

Aus der Abteilung für Kieferorthopädie und Orthodontie des
Centrums für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der
Medizinischen Fakultät Charité - Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

Präzision der softwarebasierten Kontaktpunktmodellierung bei der *SureSmile*®-Technik

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor medicinae dentariae
(Dr. med. dent.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité - Universitätsmedizin Berlin

von

Ariane Breustedt

aus Berlin

Gutachter:

1. Prof. Dr. P.-G. Jost-Brinkmann
2. Prof. Dr. J. Jackowski
3. Prof. Dr. T. Bernhart

Datum der Promotion: 22.3.2013

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	4
1.1	CAD/CAM-VERFAHREN	5
1.1.1	Entwicklung von CAD/CAM-Verfahren in der Zahnmedizin	6
1.2	CAD/CAM-SYSTEME	8
1.2.1	Prothetik	8
1.2.2	Kieferorthopädie	10
1.3	DAS SURESMILE®-SYSTEM	15
1.3.1	Entwicklung des SureSmile®-Systems	15
1.3.2	Klinische Anwendung	15
1.3.3	Bestandteile des SureSmile®-Systems	17
2	FRAGESTELLUNGEN	28
3	MATERIALIEN UND METHODEN	29
3.1	ZAHNAUSWAHL	29
3.2	KIEFERMODELLERSTELLUNG	29
3.3	ZAHNBOGENSCAN	31
3.4	ORIGINALZAHNSCAN	32
3.5	RAPIDFORM®	33
3.5.1	Registrierung	34
3.5.2	Koordinatensystemerstellung	38
3.5.3	Kontaktpunkt-Bestimmung	42
3.5.4	Quantitative Kontaktpunktanalyse	45
3.6	GEOANALYZER®	46
3.6.1	Qualitative Zahnkontaktanalyse	48
3.6.2	Clipping-Plane-Funktion	48
3.7	METHODENFEHLER	49
4	ERGEBNISSE	51
4.1	METHODENFEHLER	51
4.2	ÜBERSICHT DER STATISTISCHEN VERFAHREN	52
4.3	ERGEBNISSE DER QUALITATIVEN ZAHNKONTAKTANALYSE	53
4.4	ERGEBNISSE DER QUANTITATIVEN KONTAKTPUNKTANALYSE	56
4.4.1	Ausmaß der Abweichung der Kontaktpunkte von Original- und SureSmile®-Zähnen bezogen auf die drei Raumrichtungen	56
4.4.2	Ausmaß der Abweichung der Kontaktpunkte von Original- und SureSmile®-Zähnen abhängig von Zahngruppen im Ober- und Unterkiefer	58

4.4.3	Häufigkeit der Übereinstimmung der Kontaktpunkte von SureSmile®- und Originalzähnen bezogen auf die X-Achse (mesiodistale Richtung)	59
4.4.4	Häufigkeit der Übereinstimmung der Kontaktpunkte von SureSmile®- und Originalzähnen verglichen zwischen Ober- und Unterkiefer	60
4.4.5	Häufigkeit der Übereinstimmung der Kontaktpunkte von SureSmile®- und Originalzähnen verglichen zwischen den einzelnen Zahngruppen im Ober- und Unterkiefer	61
4.4.6	Binäre logistische Regression	63
5	DISKUSSION	64
5.1	HERSTELLUNG DER ZAHNBOGENMODELLE	64
5.2	SCANVERFAHREN	66
5.3	SCANGENAUIGKEIT UND METHODENFEHLER	68
5.4	SOFTWAREANALYSE	69
5.5	QUALITATIVE ZAHNKONTAKTANALYSE	70
5.6	QUANTITATIVE KONTAKTPUNKTANALYSE	72
6	BEANTWORTUNG DER FRAGESTELLUNGEN	75
7	ZUSAMMENFASSUNG	77
8	SUMMARY	78
9	LITERATURVERZEICHNIS	79
10	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	85
11	TABELLENVERZEICHNIS	89
12	ANHANG	90
12.1	ANHANG I: KOORDINATENSYSYSTEMERSTELLUNG	90
12.2	ANHANG II: DEFINIEREN DER KONTAKTPUNKTE	94
12.3	ANHANG III: DEFINITION DER KONTAKTPUNKTE IN X, Y UND Z	98
12.4	ANHANG IV: ABSTANDSMESSUNG MIT GEOANALYZER®	101
12.5	ANHANG V: GEOANALYZER® CLIPPING-PLANE-FUNKTION	105
12.6	ANHANG VI: SETUP-ERSTELLUNG MIT SURESMILE® AN EINEM UNTERKIEFERZAHNMODELL	109
13	DANKSAGUNG	111
14	LEBENS LAUF	112
15	EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG	113

1 Einleitung

In vielen Bereichen der Zahnmedizin ist das Anfertigen von Kiefermodellen notwendig. Zur konventionellen Modellherstellung wird die intraorale Patientensituation durch ein

Abformmaterial auf einem Abformlöffel erfasst und anschließend in Gips überführt. Alternativ besteht die Möglichkeit, mit Hilfe einer intraoralen Kamera oder eines intraoralen Scanners die Kiefersituation zu erfassen und im Anschluss auf einem Computerbildschirm als digitales Modell darzustellen. Bei beiden Verfahren liegt der Schwachpunkt in der Erfassung der Zahnzwischenräume, also den Flächen, die unmittelbar aneinander grenzen und den Kontakt zum Nachbarzahn bilden. Weder auf einem Gipskiefermodell noch bei einem digitalen Kiefermodell ist dieser Bereich exakt darstellbar, da der Zwischenraum in der Regel für beide Verfahren zu eng ist, um detailliert abgebildet werden zu können.

Für prothetische Arbeiten wie zum Beispiel Brücken, Kronen, Teilkronen oder Veneers, müssen einzelne Zähne, die vom Zahnarzt beschliffen worden sind, zur Erstellung des Zahnersatzes vom Zahntechniker aus dem Gipskiefermodell herausgetrennt werden. Im Rahmen der Restauration, die der Zahntechniker herstellt, wird versucht, die fehlende Fläche wieder entsprechend der ursprünglichen Anatomie zu rekonstruieren.

Im Bereich der Kieferorthopädie werden bei einer Setup-Erstellung ebenfalls die Zähne aus den Gipskiefer- oder digitalen Modellen herausgetrennt, um sie dann in der gewünschten Endposition im Modell wieder einzufügen. Durch das Separieren (Auftrennen der zusammenhängenden Zahnreihe in Einzelzähne) gehen die approximalen Kontaktpunkte verloren. Bei den digitalen Modellen entsteht auf dem Bildschirm in diesem nicht gescannten Zahnbereich ein Scan-Defekt, da bei der Aufzeichnung im Approximalraum keine Daten erfasst werden können. Dieser optisch fehlende Bereich wird von der Software ergänzt.

Hieraus ergibt sich die Fragestellung, wie genau diese Rekonstruktion der fehlenden approximalen Zahnanteile ist, wenn sie von einer Computersoftware modelliert werden.

In der folgenden Arbeit wird das CAD/CAM-basierte System *SureSmile*® der Firma OraMetrix® bezüglich seiner Genauigkeit der softwarebasierten Kontaktpunktmodellierung untersucht. Diese am Computer virtuell modellierten Kontaktbereiche werden dabei mit den Kontaktbereichen der gescannten Originalzähne verglichen, indem sie metrisch vermessen und Unterschiede statistisch ausgewertet werden.

1.1 CAD/CAM-Verfahren

CAD ist die englische Abkürzung für „Computer Aided Design“ und bedeutet „computergestützte Konstruktion“ [1]. Die Abkürzung bezeichnet das Erstellen von Konstruktionsunterlagen u.a. für mechanische, elektrische und elektronische Erzeugnisse mit Hilfe spezieller Software. Dieses Verfahren wird in vielen Bereichen wie Maschinenbau, im Bauingenieurwesen, in der Architektur, in der Elektrotechnik und in der Zahnmedizin angewandt.

CAM ist die englische Abkürzung für „Computer Aided Manufacturing“ und steht für die „computergestützte Herstellung“ [1, 2]. CAM bezieht sich auf die direkte Steuerung von Produktionsanlagen und unterstützt zudem Transport- und Lagerungssysteme. CAM stellt einen wesentlichen Bestandteil der computerintegrierten Produktion dar.

Zusammenfassend bezeichnet CAD/CAM die dreidimensionale Planung eines Werkstückes am Bildschirm eines Computers und dessen automatische Herstellung durch computergesteuerte Maschinen.

1.1.1 Entwicklung von CAD/CAM-Verfahren in der Zahnmedizin

In der Zahnmedizin fanden die ersten Entwicklungen im Bereich der CAD/CAM-Technologie in den 70er Jahren statt. Young und Altshuler begannen mit der Grundlagenforschung zur Datenaufnahme im Bereich der Laserholographie. Sie erfanden eine Methode zur direkten optischen Datenerfassung [3]. Den Grundstein zur Entwicklung eines CAD/CAM-Systems im prothetischen Fachbereich legten Duret in Frankreich, Mörmann sowie Brandestini in der Schweiz und Rekow in den USA [3-9]. Die oberste Zielsetzung war, eine Technik zur intraoralen Datenaufnahme zu entwickeln, an die unmittelbar im Anschluss die Fertigung eines Zahnersatzes erfolgen konnte. 1971 begann Duret mit ersten experimentellen Forschungsarbeiten. Er befasste sich mit der dreidimensionalen Datenerfassung aus der Kombination mehrerer Fotoaufnahmen und der Technik der Lasertriangulation [10, 11]. 1983 wurde in Frankreich der erste CAD/CAM-Prototyp im Bereich der Zahnmedizin zur Fertigung von Kronen vorgestellt. Die Entwicklung erfolgte durch Duret, der somit als „Vater“ der CAD/CAM-Technologie in der Zahnmedizin gilt [6]. Mörmann und Brandestini begannen 1980 mit der Entwicklung des *CEREC®-Systems*, das 1985 auf dem Markt eingeführt wurde. Sie entwickelten, basierend auf Streifenmusterprojektion, ein Verfahren zur aktiven Triangulation von Lichtschnitten [8]. Rekow arbeitete auf dem Gebiet der Stereophotogrammetrie mit dem Ziel, zweidimensionale Fotoaufnahmen computergestützt zu einem dreidimensionalen Bild zusammenzufügen.

Ende der 80er Jahre standen verschiedene CAD/CAM-basierte Produkte zur Verfügung: das *Duret®-System* (später *Sopha®-System*), entwickelt von Duret, hergestellt von Hennson International in Los Angeles, das *CEREC®-System* von Brandestini und Mörmann entwickelt, produziert von Sirona Dental Systems in Bensheim, Deutschland und das *Minnesota®-System* oder *Rekow®-System* (später *DentiCAD®*) entwickelt von Rekow und hergestellt von BEGO in Bremen, Deutschland [12, 13].

Auch Andersson und seine Arbeitsgruppe aus Schweden befassten sich seit 1987 mit der mechanischen Datenerfassung. 1989 wurde von ihnen das ebenfalls CAD/CAM basierte

sowie prothetisch orientierte System *Procera*® vorgestellt. 1991 wurde *Procera*®*All Titan* auf dem Markt eingeführt. Das System wird in Göteborg, Schweden von der Firma Nobel Biocare hergestellt [14, 15].

Allen Systemen gemeinsam ist die Nutzung der CAD/CAM-Technologie, um individuelle prothetische Werkstücke aus unterschiedlichen Materialien herzustellen.

Das *Rekow*®-System dient zur Herstellung von Metallkronen und Inlays. Das *Duret*®-System kann neben Inlays, Onlays und Kronen auch zur Herstellung von kombiniertem Zahnersatz bis zur Totalprothese eingesetzt werden. Als Kronenmaterial stehen Gold, Nichtelegmetalle, Kunststoff oder Keramik zur Verfügung. Das *CEREC*®-System arbeitet ausschließlich mit Keramik und fertigt daraus entsprechenden Zahnersatz [16-18]. Das *Procera*®*All Titan*-System stellt eine Kombination aus Kopierfräsung und Funkenerosion dar. Es ermöglicht die Bearbeitung von Titan [19].

In den 90er Jahren folgten viele weitere CAD/CAM-basierte Entwicklungen in der Zahnmedizin vorwiegend in der Prothetik, wie 1991 *Celay*® (Mikrona, Spreitenbach, CH), 1993 *Cicero*® (Cicero Dental Systems, Hoorn, NL), 1995 *Cercon smart ceramics*® (DeguDent, Hanau, D), 1996 *Procera All Ceram*® (Nobel Biocare, Göteborg, S), 1999 *Digident*® (Girrbach Dental, Pforzheim, D) [10]. 1994 wurden *CEREC*®*II*, 2000 *CEREC*®*III* und 2001 *CEREC*® *in Lab* eingeführt [20].

In den 2000er Jahren kamen weitere CAD/CAM-basierte Neuentwicklungen auf den Markt wie 2001 das *Lava*®-System (Espe Dental, Seefeld, D) sowie das *Everest*®-System (KaVo Dental, Biberach, D) und 2003 das *FutureDent*®-System (Bego Medical, Bremen, D). Andererseits wurden bereits vorhandene Verfahren nach Überarbeitung und Weiterentwicklung erneut eingeführt, so wie beispielsweise 2001 das *Cercon*®-System (DeguDent, Hanau, D) oder 2005 das *Cicero*®-System (Dental Systems, Hoorn, NL).

Nur wenige der Verfahren haben bisher eine weltweite Verbreitung gefunden. Die Mehrzahl der Anwender befindet sich in Deutschland, Skandinavien und den U.S.A. Der derzeitige starke Anstieg an CAD/CAM-Technologien spiegelt die zunehmende Bedeutung dieser Verfahren auf dem Dentalmarkt wider und wird auch in der Zukunft an Bedeutung wachsen. Nahezu jede Dentalfirma arbeitet an der Entwicklung eines eigenen Systems [10].

Auch in der Kieferorthopädie wurde die CAD/CAM-Technologie angewandt. 1997 wurden CAD/CAM-basierte Systeme wie *Invisalign*® und *Incognito*® etabliert. *Incognito*® arbeitet mit einem Biegeroboter, der auf eine Erfindung von Fischer Brandies und Orthuber 1984 zurückgeht und eine Weiterentwicklung des *Orthomate*®-Systems (Syrinx Medical Technologies, Berlin, D) darstellt. *Orthorobot*® (Medizintechnik, Österreich) wurde von Silli zum gezielten Platzieren von Brackets entwickelt. 1989 erschien das *SureSmile*®-System

der Firma OraMetix® auf dem Markt. Auch bei diesem System kommt sowohl die CAD/CAM-Technologie als auch die Robotertechnik zum Einsatz [21]. Die kieferorthopädischen Entwicklungen werden nach dem folgenden prothetischen Beispiel für ein CAD/CAM-Verfahren genauer erläutert (siehe 1.2.2).

1.2 CAD/CAM-Systeme

Die CAD/CAM-Anwendungen CAD/CAM gestützter Verfahren in der Zahnmedizin werden vor allem im Bereich der Prothetik, der Kieferorthopädie aber auch der Dysgnathiechirurgie angewandt [11, 22, 23]. Im Folgenden wird, aufgrund der deutlich größten Datenlage im Bereich der Prothetik, exemplarisch ein CAD/CAM-Verfahren erläutert.

1.2.1 Prothetik

Im Bereich der Prothetik steht eine Vielzahl von Systemen zur Verfügung. Diese unterscheiden sich sowohl in der Datenerfassung, der CAD-Software also auch in den CAM-Verfahren. Rückblickend hat sich das *CEREC®-System* am stärksten durchgesetzt und ist kontinuierlich weiterentwickelt worden. *CEREC®-Restorationen* wurden mehrfach wissenschaftlich untersucht [24-28].

Da *CEREC®* in Deutschland ein bekanntes System in der Zahnmedizin ist, soll es stellvertretend für die anderen CAD/CAM-Systeme im Folgenden genauer beschrieben werden.

Zudem arbeitet das *CEREC®-System* mit einer intraoralen Kamera zur Datenerfassung und ein ähnliches Prinzip liegt bei dem zu untersuchenden *SureSmile®-System* vor.

1.2.1.1 CEREC®-System

Das Wort „Cerec“ ist die Abkürzung von CERamic REConstruction. Die Entwicklung des Systems erfolgte durch Mörmann und Brandestini und ist seit 1985 auf dem Markt [8, 9, 17].

Das *CEREC®-System* wird für die Herstellung von festsitzendem und kombiniert festsitzend-herausnehmbarem Zahnersatz verwendet. Es dient der Herstellung von Inlays, Teilkronen, Kronen, Brücken- und Teleskopgerüsten aus Keramik [29]. Darüber hinaus ist die Herstellung von Veneers und auch Implantatkronen möglich [30]. Das *CEREC®-System* setzt sich aus den klassischen drei CAD/CAM-Komponenten Kamera, Software/Computer und Fräsmaschine zusammen.

Der beschliffene Zahn wird durch die Digitalkamera im Mund oder am Gipskiefermodell aufgenommen. Für die intraorale Aufnahme der Kavität sind eine relative Trockenlegung sowie das Besprühen der Kavität und der angrenzenden Nachbarzähne mit einem Titandioxidspray notwendig. Dieses Spray legt einen Film von mikropulverisiertem Titandioxid mit einer speziellen Kristallstruktur über den scanrelevanten Bereich. So wird der Reflexionsgrad der besprühten Oberfläche herabgesetzt, sodass die Kamera die Oberfläche digital erfassen kann [8].

Die Bilddaten werden computertechnisch mit einer entsprechenden Software zu einem dreidimensionalen Bild zusammengefügt und dargestellt. Unter Berücksichtigung der im Gerät integrierten Zahndatenbank und durch die Verarbeitung der aufgenommenen Daten wird die entsprechende Zahnrestauration, wie beispielsweise eine Krone oder ein Inlay, konstruiert [31]. Zur Erstellung dieser Datenbank wurden von Mehl und Blanz Messdaten mehrerer tausend Zähne gespeichert. Eine Lernsoftware suchte und ordnete entsprechende Strukturen und Merkmale wie Höckerspitzen, Randleisten und Fissuren zwischen den jeweiligen Zahnpaaren. Aus den Daten wurde ein Modellzahn errechnet, der dem Mittel aller natürlich vorkommenden Zähne entspricht und aus den Differenzen zwischen dem Durchschnittszahn und den Bibliothekszähnen wurden die in der Natur am häufigsten vorkommenden Abweichungen bestimmt. Die Software verformt die Zähne bei der Rekonstruktion so lange, bis morphologisch erkennbare Merkmale mit denen des präparierten Zahnes übereinstimmen. So wird eine funktionelle und ästhetisch optimale Morphologie der Kaufläche erstellt.

Die dritte Komponente (CAM-Komponente) bildet die Fräsmaschine (*CEREC inLab®*, Sirona, Bensheim, D). Die von der Computereinheit erstellten Daten werden per Funk an die Fräseinheit übermittelt. Diese schleift die Restauration aus einem industriell gefertigten Keramikblock heraus [32].

Als Neuerung in den letzten Jahren wurden eine leistungsfähige Software und eine webbasierte Kommunikationsplattform *CEREC Connect®* (Sirona, Bensheim, D) eingeführt, sodass die Versendung virtueller Kiefermodelle an Dentallabore möglich ist. Der Zahntechniker lädt die Daten von der Internetplattform herunter und prüft die Qualität der Daten. Die Weiterbearbeitung der Restauration erfolgt entweder mit der Schleifheinheit *CEREC inLab®* oder auf dem klassischen Weg am Modell. Für die Modellerstellung wird der Datensatz an *infiniDent®*, der zentralen Fertigung von Sirona, versendet. Mittels Stereolithografie-Verfahren wird ein dreidimensionales Modell aus speziellem Acrylkunststoff erstellt. Das fertige Modell wird binnen 48-72 Stunden an das Labor geliefert und ist bereits gesägt und auf eine Lochplatte gepinnt. Wahlweise können auch Präparationsgrenzen an den Zahnstümpfen von *infiniDent®* freigelegt werden. Die Materialauswahl bei *CEREC®* ist

nicht mehr nur auf Keramik beschränkt, sondern es können auch Restaurationen aus Edel- und Nichtedelmetallen hergestellt werden [22, 33].

1.2.2 Kieferorthopädie

Im Fachbereich der Kieferorthopädie sind ebenfalls in den letzten 20 Jahren die CAD/CAM-Entwicklungen vorangeschritten, um den Behandlungsablauf zu optimieren und Arbeitsschritte zu erleichtern. Es gibt CAD/CAM-basierte kieferorthopädische Systeme, die Behandlungsapparaturen auf der Basis einer speziellen CAD-Software herstellen. Mit Hilfe dieser Computersysteme erfolgt die CAM-basierte Herstellung von herausnehmbaren und festsitzenden Apparaturen wie *Invisalign*®, *Incognito*®, *SureSmile*® bis hin zur CAD/CAM-basierten Planung von orthognather Chirurgie und der Erstellung der anschließend notwendigen Schienung [22, 34-36]. Die kieferorthopädischen Systeme *Invisalign*®, *Incognito*® und *SureSmile*® werden im Folgenden genauer beschrieben.

1.2.2.1 Invisalign®-System

Die Bezeichnung „Invisalign“ setzt sich aus den englischen Wörtern „invisible“ (=unsichtbar) und „align“ (=ausrichten) zusammen.

Invisalign® ist ein kieferorthopädisches CAD/CAM-Behandlungssystem, das zur Zahnbewegung eine Serie von druckgeformten, durchsichtigen, herausnehmbaren Schienen verwendet [37].

Die Therapie erfolgt auf der Grundlage eines dreidimensionalen digitalen Kiefermodells. Die Dateninformationen zum Erstellen dieses Kiefermodells werden inzwischen durch die Anfertigung einer Computertomographie (CT) der abgeformten Kiefersituation und eines entsprechenden Bissregistrates geliefert. Durch den Einsatz einer CAD-Software ist die Behandlungsplanung und -simulation möglich. Der Behandlungsverlauf und das Behandlungsergebnis können jedoch nur visuell überprüft werden. Theoretisch ist jedoch auch der Vergleich der intraoralen Situation nach Abschluss der Behandlung durch ein erneutes CT einer Abformung nach Behandlungsende mit dem vor der Behandlung erstellten Setup möglich [38].

