


Abb. 32: Sehr unähnliche Vergleichspaare verschiedener Probanden, mit Angabe der entsprechenden metrischen Abweichung ausgedrückt durch Quant_80_20_halbe

- mittlere Frontzähne (obere Zeile)
- laterale Frontzähne (mittlere Zeile)
- Eckzähne (untere Zeile)

4.1.3 Ähnlichkeitsvergleich zwischen symmetrisch gegenüberliegenden und beliebigen Zähnen gleicher Frontzahntypen

Jeweils für mittlere Frontzähne, laterale Frontzähne und Eckzähne wird die Gruppe der symmetrisch gegenüberliegenden Zähne mit der Gruppe der beliebigen Vergleichspaare verschiedener Probanden verglichen. Testparameter ist dabei der den jeweiligen Gruppen eigene Mittelwert für Quant_80_20_halbe.

Anhand des Kolmogorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung konnte gezeigt werden, dass die oben beschrieben Gruppen bezüglich der Werte für Quant_80_20_halbe innerhalb einer Gruppe (z.B. Gruppe der symmetrisch gegenüberliegenden mittleren Frontzähne) nicht normalverteilt sind (Abb. 33 und 34).

Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest

		Quant_80_20_halbe
N		120
Parameter der Normalverteilung(a,b)	Mittelwert	44,4700
	Standardabweichung	19,95753
Extremste Differenzen	Absolut	,165
	Positiv	,165
	Negativ	-,129
Kolmogorov-Smirnov-Z		1,805
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		,003

a Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

b Aus den Daten berechnet.

Abb. 33: Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest für die Verteilung von Quant_80_20_halbe bei symmetrisch gegenüberliegenden mittleren Frontzähnen

Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest

		Quant_80_20_halbe
N		29982
Parameter der Normalverteilung(a,b)	Mittelwert	93,7623
	Standardabweichung	31,31129
Extremste Differenzen	Absolut	,061
	Positiv	,061
	Negativ	-,040
Kolmogorov-Smirnov-Z		10,634
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		,000

a Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

b Aus den Daten berechnet.

Abb. 34: Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest für die Verteilung von Quant_80_20_halbe bei beliebigen mittleren Frontzähnen verschiedener Probanden

Da keine normalverteilten Gruppen vorlagen, wurden diese anhand des U-Test nach Mann & Whitney auf signifikante Unterschiede überprüft werden.

Die Nullhypothese (Signifikanzniveau $p=0,01$) besagt, dass kein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen mit symmetrisch gegenüberliegenden Zähnen (innerhalb eines Zahntyps) und beliebigen Zähnen verschiedener Probanden (innerhalb eines Zahntyps) bezüglich Quant_80_20_halbe besteht.

Mann-Whitney-Test

Statistik für Test(a)

	Quant_80_20_halbe
Mann-Whitney-U	236220,50
	0
Wilcoxon-W	243480,50
	0
Z	-16,439
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	,000

a Gruppenvariable: ama

Ränge

	ama	N	Mittlerer Rang	Rangsumme
Quant_80_20_halbe	0	120	2029,00	243480,50
	1	29862	15043,59	449231672,50
	Gesamt	29982		

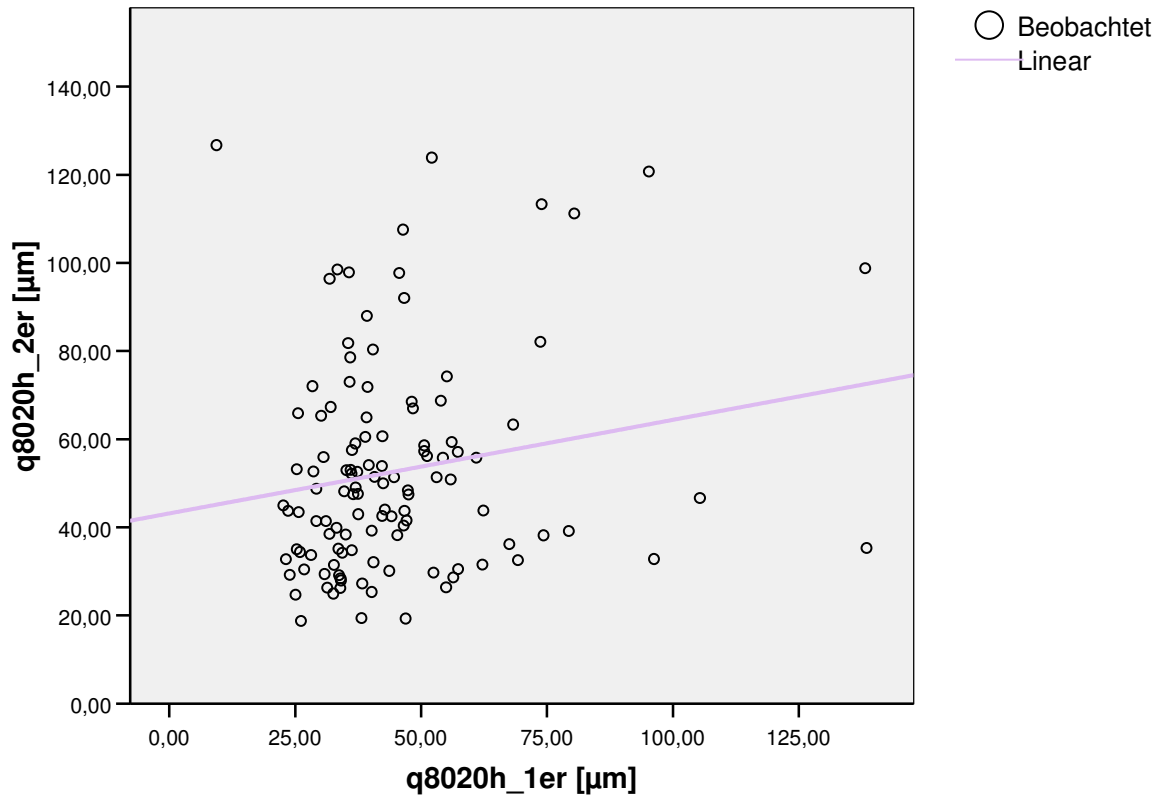
Abb. 35: Mann-Whitney-Test zwischen den Gruppen mit symmetrisch gegenüberliegenden mittleren Frontzähnen und beliebigen mittleren Frontzähnen verschiedener Probanden (Testvariable Quant_80_20_halbe; Signifikanzniveau $p=0,01$).

Anhand dieses Testverfahrens konnte die Nullhypothese für alle drei Frontzahn-
typen verworfen werden (Abb. 35). Die Alternativhypothese trifft somit zu: Es
besteht ein hochsignifikanter Unterschied bezüglich der Mittelwerte der Z-
Differenzwerte (Quant_80_20_halbe) zwischen den Gruppen mit symmetrisch
gegenüberliegenden Zähnen (innerhalb eines Zahntyps) und beliebigen Zähnen
verschiedener Probanden (innerhalb eines Zahntyps).

4.1.4 Vergleich unterschiedlicher Frontzahntypen

Bei der Korrelationsanalyse der Werte für Quant_80_20_halbe eines bestimmten
Vergleichspaares der mittleren Schneidezähne (q8020h_1er) mit dem Wert der
lateralen Schneidezähne (q8020h_2er) der jeweils gleichen Quadranten zeigte
sich auf dem Signifikanzniveau $p=0,01$ nur eine sehr schwache positive Korre-
lation (Abb. 36 und 37). Vergleichspaare mittlerer und lateraler Schneidezähne
innerhalb eines Probanden korrelierten dabei stärker miteinander (Pearson Rang-
korrelationskoeffizient = 0,178), als entsprechende Vergleichspaare unterschied-
licher Probanden (Pearson Rangkorrelationskoeffizient beträgt 0,114).

Korrelation symmetrisch gegenüberliegende mittlere Frontzähne - laterale Frontzähne (Quant_80_20_halbe)



Korrelationen

		q8020h_1er	q8020h_2er
q8020h_1er	Korrelation nach Pearson	1	,178
	Signifikanz (2-seitig)		,056
	N	120	116
q8020h_2er	Korrelation nach Pearson	,178	1
	Signifikanz (2-seitig)	,056	
	N	116	119

Abb. 36: Korrelation symmetrisch gegenüberliegender mittlerer Frontzähne mit lateralen Frontzähnen bezüglich Quant_80_20_halbe

Korrelation mittlere Frontzähne – lateral Frontzähne verschiedener Probanden (Quant_80_20_halbe)

Korrelationen

		q8020h_1er	q8020h_2er
q8020h_1er	Korrelation nach Pearson	1	,114(**)
	Signifikanz (2-seitig)		,000
	N	28848	27262
q8020h_2er	Korrelation nach Pearson	,114(**)	1
	Signifikanz (2-seitig)	,000	
	N	27262	28680

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

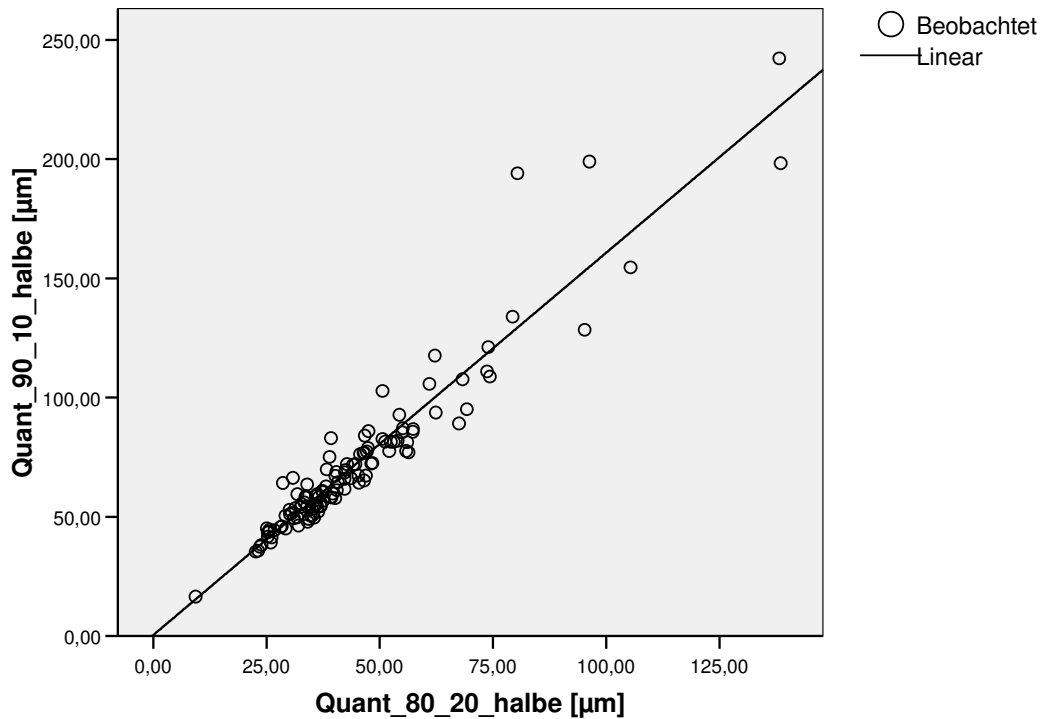
Abb. 37: Korrelation beliebiger mittlerer Frontzähne mit lateralen Frontzähnen zwischen verschiedenen Patienten bezüglich Quant_80_20_halbe

4.1.5 Vergleich verschiedener Ähnlichkeitsmaße

Beim Vergleich der Ähnlichkeitsmaße Quant_80_20_halbe mit Quant_90_10_halbe ist beim Streudiagramm der beiden Variablen eine sehr starke Korrelation erkennbar.

Dies trifft sowohl beim Vergleich für die symmetrischen Zahnpaare als auch für den Vergleich von Zahnpaaren verschiedener Probanden zu. Diese wird durch den parametrischen Spearman Rangkorrelationskoeffizient (Signifikanzniveau $p=0,01$) von 0,947 (Vergleich beliebiger mittlerer Frontzähne verschiedener Probanden) bzw. 0,944 (Vergleich symmetrisch gegenüberliegender mittlerer Frontzähne eines Probanden) bestätigt (Abb. 38 und 39).

Korrelation Quant_80_20_halbe - Quant_90_10_halbe (symmetrisch, innerhalb eines Probanden)



Modellzusammenfassung und Parameterschätzer

Abhängige Variable: q9010h

Gleichung	Modellzusammenfassung				Parameterschätzer		
	R-Quadrat	F	Freiheitsgr ade 1	Freiheitsgr ade 2	Sig.	Konstante	b1
Linear	,904	1105,010	1	118	,000	,379	1,605

Die unabhängige Variable ist q8020h.

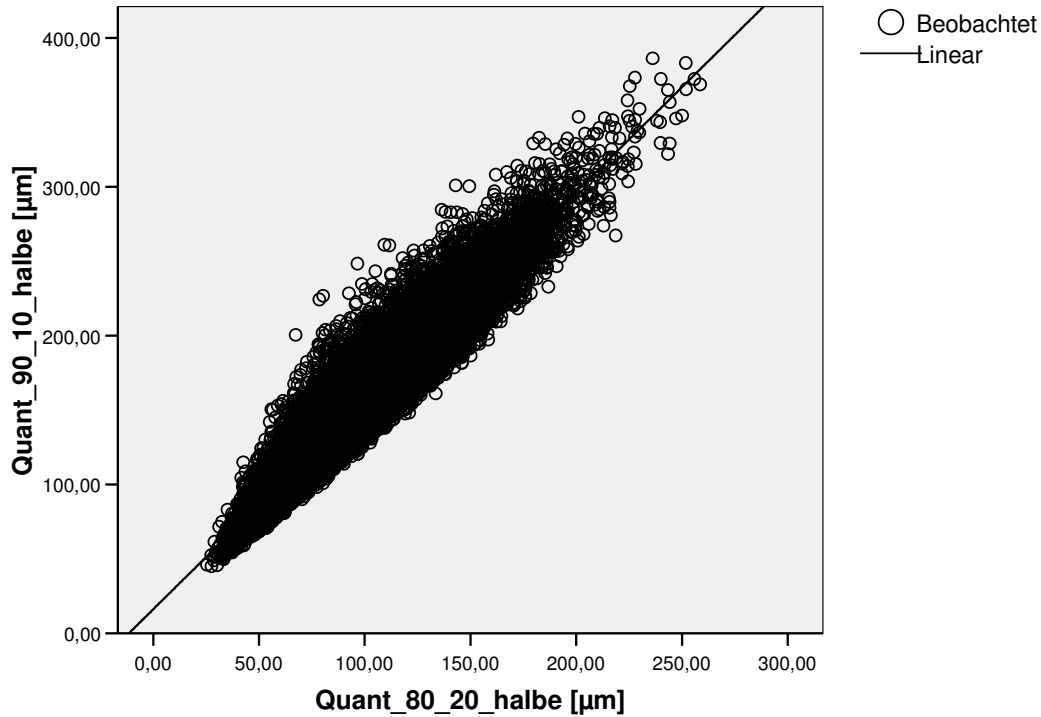
Korrelationen

			q8020h	q9010h
Spearman-Rho	q8020h	Korrelationskoeffizient	1,000	,944(**)
		Sig. (2-seitig)	.	,000
		N	120	120
	q9010h	Korrelationskoeffizient	,944(**)	1,000
		Sig. (2-seitig)	,000	.
		N	120	120

** Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant (zweiseitig).

Abb. 38: Korrelation zwischen Quant_80_20_halbe und Quant_90_10_halbe bei symmetrisch gegenüberliegenden mittleren Frontzähnen

Korrelation Quant_80_20_halbe - Quant_90_10_halbe (verschiedene Probanden)



Modellzusammenfassung und Parameterschätzer

Abhängige Variable: q9010h

Gleichung	Modellzusammenfassung					Parameterschätzer	
	R-Quadrat	F	Freiheitsgr ade 1	Freiheitsgr ade 2	Sig.	Konstante	b1
Linear	,902	274099,35 1	1	29860	,000	16,021	1,403

Die unabhängige Variable ist q8020h.

Korrelationen

			q8020h	q9010h
Spearman-Rho	q8020h	Korrelationskoeffizient	1,000	,947(**)
		Sig. (2-seitig)	.	,000
		N	29862	29862
	q9010h	Korrelationskoeffizient	,947(**)	1,000
		Sig. (2-seitig)	,000	.
		N	29862	29862

** Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant (zweiseitig).

Abb. 39: Korrelation zwischen Quant_80_20_halbe und Quant_90_10_halbe bei beliebigen mittleren Frontzähnen verschiedener Patienten

4.1.6 Visuelle Beurteilung von Ähnlichkeiten zwischen Frontzähnen und multivariate Analyse

Multidimensionale Skalierung

Auf der Basis von Ähnlichkeitsurteilen von zehn Zahnärzten resultiert eine räumliche Konfiguration (Abb. 21, Kap. 3.2.6), bei der eine Aufteilung der beurteilten Zähne in drei Gruppen beobachtbar ist (Abb. 40).

