

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

Parametrisierung unbekannter Zahnoberflächen mittels des biogenerischen Zahnmodells

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

vorgelegt von
Andreas Peter LITZENBURGER

aus
München

2007

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter:

Prof. Dr. Dr. A. Mehl

Mitberichterstatter:

Prof. Dr. Dr. h.c. W. Gernet

Priv. Doz. Dr. M. Stöckelhuber

Dekan:

Prof. Dr. med. D. Reinhardt

Tag der mündlichen Prüfung:

07.03.2007

INHALTSÜBERSICHT

1	EINLEITUNG	6
2	LITERATURÜBERSICHT	8
2.1	Nicht-metrische Verfahren	8
2.2	Metrische Verfahren, Odontometrie	9
2.2.1	Eindimensionale Verfahren; Analyse der Zahngröße	10
2.2.2	Zweidimensionale Verfahren	10
2.2.3	Dreidimensionale Verfahren	11
2.2.3.1	Moire-Verfahren	12
2.2.3.2	Punktsensor	14
2.2.3.3	Koordinatenmeßmaschine	15
2.3	Statistische Auswerteverfahren	16
2.3.1	Multivariate Analyse der okklusalen Morphologie	16
2.3.2	Fourier Analyse (Harmonische Analyse)	17
2.3.3	Prokrustes Analyse	18
2.4	Bewertung der Verfahren	19
2.5	Biogenerisches Zahnmodell	22
2.6	CAD/CAM-Technologie in der Zahnmedizin	22
2.7	Ziele der Arbeit	24
3	MATERIAL UND METHODE	25
3.1	Erstellen einer Zahnbibliothek	25
3.1.1	Probandengut	25
3.1.2	Abformung und Herstellung von Gipsmodellen	26
3.1.3	Vermessung	28

3.1.3.1	Prinzip des 3D-Liniensensors	28
3.2.1.2	Positionierung der Einzelzahnmodelle	29
3.1.4	Bearbeitung der Datensätze	30
3.2	Bearbeitung der Bibliothek mittels des „Biogenerischen Zahnmodells“	32
3.3	Generierung unbekannter Zahnoberflächen	32
3.4	Bestimmung der Ähnlichkeit symmetrisch gegenüberliegender Zähne	38
3.5	Beschreibung von Prothesenzähnen mittels des Biogenerischen Modells	41
3.6	Statistische Auswertung	43
4.	ERGEBNISSE	45
4.1	Parametrisierung unbekannter Zahnoberflächen mittels des biogenerischen Zahnmodells	45
4.1.1	Eta Faktor	45
4.1.2	Hauptkomponenten	48
4.1.3	Durchläufe	51
4.1.4	Grid Step (Auflösungsstufen)	52
4.1.5	Ergebnisse der Anpassungsdurchläufe	54
4.2	Bestimmung der Ähnlichkeit symmetrisch gegenüberliegender Zähne mittels Z-Differenzbildung	57
4.2.1	Vergleich symmetrisch gegenüberliegender Zähne jeweils eines Probanden	57
4.2.2	Vergleich erster Molaren unterschiedlicher Probanden	60
4.2.3	Z-Differenzwerte der parametrisierten Kauflächen	62
4.2.4	Vergleich der Ähnlichkeitsmaße	63

4.3	Beschreibung von Prothesenzähnen mittels dem Biogenerischen Modell	65
5.	DISKUSSION	69
5.1	Diskussion der odontometrischen Verfahren	69
5.1.1	Bisherige odontometrische Verfahren	69
5.1.2	Biogenerisches Zahnmodell	70
5.2	Diskussion der Ergebnisse	71
5.2.1	Parametrisierung und Rekonstruktion von Zahnoberflächen	71
5.2.2	Bestimmung der Ähnlichkeit symmetrisch gegenüberliegender Zähne	73
5.2.3	Rekonstruktion von Prothesenzähnen mittels Biogenerischen Modells	76
6	ZUSAMMENFASSUNG	78
7	LITERATURVERZEICHNIS	80
8	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	88
9	LEBENS LAUF	90
10	DANKSAGUNGEN	91

1 EINLEITUNG

„Ein Großteil dessen, was wir heute über die Evolution des Menschen wissen, wurde aus Untersuchungen von Zähnen abgeleitet“ (Kieser 1991).

Dies ist insbesondere der Beständigkeit der Zähne gegenüber Umwelteinflüssen zu verdanken. Da sich die Zähne nach dem Form-Funktionsprinzip („form follows function“) entwickelt haben, können sie eine Fülle an Informationen zu den verschiedensten biologischen Fragestellungen liefern. Zahlreiche Veröffentlichungen in Fachzeitschriften der Anthropologie, Biologie, Gerichtsmedizin und letztlich natürlich auch der Zahnmedizin beweisen dies.

In der Zahnmedizin ist die korrekte Wiederherstellung der Zahnform unter funktionellen Gesichtspunkten von Bedeutung. Die Fachrichtung der Gnathologie legt dabei besonderen Wert auf ein optimales Zusammenspiel zwischen Muskeln, Knochen, Gelenken, Parodontien und der Okklusion. Die Morphologie der Zähne spielt in diesem zusammenhängenden System somit eine entscheidende Rolle.

Einige wesentliche Elemente der Gnathologie erscheinen immer noch unzureichend geklärt. Dies betrifft auch die korrekte anatomische Form der Zähne und damit ihren Einfluss auf die neuromuskulär geführten Unterkieferbewegungen. Viele Dogmen, die durch die Begründer der „Lehre vom Kiefer“ von Stuart (1964) und Thomas (1965) aufgestellt wurden, sind heutzutage umstritten. Eine Tripodisierung aller tragenden Höcker mit maximalem Vielpunktkontakt kommt im natürlichen Gebiss ebenso wenig vor (Lang et al 1989) wie die reinen Punkt-Fläche/Fläche-Punkt Kontakte, wie sie im Long-Centric-Konzept gefordert werden (Ramfjord et Ash 1992). Ebenso bleibt unklar, worauf das Postulat der Eck-

zahnführung begründet ist, wenn man bedenkt, dass nur ca. 21% der Patienten eine solche beidseitig aufweisen (Kolndorfer 1982). Das Fundament aus belastbaren Daten aus der Grundlagenforschung zur komplexen dreidimensionalen Form der Zähne erscheint somit unzureichend.

In dieser Arbeit sollen grundlegende Aspekte der Morphologie der Seitenzähne untersucht werden. Insbesondere im Hinblick auf die rasante Entwicklung im Bereich der computergestützten Herstellung von Zahnersatz besteht ein aktueller Forschungsbedarf an mathematischen Formulierungen, welche die okklusalen Strukturen eines Zahnes beschreiben können. Eine vollautomatische, den Richtlinien der Gnathologie entsprechende Rekonstruktion von Okklusalflächen ist derzeit nicht möglich und bedarf noch weiterer Forschung zu diesem Themenkomplex (Mehl 1998). Unter diesen Gesichtspunkten soll ein mathematisches Modell zur Beschreibung der Kauflächen (Mehl 2003) getestet werden.

2 LITERATURÜBERSICHT

2.1 Nicht-metrische Verfahren

Die in der Literatur beschriebenen Untersuchungsmethoden zur Morphologie der Zähne sind vielfältig. Generell können diese Verfahren in metrische und nicht-metrische Verfahren eingeteilt werden.

Nicht-metrische Untersuchungen zur Topographie des Kauflächenkomplexes zeichnen sich durch ihren deskriptiven Charakter aus. Sie fokussieren sich auf größenunabhängige morphologische Strukturvarianten, die sich entweder auf generelle Unterschiede in der Form oder auf einzelne Merkmale beziehen. Die am häufigsten beschriebenen Charaktereigenschaften stellen die Schaufelform der Inzisivi, der Carabelli Höcker, die Höckerzahl sowie das Fissurenmuster der Seitenzähne dar. Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl weiterer Merkmale, die teilweise äußerst selten und örtlich begrenzt zur Ausprägung kommen (siehe Abb.1). Da einzelne Charakteristika unterschiedlich stark ausgeprägt sein können und somit nicht immer eindeutig in die Kategorien Merkmal präsent und Merkmal fehlend eingeordnet werden können, mussten bestimmte Einteilungen und Klassifizierungen geschaffen werden. Dahlberg (1956),

Hanihara (1961) und später Turner et al. (1991) haben Gipsmodelle hergestellt, um die Aus-

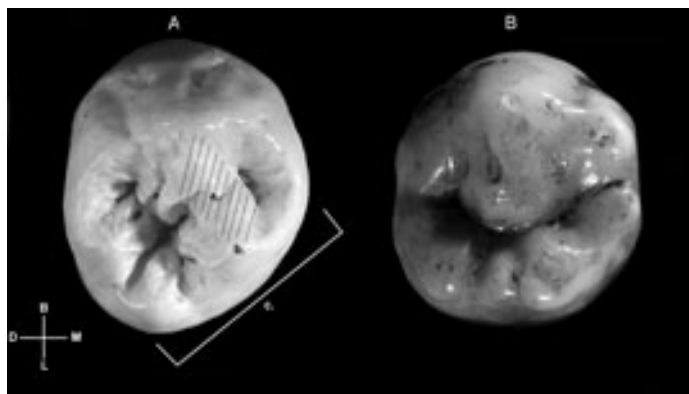


Abb.1: Unterer zweiter Praemolar eines Neandertalers (links) mit typischer transversaler Crista (schraffiert) und eines Aboriginis (rechts) mit mesialem Massenmerkmal und symmetrischer Anordnung der lingualen Höcker;
Quelle: siehe Abb.-Verzeichnis

prägung einer Eigenschaft, vom Fehlen bis hin zur größten Manifestierung, klassifizierbar zu machen (siehe Abb. 2). In „the anthropology of modern human teeth“ beschreiben Scott und Turner (1997) die morphologischen Variationen von Zähnen in modernen Populationen.

Da all diese Untersuchungen miteinander vergleichbar und für alle Leser eindeutig verständlich sein sollten, wäre eine einheitliche Terminologie vorteilhaft, welche alle einzelnen Strukturen eines Zahnes beschreiben kann. Allgemein



Abb.2: Modell zur Klassifizierung der Drei- bis Vierhöckrigkeit von Oberkiefermolaren (nach Dahlberg 1956); Quelle: siehe Abb.-Verzeichnis

anerkannt und angewandt sind dabei die Beschreibungen von Carlsen (1987), dessen Buch „Morphologie der Zähne“ diesbezüglich als eines der Standardwerke gilt. Demnach sind am Aufbau einer Krone grundsätzlich vier makroskopische Bausteine beteiligt: der Lobus (Höcker), der Randleistenbereich, das Cingulum-Derivat und die überzähligen Kronenstrukturen. Jede Zahnkrone stellt eine Kombination dieser Einzelmerkmale dar, die in der Anzahl variieren, jedoch immer mindestens einen Lobus aufweisen.

2.2 Metrische Verfahren, Odontometrie

Zur metrischen Auswertung von Zahnoberflächen wurde eine Vielzahl an Methoden entwickelt. Die Bandbreite dieser Untersuchungen reicht von der reinen Vermessung des Zahndurchmessers bis hin zur Messung von Strecken und Winkeln, die durch morphologisch interessante Punkte auf der Zahnkrone gebildet werden. Odontometrische Analysen können in ein-, zwei- und dreidimensionale Messverfahren eingeteilt werden.

2.2.1 Eindimensionale Verfahren; Analyse der Zahngröße

Ein Großteil aller Veröffentlichungen über die Anatomie der Zähne beschäftigt sich mit der reinen Größenvermessung.

Auf dem Gebiet der Anthropologie liegt den Untersuchungen meist eine genetische Fragestellung zu Grunde, die sich mit der Klärung von Verwandtschaftsverhältnissen verschiedenster ethnischer Gruppen befasst. Größenvermessungen von Zähnen gehören auch zur täglichen Arbeit der Kieferorthopäden, die sich z.B. mit einem ausgewogenen Verhältnis zwischen Zahnbreiten und Kieferbasengröße beschäftigen und erklärt die ebenfalls große Anzahl an Veröffentlichungen auf diesem Fachgebiet der Zahnmedizin. Eine etablierte Analyse-methode stellt beispielsweise die Bolton-Analyse dar (Bolton 1962), bei der die Summe der Breiten der Oberkieferinzisivi in Relation zu der Summe der Breiten der Unterkieferinzisivi gesetzt werden.

Üblicherweise werden Länge, Breite und Höhe eines Zahnes unter Verwendung einer Schieblehre gewonnen. Stellvertretend seien hier einige der wichtigsten Autoren genannt: Moorrees et al. (1957); Bolton (1962); Dahlberg (1963); Garn et al. (1964), Kieser (1991), Townsend (2001); Magne (2003); Kuswandari (2004). Teilweise werden zusätzlich die Breiten der essentiellen Höcker gemessen (Kondo et al. 1998).

2.2.2 Zweidimensionale Verfahren

Zweidimensionale Verfahren gehen über den reinen Vergleich der Zahndurchmesser hinaus und ermöglichen die metrische Untersuchung unter Einbeziehung einzelner Bestandteile der Zahnkrone. So wird es möglich die Morphologie der Zähne, durch Vermessen ausgewählter Abstände und Winkel zwischen charakteristischen Punkten, zu studieren. Diese Messpunkte können nach anatomischen

Richtlinien ausgewählt werden, wie zum Beispiel die Spitze eines Höckers. Sie können aber auch aufgrund einer mathematischen Eigenschaft definiert sein, wie zum Beispiel Punkte, an denen eine Fläche eine maximale Krümmung aufweist. Die zu untersuchenden Punkte und Linien werden auf eine Ebene projiziert (im Allgemeinen geschieht dies durch eine Fotografie) und sind dadurch durch zwei Koordinaten (x,y) bestimmt.

Ein Vorteil eines zweidimensionalen gegenüber einem dreidimensionalen Verfahren kann in der geringeren Fehleranfälligkeit im Hinblick auf einen vertikalen Substanzverlust von Zahnhartsubstanzen gesehen werden. Somit erscheint es auch möglich, Zähne zu untersuchen, die einen gewissen Grad an Abrasion und Attrition aufweisen.

2.2.3 Dreidimensionale Verfahren

Zahnoberflächen stellen Objekte dar, die sich durch eine komplexe dreidimensionale Struktur auszeichnen. So gibt es Autoren (Scott et Turner II 1997), die darauf verweisen einen Zahn besser mit dem bloßen Auge betrachten, als ihn durch ein Medium zu untersuchen, welches die räumlichen Strukturen lediglich zweidimensional wiederzugeben vermag. Es wird somit nach Methoden gesucht, die die natürlichen Grenzen einer Fotografie überwinden können.



Abb.3: Seitenzahn-
morphologie

2.2.3.1 Moire-Verfahren

Moire-Überlagerungsmuster entstehen überall dort, wo zwei ähnliche Gitter, Raster oder hinreichend parallele Linienreihen übereinanderliegend sichtbar sind. Dieses Prinzip kann anhand eines simplen Beispiels veranschaulicht werden. Man stelle sich zwei übereinander liegende Käämme vor, die einen unterschiedlichen Abstand der Zinken aufweisen. Es entsteht eine periodische Struktur von Moirestreifen.



Abb.4: Moire-Streifenmuster

Dieser Moire-Effekt kann zur dreidimensionalen Oberflächenvermessung eingesetzt werden. Hierbei wird der Zahn durch ein Gitter mit einer Lichtquelle in einem bestimmten Winkel beleuchtet. Auf der Zahnoberfläche entsteht durch Schattenwurf ein deformiertes Gittermuster. Betrachtet man nun den Zahn senkrecht zu dem vor der Lampe liegenden Gitter, erhält man durch Überlagerung mit dem projizierten Gitter charakteristische Moirestreifen. Der Abstand und die Breite der einzelnen Hell- und Dunkelzonen verhalten sich direkt proportional zu der jeweiligen Steigung auf dem okklusalen Relief. Diese Streifen verhalten sich wie Höhenlinien auf einer Landkarte, wenn das einfallende Licht parallel gebündelt ist. Dies kann annähernd durch einen möglichst großen Abstand der Lampe zu einem dicht vor dem Objekt liegenden Gitter erreicht werden.

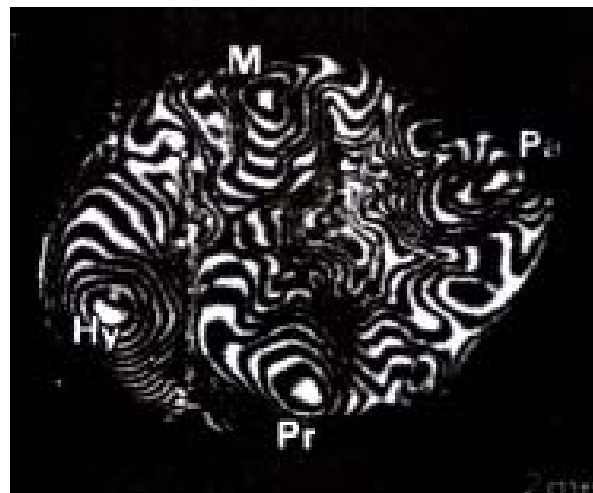


Abb.5: Bild eines oberen Molaren mit typischen Moire-Streifenmuster;
Quelle: siehe Abb.-Verzeichnis

Dreidimensionale Untersuchungen des okklusalen Reliefs des ersten oberen Molaren wurden mit Hilfe dieses Moiré-Topographie-Verfahrens von Kanazawa et al. (1983, 1984, 1988 und 1989) durchgeführt. Die Konturlinien wiesen einen Höhenunterschied von 0,2 mm auf. Die Zähne wurden parallel der Moiré-Gitterlinien in der Ebene ausgerichtet, die durch die Höckerspitzen des mesio-bukkalen Höckers (Paraconus), des disto-bukkalen Höckers (Metaconus) und des mesio-palatalen Höckers (Proconus) definiert ist. Nach Herstellung der Moiré Fotografien von Gips-

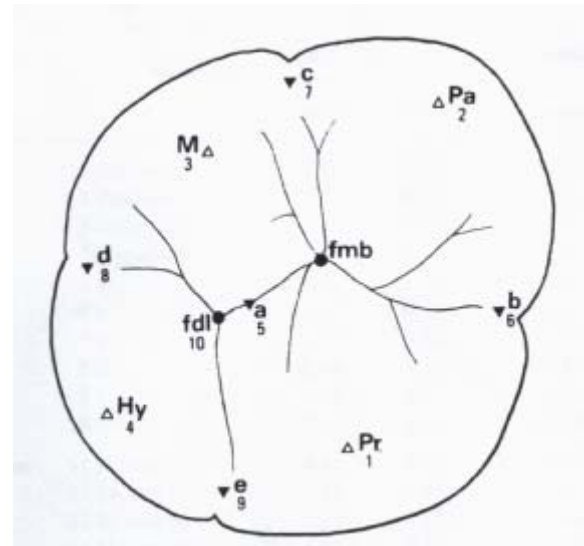


Abb.6: Messpunkte für einen oberen Molaren

modellen wurden elf Messpunkte ermittelt. Neben den Höckerspitzen wurden Punkte ausgewählt, die im Schattengitter des Moiré-Verfahrens relativ eindeutig zu bestimmen sind. Beispielsweise wurde die tiefste Einziehung der Crista obliqua (siehe Abb.6) oder einer Randleiste (siehe Abb. 6 und 7) gewählt. Zur Bestimmung der räumlichen Lage dieser Messpunkte wurden die Höhenlinien ausgehend von der zentralen Fossa abgezählt, die zumeist den tiefsten Punkt in der beschriebenen Ausrichtung darstellt. In der statistischen Auswertung zeigten sich signifikante Unterschiede beim Vergleich der Geschlechter japanischer Schulkinder. Zum einen in der Höhe der drei essentiellen Höckerspitzen, sowie zum anderen in der Auswertung von einigen Strecken und Winkeln, die entwe-

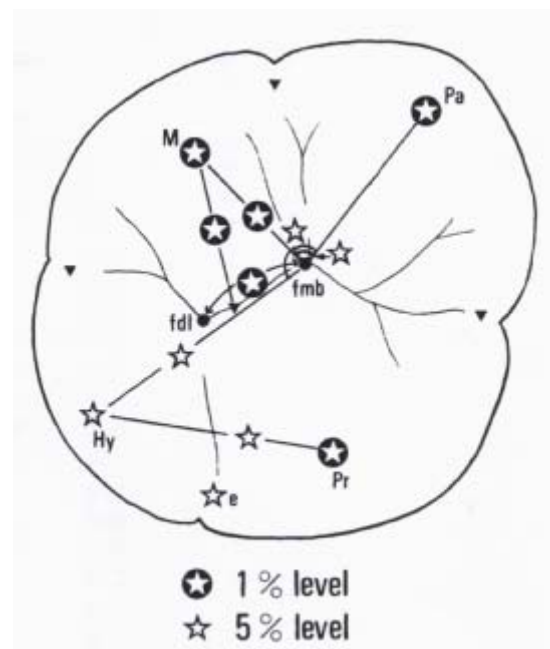


Abb.7: Zusammenfassung der geschlechtsspezifischen Unterschiede

der durch die Spitze des disto-bukkalen Höckers oder des disto-palatalen Höckers gebildet werden. Eine Korrelation zwischen der Höhe der Höcker und des Höckerabstandes konnte nicht gezeigt werden. In nachfolgenden Arbeiten wurden diese Werte japanischer Schulkinder mit denen anderer Bevölkerungsgruppen (Holländer, Ureinwohner und weiße Bevölkerung Australiens, Bantu, Mongolen, Eskimos), sowie mit den jeweils entsprechenden unteren ersten Molaren der japanischen Schulkinder verglichen. Aufgrund dieser Untersuchungen scheint es möglich, einzelne Zähne sicherer einer ethnischen Gruppe zuweisen zu können, als dies mit der rein klassischen Odontometrie (Längenbestimmung des mesio-distalen und oro-vestibulären Durchmessers) geschieht.

2.2.3.2 Punktsensor

Ein weiteres Verfahren zur berührungslosen Positionsmessung von Punkten wird durch das Prinzip der optischen Triangulation ermöglicht. Dieses Prinzip beruht auf einer Dreieckanordnung von Beleuchtungseinheit, Messobjekt und Beobachtungseinheit (=Sensor). Die Beleuchtungseinheit projiziert einen Lichtpunkt auf das Objekt. Das Objekt reflektiert den Lichtpunkt höhenabhängig auf ein bestimmtes Areal des lichtempfindlichen Sensors. Durch Kalibrierung lässt sich daraus eindeutig die Höhe des Objektpunktes zurückrechnen. Zur Vermessung des gesamten Objektes wird dieses Punkt für Punkt abgebildet. Dies kann beispielsweise durch einen in x- und y-Richtung verfahrbaren Tisch ermöglicht werden.

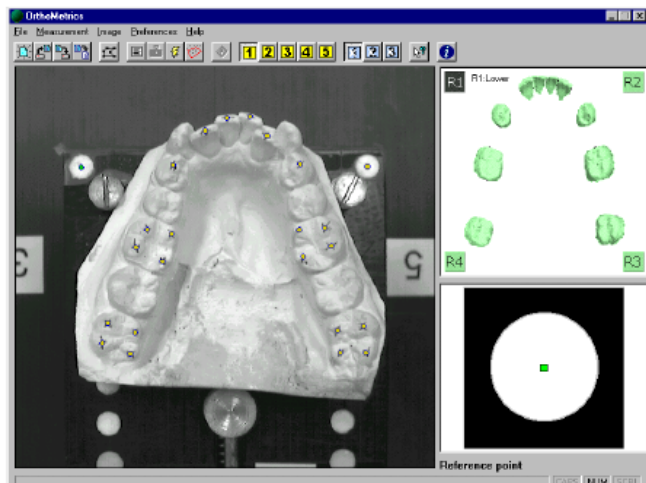


Abb. 8: Benutzeroberfläche des Programmes GUI während des Digitalisierungsvorganges; Quelle siehe Abb-Verzeichnis

Eine ähnliche Auswertung der Strecken und Winkel, die durch die Höcker eines Zahnes gebildet werden, wie sie von Kanazawa et al. (1983, 1984, 1988 und 1989) mit Hilfe der Moire-Topographie durchgeführt wurde, ist auch von Datenmengen möglich, die durch das Vermessen mit solch einem Triangulationssensor entstehen. Pirilä-Parkkinen et al. (1998, 2001) haben mit dieser Methode nach räumlicher Lagebestimmung der essentiellen Höckerspitzen gezeigt, dass die Symmetrie okklusaler Merkmale von der genetischen Prädisposition (Aneuploidie und Rechts- bzw. Linkshändigkeit) abhängig ist.

2.2.3.3 Koordinatenmessmaschine

Eine mechanische Koordinatenmessmaschine vermisst ein Objekt, indem ein Messtaster mit Präzisionsmechanik dieses Punkt für Punkt mittels einer dreiachsigen Verfahrvorrichtung abtastet. Beim ersten Kontakt des Tasters mit der Oberfläche wird die Antastbewegung unterbrochen und die (x,y,z) -Koordinate des Messpunktes aufgezeichnet. Mit Hilfe einer Steuerungssoftware können auf diese Weise alle gewünschten Messpunkte mit hoher Genauigkeit auf einem Zahn aufgezeichnet werden.

Insbesondere bei Zähnen, die sich in hohem Maße ähneln, können morphologische Unterschiede weder durch Messungen von Länge, Breite und Höhe, noch durch die Klassifizierung in verschiedene Zahnformen/-typen, genau genug wiedergespiegelt werden. Eine Methode, um feine morphologische Unterschiede zwischen zwei Zähnen qualitativ und quantitativ darzustellen, wurde 1991 von Soma vorgestellt. Nach Anzeichnung möglichst vieler morphologisch aussagekräftiger Punkte auf zwei extrahierten Zähnen (rechter und linker unterer erster Prämolare desselben Individuums) wurden diese

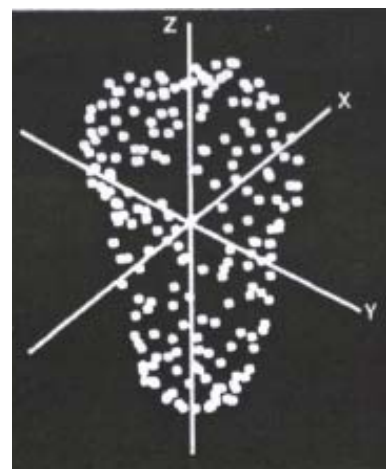


Abb. 9: Verteilung der Messpunkte; Quelle: siehe Abb.-Verzeichnis

mittels einer Koordinatenmessmaschine räumlich bestimmt und digitalisiert. Der maximale Abstand zweier benachbarter Punkte im Bereich der Wurzel lag dabei bei 3 mm. Im Bereich der Krone wurden kleinere Abstände gewählt. Nach Standardisierung und Achsenspiegelung wurden die beiden Datenmengen durch Überlagerung verglichen. Die Überlagerung erfolgte mit Hilfe einer gemeinsamen Achse, die sich aus einer Hauptkomponentenanalyse ergab. Ein Graphikprogramm erlaubte eine qualitative Auswertung durch dreidimensionale Darstellung der nichtüberlappenden Bereiche. Eine quantitative Auswertung erfolgte über Volumenvernetzung der Zahnoberfläche. Es wurde eine Formel zur Evaluierung des gesamten morphologischen Unterschiedes (RTMD = rate of total morphological difference; entspricht dem Quotienten aus der Summe der nicht-überlappenden Volumina zur Vereinigung der Volumina) herangezogen.