Seit 1940 wird der Gedanke verfolgt, mit tiefgezogenen Schienen Zahnbewegungen durchführen zu können. Kesling beschrieb als einer der ersten die Bewegung der Zähne mit Zahnpositionierungsschienen. 1945 begann durch ihn die Herstellung und Anwendung [39]. 1964 veröffentlichte Nahoum erste Erkenntnisse über den Einsatz von druckgeformten Schienen zur Zahnfehlstellungskorrektur. 1971 stellte Ponitz seine „unsichtbaren Schienen“ vor [40, 41]. 1990 präsentierte Sheridan den „Essix“ Retainer, der als aktives kieferorthopädisches Gerät eingesetzt wird [42]. 1996 begann die Entwicklung der *Invisalign*®-Technologie [43]. 1997 wurde das Unternehmen *Align Technology*®/Inc. von Zia Chishti und Kesley Wirth gegründet. Nach einigen Vorstudien wurden die ersten praktischen Untersuchungen in der Abteilung für Kieferorthopädie der University of the Pacific in San Francisco, USA, durchgeführt. Das Verfahren wurde das erste Mal im Juli 1998 vorgestellt. Seit 1999 ist das *Invisalign*®-Verfahren für Kieferorthopäden zur Behandlungsdurchführung verfügbar [44]. Der erste Artikel über das *Invisalign*®-System wurde im April 2000 veröffentlicht und untersuchende Studien folgten [45-52]. Im Zeitraum von 1998 bis 2001 waren bereits mehr als 75 % der 8500 amerikanischen Kieferorthopäden in der *Invisalign*®-Technik zertifiziert [37]. 2001 ging das Unternehmen an die Börse, startete in Deutschland und in den USA große Öffentlichkeitskampagnen und nutzte zusätzlich das Internet als Kommunikationsmedium, sodass den Kieferorthopäden Patientendaten, Behandlungspläne und die Behandlungssimulation online zugänglich sind [53]. 2006 erschien das Buch „The Invisalign System“ von O.C. Tuncay, in dem das System genau beschrieben ist und Anwendungstipps sowie Patientendokumentationen dargestellt sind [54]. Das System wurde

kontinuierlich weiterentwickelt, sodass sich das Behandlungsspektrum für die Anwendung von *Invisalign*® stetig verbreiterte. Seit 2009 wurden schrittweise verbesserte Produkteigenschaften eingeführt, auf denen *Invisalign*® 3G basiert, das seit 2011 verfügbar ist. *Invisalign*® 3G wurde speziell für die Behandlung von Klasse-II und III-Patienten entwickelt. Neben neuen behandlungserleichternden Maßnahmen, wie vorgefertigte Einschnitte in den Schienen („Precision Cuts“) und neuen Attachments zur besseren Prognose von Zahnbewegungen („Optimized Attachments“ und „Optimized Rotation Attachments“) wurde die Clin-Check®-Software sowie die *Invisalign*® Doctor Site überarbeitet und mit neuen klinischen Behandlungsvorgaben ergänzt [55].

Verfahrensablauf

Nach Aufnahme der Patientenanamnese und des Befundes werden Röntgenbilder in Form einer Panoramaschichtaufnahme (PSA) und eines Fernröntgenseitenbildes (FRS) erstellt. Zusätzlich erfolgt die Abformung des Ober- und Unterkiefers. Nach Auswertung des diagnostischen Materials durch den behandelnden Arzt entwirft dieser einen Behandlungsplan. In einer weiteren Sitzung werden Abformungen und Bissregistratur der Kiefer erstellt. Hierfür wird ein additionsvernetzendes Silikon (A-Silikon) in für Röntgenstrahlen durchlässigen Kunststofflöffeln verwendet, um später die Abformung computertomografisch erfassen und so digitale Modelle erstellen zu können [38, 56]. Zudem sind intra- und extraorale Patientenfotos notwendig. Die Kieferabformungen und Registratur werden in einer speziellen Verpackung von Align Technology® verschickt. Die eingesandten Abformungen werden bei Align Technology® (Santa Clara, Kalifornien, USA) mit Hilfe einer Lasertechnik in dreidimensionale digitale Bilder konvertiert. Es entstehen virtuelle Kiefermodelle, die mit der Firmensoftware „Treat“ bearbeitet werden. Der vom Kieferorthopäden entworfene Online-Behandlungsplan wird der Firma Align Technology® via Internet über eine geschützte Seite (*Invisalign*® Doctor Site) übermittelt. Auf diesem Weg kann der komplette Behandlungsablauf von der Ausgangssituation bis zum Therapieziel geplant werden [57-60]. Für den Behandler wird die Behandlungssimulation zum Anschauen und Kontrollieren online durch die ClinCheck®-Software zur Verfügung gestellt. Er kann letzte Korrekturen am ClinCheck® übermitteln, dann beginnt die Herstellung der *Invisalign*®-Schienen. Nach Bestätigung des ClinChecks® werden stereolithografische Kunststoffmodelle für jedes Behandlungsstadium hergestellt. Auf diesen Modellen erfolgt die Anfertigung durchsichtiger, semielastischer Polyurethan-Schienen (Aligner) [61-63]. Die entstandene Serie der Behandlungsgeräte wird dem Behandler zugeschickt und der Patient bekommt im Abstand von circa 14 Tagen jeweils eine neue Schiene eingesetzt. Nachdem alle Schienen getragen wurden, wird ein Zwischenbefund erstellt und gegebenenfalls eine weitere Optimierung durchgeführt (Case Refinement). Die Schienentherapie kann mit noch

weiteren Schienen fortgesetzt werden, falls das gewünschte Behandlungsergebnis noch nicht erreicht worden ist [44, 64-66].

1.2.2.2 *Incognito*®-System

Das *Incognito*®-System wird seit 1997 von der Firma TOP-Service für Lingualtechnik (Bad Essen, D) vertrieben und ist seit August 2008 dem 3M Unitek Unternehmen angeschlossen. In Nord- und Südamerika wird unter dem Namen *iBraces* der Vertrieb von der Partnerfirma Lingualcare® vorgenommen. Das *Incognito*®-System bietet CAD/CAM-basierte Lingualtechnik. Der Unterschied zur normalen Lingualtechnik, bei der die Brackets statt vestibulär lingual geklebt und industriell gefertigt sind, liegt hier in der patientenspezifischen Anfertigung der einzelnen Brackets auf Grundlage der individuellen Zahnanatomie. Die Bracketbasen werden zahnspezifisch modelliert und so der Zahnform individuell angepasst. Die benötigten Bögen werden mit Hilfe einer Drahtbiegemaschine gebogen. Diese Drahtbiegemaschine *Orthomate*®-System (Syrinx Medical Technologies, Berlin, D) stellt automatisch die individuellen Bögen her [67-72]. Der verwendete Typ Biegeroboter basiert auf einem Patent von Fischer Brandies und Orthuber (Universität Kiel) und wurde im Jahre 1994 auf den Markt gebracht [73]. Die Drahtbiegemaschine kann nach einem Scan der Bracketpositionen mit der 3D-Orthomate® Kamera oder nach Ermitteln der Werte des diagnostischen Setups mittels Transfer Optimized Positioning (TOP) die gewünschten Bögen durch einen Biegeroboter formen lassen. Durch kontinuierliche Weiterentwicklung des *Orthomate*®-Systems können heute auch superelastische Bögen bereits während des Biegevorgangs durch Wärme umprogrammiert werden [74].

Herstellungsverfahren

Die Grundlage der *Incognito*®-Lingualtechnik bildet ein Setup-Modell, das über eine zweiphasige Silikonabformung des Patientenkiefers gewonnen wird. Die Erfassung der Zahnoberflächen des Setup-Modells erfolgt mit einem hoch auflösenden 3D-Scanner (GOM, Braunschweig, D) [75]. Es entsteht ein virtuelles 3D-Modell, das aus mehr als 100.000 Dreiecken (Standard Triangulation Language, STL-Flächen) aufgebaut ist. Auf der virtuellen Modelloberfläche werden die individuellen Brackets am Computer mittels einer Konstruktionssoftware (*Rhino3-D*®) generiert: Erst werden die Bracketbasen auf den Zahnoberflächen gestaltet (Prototyping mit *MATERIALISE*®), dann folgt die optimale Positionierung der Brackets unter Einsatz von *ProLingual*® von Lingualcare®. Primärziel ist ein möglichst flaches Design für optimalen Tragekomfort. Parallel dazu werden die Bogendefinitionsdaten festgelegt. Die Brackets werden zunächst aus einem wachsähnlichen Material von einer Hochpräzisionsprototypingmaschine (*Solidscape*®, Merrimack, USA)

angefertigt. Die Wachsbrackets werden in einem Umgussverfahren in Gold gegossen. Nach anschließender Oberflächenbehandlung folgt die Prüfung der korrekten Dimension der Brackettschlitzte. Die Goldbrackets werden mit einem wasserlöslichen Mittel auf dem Malokklusionsmodell befestigt. Im Anschluss wird ein zweiphasiges Übertragungstray hergestellt und die Klebeflächen der Brackets vorbehandelt [67, 76]. Das Biegen der individualisierten Bögen wird von der Drahtbiegemaschine *Orthomate®-System* (Syrinx Medical Technologies, Berlin, D) vorgenommen. Die dafür notwendigen Daten liegen mittels der 3D-Konstruktionssoftware vor und werden durch den Export der Brackettkoordinaten an die Biegeeinheit weitergeben [73, 77-79].

1.2.2.3 *SureSmile®*-System

Die Schwierigkeit der orthodontischen Therapie komplexer Zahnfehlstellungen liegt einerseits in der Erarbeitung konkreter Behandlungsziele andererseits im bestmöglichen Erreichen dieser theoretisch formulierten, individuellen Zielvorstellungen [80, 81]. Um diese grundsätzliche Schwierigkeit in der Kieferorthopädie zu beheben, wurde das CAD/CAM-basierte *SureSmile®*-System (OraMetrix®, Richardson, Texas, USA) entwickelt. Das System wird zur Diagnostik, Behandlungsplanung sowie -überwachung und zur robotergesteuerten Herstellung individualisierter festsitzender kieferorthopädischer Apparaturen eingesetzt. Durch die Symbiose dieser Einzelschritte in einem System soll *SureSmile®* mithelfen, Behandlungsfehler im klinischen Alltag zu reduzieren und durch Optimierung des Behandlungsablaufes die Behandlungszeit zu verkürzen [82-84].

Das *SureSmile®*-System ist ein Behandlungssystem für die Multibrackettherapie. Die Brackettpositionen auf den Zähnen werden digital erfasst und es wird eine individuelle Behandlungsplanung am 3D-Computermodell vorgenommen. Als Ergebnis dieser Planung wird eine Sequenz von robotergefertigten Drahtbögen geliefert, die am Patienten eingesetzt wird [85]. Das *SureSmile®*-System wird vornehmlich in der letzten Therapiephase, der „Finishing Phase“, eingesetzt. In dieser Phase sind abschließende Einzelkorrekturen mit definierten Kräften erforderlich. Hierbei ergibt sich durch die robotergefertigte Drahtbogenherstellung eine hohe Präzision, so dass eine mögliche Verlängerung der Behandlungsdauer ausgeschlossen und das Behandlungsergebnis gesichert wird [84, 86].

Eine genaue Beschreibung des *SureSmile®*-Systems, das in dieser Arbeit untersucht wird, folgt im anschließenden Kapitel.

1.3 Das *SureSmile*®-System

1.3.1 Entwicklung des *SureSmile*®-Systems

Die Ursprünge des *SureSmile*®-Systems gehen auf das Bending Art System zurück. Anfang der 90 er Jahre entwickelte die Firma Bending Art Medizintechnik (Berlin, D) das *Bending Art System*®, bestehend aus einem 2D-Intraoralscanner, einer Software für kieferorthopädische Planung der Behandlung und einer Drahtbiegemaschine. Hierbei wurden in die Slots der bereits geklebten Brackets Messelemente einligiert und anschließend das Gebiss des Patienten gescannt. Die Messelemente waren mit 4 halbkugeligen Punkten versehen, die es dem CAD-Programm ermöglichten, über passive Triangulation die 3D-Position der Messelemente und damit die Position der Slots zu berechnen. Interaktiv wurde ein idealisierter Zahnbogenverlauf berechnet und dieser von der Drahtbiegemaschine hergestellt [76, 87]. Es erfolgte eine kontinuierliche Weiterentwicklung und heute setzt sich das *SureSmile*®-System aus drei Schlüsselkomponenten zusammen: dem intraoralen 3D-Scanner, der *SureSmile*®-Software und einem Biegeroboter der Firma OraMetrix® [88]. Seit 2009 bietet OraMetrix® neben dem *SureSmile*®-System für die labiale Multibrackettechnik auch das Produkt *SureSmile QT*® für die Lingualtechnik an [89].

1.3.2 Klinische Anwendung

Entscheidet sich der Patient für die Anwendung des *SureSmile*®-Verfahrens, so wird zuerst eine elektronische Patientenakte erstellt. Anamnese, klinischer Befund, Fotos und Röntgenbilder werden gespeichert. Anschließend werden die 3D-Daten der Zähne akquiriert (Abb. 1 und Abb. 2). Dies erfolgt intraoral mit dem *OraScanner*® (siehe 1.3.3.2) oder extraoral anhand von Abformungen oder Modellen mit unterschiedlichen Scanverfahren.

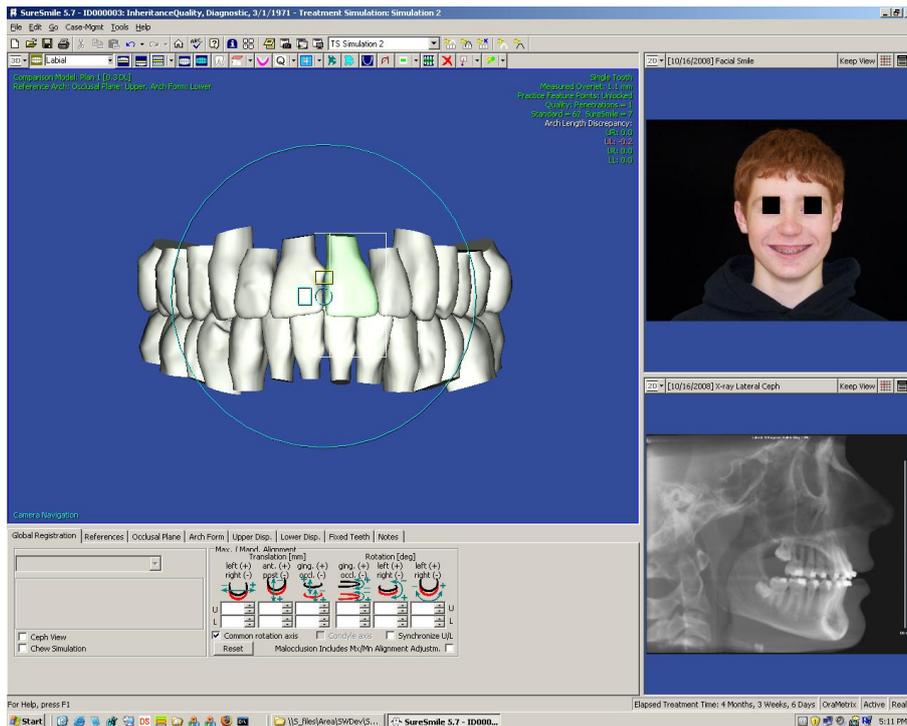


Abb. 1: Aufgenommene Patientendaten im SureSmile®-Diagnostikbogen: Kieferscan mit dem OraScanner®, Patientenfoto und Ferrnröntgenseitenbild.

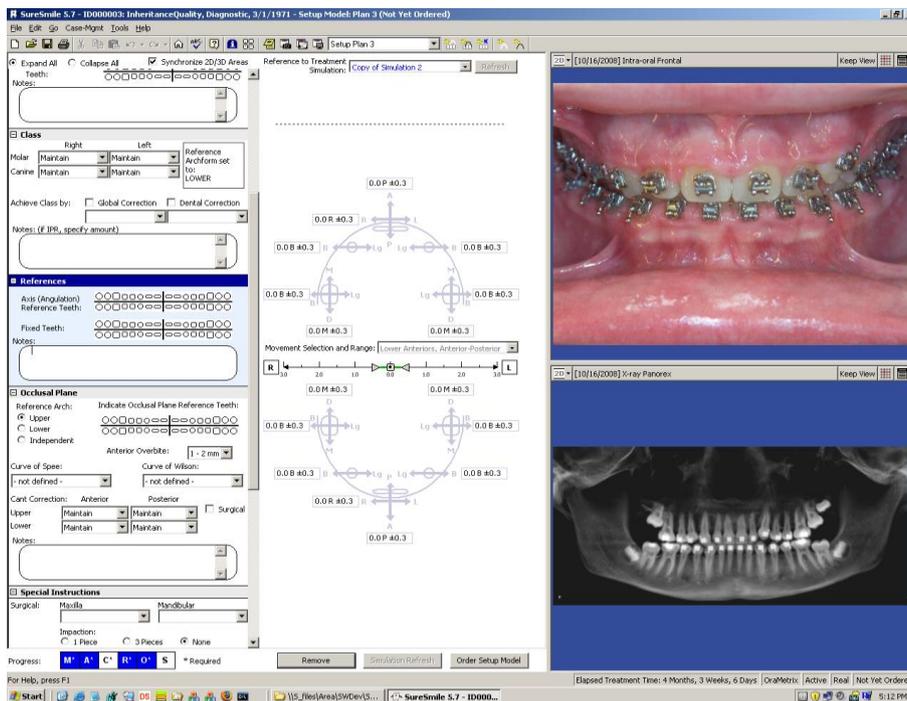


Abb. 2: Intraorales Foto, Panoramischichtaufnahme und digitaler Planungsbogen, auf dem der Kieferorthopäde die entsprechenden Behandlungsparameter für den Patienten auswählt.

Alle Patientendaten werden per Internet an das OraMetrix®-Service-Center gesendet. Dort findet die Nachbearbeitung und Erstellung der Therapiemodelle statt (siehe 1.3.3.4). Zusätzlich können unsegmentierte Studienmodelle und segmentierte Diagnostikmodelle angefertigt werden. Die unsegmentierten Studienmodelle dienen der klassischen Modellanalyse. Sämtliche Strecken zur Beurteilung der Zahnbogenform und die Zahnbreitenverhältnisse können analysiert werden. Die einzelnen Zähne lassen sich hier nicht relativ zueinander bewegen.

Für die Therapieplanung werden segmentierte diagnostische Modelle erstellt. Hier wird jeder Zahn vereinzelt und ist anschließend als 3D-Objekt frei beweglich [86]. Stehen diese Modelle nicht zur Verfügung, kann die *SureSmile*®-Behandlung auch erst mit der Herstellung des therapeutischen „Modells“ beginnen. Dieses wird auf der Grundlage eines intraoralen Scans mit Hilfe des *OraScanners*® nach dem Setzen der Brackets gefertigt. Im OraMetrix®-Service-Center wird das Setup erstellt, anhand dessen der geplante Therapieverlauf und das entsprechende Ergebnis simuliert werden kann. Auch der Patient kann sich den geplanten Behandlungsverlauf digital anschauen.

Ist der Kieferorthopäde mit der Behandlungsplanung zufrieden, hat er diese freigegeben und die verwendeten Brackets aus einer Bracketdatenbank, die in der Software hinterlegt ist, ausgewählt, dann berechnet die Software die erforderliche Bogengeometrie. Der Kieferorthopäde kann die Bogenform noch individuell verändern. Anschließend werden die Bögen vom Biegeroboter im digitalen Labor gefertigt und dem Kieferorthopäden zugesandt.

Wenn gewünscht, kann der Kieferorthopäde den *OraScanner*® auch während der Behandlung einsetzen, um Zwischenergebnisse der Therapie zu dokumentieren. Falls das Wiederbefestigen eines verlorengegangenen Brackets nötig ist, kann ein neuer partieller Scan durchgeführt und online zu OraMetrix® geschickt werden, auf dessen Grundlage die folgenden Bögen neu berechnet und gebogen werden können. Das soll Verzögerungen im Therapieverlauf verhindern [82]. Zum Abschluss der Therapie kann aufgrund eines weiteren intraoralen Scans ein abschließendes digitales Studienmodell erstellt werden. Die sonst vorhandene Lagerungsproblematik von Gipskiefermodellen entfällt durch die Digitalisierung.

1.3.3 Bestandteile des *SureSmile*®-Systems

Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten des Systems zusammenhängend erläutert und im Anschluss im Detail betrachtet.

Die intraorale Kamera (siehe 1.3.3.2) dient der Erfassung der Kieferaussgangssituation des Patienten. Die gescannten 2D-Bilder (optimal bis zu 750 pro Kiefer) werden mit Hilfe einer Computersoftware zu einzelnen 3D-Bildern umgerechnet, nahezu in Echtzeit übertragen und

zu einem dreidimensionalen Kiefermodell zusammengefügt. Dieser Kieferscan stellt die Grundlage für die Behandlung dar. Die von OraMetrix® entwickelte Software *SureSmile®* (siehe 1.3.3.1) dient zur Erstellung eines virtuellen Setups [21] und steht für die kieferorthopädische Behandlungsplanung und -simulation sowohl dem behandelnden Kieferorthopäden als auch dem digitalen Labor im Service-Center (Richardson, Texas, USA) zur Verfügung. Zur Einhaltung des Datenschutzes erfolgt der Datentransfer zwischen Praxis und Labor verschlüsselt. Der Scan wird an das digitale Labor übermittelt, das mit verschiedenen Softwaretools die Bearbeitung am Computer vornimmt (siehe 1.3.3.4). Entsprechend der Vorgaben des behandelnden Kieferorthopäden wird ein Setup erstellt [83]. Nach dem Erstellen des virtuellen Ziel-Setups, das auf der Grundlage eines Scans mit befestigten Brackets basiert, erfolgt die individuelle Anfertigung der Drahtbögen durch den Biegeroboter. Die Geometrie der Drahtbögen wird anhand der Zielstellung der Zähne sowie der 3D-Daten für die jeweils verwendeten Brackets berechnet [90].