Man erkennt, dass sich die Gruppe mit den Zähnen 3,5,6,7 hinsichtlich Dimension 1 zwischen den anderen beiden Gruppen befindet. In Bezug auf Dimension 2 ist die in der Mitte stehende Gruppe diejenige mit den Zähnen 2,8,9.

STRESS wird mit 0,29 und RSQ mit 0,57 angegeben, was als relativ schlechte Anpassung der Konfiguration betrachtet werden kann. Der größte Wert der Weirness beträgt 0,48 für Zahnarzt 3.

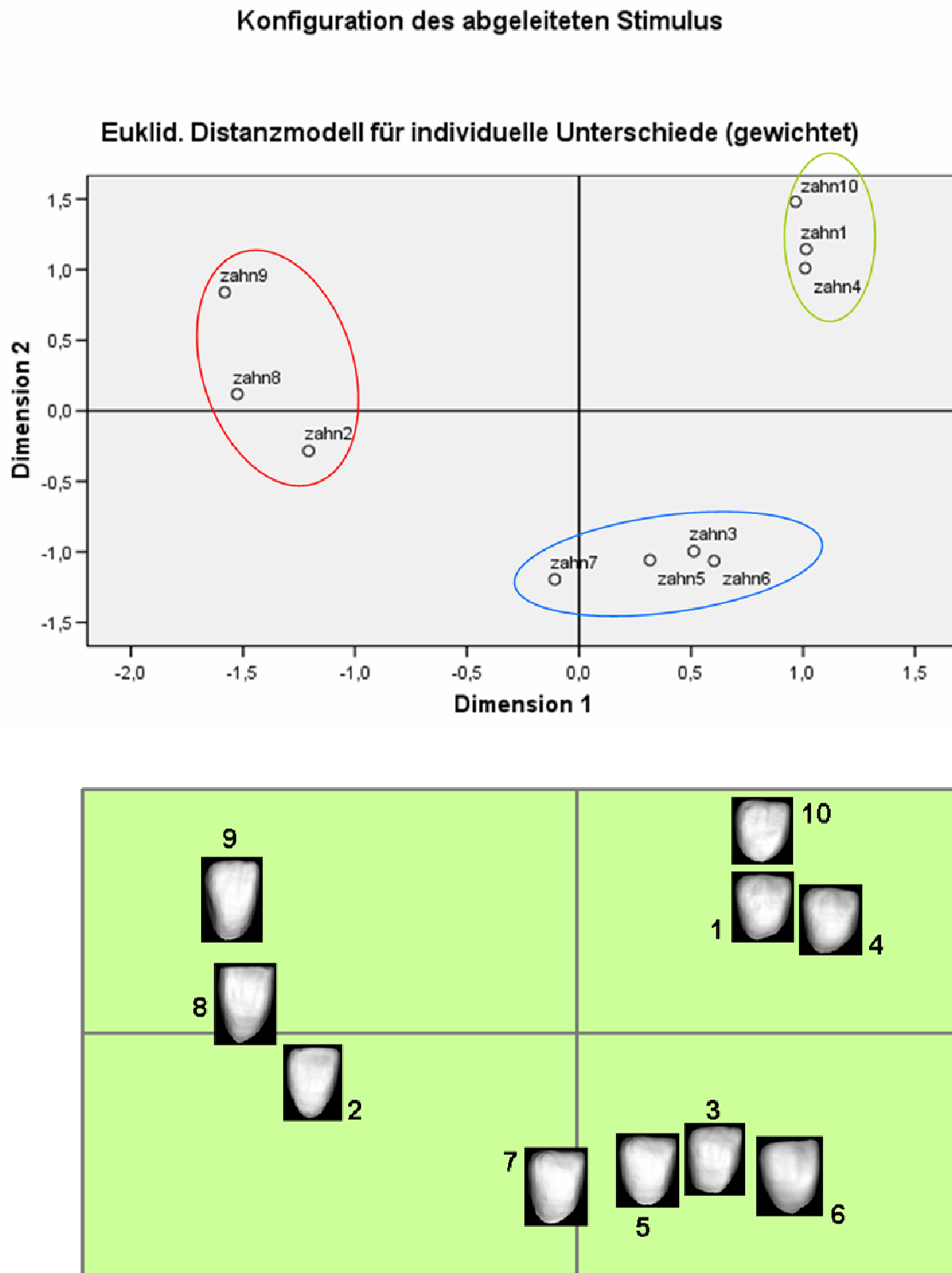


Abb. 40: Räumliche Konfiguration der beurteilten Zähne durch MDS (oben) und Veranschaulichung mit den der Konfiguration entsprechenden Zähnen. Kennzeichnung der drei zusammengefassten Gruppen durch farbige Umrandungen (unten).

Lässt man zusätzlich eine Konfiguration der zuvor metrisch ermittelten Ähnlichkeiten (Quant_80_20_halbe) mittels MDS erstellen (Abb. 41), sieht man, dass diese von der Konfiguration, die aus der Bewertung durch die Zahnärzte hervorgegangen ist, abweicht. Die Güterwerte sind gut: STRESS = 0,14 und RSQ = 0,88.

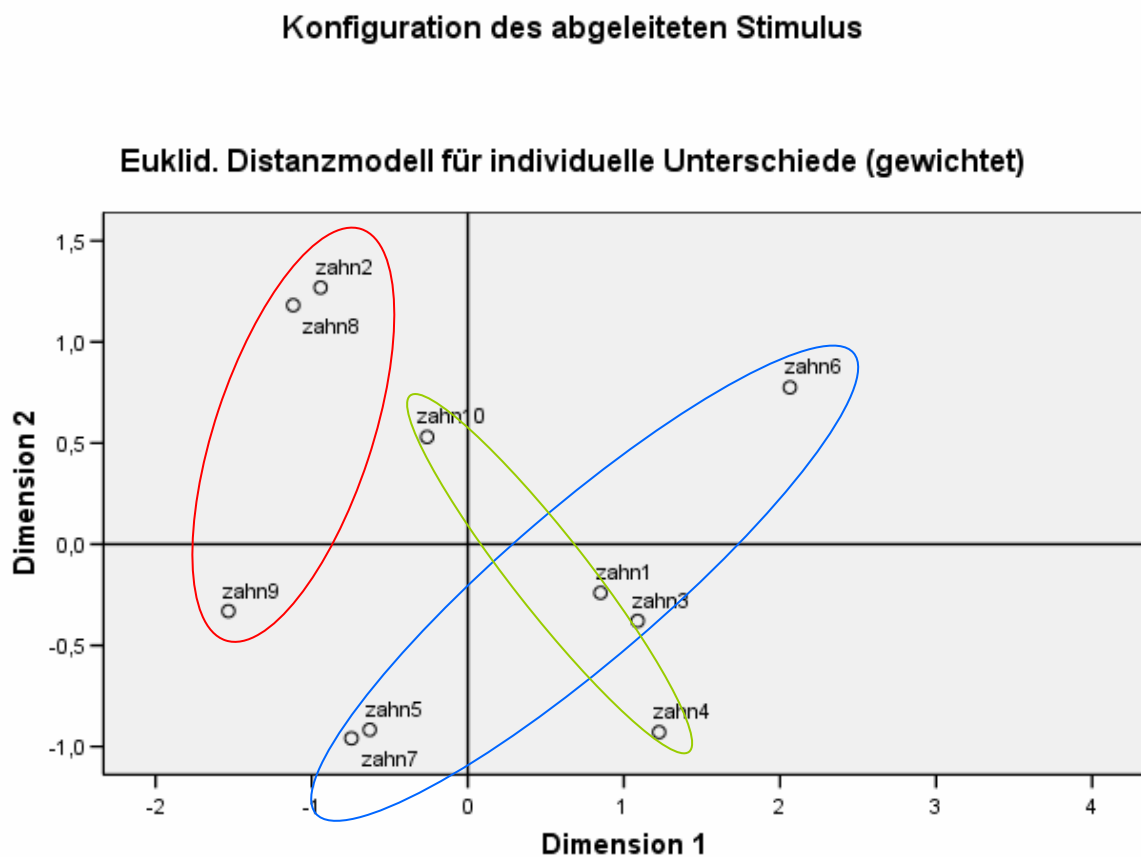


Abb. 41: Konfiguration der MDS anhand metrischer Daten (Quant_80_20_halbe)

Mehrdimensionale Entfaltung

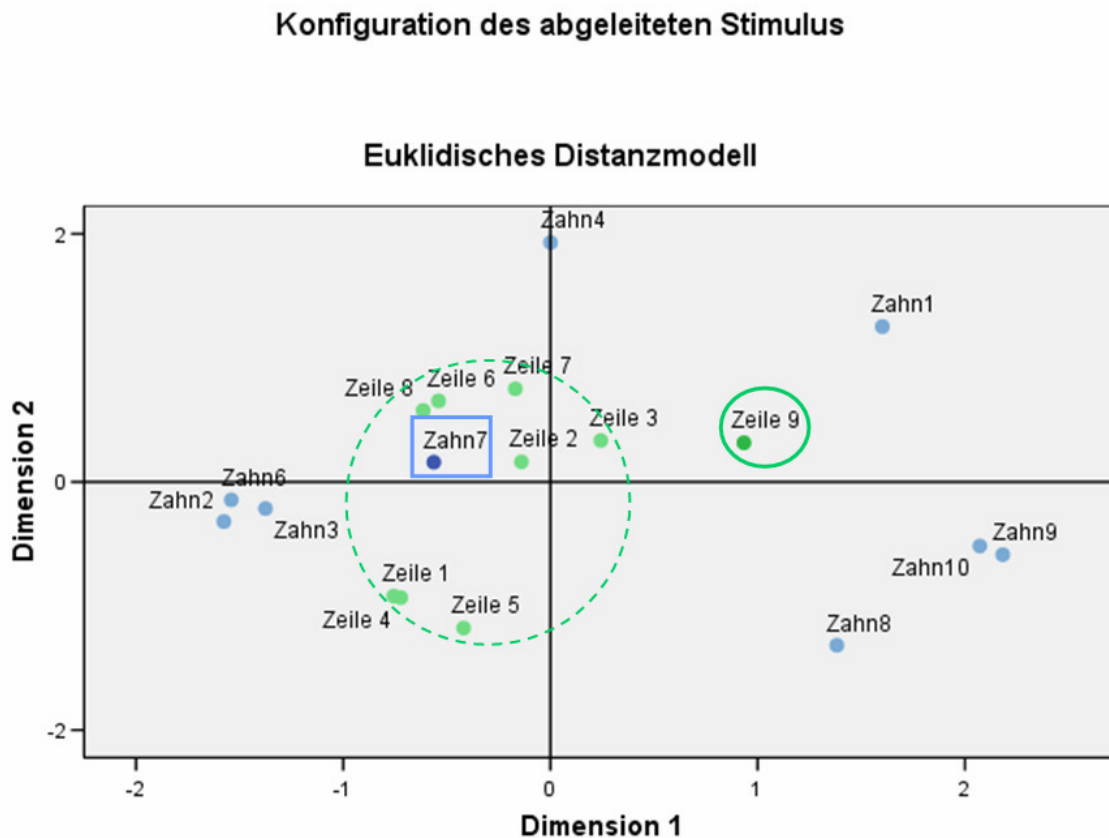


Abb. 42: Konfiguration der Mehrdimensionalen Entfaltung

■ Beobachter – grüne Punkte

■ Zähne – blaue Punkte

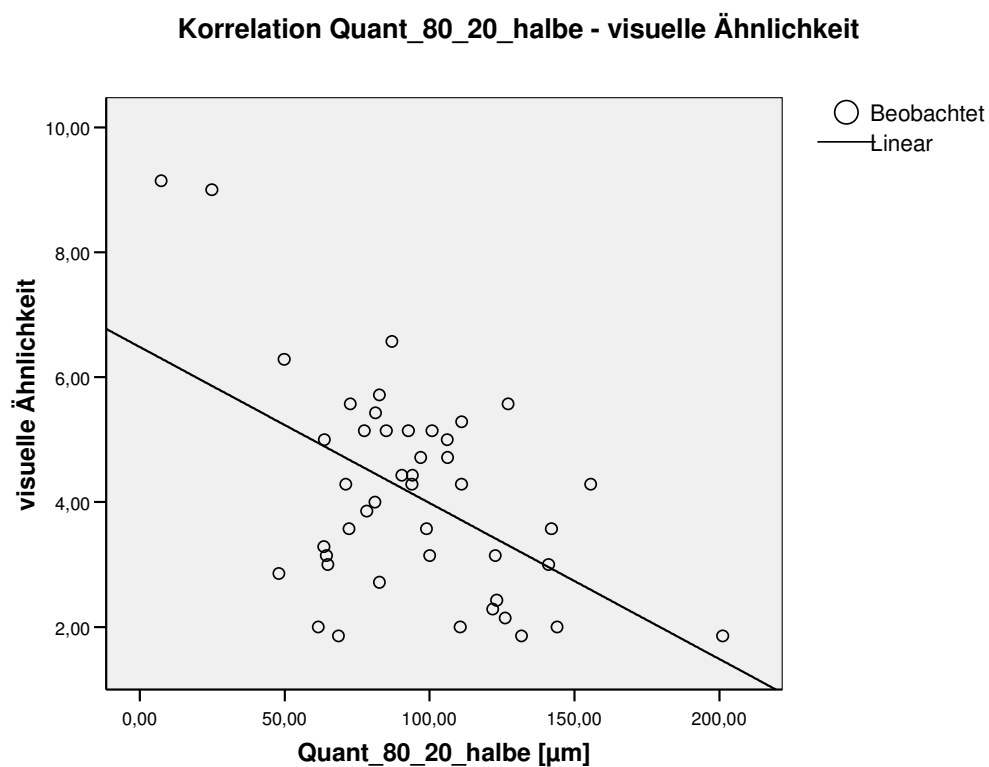
Beobachter „Zeile9“ entspricht der Positionierung der Rangreihenfolge von Quant_80_20_halbe (grüne Umrandung);

„Zahn7“ entspricht dem Zahn, der dem Referenzzahn laut aller Beobachter am nächsten lag;

Bei der MDU erkennt man, dass die Beobachter relativ nahe beieinander liegen (Abb. 42; gestrichelte, grüne Umrandung). Der Beobachter „Zeile9“ ist keine beurteilende Person, sondern repräsentiert die Rangreihenfolge, die aus den Werten von Quant_80_20_Halbe resultiert. Zahn 7, der dem Referenzzahn laut allen Beobachtern am nächsten kommt, befindet sich mitten im „Kreis“ dieser Beobachter. Die Gütemaße können als sehr gut betrachtet werden (STRESS = 0,165; RSQ = 0,997)

Korrelationsbestimmung

Der Vergleich zwischen der metrisch ermittelten Ähnlichkeit und dem visuellen Eindruck der Ähnlichkeit von Vergleichspaaren zeigt eine schwache Korrelation (Spearman-Rho Korrelationskoeffizient beträgt $-0,310$). Damit lässt sich feststellen, dass die angewandte Methode des Oberflächenvergleichs von Zähnen nur teilweise mit dem menschlichen Eindruck übereinstimmt.



Korrelationen

			q8020h	mean_ZA
Spearman-Rho	q8020h	Korrelationskoeffizient	1,000	-,310(*)
		Sig. (2-seitig)	.	,038
		N	45	45
	mean_ZA	Korrelationskoeffizient	-,310(*)	1,000
		Sig. (2-seitig)	,038	.
		N	45	45

* Die Korrelation ist auf dem 0,05 Niveau signifikant (zweiseitig).

Abb. 43: Übereinstimmung der metrisch ermittelten Ähnlichkeit mit dem visuellen Eindruck von Zahnärzten; Visuelle Bewertung: 0 Punkte entsprechen einem maximal unähnlichen Vergleichspaar, 10 Punkte entsprechen einem maximal ähnlichen Vergleichspaar

4.2 3D-Untersuchungen zur Spiegelsymmetrie

4.2.1 3D-Oberflächenvergleich von symmetrisch gegenüberliegenden Frontzähnen eines Zahntyps

Zuerst wurden Differenzbilder erstellt (Abb. 44), die durch eine Best-Fit-Überlagerung der symmetrisch gegenüberliegenden oberen Frontzähne eines Probanden entstanden. Jeder Oberflächenvergleich (Zahn 11 mit 21, Zahn 12 mit 22, Zahn 13 mit 23) wurde von vestibulär, inzisal und palatinal dokumentiert (Abb. 45).