Eine im Aufbau ähnliche 3D-Koordinatenmessmaschine verwendeten Kubota et al. (1994) zur Untersuchung des anatomischen Äquators und der Schmelz-Zement-Grenze. Auch Witzleb et al. (1988) haben ein solches Messgerätesystem vorgestellt und die prinzipielle Möglichkeit zur metrischen Erfassung von Okklusionsmerkmalen beschrieben.

2.3 Statistische Auswerteverfahren

Die im Folgenden vorgestellten stochastischen Analysen untersuchen die anatomischen Strukturen von Zähnen. Sie sind alle anhand von Fotografien durchgeführt worden. Prinzipiell ist es aber möglich diese Methoden auch mit dreidimensionalem Datenmaterial durchzuführen.

2.3.1 Multivariate Analyse der okklusalen Morphologie

Die Bezeichnung multivariate Statistik steht für die statistische Analyse mehrdimensionaler Merkmale und ist so in der Biometrie, bei Merkmalskomponenten die sich gegenseitig beeinflussen, sinnvoll einsetzbar (Lorenz 1996). Betrachtet

man nun n Messpunkte auf einem Zahn, wird dieser durch einen Komplex von Merkmalen charakterisiert, der aus n Komponenten besteht und als n -dimensional beschriebenes „Supermerkmal“ aufgefasst werden kann.

Da eine Differenzierung zwischen Zähnen verschiedenster ethnischer Gruppen (Kaukasier, Negroide, Mongolide, Australide sowie Angelsachsen des Mittelalters, des 17. sowie des heutigen Jahrhunderts) anhand visueller Betrachtung oder alleiniger Analyse der Zahngrößen im Vorfeld der Untersuchung nicht möglich war, verglich Lavelle (1978, 1984) diese Zähne mit Hilfe der Methode der multivariaten Analyse (Kanonische Korrelationsanalyse). Nach der Herstellung von Gipsmodellen der Zähne, die aus den verschiedensten Museen Großbritanniens stammen, wurden auf den rechten oberen Molaren 19 Messpunkte angezeichnet. Die Messpunkte beruhen auf einer Auswahl von Biggerstaff (1969). Es wurden neun okklusale Punkte und 10 Bezugspunkte, die auf der äußeren Umrisslinie des Zahnes liegen, markiert (siehe Abb.10). In einem standardisierten Verfahren wurde unter 10-facher Vergrößerung eine Fotografie erstellt. Die stochastische Analyse zeigt, dass unter Berücksichtigung der okklusalen Bezugspunkte eine eindeutige Abgrenzung zwischen den Gruppen möglich ist.

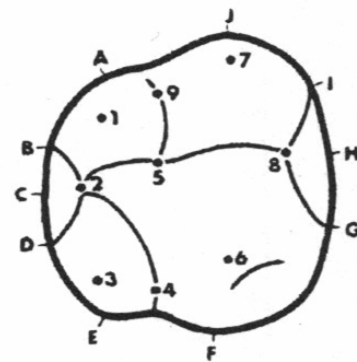


Abb.10: Messpunkte an einem oberen Molaren

2.3.2 Fourier Analyse (Harmonische Analyse)

Eine weitere Methode zur Untersuchung von Formen, die auch schon in den Feldern der Neurologie (Casanova et al. 1990), Osteologie (Halozonetis et al. 1991) und Onkologie (Shen 1994) eingesetzt wurde, stellt die Fourier Analyse (Harmonische Analyse) dar. Eine periodische Funktion kann als unendliche Reihe von trigonometrischen Funktionen (=Fourier Reihe) dargestellt werden.

So kann eine Konturlinie eines Zahnes als eine stetige Funktion angesehen werden, welche in eine Summe von Sinus- und Kosinusfunktionen zerlegt werden kann. Diese durch Kurvenanpassung gewonnenen Winkelfunktionen ermöglichen dann einen Formvergleich und eine Differenzbewertung, welche es erlaubt, den anatomischen Äquator und die Konturlinie der Okklusalfäche eines Zahnes zu untersuchen. Ferrario et al. (1999) konnten keine geschlechtsspezifischen Unterschiede bezüglich dieser beiden Linien feststellen.

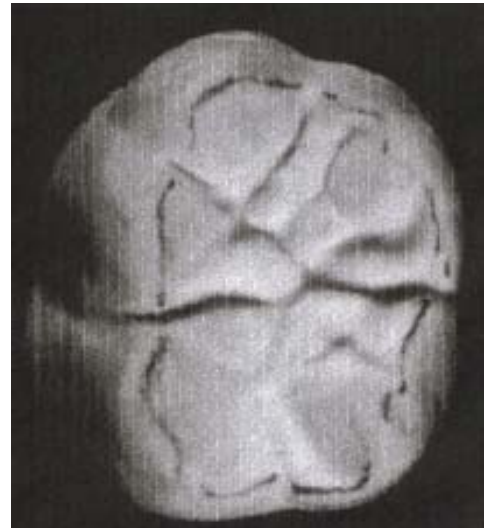


Abb. 11: Ansicht eines unteren Molaren. Die Kontur der Okklusalfäche ist hervorgehoben.

2.3.3 Prokrustes Analyse

Die reine Form eines Körpers ist all jene geometrische Information, die übrig bleibt, wenn Lage, Maßstab und Rotationseffekte aus einem Objekt herausgefiltert werden (Dryden und Mardia 1998). Eine Methode um die Ähnlichkeit von Objekten, die sich durch Punkte in einem Koordinatensystem darstellen lassen, beschreiben zu können, ist die Prokrustes Analyse. Prokrustes (gr.=der Strecker) heißt in der griechischen Mythologie ein Räuber, der seine Opfer folterte, um sie in ein Bett einzupassen. Waren sie zu klein, so wurden sie gestreckt, waren sie zu groß, so wurden sie gekürzt.

Robinson et al. (2001a, 2001b) untersuchten die Zahnoberflächen nach diesem Verfahren. In diesem zweidimensionalen Verfahren werden definierte Zahnbezugspunkte in einem Koordinatensystem dargestellt. Nach Ermittlung des Mittelpunktes einer Zahnfläche, Größenabgleichs, Rotation und abermaligem Größenabgleichs, war es möglich, die Form mehrerer Zähne miteinander zu vergleichen und ihre Ähnlichkeit quantitativ zu bestimmen. So ist es möglich die

standardmäßigen beschreibenden statistischen Verfahren (beispielsweise die Ermittlung einer Durchschnittsform, Hauptkomponentenanalyse, sowie Darstellung in einem Deformationsgitter) anzuwenden. Veranschaulicht werden diese Techniken anhand der Vestibularflächen oberer mittlerer Frontzähne von Patienten mit Zahn-

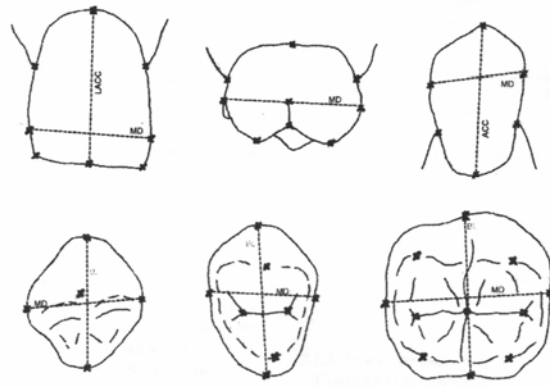


Abb. 12: Messpunkte für die Prokrustes Analyse

unterzahl im Vergleich zu einer gesunden Kontrollgruppe. So konnte gezeigt werden, dass die Zähne der Hypodontie-Gruppe eine nach inzisal konischer zulaufende Form besitzen.

2.4 Bewertung der Verfahren

Die Literaturübersicht zeigt, dass es unterschiedlichste Ansätze gibt, die Anatomie der Seitenzähne zu analysieren und nach speziellen Merkmalen und Gemeinsamkeiten zu klassifizieren. Insbesondere im Hinblick auf den in der Zahnmedizin immer größer werdenden Einfluss der CAD/CAM-gefertigten Zahnrestorationen, sind fundamentale Kenntnisse und Beschreibungsmöglichkeiten okklusaler Strukturen ein aktuell gefragtes Forschungsthema. Die bisher in der Literatur beschriebenen Ansätze erlauben jedoch keine ausreichende metrische Charakterisierung der okklusalen Morphologie, um in einem automatischen Berechnungsvorgang gut passende Vorschläge für Restaurationen zu erhalten.

2.5 Biogenerisches Zahnmodell

Das biogenerische Zahnmodell (Mehl 2003) stellt den Versuch dar, alle in der Natur vorkommenden Zahnformen mathematisch zu beschreiben. Nach Erstellung einer Zahnbibliothek und 3D-Vermessung der Gipszähne werden die digitalisierten Zahnoberflächen bearbeitet.

Zunächst wird anhand eines ausgesuchten, möglichst typischen Vertreters (=Referenzzahn) eines jeweiligen Zahntyps (z.B. Oberkiefer 6er) durch Korrespondenzanalyse eine Durchschnittszahnberechnung durchgeführt. Es handelt sich dabei nicht um eine reine Überlagerung der jeweils einzelnen Punkte $z_n(x_n, y_n)$, welche in ihrer Gesamtheit eine Zahnoberfläche beschreiben. Dies würde lediglich zu einem stark verrauschten, nahezu strukturlosen Datensatz führen, welcher nicht die typischen Merkmale eines Zahns aufweist (Mehl et al. 2005). Viel mehr wird versucht die komplexe Anatomie eines Zahnes in einzelne Bausteine (Höckerspitzen, Randleisten, Höckerabhänge) zu zerlegen, und so „Korrespondenzen“ zu finden, um jeweils gleiches mit gleichem „vergleichen“ zu können. So vermeidet man ein „Herausmitteln“ essentieller Zahnoberflächenstrukturen, wie dies bei konventioneller Überlagerung, beispielsweise von tiefen Fissuren mit bauchigen Dreieckswülsten geschieht.

Diese Korrespondenzfindung erfolgt automatisiert durch mathematische Algorithmen (ähnlich den Algorithmen, wie sie in der Videotechnologie angewendet werden). So wird in einem ersten Berechnungsdurchlauf jede Zahnoberfläche einzeln mit der des typischen Vertreters verglichen und man erhält einen Durchschnittszahn mit gemittelten Werten für Fissurentiefe, Höckerkrümmungen, Randleistengestalt usw.. Dieser Durchschnittszahn zeigt alle charakteristischen Merkmale, wie sie auch in den Lehrbüchern für Zahnmedizin und Zahntechnik beschrieben werden (Mehl 2003). In einem weiteren Generierungsdurchlauf kann man jetzt den so entstandenen Durchschnittszahn als Referenzzahn ein-

setzen, um so einen noch allgemeiner bestimmten Durchschnittszahn zu erhalten.

Neben der Referenzanalyse bedient sich das „biogenerische Zahnmodell“ der Hauptkomponentenanalyse. Von dem beschriebenen Durchschnittszahn ausgehend kann man durch Vektorverschiebung jeden in der Bibliothek aufgeführten Zahn des jeweiligen Zahntyps (z.B. oberer erster Prämolare) dreidimensional beschreiben. Letzen Endes kann auch der Referenzzahn an sich, ausgehend von einem äquidistanten Gitterfeld, als Vektorfeld in einem dreidimensionalen Raum repräsentiert werden. Somit liegen auch die einzelnen Zahnoberflächen als Vektoren vor, welche wiederum in ihrer Gesamtheit eine Punktwolke aufspannen, die man auch als den Zahnraum für einen gewissen Zahntyp ansehen kann. Sind die Zahnvektoren richtig gebildet worden (=die richtigen Korrespondenzen gefunden worden), sollten alle Linearkombinationen der vorhandenen Vektoren innerhalb dieses Zahnraumes wiederum Zahnformen ergeben, die plausibel sind und in der Natur vorkommen könnten (Mehl 2003). Da die Anzahl der Linearfaktoren sehr hoch sein muss, um Zahnoberflächen mit einer hohen Genauigkeit beschreiben zu können, kann zur Reduktion der Faktoren die Hauptkomponentenanalyse (PCA= Principal Component Analysis) herangezogen werden. Es wird also versucht, der Datenmenge aller vermessenen Zahnoberflächen mit ihren vielen verschiedenen Eigenschaften einige wenige latente (verborgene) Faktoren zu extrahieren, die für die Eigenschaften einer Zahnoberfläche bestimmend sind.

Somit ist es mit dem „biogenerischen Zahnmodell“ möglich, durch Veränderung der Parameter der einzelnen Hauptkomponenten, beliebige natürliche Zahnoberflächen nachzuempfinden.

2.6 CAD/CAM-Technologie in der Zahnmedizin

Die Bezeichnung CAD/CAM steht für Computer Aided Design (CAD) und Computer Aided Manufacturing (CAM). Die Idee und Umsetzung dieser Prozesse ist in vielen Zweigen der Industrie schon lange Stand der Technik. Zuerst wurde das rechnergestützte Design im zweidimensionalen Bereich angewandt und ersetzte das klassische Zeichenbrett. Neue Rechnergenerationen erlauben in einer akzeptablen Zeit die Konstruktion von Bauteilen, sowie die Veränderung und Beeinflussung des Bauteils am Bildschirm im dreidimensionalen Bereich (Böhm 2002).

In der Zahnmedizin wird bei der funktionellen Kauflächengestaltung von Restaurationen versucht, den konventionellen Modellierungsvorgang am Monitor zu simulieren, indem man Schritt für Schritt die Kaufläche aufbaut. Die Schwierigkeit besteht hierbei darin, dreidimensionale Geometrien auf dem zweidimensionalen Bildschirm zu visualisieren. Erstrebenswert, aber auch am schwierigsten, ist der Weg über eine nahezu automatische Kauflächengestaltung ohne Interaktion seitens des Bedieners. Die aktuellen CAD/CAM-Systeme bestehen im Prinzip aus drei Komponenten. Die erste Komponente tastet die vom Zahnarzt angefertigte Präparation intra- oder extraoral anhand von Modellen ab. Die zweite Komponente, der CAD-Bereich, besteht aus einer Computer-Einheit, mit deren Hilfe eine dreidimensionale Planung und Konstruktion des Zahnersatzes am Bildschirm vorgenommen wird. Durch die dritte Komponente, dem CAM-Bereich, wird der virtuelle Zahnersatz durch unterschiedliche Fertigungstechnologien in einen dentalen Werkstoff umgesetzt. Vornehmlich kommen heutzutage CAD/CAM-Systeme zum Einsatz, die nur Gerüste aus unterschiedlichen Werkstoffen herstellen und somit eine Grundlage für die individuelle Weiterverarbeitung durch den Zahntechniker liefern (Tinschert et al 2004). Ein nächster Schritt sollte nun darin bestehen, Verbesserungen durchzuführen, welche die Einsatzbreite, die Qualität und die

Wirtschaftlichkeit der Systeme erhöhen. Speziell der Schritt zur Kauflächengestaltung von Zahnrestorationen nimmt in der konventionellen Vorgehensweise viel Zeit in Anspruch. Eine vollautomatische Berechnung im CAD-Prozess könnte hier bei gleichzeitiger Einhaltung hoher Qualitätskriterien und Standards viel Zeit und Kosten sparen. Zur Zeit existiert jedoch noch keine allgemeingültige Beschreibung der Kauflächenmorphologie, die für alle Fälle einen akzeptablen Kauflächenvorschlag unter Einbeziehung statischer, funktioneller und morphologischer Kriterien erfüllen würde. Derzeitige Verfahrenskonzepte beruhen daher auf verschiedenen Modellvereinfachungen bzw. Teilautomatisierungen (Mehl et al 2005).

2.7 Ziele der Arbeit

In dieser Arbeit soll ein neues Modell zur mathematischen Beschreibung von Kauflächen (das Biogenerische Modell) auf seine Anwendbarkeit getestet werden.

Folgende Aufgaben und Ziele wurden bearbeitet:

1. Aufbau einer Zahnbibliothek

2. Testung des Biogenerischen Zahnmodells an Zähnen, die nicht in der Bibliothek vorhanden sind, anhand folgender Frage- und Aufgabenstellung:

- a: Wie gut (morphologisch ähnlich) können unbekannte kariesfreie Zähne ausgehend von nur unvollständiger Oberflächeninformation mit dem biogenerischen Modell beschrieben bzw. rekonstruiert werden?

- b: Bestimmung wichtiger Einflussgrößen auf den Rekonstruktionsprozess

- c: Bestimmung der Genauigkeit der Beschreibung bzw. der Rekonstruktionen

- d: Bestimmung der Variabilität der Rekonstruktionen. Wird jeweils nur ein bestimmter Typ eines Einheitszahnes generiert?

3. Bestimmung der Ähnlichkeit symmetrisch gegenüberliegender Zähne jeweils eines Probanden und Bestimmung der Variabilität natürlicher Kauflächen.

4. Untersuchung von Prothesenzähnen durch das biogenerische Zahnmodell

3. MATERIAL UND METHODEN

3.1 Erstellen einer Zahnbibliothek

Für die in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen wurde eine möglichst große Bibliothek natürlicher Zahnoberflächen angelegt. Diese Bibliothek liegt in zweifacher Ausführung vor. Zum einen in Form von Gipsmodellen, zum anderen in digitalisierter Form dreidimensionaler Datensätze.

3.1.1 Probandengut

Die Studie untersucht natürliche Kauflächen der Molaren und Prämolaren in Ober- und Unterkiefer. Hauptkriterium der Auswahl war, dass die ursprüngliche Zahnmorphologie der relevanten Zähne zum Zeitpunkt der Erfassung weitgehend unverändert sein sollte. Daher sollten die Probanden, um eine möglichst exakte Untersuchung des Kauflächenreliefs durchführen zu können, folgende Kriterien erfüllen:

- frei von Karies
- frei von Restaurationen
- frei von Versiegelungen
- möglichst frei von Abrasionen

Um diese Kriterien erfüllen zu können, schien es sinnvoll, die Probanden in einer Altersgruppe von ca. 14 bis 25 Jahren auszuwählen. Problematisch erwies sich bei den jüngeren Probanden oftmals der noch nicht vollständig erreichte Durchbruch der zweiten Molaren. Bei älteren Probanden hingegen verändert der zunehmende Abrasionsgrad die ursprüngliche Morphologie. Unter den genau-

nten Bedingungen wurden Probanden vor allem in höheren Klassenstufen verschiedener Schulen in München und Leipzig, und unter Studenten der Zahnmedizin an der Ludwig-Maximilian-Universität München gesucht. Die Auswahl erfolgte mit den üblichen Hilfsmitteln einer zahnärztlichen Untersuchung. Es konnten 86 Schüler und Studenten gefunden werden, die sich bereit erklärten bei vorliegender Studie mitzuwirken. Der Altersdurchschnitt betrug 19,3 Jahre. Ergänzt wurde die Materialsammlung mit Hilfe von 39 bereits vorliegenden Modellpaaren aus zahnärztlichen Praxen und zahntechnischen Laboratorien. Da es sich als allgemein schwierig erwies eine ausreichende Anzahl geeigneter Probanden zu finden, bei welchen alle Seitenzähne allen genannten Kriterien genügen, und eine endgültige Auswahl der geeigneten Zähne erst am Modell erfolgen kann, wurden teilweise auch nur einzelne Zähne eines Probanden verwendet. Alle Probanden stammen aus dem mitteleuropäischen Raum. Die Probanden und bei Minderjährigen die Erziehungsberechtigten wurden mittels eines Aufklärungsbogens informiert und um eine schriftliche Einverständniserklärung gebeten. Für jeden Probanden wurde ein Dokumentationsbogen mit entsprechender Registriernummer angelegt.

3.1.2 Abformung und Herstellung von Gipsmodellen

Die Abformungen der oben beschriebenen Probanden erfolgten im Zeitraum von Juli 2002 bis Juli 2003 an der LMU München und in einer Zahnarztpraxis in Leipzig. Es wurden jeweils Gesamtabformungen des Ober- und Unterkiefers mit konfektionierten, perforierten Metalllöffeln genommen. Um eine möglichst hohe Genauigkeit zu erreichen, wurde eine Polyetherabformmasse (Impregum Soft®, 3M ESPE) benutzt. Die Löffel wurden mit Hilfe einer thermoplastischen Masse (Kerr-Masse) individualisiert und durch Aufbringen eines Polyetheradhäsivs (3M Espe) vorbehandelt. 24 Stunden nach der jeweiligen Abdrucknahme wurden die Abformungen mit Superhartgips Typ IV (Fa. Picodent, Zahnkranzgips Z280, weiß) ausgegossen. Die Anrührmethodik entsprach einem

standardisierten Verfahren nach Herstellerangaben. Dazu wurden jeweils 100g Gipspulver mit 20 ml destilliertem Wasser gemischt und 40 Sekunden lang unter Vakuum angerührt. Zur Vermeidung von Lufteinschlüssen in den Modellen fand das Ausgießen auf einem Rüttler statt.

Nach zwei Stunden konnten die Gipsmodelle auf eine geeignete Größe getrimmt werden und mit einer diamantbesetzten Metalltrennscheibe die einzelnen Zähne herausgesägt und beschriftet werden. Besonders sorgfältig wurde im Bereich der Approximalkontakte vorgegangen, um die ursprüngliche Morphologie nicht zu verändern.

Bei den so entstandenen Einzelzahnmodellen wurde eine Stufe am Übergang von der klinischen Krone zur Gingiva eingefräst um bei Datenerfassung durch das 3D-Scansystem zu gewährleisten, dass lediglich die zu analysierende klinische Krone erfasst wird. Alle fehlerhaften Modelle (z.B. durch Blasenbildung während der Abformung oder des Ausgusses) wurden aussortiert. Kleine Gipsperlen auf den Modellen wurden unter Zuhilfenahme eines Skalpells weggesprengt. Ein zweiter Ausguss wurde zu Dokumentationszwecken angefertigt.



Abb.13: Modellpaar



Abb.14: Einzelzahnmodell

3.1.3 Vermessung

Die Einzelzahn-gipsmodelle wurden mit einem optischen 3D-Sensor (Laser Scan 3D Pro, Willitec (Mehl 1996)) aus zwei unterschiedlichen Richtungen vermessen. Durch Überlagerung dieser Teilansichten und Bearbeitung mittels eines Softwareprogrammes konnte eine vollständige 3D-Ansicht erstellt werden.

3.1.3.1 Prinzip des 3D-Liniensensors

Die Beleuchtungseinheit in Form einer Halbleiter-Laserdiode (670nm) wird über eine spezielle Linienoptik in eine Lichtlinie umgewandelt, die auf die zu vermessende Objektoberfläche projiziert wird. Die Lichtlinie wird unter dem Triangulationswinkel durch die Beobachtungsoptik auf einen CCD-Kamerachip abgebildet. Höhenunterschiede des Profils werden dadurch in einen lateralen Versatz auf dem CCD-Chip überführt. Durch Eichung kann man dann aus der

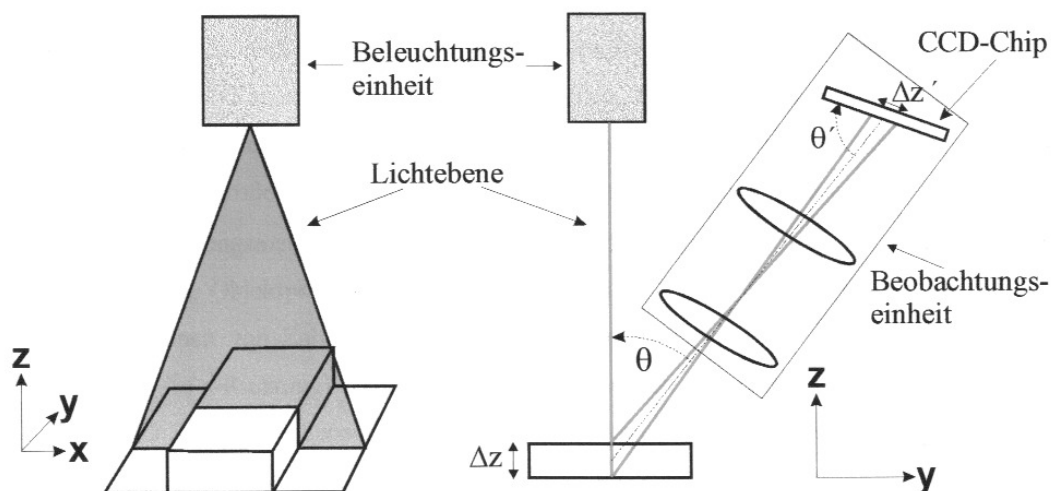


Abb.15: Triangulationsanordnung des Scanners

Größe des Versatzes die Höhe im Objektraum zurückrechnen. Der Tiefenschärfebereich liegt bei maximal 3,6 cm, ohne dass Einbußen in der Messgenauigkeit hingenommen werden müssen. Die gesamte 3D-Oberfläche erhält man

durch schrittweises Verfahren des Objektes auf einem Verschiebetisch in y-Richtung.

Der Abstand zwischen den einzelnen vermessenen Linienprofilen ist individuell einstellbar und betrug in dieser Arbeit 30 μm . Ein einzelnes Lichtprofil enthält die Information von 512 Oberflächenpunkten. Eine Zahnoberfläche wurde mit einem Punkteabstand von ca. 30 μm x 30 μm (x,y) vermessen und wird somit durch bis zu 200.000 Messpunkte beschrieben. Die Werte wurden im binären Datenformat (*.xv Dateien) abgespeichert.

Vorteile gegenüber den in der Literaturübersicht (2.2.3) beschriebenen dreidimensionalen Messvorrichtungen werden insbesondere in der in kurzer Zeit und hoher Genauigkeit (Reproduzierbarkeit bis zu 1 μm) gewonnenen hohen Messpunktdichte (250 000 Oberflächenpunkte in ca. 30 Sekunden) gesehen, die für eine exakte Vermessung der äußerst komplex aufgebauten Zahnoberfläche essentiell wichtig ist.