1.3.3.1 *SureSmile®-Software*

Die *SureSmile®*-Software ermöglicht neben computergestützten Modellanalysen, die in der Vergangenheit manuell an Modellen durchgeführt wurden, die Erstellung unterschiedlicher Setups und so die Simulation von verschiedenen Behandlungsabläufen. Das *SureSmile®*-System dient der Findung, Festlegung und Durchführung der am besten geeigneten individuellen Therapie für jeden Patienten. Die Software unterstützt die in der Kieferorthopädie bekannten Behandlungsvarianten wie Expansionen und Kontraktionen, Extraktionen, approximale Schmelzreduktion, Beeinflussung der Spee'schen Kurve, Änderung der Okklusionsebenen, genaue Festlegung von Zahnpositionen und Bewegungsabläufen. Die Behandlungsvorgaben, die der Kieferorthopäde in der Software auswählt, bilden die Grundlage aller Therapievorschlüsse und Verläufe, die im Service-Center erstellt werden [82, 91]. Der Kieferorthopäde kann die digitale Behandlungsplanung jedoch auch selbst vornehmen oder nur zu einem Teil an das digitale Labor der Firma OraMetrix® delegieren, das seine Vorgaben umsetzt und das Ergebnis zur Prüfung und Freigabe bzw. mit der Angabe von Änderungswünschen an ihn als 3D-Modell übermittelt. Nachdem das Setup und der Behandlungsverlauf freigegeben sind, legt der Kieferorthopäde die Drahtbogensequenz fest. Es sind Angaben zu Drahtmaterial und Drahtquerschnitt sowie zum Behandlungsverlauf erforderlich.

Die Simulation der Behandlung soll helfen, zu erwartende Probleme frühzeitig zu erkennen. Durch die Überlagerung von Ausgangs-, Zwischen- und Endsituation lassen sich Probleme leicht visuell erfassen. Zur Beurteilung der Okklusionsebenenneigung können anhand eines

Fernröntgenseitenbildes die virtuellen Modelle überlagert und nach der Stellung im Gesichtsschädel ausgerichtet werden. Auch werden die Effekte von Schneidezahnbewegungen und deren Auswirkungen auf das Weichgewebe berücksichtigt. Patient und Kieferorthopäde können gemeinsam mit Hilfe der *SureSmile*®-Software am Computer den gesamten geplanten Behandlungsverlauf und das endgültige Ergebnis bereits vor Therapiebeginn anschauen. Während der gesamten Behandlungsphase kann eine digitale Überwachung des Behandlungsverlaufes erfolgen [86].

1.3.3.2 *OraScanner*®

Der *OraScanner*® der Firma OraMetrix® ist eine computergestützte Intraoralkamera, die in der Lage ist, berührungslos einen originalgetreues dreidimensionales digitales Abbild der Kiefersituation zu erzeugen [21, 60]. Der *OraScanner*® basiert auf dem Prinzip der aktiven Triangulation. Hierbei wird ein geometrisches Muster auf die Zähne projiziert und unter einem abweichenden Winkel (14°) mit Hilfe eines CCD-Sensors aufgenommen. Aufgrund der Kenntnis des Musters selbst und des Triangulationswinkels kann aus der Verzerrung die dreidimensionale Gestalt des gescannten Körpers bzw. Bereiches errechnet werden [92]. Um im beengten intraoralen Raum eingesetzt werden zu können, ist am vorderen Ende des Scanners ein auswechselbarer Spiegel befestigt, der den Projektions- und Aufnahmestrahlangang um 90° umlenkt (Abb. 3). Es wird eine Vielzahl von kleinen Einzelbildern aufgenommen, aus denen eine gleichgroße Anzahl von 3D-Bildern errechnet wird. Bei ausreichender Überlappung der 3D-Bilder werden diese zusammengefügt und daraus das Gesamtobjekt konstruiert. Somit ist es möglich, auch Objekte aufzunehmen, die größer als der Sichtbereich des *OraScanners*® sind [34, 93, 94]. Die während des Scannens des Patienten am Bildschirm angezeigten Bilder dienen lediglich der Prüfung der Vollständigkeit der durchgeführten Scans vor Ort. Gegebenenfalls fehlende Bereiche oder Löcher können so einfach erkannt werden und während der Scansitzung nachgescannt werden. Dieses erste Registrierverfahren ist auf hohe Geschwindigkeit bei reduzierter Genauigkeit ausgelegt.

Der *OraScanner*® arbeitet referenzfrei. Dies bedeutet, dass die Position des Scanners im Raum während der aufeinander folgenden Aufnahmen nicht bekannt sein muss. Es reicht die Überlappung der Einzelbilder, um die dreidimensionalen Daten zu ermitteln [86]. Durch die Verwendung einer stroboskopischen Beleuchtung kann verwacklungsfrei freihändig gescannt werden. Dabei wird eine Auflösung von 0,05 mm erreicht. In Echtzeit entsteht das Bild der gescannten Bereiche auf dem Monitor. Nach wenigen Minuten erscheint die komplette digitalisierte Kiefersituation auf dem Bildschirm [95]. Der *OraScanner*® eignet sich für den intra- und für den extraoralen Gebrauch. Es können sowohl Zahnoberflächen als

auch Bracketpositionen dreidimensional erfasst werden. Eine Voraussetzung ist eine gleichmäßig matte Oberfläche der zu scannenden Objekte. Transluzenter Zahnschmelz oder glänzende Oberflächen wie Kronen oder Brücken können nicht ohne entsprechende Vorbehandlung gescannt werden.

Um mögliche Lichtreflexionen zu verhindern und eine gleichmäßig matte, scanbare Oberfläche herzustellen, werden alle scanrelevanten Bereiche mit einem schnell trocknenden Titandioxidspray oder einem Titandioxidlack versehen. Während des Scanvorgangs wird der *OraScanner*® langsam von vestibulär nach oral hin und her schwenkend über die gesamte Zahnreihe geführt, bis alle Zahnkronen vollständig erfasst sind. Je Kiefer werden etwa 10 bis 15 Minuten zum Abscannen benötigt und es werden bis zu 750 Bilder dabei aufgenommen.

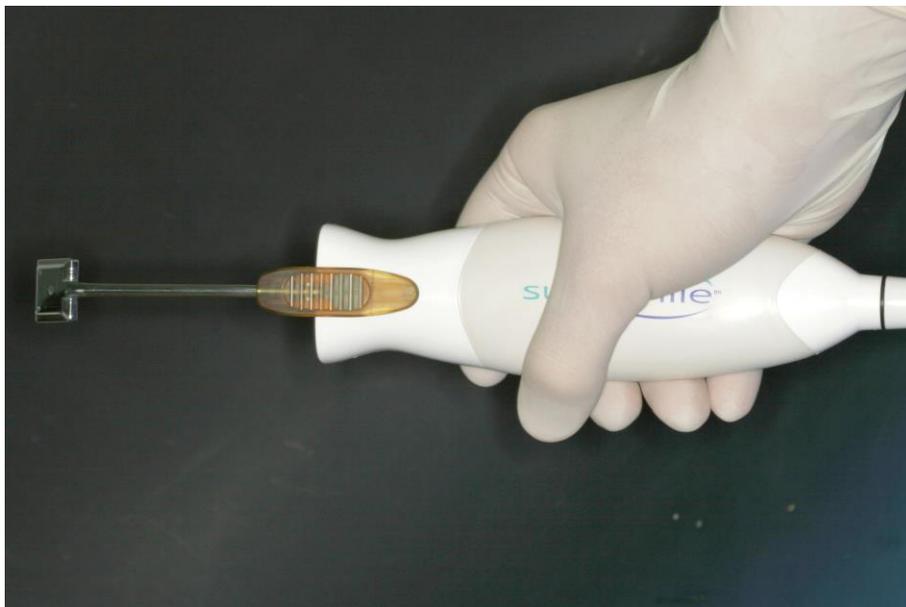


Abb. 3: Aufsicht auf den *OraScanner*® mit viereckigem Umlenkspiegel links, an einem Griff fixiert.

1.3.3.3 Digitale Datenerfassung

Um eine Therapie nach dem *SureSmile*®-Verfahren durchführen zu können, müssen zuerst alle für die Diagnostik und Therapieplanung erforderlichen bzw. verfügbaren Unterlagen und Daten wie Anamnese, Befund, Röntgenbilder, kephalometrische Analysen und Fotos digital erfasst und gespeichert werden. Sie dienen bei der Datenver- und -bearbeitung im digitalen Labor als Grundlage und sind als Referenz hilfreich (Abb. 1 und Abb. 2).

Die Akquise der 3D-Daten von Zähnen und Teilen der Gingiva kann auf unterschiedliche Weise erfolgen: Intraoral mit dem *OraScanner*®, extraoral vom Modell mit dem *OraScanner*® oder einem anderen 3D-Scanner sowie extraoral vom Abdruck oder Modell mit Hilfe einer 3D Cone Beam Computertomographie (3D CB-CT). Dieser Scan wird mit Hilfe eines *i-CAT*® (Imaging Sciences, Hatfield, USA) durchgeführt [96]. Die digitalen Daten werden mit Hilfe von automatischen Replikationsverfahren zwischen dem Server des Behandlungszentrums und den Servern des *OraMetrix*®-Service-Centers ausgetauscht.

Eine weitere Voraussetzung für die anschließende digitale Modell- und Setup-Erstellung ist die visuelle Einschätzung der Kontaktpunktsituation des Patientenkiefers durch den Kieferorthopäden. Zu jedem einzelnen Zahn des Patienten muss explizit die Angabe erfolgen, ob ein approximaler Kontakt zum Nachbarzahn besteht. Diese Angaben werden in einer Datensoftware mittels ja/nein-Aussage dokumentiert. Liegt ein Kontakt vor, so wird in einem Kontrollkästchen das entsprechende Feld markiert. Liegt kein Kontakt vor, wird keine Eingabe vorgenommen. Diese Aussagen des Behandlers zur optischen Approximalkontaktbeurteilung werden bei der anschließenden digitalen Modell- und Setup-Erstellung im Labor berücksichtigt (Abb. 4).

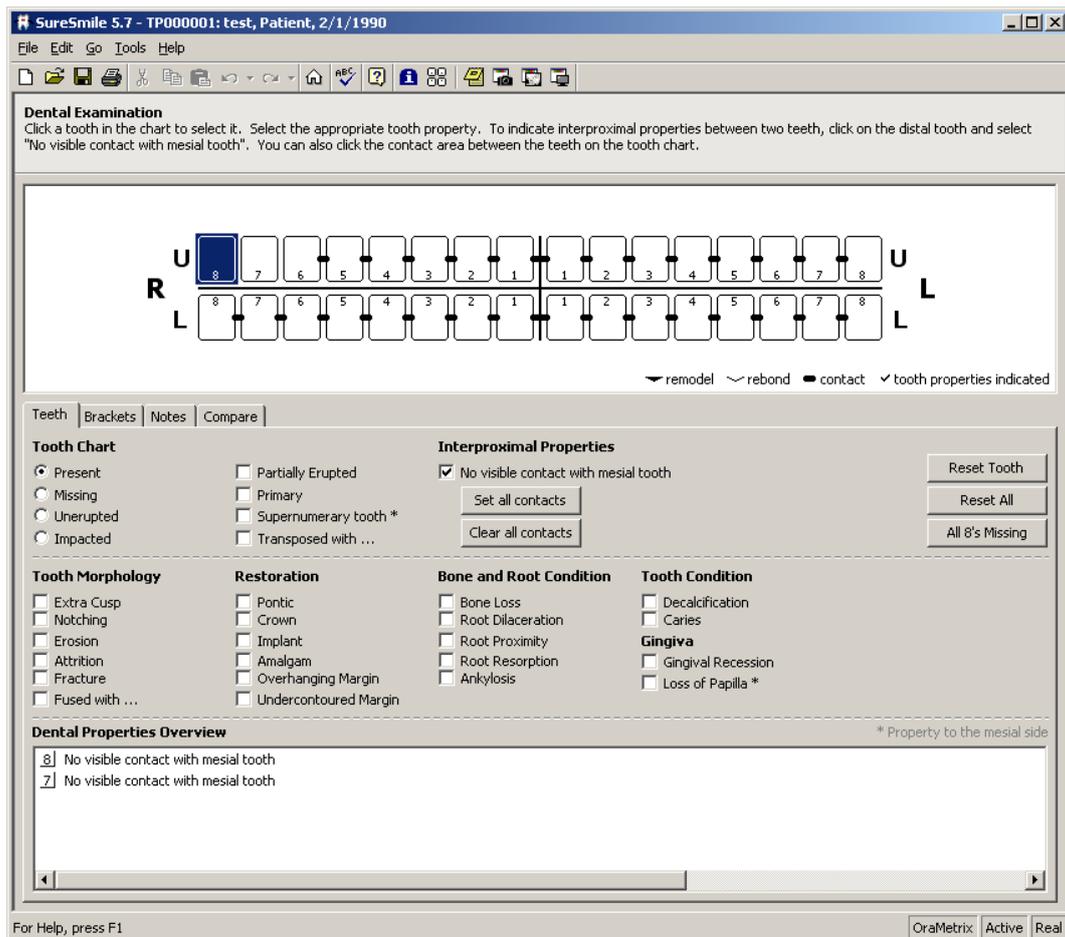


Abb. 4: SureSmile®-Datenerfassungsbogen zur Beurteilung des Vorhandenseins von approximalen Zahnkontakten.

1.3.3.4 3D-Datenbearbeitung im digitalen Labor

Nachdem die Patienten- und Kieferscandaten verschlüsselt an das digitale Labor gesendet wurden, erfolgt die weitere Bearbeitung der Modellscans (Abb. 5)

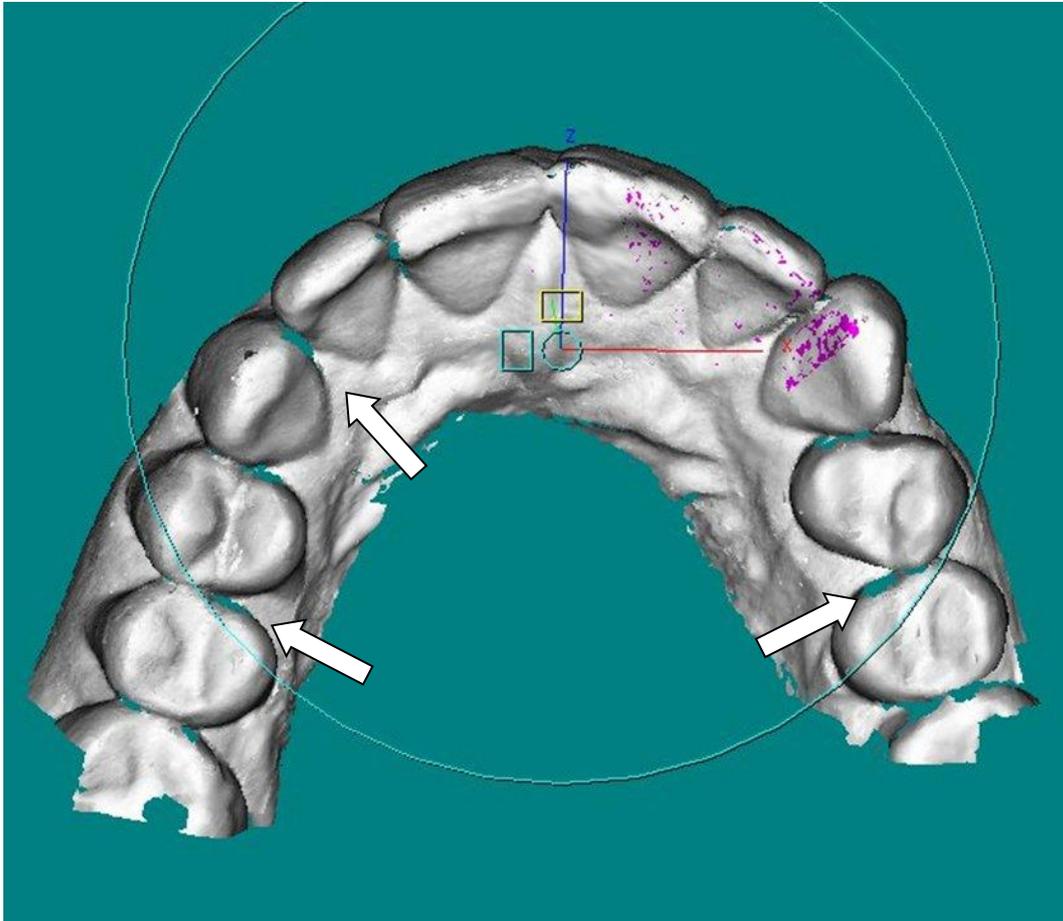


Abb. 5: Unbearbeiteter, partieller Scan eines Oberkiefers in okklusaler Ansicht, im *SureSmile*®-Programm aufgerufen. Der Scan ist aus Einzelbildern (Frames) zusammengesetzt. In den approximalen Bereichen sind die fehlenden Scandaten ersichtlich (grüner Hintergrund schimmert durch:⇒). Oberflächen, die noch zu bearbeiten sind, sind in pink dargestellt.

Die virtuelle Bearbeitung des Kiefermodells erfolgt in den folgenden fünf Arbeitsschritten:

1. Registrierung

Zuerst erfolgt die Registrierung: Damit wird das Zusammenfügen von mehreren einzelnen 3D-Bildern zu einem 3D-Gesamtobjekt bezeichnet. Die einzelnen 3D-Bilder werden im digitalen Labor zusammengerechnet. Hierbei werden Scanartefakte korrigiert, Oberflächen wenn erforderlich modelliert und geglättet (Abb. 6). Bei nicht eindeutiger Datenlage sind manuelle Eingriffe notwendig, wie z. B. beim Vergleich eines Fotos mit einem fraglichen Bereich des Scans, um eine bestmögliche virtuelle 3D-Repräsentation des jeweiligen Gebisses zu erzielen.

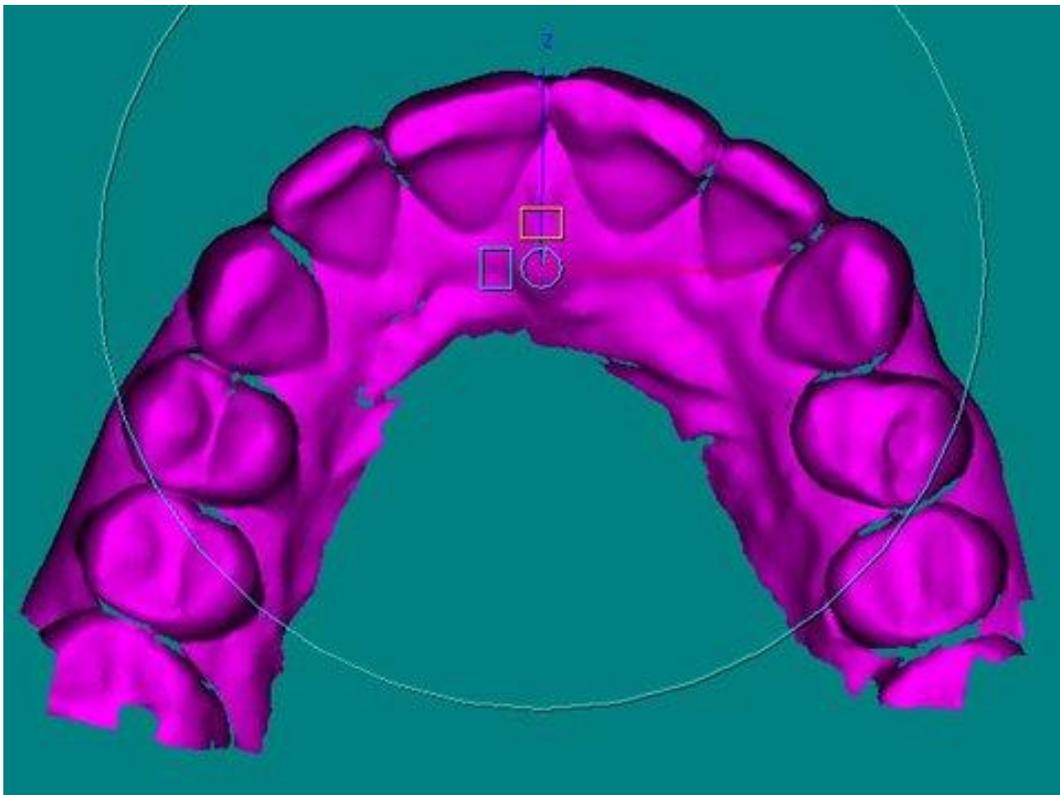


Abb. 6: Darstellung des Oberkiefers aus Abb. 5 nach erfolgter Registrierung des Zahnbogenscans mit Nachkorrektur von Scanartefakten und Oberflächenglättung sowie Nachmodellierung, gefärbt in Pink zur Weiterbearbeitung. Nicht gescannte Bereiche scheinen weiterhin grün durch.

2. Single-Mesh

Das im Rahmen der Reistrierung berechnete und aufgearbeitete 3D-Objekt des Kiefers wird nun in ein „Single-Mesh“ umgewandelt. Hierbei handelt es sich um ein so genanntes Hülldatenmodell. Dieser Schritt führt zu einer deutlichen Reduzierung der überlappenden und damit redundanten Daten.

3. Zahnerkennung

In diesem Hülldatenmodell erkennt die Software die Anzahl sowie die Art der Zähne und färbt sie je nach Zahngruppe (zwei mittlere Schneidezähne, zwei seitliche Schneidezähne, zwei Eckzähne, zwei 1. Prämolaren, zwei 2. Prämolaren, zwei 1. Molaren, zwei 2. Molaren, zwei 3. Molaren) ein (Abb. 7).

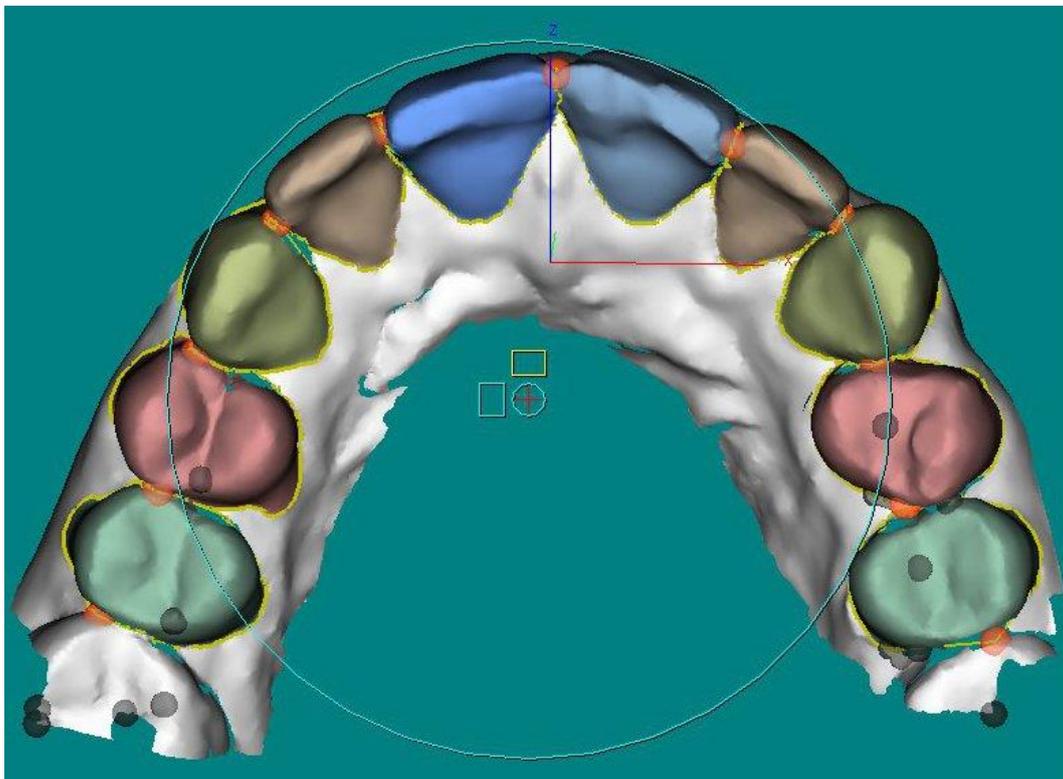


Abb. 7: Automatische Zahnerkennung durch die Software. Einzelne Zahngruppen sind in unterschiedlichen Farben dargestellt. In dieser Darstellung sind die Zahngruppen vom mittleren Schneidezahn bis zum 2. Prämolaren abgebildet.