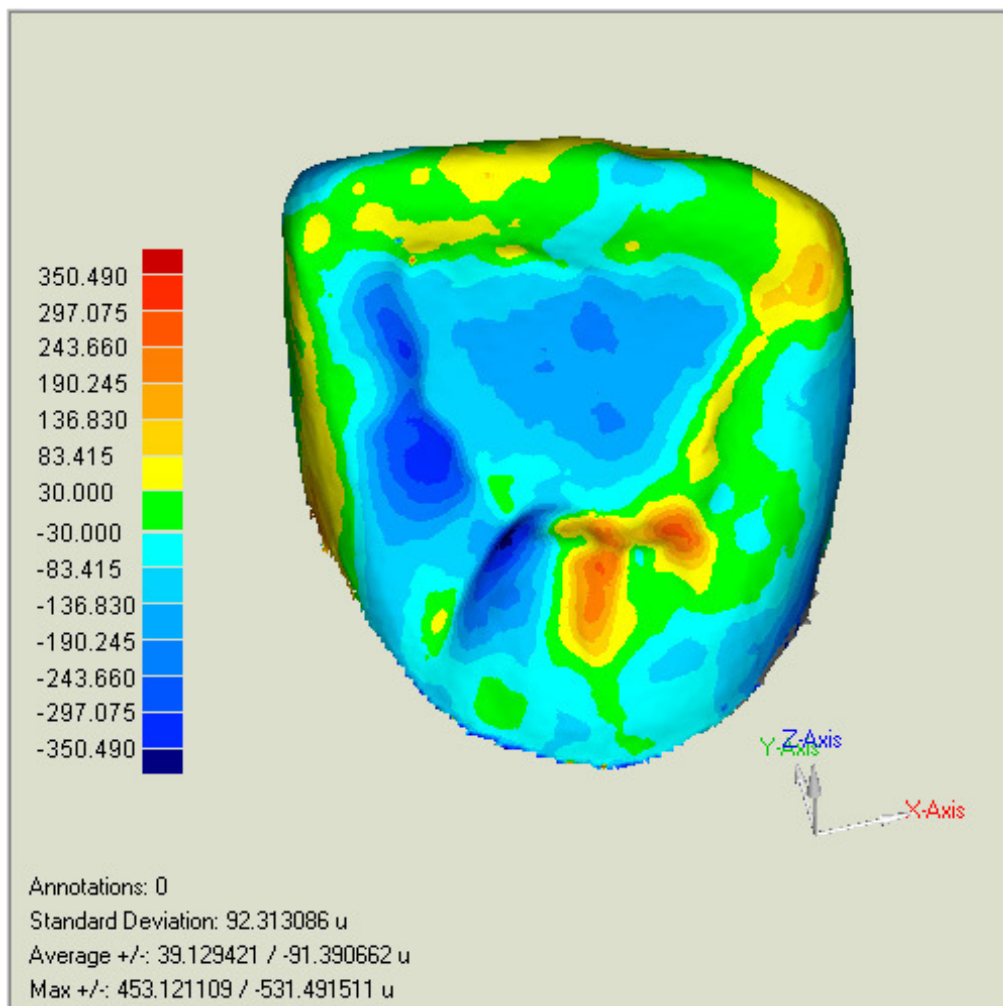


Abb. 44: Differenzbild aus dem Vergleich des Zahnes 11 mit dem Zahn 21 eines Probanden (Ansicht von palatinal); farbliche Kodierung der jeweiligen Abstände nach Überlagerung; Werte in μm

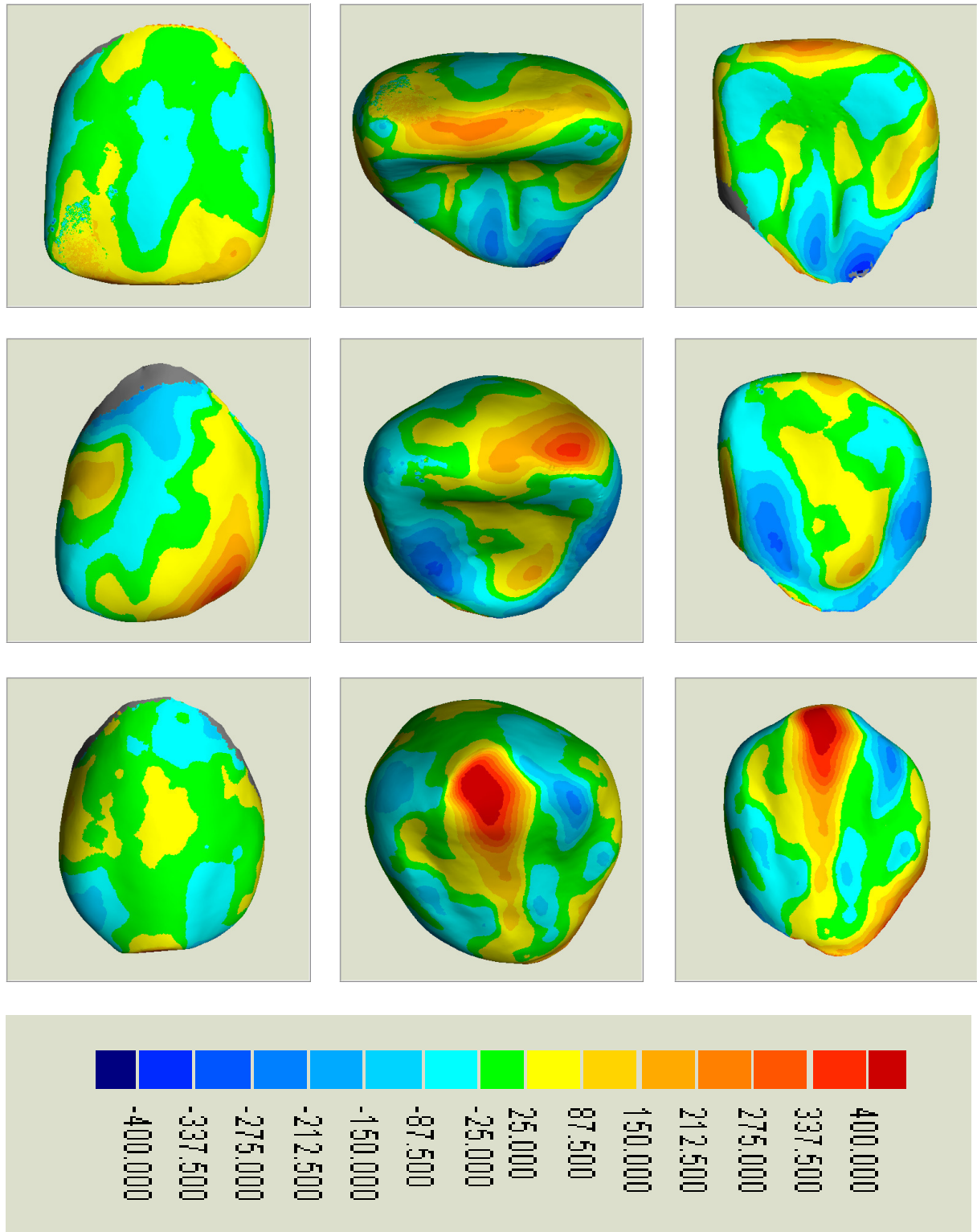
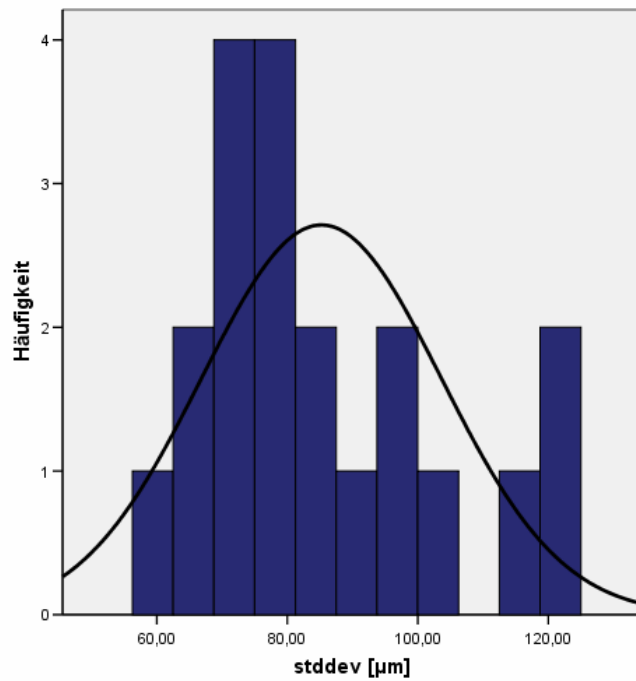
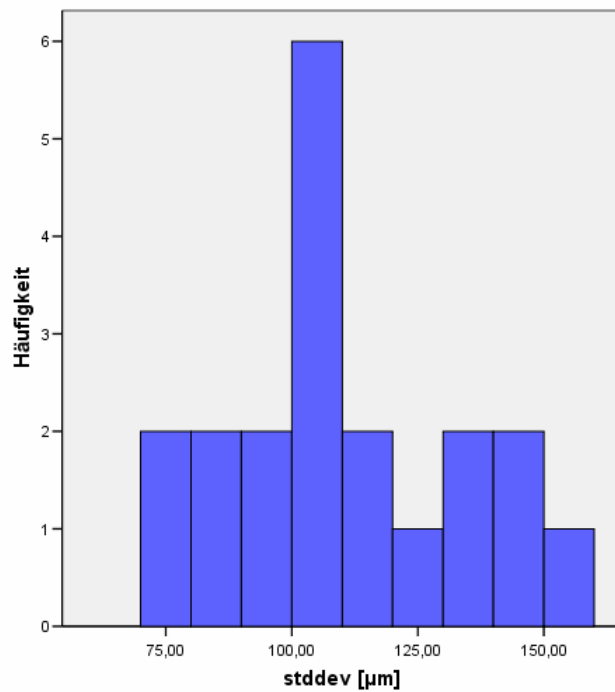


Abb. 45: Differenzbilder von Oberflächenvergleichen;
 farbliche Kodierung der jeweiligen Abstände nach Überlagerung; Werte in μm

- mittlere Frontzähne – Ansicht von vestibulär, inzisal und palatinal (obere Zeile)
- laterale Frontzähne – Ansicht von vestibulär, inzisal und palatinal (mittlere Zeile)
- Eckzähne – Ansicht von vestibulär, inzisal und palatinal (untere Zeile)

3D-Vergleich kompletter Oberflächen mittlerer Frontzähne gleicher Probanden

Mittelwert = 85,226
Std.-Abw. = 18,386
N = 20

3D-Vergleich kompletter Oberflächen lateraler Frontzähne gleicher Probanden

Mittelwert = 111,334
Std.-Abw. = 23,336
N = 20

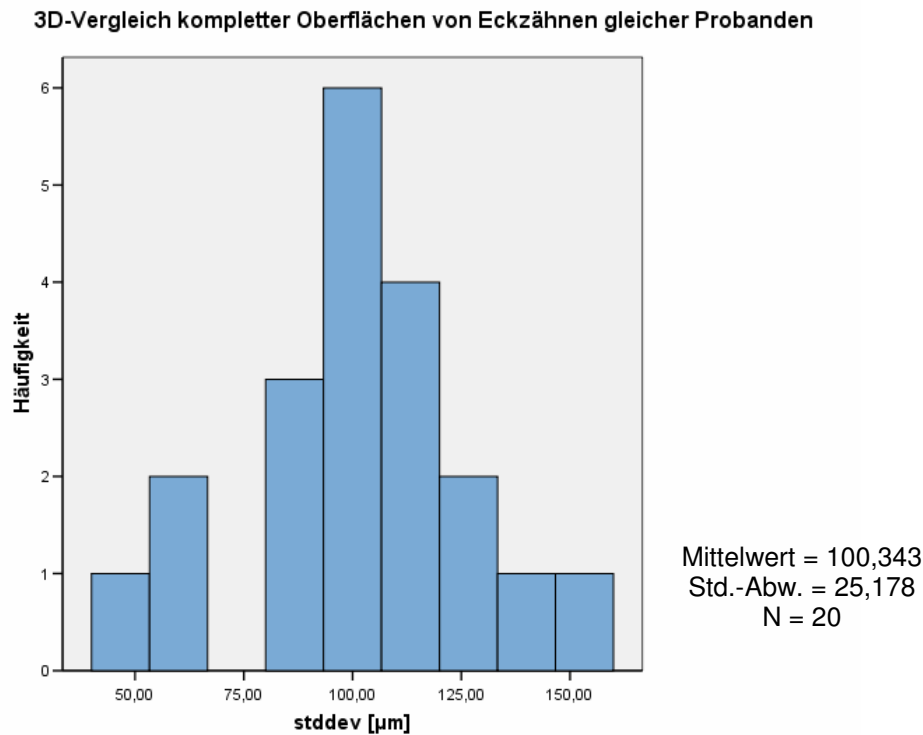


Abb. 46: Histogramme der Standardabweichung (stddev)

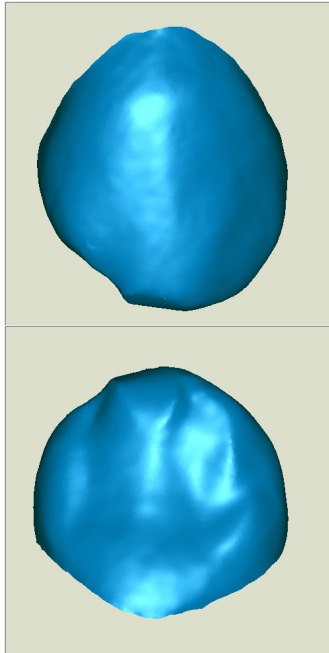
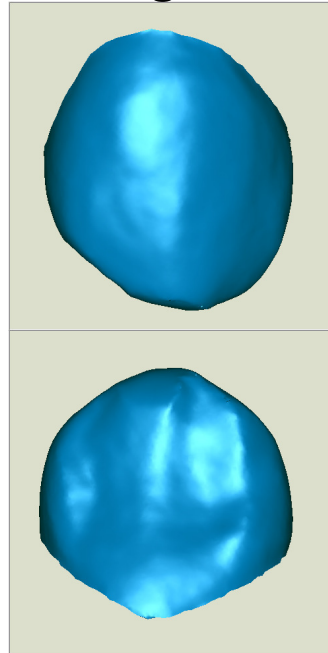
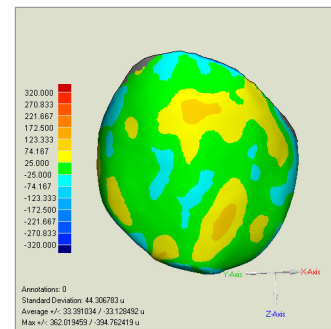
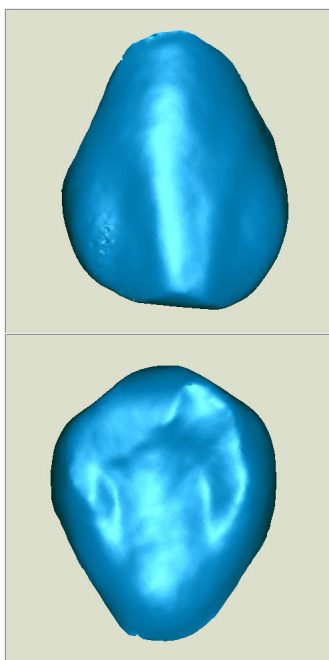
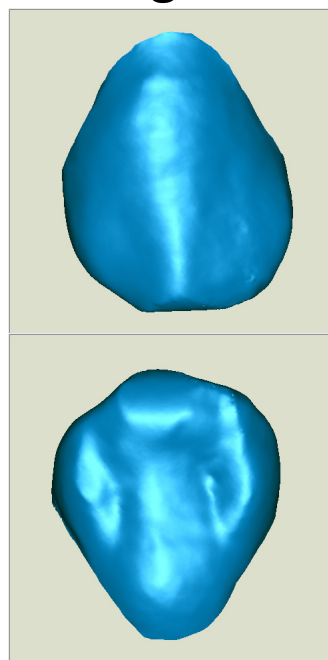
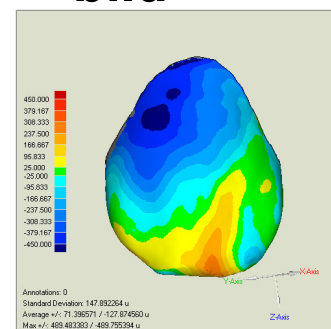
- mittlere Frontzähne (erstes Histogramm)
- laterale Frontzähne (mittleres Histogramm)
- Eckzähne (letztes Histogramm)

Tabelle 5 und Abbildung 46 zeigen die statistischen Daten, die für die resultierenden Standardabweichungen (stddev) über die Zahnoberflächen als Ähnlichkeitsmaß gewonnen werden konnten.

		Vergleich Zahn 11 mit 21	Vergleich Zahn 12 mit 22	Vergleich Zahn 13 mit 23
	n	20	20	20
stddev (Ähnlich- keitsmaß)	Mittelwert	85,226	111,334	100,343
	Std.-Abw. *	18,386	23,336	25,178

Tab. 5: 3D-Oberflächenvergleich symmetrisch gegenüberliegender Zähne;
Mittelwerte und Std.-Abw. in µm;

* entspricht der Std.-Abw. des zuvor genannten Mittelwertes und ist kein Ähnlichkeitsmaß

**Zahn 13_
gespiegelt****Zahn 23_
original****Differenz-
bild****44 μm** **Zahn 13_
gespiegelt****Zahn 23_
original****Differenz-
bild****148 μm** **Abb. 47:** Vergleichspaare mit minimaler und maximaler Standardabweichung (stddev) als Ähnlichkeitsmaß

Die kleinste Standardabweichung und damit größte metrische Ähnlichkeit wurde mit 44,31 μm zwischen zwei Eckzähnen ermittelt. Die größte Standardabweichung und somit die größte metrisch Unähnlichkeit betrug 147,89 μm und fand sich ebenfalls bei Eckzähnen (Abb. 47).