3.2.1.2 Positionierung der Einzelzahnmodelle

Die vorbereiteten Einzelzahnmodelle (siehe Kap.3.1.2) wurden in einer Aufspannvorrichtung eingebracht und mit einer plastilin-ähnlichen Masse fixiert. Diese Vorrichtung ist in einem Kugelgelenk gelagert und konnte manuell in allen drei Richtungen gedreht werden. Der Zahn wurde dadurch so eingestellt, dass die Kaufläche möglichst gut erfasst werden konnte. Zusätzlich erforderlich war, das Objekt im Messbereich in x-Richtung und in z-Richtung (Höhe) positionieren zu können.

Aufgrund der Triangulationsanordnung des Sensors wird in einem einzelnen Messvorgang nie der gesamte Zahn dreidimensional vermessen werden können, da an sensorabgewandten, steilen Zahnabhängen prinzipiell Abschattungen auftreten. Daher muss ein Zahn aus mindestens zwei unterschiedlichen

Richtungen gescannt werden. In vorliegender Arbeit wurden die Einzelzahnmodelle nach der ersten Vermessung um ca. 180° um die Vertikale (z-Richtung) rotiert und eine zweite Vermessung vorgenommen. Die einzelnen Scans wurden anschließend automatisch mit Hilfe eines Matching-Programms zu einer vollständigen 3D-Ansicht überlagert.

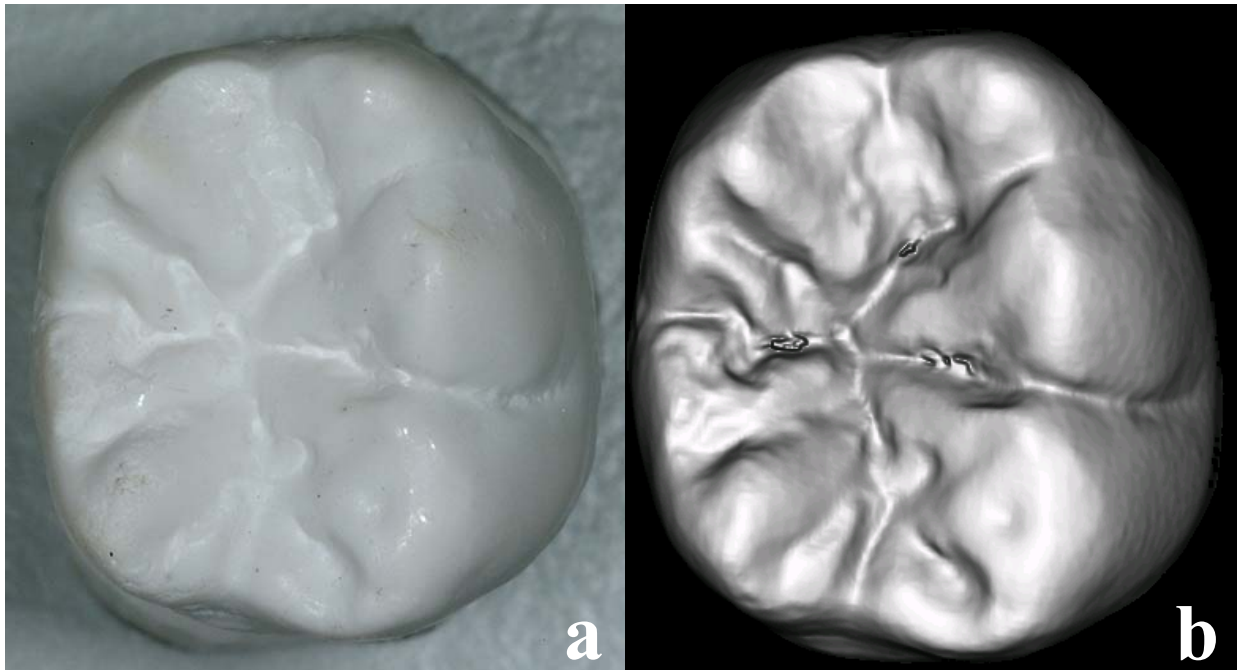


Abb. 16: **a:** Gipszahn nach Bearbeitung; **b:** gescannte Oberfläche

3.1.4 Bearbeitung der Datensätze

Nach der eigentlichen Vermessung müssen die zwei Ansichten des Einzelzahnmodelles zu einer Gesamtübersicht zusammengelegt werden. Dies dient zur Vervollständigung von abgeschatteten oder untersichgehenden Bereichen. Die Überlagerung der einzelnen Ansichten erfordert keine exakte Kenntnis der Rotations- und Translationsparameter, sondern wird durch ein spezielles Matching-Programm (Match3D 2.4, Gloger 2004) durchgeführt. Dieses verschiebt und dreht die Ansichten nach einem speziellen Algorithmus so lange zueinander, bis die Superposition optimal ist. Entsprechende Fehlstellen des ersten Scanprozesses können danach mit Daten des zweiten Scans aufgefüllt werden.

Die Datensätze wurden nach Zahntypen (OK 4, OK 5, OK 6,...) geordnet. Jeweils ein typischer Vertreter (=Referenzzahn) wurde nach Augenschein ausgewählt. Um sicherzustellen, dass alle Kauflächen eines Typs möglichst ähnlich im dreidimensionalen Raum ausgerichtet sind, wurden alle Zahnoberflächen nochmals mittels oben genannten Matchingprogramms superpositioniert. Zähne aus den symmetrisch gegenüberliegenden Kieferhälften der jeweiligen Referenzzähne wurden vor der Überlagerung achsenspiegelt.

<i>Zahn</i>	Anzahl	<i>Zahn</i>	Anzahl	<i>Zahn</i>	Anzahl	<i>Zahn</i>	Anzahl
<i>14</i>	102	<i>24</i>	108	<i>34</i>	94	<i>44</i>	96
<i>15</i>	104	<i>25</i>	98	<i>35</i>	89	<i>45</i>	90
<i>16</i>	101	<i>26</i>	95	<i>36</i>	91	<i>46</i>	89
<i>17</i>	87	<i>27</i>	90	<i>37</i>	80	<i>47</i>	78

Tabelle 1: Zahnbibliothek

3.2 Bearbeitung der Bibliothek mittels des „Biogenerischen Zahnmodells“

Die ausgerichteten dreidimensionalen Datensätze wurden dann nach einem von Mehl (2003, „Der biogenerische Zahn“) vorgestellten mathematischen Verfahren bearbeitet (siehe Kapitel 2.5).

3.3 Generierung unbekannter Zahnoberflächen

Um das Modell an unbekanntem Oberflächen zu testen, wurden von weiteren 8 Probanden Abformungen genommen (wie in 3.1.2 beschrieben). In analoger Weise wurden deren Zahnoberflächen nach Modellherstellung vermessen. Anhand des biogenerischen Modells wurde versucht, die unbekanntem Zahnoberflächen unter Berücksichtigung verschiedener Parameter und Teilfunktionen optimal zu rekonstruieren. Die Berechnungen wurden im Programm Dent Visual (Mehl 2003) anhand von 4 Oberkiefermolaren und 3 Unterkiefermolaren durchgeführt. Folgende Parameter und Teilfunktionen wurden berücksichtigt:

1. Zahl der **Hauptkomponenten (PC)**. Je mehr Hauptkomponenten im Generierungsprozess berücksichtigt werden, desto detailgetreuere Oberflächen können erzeugt und beschrieben werden.

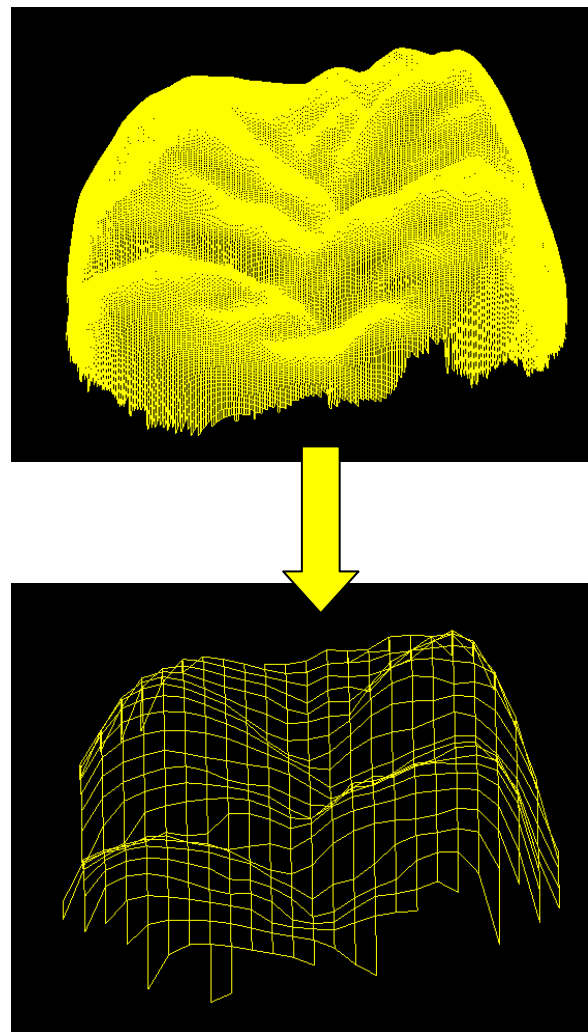


Abb 17: Datenreduktion einer Kaufläche

2. Anzahl der **Berechnungsdurchläufe** (additional iterations = **add it**). Es wurden mehrere Berechnungsdurchläufe durchgeführt, die, bezogen auf die vorher berechneten Ergebnisse, eine weitere Verfeinerung der Anpassung ermöglichten.
3. **Reduktionsfaktor (grid step)** der gegebenen Punktmenge und resultierend daraus die zur Generierung vorgegebenen Punkte (**points**). So bedeutet beispielsweise ein Reduktionsfaktor von 36, dass in dem bestehenden Gitternetz der Punkte jeweils in x-Richtung und in y-Richtung nur jeder 36-te Punkt ausgesucht wird. So reduziert sich in diesem Falle die Zahl der oberflächenbeschreibenden Punkte von ca. 60 000 auf ca. 45. Daraus resultiert eine in ihren Strukturen rudimentäre Zahnoberfläche (siehe Abbildung 18 und 20).

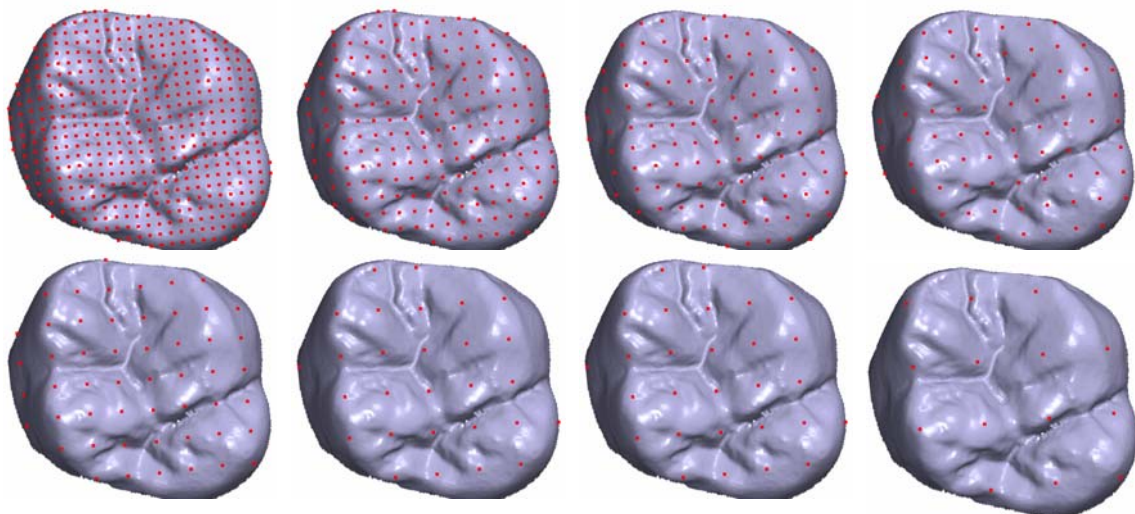


Abb.18: Reduktion der Punktmenge: Grid step 12, 18, 24, 30, 36, 48, 60 und 72;
rot = vorgegebene Punkte

4. **Wahrscheinlichkeitsfaktor (η =eta_faktor)**. Je höher der η -Faktor ist, umso näher am Durchschnittszahn wird die Rekonstruktion berechnet. Je geringer der Wert des η -Faktors, desto freier wird eine Rekonstruktion generiert und desto weiter kann sich auch eine Rekonstruktion von dem jeweiligen Durchschnittszahn wegbewegen. Der Durchschnittszahn ist aber, geht man davon aus, dass die natürlichen Zahnoberflächen in einem

„Zahnraum“ normalverteilt sind, die wahrscheinlichste Zahnoberfläche. Hat man nun sehr wenige Punkte bei einem sehr kleinen η -Faktor (=großer Freiheitsgrad) gegeben, ist davon auszugehen, dass eine zahnuntypische Morphologie generiert wird. Andererseits wird z.B. bei sehr viel Vorabinformation (=viele gegebene Punkte) und hohem η -Faktor eine Rekonstruktion stark in das „Korsett“ des Durchschnittszahns gezwungen und kann somit die individuelle Morphologie eines Zahnes nur ungenügend darstellen. Es gilt somit ein sinnvolles Verhältnis aus gegebener Vorabinformation und individueller Gestaltungsfreiheit herauszufinden.

Die Oberkiefermolaren wurden jeweils mit dem Oberkiefermodell generiert. Die Unterkiefermolaren wurden mit dem Unterkiefermodell generiert. Zusätzlich wurde der Unterkieferzahn 01_46 (Proband 1, Zahn 46) mit dem Oberkiefermodell generiert. Die genaue Zusammensetzung der Rekonstruktionsparameter ist in der Tabelle 2 ausgeführt.

Rekonstruktions-Parameter	Quantität	Wert
Wahrscheinlichkeitsfaktor	5	4; 16; 64; 256; 1024
Hauptkomponenten	5	30; 90; 150; 210; 270
Berechnungsdurchläufe	4	2; 4; 6; 8
Reduktionsfaktor	8	12;24;36;42; 48;54;60;72
Rekonstruktionen pro Zahn	800	

Tabelle 2: Kombination der Rekonstruktionsparameter

Nach dem Öffnen (=Importieren) der jeweiligen Zahndatei (Dateiformat *.xv) im Programm Dent Visual 2005 erfolgte eine Markierung von vier Höckerspitzen. In der Menüleiste wurde durch Mausklick das Pull-Down-Menü Generic Tooth geöffnet und der Befehl Reconstruct Crown nach Einstellung der individuellen Parameter (grid step, PC, add it) ausgeführt. In der sich öffnenden Registrierkarte wurden auf dem repräsentativen Zahn die jeweiligen Höckerspitzen in gleicher Reihenfolge wie auf dem Originalzahn markiert und somit eine erste grobe Orientierung zur Ausrichtung der Rekonstruktion gegeben.

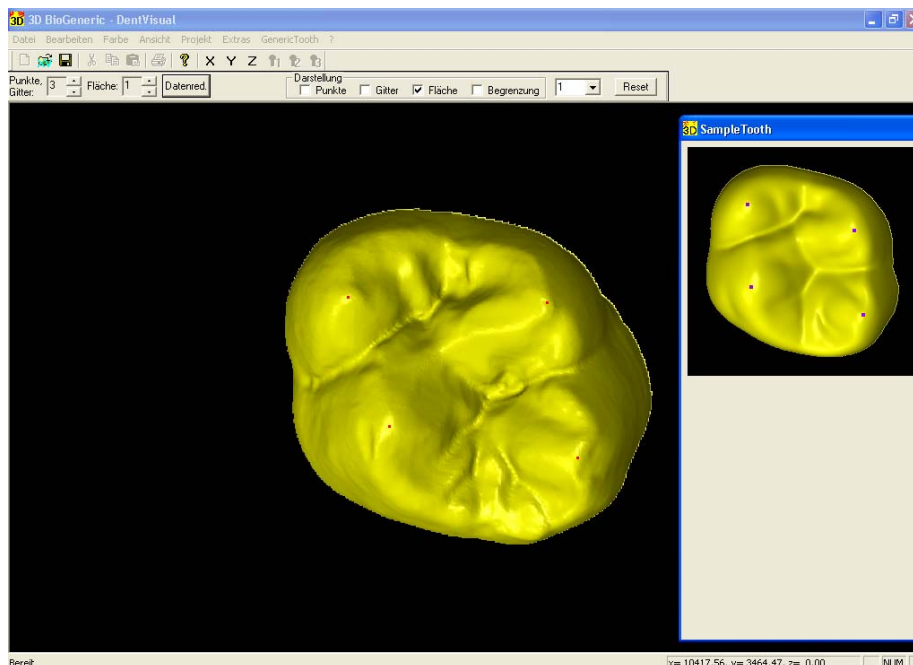


Abb. 19: Programm Dent Visual mit geöffnetem Datensatz und Registrierkarte

Die erhaltenen Kauflächenrekonstruktionen wurden dann auf Ihre Ähnlichkeit hin mit den jeweiligen Ausgangskauf Flächen verglichen (siehe Statistische Auswertungen Kapitel 3.6).

Eine Visualisierung der errechneten Zahnoberflächen wurde durch die Umwandlung der *.xv Dateien in *.tif Dateien (Anwendungsbefehl von Gloger 2005) ermöglicht. Im Folgenden wurden alle Rekonstruktionen, die sich durch

zahnuntypische Formen auszeichnen, verworfen und unter den übrig gebliebenen jene Zahnoberflächen herausgefiltert, die dem Ursprungszahn am ähnlichsten sehen (visuelle Auswertung). Aus diesen wurde dann derjenige Zahn mit der geringsten Standardabweichung ($\text{std dev}_{\text{gen}}$) als beste Rekonstruktion ausgesucht.

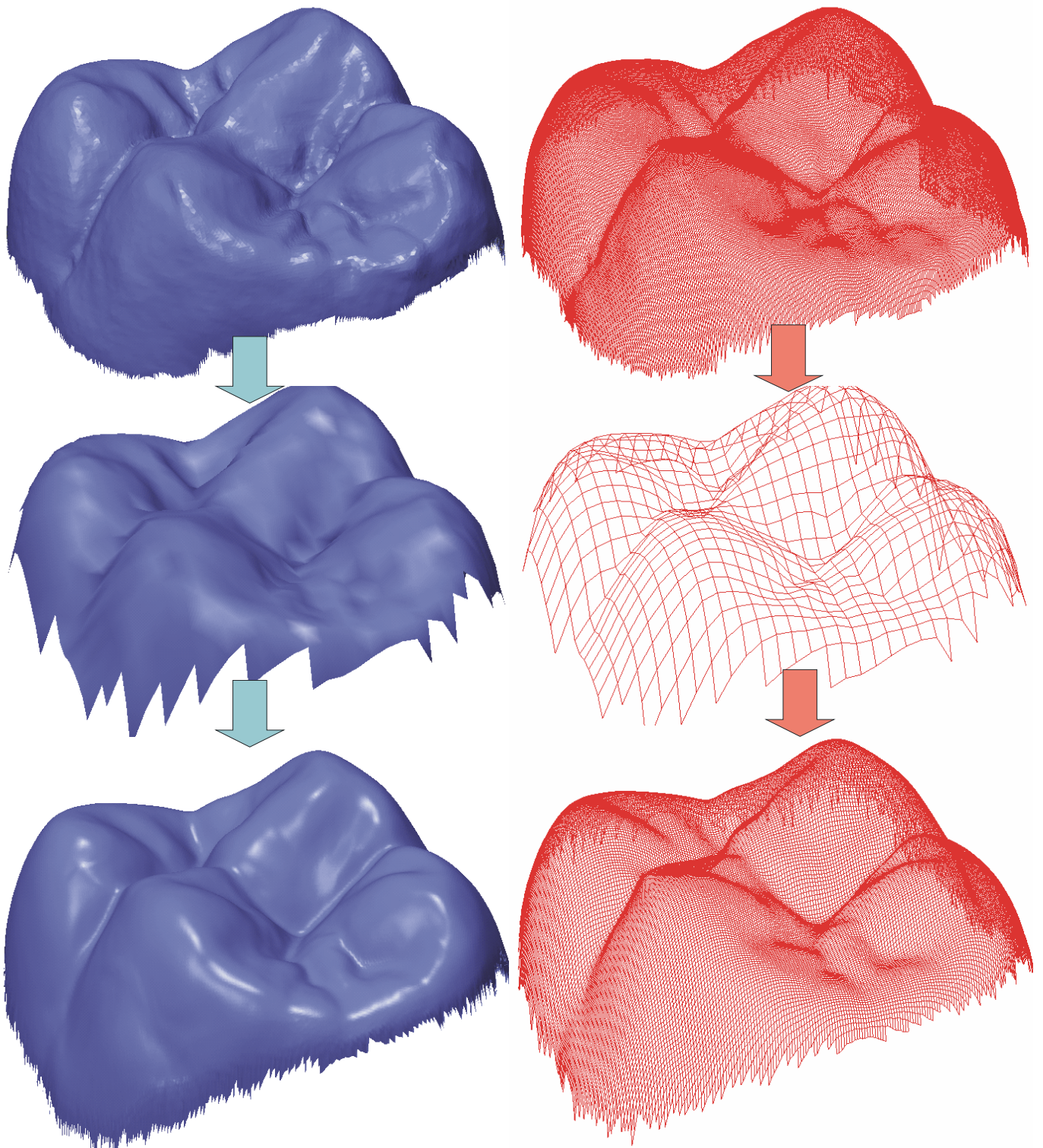
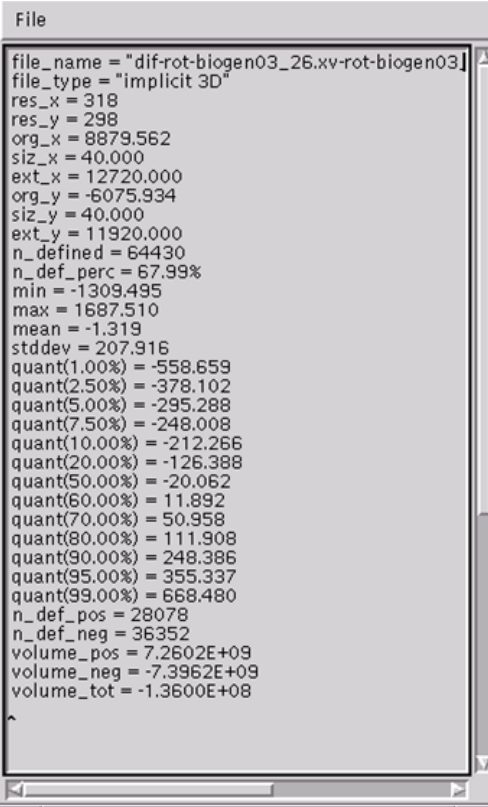


Abb. 20: Darstellung des Berechnungsprozesses. Links in der Flächendarstellung und rechts in der Gitterdarstellung. Oben: unbekannte Zahnoberfläche; Mitte: reduzierte unbekannte Zahnoberfläche; Unten: mittels biogenerischem Modell parametrisierte Zahnoberfläche

3.4 Bestimmung der Ähnlichkeit symmetrisch gegenüberliegender Zähne

Die Zähne der rechten und der linken Seite eines Probanden besitzen jeweils eine sehr hohe Ähnlichkeit (siehe Abbildung 22 und 23). Anhand der Untersuchung der Standardabweichung soll gezeigt werden, ob sich diese Symmetrie metrisch ausdrücken lässt.

159 Paare erster Ober- und 134 Paare erster Unterkiefermolaren wurden auf ihre Ähnlichkeit hin untersucht. Im Softwareprogramm Match3D 2.4 (Gloger 2004) wurden jeweils die beiden symmetrischen Zahndatensätze eines Patienten geöffnet. Nach Achsenspiegelung des Zahnes 26 wurden in beiden Bildern durch Mausklick manuell 3 Referenzpunkte in gleicher Reihenfolge markiert. Nach Öffnen des Pull-Down-Menus „Model“ wurde der Überlagerungsprozess im Matching Control Panel initiiert. Die beiden Datensätze wurden dabei in einem Minimierungsprozess durch Rotation und Translation möglichst gut übereinander gelagert. Nach Erstellung eines Differenzbildes wurden die Werte der Standardabweichung, des 20% Quantils, 80%-Quantils und des Medians in einer separaten Datei im Format *.stat abgespeichert (siehe auch Kapitel 3.6, Statistische Auswertungen).



```

File
file_name = "dif-rot-biogen03_26.xv-rot-biogen03]
file_type = "implicit 3D"
res_x = 318
res_y = 298
org_x = 8879.562
siz_x = 40.000
ext_x = 12720.000
org_y = -6075.934
siz_y = 40.000
ext_y = 11920.000
n_defined = 64430
n_def_perc = 67.99%
min = -1309.495
max = 1687.510
mean = -1.319
stddev = 207.916
quant(1.00%) = -558.659
quant(2.50%) = -378.102
quant(5.00%) = -295.288
quant(7.50%) = -248.008
quant(10.00%) = -212.266
quant(20.00%) = -126.388
quant(50.00%) = -20.062
quant(60.00%) = 11.892
quant(70.00%) = 50.958
quant(80.00%) = 111.908
quant(90.00%) = 248.386
quant(95.00%) = 355.337
quant(99.00%) = 668.480
n_def_pos = 28078
n_def_neg = 36352
volume_pos = 7.2602E+09
volume_neg = -7.3962E+09
volume_tot = -1.3600E+08
  
```

Abb.21: Statistik eines Differenzbildes

In gleicher Weise wurde die Ähnlichkeit der Ober- und Unterkiefer-Sechsjahresmolaren verschiedener Patienten zueinander untersucht. Dabei wurden jeweils zwei Zähne unterschiedlicher Patienten überlagert und nach

Erstellung eines Differenzbildes die statistischen Werte (Standardabweichung, 20%-Quantil, 80%-Quantil und Median) genommen. 23664 Überlagerungen wurden für den Ober- und 5947 für den Unterkiefer vorgenommen.

Ebenso wurden die besten parametrisierten Kauflächen mit den jeweiligen Ausgangskauf Flächen superpositioniert. Die auf diese Weise gefunden Werte wurden daraufhin mit den der symmetrisch gegenüberliegenden und den der unterschiedlicher Probanden in Relation gesetzt.