4. Templates und Matching

Um nicht gescannte oder nicht scanbare Bereiche des Zahnbogens zu ergänzen, bedient sich die Software so genannter Zahntemplates. Hierbei handelt es sich um anatomisch gemittelte Zahnformen, die in einer Datenbank hinterlegt sind und beim Prozess des „Matching“ den gescannten Zähnen überlagert werden, so dass fehlende Bereiche anatomisch korrekt ergänzt werden. In der *SureSmile®*-Software sind zwei unterschiedliche Zahntemplatesätze mit jeweils 32 Einzelzähnen hinterlegt. Es ist eine Auswahl zu treffen zwischen „rounded template“ und „not rounded template“. Die beiden Zahnsätze unterscheiden sich in der Form der Zähne: „not rounded“ steht für jugendliche Zähne, die scharfkantiger sind und noch keine Abrasionen und Attritionen aufweisen; „rounded templates“ beinhalten Zahnformen, die hauptsächlich für Erwachsene oder ältere Patienten gewählt werden.

Eine farbliche Kennzeichnung ermöglicht die differenzierte Darstellung jener Bereiche, die originalgetreu gescannt wurden und jener Oberflächen, die mit Hilfe eines Templates ergänzt wurden (gelb, Abb. 8). Der auf diese Weise fertig konstruierte Zahn weist eine gleichmäßige zweifarbige Oberflächenfärbung auf.

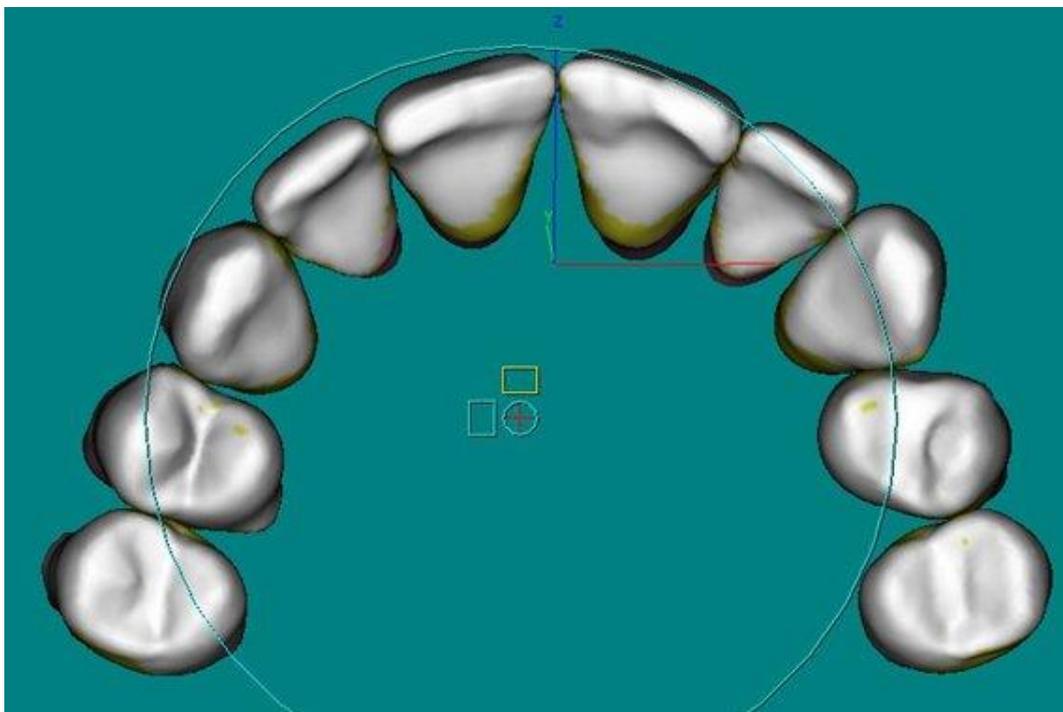


Abb. 8: „Matching“: Nicht gescannte Bereiche wurden mit Hilfe von Templates aus einer Datenbank vervollständigt und so die fehlenden Bereiche der Zähne im Scan rekonstruiert. Diese anatomischen Ergänzungen der Scans sind gelb dargestellt.

5. Bracketdatenbank und Gingivamodellierung

Für die spätere Berechnung der Drahtbogengeometrie ist die Kenntnis der räumlichen Lage der Bracket-Schlitze (Slots) erforderlich. Die Auflösung des *OraScanners®* reicht nicht aus, um die Position der Bracketschlitze und insbesondere den Torque mit der erforderlichen Genauigkeit zu ermitteln. Hierfür wäre eine Auflösung von besser als 0,001 mm notwendig. Die Auflösung des *OraScanners®* beträgt 0,05 mm. Um die Lage der Slots zu ermitteln, wird daher ein digitales 3D-Bracket in die gescannten Oberflächen des Brackets registriert. Dieses Verfahren ähnelt dem zuvor beschriebenen Verfahren, bei dem die dentalen Templates in die Zahnscandaten registriert werden. Jedoch geht es hier ausschließlich um die Optimierung der Position im Raum. Daher erfolgt keine Skalierung des 3D-Modells. Die Daten der Brackets stammen aus der in der Software integrierten Bracketdatenbank. Diese enthält derzeit die 3D-Daten von über 10.000 Brackets verschiedener Hersteller. Für jeden Patienten sind somit der verwendete Brackettyp oder die einzelnen verwendeten Brackets anzugeben.

Mit Hilfe der Software wird auch die Gingiva modelliert (Abb. 9) Hierzu werden Gingiva-Templates verwendet, die eine Anpassung der Gingiva-Darstellung nach Bewegungen der Zähne erlauben. Diese Funktion dient ausschließlich der verbesserten wirklichkeitsgetreuen visuellen Darstellung der Kiefer.

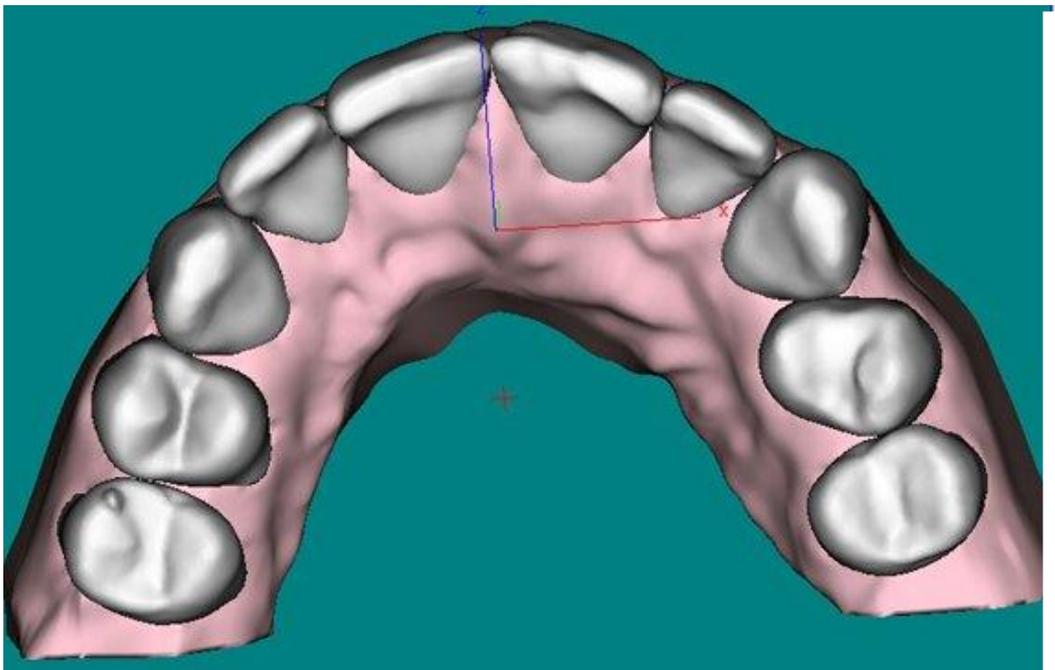


Abb. 9: Oberkiefer vollständig von der Software nachbearbeitet, sodass alle Zähne eine lückenlose Oberfläche haben und Nachbarzahnkontakt im approximalen Bereich aufweisen. Zusätzlich wurde eine Gingiva konstruiert (vgl. Abb. 5 - Abb. 8).

2 Fragestellungen

Die Nachbildung von Gebissituationen mit Hilfe von Modellen, die entweder mittels konventioneller Abformverfahren oder mit digitalen optischen Verfahren hergestellt werden, weisen im Bereich der Interdentalräume, und hier besonders im Bereich der approximalen Kontaktpunkte, eine eingeschränkte Genauigkeit auf.

Die umfassende Planung einer kieferorthopädischen Therapie setzt die Segmentierung (räumliche Trennung) von Nachbarzähnen im Modell voraus, sodass Einzelzahnbewegungen am Modell simuliert werden können. Dies erlaubt die Simulation des Behandlungsziels, anhand dessen die kieferorthopädischen Apparaturen konstruiert und gefertigt werden können. Am klassischen Gipskiefermodell geht die exakte Kontaktpunktinformation aufgrund des Sägeschnitts im Rahmen des Segmentiervorgangs verloren.

Bei optischen Scanverfahren ist bei engen Kontaktbereichen keine genaue Erfassung der approximalen Zahnoberflächen möglich. Dicht aneinander gelagerte Zahnoberflächenbereiche sind nicht einsehbar und können vom Scanner nicht erfasst werden. Bei der Durchführung der virtuellen Segmentierung erscheinen die nicht gescannten Kontaktpunktbereiche als schwarze Flächen. Diese Flächen werden beim *SureSmile®*-Verfahren mittels softwaregestützter Überlagerung mit idealisierten Zahnformen (Templates) ergänzt/modelliert.

Die Beurteilung dieser softwaregestützten Modellierung ist das Ziel der vorliegenden Untersuchung. Hierbei ergeben sich folgende Fragestellungen:

1. Erkennt die *SureSmile®*-Software die approximalen Kontakte anhand des Kieferscans und erstellt diese im digitalen Modell übereinstimmend mit den approximalen Kontakten im Originalzahnmodell?
2. Wie groß ist das Ausmaß der Abweichung und die Häufigkeit der Übereinstimmung der Kontaktpunkte von Originalzähnen und *SureSmile®*-Zähnen in mesiodistaler Richtung?
3. Gibt es bei der softwarebasierten Kontaktpunkt-Modellierung einen Einfluss auf die Genauigkeit abhängig von der Region und damit der Zahnform der Frontzähne, Prämolaren und Molaren oder bezüglich der Lage im Oberkiefer oder Unterkiefer?

3 Materialien und Methoden

Zur Beurteilung der Qualität modellierter Approximalkontaktbereiche durch die *SureSmile®*-Software müssen die Originalkontaktflächen der gescannten Zähne bekannt sein. So ist ein Vergleich der tatsächlichen Kontaktbereiche mit den von *SureSmile®* modellierten Kontakten möglich und die Genauigkeit der Software bezüglich der Rekonstruktion der nicht gescannten approximalen Bereiche beurteilbar.

3.1 Zahnauswahl

Insgesamt wurden 224 extrahierte menschliche Zähne ausgewählt. Diese stammten aus dem Fundus der Charité-Universitätsmedizin Berlin. Dort wurden Zähne über viele Jahre in Studentenkursen und in der chirurgischen Abteilung der Zahnklinik gesammelt und in Formalin gelagert. Eine patientenbezogene Zuordnung und die Bestimmung des genauen Alters der Zähne sind somit nicht möglich.

Es wurden mehrere Ausschlusskriterien festgelegt: Die Zähne mussten karies- und restaurationsfrei sein. Die Zahnkrone sollte vollständig erhalten und nicht im Rahmen von Extraktionstechniken beschädigt worden sein. Abrasionen und Attritionen sollten so wenig wie möglich vorhanden sein. Die Selektion der insgesamt 224 Zähne erfolgte entsprechend der Ausschlusskriterien und nach anschließender Sortierung bezüglich ihrer Form und Größe.

3.2 Kiefermodellerstellung

Aus den 224 extrahierten Zähnen wurden Sortierungen bezüglich der Form und Größe vorgenommen und 8 lückenlose Ober- und 8 Unterkieferzahnbögen mit jeweils 14 Zähnen zusammengestellt.

Es wurden drei Zahngruppen festgelegt: Die Frontzahngruppe „FZ“ umfasste die Schneidezähne und die Eckzähne im Oberkiefer und Unterkiefer (Zähne 11, 12, 13, 21, 22, 23, 31, 32, 33, 41, 42, 43). Die Prämolarengruppe „PM“ wurde von den Prämolaren 14, 15, 24, 25 und im Unterkiefer entsprechend von den Zähnen 34, 35, 44, 45 gebildet. Die Molarengruppe „M“ setzte sich im Oberkiefer aus den Molaren 16, 17, 26 und 27 sowie im Unterkiefer aus den Molaren 36, 37, 46 und 47 zusammen.

Die Zähne wurden in Wachs (Modellierwachs: Typ extrahart super, 500 g, Morsa Wachswarenfabrik, Krumbach, D) aufgestellt und die Gingiva modelliert. Bei der Zahnaufstellung wurden leichte Engstände in der Unterkieferfront (Abb. 10 und Abb. 11) und

geringe Rotationen und Engstände im Seitenzahnggebiet, aber auch lückige Gebissituationen erzeugt. Die Kontaktpunkte wurden nur visuell, ohne optische Vergrößerung wie Lupenbrille oder Mikroskop, beurteilt. Sobald ein Zahnbogenmodell fertig modelliert war, wurde es im Anschluss mit dem *OraScanner*® abgescannt. So konnten eventuelle Formveränderungen des Wachses und damit mögliche Zahnkontaktveränderungen durch Temperaturschwankungen im Raum bei längerer Lagerung ausgeschlossen werden.



Abb. 10: Unterkieferzahnbogen mit Engstand in der Front in Wachs aufgestellt und mit Titandioxidspray bearbeitet.



Abb. 11: Okklusalanisicht des Zahnbogens aus Abb. 10

3.3 Zahnbogenscan

Der Scanvorgang der in Wachs aufgestellten Zahnbögen aus extrahierten Zähnen wurde mit dem *OraScanner*® (Seriennummer 10.128.0.3500010001SN01, OraMertix®, Richardson, Texas, USA) der Charité durchgeführt. Zunächst wurden alle Oberflächen mit einer gleichmäßig dünnen Schicht Titandioxidspray (*Arti-Spray*®, BK-285, weiß, 75 ml, Bausch, Köln, D) versehen, um Lichtreflexionen zu verhindern. Der Scanner wurde zur Erfassung der Zahnoberflächen langsam von vestibulär nach oral und zurück schwenkend über die Zahnreihe geführt und die gescannten Flächen wurden fortlaufend auf dem Bildschirm ergänzt. Beim Oberkieferscan wurde distovestibulär am Zahn 17 begonnen, bei den Unterkieferscans distovestibulär des Zahnes 37. Für einen vollständigen Scan des Kiefers wurden etwa 15 Minuten benötigt und eine Bildanzahl von bis zu 750 Bildern aufgenommen, aus denen sich der fertige Zahnbogenscan ergab (Abb. 12).



Abb. 12: Vollständiger Unterkieferzahnbogenscan des Modells aus Abb. 10 und Abb. 11

Bereiche, die nicht vom Scanner erfasst wurden, wurden als optische „Löcher“ dargestellt. Zum Nachscannen einzelner Bereiche wurde der Scanner über einen bereits gescannten Bereich geführt, um diesen zu erkennen und von dort an wurde der *OraScanner*® in

Richtung der noch zu scannenden Bereiche über die Zahnoberfläche bewegt. Alle Scanvorgänge wurden unter Tageslicht durchgeführt. Zusätzlich wurde in der entsprechenden Eingabemaske der *SureSmile*®-Software (Abb. 4) das Vorhandensein von approximalen Kontaktpunkten notiert. Hierbei erfolgte die klinische Kontaktpunktbeurteilung mittels bloßen Auges ohne Anwendung optisch vergrößernder Hilfsmittel.

Nachdem der Scanvorgang abgeschlossen war, wurden die Daten gespeichert und als verschlüsselter Datensatz an die Firma OraMetrix® versendet. Dort erfolgte im digitalen Labor die Bearbeitung der Scan-Daten (siehe 1.3.3.4), wobei mittels Templates und Matching auch die nicht gescannten Bereiche der Approximalflächen rekonstruiert wurden.

Diese softwarebasierten Zahn-Rekonstruktionen auf Seiten des digitalen Labors werden im Verlauf der vorliegenden Arbeit als SureSmile®-Zähne bezeichnet. Mit ihnen werden die gescannten Originalzähne im Prozess der Registrierung überlagert (siehe 3.5.1) und somit für die Beurteilung der Kontaktpunkt-Rekonstruktion herangezogen.

3.4 Originalzahnscan

Für den softwaretechnischen Schritt der Registrierung (siehe 3.5.1) war es erforderlich, dass alle Zähne auch als Einzelzahnscans vorlagen. Diese Einzelzahnscans werden im Verlauf der vorliegenden Arbeit als Originalzähne bezeichnet.

Die Zähne wurden im Anschluss an den erfolgten Zahnbogenscan nacheinander aus dem Zahnbogen herausgenommen und es wurde jeweils ein Einzelzahnscan durchgeführt, bei dem auch die Approximalflächen vollständig abgebildet wurden. Zuvor wurde die erste Titandioxidschicht von den Zähnen entfernt. Diese Reinigung erfolgte mit Hilfe eines Dampfstrahlgerätes.

An jedem Zahn wurde an der mesialen Wurzeloberfläche ein Hölzchen mittels Sekundenkleber fixiert, um die komplette Zahnoberfläche mit dem Titandioxidspray zu beschichten und den Zahn festhalten zu können, ohne die bearbeitete Oberfläche zu berühren (Abb. 13). Während des Scanvorganges wurde mit der einen Hand das Hölzchen mit dem befestigten Zahn festgehalten und die andere Hand fuhr mit dem *OraScanner*® die Zahnoberfläche zur Datenerfassung ab.

Die *SureSmile*® Software erzeugte ein 3D-Objekt, das im STL-Format abgespeichert wurde (Abb. 14). Anschließend wurde das mitgescannte Hölzchen entfernt. Aufgrund dessen geringen Durchmessers blieb nur ein kleines „Loch“ auf der Wurzeloberfläche im virtuellen Modell des gescannten Zahnes zurück, was für die Beurteilung der im Kronenbereich liegenden Approximalkontaktfläche irrelevant war.



Abb. 13: Oberer erster Prämolare mit einem Hölzchen, das mit Sekundenkleber an der mesialen Wurzeloberfläche fixiert wurde. Der Zahn wurde für den Scanvorgang mit einer weißen Titandioxidschicht versehen.

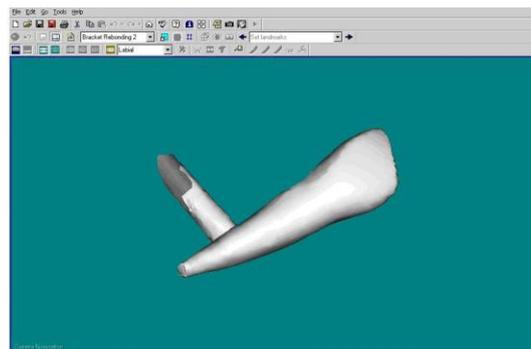


Abb. 14: Screenshot eines gescannten Originalzahnes 12, aufgerufen im SureSmile®-Programm mit mesial an der Wurzeloberfläche befestigter Haltevorrichtung.

3.5 **Rapidform®**

Aufgrund der Einzelzahnschans aller je 14 entfernten Zähne aus acht Ober- und acht Unterkieferzahnbögen ergaben sich insgesamt 224 Einzelzahndatensätze, die die Anatomie der gescannten Zähne exakt wiedergaben (=Originalzähne).

Die acht Ober- und acht Unterkiefer-Zahnbogenscans beinhalteten jeweils 14 Zähne. Diese Zähne wurden einzeln durch das digitale Labor in den Bereichen rekonstruiert, in denen im Zahnbogenscan aufgrund von optischer Verdeckung anatomische Details nicht erkennbar

waren. Somit entstanden auch hier insgesamt 224 Einzelzahndatensätze (=SureSmile®-Zähne), die aus den Zahnbögen-scans virtuell herauslösbar waren.

Die anatomisch exakt erfassten Originalzähne wurden (als Einzelzähne) mit ihren korrespondierenden SureSmile®-Zähnen, welche sich ja im Zahnbogenverbund befinden, zur Deckung gebracht (=registriert). Dies wurde ermöglicht, indem vier eindeutige anatomische Referenzpunkte auf den Originalzähnen und SureSmile®-Zähnen übereinander gelegt wurden. Daraufhin konnten die SureSmile®-Zähne mit den Originalzähnen unter Verwendung eines Koordinatensystems quantitativ analysiert werden (siehe 3.5.4).

Dieser Vorgang sowie alle Kontaktpunktbestimmungen und Vermessungen wurden an einem Computerarbeitsplatz der Firma OraMetrix® (Berlin, D) mit Hilfe der Software Rapidform® (INUS Technology, Seoul, Korea) vorgenommen. Hierbei handelt es sich um eine Reverse-Engineering-Software für die Erstellung, Bearbeitung und Analyse von 3D-CAD-Modellen basierend auf 3D-Scandaten.