4.2.2 Spiegelsymmetrischer Ersatz

Zusätzlich zum direkten Vergleich zweier symmetrisch gegenüberliegender Zähne eines Typs soll auch geprüft werden, wie gut ein achsensymmetrisch gespiegelter Zahn seinen seitenkorrespondierenden Zahn ersetzen kann.

Dazu wurden entweder der Zahn 21, Zahn 22 oder Zahn 23 des Oberkiefergesamtmodells gelöscht und der entsprechende wie unter 3.3.1 beschrieben gespiegelte, rotierte und translatierte korrespondierende Zahn in die entstandene Lücke gesetzt (Abb. 23, Kap. 3.3.2).

Die automatische Positionierung konnte in den meisten Fällen übernommen werden. Bei einem Anteil von etwa 25 % mussten manuelle Korrekturen vorgenommen werden (Abb. 24, Kap. 3.3.2).

4.2.3 Approximale und okklusale Passung der spiegelsymmetrischen Rekonstruktion

Es wurde versucht, Frontzähne durch ihre spiegelsymmetrisch korrespondierenden Zähne zu ersetzen.

Bei solch einem Ersatz war es möglich, dass der Abstand des ersetzten Zahnes zum mesialen bzw. distalen Nachbarzahn entweder größer wurde, oder aber es zur Überschneidung von Zähnen kam, die im folgenden als „Overlap“ bezeichnet wird. Die Abstände wurden im Original und in der Situation mit dem ersetzten Zahn vermessen (Overlap als positiver Wert, Abstand als negativer

Wert) und die jeweiligen Differenzen bestimmt. Auch bei den Abständen zu den Antagonisten war es prinzipiell möglich, dass diese entweder größer wurden oder dass ein Overlap auftrat. Tabelle 6 und die Abbildungen 48 bis 50 zeigen die resultierenden statistischen Werte:

		Mittlere Frontzähne	Laterale Frontzähne	Eckzähne
	n	20	20	20
Differenz - mesialer Abstand	Mittelwert	29,800	-27,80	69,25
	Std.-Abw. *	145,326	152,520	118,145
Differenz - distaler Abstandes	Mittelwert	-24,95	-40,95	**
	Std.-Abw. *	151,081	143,466	**
Differenz - Abstand zum Antagonisten	Mittelwert	-3,55	-50,85	-26,90
	Std.-Abw. *	137,708	158,707	119,022

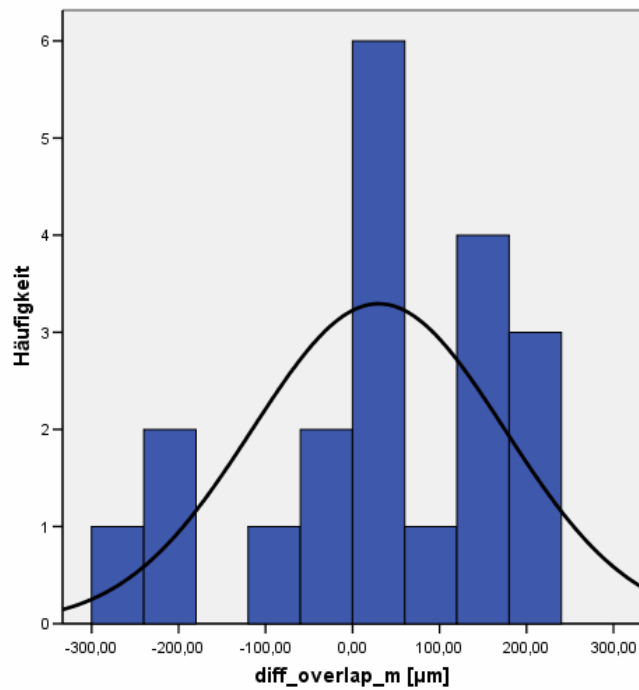
Tab. 6: Passung der ersetzenden Zähne zu den approximalen Zähnen und den Antagonisten; Mittelwert und Std.-Abw. in μm ;

* entspricht der Std.-Abw. des zuvor genannten Mittelwertes und ist kein Ähnlichkeitsmaß

** der mesiodistale Abstand des Eckzahnes zum erstem Prämolare wurde nicht erhoben

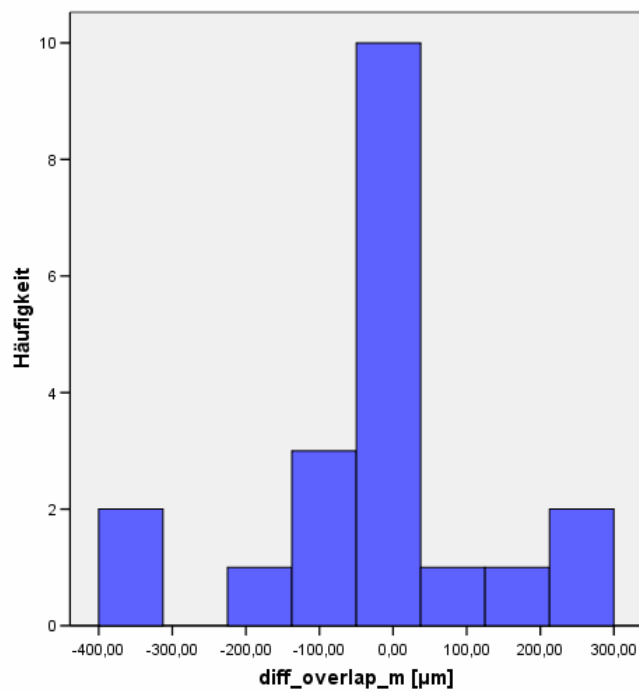
Bei 60 gemessenen Unterschieden des mesialen Abstandes und des Abstandes zum jeweiligen Antagonisten traten je fünf Fälle auf, bei denen die Differenz über $250 \mu\text{m}$ betrug. Der Maximalwert betrug $370 \mu\text{m}$ bezüglich des mesialen Abstandes und $343 \mu\text{m}$ bezüglich des Antagonistenabstandes. In drei von 40 Fällen überschritt die Differenz des distalen Abstandes den Wert von $250 \mu\text{m}$, wovon der höchste Wert $459 \mu\text{m}$ war. Somit wich in ca. 92 % der Fälle der spiegelsymmetrische Ersatz nicht mehr als $250 \mu\text{m}$ vom Original ab.

Differenz der mesialen Abstände zwischen Originalsituation und der Situation nach spiegelsymmetrischem Ersatz (mittlere Frontzähne)



Mittelwert = 29,80
Std.-Abw. = 145,326
N = 20

Differenz der mesialen Abstände zwischen Originalsituation und der Situation nach spiegelsymmetrischem Ersatz (laterale Frontzähne)



Mittelwert = -27,80
Std.-Abw. = 152,520
N = 20

Differenz der mesialen Abstände zwischen Originalsituation und der Situation nach spiegelsymmetrischem Ersatz (Eckzähne)

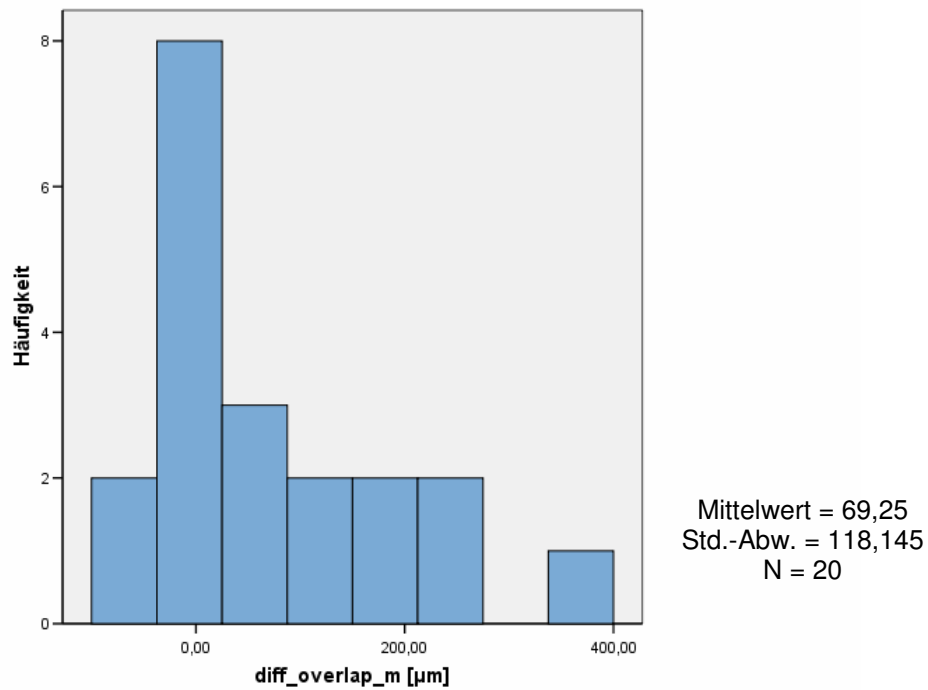
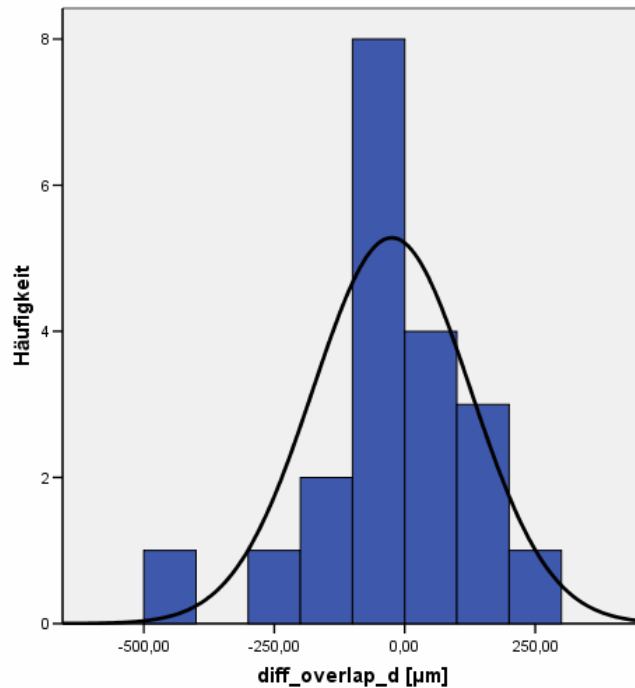


Abb. 48: Differenz der mesialen Abstände zwischen Originalsituation und der Situation nach spiegelsymmetrischem Ersatz;

Histogramme der Differenz des mesialen Overlap

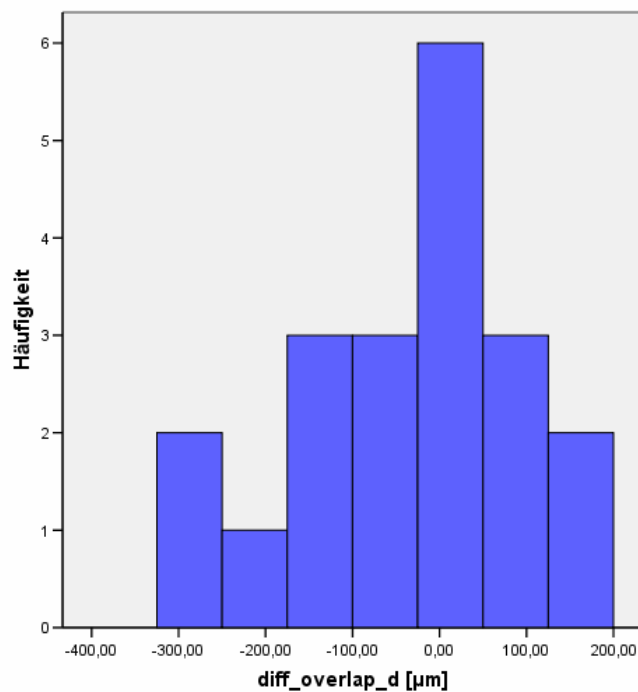
- mittlere Frontzähne (erstes Histogramm)
- laterale Frontzähne (mittleres Histogramm)
- Eckzähne (letztes Histogramm)

Differenz der distalen Abstände zwischen Originalsituation und der Situation nach spiegelsymmetrischem Ersatz (mittlere Frontzähne)



Mittelwert = -24,95
 Std.-Abw. = 151,081
 N = 20

Differenz der distalen Abstände zwischen Originalsituation und der Situation nach spiegelsymmetrischem Ersatz (laterale Frontzähne)



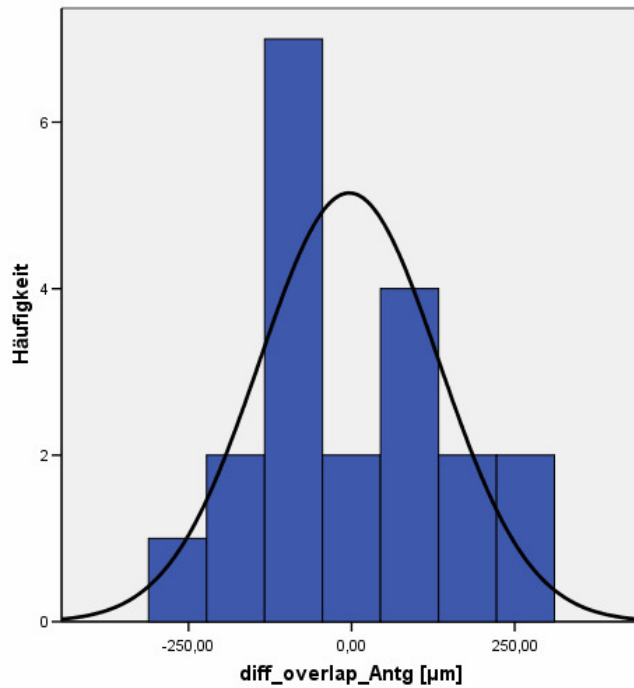
Mittelwert = -40,95
 Std.-Abw. = 143,466
 N = 20

Abb. 49: Differenz der distalen Abstände zwischen Originalsituation und der Situation nach spiegelsymmetrischem Ersatz;

Histogramme der Differenz des mesialen Overlap

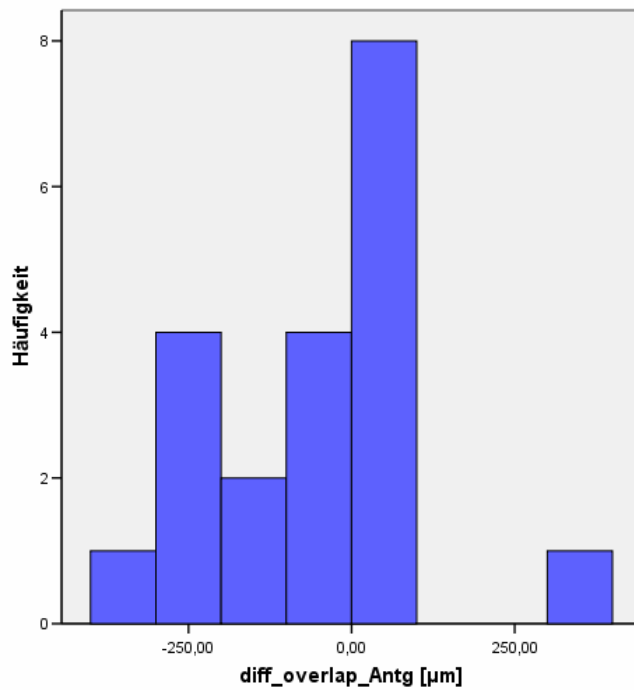
- mittlere Frontzähne (erstes Histogramm)
- laterale Frontzähne (zweites Histogramm)

Differenz der Abstände zu den Antagonisten zwischen Originalsituation und der Situation nach spiegelsymmetrischem Ersatz (mittlere Frontzähne)



Mittelwert = -3,55
Std.-Abw. = 137,708
N = 20

Differenz der Abstände zu den Antagonisten zwischen Originalsituation und der Situation nach spiegelsymmetrischem Ersatz (laterale Frontzähne)



Mittelwert = -50,85
Std.-Abw. = 158,707
N = 20

Differenz der Abstände zu den Antagonisten zwischen Originalsituation und der Situation nach spiegelsymmetrischem Ersatz (Eckzähne)