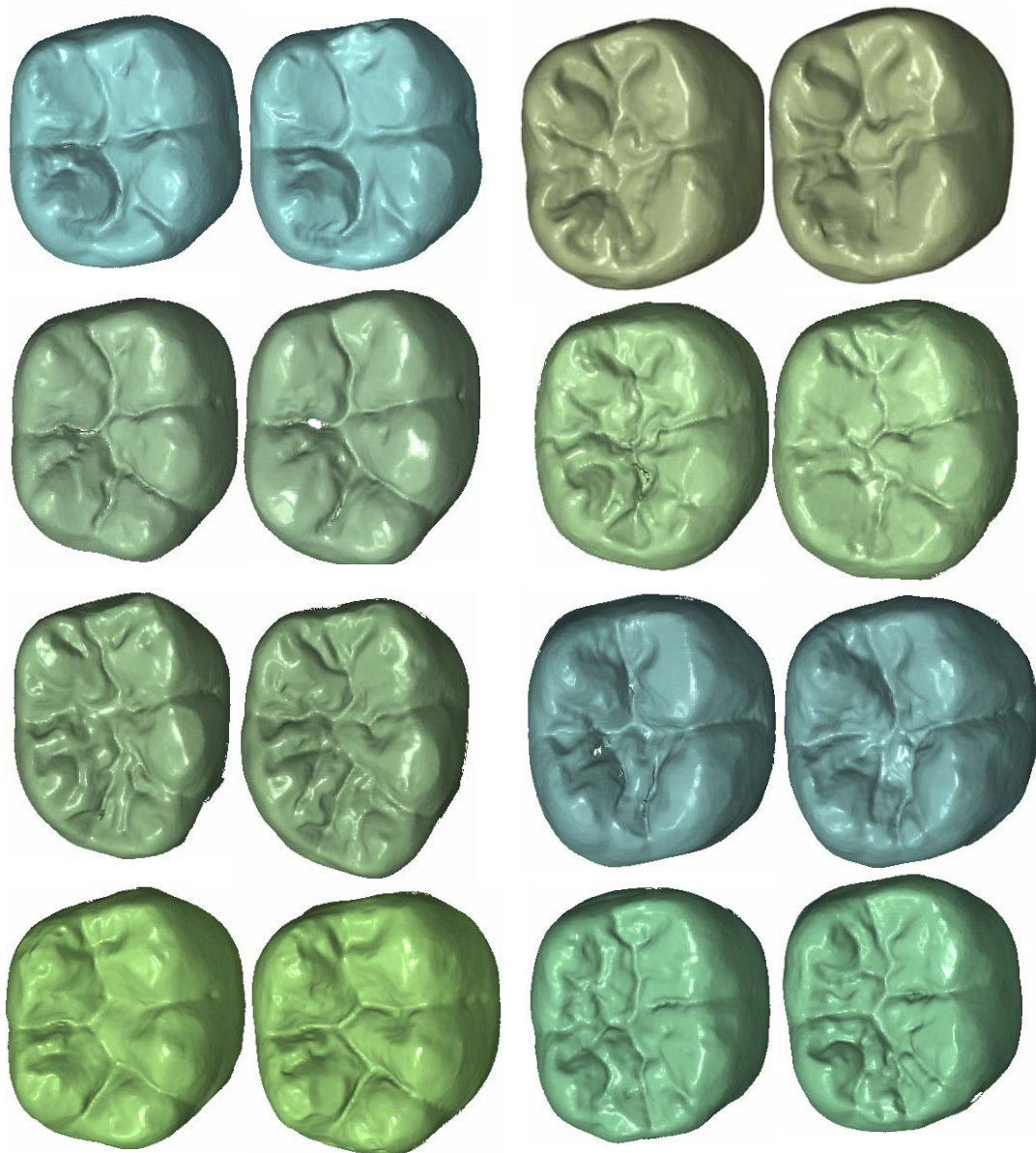


Abb.22: Auszug aus der Zahnbibliothek: Jeweils rechter und linker erster Unterkiefermolar eines Patienten

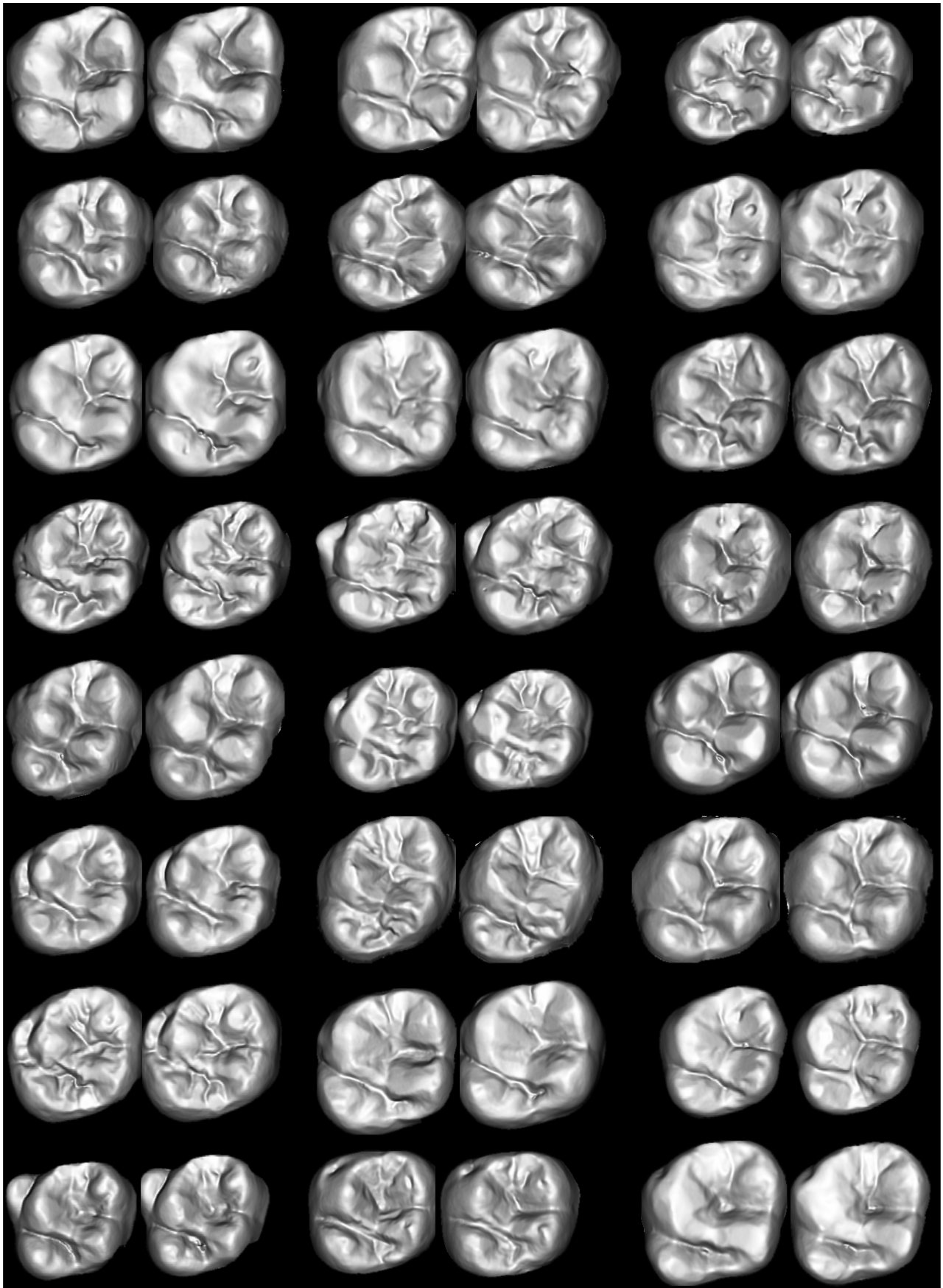


Abb.23: Auszug aus der Zahnbibliothek: Jeweils rechter und linker erster oberer Molar eines Patienten

3.5 Beschreibung von Prothesenzähnen mittels des Biogenerischen Modells

Sieben Prothesenzähne wurden anhand des Biogenerischen Modells untersucht (siehe Abb. 24). Es sollte festgestellt werden, ob diese künstlichen, von Experten (Zahntechniker und Zahnärzte) hergestellten „Durchschnittszähne“ von dem Modell beschrieben werden können und damit im Raum der natürlichen Zahnoberflächen liegen.

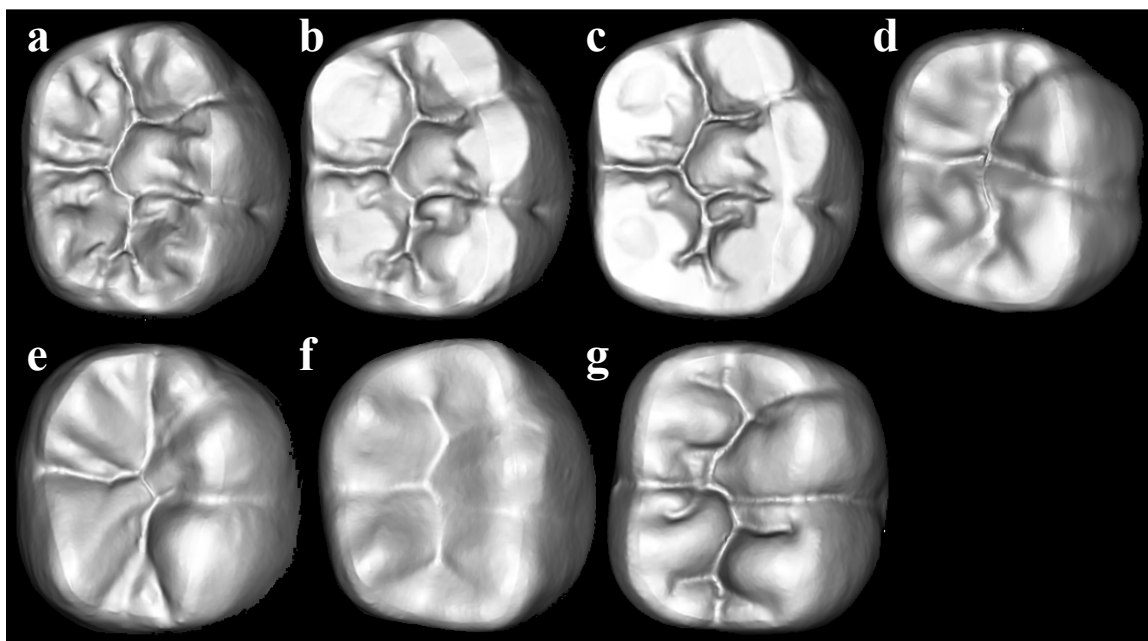


Abb.24:Prothesenzähne: **a:** Lee Culp Youth; **b:** Lee Culp Adult; **c:** Lee Culp Mature; **d:** Heraeus Kulzer Premium Posterior; **e:** Ivoclar; **f:** AsiaDatabase; **g:** VITA Physiodens Posteriores

Für jeden Prothesenzahn wurden unter Verwendung des Biogenerischen Zahnmodells 100 Oberflächen berechnet.

Rekonstruktionsfaktoren	Werte
Points/Grid step	12
Eta-Faktor (η)	4; 16; 64; 265; 1024
Hauptkomponenten(PC)	30; 90; 150; 210; 270
Durchläufe (add_it)	2; 4; 6; 8
entspricht 100 generierten Rekonstruktionen pro Prothesenzahn	

Tabelle 3: Übersicht der berücksichtigten Rekonstruktionsparameter

Nach Sichtung aller Rekonstruktionen wurde eine Kombination von Parametern gesucht, die in allen Fällen die beste Anpassung an die Ursprungskauffläche ermöglichen. Um die Eigenschaften der einzelnen Prothesenzähne deutlich voneinander abgrenzen zu können, wurde eine Kombination an Variablen ausgewählt, von der man sich eine gewisse Indikatorwirkung erhofft:

- 8 Durchläufe (add it), um möglichst genaue Rekonstruktionen zu generieren
- Einen relativ hohen Eta-Faktor (η) von 64, um die Rekonstruktion nicht zu variabel zu gestalten, da die untersuchten Prothesenzähne einen relativ durchschnittlichen Vertreter Ihres Zahntyps repräsentieren. Der starke „Glättungsfaktor“ soll zudem verhindern, dass es zu Oberflächenunebenheiten bei lediglich schon geringen Abweichungen von natürlichen Zahnformen kommt.
- 270 Hauptkomponenten (PC), um möglichst viele Details der Kaufflächen berücksichtigen zu können.
- Ein Grid Step von 8, um möglichst viel Information über die Prothesenzahnmorphologie zu haben.

3.6 Statistische Auswertung

Als Maß für die Ähnlichkeit zweier Kauflächen wurden zwei unterschiedliche Messverfahren herangezogen. Zum einen wurde die Standardabweichung über den geringsten Abstand betrachtet und zum anderen wurde ein Differenzwert durch z-Projektion bestimmt.

Die Standardabweichung über den geringsten Abstand ($\text{std dev}_{\text{gen}}$) wurde im Program Dent Visual 2004 gewonnen, indem jeweils einem Punkt der einen Kaufläche, der jeweils nächstliegende Punkt der anderen Kaufläche zugeordnet wurde:

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

Dies konnte immer dann geschehen, wenn die zu vergleichenden Oberflächen in gleicher Weise im Raum angeordnet waren. Das war der Fall, wenn ausgehend von einigen wenigen Punkten einer Ursprungskaufläche eine andere Zahnoberfläche mit gleicher räumlicher Orientierung neu generiert wurde.

In allen anderen Fällen zweier beliebig im Raum angeordneter Oberflächen mussten diese erst möglichst deckungsgleich überlagert werden. Dies geschah durch Rotation und Translation mittels Minimierungsalgorithmen im Programm Match 3D Vers2.4 (Gloger 2004). 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.

Dies führt gerade im Randbereich der Objekte zu vereinzelt sehr hohen Abweichungen, welche 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.

$$\text{Z-Differenzwert} = \frac{Q_8 - Q_2}{2}$$

Im Anschluss wurde anhand dieser unterschiedlich ermittelten Standardabweichungen eine Korrelationsanalyse nach Pearson durchgeführt. Hierbei wurden zusätzlich noch die 1, 5, 95 und 99% Quantile berücksichtigt.

Die Statistische Auswertung fand unter Windows mit SPSS 13.0 statt.

4. ERGEBNISSE

4.1 Parametrisierung unbekannter Zahnoberflächen mittels des biogenerischen Zahnmodells

Das biogenerische Modell wurde anhand von sieben unbekanntem Sechsjahresmolaren getestet. Die Auswirkung der einzelnen Parameter auf die Anpassung wird im Folgenden aufgeführt.

4.1.1 Eta Faktor

Die Wirkung des **Eta Faktors** ($=\eta$) kann Abbildung 25 und 26 entnommen werden. Der Eta-Faktor kann als eine Art Glättungsfaktor oder auch Wahrscheinlichkeitsfaktor interpretiert werden. Je höher der Glättungsfaktor, desto näher am Durchschnittszahn wird die Kaufläche generiert. Mit sinkendem Eta-Faktor kann jedoch eine sehr individuelle, aber manchmal unwahrscheinlichere (bezogen auf die in der Natur vorkommenden Zahnformen) Oberfläche konstruiert werden. Ist der Eta-Faktor jedoch wie in Abbildung 27 sehr hoch, so wird eine Art Einheitszahn generiert.

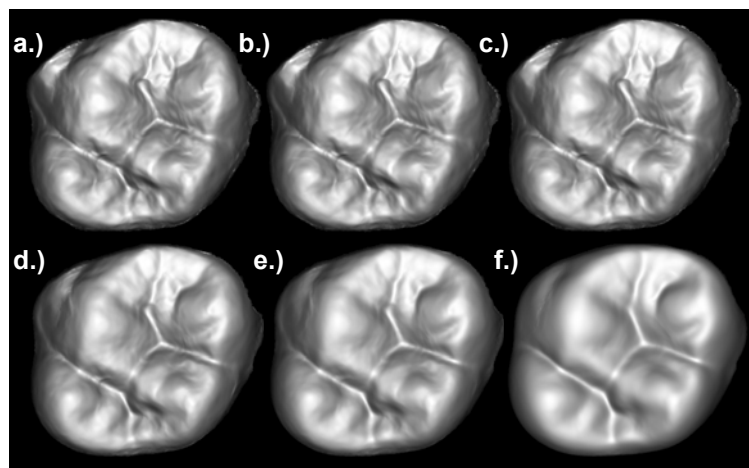


Abb 25: Rekonstruktion des Zahns 01_16 mit gleich bleibender Anzahl an Hauptkomponenten (PC=210) nach 2 Durchläufen mit zunehmenden Eta Faktor: **a:** $\eta=0,06$; **b:** $\eta=0,25$; **c:** $\eta=1$; **d:** $\eta=4$; **e:** $\eta=16$ und **f:** $\eta=256$

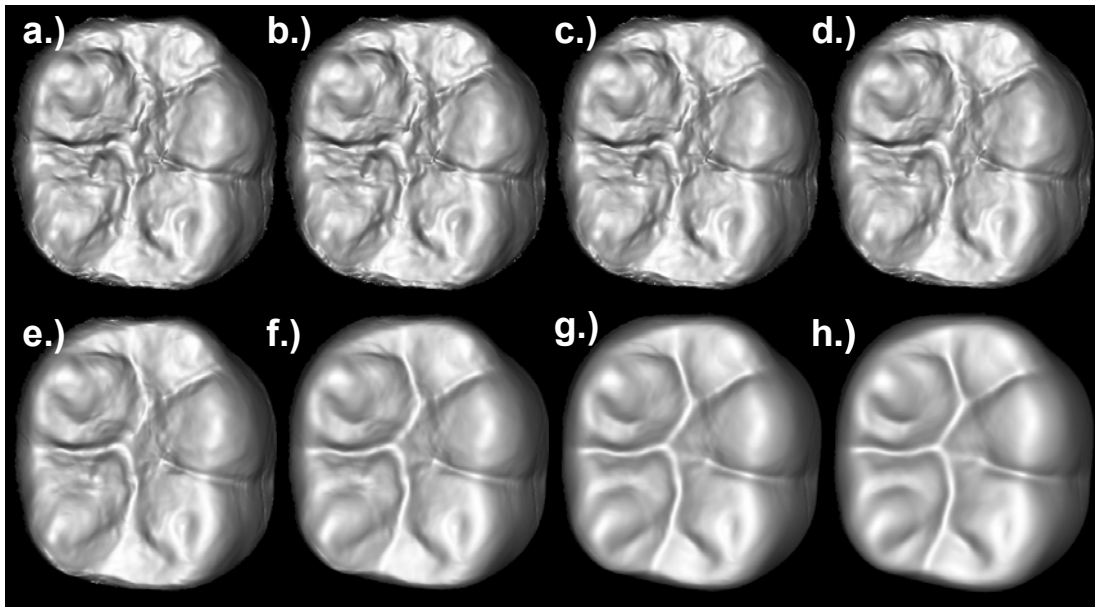


Abb 26: Rekonstruktion des Zahnes 03_46 mit gleich bleibender Anzahl an Hauptkomponenten (PC=210) nach 4 Durchläufen mit zunehmenden Eta Faktor
a: $\eta=0,06$; **b:** $\eta=0,25$; **c:** $\eta=1$; **d:** $\eta=4$; **e:** $\eta=16$ **f:** $\eta=64$; **g:** $\eta=256$ und **h:** $\eta=1024$

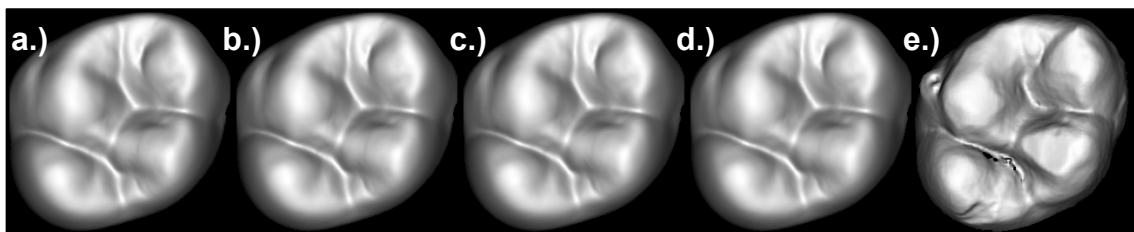


Abb 27: Rekonstruktion des Zahnes 06_16 mit sehr hohem Eta-Faktor ($\eta=1024$) nach 2 Durchläufen mit gleich bleibender Gitterkonstante ($g=12$) unter Berücksichtigung zunehmender Anzahl an Hauptkomponenten: **a:** PC=30, **b:** PC=90, **c:** PC=150, **d:** PC=270 und **e:** Ausgangszahn

Bei einem sehr niedrigen Eta-Faktor ist der Freiheitsgrad der Rekonstruktion teilweise so hoch, dass in Extremfällen sehr wellige, zahnuntypische Formen geschaffen werden (siehe Abbildung 25 a-d und 29 h-k). Vergleicht man die Abbildungen 29 und 30, so kann man erkennen wie beispielsweise ein sehr niedriger Eta-Faktor von 0,25 es dem Modell ermöglicht ein sehr deutliches Tuberculum Carabelli zu generieren, obwohl der Ausgangszahn gar keines besitzt (Problem der Überbestimmung = Overfitting).

Je kleiner der Eta-Faktor, desto geringer ist die Standardabweichung zum Ausgangszahn. Dies kann der Abbildung 28 entnommen werden.

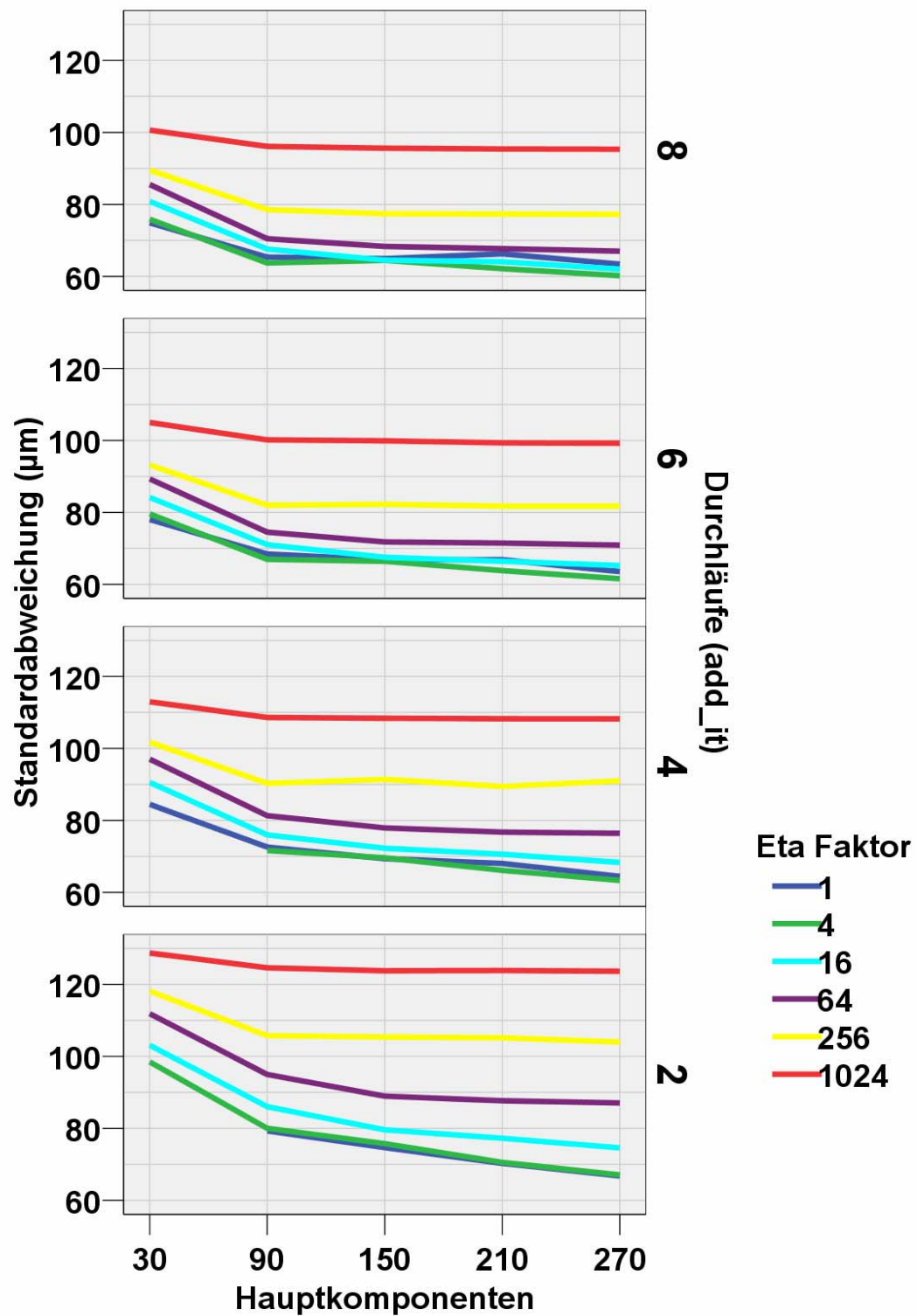


Abb. 28: Darstellung der Standardabweichung (std_dev) in Abhängigkeit des Eta_Faktors.

4.1.2 Hauptkomponenten

Je mehr **Hauptkomponenten** (Principal Components = **PC**) in die Berechnung mit einbezogen werden, desto detailgetreuer können Zahnformen beschrieben werden. So werden mit den ersten Hauptkomponenten genau die besonders variablen Hauptmerkmale beschrieben. Die Hauptkomponenten mit hohem Wert beschreiben dann noch mehr die einzelnen Feinheiten. Letztlich scheint es ab einer gewissen Zahl an Hauptkomponenten nicht mehr zu entscheidenden Verbesserungen der Zahnform zu kommen. Ab einem gewissen Punkt nehmen wohl immer mehr weniger essentielle Oberflächenstrukturen maßgeblichen Einfluss auf die Rekonstruktion. So kann Abbildung 29 entnommen werden, dass mit steigender Anzahl an Hauptkomponenten eine deutliche Formanpassung an den Ausgangszahn stattfindet. Man beachte beispielsweise die markante mesiale Randleiste. Diese Formanpassung geht jedoch mit einer zunehmend unebenen Oberflächenstruktur einher. Diese kann durch Kombination mit einem höheren Eta-Faktor wieder ausgeglichen werden (siehe Abbildung 30).