3.5.1 Registrierung

Der Zahnbogen-scan und der Originalzahn, der am korrespondierenden Platz im Zahnbogen überlagert werden sollte, wurden aus der gespeicherten Zahn-datei aufgerufen (Abb. 15). Die Abb. 16 bis Abb. 19 zeigen das Vorgehen am Beispiel von Zahn 41: Mit der Befehlsabfolge „build >> register >> shells >> initial“ erfolgte die „Initiale Registrierung“ des Zahnes durch die Software an die entsprechende Stelle im Zahnbogen. Bei der Initial-Registrierung wurden auf der Originalzahnoberfläche und am entsprechenden Zahn im Zahnbogen-scan vier Punkte markiert. Die Auswahl der Punkte sollte möglichst verteilt und an markanten Stellen, wie zum Beispiel Zahnkanten, sein. Das Programm Rapidform® suchte nach identischen Flächenformen der jeweiligen markierten Punkte und legte so den Originalzahn 41 in den Zahn 41 des Zahnbogen-scans. Anschließend wurde in einem zweiten Rechenschritt die so genannte „Fein-Registrierung“ vorgenommen, um den Zahn in die endgültige, softwareerrechnete Position einzufügen. Mit Hilfe der Befehlsabfolge „build >> register >> fine“ wurden die Punkte zur Deckung gebracht.

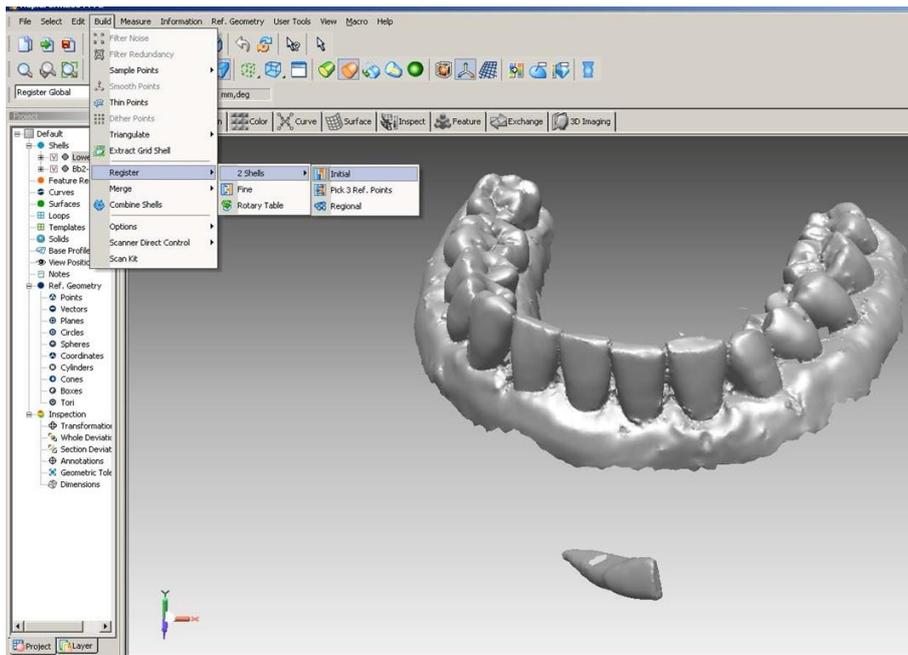


Abb. 15: Originalzahn 41 und der zugehörige Unterkieferzahnbogenscan wurden im Computerprogramm Rapidform® aufgerufen.

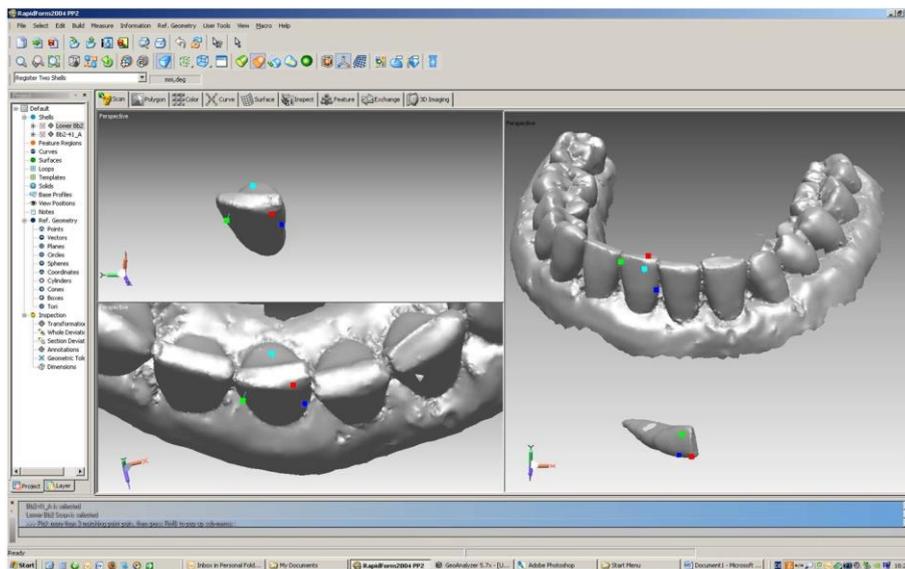


Abb. 16: Initial-Registrierung: am Zahn 41 wurden sowohl am Originalzahn als auch innerhalb des Unterkieferzahnbogenscans vier Punkte manuell markiert, die die Software zur Orientierung und Überlagerung benötigt.

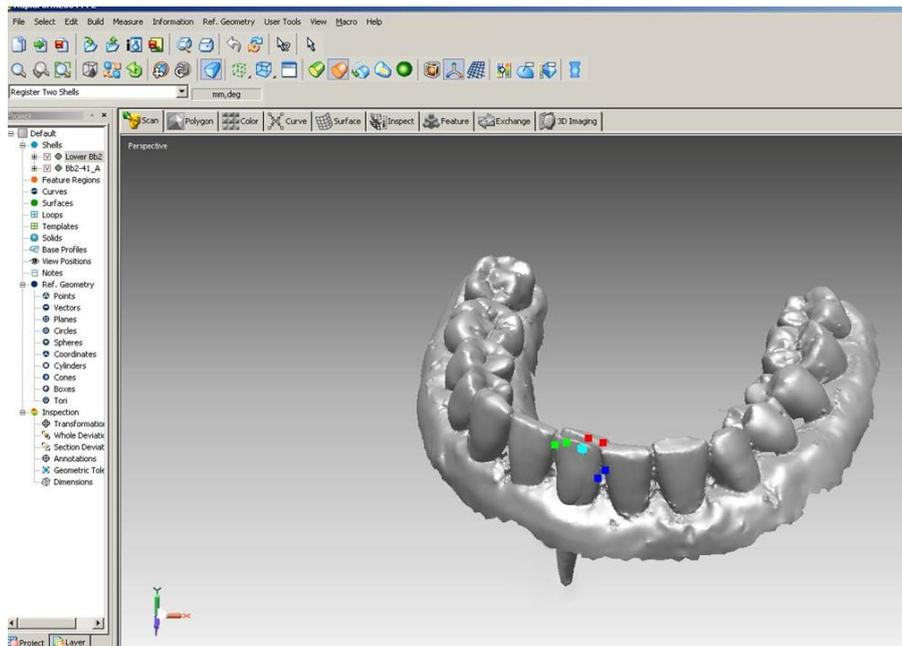


Abb. 17: Der Zahn 41 wurde anhand von vier ausgewählten Markierungspunkten von der Software initial in den Unterkiefer registriert.

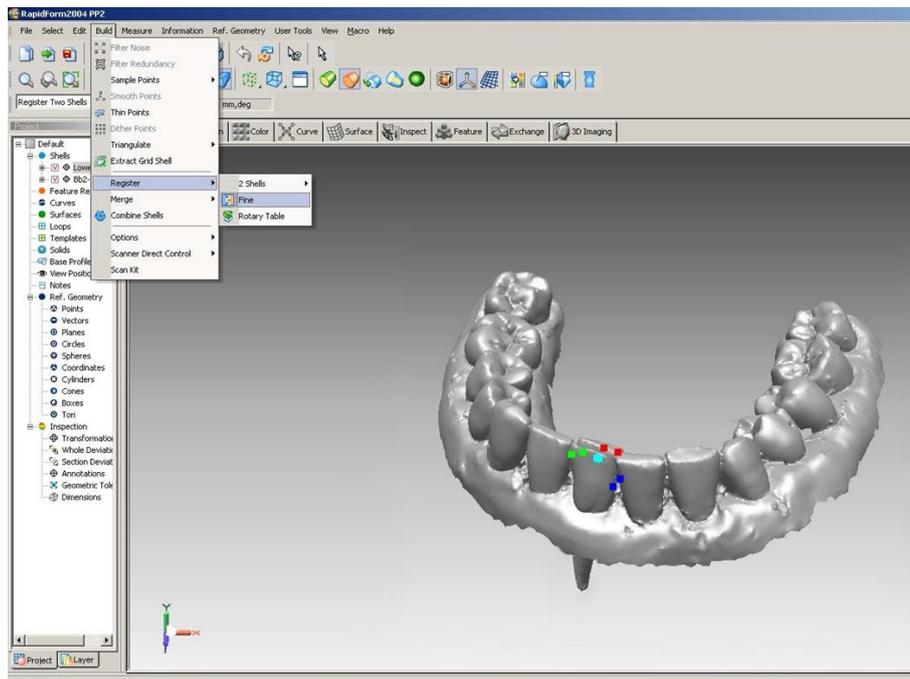


Abb. 18: Die Befehlsabfolge zur Fein-Registrierung wurde links oben im Bild aufgerufen. Die mittels Punkten markierten Bereiche am Originalzahn sind den markierten Bereichen im Zahnbogen zugeordnet worden und der Zahn wurde im Rahmen der Initialregistrierung an die entsprechende Stelle im Zahnbogen eingefügt.

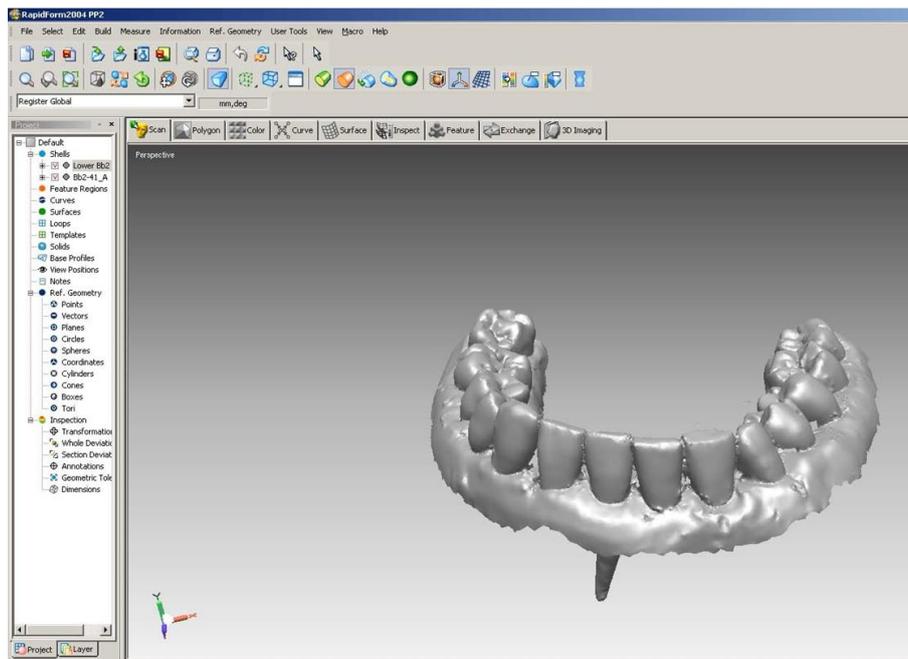


Abb. 19: In dem Unterkieferzahnbogenscan wurde der Zahn 41 fertig einregistriert, indem die Zahnkrone des Originalzahnes und die des Zahnes im Zahnbogen zur Deckung gebracht wurden.

3.5.2 Koordinatensystemerstellung

Die Position jedes Zahnes eines gescannten Kiefers war dreidimensional von der Software *Rapidform*® über ein universelles Koordinatensystem definiert. Um die Positionen der Zähne und deren Kontaktpunkte in mesialer sowie distaler Richtung untereinander vergleichen zu können, wurde zunächst für jeden Zahn ein individuelles, zahnspezifisches Koordinatensystem erstellt (siehe Anhang I: Koordinatensystemerstellung, 12.1).

Zunächst wurde dazu ein Zahn in das Programm *Rapidform*® importiert. Zur Festlegung der XY-Ebene wurde die Oberfläche des Zahnes markiert und anschließend eine Hüllbox mit der Befehlsabfolge, die im Anhang I dargestellt ist, generiert. Diese Hüllbox besteht aus sechs Flächen, welche die äußeren Abmessungen des Zahnes charakterisieren (Abb. 20).

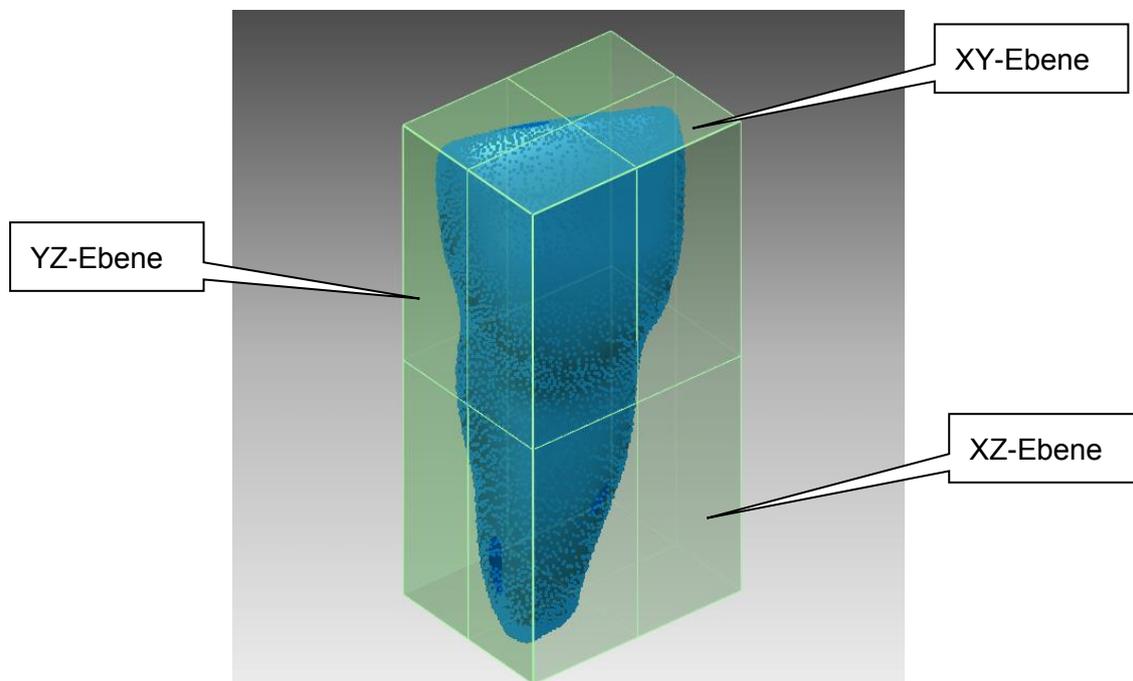


Abb. 20: Angelegte Hüllbox mit den Ebenen, die sich an der äußeren Begrenzung des Zahnes 11 orientieren. Die XY-Ebene wurde von der Software vorgeschlagen und ist noch nicht optimal ausgerichtet. Sie musste manuell am PC durch entsprechende Drehung korrigiert werden. Die XZ- und YZ-Ebenen richteten sich nach der Ausrichtung der XY-Ebene automatisch aus.

Die im Folgenden als XY-Ebene bezeichnete und auf den Schneidekanten bzw. Höckerspitzen der Zähne liegende Ebene wurde orthogonal zur Zahnlängsachse sowie parallel zur Zahnschneidekante ausgerichtet. Die XZ- und YZ-Ebene wurden senkrecht dazu im Anschluss automatisch vom Programm *Rapidform*® generiert.

Die X-Achse (Abb. 21, roter Pfeil) verläuft durch die YZ-Ebene und entspricht der mesiodistalen Ausdehnung des Zahnes. Die Z-Achse (Abb. 21, blauer Pfeil) verläuft parallel zur Zahnlängsachse und steht für die inzisal-apikale Ausdehnung des Zahnes. Die Y-Achse (Abb. 21, grüner Pfeil) verläuft orthogonal durch die XZ-Ebene und entspricht der orovestibulären Ausdehnung des Zahnes.

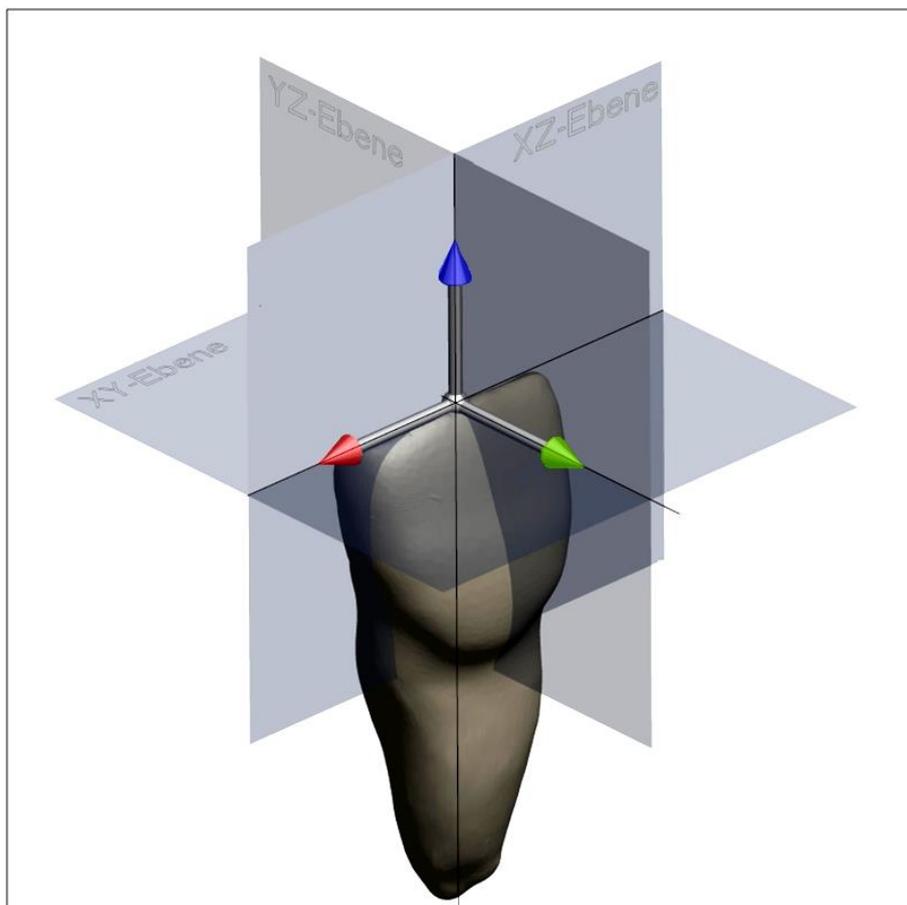


Abb. 21: Definition des zahn-spezifischen Koordinatensystems und der entsprechenden Ebenen: Der inzisal-apikal verlaufende blaue Pfeil stellt die Z-Achse dar und trifft im rechten Winkel auf die XY-Ebene. Der mesiodistal ausgerichtete rote Pfeil stellt die X-Achse dar, die auf der YZ-Ebene im rechten Winkel trifft. Der orovestibuläre grüne Pfeil trifft auf die XZ-Ebene und zeigt den Verlauf der Y-Achse.

Die Orientierung des zahnspezifischen Koordinatensystems erfolgte jeweils anhand des Verlaufes der koronalen Zahnachse. Wurzelmerkmale wurden vernachlässigt, da nur die Betrachtung der Kronenmodellierung für die Fragestellungen relevant war. Da die Software nur über ein universelles und kein zahnspezifisches Koordinatensystem verfügt, anhand dessen die Ausrichtung aller Zahnachsen erfolgen konnte, wurde jedem Zahn ein individuelles Koordinatensystem zugeordnet. Die Orientierung der X-, Y- und Z-Achse wurde bei dem Koordinatensystem je Zahn im Zahnbogen übereinstimmend ausgerichtet (Abb. 22 und Abb. 23).

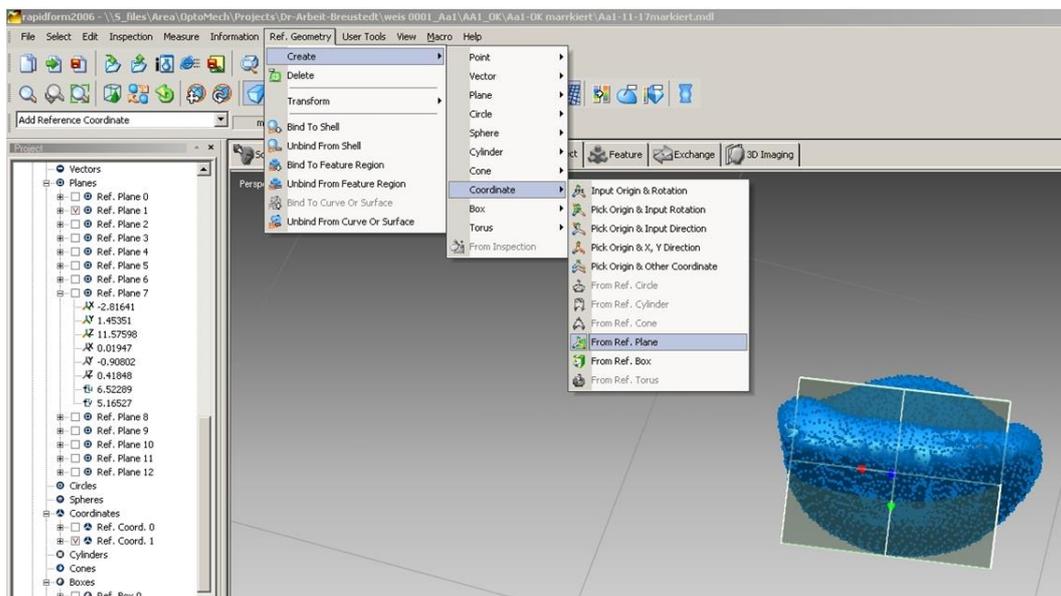


Abb. 22: Zahn 11 mit an Hand der XY-Ebene erstelltem Koordinatensystem. Die XY-Ebene wurde manuell am PC so ausgerichtet, dass die Pfeile des Koordinatensystems in die zugehörige Richtung der X-, Y- und Z-Achse zeigen.