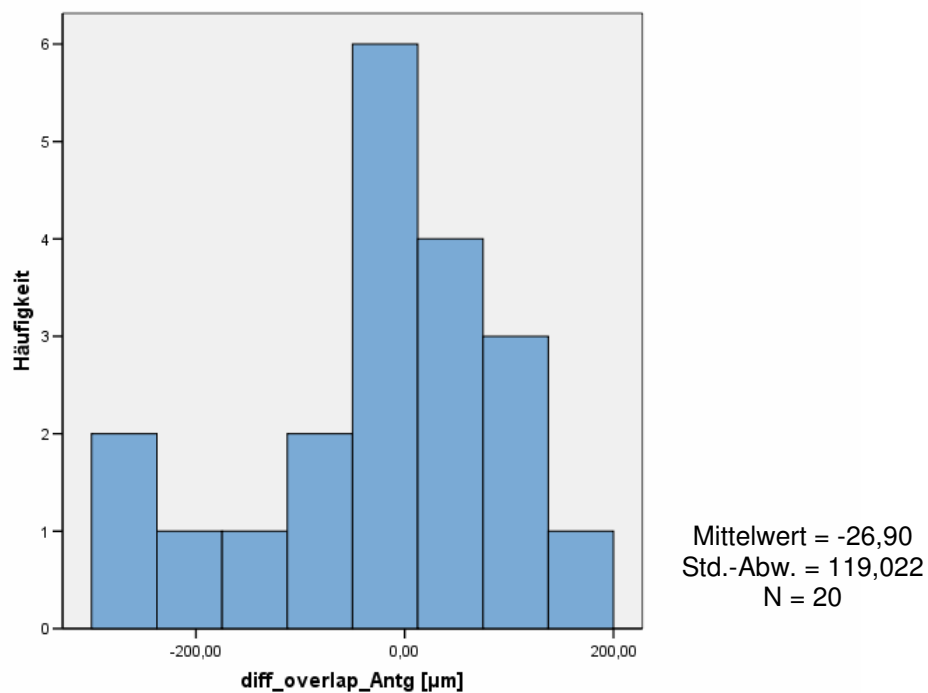


Abb. 50: Differenz der distalen Abstände zu den Antagonisten zwischen Originalsituation und der Situation nach spiegelsymmetrischem Ersatz; Histogramme der Differenz des mesialen Overlap

- mittlere Frontzähne (erstes Histogramm)
- laterale Frontzähne (mittleres Histogramm)
- Eckzähne (letztes Histogramm)

4.2.4 Visuelle Bewertung von Spiegelsituation und Originalsituation

Der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test zeigt auf hochsignifikantem Niveau ($p < 0,001$), dass die gespiegelten Ansichten als harmonischer bewertet wurden, als die Originalansichten. Insgesamt wurde die gespiegelte Ansicht bei 39 Einzelurteilen besser bewertet, das Original dagegen nur bei 14 Urteilen. 27-mal wurden beide Ansichten als gleich harmonisch gewertet (Abb. 51 und 52).

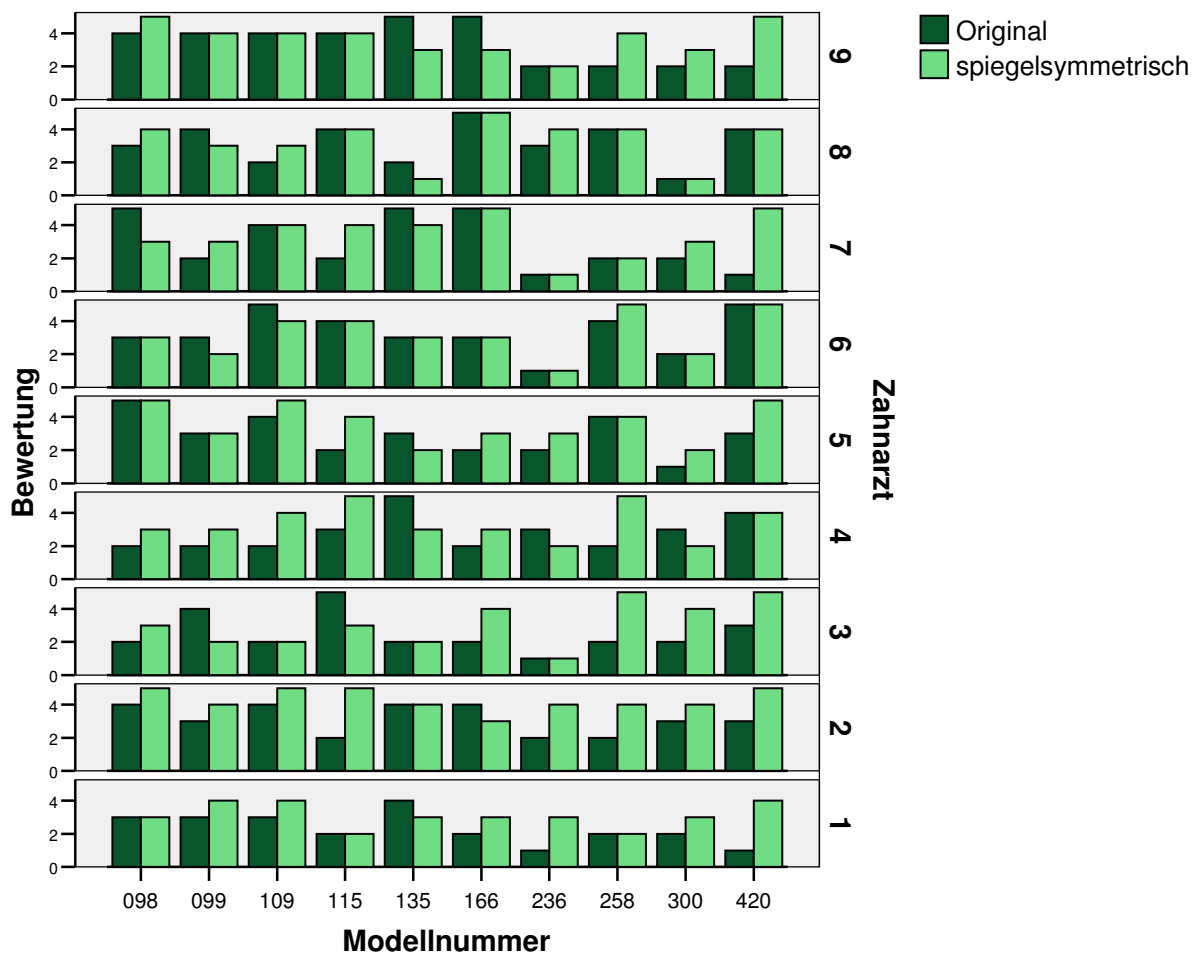


Abb. 51: Balkendiagramm, das die Bewertung von Originalansicht und spiegelsymmetrischer Ansicht der einzelnen Zahnärzte zeigt.

Bewertung 5 = sehr harmonisch (++)

Bewertung 1 = sehr unharmonisch (--)

Wilcoxon-Test

Ränge

		N	Mittlerer Rang	Rangsumme
Spiegel - Original	Negative Ränge	39(a)	28,31	1104,00
	Positive Ränge	14(b)	23,36	327,00
	Bindungen	27(c)		
	Gesamt	80		

a Spiegel < Original

b Spiegel > Original

c Spiegel = Original

Statistik für Test(b)

	Spiegel - Original
Z	-3,548(a)
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	,000

a Basiert auf positiven Rängen.

b Wilcoxon-Test

Abb. 52: Wilcoxon-Test zum Vergleich der Bewertungen der Originalansichten mit den Bewertungen der gespiegelten Ansichten

5 DISKUSSION

5.1 Diskussion von Material und Methode

Ziel der Erarbeitung einer Zahnbibliothek ist es, eine Vielzahl der in der Natur vorkommenden Zahnformen zu erhalten. Es wurde eine Reihe an Voraussetzungen formuliert, die an die Probanden zu stellen war. Da in dieser Studie eine Altersgruppe von ca. 16 bis 25 Jahren ausgewählt wurde und es sich um naturgesunde Bissituationen handelt, war eine Abrasion der Inzisalkanten wenig fortgeschritten. Es wurden keine jüngeren Probanden zugelassen, um einen möglichst vollständigen Zahndurchbruch gesichert zu wissen. Um auch die gesamte Oberkieferfront in die Analysen einzubeziehen, war es notwendig, dass die Probanden keine kieferorthopädisch relevanten Fehlstellungen der Frontzähne aufwiesen. Alle Ergebnisse, die aus den vorliegenden Untersuchungen geschlossen werden, müssen vor dem Hintergrund gesehen werden, dass die für die Zahnbibliothek ausgewählten Probanden nur eine Stichprobe der Bevölkerung darstellen. Die Probanden waren alle Schüler bzw. Studenten aus Leipzig und München. Wünschenswert wäre eventuell eine bessere Repräsentation anderer Regionen bzw. eine repräsentativere ethnische Verteilung. Um auch spätere Fragestellungen bearbeiten zu können, war bei der Erstellung der Zahnbibliothek auf eine genaue Erfassung aller eventuell interessanten Daten zu achten. Da die Modellsammlung teilweise mit Modellen aus zahnärztlichen Praxen ergänzt wurde, war dies in einigen wenigen Fällen nicht möglich. So muss für entsprechende Gruppierungen in weiteren Untersuchungen immer eine geeignete Auswahl erfolgen.

Mit Hilfe der Zahnbibliothek kann außer von Zahnanalysen bzw. morphologische Studien auch die Erarbeitung eines biogenerischen Modells nach Mehl (2003) durchgeführt werden. Die Zahnbibliothek könnte weiter Grundlagen für die Lehre, bei der Systematisierung neuer Prothesenzähne und in der Forensik bzw. Anthropologie bereitstellen.

Bei der Herstellung der Einzelzahnmodelle konnten kleinere Absprengungen im Approximalbereich zweier Zähne bei deren Trennung nicht verhindert werden. Kleinere Ungenauigkeiten in diesen Bereichen sind die Folge. Um eine korrekte Datenerfassung durch das 3D-Scansystem zu gewährleisten, wurde bei den Einzelzahnmodellen eine Stufe am Übergang von der klinischen Krone zur Gingiva eingefräst. Dies bedingt kleine Ungenauigkeiten der zervikalen Bereiche. Gipsperlen auf den Modellen wurden vorsichtig weggesprengt, was ebenfalls zu kleinen Ungenauigkeiten führen konnte.

Die Genauigkeit des Scanvorganges mit anschließender Interpolation ist mit etwa 10-15 μm sehr hoch. Bei der Visualisierung der Datensätze zeigten sich durchwegs gute Scannergebnisse. Als schwierig erwies sich die Platzierung und Ausrichtung der Einzelstümpfe und des Kiefermodells, was bei der Handhabung etwas Übung nötig machte.

5.2 Diskussion der Ergebnisse

5.2.1 Oberflächenvergleich der Vestibularflächen oberer Frontzähne

Ähnlichkeitsvergleich zwischen symmetrisch gegenüberliegenden und beliebigen Zähnen gleicher Frontzahntypen

Die einzelnen Zahntypen innerhalb eines Kiefers weisen deutliche Gemeinsamkeiten auf. Man geht heute davon aus, dass unterschiedliche unabhängige molekulare Signale die Größe und Form eines Zahnes beeinflussen (Tucker und Sharpe 1999). Wenn diese Signalträger in der rechten, wie in der linken Körperhälfte auf die gleiche Art wirken, so müssten sich spiegelsymmetrische Zähne sehr ähnlich sein.

Bei vorliegender Untersuchung wurde zunächst insbesondere auf die vestibuläre Oberfläche oberer Frontzähne eingegangen. Nach Überlagerung wurden entsprechende Oberflächen anhand Quant_80_20_halbe (Z-Differenzwert, Kap.3.2) verglichen. Zwei symmetrisch gegenüberliegende obere Frontzähne haben eine sehr hohe Ähnlichkeit zueinander. Diese macht es beispielsweise problemlos möglich, bei einer Auswahl vestibulärer Bibliotheksoberflächen jeweils symmetrisch gegenüberliegende Zähne visuell zu selektieren. Diese Ähnlichkeit sollte nun ebenso metrisch erfassbar sein. Die durchschnittlichen Werte für Quant_80_20_halbe betragen 44 μm (mittlerer Frontzahn), 53 μm (lateralen Frontzahn) und 51 μm (Eckzahn). Dagegen sind die Ähnlichkeitswerte zwischen Zahntypen verschiedener Probanden etwa um den Faktor zwei höher. Die mittleren Werte für Quant_80_20_halbe ergaben hierfür 94 μm (mittlerer Frontzahn), 98 μm (lateralen Frontzahn) und 103 μm (Eckzahn). Dabei war es möglich, dass sehr ähnliche Vergleichspaare mit Werten um 30 μm auch zwischen verschiedenen Probanden auftraten und wiederum vereinzelt symmetrische Paare mit hohen Werten über 100 μm zu finden waren. Vergleicht man jeweils

die durchschnittlichen Werte für Quant_80_20_halbe beider Gruppen, so stellt man fest, dass symmetrisch gegenüberliegende vestibuläre Frontzahnoberflächen, bezüglich des Ähnlichkeitsmaßes Quant_80_20_halbe, zueinander signifikant ähnlicher sind als beliebige vestibuläre Frontzahnoberflächen verschiedener Probanden. Dies bestätigt Untersuchungen an Molaren, bei denen noch größere Unterschiede zwischen den beiden Gruppen auftraten (Litzenburger 2007).

Andere Studien ermittelten deutlich höhere Abweichungen beim Vergleich zweier symmetrisch gegenüberliegender Frontzähne. Dort wurden nicht nur vereinzelt, sondern innerhalb eines hohen Anteils der Probanden deutliche Unterschiede von über 200 µm bezüglich verschiedener Dimensionsparameter gefunden (Mavroskoufis und Ritchie 1980, Al Wazzan 1995). Diese Ergebnisse können dadurch erklärt werden, dass bei der Erhebung und dem Vergleich eindimensionaler Dimensionsparameter, u.a. durch die Schwierigkeit der Wahl der Referenzpunkte, es leicht zu Messfehlern kommen kann. Darüberhinaus lassen sich aus eindimensionalen metrischen Parametern nur sehr bedingt Aussagen über die Ähnlichkeiten komplexer Zahnoberflächen treffen.

Die in dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse sind jedoch immer vor dem Hintergrund der Güte des Ähnlichkeitsmaßes und dessen Übereinstimmung mit dem visuellen subjektiven Eindruck von Ähnlichkeit zu sehen.

Vergleich unterschiedlicher Frontzahntypen

Die bisherigen Untersuchungen dieser Studie richteten sich auf die Ähnlichkeiten von Zähnen innerhalb eines Zahntyps. Es scheint sinnvoll, auch Ähnlichkeiten zwischen verschiedenen Frontzahntypen zu untersuchen. Sind sich beispielsweise die mittleren Frontzähne eines Probanden sehr ähnlich, wie ähnlich sind dann die lateralen Frontzähne bzw. die Eckzähne jeweils zueinander? Ebenso kann folgende Frage gestellt werden: Betrachtet man die Ähnlichkeit

zwischen Zahn 22 des einen Probanden und Zahn 22 eines anderen Probanden und stellt eine hohe Ähnlichkeit fest, sind sich dann die beiden Zähne 11 dieser Probanden ebenfalls überdurchschnittlich ähnlich? Diese Überlegungen wurden anhand einer Korrelationsanalyse der entsprechenden Werte des Ähnlichkeitsmaßes Quant_80_20_halbe überprüft, wobei nur sehr schwache positive Korrelationen festgestellt werden konnten. Daher ist davon auszugehen, dass die Symmetrie nicht als übergeordnetes Prinzip festgelegt ist. Es lässt sich also nicht sagen, dass Menschen bezüglich der Ähnlichkeit der Frontzähne generell symmetrische oder asymmetrische Verhältnisse aufweisen.

Interessant ist, dass die Korrelation innerhalb eines Probanden höher ausgeprägt ist. Das geht mit der Auffassung, die Zahngröße und -form sei stark genetisch beeinflusst (Kabban 2001) konform. So wäre es denkbar, dass bei jedem Mensch ein genetischer Grundbauplan der Zahnmorphologie festgelegt ist. Wie bereits erwähnt geht man davon aus, dass verschiedene unabhängige molekulare Signale die Größe und Form eines Zahnes beeinflussen (Tucker und Sharpe 1999). Diese Signale könnten dafür verantwortlich sein, dass die eigentlich determinierte Morphologie recht unterschiedlich in den Phänotyp umgesetzt wird. Auch Umweltfaktoren oder Zufallsprozesse könnten dafür relevante Einflussfaktoren sein.