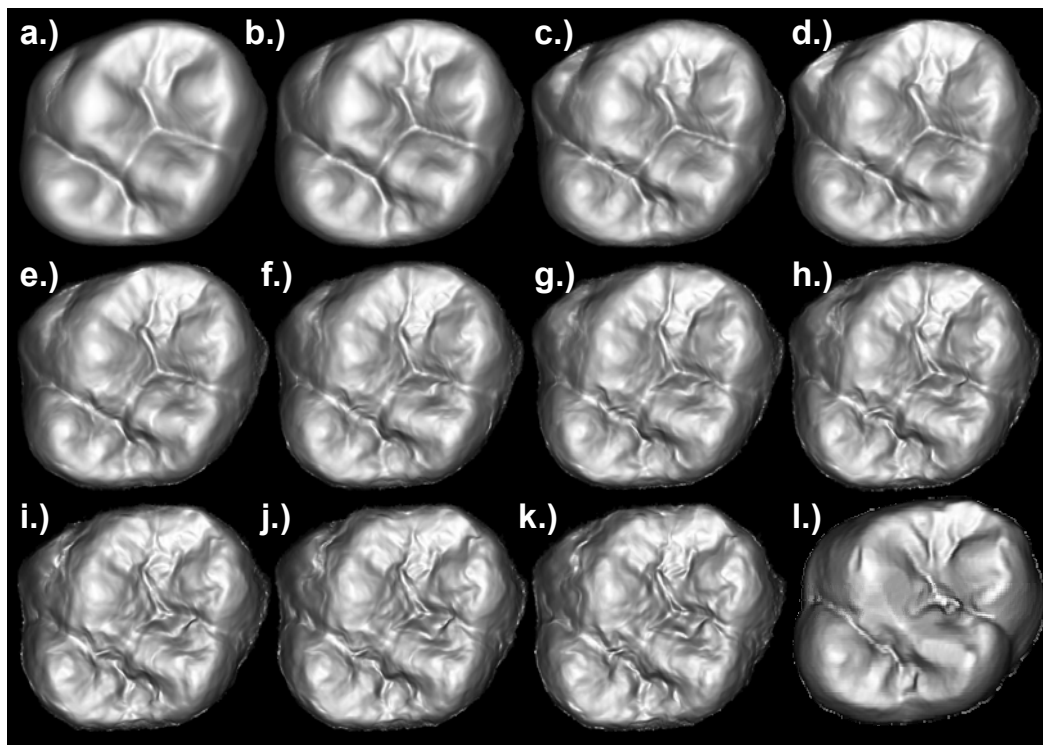


Abb 29: Rekonstruktion des Zahnes 01_16 mit nach 6 Durchläufen mit η -Faktor **0,25** unter Einbeziehung von einer zunehmenden Anzahl an Hauptkomponenten: **a:** PC=30; **b:** PC=60; **c:** PC=90; **d:** PC=120; **e:** PC=150; **f:** PC=180; **g:** PC=210; **h:** PC= 240; **i:** PC=270; **j:** PC= 300; **k:** PC= 360 und **i:** Ausgangszahn

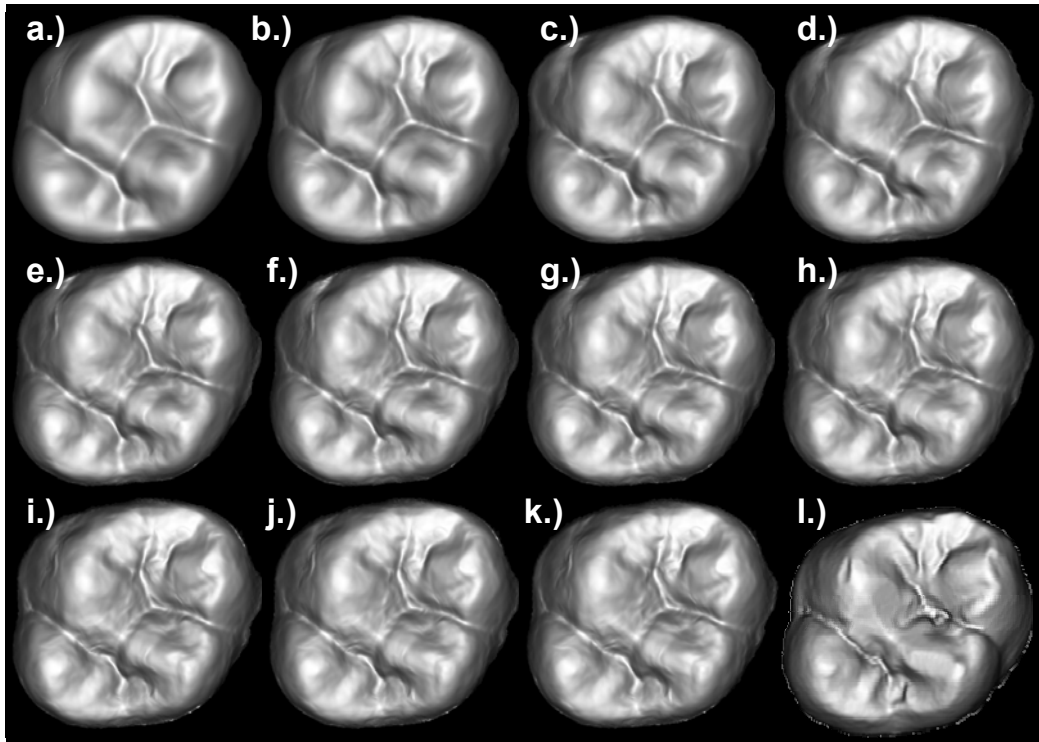


Abb 30: Rekonstruktion des Zahnes 01_16 mit nach 6 Durchläufen mit η -Faktor 4 unter Einbeziehung einer zunehmenden Anzahl an Hauptkomponenten: **a:** PC=30; **b:** PC=60; **c:** PC=90; **d:** PC=120; **e:** PC=150; **f:** PC=180; **g:** PC=210; **h:** PC= 240; **i:** PC=270; **j:** PC= 300; **k:** PC= 360 und **l:** Ausgangszahn

Zur Verdeutlichung dieser Beobachtungen werden weitere Rekonstruktionsbeispiele in Abbildung 31 und 32 gezeigt.

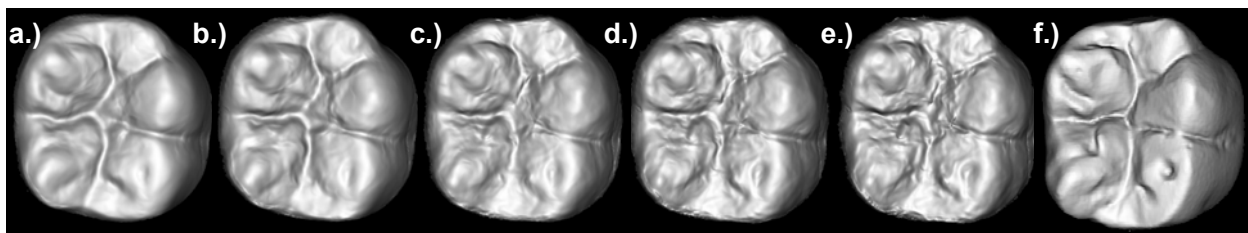


Abb 31: Rekonstruktion des Zahnes 03_46 mit η -Faktor 0,06 nach 4 Durchläufen mit **a:** PC=30; **b:** PC=60; **c:** PC=90; **d:** PC=150; **e:** PC=270 und **f:** Ausgangszahn

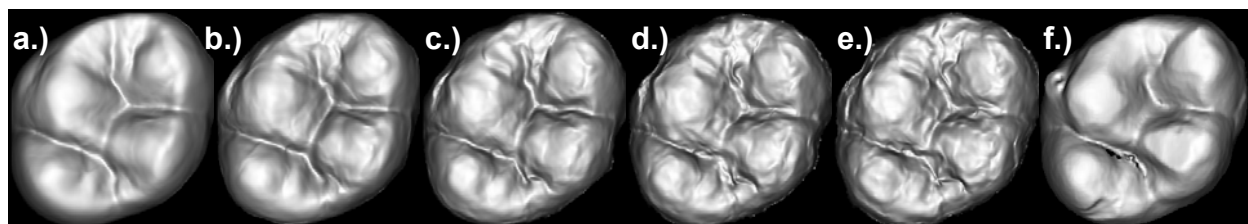


Abb 32: Rekonstruktion des Zahnes 06_16 mit η -Faktor 0,25 nach 2 Durchläufen unter Berücksichtigung zunehmender Anzahl an Hauptkomponenten: **a:** PC=30; **b:** PC=90; **c:** PC=150; **d:** PC=210; **e:** PC=270 und **f:** Ausgangszahn

Der metrische Vergleich der in Abbildung 29 und 30 gezeigten Rekonstruktionen mit dem Ausgangszahn zeigt, dass mit zunehmender Anzahl an Hauptkomponenten und sinkendem Eta-Faktor die Rekonstruktion genauer wird. Dies lässt sich anhand der Standardabweichung ($\text{stddev}_{\text{gen}}$) zeigen (siehe Abbildung 33). Diese Steigerung der Genauigkeit ist jedoch aufgrund der damit einhergehenden zunehmenden Oberflächenunebenheit limitiert.

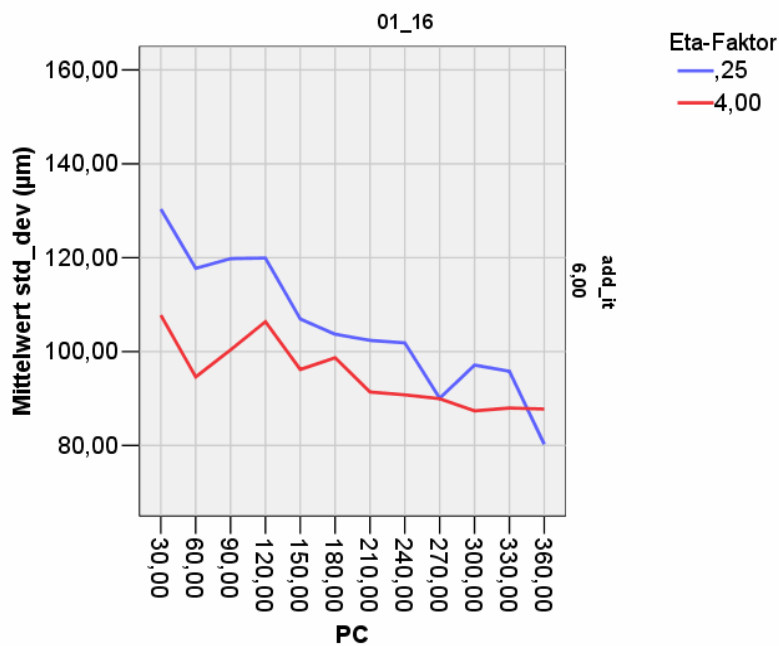


Abb. 33: Standardabweichung der in Abbildung 29 und 30 gezeigten Rekonstruktionen

4.1.3 Durchläufe

Die Anzahl der **Durchläufe** (additional Iteration = **add it**) wirkte sich visuell unwesentlich auf die Anpassungsergebnisse aus, bewirkte jedoch geringe Verbesserungen der Standardabweichungen (siehe Abbildung 34 und 35).

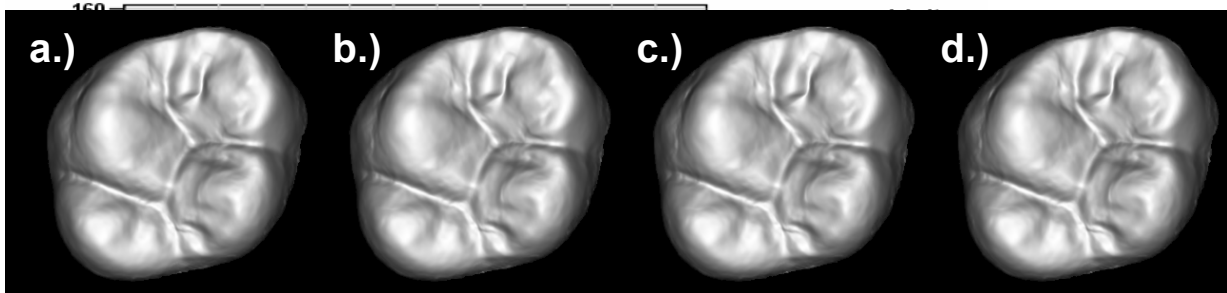


Abb.34: Rekonstruktionen (Zahn 08_16) mit gleicher Anzahl an Hauptkomponenten (PC=210) und gleich bleibendem eta-Faktor ($\eta=16$) nach verschiedenen Durchläufen (add it): **a:** 2 add it; **b:** 4 add it; **c:** 6 add it; **d:** 8 add it

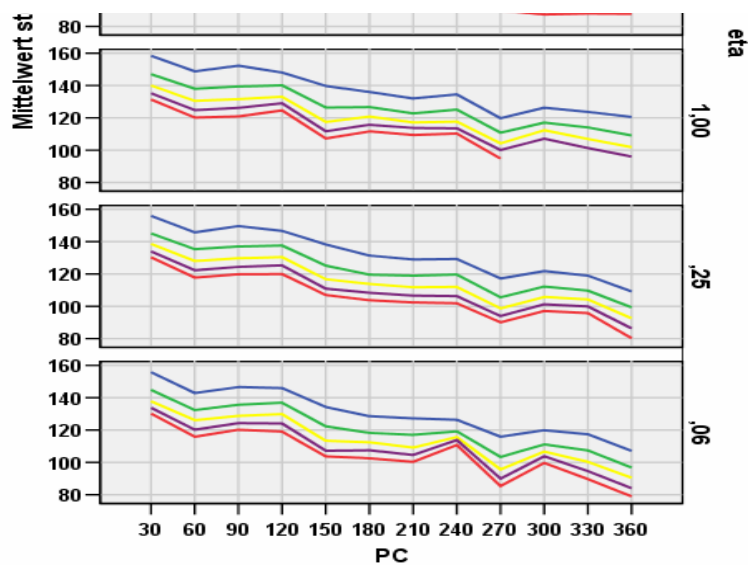


Abb. 35: Darstellung der Standardabweichung (std_dev) in Abhängigkeit von der Anzahl der Durchläufe (add it). Mit jedem Durchlauf nimmt die Genauigkeit der Rekonstruktion zu.

4.1.4 Grid Step (Auflösungsstufen)

Die Menge der gegebenen Vorinformation nimmt erheblichen Einfluss auf die Anpassung. Betrachtet man Abbildung 36, so zeigt sich, dass die mit niedrigem **Grid Step** generierten Oberflächen dem Ursprungszahn deutlich ähnlicher sehen. Einige wesentliche Charakteristika des Ursprungszahns, wie beispielsweise die rhomboide Umrissform mit dem sehr ausladenden disto-palatinalen Höcker, spiegeln sich aber auch noch in den Rekonstruktionen wieder, welche mit weniger als 30 Punkten (entspricht Grid Step 48, siehe Abbildung 36f) konstruiert wurden.

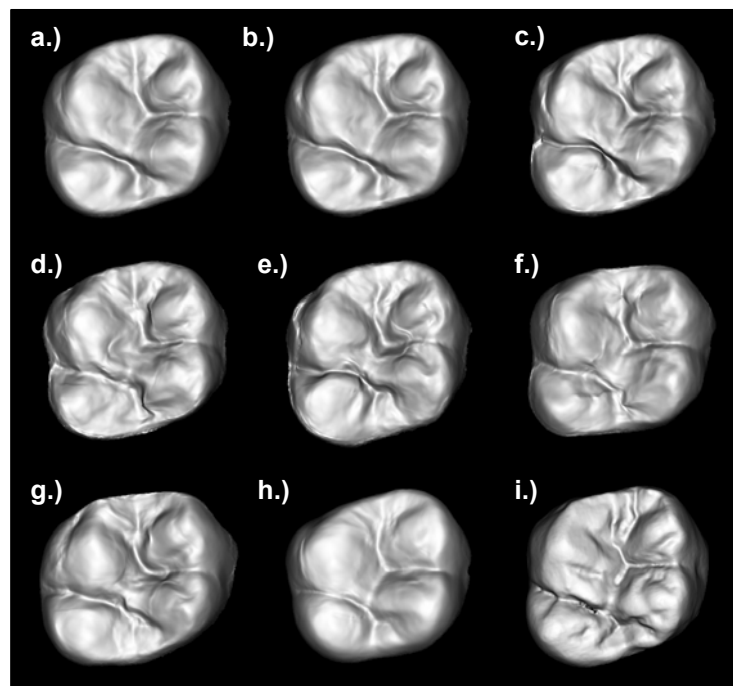


Abb.36: Rekonstruktionen des Zahnes 03_16 mit gleicher Anzahl an Hauptkomponenten (PC=90) und gleich bleibendem eta-Faktor ($\eta = 16$) nach 6 Durchläufen (add it) mit zunehmend geringerer Anzahl an gegebenen Punkten (points/grid step): **a:** $p=457/g=12$; **b:** $p=202/g=18$; **c:** $p=110/g=24$; **d:** $p=75/g=30$; **e:** $p=50/g=36$; **f:** $p=27/g=48$; **g:** $p=17/g=60$; **h:** $p=13/g=72$ und **i:** Ausgangszahn; siehe auch Abb. 19

Der metrische Vergleich zeigt ebenfalls eine deutliche Zunahme der Standardabweichung. Bei viel Vorinformationen (kleinem Grid Step) liefern die Rekonstruktionen mit niedrigem Eta-Faktor die besseren Ergebnisse, als

Rekonstruktionen mit hohem Eta-Faktor. Dieses Verhältnis kehrt sich mit steigendem Grid Step um (siehe Abbildung 37, rote Linie).

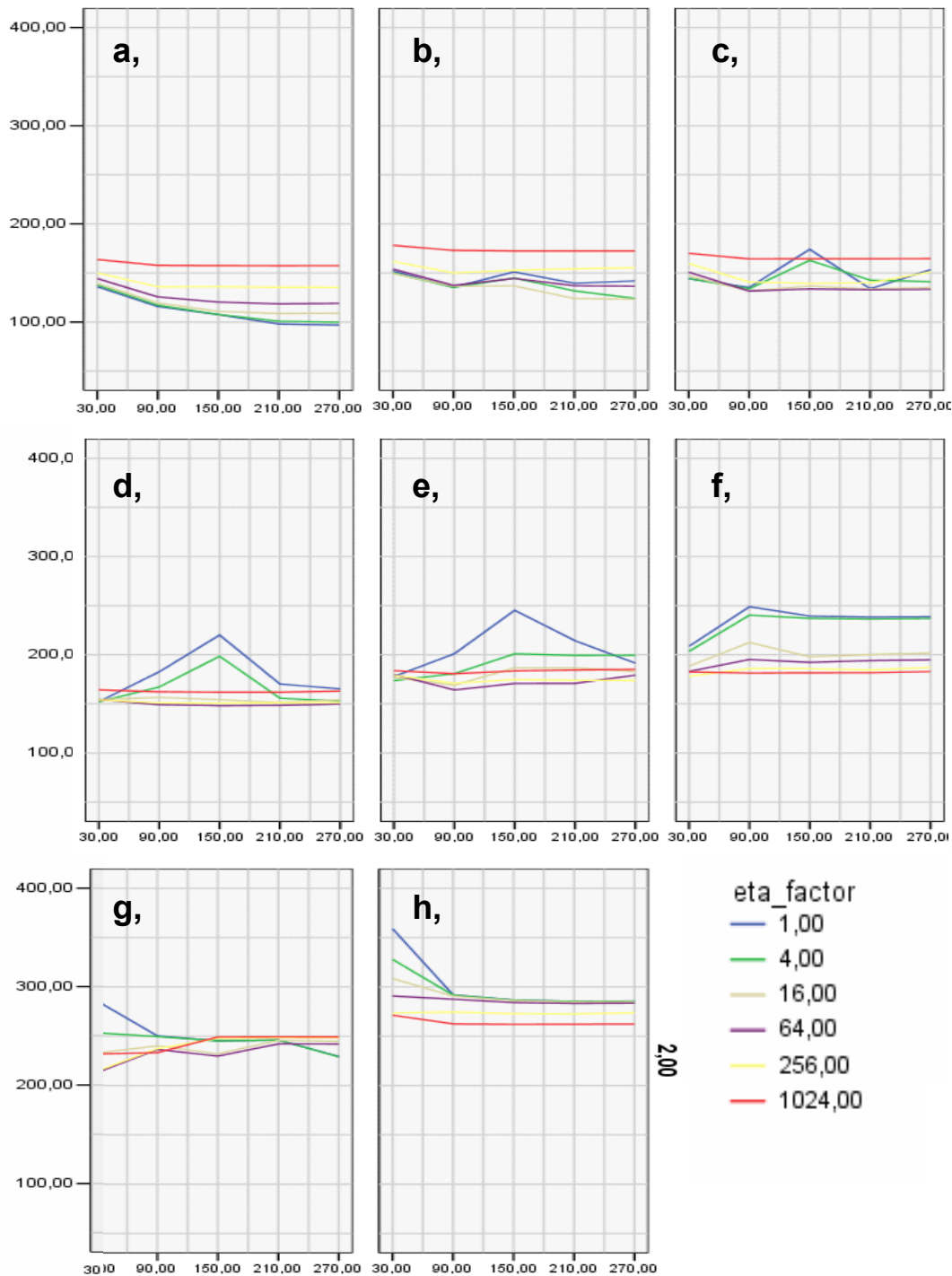


Abb.37: Rekonstruktionen des Zahnes 03_16 nach 2 Durchläufen (add it) mit abnehmender Anzahl an gegebenen Punkten (points/grid step): **a:** $p=457/g=12$; **b:** $p=202/g=18$; **c:** $p=110/g=24$; **d:** $p=75/g=30$; **e:** $p=50/g=36$; **f:** $p=27/g=48$; **g:** $p=17/g=60$ und **h:** $p=13/g=72$

4.1.5 Ergebnisse der Anpassungsdurchläufe

In den Abbildungen 38 und 39 sind die Ergebnisse der 8 Anpassungsdurchläufe dargestellt. Je nach Gewichtung der Hauptkomponenten und des Eta-Faktors gibt es verschiedenste Parametrisierungsmöglichkeiten. Alle Zahnoberflächen konnten zufriedenstellend rekonstruiert werden. Der Reduktionsfaktor betrug jeweils 12. Allgemeingültige Werte für den Eta-Faktor und für die Anzahl der Hauptkomponenten, die in jedem Falle die besten Rekonstruktionen liefern, konnten nicht gefunden werden. Auffällig war somit eine große Bandbreite an Kombinationsmöglichkeiten der beschriebenen Faktoren, die akzeptable Rekonstruktionen lieferten. Die im Folgenden ausgewählten Rekonstruktionsbeispiele wurden visuell und anhand der Standardabweichung ausgewählt. Die Standardabweichungen liegen für die Oberkiefermodelle zwischen $58\ \mu\text{m}$ und $96\ \mu\text{m}$, für die Unterkiefermodelle zwischen $58\ \mu\text{m}$ und $142\ \mu\text{m}$. Der Kontrollzahn konnte nicht sinnvoll rekonstruiert werden (Unterkieferzahn mit dem Oberkiefermodell). Auf den folgenden Seiten werden die Ergebnisse grafisch dargestellt. Auf der linken Seite befinden sich der jeweilige Ursprungszahn und auf der rechten Seite die ausgewählten Rekonstruktionsbeispiele.