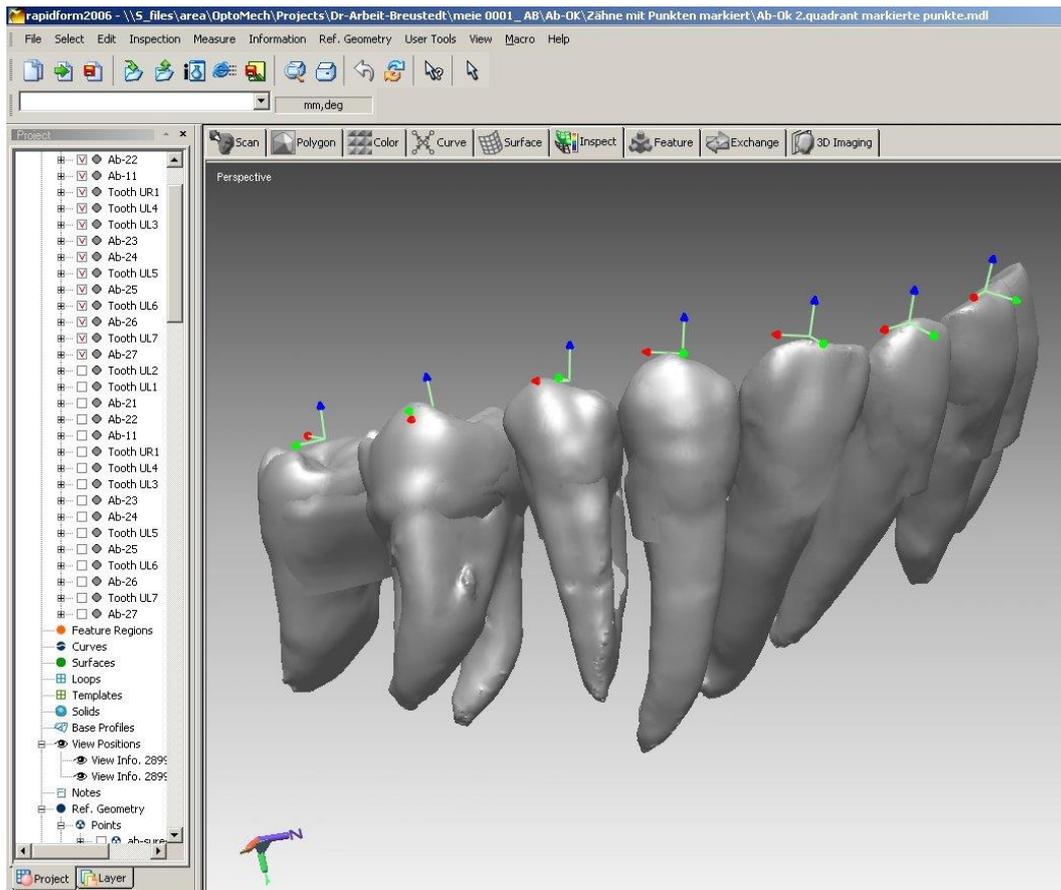


Abb. 23: Screenshot einer Zahnreihe 21-27 mit individuell erstellten Koordinatensystemen je Zahn im Programm *Rapidform*®. Die von *SureSmile*® nachbearbeiteten Zähne und die einregistrierten Originalzähne sind hier im Bild im koronalen Bereich bereits überlagert.

3.5.3 Kontaktpunkt-Bestimmung

Nachdem für alle *SureSmile*®- und Originalzähne die Koordinatensysteme erstellt worden waren, wurde für jeden einzelnen Kontaktpunkt die Lage auf der X-, Y- und Z-Achse ermittelt. Da es sich klinisch bei einem Kontakt“punkt“ zwischen zwei Zähnen um eine Fläche handelt, wurde diese Fläche in der Analyse mit *Rapidform*® auf die kleinstmögliche Flächeneinheit reduziert. Dies geschah in *Rapidform*® durch so genannte „Tesselation“ oder „Parkettierung“: Hierbei wird die Oberfläche mit Hilfe von kleinsten Dreiecksfacetten beschrieben. Jede Dreiecksfacette wird durch die Eckpunkte und die zugehörige Fläche des Dreiecks charakterisiert. Die Dreiecke sind lückenlos und überlappungsfrei miteinander verkettet. Die Größe und Anzahl der Dreiecke kennzeichnen den Detaillierungsgrad und die Scanauflösung der Modelle. So können ebene Oberflächen durch eine kleine Anzahl von Dreiecken großer Kantenlänge definiert werden, wohingegen gekrümmte Oberflächen durch eine große Anzahl von Dreiecken geringer Kantenlänge gekennzeichnet sind (Abb. 24).

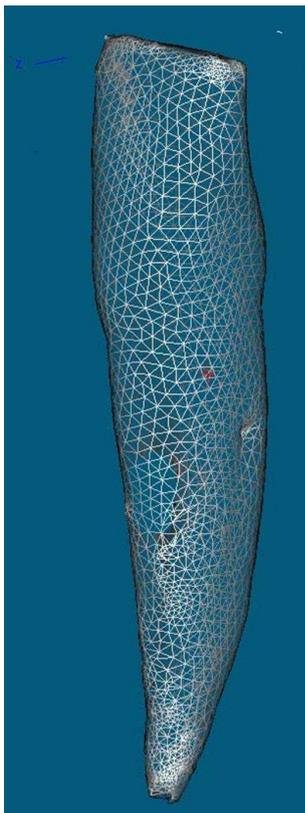


Abb. 24: Tesselation (Parkettierung) der Oberfläche eines Zahnes: glatte Oberflächenbereiche stellen sich mit wenigen großen Dreiecken dar, Kanten und Unebenheiten mit vielen kleinen Dreiecken.

Die Abstands- bzw. Kontaktflächenmessung zweier benachbarten Zähne erfolgte mittels der Programmfunktion: „inspection >> register >> whole register with polygon“. Der gesamte Programmablauf findet sich in Anhang II: Definieren der Kontaktpunkte, 12.2.

Der Abstand zweier benachbarter ausgewählter Approximalkontaktbereiche wurde berechnet und numerisch sowie grafisch dargestellt. Die Zahnoberfläche, die zuerst von den beiden Zähnen, zwischen denen gemessen wird, angewählt wird, stellt das Programm nach Abstandsmessung farbig dar, um im Anschluss den Abstand zwischen den Zähnen zu vermessen (Abb. 25).

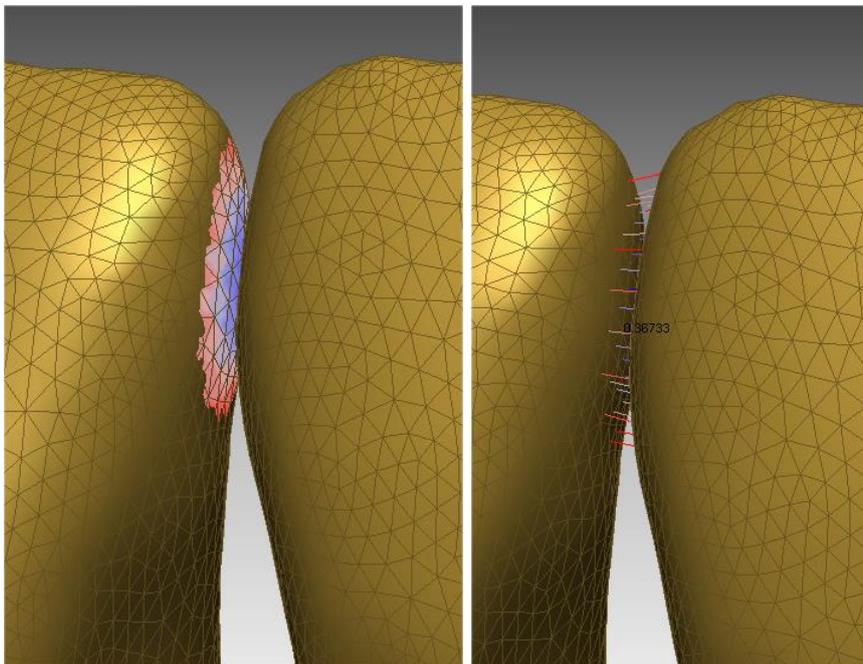


Abb. 25: Ermittlung des Approximalkontaktpunktes am Beispiel zweier Originalzähne 11 und 21 durch die Berechnung des geringsten Abstandes zwischen den zwei Zähnen. Links: Auswahlbereich der berechneten Oberfläche farbig markiert, rechts: Darstellung der Abstandsvektoren in rot. Die Zahl im Bild (0,36733 mm) steht für den geringsten gemessenen Abstand zwischen den beiden Zähnen.

Mit Hilfe von *Rapidform*® (Funktion: „calculate tolerance“) wurde diejenige Dreiecksfacette isoliert, die den geringsten Abstand zum Nachbarzahn aufwies.

Der Mittelpunkt dieser Dreiecksfacette wurde wiederum manuell markiert und als Referenzpunkt beschriftet und gespeichert. Dieser Referenzpunkt definierte für alle weiteren Untersuchungen die zentrale Stelle der approximalen Kontaktfläche eines jeden Zahnes. Somit wurde aus einer klinischen Kontaktfläche ein isolierter, dreidimensional bestimmbarer Kontaktpunkt (Abb. 26).

Für jeden *SureSmile*®- und Originalzahn wurden mit diesem Verfahren ein mesialer und ein distaler Kontaktpunkt ermittelt. Eine Ausnahme bildeten die 2. Molaren, da sie keine distalen Nachbarzähne besitzen.

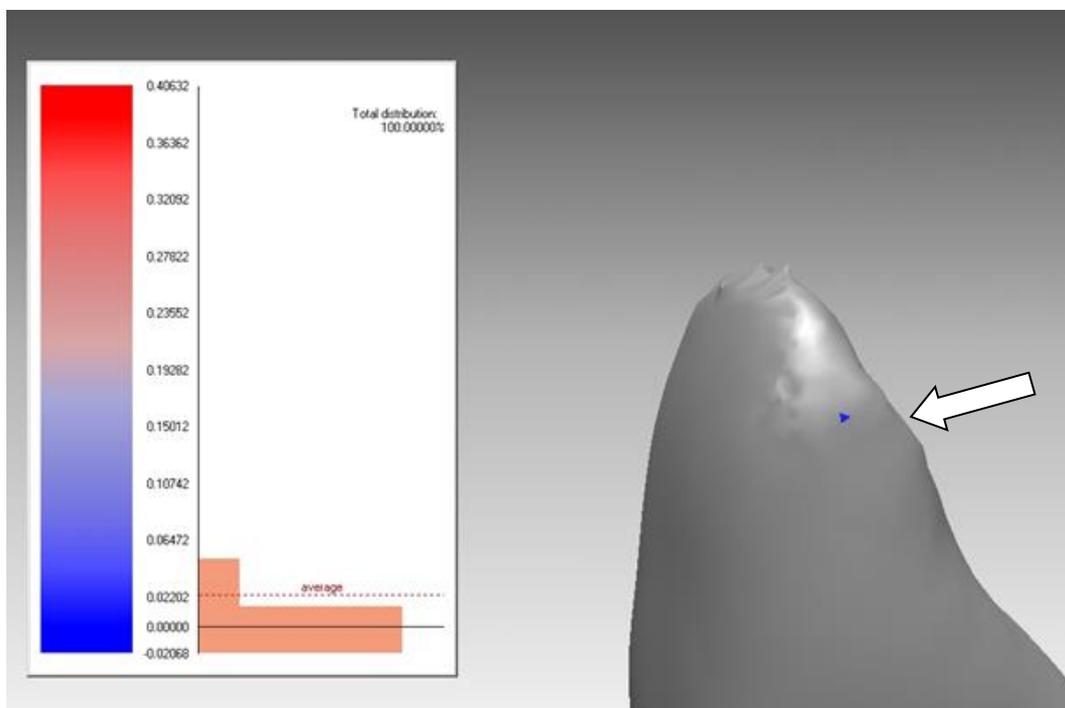


Abb. 26: Auf der Zahnoberfläche des Zahnes 41 ist das isolierte Dreieck aus der Kontaktfläche in blau sichtbar (\Rightarrow). Dieses Dreieck hat den geringsten Abstand zum Nachbarzahn und stellt somit das Zentrum der Kontaktfläche dar. Die Zahnabstände werden durch das Programm farblich codiert: von 0 mm (tiefblau) bis 0,4 mm (rot).

3.5.4 Quantitative Kontaktpunktanalyse

Um die Lage der Kontaktpunkte zwischen *SureSmile*®-Zähnen und Originalzähnen vergleichen zu können, wurden die Distanzen zwischen jedem ermittelten Kontaktpunkt und der durch den Ursprung des zahnspezifischen Koordinatensystems verlaufenden Ebenen berechnet. *Rapidform*® ermittelte den Abstand zwischen Kontaktpunkt und XY-Ebene als Z-Wert, den Abstand zwischen Kontaktpunkt und XZ-Ebene als Y-Wert und den Abstand zwischen Kontaktpunkt und YZ-Ebene als X-Wert (Befehlsabfolge: Auswahl der Bezugsebene, Auswahl des Kontaktpunktes, Befehle: „measure >> distance >> point/reference plane“) (siehe Anhang III: Definition der Kontaktpunkte in X, Y und Z, 12.3). So wurde jedem mesialen und distalen Kontaktpunkt ein X-, Y- und Z-Wert innerhalb seines zahnspezifischen Koordinatensystems zugeordnet und abgespeichert. Diese Vermessungen erfolgten sowohl für die Originalzähne als auch für die *SureSmile*®-Zähne. Die X-Werte beschreiben die mesiodistale Lage der Kontaktpunkte. Die Y-Werte geben die orovestibuläre und die Z-Werte die inzisal-apikale Lage der Kontaktpunkte an. Bei den folgenden Untersuchungen werden nur die X-Werte betrachtet, da die mesiodistale Strecke ausschlaggebend für das Zustandekommen eines Kontaktpunktes ist und daher nur diese Werte von Interesse sind. Alle Zähne werden zur weiteren Beurteilung der Ergebnisse in Zahngruppen eingeteilt (Tab. 1).

Zahngruppe	Zugehörige Zähne	Anzahl (n) der untersuchten Originalzähne	Anzahl (n) der untersuchten <i>SureSmile</i> ®-Zähne
OK-FZ	11, 12, 13, 21, 22, 23	48	48
OK-PM	14, 15, 24, 25	32	32
OK-M	16, 17, 26, 27	32	32
UK-FZ	31, 32, 33, 41, 42, 43	48	48
UK-PM	34, 35, 44, 45	32	32
UK-M	36, 37, 46, 47	32	32
	Summe	224	224
Die Summe der mesialen und distalen Kontaktpunkte (der 7er hat nur einen mesialen Kontakt) beträgt für Originalzähne und <i>SureSmile</i> ®-Zähne jeweils 416.			

Tab. 1: Definierte Zahngruppen und Anzahl der untersuchten Originalzähne und *SureSmile*®-Zähne.

Die ermittelten X-, Y- und Z-Werte wurden in einer Excel-Tabelle abgespeichert und dienten als Berechnungsgrundlage für die quantitative Kontaktpunktanalyse. Diese erfolgte, indem die jeweiligen X-, Y- und Z-Werte der Originalzähne von den Werten der *SureSmile®*-Zähne subtrahiert und die sich ergebenden Beträge zum Vergleich verwendet wurden. Diese Differenz-Beträge bildeten die Basis für die statistische Auswertung (siehe 4.2) der quantitativen Kontaktpunktanalyse.

3.6 **GeoAnalyzer®**

Ein Zahnbogenmodell mit 14 aufgestellten Zähnen beinhaltet 13 Zahnzwischenräume. Jeder Zahnzwischenraum ist dadurch gekennzeichnet, dass ein Kontakt zwischen den benachbarten Zähnen existiert oder nicht. Insgesamt lagen bei 16 Zahnbogenmodellen 208 auf Zahnkontakt zu beurteilende Zahnzwischenräume vor.

Die Software *GeoAnalyzer®* (OraMetrix®, Richardson, Texas, USA) wurde verwendet, um die Zahnzwischenräume auf das Vorhandensein oder Nichtvorhandensein eines Kontaktes hin zu überprüfen. Dabei wurde ein Kontakt als vorhanden definiert, wenn der Abstand zwischen den benachbarten Zahnflächen kleiner oder gleich 0,1 mm war. Die Kontaktanalyse durch *GeoAnalyzer®* erreicht eine Genauigkeit bis 10^{-4} mm. Der Programmablauf ist in Anhang IV: Abstandsmessung mit *GeoAnalyzer®*, 12.4 beschrieben. Zusätzlich konnten die Kontaktflächen der Zähne mit Hilfe des Programms auch optisch dargestellt werden (Abb. 27).

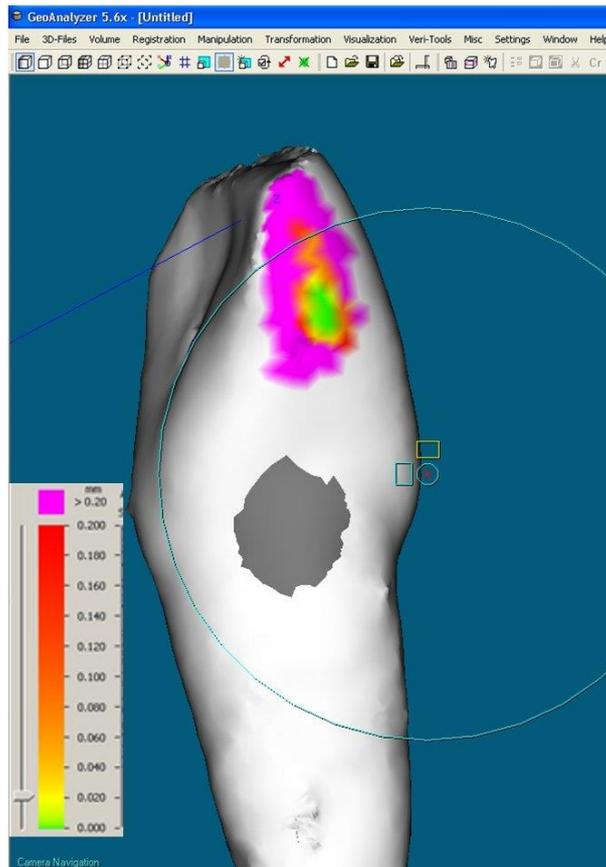


Abb. 27: *GeoAnalyzer*®: Der Abstand zwischen zwei Zähnen wird farbig dargestellt und kann anhand der Skala abgelesen werden. Der grüne Bereich stellt den engsten Kontakt mit dem Nachbarzahn dar.

3.6.1 Qualitative Zahnkontaktanalyse

In *GeoAnalyzer*® wurden die 208 Zahnzwischenräume der Originalzähne mit den 208 Zahnzwischenräumen der *SureSmile*®-Zähne verglichen. Hinsichtlich der Zahnkontakte ergaben sich die folgenden in Tab. 2 dargestellten vier Gruppen. Der Vergleich dieser Gruppen bildete die Basis für die statistische Auswertung (siehe 4.2) der qualitativen Zahnkontaktanalyse.

Kontakt bei <i>SureSmile</i> ®-Zähnen	Kontakt bei Originalzähnen	Gruppe
Nicht vorhanden	Nicht vorhanden	00
Nicht vorhanden	Vorhanden	01
Vorhanden	Nicht vorhanden	10
Vorhanden	Vorhanden	11

Tab. 2: Gruppeneinteilung der möglichen Kontaktkombinationen bei der qualitativen Zahnkontaktanalyse.

3.6.2 Clipping-Plane-Funktion

Die in *GeoAnalyzer*® aufgerufenen Zahndatensätze wurden grafisch als dreidimensionale Hülldatenmodelle dargestellt, die mit Hilfe der Clipping-Plane-Funktion an jeder beliebigen Stelle mittels einer virtuellen Ebene geteilt werden können. Der Anwender kann somit beliebig viele Schnittebenen definieren und die entsprechenden Querschnitte der Zähne visuell beurteilen. Werden zwei Nachbarzähne gleichzeitig aufgerufen, so kann man mit der Clipping-Plane-Funktion eine Ebene anlegen, die genau durch den Kontaktpunkt der Nachbarzähne verläuft, und somit den Kontaktpunkt visuell beurteilen und vermessen. Der Programmablauf hierzu ist in Anhang V: *GeoAnalyzer*® Clipping-Plane-Funktion, 12.5 beschrieben.

Die Clipping-Plane-Funktion wurde in dieser Arbeit dazu verwendet, um den Methodenfehler zu bestimmen (siehe 3.7).

3.7 Methodenfehler

Zur Bestimmung des Methodenfehlers wurde ein beliebig ausgewählter Oberkieferzahn (Zahn 13) zehnmal hintereinander unter gleichen Bedingungen (gleiche Person, gleicher Scanner) mit dem *OraScanner*® gescannt. Die Hülldatenmodelle dieser zehn Einzelzahnscans wurden nacheinander in den korrespondierenden Zahn des gescannten Zahnbogenmodells registriert. Anschließend wurden alle zehn registrierten Hülldatenmodelle gleichzeitig in *GeoAnalyzer*® geöffnet und mit Hilfe der Clipping-Plane-Funktion im Bereich der größten mesiodistalen Ausdehnung der Krone auf Lageabweichungen jeweils an der mesialen und distalen Fläche untersucht (Abb. 28). Dies erfolgte durch die Vermessung anhand eines gleichzeitig eingeblendeten 0,01 mm Gitterlinien-Rasters (Abb. 29).

Die ermittelten Differenzen der zehn Einzelzahnscans wurden - nach mesialer und distaler Fläche getrennt - mittels der Dahlberg-Formel auf die Stichproben-Standardabweichung hin untersucht.