Vergleich verschiedener Ähnlichkeitsmaße

Für den Oberflächenvergleich der Vestibularflächen oberer Frontzähne wurden zuerst durch Rotation und Translation mittels Minimierungsalgorithmen zwei Zähne möglichst deckungsgleich übereinander gelegt. Nach erfolgter Superposition wurde jeder Punkt (x, y, z_1) der einen Kaufläche mit dem entsprechenden Punkt (x, y, z_2) der anderen Kaufläche verglichen. Aus der Differenz der jeweiligen z-Werte erfolgte u.a. die Berechnung des 10% Quantils, des 20% Quantils, des 80% Quantils und des 90% Quantils. Ein Vorteil

dieser Methode zur Ähnlichkeitsbestimmung ist, dass man völlig ohne eine Bestimmung von einzelnen Messpunkten auskommt. Dies kann sich aber durchaus als problematisch erweisen (Litzenburger 2007). Ein weiterer Vorteil ist, dass man mit diesem Verfahren in akzeptabler Zeit, viele Vergleiche (etwa 90.000) von Zahnoberflächen durchführen kann, die untersucherunabhängig immer zum gleichen Ergebnis führen. Bei Frontzähnen ist die Ansicht von vestibulär aus Gründen der Ästhetik vordergründig von Interesse. Dies führt jedoch gerade bei dem aus der vestibulären Ansicht erkennbaren Randbereich der Frontzähne zu vereinzelt hohen Abweichungen, die jedoch nicht als repräsentativ für die Ähnlichkeit zweier Frontzähne betrachtet werden können. Daher wurden die größten Abweichungen aus der Analyse herausgenommen und nur jene 60% der Werte betrachtet, welche die geringsten Distanzen aufweisen. Dies erfolgte mit Hilfe der Ermittlung der 20%- und 80%-Quantile. Als Maß für die Ähnlichkeit wurde somit als modifizierte Form der Standardabweichung die Hälfte der Differenz der 20%- und 80%-Quantile (bezeichnet als Z-Differenzwert oder gleichbedeutend als Quant_80_20_halbe) verwendet. Problem bei der Anwendung dieser Modifikation im Frontzahnbereich ist, dass gerade die Umrissform eines Frontzahnes, die nicht unwesentlich zum Gesamteindruck des Zahnes beiträgt, dadurch relativ schlecht repräsentiert wird. Nachteilig ist weiter, dass lediglich ein Durchschnittswert der Ähnlichkeit errechnet wird, der keine Auskunft darüber gibt, welcher Teil des Zahnes relativ konstant bzw. variabel ist.

Visuelle Beurteilung von Ähnlichkeiten zwischen Frontzähnen

Die auf Ähnlichkeitsurteilen basierende räumliche Konfiguration der MDS soll das Abbild der Anordnung der Zähne, hinsichtlich ihrer Ähnlichkeit zueinander, in der Vorstellung der Versuchspersonen repräsentieren. Dabei wird das INDSCAL-Verfahren genutzt, das für jede bewertende Person eine eigene Konfiguration erstellt, da davon auszugehen ist, dass die Zahnärzte zwar

ähnliche, aber nicht identische Wahrnehmungsräume bezüglich der Zahnmorphologie und Ähnlichkeitsbeurteilung besitzen. Man geht davon aus, dass die Zahnärzte die Konfiguration aufspannenden Dimensionen verschieden stark gewichten, und somit auf unterschiedliche Merkmale der Zahnform Wert legen. Auf den individuellen Konfigurationen basierend, entsteht durch Streckung und Stauchung entlang der Dimensionen eine zusammengefasste Konfiguration. Diese „gemeinsame Konfiguration“ besteht aus zwei Dimensionen. In dieser Studie lässt die resultierende zweidimensionale Konfiguration eine Zusammenfassung der Zähne in drei Gruppen zu.

Sieht man sich die Morphologie der jeweiligen Gruppen an, so erkennt man deutlich, dass die Zähne 2,8 und 9 sehr schmal und die Zähne 1,4 und 10 dagegen viel breiter wirken. Objektives Merkmal für diese Erscheinung ist das Längen-Breiten-Verhältnis (w/l -Ratio). Die dritte Gruppe, bestehend aus Zahn 3,5,6 und 7 befindet sich diesbezüglich zwischen den anderen beiden Gruppen. Für diese Unterteilung könnte Dimension 1 verantwortlich sein, da man gut erkennt, dass die Gruppen mit hoher und niedriger w/l -Ratio an den äußeren Rändern dieser Dimension liegen und sich die Gruppe mit mittlerer w/l -Ratio dazwischen befindet. Die Beurteilung von Dimension 2 fällt dagegen schwer. Hier ist es die Gruppe mit den Zähnen 2,8,9 die in der Mitte liegt. Die anderen beiden Gruppen müssten sich also in einem gewissen Merkmal relativ stark voneinander unterscheiden. Betrachtet man die bezüglich Dimension 2 eine Mittelstellung einnehmende Gruppe, erkennt man, dass sich diese folgendermaßen aufteilt: Zahn 9 steht der Gruppe mit den Zähnen 1,4,10 nahe und Zahn 2 der Gruppe mit den Zähnen 3,5,6,7. Als mögliche ausschlaggebende Merkmale ließen sich die mesiodistale oder inziszervikale Krümmung, die Rundung der distalen Ecke, das Vorhandensein von Strukturbausteinen, wie Längsrillen oder Erhabenheiten, die Form der Inzisalkante, das Winkelmerkmal oder deren Kombinationen diskutieren.

Letztlich ist es nicht gelungen Dimension 2 befriedigend zu interpretieren. Das Ergebnis ist vor dem Hintergrund des Vorliegens von schlechten Gütewerten für die MDS zu sehen, was einer schlechten Anpassung der Konfiguration an die erhobenen Ähnlichkeitsurteile gleichkommt. Da es sich um eine explorative Analyse handelt, sind diese Werte jedoch akzeptabel. Als Ursache der mäßigen Anpassung käme zum einen in Betracht, dass in Wirklichkeit mehrere Dimensionen in die Beurteilung einfließen und die erstellte zweidimensionale Konfiguration ein nicht ausreichendes Abbild der tatsächlichen Wahrnehmungsräume der Personen liefert. Ein weiterer Grund könnte in der individuellen Unterschiedlichkeit der Wahrnehmungsräume der einzelnen Zahnärzte bezüglich der Zahnmorphologie liegen, was auf unterschiedlichen Dimensions-Gewichtungen beruhen mag. Hier fällt auf, dass die meisten Bewertenden die Dimension 1 am stärksten gewichten. Zahnarzt 3 hat beispielsweise den höchsten Weirness-Index und weicht damit am stärksten von der durchschnittlichen Dimensions-Gewichtung ab. Ebenfalls muss die Möglichkeit berücksichtigt werden, dass die Beobachter letztlich nur eine Dimension beurteilen.

Zusammengefasst bedeutet dies, dass Zahnärzte einzelne morphologische Merkmale unterschiedlich stark gewichten, wobei das Längen-Breiten-Verhältnis eine übergeordnete Rolle spielt.

Die Konfiguration der beschriebenen visuellen Ähnlichkeitsvergleiche und die Konfiguration der metrisch ermittelten Werte für Quant_80_20_halbe sind sich einigermaßen ähnlich. Die Gütewerte der metrischen Konfiguration liegen im akzeptablen Bereich. Aufgrund des Unterschiedes der beiden Konfigurationen und der eher schwachen Korrelation zwischen den metrisch (anhand Quant_80_20_halbe) und den visuell ermittelten Ähnlichkeiten ist davon auszugehen, dass das Maß Quant_80_20_halbe mäßig geeignet ist, die menschliche Wahrnehmung der Ähnlichkeit von Zahnoberflächen zu beschreiben.

Bei der Multidimensionalen Entfaltung (MDU) fällt zuerst auf, dass die Beobachter relativ nahe beieinander liegen und die Gütemaße der MDU als sehr gut betrachtet werden können. Dies steht im Widerspruch zu dem Ergebnis der MDS und gibt einen Hinweis darauf, dass die Zahnärzte in der Beurteilung auf ein Merkmal fokussieren könnten, welches wahrscheinlich der w/l-Ratio entspricht. Dem Idealpunktmodell der MDU zufolge befinden sich die Beobachter dort, wo sie den Referenzzahn im Wahrnehmungsraum ansiedeln. Man kann gut erkennen, dass der Zahn, den alle Versuchspersonen dem Referenzzahn am nächsten sehen, in der Mitte derselbigen liegt, was wiederum für die gute Anpassung der Konfiguration an den Wahrnehmungsraum der Beobachter spricht. Auch die MDU deutet auf eine nur mäßige Übereinstimmung des metrischen Ähnlichkeitsmaßes mit der visuellen Wahrnehmung hin, da die entsprechende Positionierung des Maßes etwas außerhalb des Kreises der Beobachter liegt.

5.2.2 3D-Untersuchungen zur Spiegelsymmetrie

Ziel dieses Abschnittes war es zu evaluieren, wie gut ein oberer Frontzahn seinen kontralateralen Zahn ersetzen kann. Um dies umfassend einschätzen zu können war es nicht mehr ausreichend, nur die vestibulären Anteile der Frontzähne zu analysieren. So wurde ein Verfahren gewählt, bei dem die Standardabweichung (stddev) über den geringsten Abstand gewonnen wurde, indem jeweils einem Punkt der einen Zahnoberfläche der jeweils nächstliegende Punkt der anderen Zahnoberfläche zugeordnet wurde. Vorteil ist, dass bei diesem Vergleich alle Zahnflächen gleichmäßig repräsentiert werden und bezüglich der Ähnlichkeit keine unverhältnismäßigen Abweichungen an Randbereichen auftreten. Partielle Bereiche mit sehr hoher oder niedriger Variabilität können klar ersichtlich dargestellt werden. Diese Art von Oberflächenvergleich ist zum jetzigen Zeitpunkt allerdings noch sehr zeitaufwendig, was sich in der geringen Zahl der durchgeführten Vergleiche widerspiegelt. Die Werte, die aus

dem Vergleich der kompletten Oberfläche mittels nächstliegender Punkte durchgeführt wurden, sind etwa um den Faktor zwei größer als die Ergebnisse der Z-Differenzwerte bei vestibulären Zahnflächen. Dies resultiert aus der unterschiedlichen Methode und der größeren gemessenen Fläche.

Es fällt auf, dass die mittleren Frontzähne sowohl den geringsten Mittelwert, als auch die kleinste Varianz aufweisen. Dagegen zeigt sich bei den lateralen Schneidezähnen die größte Variabilität, was der allgemeinen Vorstellung entspricht. Bei allen Zahntypen ist die Varianz des Ähnlichkeitsmaßes relativ niedrig.

Neben dem reinen Formvergleich war es interessant zu sehen, ob der gespiegelte, rotierte und translatierte Zahn seinen korrespondierenden Zahn befriedigend ersetzen könnte. Dies erfolgte automatisch per Software und erforderte zum Teil geringes Nachjustieren. Gemessen wurden die approximale Situation und das Verhältnis zum Antagonisten vor und nach spiegelsymmetrischem Ersatz. Auffällig ist, dass die durchschnittlichen Differenzen relativ klein, die jeweiligen Varianzen jedoch hoch sind. Dies bedeutet, dass sich die Differenzen insgesamt ausgleichen, jedoch im Einzelfall durchaus hohe Abweichungen vorhanden sind. Insgesamt ist das Ergebnis aber durchaus zufriedenstellend. In den allermeisten Fällen wich der ersetzende Zahn in keiner Dimension mehr als 0,25 mm von der Originalsituation ab. Mesiale und distale Missverhältnisse glichen sich zudem oft aus.

Weiter war es wichtig zu wissen, ob die neu zusammengestellten Frontzahnansichten auch von Experten als zufriedenstellend harmonisch beurteilt würden. Wie man weiß, ist die Symmetrie ein wichtiger Einflussfaktor dentaler Ästhetik (Brunzel et al. 2006, Kokich et al. 2006). Trotzdem erstaunt das Ergebnis des visuellen Vergleiches von Originalsituation und Spiegelsituation. Denn dass die gespiegelten Ansichten überwiegend als harmonischer empfunden wurden als

ihre jeweiligen natürlichen Ausgangssituationen, ist nicht selbstverständlich. Dies kann als weiterer Beleg für den Stellenwert der Symmetrie im ästhetischen Empfinden von dentalen Parametern gedeutet werden.

5.3 Ausblick

Es sind eine Reihe von mathematischen Methoden zum Ähnlichkeitsvergleich von Oberflächen beschrieben worden. Im ersten Teil der vorliegenden Untersuchung erfolgte eine zweieinhalbdimensionale Analyse der Abstände nach Überlagerung von Vestibularansichten mittels Quant_80_20_halbe (Z-Differenzwert). Wie bereits dargestellt, ist dieses Verfahren Limitationen unterworfen. Von dem im zweiten Teil durchgeführten dreidimensionalen Vergleich kompletter Frontzahnoberflächen, bei dem als Ähnlichkeitsmaß die Standardabweichung über den geringsten Abstand gewonnen wurde, ist anzunehmen, dass dieser besser für einen Ähnlichkeitsvergleich geeignet ist, da alle Oberflächen eines Zahnes gleichmäßig repräsentiert werden. Anhand der hier eingesetzten Instrumente der Korrelationsanalyse und der multivariaten Verfahren bleibt zu prüfen, ob es beim Vergleichsverfahren über den geringsten Abstand auch zu einer besseren Übereinstimmung zwischen visuellem Eindruck und Ähnlichkeitsmaß kommt. Desweiteren sollte eine Methode entwickelt werden, mit der eine hohe Fallzahl an Ähnlichkeitsvergleichen praktikabel durchzuführen ist. Vielversprechend mutet die Möglichkeit des Ähnlichkeitsvergleichs basierend auf dem Prinzip der Hausdorff-Distanz an, das schon erfolgreich beim Vergleich von Gesichtsoberflächen eingesetzt wurde (Lindemann et al. 2004, Pujol et al. 2002).

Die durchgeführte multidimensionale Skalierung zur Erfassung des Wahrnehmungsraumes von Zahnärzten bezüglich der Zahnmorphologie erfolgte erstmalig und rein explorativ. Sicher wäre es wünschenswert gewesen, nicht nur das Längen-Breiten-Verhältnis, als wichtiges morphometrisches Merkmal

identifizieren zu können. Hier sind weitere, exakter formulierte Erhebungen des visuellen Eindrucks von Zahnoberflächen nötig. Das heißt beispielsweise, dass gewisse relevante Merkmale der zu beurteilenden Zähne bewusst ausgewählt und in unterschiedlicher Form zur Beurteilung vorgelegt werden. Desweiteren kann eine Erhöhung der Anzahl der Experten sinnvoll sein.

Aufmerksamkeit sollte auch den möglichen Abhängigkeiten zwischen morphometrischen Parametern der Zähne und des Gesichtes geschenkt werden. Die Untersuchungen die hierzu gemacht wurden, kommen bis auf wenige Ausnahmen (Lindemann et al. 2004) nicht über einfache Längenmessungen hinaus. Etablierte Gesichtscanverfahren können zu diesem Zweck genutzt und weiterentwickelt werden.

Der spiegelsymmetrische Ersatz von Frontzähnen wurde objektiv-metrisch und subjektiv-visuell evaluiert und scheint geeignet, um bei vollautomatischen Rekonstruktionsmaßnahmen zum Tragen zu kommen. Limitationen bestehen jedoch besonders im Hinblick auf funktionelle Gesichtspunkte. Durch die Anwendung des Biogenerischen Zahnmodell (Mehl 2003) ist es vorstellbar diese Limitationen zu eliminieren, was in einer erheblichen Qualitätssteigerung von automatischen Herstellungsverfahren resultieren könnte.

5.4 Schlussfolgerungen

1. Die Mittelwerte der Abstände nach Überlagerung der Vestibularflächen symmetrisch gegenüberliegender Frontzähne betragen zwischen 44 μm und 53 μm (bezüglich dem Ähnlichkeitsmaß Quant_80_20_halbe).
2. Die Mittelwerte der Abstände nach Überlagerung der Vestibularflächen von Frontzähnen des gleichen Typs bei verschiedenen Probanden betragen zwischen 94 μm und 103 μm (bezüglich dem Ähnlichkeitsmaß Quant_80_20_halbe).
3. Die Ähnlichkeit von symmetrischen Zähnen eines Zahntyps ist signifikant höher als die Ähnlichkeit von Frontzähnen verschiedener Probanden bezüglich des Ähnlichkeitsmaßes Quant_80_20_halbe.
4. Aus der Ähnlichkeit eines Vergleichspaares mittlerer Frontzähne kann nicht auf die Ähnlichkeit des entsprechenden Vergleichspaares lateraler Frontzähne geschlossen werden.
5. Es konnte kein Unterschied der Ähnlichkeitsmaße Quant_80_20_halbe und Quant_90_10_halbe festgestellt werden.
6. Bei der der Ähnlichkeitsbeurteilung der Morphologie von Frontzähnen gewichten Zahnärzte einzelne Merkmale des Erscheinungsbildes unterschiedlich
7. Das Längen-Breiten-Verhältnis spielt eine wichtige Rolle bei der Charakterisierung von Frontzahnformen.