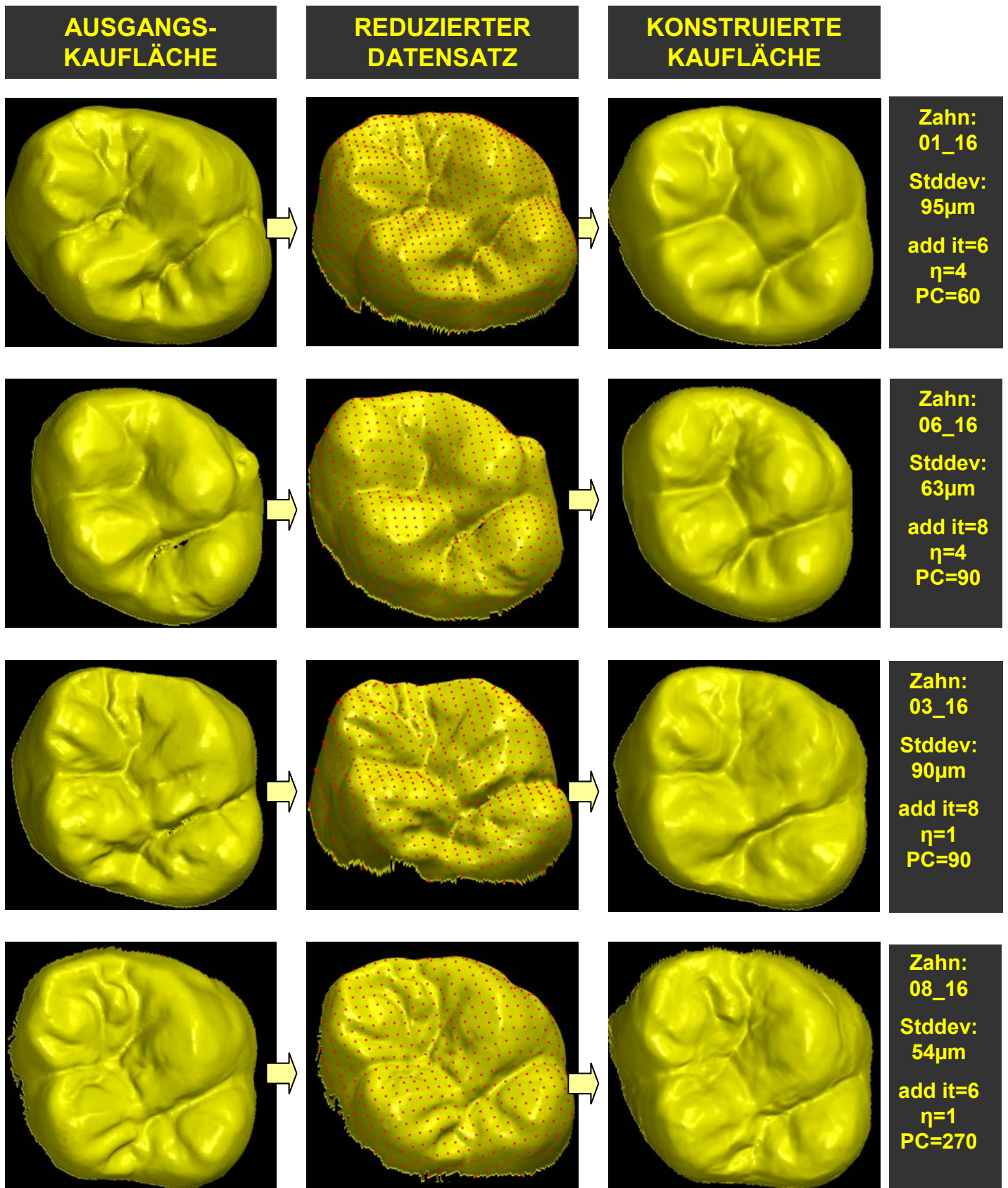


Abb. 38: Ergebnisse der Rekonstruktionen. Von links nach rechts: Ausgangszahn, reduzierter Datensatz (=Berechnungsgrundlage), ausgewählte Rekonstruktion, Datenangaben

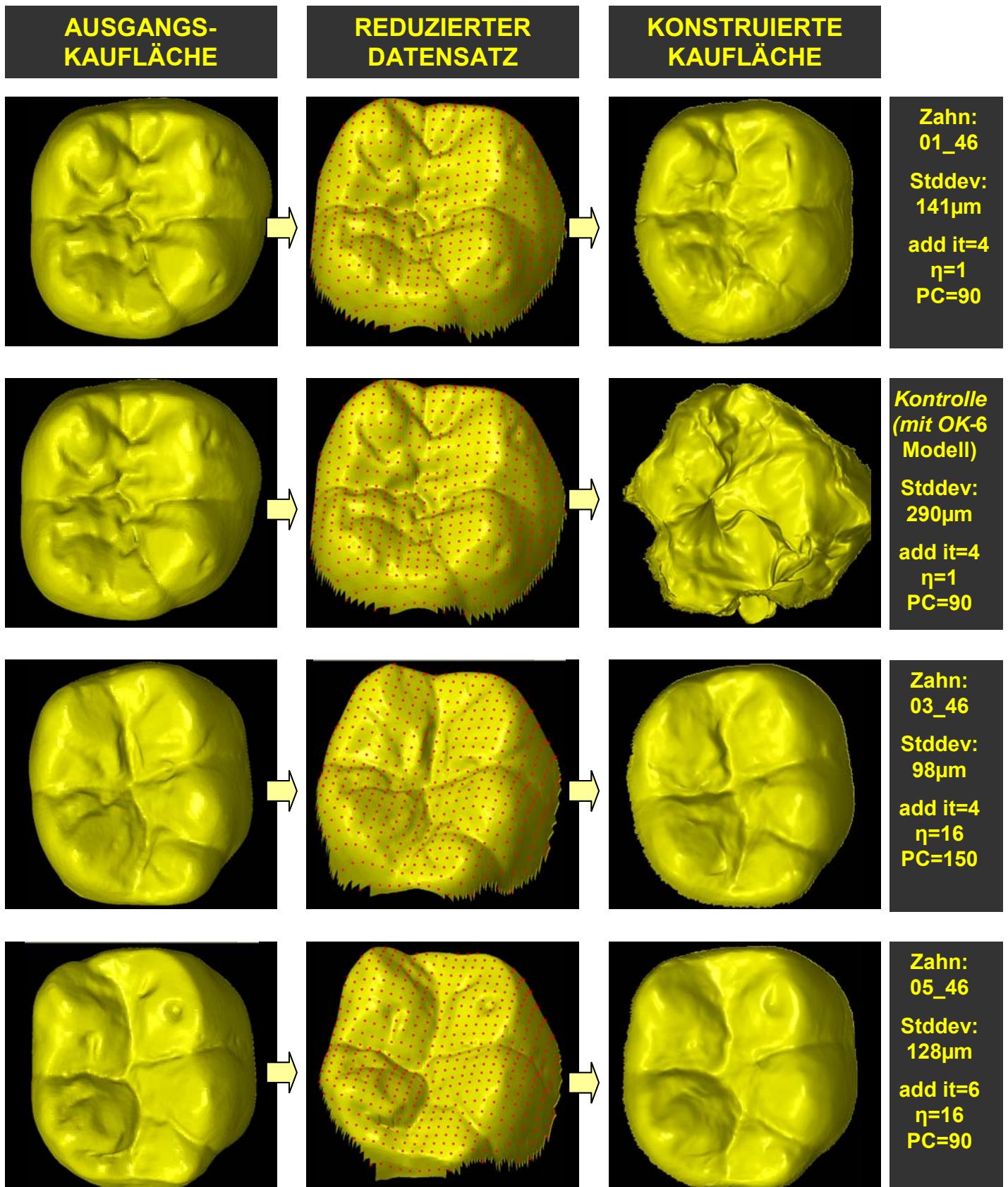


Abb. 39: Ergebnisse der Rekonstruktionen. Von links nach rechts: Ausgangszahn, reduzierter Datensatz (=Berechnungsgrundlage), ausgewählte Rekonstruktion, Datenangaben

4.2 Bestimmung der Ähnlichkeit symmetrisch gegenüberliegender Zähne mittels Z-Differenzbildung

Die Zähne der rechten und der linken Seite eines Probanden besitzen jeweils eine sehr hohe Ähnlichkeit (siehe Abb. 22 und 23). Anhand der Untersuchung der Abweichung mittels z-Projektion soll gezeigt werden, inwieweit sich diese Symmetrie metrisch ausdrücken lässt und wie sich die Ähnlichkeitswerte des vorherigen Kapitels einordnen lassen.

4.2.1 Vergleich symmetrisch gegenüberliegender Zähne jeweils eines Probanden

Der Mittelwert des Z-Differenzwertes (siehe Kapitel 3.6) des rechten, im Vergleich mit dem linken ersten **Unterkiefermolaren**, eines Probanden beträgt

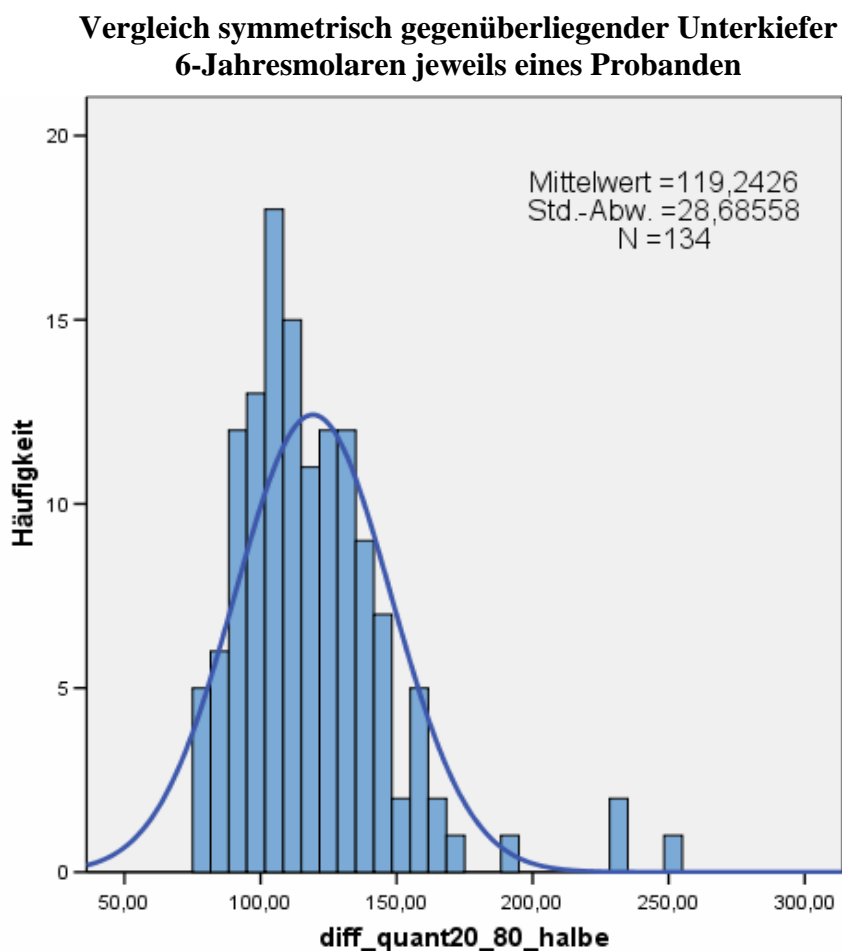


Abb. 40: Histogramm des Z-Differenzwertes

119 μm . 134 Zahnpaare wurden untersucht. In Abbildung 41 sind all jene Fälle herausgestellt, die einander am unähnlichsten sind.

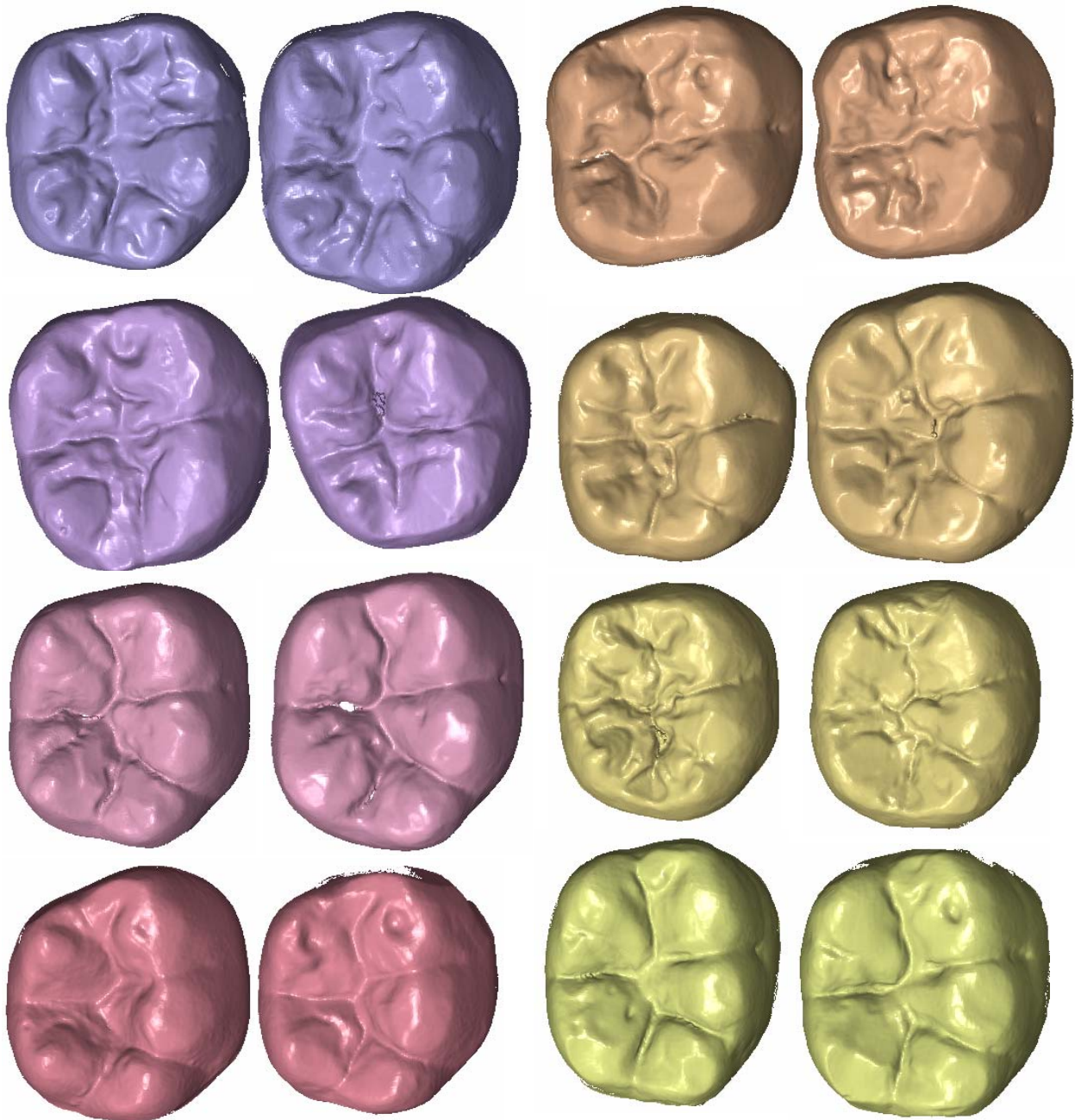


Abb. 41: Symmetrisch gegenüberliegende Unterkiefermolaren eines Probandens.
linke Spalte von oben nach unten: 254 μm , 232 μm , 231 μm , 170 μm ,
rechte Spalte von oben nach unten: 162 μm , 161 μm , 158 μm , 157 μm

Der Mittelwert des Z-Differenzwertes (siehe Kapitel 3.6) des rechten im Vergleich mit dem linken ersten **Oberkieferkiefermolaren** eines Probanden beträgt 126 μm . 159 Zahnpaare wurden untersucht.

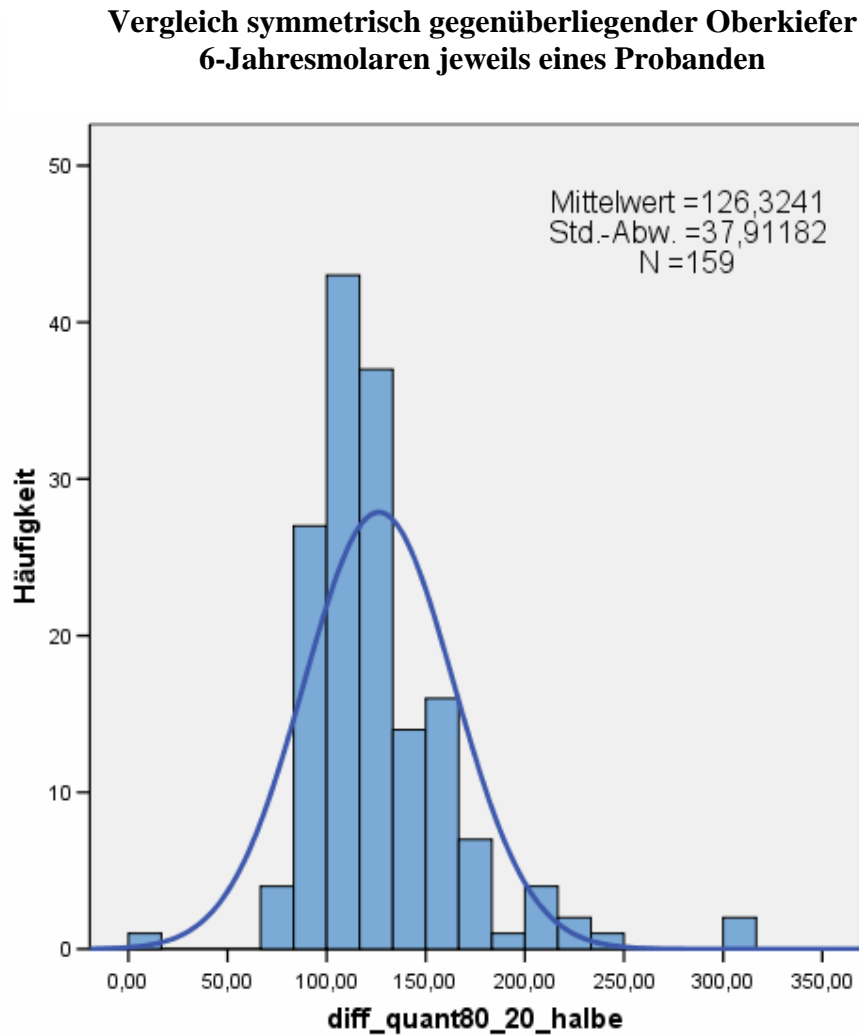


Abb. 42: Histogramm des Z-Differenzwertes

4.2.2 Vergleich erster Molaren unterschiedlicher Probanden

Der Mittelwert der Abweichungen (Z-Differenzwert, siehe Kapitel 3.6) eines Sechsjahresmolaren eines Probanden im Vergleich zu dem Sechsjahresmolaren eines anderen Probanden beträgt im Oberkiefer 341 μm und im Unterkiefer 276 μm (siehe Abb. 43 und 44). 23664 bzw. 5947 Matchingprozesse liegen diesen Untersuchungen zu Grunde.

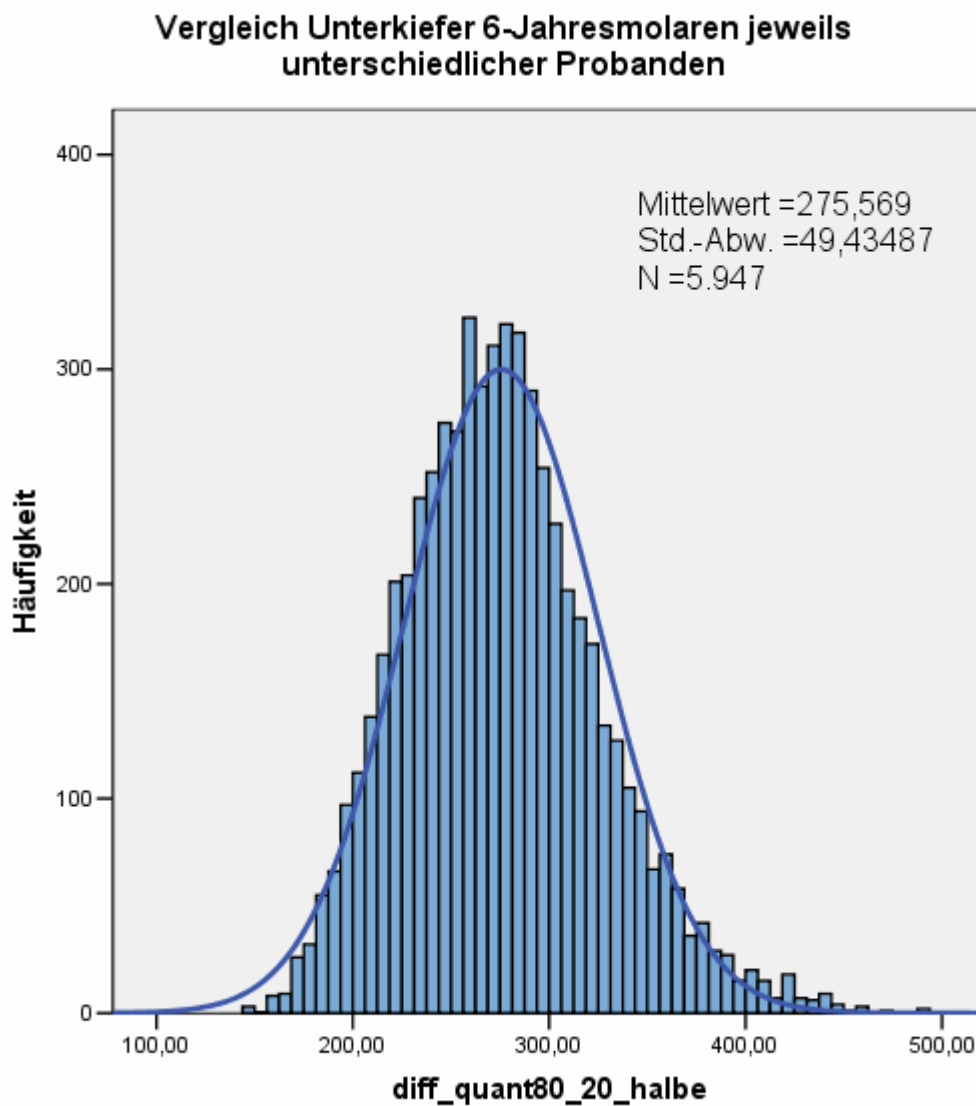


Abb. 43: Histogramm des Z-Differenzwertes

Vergleich Oberkiefer 6-Jahresmolaren unterschiedlicher Probanden

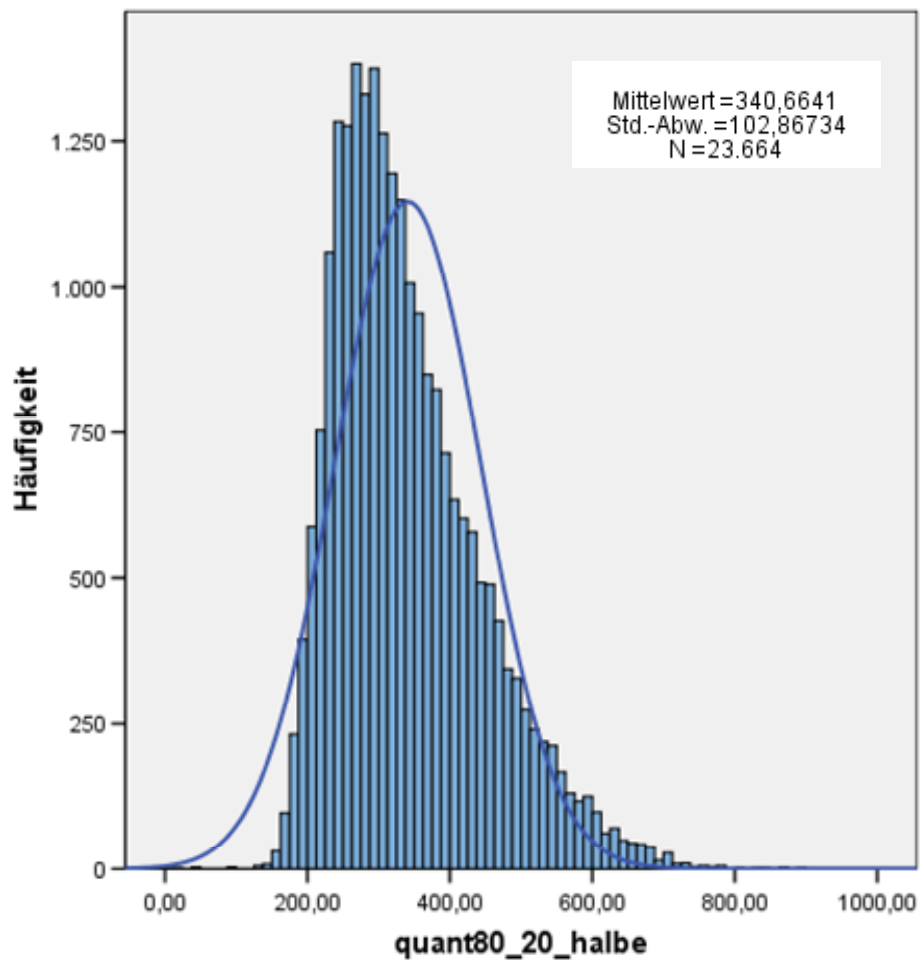


Abb. 44: Histogramm des Z-Differenzwertes

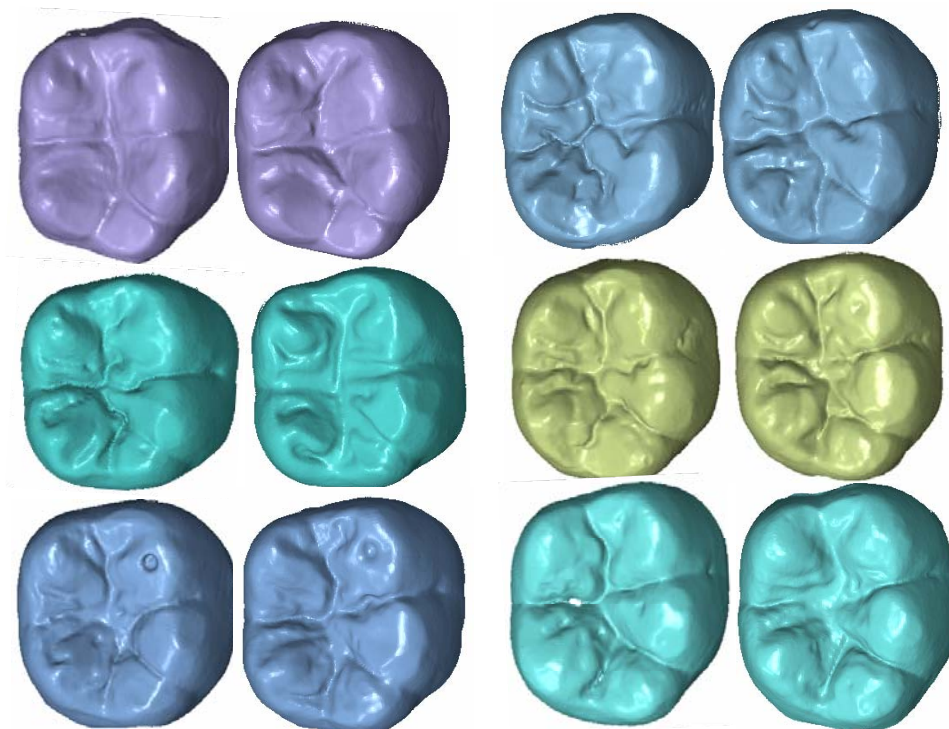


Abb.45: Unterkiefermolaren unterschiedlicher Individuen, die sich jedoch sehr ähnlich sehen und alle einen Z-Differenzwert von unter 150 μ m aufweisen

4.2.3 Z-Differenzwerte der parametrisierten Kauflächen

Der durchschnittliche Z-Differenzwert (siehe Kapitel 3.6) für die 7 rekonstruierten Kauflächen beträgt im Oberkiefer 70 μm und im Unterkiefer 101 μm . In Abbildung 47 sind diese Werte jeweils mit den gefundenen Ähnlichkeitswerten in Relation gesetzt.

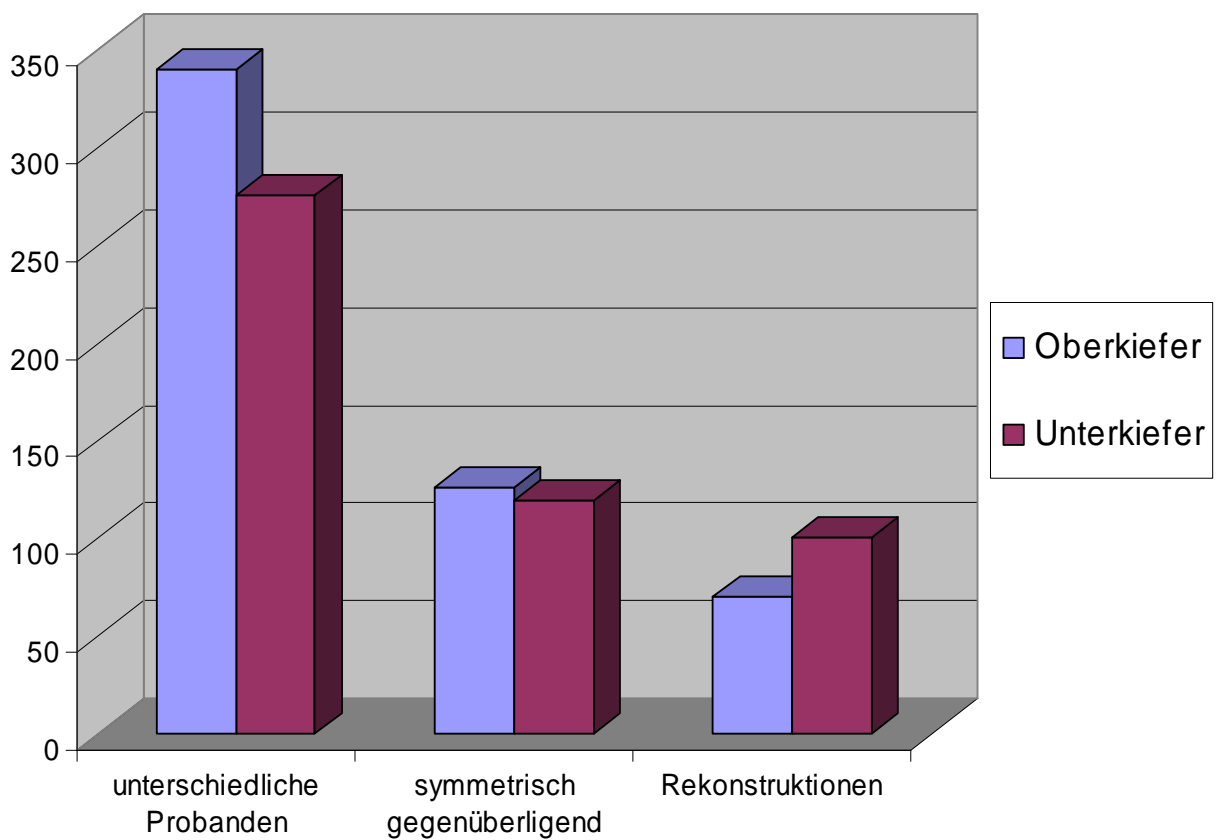


Abb. 46: Z-Differenzwerte

4.2.4 Vergleich der Ähnlichkeitsmaße

Diese Untersuchungen zur Variabilität der natürlichen Zahnformen sollen helfen, die Ergebnisse aus dem Generierungsprozess unbekannter Zahnoberflächen mittels biogenerischem Zahnmodell zu deuten. Der mit Hilfe der z-Projektion gewonnene Z-Differenzwert unterscheidet sich grundsätzlich von dem Wert der Standardabweichung, die über den geringsten Abstand ($\text{Stddev}_{\text{Gen}}$) gefunden wurde (siehe Kapitel 3.6). In einer Korrelationsanalyse wurden diese beiden Verfahren miteinander verglichen.