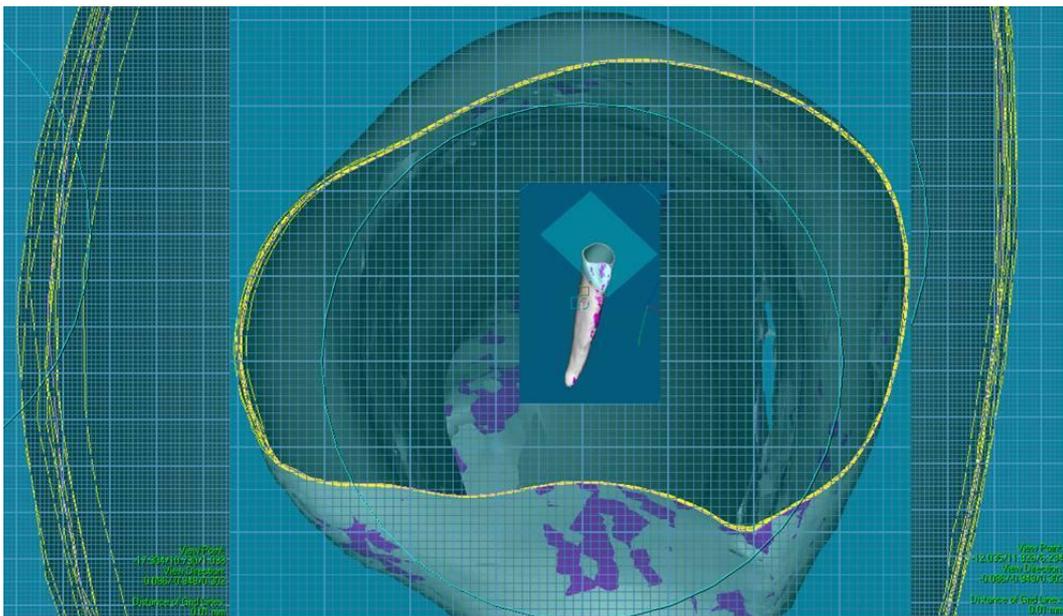


Abb. 28: Blick von inzisal auf die Schnittebene des Zahnes 13 nach Übereinanderlagerung der zehn Einzelzahnscans in *GeoAnalyzer*®. Die Höhe der Schnittebene ist im Zentrum der Grafik zusätzlich eingeblendet. Die gelben Linien am linken und rechten Bildrand stellen die vergrößerten Übereinanderlagerungen der mesialen bzw. distalen Approximalflächen dar, die nachfolgend auf Abweichungen vermessen wurden.

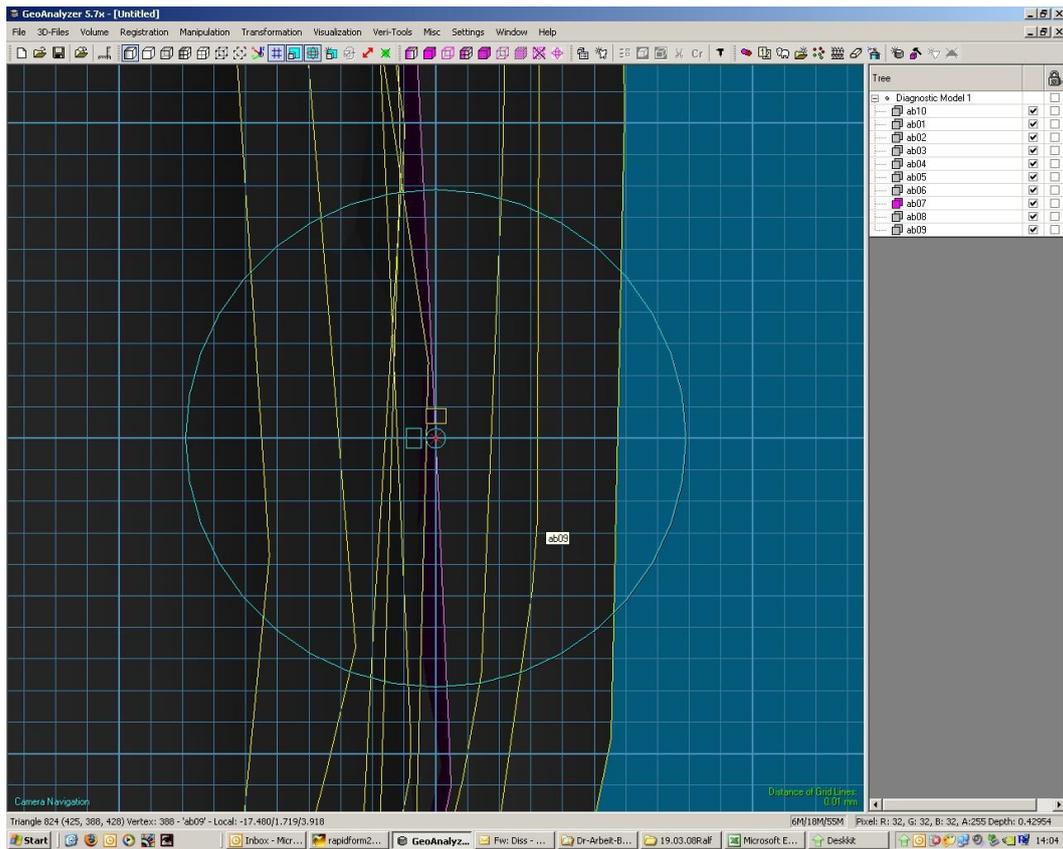


Abb. 29: Vergrößerter Ausschnitt der mesialen Approximalfächen der zehn Einzelzahnschans mit Überlagerung des 0,01 mm Gitters zur Vermessung. Es wurden die Abstände der einzelnen Punkte auf der Linie vermessen, die von rechts nach links durch die Mitte des Fadenkreuzes verläuft.

4 Ergebnisse

4.1 Methodenfehler

Der durchschnittliche methodische Fehler über die mesiale und distale Fläche wurde mit 0,035 mm berechnet (Tab. 3).

Messung	Zahnfläche	Scanabstand		Stichprobenvarianz	Stichproben-Standard- Abweichung (nach Zahnflächen)	Durchschnitt- licher metho- discher Fehler
(i...n)		$x_i \dots x_n$	$x_i - x_0$	$s^2 =$ $(1/n-1) * [\sum (x_i - x_0)^2]$	$\sqrt{s^2}$	
		[μm]	[μm]	[μm^2]	[μm]	[μm]
1	distal	1	-45,05	1967,36	44,35	34,97
2		19	-27,05			
3		38	-8,05			
4		68	21,95			
5		69	22,95			
6		71	24,95			
7		71	24,95			
8		84	37,95			
9		89	42,95			
10		143	96,95			
1	mesial	4	-44,58	614,11	24,78	34,97
2		12	-36,58			
3		19	-29,58			
4		21	-27,58			
5		24	-24,58			
6		25	-23,58			
7		35	-13,58			
8		35	-13,58			
9		47	-1,58			
10		49	0,42			

Tab. 3: Zur Fehleranalyse wurde die Dahlberg-Formel verwendet. Diese ergibt eine Stichproben-Standardabweichung von 0,044 mm für die distalen und 0,025 mm für die mesialen Zahnflächenscans, was einen durchschnittlichen methodischen Fehler von 0,035 mm für die Scangenaugigkeit ergibt.

4.2 Übersicht der statistischen Verfahren

Bei der qualitativen Zahnkontaktanalyse wurden für die kategorialen Merkmale (Gruppen 00, 01, 10, 11; siehe 3.6.1) als Maß der Übereinstimmung der Kappa-Wert berechnet. Um die Unterschiede in den Häufigkeiten der falsch-positiven und falsch-negativen Gruppen zu überprüfen, wurde der McNemar-Test angewandt.

Bei der quantitativen Kontaktpunktanalyse wurden für alle 416 Zahnkontaktpunkte jeweils die X-, Y- und Z-Wert-Betragsdifferenzen aus *SureSmile*®- und Originalzähnen ermittelt. Für diese Werte wurden neben dem Mittelwert und der Standardabweichung auch der Medianwert, sowie das untere und obere Quartil (25er und 75er Perzentile) berechnet. Zusätzlich wurden Minimum und Maximum bestimmt. Die grafische Darstellung dieser Ergebnisse erfolgte mit Hilfe von Boxplots.

Es wurde festgelegt, die Kontaktpunktabstände (entsprechend den rechnerisch ermittelten Betragsdifferenzen), die kleiner oder gleich 0,1 mm waren, als deckungsgleich anzusehen und somit als Übereinstimmung der Kontaktpunkte von *SureSmile*®- und Originalzähnen zu behandeln. Alle Werte über 0,1 mm wurden als nicht übereinstimmend modellierte Kontaktpunkte definiert.

Die Prüfung auf Unterschiede in der Häufigkeitsverteilung der übereinstimmend modellierten Kontaktpunkte und der nicht übereinstimmend modellierten Kontaktpunkte wurde erst hinsichtlich der Lage im Kiefer (OK/UK) und im Anschluss hinsichtlich der Zahngruppe (Frontzahn/Prämolar/Molar) mit dem Chi-Quadrat-Test als univariates Verfahren durchgeführt.

Um den gleichzeitigen Einfluss der Faktoren Oberkiefer/Unterkiefer und Frontzahn-, Prämolaren- oder Molarenregion auf übereinstimmende und nicht übereinstimmende Kontaktpunkte von *SureSmile*®-Zähnen und Originalzähnen zu prüfen, wurde eine binäre logistische Regression als multivariates Verfahren eingesetzt.

Ein $p < 0,05$ wurde als signifikant betrachtet. Die Datenerfassung geschah mit Microsoft Excel 2000 Version 9.0, indem die Daten manuell in eine Exceltabelle eingefügt wurden. Die statistischen Auswertungen wurden mit SPSS Version 13.0 durchgeführt.

4.3 Ergebnisse der qualitativen Zahnkontaktanalyse

Die Originalzähne hatten zu 59,6 % (n=124) Kontakt zu ihrem jeweiligen Nachbarzahn. Die *SureSmile*®-Zähne hatten zu 79,8 % (n=166) Kontakt zu ihrem jeweiligen Nachbarzahn.

In 48,6 % (n=101) traten übereinstimmend an den Originalzähnen und an den entsprechenden *SureSmile*®-Zähnen Kontakte auf (Gruppe 11). Zu 9,1 % (n=19) hatten die *SureSmile*®-Zähne und die entsprechenden Originalzähne keinen Kontakt (Gruppe 00). In 11,1 % (n=23) lag an den Originalzähnen ein Kontakt vor, der von *SureSmile*® nicht als Kontakt modelliert wurde (Gruppe 01). In 31,2 % (n=65) lag bei den *SureSmile*®-Zähnen ein Kontakt vor, der an den Originalzähnen nicht vorhanden war (Gruppe 10) (Abb. 30).

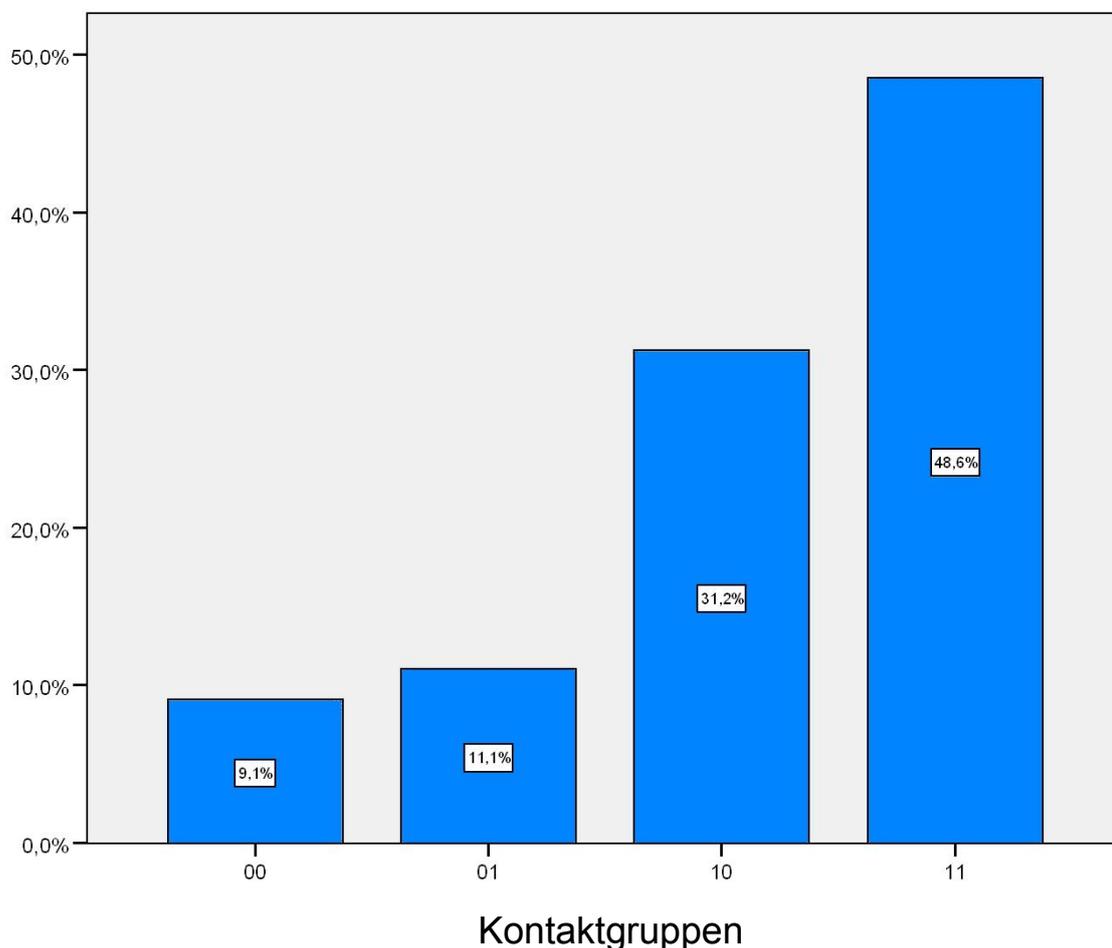


Abb. 30: Prozentuale Verteilung der unterschiedlichen Kontaktgruppen

Gruppe 00: *SureSmile*®- und Originalzähne ohne Kontakt

Gruppe 01: *SureSmile*®-Zähne ohne Kontakt und Originalzähne mit Kontakt

Gruppe 10: *SureSmile*®-Zähne mit Kontakt und Originalzähne ohne Kontakt

Gruppe 11: *SureSmile*®- und Originalzähne mit Kontakt

Um die Frage der Übereinstimmung der Kontakte von *SureSmile*®-Zähnen mit den Originalzahnkontakten zu beantworten, wurde für die Gruppe 00 und für die Gruppe 11 der Kappa-Test durchgeführt. Bei der Betrachtung aller Ober- und Unterkieferzahnkontakte gemeinsam (n=208) errechnete sich ein Kappa von 0,044 mit einem 95 %-Konfidenzintervall von -0,078 bis 0,167.

Der Vergleich für die Kontakthäufigkeiten zwischen den Gruppen 01 und 10 wurde mit Hilfe des McNemar-Tests geprüft. Der p-Wert in diesem Test war für alle Ober- und Unterkieferzähne gemeinsam kleiner als 0,001.

Betrachtet man alle oberen (n=104) Approximalräume, so haben im Oberkiefer 84,6 % (n=88) der *SureSmile*®-Zähne und 58,7 % (n=61) der Originalzähne Kontakt zum jeweiligen Nachbarzahn (Abb. 31).

Davon wiesen 7,7 % (n=8) der Zahnzwischenräume sowohl bei *SureSmile*®- als auch bei den Originalzähnen keine Kontakte auf (Gruppe 00). Zu 51 % (n=53) lagen sowohl bei *SureSmile*®-Zähnen als auch bei den Originalzähnen übereinstimmende Kontakte vor (Gruppe 11). Bei 33,7 % (n=35) der Approximalräume im Oberkiefer wurde bei *SureSmile*®-Zähnen ein Kontakt modelliert. Hier lagen an den Originalzähnen keine Kontakte vor (Gruppe 10). Bei 7,7 % (n=8) wurden an den Originalzähnen Kontakte ermittelt, die bei *SureSmile*®-Zähnen nicht modelliert wurden (Gruppe 01).

Im Unterkiefer hatten von allen möglichen Kontakten (n=104) 75 % (n=78) der *SureSmile*®-Zähne und 60,6 % (n=63) der Originalzähne einen Kontakt zum jeweiligen Nachbarzahn.

Bei 10,6 % (n=11) lagen sowohl an *SureSmile*®-Zähnen als auch an den Originalzähnen keine Kontakte vor (Gruppe 00). Zu 46,2 % (n=48) waren bei den *SureSmile*®-Zähnen und bei den Originalzähnen übereinstimmende Kontakte vorhanden (Gruppe 11). Bei 28,8 % (n=30) wurden an *SureSmile*®-Zähnen Kontakte modelliert, die an den Originalzähnen nicht vorhanden waren (Gruppe 10). An 14,4 % (n=15) der Originalzähne traten Kontakte auf, die von *SureSmile*® nicht modelliert wurden (Gruppe 01).

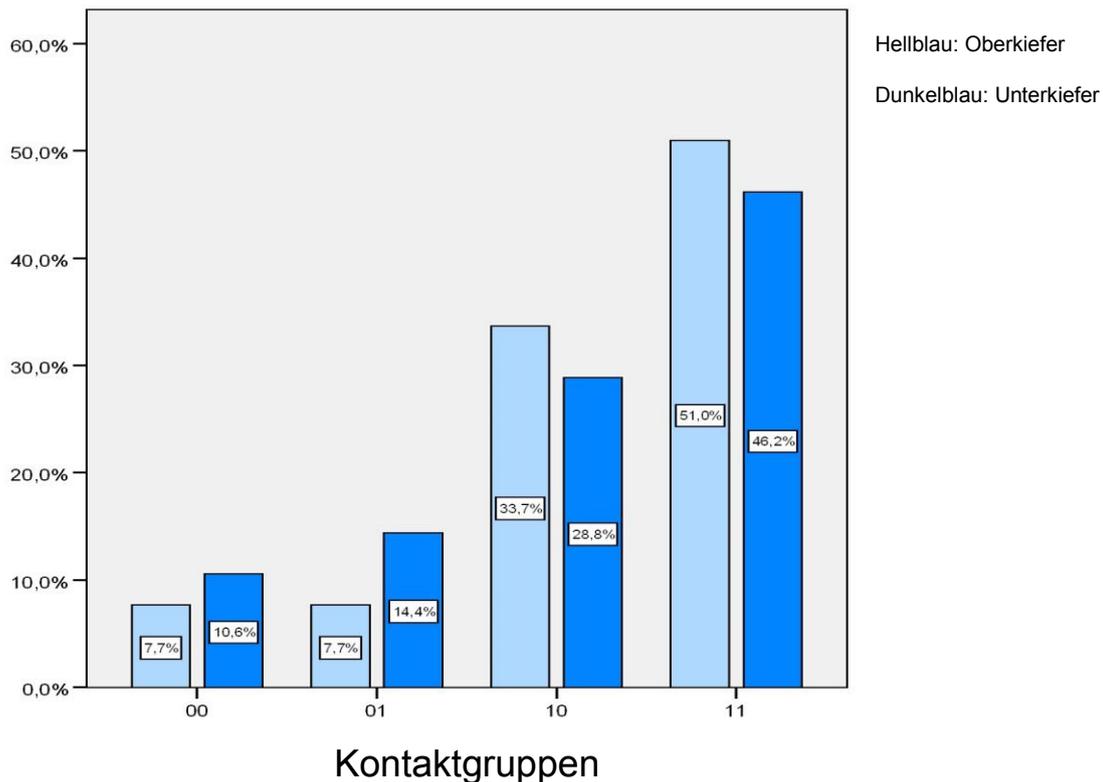


Abb. 31: Nach Ober- und Unterkiefer getrennt aufgeführte Verteilung der Kontaktgruppen.

00: *SureSmile*®- und Originalzähne ohne Kontakt

01: *SureSmile*®-Zähne ohne Kontakt und Originalzähne mit Kontakt

10: *SureSmile*®-Zähne mit Kontakt und Originalzähne ohne Kontakt

11: *SureSmile*®- und Originalzähne mit Kontakt.

Bei getrennter Betrachtung von Ober- und Unterkieferzähnen gab es pro Gruppe 104 mögliche approximale Kontakte zwischen den jeweils benachbarten Zähnen.

Für die Oberkieferzähne ergab sich ein Kappa von 0,061 mit einem 95 %-Konfidenzintervall von -0,09794 bis 0,2189. Für die Unterkieferzähne ergab sich ein Kappa von 0,032 mit einem 95%-Konfidenzintervall von -0,151 bis 0,2155.

Der McNemar-Test ergab für die Oberkieferzähne einen p-Wert kleiner als 0,001 und für die Unterkieferzähne einen p-Wert von 0,036. Somit liegen in beiden Fällen signifikante Unterschiede bezüglich des Vorhandenseins von Zahnkontakten an Originalzähnen und modellierten *SureSmile*®-Zähnen vor.

4.4 Ergebnisse der quantitativen Kontaktpunktanalyse

4.4.1 Ausmaß der Abweichung der Kontaktpunkte von Original- und *SureSmile*®-Zähnen bezogen auf die drei Raumrichtungen

Die Ergebnisse der beschreibenden Statistik hinsichtlich der Abweichung der Kontaktpunkte von Original- und *SureSmile*®-Zähnen in X-, Y- und Z-Richtung sind in der Tab. 4 zusammengefasst und wurden mit Hilfe von Boxplots grafisch dargestellt (Abb. 32).

		Betrag X-Wert	Betrag Y-Wert	Betrag Z-Wert
Anzahl (n)		416	416	416
Mittelwert [mm]		0,099	0,371	0,562
Standardabweichung [mm]		0,080	0,423	0,541
Minimum [mm]		0,000	0,001	0,005
Maximum [mm]		0,563	3,117	3,120
Perzentile [mm]	25	0,036	0,101	0,187
	50 (Median)	0,080	0,250	0,413
	75	0,137	0,472	0,731

Tab. 4: Statistische Auswertung aller X-, Y- und Z-Werte (X: mesiodistale Richtung, Y: orovestibuläre Richtung, Z: inzisal-apikale Richtung) bezüglich der Abweichung der Kontaktpunkte von *SureSmile*®-Zähnen und Originalzähnen.