-
8. Das Ähnlichkeitsmaß Quant_80_20_halbe ist mäßig geeignet, die menschliche Wahrnehmung der Ähnlichkeit von Zahnoberflächen zu beschreiben.
 9. Ein dreidimensionaler Vergleich der gesamten Oberfläche von spiegelsymmetrisch gegenüberliegenden Frontzähnen zeigt Mittelwerte der Standardabweichungen von 85 μm bis 111 μm .
 10. Der spiegelsymmetrische Ersatz von Frontzähnen ist hinsichtlich approximalen, okklusalen und ästhetischen Gesichtspunkten zufriedenstellend.
 11. Gespiegelte Frontzahnansichten werden in der Regel ästhetischer empfunden als die entsprechenden Originalsituationen.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Bisher waren Längenmessungen und deskriptive Charakterisierungen die einzigen Anhaltspunkte zur Beschreibung der Oberflächenmorphologie von Frontzähnen. Für die Erstellung eines Datensatzes bei computergestützten Verfahren in der Zahnmedizin ist dies nicht mehr ausreichend. In der Literatur existieren bisher keine Ansätze zur Morphometrie der Oberflächen oberer Frontzähne, die für automatische Rekonstruktionsverfahren verwertbar wären.

Für diese Arbeit wurde in einem ersten Schritt eine Zahnbibliothek aus natürlichen, unversehrten Frontzahnoberflächen aufgebaut. Mit Hilfe dieser Zahndatenbank konnten verschiedene dreidimensionale morphometrische Untersuchungen durchgeführt werden, bei denen Analysen zur Spiegelsymmetrie eine wichtige Rolle einnahmen. Zudem wurden die gewonnenen metrischen Ergebnisse mit dem visuellen Eindruck von Experten verglichen. Diese Beobachterdaten wurden außerdem zur explorativen Detektion jener morphologischen Merkmale genutzt, die maßgeblich die subjektive menschliche Wahrnehmung beeinflussen.

Der Ähnlichkeitsvergleich von Vestibularflächen symmetrisch gegenüberliegender Frontzähne mit Frontzähnen des gleichen Typs verschiedener Probanden zeigt metrisch, dass sich die symmetrischen Zähne signifikant ähnlicher sind. Die Durchschnittswerte für die mittlere Abweichung nach Überlagerung der Vestibularflächen (Quant_80_20_halbe) betragen bei symmetrischen Zähnen zwischen 44 μm und 53 μm , bei Zähnen unterschiedlicher Probanden sind die Werte um den Faktor zwei höher. Dies wurde erstmalig durch einen mathematischen Oberflächenvergleich quantifiziert.

Konnte eine hohe Ähnlichkeit zwischen symmetrisch gegenüberliegenden Zähnen bzw. zwischen Zähnen des gleichen Zahntyps zweier Probanden festgestellt werden, waren sich die anderen symmetrisch gegenüberliegenden Frontzahntypen innerhalb dieses Probanden bzw. die anderen Frontzahntypen von zwei unterschiedlichen Probanden nicht ebenfalls deutlich ähnlicher.

Die benutzten statistischen Verfahren (u.a. Multidimensionale Skalierung, Multidimensionale Entfaltung) weisen auf eine mäßige Übereinstimmung der metrisch ermittelten Ähnlichkeiten mit der visuellen Wahrnehmung von Zahnärzten hin. Dies könnte aus der unzulänglichen Erfassung relevanter morphologischer Strukturen durch das verwendete Ähnlichkeitsmaß resultieren. Den Ergebnissen multivariater Analysen zufolge hatten die beurteilenden Zahnärzte eine vergleichbare Vorstellung der Zahnmorphologie wobei sie einzelne Merkmale der Zahnstruktur scheinbar verschieden gewichteten. Ein übergeordneter Parameter der visuellen Bewertung ist das Längen-Breiten-Verhältnis, über die anderen Merkmale kann bisher nur spekuliert werden.

In einer dreidimensionalen Versuchsanordnung wurde simuliert, inwieweit es möglich ist, dass ein achsensymmetrisch gespiegelter Zahn seinen kontralateralen Zahn ersetzen kann. Dieser Ansatz wurde unter approximalen, okklusalen und ästhetischen Gesichtspunkten evaluiert. Es zeigte sich eine zufriedenstellende metrische Passung hinsichtlich der approximalen und okklusalen Verhältnisse. Bemerkenswert war die bessere visuelle Akzeptanz der modifizierten Frontzahnansichten im Vergleich zu den jeweiligen Originalansichten. Insgesamt erscheint der spiegelsymmetrische Ersatz als ein brauchbares Basiskonzept für vollautomatische Rekonstruktionsmaßnahmen im oberen Frontzahnbereich.

7 LITERATURVERZEICHNIS

Abdullah MA: Inner canthal distance and geometric progression as a predictor of maxillary central incisor width. *J Prosthet Dent* 88(1), 16-20 (2002)

Adeyemi TA, Isiekwe MC: Mesio-distal crown dimensions of permanent teeth in a Nigerian population. *Afr J Med Sci* 32(1), 23-5 (2003)

Al-el-Sheikh HM: The relationship of interalar width, interpupillary width and maxillary anterior teeth width in Saudi population. *Odontostomatol Trop* 21(84), 7-10 (1998)

Al Wazzan KA: Variation in mesiodistal crown width and amount of tooth exposure between right and left maxillary anterior teeth. *Egypt Dent J* 41, 1283-6 (1995)

Al Wazzan KA: The relationship between intercanthal dimension and the width of maxillary anterior teeth. *J Prosthet Dent* 86(6), 608-12 (2001)

Al Yami EA, Kuijpers-Jagtman AM, Van 't Hof MA: Assessment of dental and facial aesthetic in adolescents. *Eur J Orthod* 20, 399-405 (1998)

Ali Fayyad M, Jamani KD, Agrabawi J: Geometric and mathematical proportions and their relations to maxillary anterior teeth. *J Contemp Dent Pract* 7(5), 62-70 (2006)

Alt KW, Türp JC: Die Evolution der Zähne. Phylogenie - Ontogenie - Variation. Quintessenz Verlag, Berlin (1996)

Alt KW: Odontologische Verwandtschaftsanalyse. Gustav Fischer Verlag, Jena (1997)

Andrews LF: The six keys to normal occlusion. Am J Orthod 62, 296-309 (1972)

Arnett GW, Bergman RT: Facial keys to orthodontic diagnosis and treatment planning. Part I. Am J Orthod Dentofacial Orthop 103(4), 299-312 (1993)

Ash MM: Wheelers dental anatomy, physiology and occlusion. 7. ed. Saunders, Philadelphia (2003)

Backhaus K, Erichson B, Plinke W, Weiber R: Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. Springer, Berlin (1996)

Bauer A, Gutowski A: Gnathologie. Einführung in Theorie und Praxis. Buch- und Zeitschriftenverlag „Die Quintessenz“, Berlin (1984)

Belser UC: Esthetics checklist for the fixed prosthesis - Part II: Biscuit-bake try-in. In: Schärer P, Rinn LA, Kopp FR, editors. Esthetic guidelines for restorative dentistry. Quintessence, Chicago 188-92 (1982)

Berg R: Orthodontic treatment--yes or no? A difficult decision in some cases. A contribution to the discussion. J Orofac Orthop 62(6), 410-21 (2001)

Berksun S, Hasanreisoglu U, Gokdeniz B: Computer-based evaluation of gender identification and morphologic classification of tooth face and arch forms. J Prosthet Dent 88(6), 578-84 (2002)

Bindl A, Mörmann WH: Marginal and internal fit of all-ceramic CAD/CAM crown-copings on chamfer preparations. J Oral Rehabil 32(6), 441-7 (2005)

Björk A: The face in profile. *Swed Dent J* 5, 40-4 (1947)

Black GV: A work on special dental pathology. Medico-Dental Publ Co., Chicago (1915)

Bolton WA: The clinical application of a tooth-size analysis. *Am J Orthod* 48, 504-29 (1962)

Borg I, Groenen P: Modern Multidimensional Scaling: Theory and Applications. Springer, New York (2005)

Brisman AS: Esthetics: A comparison of dentists' and patients' concepts. *J Am Dent Assoc* 100, 345-52 (1980)

Brunzel S, Kern M, Freitag S, et al.: Aesthetic effect of minor changes in incisor angulation: an internet evaluation. *J Oral Rehabil* 33(6), 430-5 (2006)

Burchett PJ, Christensen LC: Estimating age and sex by using color, form, and alignment of anterior teeth. *J Prosthet Dent* 59(2), 175-9 (1988)

Carlsen O: Dental Morphology. Munksgaard, Copenhagen (1987)

Carlsson GE, Wagner IV, Ödman P, et al.: An international comparative multicenter study of assessment of dental appearance using computer-aided image manipulation. *Int J Prosthodont* 18, 246-54 (1998)

de Castro MV, Santos NC, Ricardo LH: Assessment of the "golden proportion" in agreeable smiles. *Quintessence Int* 37(8), 597-604 (2006)

Celenza FV: Okklusale Morphologie: Quintessenz Verlags-GmbH, Berlin (1981)

Cellerino A: Psychobiology of facial attractiveness. *J Endocrinol Invest* 26, 45-8 (2003)

Chang M, Wennstrom JL, Odman P, et al.: Implant supported single-tooth replacements compared to contralateral natural teeth. Crown and soft tissue dimensions. *Clin Oral Implants Res* 10(3), 185-94 (1999)

Chiche GJ, Pinault A: *Esthetics of Anterior Fixed Prosthodontics*. Quintessence, Chicago (1994)

Choe KS, Sclafani AP, Litner JA, et al.: The Korean American woman's face: anthropometric measurements and quantitative analysis of facial aesthetics. *Arch Facial Plast Surg* 6, 244-52 (2004)

Coxeter HSM: The golden section and phyllotaxis. *Scripta Mathematica* 19, 135 (1953)

Edler RJ: Background considerations to facial aesthetics. *J Orthod* 28, 159-68 (2001)

Farkas LG: Accuracy of anthropometric measurements: past, present and future. *Cleft Palate Craniofac J* 33, 10-8 (1996)

Faure JC, Rieffe C, Maltha JC: The influence of different facial components on facial aesthetics. *Eur J Orthod* 24, 1-7 (2002)

Fleischer-Peters A, Stürmer W: Zur Frage der Schneidezahnbreiten bei Progenie. *Fortschr Kieferorthop* 33, 169-75 (1972)

Fradeani M: *Ästhetische Sanierungen mit festsitzender Prothetik. Band 1: Ästhetische Analyse*. Quintessenz, Berlin (2005)

Frush JP, Fisher RD: How dentogenetic restorations interpret the sex factor. *J Prosthet Dent* 6, 160 (1955)

Garn SM, Lewis AB, Kerewsky RS: Sex differences in tooth size. *J Dent Res* 43, 306 (1964)

Garn SM, Lewis AB, Kerewsky RS: The meaning of bilateral asymmetry in the permanent dentition. *Angle Orthod* 36, 55-62 (1966)

Garn SM, Lewis AB, Swindler DR, Kerewsky RS: Genetic control of sexual dimorphism in teeth size. *J Dent Res* 46, 963 (1967)

Garn SM, Lewis AB, Walenga A: Maximum-confidence values for the human mesiodistal crown dimensions of human teeth. *Arch Oral Biol* 13, 841-4 (1968)

Gerber A: Proportionen und Stellung der Frontzähne im natürlichen und künstlichen Zahnbogen; Proportions and position of the anterior teeth in the natural and artificial dentition. *Die Quintessenz* 16 (1), 33-42 (1965)

Gillen RJ, Schwartz RS, Hilton TJ, et al.: An analysis of selected normative tooth proportions. *Int J Prosthodont* 7(5), 410-7 (1994)

Gomes VL, Goncalves LC, do Prado CJ, et al.: Correlation between facial measurements and the mesiodistal width of the maxillary anterior teeth [In Process Citation]. *J Esthet Restor Dent* 18(4), 196-205 (2006)

Graf E, Koch M, Haffner T, Hoffmann K: Welche Relationen bestehen zwischen Breitensummen unterer und oberer Schneidezähne. *Stomatol DDR* 37, 413-6 (1987)

Gysi A: Das Aufstellen der Zähne für Vollprothesen. Verlag Schweizer Zahntechniker-Vereinigung, Zürich (1948)

Hamerle A, Pape, H: Grundlagen der mehrdimensionalen Skalierung, in: Fahrmeier L, Hamerle A: Multivariate statistische Verfahren. de Gruyter, Berlin (1984)

Haralabakis NB, Sifakakis I, Papagrigorakis M, et al.: The correlation of sexual dimorphism in tooth size and arch form. *World J Orthod* 7(3), 254-60 (2006)

Harris EF, Burris BG: Contemporary permanent tooth dimensions, with comparisons to G. V. Black's Data. *J Tenn Dent Assoc* 83(4), 25-9 (2003)

Hasanreisoglu U, Berksun S, Aras K, et al.: An analysis of maxillary anterior teeth: facial and dental proportions. *J Prosthet Dent* 94(6), 530-8 (2005)

Hoffman W: Interalar width as a guide in denture tooth selection. *J Prosthet Dent* 55(2), 219-21 (1986)

Hönn M, Göz G: The Ideal of Facial Beauty: A Review. *J Orofac Orthop* 68, 6-16 (2007)

Hörauf K: Form und Stellung der Frontzähne in ihrer Beziehung zu Körperbautypen. Hanser, München (1958)

Horn R: Zur Brauchbarkeit der Dreiformenthese nach Williams. *Zahnärztl Praxis* 36, 220 (1985)

Horn R: Auswahl und Aufstellung der künstlichen Zahnreihe. *Praxis der Zahnheilkunde*, Bd. 7 Totalprothesen. 3. Aufl. Urban & Schwarzenberg, München (1991)

Hupfauf L, Nolden R: Ästhetik in der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde. PdZ spezial. Urban & Schwarzenberg, München (1995)

Ibrahimagic L, Jerolimov V, Celebic A, Carek V, Baucic I, Zlataric DK: Relationship between the face and the tooth form. Coll Antropol 25 (2), 619-26 (2001)

Jefferson Y: Skeletal types: key to unravelling the mystery of facial beauty and its biologic significance. J Gen Orthod 7, 7-25 (1996)

Johnston VS: Is beauty in the eye of the beholder? Ethol Sociobiol 14, 183-99 (1993)

Jordan R, Abrams L, Kraus B: Kraus' Dental Anatomy and Occlusion. 2nd ed. Mosby Year Book, St. Louis (1992)

Kabban M, Fearne J, Jovanovski V, Zou L: Tooth size and morphology in twins. Int J Paediatr Dent 11(5), 333-9 (2001)

Keng SB: Nasal width dimensions and anterior teeth in prosthodontics. Ann Acad Med Singapore 15(3), 311-4 (1986)

Kerosuo H, Hausen H, Laine T, et al.: The influence of incisal malocclusion on the social attractiveness of young adults in Finland. Eur J Orthod 17(6), 505-12 (1995)

Kieser JA: Human adult odontometrics. Cambridge Univ. Press, Cambridge (1990)

Koeck B: Rekonstruktive Maßnahmen. In: Hupfauf L, Hrsg. Die Praxis der Zahnheilkunde. Band 5. Urban und Schwarzenberg, München (1989)

Koeck B, Besford J: Praxis der Zahnheilkunde. Band 7. Elsevier, Urban & Fischer, München (2005)

Kois JC: The restorative-periodontal interface: Biological parameters. *Periodontol* 2000 11, 29-38 (1996)

Kokich V: Esthetics and anterior tooth position: an orthodontic perspective. Part II: Vertical position. *J Esthet Dent* 5(4), 174-8 (1993)

Kokich VO, Kokich VG, Kiyak HA: Perceptions of dental professionals and laypersons to altered dental esthetics: asymmetric and symmetric situations. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 130(2), 141-51 (2006)

Kondo S, Funatsu T, Wakatsuki E, Shun-Te H: Sexual dimorphism in the Tooth Crown Dimensions of the second deciduous and first permanent molars of Taiwan Chinese. *Okajimas Folia Anat Jpn* 75(5), 239-46 (1998)

Körber K: Zahnärztliche Prothetik. Thieme Verlag, Stuttgart (1995)

Krajicek DD: Natural appearance for the individual denture patient. *J Prosthet Dent* 10, 105-14 (1960)

Landes CA, Bitsakis J, Diehl T, et al.: Introduction of a three-dimensional anthropometry of the viscerocranium. Part I: measurement of craniofacial development and establishment of standard values and growth functions. *J Craniomaxillofac Surg* 20, 18-24 (2002)

Langlois JH, Roggman LA, Casey RJ, et al.: Infant preferences for attractive faces: Rudiments of stereotype? *Dev Psychol* 23, 363-9 (1987)

Lavelle CLB: The relationship between stature, skull, dental arch and tooth dimensions in different racial groups. *Orthodontist* 3, 7-11 (1971)

Le Huche R: Füllungen, Inlays-Onlays und Kronen als Funktion der Form des Zahnes. *Die Quintessenz*, Berlin (1971)

Lee J: *Dental aesthetics*. Wright, Bristol, 1962.