Aus jedem Berechnungsprozess wurden willkürlich drei bis vier Rekonstruktionsbeispiele ausgesucht und dann mit dem Ursprungszahn verglichen. 30 Fälle wurden untersucht. In Abbildung 48 sind die jeweiligen Werte grafisch angetra-

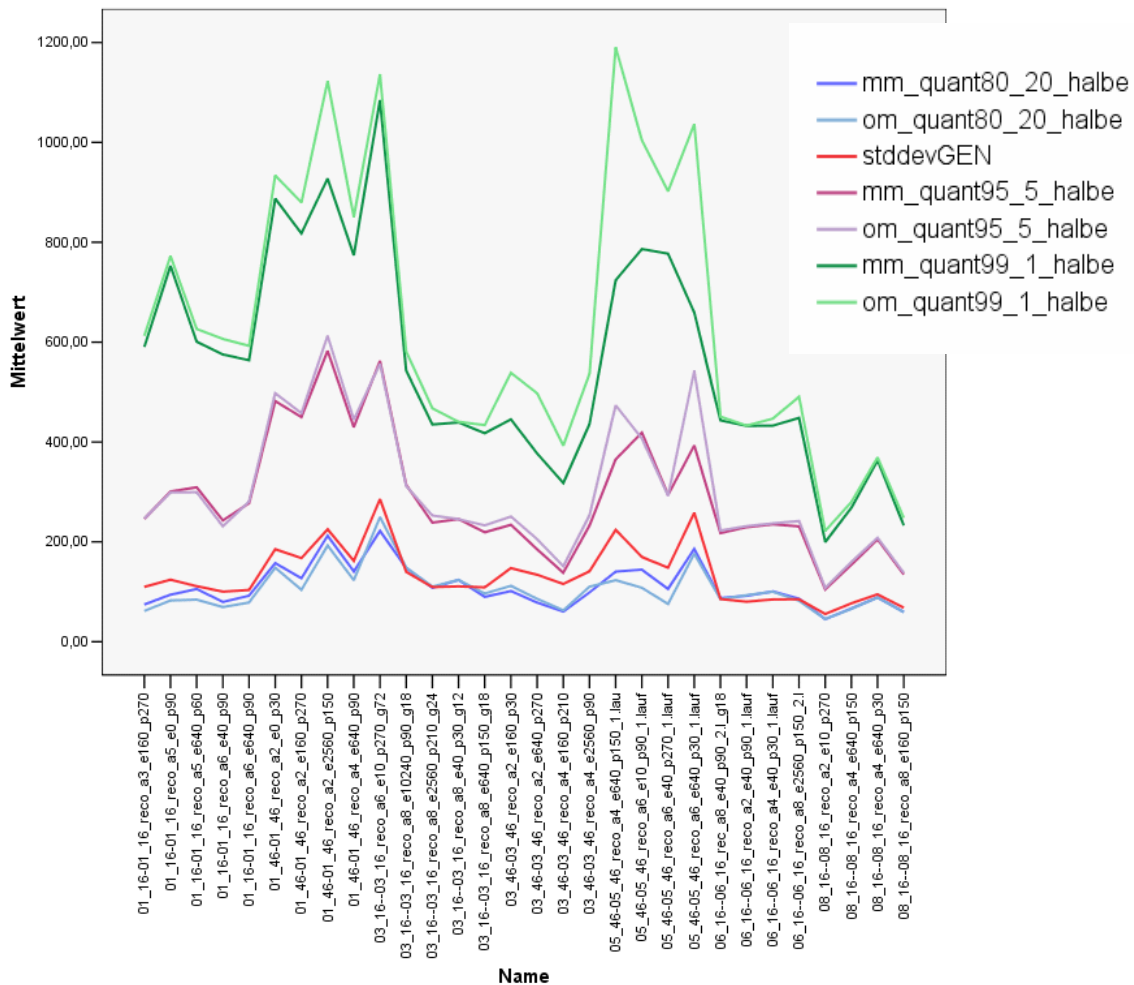


Abb.47: Korrelierende Standardabweichungen

gen. Die Berechnung der Z-Differenzwerte erfolgte durch Ermittlung des 1% und 99%, 5% und 95% sowie 20% und 80%-Quantils. Zum einen wurde dies ohne erneute Überlagerung der Oberflächen (om = ohne Matching) gemacht. Zum anderen nach erneuter Überlagerung (mm = mit Matching). Die Korrelationskoeffizienten der als besonders aussagekräftig angesehenen Z-Differenzwerte, die sich durch Ermittlung des 5%-95% und 20%-80% Quantils ergaben, mit der Standardabweichung über den geringsten Abstand ($\text{Stddev}_{\text{Gen}}$) lagen zwischen 0,845 und 0,910. Vergleicht man jene Z-Differenzwerte, die über die gleichen Quantile errechnet wurden, vor und nach Überlagerung, zeigen sich noch größere Übereinstimmungen. Der Faktor beträgt für die Z-Differenzwerte über das 20%-80%-Quantil 0,953 und die Standardabweichung über das 5%-95%-Quantil 0,970. Dies weist darauf hin, dass es durch den Überlagerungsprozess zu keinen größeren Positionierungsveränderungen gekommen ist.

		stddevGEN
stddevGEN	Korrelation nach Pearson	1
	Signifikanz (2-seitig)	
	N	30
mm_quant80_20_halbe	Korrelation nach Pearson	,896**
	Signifikanz (2-seitig)	,000
	N	30
om_quant80_20_halbe	Korrelation nach Pearson	,857**
	Signifikanz (2-seitig)	,000
	N	30
mm_quant95_5_halbe	Korrelation nach Pearson	,845**
	Signifikanz (2-seitig)	,000
	N	30
om_quant95_5_halbe	Korrelation nach Pearson	,910**
	Signifikanz (2-seitig)	,000
	N	30
mm_quant99_1_halbe	Korrelation nach Pearson	,805**
	Signifikanz (2-seitig)	,000
	N	30
om_quant99_1_halbe	Korrelation nach Pearson	,902**
	Signifikanz (2-seitig)	,000
	N	30

Tabelle 4: Auszug aus der Korrelationstabelle. ** = die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

4.3 Beschreibung von Prothesenzähnen mittels dem Biogenerischen Modell

Nach Sichtung der jeweils 100 generierten Rekonstruktionen der sieben Prothesenzähne wurde jeweils ein repräsentatives Beispiel ausgewählt. Es sollen die morphologischen Unterschiede zwischen dem „künstlichen“ Prothesenzahn und dessen biogenerische Rekonstruktion aufgezeigt werden. Das „Wissen“ des Modells über Zahnformen basiert auf einer Bibliothek von natürlichen Zahnoberflächen.

Alle Prothesenzähne konnten zufriedenstellend rekonstruiert werden. Vier der ausgewählten Rekonstruktionen (Heraeus Kulzer Premium Posterior, Asia Database, Lee Culp Youth, Lee Culp Adult) weisen mit $63\mu\text{m}$, $70\mu\text{m}$, $82\mu\text{m}$ und $83\mu\text{m}$ jeweils eine sehr geringe Standardabweichung ($\text{Stddev}_{\text{Gen}}$) auf. Die drei anderen Rekonstruktionen (Lee Culp Mature, VITA PhysiodensPosteriores und Ivoclar) besitzen mit $100\mu\text{m}$, $104\mu\text{m}$ und $105\mu\text{m}$ eine jeweils deutlich höhere Abweichung. Dieser Trend zeigt sich auch deutlich bei der Betrachtung der Standardabweichungen aller weiteren Konstruktionen in Abbildung 50.

Deutliche Formabweichung in der Rekonstruktion zeigen sich bei den Zähnen von Vita und Ivoclar. Das Biogenerische Modell kann die stark rechteckige Konturlinie der Vita-Zahnes nicht nachempfinden. Ebenso kann in der Rekonstruktion der Zahnes von Ivoclar die ziemlich schmale Kaufläche nicht konstruiert werden und wird deutlich abgerundet. Die starken und ziemlich planen Abrasionen des Zahns Lee Culp Mature werden in ähnlicher Weise abgerundet.

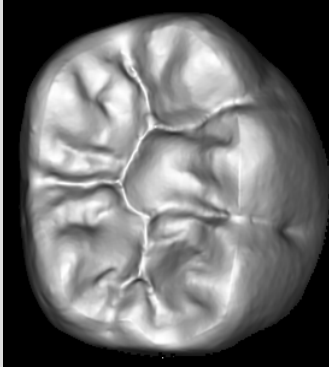
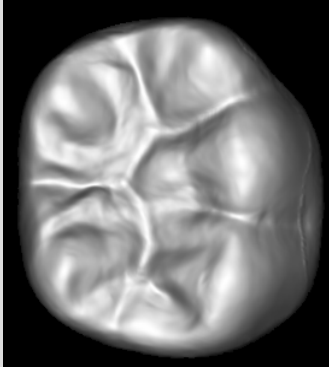
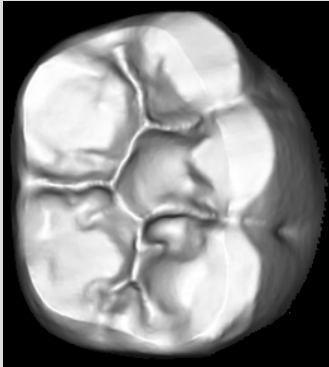
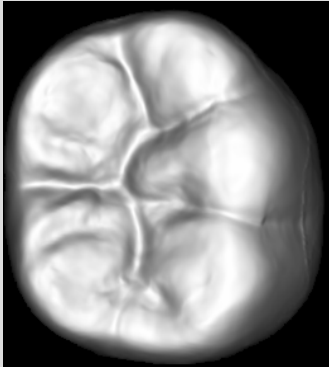
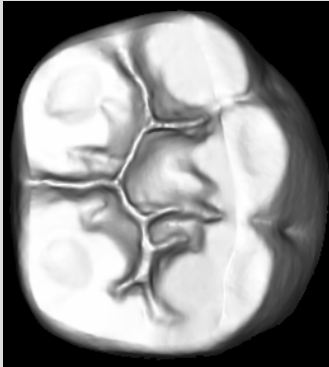
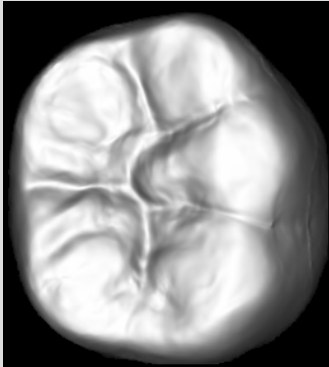
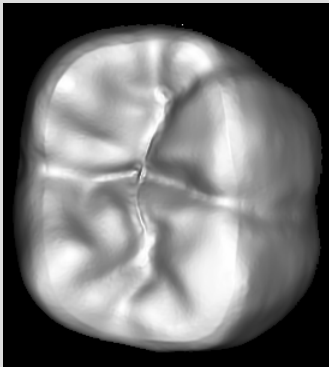
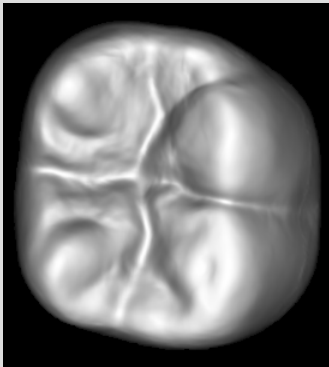
	Ursprungszahn	Rekonstruktion
Lee Culp Youth Std.dev. : 82 μm		
Lee Culp Adult Std.dev. : 83 μm		
Lee Culp Mature Std.dev. : 100 μm		
Heraeus Kulzer Premium Posterior Std.dev. : 68 μm		

Abb. 48: Parametrisierung der Prothesenzähne. Links: Name und Standardabweichung, Mitte: Ausgangsprothesenzahn, Rechts: Parametrisierung

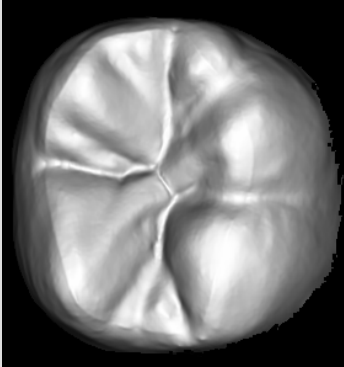
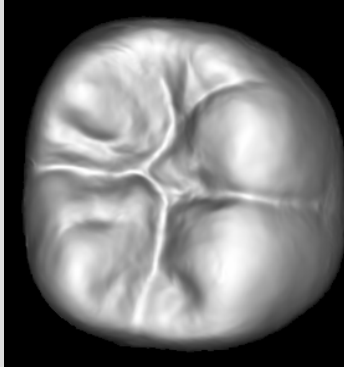
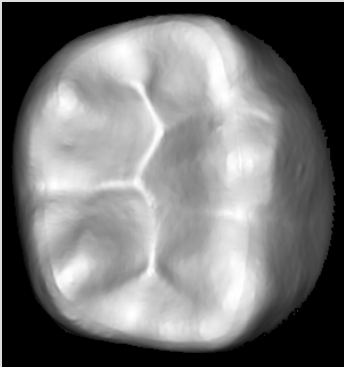
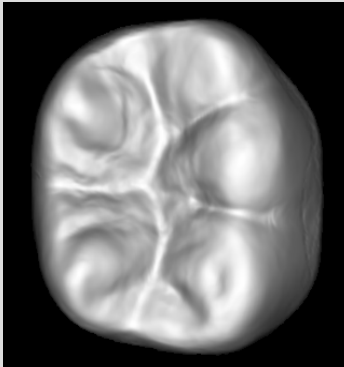

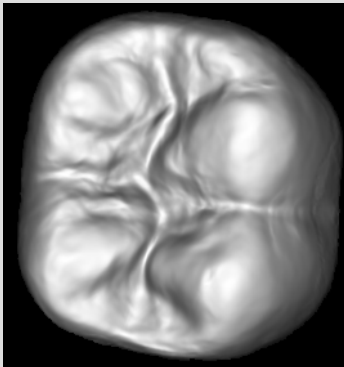
	Ursprungszahn	Rekonstruktion
Ivoclar Std.dev. : 105 μm		
Asia Database Std.dev. : 70 μm		
VITA Physiodens Posteriores Std.dev. : 104 μm		

Abb.49: Parametrisierung der Prothesenzähne. Links: Name und Standardabweichung, Mitte: Ausgangsprothesenzahn, Rechts: Parametrisierung

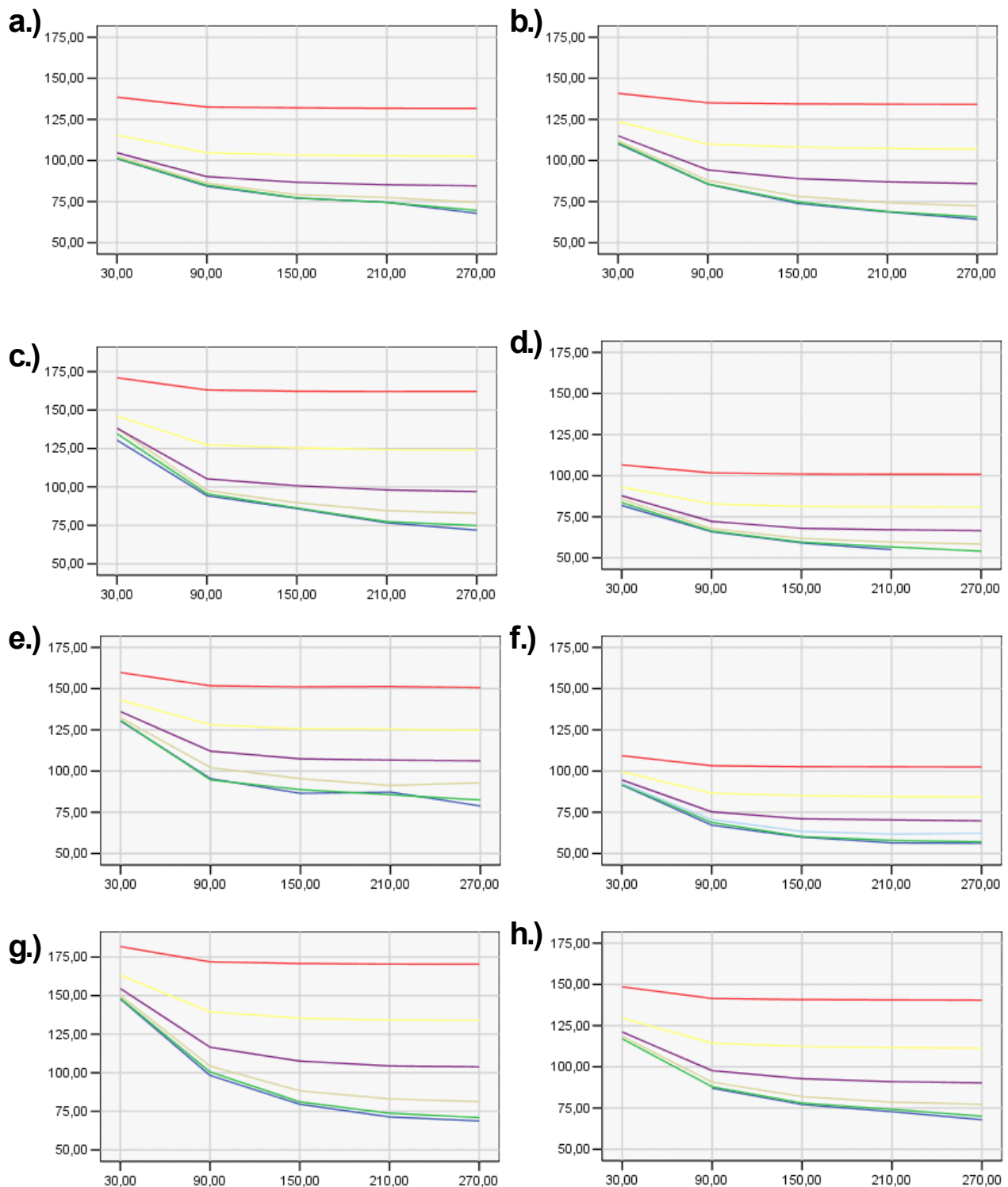


Abb.50: Standardabweichung aller rekonstruierten Prothesenzähne. An der Ordinate ist die Standardabweichung (in μm) und an der Abszisse ist Anzahl der Hauptkomponenten angetragen. Die Linien stehen für jeweils einen Etafaktor: — 1; — 4; — 16; — 64; — 256; — 1024.

a: Lee Culp Youth; **b:** Lee Culp Adult; **c:** Lee Culp Mature; **d:** Heraeus Kulzer Premium Posterior; **e:** Ivoclar; **f:** Asia Database; **g:** VITA PhysiodensPosteriores und **h:** Durchschnittswerte

5. DISKUSSION

5.1 Diskussion der odontometrischen Verfahren

5.1.1 Bisherige odontometrische Verfahren

Im Zusammenhang mit der Digitalisierung und computerunterstützten Fertigung von Zahnersatz, aber auch für die Ausbildung und der analytischen Vorgehensweise bei der Auswahl von Prothesenzähnen und Übungsmodellen, besteht immer mehr der Wunsch nach einer mathematischen Formulierung der Kauflächenmorphologie (Mehl 2005). Für Datenprozesse sind vor allem die metrischen Beziehungen von Interesse. Diese können entscheidend zur Kauflächenbeschreibung beitragen. Aus der Anatomie und der Anthropologie gibt es in diesem Zusammenhang viele Untersuchungen. Es handelt sich jedoch hauptsächlich um lineare Längen- und Größenbestimmungen. Diese konventionellen metrischen Vermessungen liefern nur quantitative Informationen über die Größe. Über die Gestalt und Struktur von Zahnoberflächen kann mit ihnen keine Aussage getroffen werden. Untersuchungen zu Gestalt und Struktur existieren, wie die Literaturübersicht zeigt, nur unter dem Gesichtspunkt von qualitativen Beschreibungen. Quantitative mathematische Formulierungen zu Gestalt- und Strukturmerkmalen sind in der Literatur nur vereinzelt anzutreffen und betreffen hauptsächlich Winkelvermessungen oder Verhältnisse von Strecken. All diese Werte beschreiben zwar einzelne Aspekte der Gestalt und Struktur von Zähnen, es lässt sich jedoch mit ihnen keine mathematische Beschreibung von Zahnoberflächen durchführen. Aufgrund der hohen Anzahl an odontometrischen Studien

verstehen sich die Angaben in der Literaturübersicht als eine zusammenfassende Übersicht, in der Beispiele und für vorliegende Arbeit interessante Studien präsentiert werden.

Hierbei zu bedenken, dass beim Vergleich verschiedener Quellen durch unterschiedliche Meßmethoden und ungleiches Probandengut, unterschiedliche Messfehler resultieren. So sollten bei einer odontometrischen Studie Angaben über Probandenzahl, Geschlecht, Alter bzw. Abrasionsgrad der Zähne, Herkunft der Probanden und Meßmethode angegeben werden. Leider lassen sich diese Parameter bei vielen odontometrischen Studien nur lückenhaft rekonstruieren. Außerdem ist keine einstimmige, klare Terminologie auf dem Feld der Zahnvermessung auszumachen.

5.1.2 Biogenerisches Zahnmodell

Das in dieser Studie angewendete Verfahren zur Kauflächenberechnung, das biogenerische Zahnmodell, ist in der Lage einen bestimmten Zahntypus anhand weniger Variablen mathematisch zu beschreiben. Die Erzeugung dieses biogenerischen Zahnmodell Datensatzes erfolgt dabei über eine möglichst große Anzahl von Datensätzen desselben Zahntyps. Insgesamt enthält die Zahnbibliothek eine große Auswahl aller möglichen vorkommenden natürlichen Zahnformen. Je nach Aufgabenstellung ist es möglich, verschiedenste Zahntypen zu gruppieren, für die jeweils ein biogenerisches Modell erstellt werden kann. Beim Zahntyp kann es sich zum Beispiel um Molaren, Prämolaren, Eckzähne und Frontzähne handeln. Als Zahntyp kann aber auch der Oberkiefer(OK)-4er, Unterkiefer(UK)-6er, etc. stehen. Möglich sind auch Unterscheidungen nach Alter, Abrasionsgrad, Geschlecht, nach Volkszugehörigkeit, nach morphologischen Besonderheiten der Zähne, nach der Größe etc.. Beispiele hierfür könnten Oberkiefer-6er

mit oder ohne Tuberculum carabelli, Oberkiefer-1er bei männlichen Personen, vier- oder fünfhöckerige Unterkiefer-6er etc. darstellen.

Auch können benachbarte Zähne, Antagonisten oder symmetrisch gegenüberliegende Zähne zu einem Zahntyp zusammengefasst werden, um Zusammenhänge zu analysieren. Prinzipiell müsste es so auch möglich sein, anhand von verbleibenden naturbelassenen Zähnen eines Patienten die Kaufläche eines zu ersetzenden Zahns zu berechnen.

So können unter Zuhilfenahme des biogenerischen Modells Zahnanalysen, morphologische Studien, Berechnungen von typischen Repräsentanten einer ausgewählten Grundmenge, usw. durchgeführt werden. Dies würde in der Ausbildung, bei der Systematisierung neuer Prothesenzähne und in der Forensik bzw. Anthropologie neue Möglichkeiten eröffnen.

Der entscheidende Vorteil des hier verwendeten Verfahrens ist der wissenschaftliche Ansatz und die Etablierung eines mathematischen Modells.

5.2 Diskussion der Ergebnisse

5.2.1 Parametrisierung und Rekonstruktion von Zahnoberflächen

Die Ergebnisse zeigen, dass mit dem biogenerischem Zahnmodell Zahnoberflächen anhand weniger vorgegebener Punkte nachempfunden werden können. Je nach Gewichtung der Hauptkomponenten und des Eta-Faktors kommen verschiedenste Parametrisierungsmöglichkeiten in Frage.

Allgemeingültige Werte, die in jedem Falle die besten Anpassungen lieferten, konnten nicht gefunden werden. Auffällig war somit eine große Bandbreite an Kombinationsmöglichkeiten der beschriebenen Faktoren, die akzeptable Rekonstruktionen liefern. Wie bereits in Material und Methode beschrieben, wurden die besten Rekonstruktionen zum einen anhand der möglichst geringen Standardabweichung und zum anderen visuell ausgewählt. Zahnuntypische Rekonstruktionen konnten visuell ausgeschlossen werden. Es blieb jedoch je nach Gewichtung von Eta-Faktor, Anzahl der Hauptkomponenten und Durchläufe, sowie der gegebenen Vorinformation eine große Auswahl an zahntypischen Rekonstruktionen bestehen. Die „Ähnlichkeit“ zur Ursprungskaufäche sollte als Auswahlkriterium herangezogen werden. Da für Kaufächen bisher noch keine allgemeingültige metrische oder mathematische Beschreibung existiert, hängt die Auswahl in hohem Maße von den Erfahrungen der Betrachter ab. In den Lehrbüchern der Zahnmedizin und Zahntechnik werden verschiedene Merkmale und charakteristische Punkte angegeben, die für einen bestimmten Zahntyp entscheidend sind und diesen beschreiben können. Die Charakteristika beschreiben aber keineswegs genau definierbare Punkte auf der Zahnoberfläche, sondern sind eher eine ungefähre Vorstellung der Zahnmorphologie, angepasst an unsere Erfahrungen.

Die Standardabweichungen der generierten Kaufächen zu den Ausgangskaufächen sind mit Werten zwischen 58 μm und 141 μm sehr klein und zeigen die große Ähnlichkeit. Einen Unterkieferzahn mit dem Oberkiefermodell zu rekonstruieren führte zu keinem befriedigenden Ergebnis. Die Standardabweichung von 290 μm verdeutlicht dies ebenso wie die absolut zahnuntypischen Rekonstruktionsgebilde. Es kann somit angenommen werden, dass mit dem jeweils passenden biogenerischen Zahnmodell sehr individuell Zahnoberflächen konstruiert werden können, solange die gegebene Vorinformation sinnvoll in den jeweiligen „Zahnraum“ passt. Dies funktioniert auch noch befriedigend mit sehr wenig Vorinformation. Die in dem Modell enthaltenen Geset-

mäßigkeiten ermöglichen es, einzelne fehlende Zahnmerkmale auf Grund von wenig gegebener Information zu ergänzen. Dies funktioniert ohne Expertenregeln über Zahnmorphologie. Allein aus der Analyse und individuellen Kombination der dem Modell ursprünglich zur Verfügung gestellten Information in Form von sehr vielen Zahnoberflächen können Rückschlüsse auf fehlende Teile einer Zahnoberfläche getroffen werden. Dies geschieht also in ähnlicher Weise wie es einem Zahntechniker gelingt, eine Kaufläche zu modellieren, die sich möglichst harmonisch in ein individuelles morphologisches Grundschema einfügt. Auch dem Zahntechniker ermöglicht die Erfahrung aus der Arbeit mit sehr vielen unterschiedlichen Zahnformen, dem somit über die Jahre visuell Erlernten, in einer bestimmten Situation eine bestimmte Kaufläche zu gestalten. Als Vorteil des Modells ist dabei jedoch zu sehen, dass es auf keine in Studienstuben erdachten gnathologischen Regeln zurückgreifen muss, wie beispielsweise ein Stützhöcker auszusehen hat, um den Anforderungen einer Dreipunkt-abstützung gerecht zu werden oder welcher Zahntyp doch eher ein umgekehrtes Massenmerkmal aufweist.

5.2.2 Bestimmung der Ähnlichkeit symmetrisch gegenüberliegender Zähne

Die einzelnen Zahntypen innerhalb eines Kiefers weisen deutliche Gemeinsamkeiten auf. Die Ähnlichkeit der Größe eines jeweils kontralateralen Zahnes ist bereits durch unzählige Studien bewiesen worden (Moorrees et al. 1957, Garn 1964, Kabban 2001). Neuere Untersuchungen weisen jedoch darauf hin, dass die okklusale Morphologie weitgehend unabhängig von der Größe eines Zahns ist (Harris et al 2006). Die These von Biggerstaff (1971) die Anzahl der Höcker und weiterer okklusaler Strukturen sei proportional zur Zahngröße scheint damit widerlegt. Man geht heute davon aus, dass unterschiedliche unabhängige molekulare Signale die Größe und Form eines Zahnes beeinflussen (Tucker et al

1999). Wenn diese Signalträger auf der selben Weise in der rechten, wie in der linken Körperhälfte wirken, so müssten sich spiegelsymmetrische Zähne sehr ähnlich sein.

In der vorliegenden Untersuchung sollte insbesondere auf die Form der Molaren eingegangen werden. Dabei wurde der Z-Differenzwert nach Überlagerung zweier Kauflächen betrachtet. Zwei symmetrisch gegenüberliegende Zähne eines Kiefers zeigen einen sehr hohen Grad an Ähnlichkeit. So ist es beispielsweise problemlos möglich einer Auswahl von Bibliothekskauflächen jeweils den kontralateralen Nachbarn zuzuordnen. Diese Ähnlichkeit sollte nun auch metrisch erfasst werden. Der Durchschnitts-Z-Differenzwert von rechten und linken ersten Molaren eines Probandens beträgt $119 \mu\text{m}$ (Unterkiefer) bzw. $126 \mu\text{m}$ (Oberkiefer). Diese Werte sind fast um den Faktor 3 kleiner als die Werte, die sich durch Vergleich von Molaren unterschiedlicher Probanden ergeben. Der Durchschnitts-Z-Differenzwert eines ersten Molaren eines Probanden im Vergleich zu dem ersten Molaren eines anderen Probanden beträgt im Oberkiefer $341 \mu\text{m}$ und im Unterkiefer $276 \mu\text{m}$. Diese Werte verdeutlichen die große Bandbreite der in der Natur vorkommenden Zahnformen. Setzt man diese Zahlenwerte in Relation mit den Durchschnitts-Z-Differenzwerten von $70 \mu\text{m}$ (Oberkiefer) und $104 \mu\text{m}$ (Unterkiefer) aus den rekonstruierten Zahnflächen, so kann man den Versuch der Rekonstruktion von unbekanntem Zahnflächen als erfolgreich betrachten.

Ergebnisse künftiger Untersuchungen werden sich an diesen Werten messen lassen müssen. Weiterführende Untersuchungen könnten sich beispielsweise über Rekonstruktionen mittels des biogenerischen Zahnmodells von Zähnen nach Inlay bzw. Onlaypräparation durchführen lassen. Auch sollte betrachtet werden, ob im Mund eines Menschen jeweils ein charakteristisches Kauflächenmuster vorherrscht und inwieweit es möglich ist, damit die Morphologie eines zu er-

setzenden Zahnes von seinen mesialen oder distalen bzw. antagonistischen Nachbarn abzuleiten.

Ein klarer Vorteil in der gezeigten Methode zur Bestimmung von Ähnlichkeit von Oberflächen mittels mittlerer Abweichung ist darin zu sehen, dass man völlig ohne eine Bestimmung von einzelnen Messpunkten auskommt. Und gerade das „korrekte“ Setzen eines Messpunktes auf der geometrisch so variablen Struktur eines Zahnes, kann sich als problematisch erweisen. Dabei erweist es sich eine gute Standardisierung für Messpunkte umso schwieriger, je komplexer eine Oberfläche aufgebaut ist. Während auf flache Oberflächen, wie beispielsweise auf den Bukkalflächen der Frontzähne, noch relativ eindeutig eine Begrenzungspunkt platziert werden kann, kommen bei einer Auswertung einer Okklusalfäche Effekte wie Betrachtungsrichtung und anatomische Uneindeutigkeiten stärker zum tragen (Robinson et al. 2002).

Eine Auswertung über die gesamte Zahnfläche führt untersucherunabhängig jedoch immer zum gleichen Ergebnis. Als nachteilig kann jedoch gesehen werden, dass dadurch lediglich ein Durchschnittswert für die Ähnlichkeit zweier Kauflächen errechnet wird. Welcher Teil eines Zahnes dabei relativ konstant und welcher Teil besonders variabel in der Ausprägung ist, kann damit nicht erfasst werden. Dies könnte jedoch theoretisch durch eine Überlagerung aller Differenzbilder erfolgen. Eine der wesentlichsten Unterscheidungsmerkmale ist sicherlich die Größe. Dies wird auch deutlich wenn man sich die Veränderungen des biogenerischen Durchschnittszahnes betrachtet, die durch die erste Hauptkomponente beschrieben wird (<http://web.dent.med.uni-muenchen.de/~amehl/filme.htm>). Die weiteren Hauptkomponenten beschreiben, teilweise abstrakt, einige weitere wichtige Zahnmerkmale, die auch schon in anderen Untersuchungen gefunden wurden. Zu nennen ist sicherlich die Form des Fissurenmusters (x- bzw. y-Form), die 4- bis 5- Höckrigkeit, Verschiebungen des Massenmerkmals und eine rhomboide bis trapezförmige Okklusalfäche. Bei

einer Auswertung aller Überlagerungsdifferenzbilder ist davon auszugehen, dass diese vielen Unterschiede in ihrer Vielzahl nicht erkennbar werden. Bei einer Untersuchung zu dieser Fragestellung sollte besser ein Ansatz unter Einbeziehung des biogenerischen Zahnmodells gesucht werden.

5.2.3 Rekonstruktion von Prothesenzähnen mittels Biogenerischen Modells

Eine natur- und funktionsgerechte Anatomie künstlicher Zähne soll eine gute Rehabilitation durch Voll- und Teilprothesen ermöglichen. Bei der Gestaltung dieser künstlichen Zähne werden verschiedene konstruktionsmorphologische Regeln beachtet. So muss ein künstlicher Seitenzahn über eine stabile statische Okklusion und gleichzeitig über die notwendigen Freiräume in der Dynamik verfügen. Vorbild für diese künstlichen Zähne ist somit die Natur.

Die Prothesenzähne wurden durch ein Modell, das sein „Wissen“ aus rein natürlichen Zahnoberflächen generiert, nachempfunden. Je besser dies gelingt, umso näher an der Natur sollten diese Prothesenzähne sein. Allerdings besteht die Kauflächenbibliothek, die ja die Basis für das biogenerische Modell darstellt aus einer Auswahl an sehr jungen und abrasionsfreien Zähnen. Dies mag auch der Grund für die nur mäßig gute Rekonstruktion des Zahns Lee Culp Mature sein, der ja von seinen juvenileren Verwandten Lee Culp Youth und Lee Culp Adult lediglich durch die deutlich stärkeren Abrasionen unterscheidet. Die nur mangelhaften Rekonstruktionen der abrasionsfreien Modelle VITA Physiodens Posteriores und Ivoclar lassen sich jedoch nicht auf diesen Effekt zurückführen. Sie scheinen einfach nicht so gut in den virtuellen Zahnraum zu passen, der von dem biogenerischen Zahnmodell aufgespannt wird.

Inwieweit eine naturnahe Form von Prothesenzähnen eine Rehabilitation nach gnathologischen Regeln verbessert, lässt sich jedoch nicht so einfach nachweisen.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Längenmessungen und deskriptive Charakterisierungen waren bisher die einzigen Anhaltspunkte zur Beschreibung der Kauflächenmorphologie. Für computergestützte Verfahren in der Zahnmedizin ist dies für die Erstellung eines Datensatzes nicht mehr ausreichend. In der Literatur existieren hierzu bisher keine Lösungsansätze.

In dieser Arbeit wurde in einem ersten Schritt eine Zahnbibliothek aus unversehrten Kauflächen aufgebaut. Mit Hilfe dieser Zahndatenbank wurde ein mathematisches Modell (Mehl 2002), das einen bestimmten Zahntypus anhand weniger Parameter unter Berücksichtigung funktioneller und biologisch relevanter Strukturen mathematisch beschreiben kann, erstellt.

Dieses biogenerische Zahnmodell wurde an verschiedenen, der Zahnbibliothek unbekannt, Zähnen getestet. Die Ergebnisse zeigen, dass in allen Fällen eine vollautomatische Anpassung möglich war. Die Genauigkeiten der Anpassungen lagen bei etwa 87 μm . Des Weiteren wurden verschiedene Einflussgrößen auf das mathematische Modell untersucht. Dabei konnten keine allgemeingültigen Werte gefunden werden, die in jedem Falle die besten Ergebnisse liefern. Die Bandbreite der entsprechenden Werte konnte jedoch eingegrenzt werden. Die visuelle Auswertung und der metrische Vergleich der Anpassungen verdeutlichen die große Flexibilität des biogenerischen Zahnmodells.

In einem weiteren Schritt wurden die Bibliothekskauflächen untereinander verglichen. Der Durchschnittswert für die mittlere Abweichung von dem rechten und dem linken ersten Molaren jeweils eines Probanden beträgt 119 μm im Unterkiefer und 126 μm im Oberkiefer. Bei dem Vergleich von ersten Molaren

unterschiedlicher Probanden ergibt sich ein Wert von 276 μm im Unterkiefer und 340 μm im Oberkiefer.

In einer Dritten Versuchsanordnung wurden sieben Prothesenzähne mittels biogenerischen Zahnmodells auf ihre „Natürlichkeit“ getestet. Vier Zähne konnten als eher natürliche Durchschnittszähne klassifiziert werden. Zwei Zähne wurden als nicht repräsentative Durchschnittszähne eingestuft. Ein Zahn konnte auf Grund seines starken Abrasionsgrades nicht eingeordnet werden.

Insgesamt besteht mit Hilfe des biogenerischen Zahnmodells die Möglichkeit, Kauflächen vollautomatisch unter Berücksichtigung biologischer und funktionseller Kriterien zu rekonstruieren. Inwieweit dies bei Zähnen gelingt, die einen großem Substanzverlust erfahren haben, beispielsweise durch Inlay-/Onlaypräparation, müssen weitere Studien zeigen. Auch scheint die Frage interessant, ob es möglich ist, von noch erhaltenen Zähnen Rückschlüsse auf bereits zerstörte Zähne zu erhalten.

LITERATUR

1. Adolph S, Gürke S: Modeling of a fitting inlay from various information. VMV Stuttgart 309-316 (2001)
2. Biggerstaff RH: Cusp size, sexual dimorphism and heritability of cusp size in twins. Am J Phys Anthropol 42:127–140 (1975)
3. Biggerstaff RH: The basal area of posterior tooth crown components: the assessment of within tooth variations of premolars and molars. Am J Phys Anthropol 31(2): 163-70 (1969)
4. Böhm U: CAD/CAM contra Gießen. Quintessenz Zahntech 28, 2, 114-120 (2002)
5. Bolton WA: The clinical application of a tooth-size analyses. Am J Orthod 48: 504-529 (1962)
6. Carlsen O: Morphologie der Zähne, Deutscher Ärzte-Verlag GmbH, Köln (1990)
7. Casanova MF, Sanders RD, Goldberg TE, Bigelow LB, Christison G, Torrey EF, Weinberger DR: Morphometry of the corpus callosum in monozygotic twins discordant for schizoprenia. J Neurol Neurosurg Psychiatry 53, 416-421 (1990)
8. Dahlberg AA: Analyses of the American Indian dentition. Aus Brothwell D.R.(ed.): Dental Anthropology, New York, Pergamon Press, 149-77 (1963)

-
9. Dahlberg AA: Dental evolution and culture. *Human biology*, 35, 237-49 (1963)
 10. Dryden I.L., Mardia K.V.: *Statistical Shape analysis*. Wiley, New York (1998)
 11. Felber L, Leemann Th, Mörmann WH: Computergestützte vollautomatische Konstruktion von Inlays. *Acta Med Dent Helv* 2, 217-225 (1997)
 12. Ferrario VF, Sforza C, Gianluca M, Colombo A, Serrao G: Size and Shape of the Human First Permanent Molar: A Fourier Analysis of the Occlusal and Equatorial Outlines. *Am J Phys Anthropol* 108: 281-94 (1999)
 13. Garn SM, Lewis AB, Kerewsky RS: Sex differences in tooth size. *Journal of Dental Research*, 43, 306 (1964)
 14. Halozonitis DJ, Shapiro E, Gheewalla RK, Clark RE: Quantitative description of shape of the mandible. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 99, 49-56 (1991)
 15. Hanihara K: Criteria for the classification of crown characters of the human dentition. Unpublished mimeo and dental stone plaques (1961)
 16. Harris EF, Dinh DP: Intercusp Relationships of the Permanent Maxillary First and Second Molars in American Whites. *Am J Phys Anthropol* 130:514–528 (2006)
 17. Kabban M, Fearne J, Jovanovski V, Zou L: Tooth size and morphology in twins *International Journal of Paediatric Dentistry*; 11: 333–339(2001)

18. Kanazawa E, Mayhall JT: Three-dimensional analysis of maxillary first molar crowns of Canadian Inuit. *Am J Phys Anthropol* 78(1), 73-8 (1989)
19. Kanazawa E, Ozaki T: An application of the moire method to three-dimensional measurements of occlusal aspects of molars. *Acta Morphol Neerl Scand* 22(1), 85-91 (1984)
20. Kanazawa E, Sekikawa M, Ozaki T, Sekikawa M, Namura T, Richards LC: Three-dimensional measurement of the maxillary first molars in Australian whites. *Nichidai Koko Kakaku* 15(4), 457-64 (1989)
21. Kanazawa E, Sekikawa M, Ozaki T: Three-dimensional measurement of the occlusal surface of upper first molars in a dutch population. *J Dent Res* 63, 1298-1301 (1984)
22. Kanazawa E, Sekikawa M, Tadaschi O: Three-dimensional measurement of the occlusal surface of upper first molars in a modern japanese population. *Acta Anat* 116, 90-96 (1983)
23. Kern M, Mehl A: Neue Perspektiven für CAD/CAM in der Zahnheilkunde? *Quintessenz Zahntech* 28, 11, 1244-1250 (2002)
24. Kieser JA, Human adult odontometrics. University Press, Cambridge (1991)
25. Kolndorffer K: Zahnersatz für Teilbezahnte. In: Böttger H, Hrsg. Funktionelle Okklusion. Gleitbahnbezogene Diagnostik und Therapie. Berlin: Quintessenz Verlags-GmbH (1982)

26. 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): 239-246 (1998)
27. Kubota K, Natori M, Sasaki K: Three-dimensional Measurement Study of the Maximum Protuberance and Cervical Line of Upper Molars. *J Nihon Univ Dent* 36(1), 58-67 (1994)
28. Kunzelmann KH, Mehl A, Pelka M: Automatische Rekonstruktion von Kauflächen computergenerierter Restaurationen. *Zahnärztl Welt/Rundschau* 102, 695-703 (1993)
29. Kuswandandari S, Nishino M: The mesiodistal crown diameter of primary dentition in Indonesian Javanese children. *Arch Oral Biol* 49(3): 217-22 (2004)
30. Lang NP, Gipp A, Grendelmeier A: *Freedom in Centric. Ein Lehrgang für das Aufwachsen von Okklusionsflächen nach dem Prinzip der Freiheit in Zentrik.* Berlin: Quintessenz Verlags-GmbH (1989)
31. Lavelle CL: A metric analysis of occlusal morphology between three population samples. *Bull Group Int Rech Sci Stomatol Odontol (Belgien)* 27(3) 181-98 (1984)
32. Lavelle CL: An analysis of molar tooth form. *Acta Anat (Basel)* 100(3), 282-8 (1978)
33. Lorenz RJ: *Grundbegriffe der Biometrie, 4. Auflage,* Gustav Fischer Verlag, Stuttgart (1996)

-
34. Magne P, Gallucci GO, Belser UC: Anatomic crown with/length ratios of unworn and worn maxillary teeth in white subjects. *J Prosthet Dent* 89(5): 453-61 (2003)
35. Mattiola A, Mörmann WH, Lutz F.: Computergestützte Okklusion von Cerec 2 Inlays und Overlays. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 105: 1283-1290 (1995)
36. Mehl A: Der „Biogenerische Zahn“. Ein neuartiges Verfahren zur hochpräzisen biologisch funktionellen Gestaltung von Zahnrestorationen. Dissertationsschrift (2003)
37. Mehl A: 3D-Datenerfassung und CAD/CAM-Technologie in der restaurativen Zahnmedizin – Entwicklung, Einsatz und Perspektiven eines neuen Verfahrens. Habilitationsschrift (1998)
38. Mehl A, Blanz V, Hickel R: Was ist der „Durchschnittszahn“? Ein mathematisches Verfahren für die automatische Berechnung einer repräsentativen Kaufläche. *Dtsch Zahnärztl Z* 60, 335-341 (2005)
39. Mehl A, Blanz V: Neues Verfahren zur vollautomatischen Kauflächenrekonstruktion mittels biogenerischem Zahnmodell. *Int J Comput Dent* 8, 13-25 (2005a)
40. Mehl A, Gloger W, Hickel R: Erzeugung von CAD-Datensätzen für Inlays und Kronen mit funktionellen Kauflächen. *Dtsch Zahnärztl Z* 52, 520-524 (1997)
41. Mehl A, Gloger W, Kunzelmann KH, Hickel R: Entwicklung eines neuen optischen Oberflächenmessgerätes zur präzisen dreidimensionalen Zahnvermessung. *Dtsch Zahnärztl Z* 51, 23-27 (1996)

- 42.Mehl A, Blanz V, Hickel R: Was ist der „Durchschnittszahn“? DZZ 60(6), 335-341(2005b)
- 43.Moorrees CFA, Thomsen SO, Jensen E, Yen PK: Mesiodistal crown diameters of the deciduous and permanent teeth in individuals. J Dent Res 36,39-47 (1957)
- 44.Paulus D, Wolf M, Meller S, Niemann H: Three-dimensional computer vision for tooth restoration. Med Image Analysis 3, 1-19 (1999)
- 45.Pirila-Parkkinen K, Pirttiniemi P, Alvesalo L, Silven O, Heikkilä J, Osborne RH: The relationship of handedness to asymmetry in the occlusal morphology of first permanent molars. Eur J Morphol 39(2): 81-9 (2001)
- 46.Pirila-Parkkinen K, Pirttiniemi P, Alvesalo L, Silven O, Heikkilä J, Julko J, Karjalahti P: A New Method for Measuring Three-Dimensional Dental Morphology, aus Proceedings of the 11th symposium on Dental Morphology, Oulu, Finland (1998)
- 47.Pirila-Parkkinen K, Pirttiniemi P, Alvesalo L, Silven O, Heikkilä J, Julko J, Karjalahti P: Asymmetry in the occlusal morphology of first permanent molars in 45,X/46XX mosaics. Arch Oral Biol 43:25-32 (1998)
- 48.Ramford SP, Ash M: Individuell optimale Okklusion. Berlin Quintessenz Verlags-GmbH (1992)
- 49.Robinson DL, Blackwell PG, Stillmann EC, Brook AH: Development of a coherent methodology for the analysis of tooth shape. Dental morphology 2001, Refereed full papers from the 12th International Symposium on Dental Morphology, Sheffield, United Kingdom (2001b)

-
50. Robinson DL, Blackwell PG, Stillmann EC, Brook AH: Impact of landmark reliability on the planar Procrustes analysis of tooth shape. *Arch Oral Biol* 47, 545-54 (2002)
51. Robinson DL, Blackwell PG, Stillmann EC, Brook AH: Planar Procrustes analysis of tooth shape. *Arch Oral Biol* 46, 191-199 (2001a)
52. Saliger G: Designing a CEREC crown. In: *Cerec 10 year anniversary Symposium*, ed. W.H. Mörmann. Quintessence, Chicago, 427-440 (1996)
53. Scott GR, Turner II CG: *The anthropology of modern human teeth*. University Press, Cambridge (1997)
54. Shen L, Rangayyou RM, Desautel JEL: Application of shape analysis to mammographic calcifications. *IEEE Trans Med Imag* 13, 263-274 (1994)
55. Soma K, Takehiro K, Toru N, Fujio M: Three-dimensional digitation: Method for evaluating morphological differences between teeth. *Bull Tokyo Med Dent Univ*, 38,1-8 (1991)
56. Stuart CE: Good occlusion for natural teeth. *J Prosthet Dent* 14, 716-724 (1964)
57. Thomas PC: *Syllabus on full mouth waxing technique for rehabilitation*. Postgraduate education. UCS. San Francisco (1965)
58. Tobias PV: *Progress and Problems in the study of the early man in Sub-Saharan Africa*. Aus: *The Funktional and Evolutionary Biology of Primates* von Tuttle, H., Chicago; 63-93 (1971)
59. Townsend GC, Dempsey P.J.: Genetic and environmental contributions to variation in human tooth size. *Heredity* 86(6): 685-93 (2001)

-
60. Tucker AS, Sharpe PT: Molecular genetics of tooth morphogenesis and patterning: the right shape in the right place. *J Dent Res* 78:826–834 (1999)
61. Turner II CG, Nichol CR, Scott GR: Scoring procedures for key morphological traits of the permanent dentition; the Arizona State University dental anthropology system. Aus Kelly, M.A., Larsen, C.S. (eds): *Advances in Dental Anthropology*. New York, Wiley-Liss, 13-31 (1991)

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

1. aus: Dental Morphology. Department of Human Evolution - Max Planck Institute for Evolutionary Anthropology, Leipzig
2. aus: Pirila-Parkkinen K, Pirttiniemi P, Alvesalo L, Silven O, Heikkilä J, Julko J, Karjalahti P: A New Method for Measuring Three-Dimensional Dental Morphology, aus Proceedings of the 11th symposium on Dental Morphology, Oulu, Finland (1998)
3. eigenes Bildmaterial
4. eigenes Bildmaterial
5. aus: Scott, G.R., Turner II, C.G.: The anthropology of modern human teeth. University Press, Cambridge (1997)
- 6.+7. aus: Kanazawa, E., Ozaki, T.: An application of the moire method to three-dimensional measurements of occlusal aspects of molars. Acta Morphol Neerl Scand 22(1), 85-91 (1984)
8. aus: Pirila-Parkkinen K., Pirttiniemi P., Alvesalo L., Silven O., Heikkilä J., Julko J., Karjalahti P.: A New Method for Measuring Three-Dimensional Dental Morphology, aus Proceedings of the 11th symposium on Dental Morphology, Oulu, Finland (1998)
9. aus: Soma, K., Takehiro, K., Toru, N., Fujio, M.: Three-dimensional digitation: Method for evaluating morphological differences between teeth. Bull Tokyo Med Dent Univ, 38,1-8 (1991)

10.+11. aus: Lavelle, C.L.: An analysis of molar tooth form. Acta Anat (Basel) 100(3), 282-8 (1978)

12. aus: Robinson, D.L., Blackwell, P.G., Stillmann, E.C., Brook, A.H.: Planar Procrustes analysis of tooth shape. Arch Oral Biol 46, 191-199 (2001a)

13.-14. eigenes Bildmaterial

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

16.-49. eigenes Bildmaterial

9 LEBENSLAUF

Name: Andreas Peter Litzenburger
Geburtsdatum: 16. September 1977
Geburtsort: München
Familienstand: ledig
Staatsangehörigkeit: deutsch
Eltern: Agnes Maria Litzenburger, geb. Franziszi
Ingolf Litzenburger, Dipl. Ing.

Beruf:

seit Juli 2004 Tätigkeit als Zahnarzt

Studium:

Dezember 2003 Staatsexamen im Fach Zahnmedizin an der
- Juni 2004 Ludwig-Maximilians-Universität München

April 1999 Studium der Zahnmedizin an der
- Juni 2004 Ludwig-Maximilians-Universität München

Schulbildung:

Juni 1997 Abitur
1989-1997 Staatliches Gymnasium München Moosach
1985-1989 Dom-Pedro-Schule, München

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 meiner Kollegin Frau Juliane Richter und Herrn Florian Probst 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 meiner Familie danken, da sie mir dieses Studium erst ermöglicht hat und mir immer mit Rat und Tat zur Seite stand.