Lehmann KM, Hellwig E: *Zahnärztliche Propädeutik*. Urban & Fischer, München (2005)

Levin EI: Dental esthetics and the golden proportion. *J Prosthet Dent* 40(3), 244-52 (1978)

Lindemann HB, Knauer C, Pfeiffer P: Morphometric relationships between tooth and face shapes. *J Oral Rehabil* 31(10), 972-8 (2004)

Litzenburger A: *Parametrisierung unbekannter Zahnoberflächen mittels des biogenerischen Zahnmodells*. Dissertationsschrift (2007)

Lombardi RE: The principles of visual perception and their clinical application to denture esthetics. *J Prosthet Dent* 29, 358-82 (1973)

Lotzmann U: *Die Prinzipien der Okklusion*. Verlag Neuer Merkur GmbH, München (1998)

Lund H, Mornstad H: Gender determination by odontometrics in a Swedish population. *J Forensic Odontostomatol* 17(2), 30-4 (1999)

Mack MR: Perspective of facial esthetics in dental treatment planning. *J Prosthet Dent* 75, 169-76 (1996)

Magne P, Gallucci GO, Belser U: Anatomic crown width/length ratios of unworn and worn maxillary teeth in white subjects. *J Prosthet Dent* 89, 453-61 (2003)

Magne P, Belser U: Adhäsiv befestigte Keramikrestorationen. Quintessenz Verlag, Berlin (2004)

Mahshid M, Khoshvaghti A, Varshosaz M, et al.: Evaluation of "golden proportion" in individuals with an esthetic smile. *J Esthet Restor Dent* 16(3), 185-92 (2004)

Mavroskoufis F, Ritchie GM: Variation in size and form between left and right maxillary central incisor teeth. *J Prosthet Dent* 43(3), 254-7 (1980)

McCorckle AD, Mourino A, McIver JE, Minton P: Incisor width ratio. *Angle Orthod* 53, 19-24 (1983)

Mehl A, Gloger W, Kunzelmann KH, Hickel R: Entwicklung eines neuen optischen Oberflächenmessgerätes zur präzisen dreidimensionalen Zahnvermessung. *Dtsch Zahnärztl Z* 51, 23-7 (1996)

Mehl A, Gloger W, Hickel R: Erzeugung von CAD-Datensätzen für Inlays und Kronen mit funktionellen Kauflächen. *Dtsch Zahnärztl Z* 52, 520-4 (1997)

Mehl A, Gloger W, Kunzelmann KH, Hickel R: A new optical 3D device for the detection of wear. *J Dent Res* 76, 1799-807 (1997)

Mehl A: 3D-Datenerfassung und CAD/CAM-Technologie in der restaurativen Zahnmedizin – Entwicklung, Einsatz und Perspektiven eines neuen Verfahrens. Habilitationsschrift (1998)

Mehl A: Der „Biogenerische Zahn“. Ein neuartiges Verfahren zur hochpräzisen biologisch funktionellen Gestaltung von Zahnrestorationen. Dissertationsschrift (2003)

Mehl A, Blanz V: Neues Verfahren zur vollautomatischen Kauflächenrekonstruktion mittels biogenerischem Zahnmodell. *Int J Comput Dent* 8, 13-25 (2005)

Miller EL, Bodden WR, Jamison HC: A study of the relationship of the dental midline to the facial median line. *J Prosthet Dent* 41(6), 657-60 (1979)

Modrach A: zitiert bei Tanzer. *Zahnärztl Welt* 59, 7 (1958)

Moorrees CFA, Reed RB: Correlations among crown diameters of human teeth. *Arch Oral Biol* 9, 685-97 (1954)

Moorrees CFA, Thomsen SO, Jensen E, Yen PKJ: Mesiodistal crown diameters of deciduous and permanent teeth. *J Dent Res* 36, 39-47 (1957)

Morley J, Eubank J: Macroesthetic elements of smile design. *J Am Dent Assoc* 132 (1), 39-45 (2001)

Motsch A: Funktionsorientierte Einschleiftechnik für das natürliche Gebiß. 2. Auflage, Hanser Verlag, München, Wien (1978)

Mueser KT, Grau BW, Sussman S, et al.: You are only as pretty as you feel: facial expression as a determinant of physical attractiveness. *J Pers Soc Psychol* 46, 469-78 (1984)

Mühlreiter E: Über Maximal- und Minimalgrößen der Zähne. *Deutsche Vierteljahresschrift für Zahnheilkunde* 14(2) (1874)

Mühlreiter E: Anatomie des menschlichen Gebisses. Felix, Leipzig (1912)

Olsson M, Lindhe J, Marinello CP: On the relationship between crown form and clinical features of the gingiva in adolescents. *J Clin Periodontol* 20(8), 570-7 (1993)

Owens EG, Goodacre CJ, Loh PL, et al.: A multicenter interracial study of facial appearance. Part 1: A comparison of extraoral parameters. *Int J Prosthodont* 15(3), 273-82 (2002)

Padwa BL, Kaiser MO, Kaban LB: Occlusal cant in the frontal plane as a reflection of facial asymmetry. *J Oral Maxillofac Surg* 55(8), 811-6 (1997)

Parreidt J: Die Breite der oberen zentralen Schneidezähne beim männlichen und weiblichen Geschlecht. *Deutsche Monatsschrift für Zahnheilkunde* 2(5) (1884)

Perrett DI, May KA, Yoshikawa S: Facial shape and judgements of female attractiveness. *Nature* 368, 239-42 (1994)

Perzigian AJ: Allometric analysis of dental variation in a human population. *Am J Phys Anthropol* 54(3), 341-5 (1981)

Pogrel MA: What are normal esthetic values? *J Oral Maxillofac Surg* 49, 963-9 (1991)

Porter JP: The average African American male face: an anthropometric analysis. *Arch Facial Plast Surg* 6, 78-81 (2004)

Preston J: Comprehension and reproduction of esthetics. Presented at the II Italian Academy of Prosthetic Dentistry International Congress, Bologna, Italy (1984)

Preston J: The golden proportion revisited. *J Esthet Dent* 5(6), 247-51 (1993)

Pujol A, Villanueva JJ: A supervised modification of the hausdorffdistance for visual shape classification. *Int J Pattern Recogn Artif Intell* 16(3), 349-59 (2002)

Reiber T: Form und Funktion der Frontzähne: klinische und experimentelle Untersuchungen. Hanser Verlag, München, Wien (1992)

Richter MJ: Evaluation der vollautomatischen Inlayrekonstruktion mittels biogenerischem Zahnmodell. Dissertationsschrift (2006)

Ricketts RM: Cephalometric synthesis. *Am J Orthod* 46, 647-63 (1960)

Ricketts RM, Roth RH, Chaconas SJ, Schulhof RJ, Engel GA. Orthodontic Diagnosis and Planning. Rocky Mountain Data System, Denver 39-147 (1982)

Rosenstiel SF, Ward DH, Rashid RG: Dentists' preferences of anterior tooth proportion--a web-based study. *J Prosthodont* 9(3), 123-36 (2000)

Rudzki-Janson I, Thedens K: Fotodokumentation, Profil- und Enface-Analyse, Videoimaging. In: Diedrich P, Hrsg. Kieferorthopädie I. Orofaziale Entwicklung und Diagnostik. Urban und Fischer, München (2000)

Rufenacht C: Ästhetik in der Zahnheilkunde. Quintessenz Verlags-GmbH, Berlin (1990)

Sanin C, Savara BS: An analysis of permanent mesiodistal crown size. *Amer J Orthodont* 59, 488 (1971)

Scandrett FR: A clinical evaluation of techniques to determine the combined width of the maxillary anterior teeth and the maxillary central incisor. *J Prosthet Dent* 48, 15-22 (1982)

Schlosser JB, Preston CB, Lampasso J: The effects of computer-aided anteroposterior maxillary incisor movement on ratings of facial attractiveness. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 127(1), 17-24 (2005)

Schulte W: Die exzentrische Okklusion. Quintessenz Verlags-GmbH, Berlin (1983)

Schumacher G-H: Anatomie und Biochemie der Zähne. Fischer, Stuttgart (1990)

Schumacher G-H: Odontographie. Hüthig, Heidelberg (1995)

Scott GR, Turner CG: The anthropology of modern human teeth. Cambridge Univ. Press, Cambridge (1997)

Schamschula RG, Barmes DE, Adkins BL: Caries aetiology in Papua New Guinea. Associations of tooth size and dental arch width. *Aust Dent J* 17(3), 188-95 (1972)

Seipel CM: Variation in tooth position. *Svensk Tandläk Tidskr* 39, Suppl.:1-176 (1946)

Selmer-Olsen R: An odontological study of the Norwegian Lapps. *Skrift Norske Vidensk-Akademi* 3, 1-167 (1949)

Sergl HG, Zentner A, Krause G: An experimental study of the esthetic effect of facial profiles. *J Orofac Orthod* 59, 116-26 (1998)

Shackelford TK, Larsen RJ: Facial asymmetry as an indicator of psychological, emotional, and physiological distress. *J Pers Soc Psychol* 72, 456-66 (1997)

Shoemaker WA: How to take the guesswork out of dental esthetics and function. *Fla Dent J* 58, 35-9 (1987)

Smukler H, Chaibi M: Periodontal and dental considerations in clinical crown extension: A rational basis for treatment. *Int J Periodontics Restorative Dent* 17, 464-77 (1997)

Snow SR: Esthetic smile analysis of maxillary anterior tooth width: the golden percentage. *J Esthet Dent* 11, 177-84 (1999)

Spät H: Cluster-Analyse-Algorithmen. Oldenbourg, München (1977)

Spyropoulos MN, Halazonetis DJ: Significance of the soft tissue profile on facial esthetics. *Am J Dentofacial Orthop* 119, 464-71 (2001)

Sterrett JD, Oliver T, Robinson F, Fortson W, Knaak B, Russell CM: Width/length ratios of normal clinical crowns of the maxillary anterior dentition in man. *J Clin Periodontol* 26, 153-7 (1999)

Stoll R, Stachniss V: Computerunterstützte Technologien in der Zahnheilkunde; Computer-assisted technologies in dentistry. *Dtsch Zahnärztl Z* 45 (6), 314-22 (1990)

Strub JR, Türp JC, Witkowski S, Hürzeler MB, Kern M: Curriculum Prothetik. Band I. 2.Auflage, Quintessenz Verlags-GmbH, Berlin (1999)

Stumbaum M: Anwendbarkeit der FGP-Technik bei der computergestützten Okklusionsgestaltung. Dissertationsschrift (2005)

Swaddle JP, Cuthill IC: Asymmetry and human facial attractiveness: symmetry may not always be beautiful. *Proc Biol Sci* 261, 111-6 (1995)

Symons D: *The evolution of human sexuality*. Oxford University Press, New York (1979)

Tanzer, G: Gibt es maskuline und feminine Formenmerkmale der oberen menschlichen Vorderzähne? *Dtsch Stomat* 6, 457 (1956)

Tarnow DP, Magner AW, Fletcher P: The effect of the distance from the contact point to the crest of bone on the presence or absence of the interproximal dental papilla. *J Periodontol* 63, 995-6 (1992)

Tatarunaite E, Playle R, Hood K, et al.: Facial attractiveness: a longitudinal study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 127, 676-82 (2005)

Terpelle T, Wagner B, Rasche KR: Untersuchungen zur Relation der Frontzahn- und der Nasenflügelbreite. *Dtsch Zahnärztl Z* 60(9), 488 (2005)

Tjan AH, Miller GD, The JG: Some esthetic factors in a smile. *J Prosth Dent* 51 (1), 24-8 (1984)

Tonn P: Über die mesiodistalen Zahnbreitenrelationen der Zähne des Oberkiefers zu den entsprechenden des Unterkiefers bei normaler und anormaler Okklusion. *Med. Diss., Berlin* (1937)

Treu G: Durchschnittsbild und Schönheit [composite pictures and beauty]. *Zeitschrift für Aesthetik und Allgemeine Kunstwissenschaft* 9, 433-48 (1914)

Tucker AS, Sharpe PT: Molecular genetics of tooth morphogenesis and patterning: the right shape in the right place. *J Dent Res* 78, 826-34 (1999)

Van der Linden FPGM, Boersma H, Zelders T, Peters KA, Raaben JH: Three-dimensional analysis of dental casts by means of Optocom. *J Dent Res* 51, 1100 (1972)

Varjao FM, Nogueira SS, Russi S, et al.: Correlation between maxillary central incisor form and face form in 4 racial groups. *Quintessence Int (Germany)* 37(10), 767-71 (2006)

Vig RG, Brundo GC: The kinetics of anterior tooth display. *J Prosthet Dent* 39(5), 502-4 (1978)

Ward DH: Proportional smile design using the recurring esthetic dental (red) proportion. *Dent Clin North Am* 45(1), 143-54 (2001)

Wheeler RC: Complete crown form and the periodontium. *J Prosthet Dent* 11, 722-34 (1961)

Williams JL: A new classification of human teeth forms with special reference to a new system of artificial teeth. *Dent Cosmos* 56, 627 (1914)

Wolfart S, Brunzel S, Freitag S, et al.: Assessment of dental appearance following changes in incisor angulation. *Int J Prosthodont* 17(2), 150-4 (2004)

Wolfart S, Thormann H, Freitag S, et al.: Assessment of dental appearance following changes in incisor proportions. *Eur J Oral Sci* 113(2), 159-65 (2005)

Zollikofer CPE: Vorlesungsskript Uni Zürich, Quelle Internet (2002)

8 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: eigenes Bildmaterial

Abb. 2: aus: Hönn M, Göz G: The Ideal of Facial Beauty: A Review. J Orofac Orthop 68, 6-16 (2007)

Abb. 3: in Anlehnung an: Magne P, Gallucci GO, Belser U: Anatomic crown width/length ratios of unworn and worn maxillary teeth in white subjects. J Prosthet Dent 89, 453-61 (2003)

Abb. 4: aus: Magne P, Gallucci GO, Belser U: Anatomic crown width/length ratios of unworn and worn maxillary teeth in white subjects. J Prosthet Dent 89, 453-61 (2003)

Abb. 5: aus: Carlsen O: Dental Morphology. Munksgaard, Copenhagen (1987)

Abb. 6: aus: Mühlreiter E, De Jonge Cohen TE.: Anatomie des menschlichen Gebisses, Verlag Arthur Felix, Leipzig, 1928

Abb. 7: aus: Scott GR, Turner II CG: The anthropology of modern human teeth. University Press, Cambridge (1997)

Abb. 8: eigenes Bildmaterial

Abb. 9: aus: Magne P, Gallucci GO, Belser U: Anatomic crown width/length ratios of unworn and worn maxillary teeth in white subjects. J Prosthet Dent 89, 453-61 (2003)

Abb. 10: aus: Abdullah MA: Inner canthal distance and geometric progression as a predictor of maxillary central incisor width. J Prosthet Dent 88(1), 16-20 (2002)

Abb. 11-13: eigenes Bildmaterial

Abb. 14: aus: Mehl A.: 3D-Datenerfassung und CAD/CAM-Technologie in der restaurativen Zahnmedizin – Entwicklung, Einsatz und Perspektiven eines neuen Verfahrens. Habilitationsschrift (1998)

Abb. 15: Schemazeichnung des Laserscanners es1 der Firma Etkon (Gräfelfing, Deutschland)

Abb. 16-52: eigenes Bildmaterial

9 LEBENSLAUF

Name: Florian Andreas Probst
Geburtsdatum: 15. März 1979
Geburtsort: Dachau
Familienstand: ledig
Staatsangehörigkeit: deutsch
Eltern: Christine Probst, geb. Raudies
Werner Probst

Beruf:

seit Juli 2004 Tätigkeit als Zahnarzt
Juni 2004 Approbation als Zahnarzt

Studium:

seit Sep 2004 Studium der Humanmedizin an der
Technischen Universität München
Mai 2004 Zahnärztliche Prüfung
Mai 1999-Mai 2004 Studium der Zahnmedizin an der
Ludwig-Maximilians-Universität München

Schulbildung:

Juni 1998 Abitur
1989-1998 Ignaz-Taschner-Gymnasium Dachau
1985-1989 Grundschule Markt Indersdorf

10 DANKSAGUNGEN

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Dr. Albert Mehl für die freundliche Bereitstellung dieses interessanten Themas, für seine immer vorhandene Hilfsbereitschaft und die tatkräftige Unterstützung.

In gleicher Weise möchte ich mich bei meinen Kollegen Frau Dr. Juliane Richter, Herrn Dr. Andreas Litzenburger, Herrn Jan Röhrig und Herrn Dr. Jan Haito für die gute Zusammenarbeit und die immer sehr gute Atmosphäre bei der Bearbeitung dieses Themas bedanken.

Ferner danke ich Herrn Wolfram Gloger und Herrn Thomas Obermeier für die Hilfe bei Hard- und Softwareproblemen.

Abschließend möchte ich meinen Eltern danken, da sie mir dieses Studium erst ermöglicht haben und mir immer mit Rat und Tat zur Seite standen.