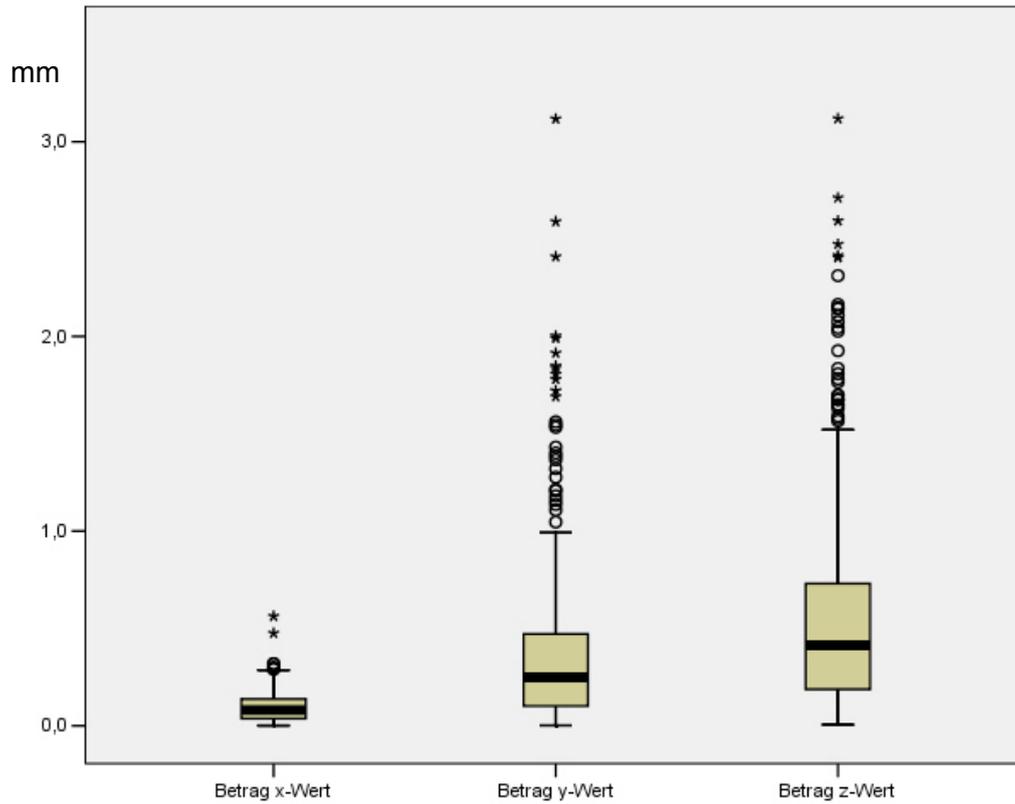


Abb. 32: Boxplot vom Ausmaß der Abweichung der Kontaktpunkte von *SureSmile*®- und Originalzähnen (in mm) bezogen auf die drei Raumrichtungen.

4.4.2 Ausmaß der Abweichung der Kontaktpunkte von Original- und *SureSmile*®-Zähnen abhängig von Zahngruppen im Ober- und Unterkiefer

Die Ergebnisse der X-Werte bezogen auf die drei Gruppen Frontzähne (FZ), Prämolaren (PM) und Molaren (M) in Oberkiefer (OK) und Unterkiefer (UK) sind in Tab. 5 dargestellt.

Zahngruppen	Anzahl (n)	Mittelwert [mm]	Standard-abweichung [mm]	Minimum [mm]	Maximum [mm]	Perzentile 25er [mm]	Median [mm]	Perzentile 75er [mm]
OK-FZ	96	0,093	0,077	0,002	0,294	0,035	0,065	0,130
OK-PM	64	0,105	0,074	0,001	0,298	0,045	0,094	0,154
OK-M	48	0,116	0,075	0,002	0,299	0,060	0,110	0,162
UK-FZ	96	0,105	0,093	0,000	0,563	0,036	0,081	0,140
UK-PM	64	0,097	0,079	0,003	0,475	0,038	0,090	0,132
UK-M	48	0,076	0,064	0,003	0,290	0,025	0,061	0,118

Tab. 5: Statistische Auswertung der einzelnen Zahngruppen, unterteilt in Ober- und Unterkiefer bezüglich der Abweichungen in der Lage der Kontaktpunkte der *SureSmile*®- und Originalzähne in mesiodistaler Ausdehnung (X-Werte).

4.4.3 Häufigkeit der Übereinstimmung der Kontaktpunkte von *SureSmile*®- und Originalzähnen bezogen auf die X-Achse (mesiodistale Richtung)

An 224 Originalzähnen und den korrespondierenden 224 *SureSmile*®-Zähnen sind jeweils 416 Kontaktpunkte in ihrer Lage bezogen auf die X-Achse verglichen worden. Es wurde festgelegt, dass Kontaktpunktabstände auf der X-Achse, die kleiner oder gleich 0,1 mm waren, als deckungsgleich angesehen und somit als Übereinstimmung der Kontaktpunkte von *SureSmile*®- und Originalzähnen behandelt wurden. Alle Werte über 0,1 mm wurden als nicht übereinstimmend definiert.

Von 416 untersuchten Kontaktpunkten wurden 58,9 % (n=245) an *SureSmile*®-Zähnen übereinstimmend mit den Originalzähnen erstellt. Bei 41,1 % (n=171) der modellierten *SureSmile*®-Kontaktpunkte war die Abweichung von den Originalkontaktpunkten größer als 0,1 mm (Tab. 6).

Kontaktpunktabstand auf X-Achse	Vergleich <i>SureSmile</i> ®- und Originalzähne	Anzahl (n)	Relative Häufigkeit
0 bis 0,1 mm	Kontaktpunkt stimmt überein	245	0,589
größer als 0,1 mm	Kontaktpunkt stimmt nicht überein	171	0,411

Tab. 6: Ergebnis der Übereinstimmung der Kontaktpunktlage in mesiodistaler Richtung (X-Achse) von *SureSmile*®- und Originalzähnen.

4.4.4 Häufigkeit der Übereinstimmung der Kontaktpunkte von *SureSmile*®- und Originalzähnen verglichen zwischen Ober- und Unterkiefer

Im Ober- und im Unterkiefer wurden jeweils 112 mesiale und 96 distale Kontaktpunkte getrennt voneinander untersucht. Von den mesialen Kontaktpunkten, die von *SureSmile*® modelliert wurden, stimmten im Oberkiefer 53,6 % (n=60) und im Unterkiefer 64,3 % (n=72) mit den Originalkontaktpunkten in mesiodistaler Richtung überein. Im Bereich der distalen Kontaktpunkte, die von *SureSmile*® modelliert wurden, stimmten im Oberkiefer 57,3 % (n=55) und im Unterkiefer 60,4 % (n=58) mit den Kontaktpunkten der Originalzähne in mesiodistaler Richtung überein (Tab. 7).

Kontaktpunktlage	Kontaktpunkt Abstand auf X-Achse (mesiodistale Richtung)	Anzahl der Kontaktpunkte...	... im Oberkiefer	... im Unterkiefer	Gesamt
mesial	0 ≤ 0,1 mm (≈ übereinstimmender Kontaktpunkt)	<i>Absolut (n)</i>	60	72	132
		<i>Relativ (%)</i>	53,6	64,3	58,9
	> 0,1 mm (≈ nicht übereinstimmender Kontaktpunkt)	<i>Absolut (n)</i>	52	40	92
		<i>Relativ (%)</i>	46,4	35,7	41,1
	Gesamt	<i>Absolut (n)</i>	112	112	224
		<i>Relativ (%)</i>	100	100	100
distal	0 ≤ 0,1 mm (≈ übereinstimmender Kontaktpunkt)	<i>Absolut (n)</i>	55	58	113
		<i>Relativ (%)</i>	57,3	60,4	58,9
	> 0,1 mm (≈ nicht übereinstimmender Kontaktpunkt)	<i>Absolut (n)</i>	41	38	79
		<i>Relativ (%)</i>	42,7	39,6	41,1
	Gesamt	<i>Absolut (n)</i>	96	96	192
		<i>Relativ (%)</i>	100	100	100

Tab. 7: Häufigkeit der übereinstimmenden und nicht übereinstimmenden mesialen bzw. distalen Kontaktpunkte von *SureSmile*®- und Originalzähnen im Ober- und Unterkiefer.

Der p-Wert wurde mit dem Chi-Quadrat-Test berechnet und ergab für die mesialen Kontaktpunkte im Vergleich Ober- gegen Unterkiefer einen Wert von 0,103. Für die distalen Kontaktpunkte im Vergleich Ober- gegen Unterkiefer ergab sich p=0,660.

4.4.5 Häufigkeit der Übereinstimmung der Kontaktpunkte von *SureSmile*®- und Originalzähnen verglichen zwischen den einzelnen Zahngruppen im Ober- und Unterkiefer

Im Ober- und im Unterkiefer wurden jeweils 96 mesiale und distale Frontzahnkontaktpunkte, jeweils 64 mesiale und distale Prämolarenkontaktpunkte und 64 mesiale bzw. 32 distale Molarenkontaktpunkte untersucht. Im Oberkiefer wurden die mesialen Kontaktpunkte zu 60,4 % (n=29) an den Frontzähnen (FZ), zu 50 % (n=16) an den Prämolaren (PM) und 46,9 % (n=15) an den Molaren (M) in mesiodistaler Richtung übereinstimmend zwischen Originalzahn und *SureSmile*®-Zahn modelliert. Im Unterkiefer wurden 70,8 % (n=34) der Kontaktpunkte der Frontzähne, 53,1 % (n=17) der Prämolaren und 65,6 % (n=21) Kontaktpunkte der Molaren der *SureSmile*®-Zähne übereinstimmend mit den Kontaktpunkten der Originalzähne modelliert. Die distalen Kontaktpunkte im Oberkiefer wurden von *SureSmile*® an den Frontzähnen zu 64,6 % (n=31), an den Prämolaren zu 56,3 % (n=18) und an den Molaren zu 37,5 % (n=6) in mesiodistaler Richtung übereinstimmend mit den Originalzähnen modelliert. Im Unterkiefer stimmten die modellierten Kontaktpunkte von *SureSmile*® an den Frontzähnen zu 56,3 % (27), an den Prämolaren zu 59,4 % (n=19) und an Molaren zu 75 % (n=12) in mesiodistaler Richtung mit den Kontaktpunkten der Originalzähne überein (Tab. 8).

Kontaktpunktlage	Kiefer	Kontaktpunkt Abstand auf X-Achse (mesiodistale Richtung)	Anzahl der Kontaktpunkte	FZ	PM	M	Gesamt
mesial	OK	0 ≤ 0,1 mm (≈ übereinstimmender Kontaktpunkt)	<i>Absolut (n)</i>	29	16	15	60
			<i>Relativ (%)</i>	60,4	50	46,9	53,6
		> 0,1 mm (≈ nicht übereinstimmender Kontaktpunkt)	<i>Absolut (n)</i>	19	16	17	52
			<i>Relativ (%)</i>	39,6	50	53,1	46,4
		Gesamt	<i>Absolut (n)</i>	48	32	32	112
			<i>Relativ (%)</i>	100	100	100	100
	UK	0 ≤ 0,1 mm (≈ übereinstimmender Kontaktpunkt)	<i>Absolut (n)</i>	34	17	21	72
			<i>Relativ (%)</i>	70,8	53,1	65,6	64,3
		> 0,1 mm (≈ nicht übereinstimmender Kontaktpunkt)	<i>Absolut (n)</i>	14	15	11	40
			<i>Relativ (%)</i>	29,2	46,9	34,4	35,7
		Gesamt	<i>Absolut (n)</i>	48	32	32	112
			<i>Relativ (%)</i>	100	100	100	100
distal	OK	0 ≤ 0,1 mm (≈ übereinstimmender Kontaktpunkt)	<i>Absolut (n)</i>	31	18	6	55
			<i>Relativ (%)</i>	64,6	56,3	37,5	57,3
		> 0,1 mm (≈ nicht übereinstimmender Kontaktpunkt)	<i>Absolut (n)</i>	17	14	10	41
			<i>Relativ (%)</i>	35,4	43,8	62,5	42,7
		Gesamt	<i>Absolut (n)</i>	48	32	16	96
			<i>Relativ (%)</i>	100	100	100	100
	UK	0 ≤ 0,1 mm (≈ übereinstimmender Kontaktpunkt)	<i>Absolut (n)</i>	27	19	12	58
			<i>Relativ (%)</i>	56,3	59,4	75	60,4
		> 0,1 mm (≈ nicht übereinstimmender Kontaktpunkt)	<i>Absolut (n)</i>	21	13	4	38
			<i>Relativ (%)</i>	43,8	40,6	25	39,6
		Gesamt	<i>Absolut (n)</i>	48	32	16	96
			<i>Relativ (%)</i>	100	100	100	100

Tab. 8: Häufigkeit der übereinstimmenden und nicht übereinstimmenden mesialen bzw. distalen Kontaktpunkte von *SureSmile*®- und Originalzähnen im Ober- bzw. Unterkiefer bezogen auf die Zahngruppen FZ, PM, M.

Im Chi-Quadrat-Test ergab sich bei dem Vergleich der mesialen Kontaktpunkte zwischen den einzelnen Zahngruppen für den Oberkiefer ein p-Wert von 0,500 und für den Unterkiefer ein p-Wert von 0,273. Beim Vergleich der distalen Kontaktpunkte zwischen den einzelnen Zahngruppen ergab sich für den Oberkiefer ein p-Wert von 0,172 und für den Unterkiefer ein p-Wert von 0,393.

4.4.6 Binäre logistische Regression

Mittels des multivariaten Untersuchungsverfahrens der binären logistischen Regression wurden gleichzeitig die zwei Einflussgrößen Lage (OK/UK) und Zahngruppe (FZ/PM/M) auf die Häufigkeit der Übereinstimmung der Kontaktpunkte von *SureSmile*®- und Originalzähnen geprüft. Hierbei wurden die mesialen Kontaktpunkte gesondert von den distalen Kontaktpunkten untersucht.

Bei den mesialen Kontaktpunkten konnte sowohl für die Lage in Ober- oder Unterkiefer ($p=0,101$) als auch für die Zahngruppen ($p=0,181$) kein signifikanter Einfluss auf die Häufigkeit der Übereinstimmung der Kontaktpunkte von *SureSmile*®- und Originalzähnen nachgewiesen werden. Ebenso wenig konnte dieser bei den distalen Kontaktpunkten nachgewiesen werden (OK/UK: $p=0,660$ und Zahngruppe: $p=0,898$).

5 Diskussion

Im Rahmen der kieferorthopädischen Behandlungsplanung mit dem *SureSmile®-System* werden segmentierte Kiefermodelle erstellt, um mit Hilfe eines Setups das Behandlungsziel visualisieren zu können. Die Segmentierung eines Kiefermodells am klassischen Gipskiefermodell bedeutet das Heraustrennen eines jeden Einzelzahnes mit Hilfe des Sägeschnitts und die anschließende Neugruppierung der Zähne im Sinne des Behandlungszieles.

Bei diesem Verfahren können allein aufgrund der Dicke des Sägeblattes wertvolle Kontaktinformationen zwischen den Zähnen zerstört werden. Mit Hilfe von optischen Scanverfahren direkt am Patienten und der virtuellen Erstellung von Kiefermodellen kann die kieferorthopädische Analyse und Planung am Computer durchgeführt werden. Analog zu den Sägeschnittmodellen muss auch am Computer jeder einzelne Zahn im Sinne einer virtuellen Segmentierung aus dem Zahnbogen herausgelöst werden, damit eine Neuordnung der Zähne möglich ist. Hierbei ergibt sich das Problem, dass für zwei in Kontakt stehende Nachbarzähne die anatomischen Daten für die approximalen Kontaktflächen vom Scanner nicht erfasst werden können, da sie jeweils vom Nachbarzahn optisch verdeckt werden.

Die kieferorthopädische Software *SureSmile®* rekonstruiert diese fehlenden Informationen der nicht scanbaren Approximalflächen. Die Untersuchung der Genauigkeit dieser Rekonstruktion war das Ziel der vorliegenden Arbeit. Hierzu wurden insgesamt 224 extrahierte Zähne zu 8 Oberkiefer- und 8 Unterkieferzahnbogenmodellen mit jeweils 14 Zähnen zusammengestellt. Diese 16 Zahnbogenmodelle wurden abgescannt und im Anschluss jeder einzelne Zahn entnommen und nochmals einzeln gescannt.

Durch diesen Einzelzahns캔 war ein direkter Vergleich zwischen den von *SureSmile®* modellierten und den tatsächlichen approximalen Zahnflächen der Originalzähne möglich.

5.1 Herstellung der Zahnbogenmodelle

Die Zahnbogenmodelle wurden mittels extrahierter Zähne hergestellt. Diese stammten aus dem Fundus des Centrums für Zahn- Mund- und Kieferheilkunde, Charité-Universitätsmedizin, Berlin. Der genaue Ursprung der einzelnen Zähne ist nicht nachvollziehbar. Es kann davon ausgegangen werden, dass jeder Zahn in den zusammengestellten Modellen von einem anderen Menschen stammt. Die Bedingung bei der Zahnauswahl war eine Abwesenheit von Pathologie und zahnärztlicher Restauration. Kunststoffzähne kamen nicht zur Anwendung, um die Untersuchungen anhand von

natürlichen Zahnformen durchzuführen und nicht anhand von idealisierten, konfektionierten Zahnformen, wie sie bei industriell hergestellten Prothesenzähnen aus Kunststoff vorliegen.

Durch die Kombination von natürlichen Zähnen unterschiedlicher Herkunft in einem Zahnbogenmodell ergab sich eine große Variabilität an anatomischen Ausprägungsmerkmalen wie Fissuren- und Höckerverlauf, die sich normalerweise innerhalb eines Kiefers individuumspezifisch wiederholen [97-101]. Allerdings wurden anhand grober Einteilungsmerkmale wie Form, Abrasionsgrad und Größe möglichst zueinander passende Zähne in einem Zahnbogenmodell kombiniert. Somit entstanden im Gegensatz zu einem realen Patientenkiefer jeweils Ober- und Unterkieferzahnbogenmodelle, die aufgrund der anatomischen Variabilität der Einzelzähne vereinzelt Abweichungen in der Lage der Approximalkontakte bezogen auf die inzisal-apikale und orovestibuläre Richtung aufwiesen. Dies konnte jedoch vernachlässigt werden, da für die Beurteilung eines approximalen Zahnkontaktes im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen nur die mesiodistale Ausdehnung von Bedeutung war.

Die Datensätze der gescannten Zahnbogenmodelle wurden zur Firma OraMetrix® übermittelt, die nicht davon in Kenntnis gesetzt worden war, dass es sich bei den Scans um Studienmodelle handelte. Somit sollte sichergestellt werden, dass die Weiterbearbeitung der Zahnbogenscans wie bei realen Patientenfällen erfolgt. Hierzu wurde eine Gingiva inklusive Interdentalpapillen naturgetreu aus Wachs modelliert. Die Anwendung eines solchen Modellierwachses war auch notwendig, weil die Zähne nach dem Kieferbogenscan aus diesem entfernt werden mussten und nochmals einzeln per Hand gescannt wurden. Somit mussten die Zähne leicht aus dem Fixiermedium entnehmbar sein. Wachs bietet den Vorteil, dass während der elastischen Phase die einzelnen Zähne bei der Zahnbogenaufstellung geringfügig individuell beweglich bleiben, so dass Fehlstellungen ähnlich eines realen Patientenfalls modelliert werden können. Nach Erkalung des Materials war eine Fixierung der Zähne gewährleistet. Wachs bot somit die besten Voraussetzungen für das Trägermaterial des zu modellierenden Zahnbogens. Es ist präzise zu positionieren, modellieren und individuell auszuformen und zu polieren [102]. Zur Erstellung der Kiefermodelle wurde ein rosa Plattenwachs (Modellierwachs: Typ extrahart super, 500 g, Morsa Wachswarenfabrik, Krumbach, D) verwendet, da dieses Wachs den gewünschten Anforderungen entsprach und kostengünstig zur Verfügung stand. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass Temperaturschwankungen und unsachgemäße Handhabung der modellierten Kiefermodelle, wie beispielsweise das Berühren der Zähne, die Gefahr von Verformungen birgt. Deswegen wurde jedes Zahnbogenmodell nach seiner Fertigstellung gescannt, um

Formveränderungen durch mechanische oder thermische Einwirkungen bei längerer Lagerung auszuschließen.

5.2 Scanverfahren

An der Wurzeloberfläche jedes Zahnes wurde ein Hölzchen als Haltevorrichtung befestigt, so dass der Zahn gleichzeitig gehalten, ohne Berührung der Zahnoberfläche mit Titandioxid eingesprüht und im Anschluss gescannt werden konnte. Der Positionierung des Hölzchens am Zahn kam eine wesentliche Bedeutung zu: Dort, wo das Hölzchen am Zahn befestigt war, konnten beim Scanvorgang keine Daten der Zahnoberfläche erfasst werden. Deshalb war darauf zu achten, dass die Lokalisierung dieser Klebestelle deutlich unterhalb der Zahnkrone in Richtung apikalem Wurzeldrittel erfolgte. Nur so konnte gewährleistet werden, dass der für die Untersuchung relevante Bereich der Zahnkrone im Scan einwandfrei abgebildet wurde. Eine Vereinfachung des Einzelzahn-Scanverfahrens könnte für zukünftige Studien durch die Befestigung des jeweiligen Zahnes auf einem Drehtisch erreicht werden, so dass der Zahn mit seiner Längsachse senkrecht auf dem Drehtisch fixiert ist. Dies ergäbe eine insgesamt einfachere Handhabung und einen deutlichen Zeitgewinn beim Einzelzahnsan von insgesamt 224 Zähnen.

Für jeden Zahnsan ist eine Oberflächenmattierung mittels Titandioxid notwendig, damit Reflexionsartefakte verhindert werden. In der vorliegenden Untersuchung wurde ein von der Firma OraMetrix® empfohlenes Titandioxidspray (Arti-Spray®, BK-285, weiß, 75 ml, Bausch, Köln, D) verwendet. Die gleichmäßige und dünne Applikation dieses Sprays auf der Zahnoberfläche hat entscheidenden Einfluss auf die korrekte Wiedergabe der Zahnanatomie in dem Scanverfahren [2, 103, 104]. Dies kommt insbesondere zum Tragen an Ecken und Inzisalkanten von Zähnen, so dass hier Methodenfehler von 20 bis 40 µm entstehen können [105, 106]. Jeder Zahn muss über alle Flächen gleichmäßig und in der gleichen Schichtstärke besprüht werden. Das gleichmäßige Auftragen bedarf einiger Erfahrung. Appliziert man eine zu große Menge auf eine Stelle, besteht die Gefahr der „Haufenbildung“ und die Schicht ist in diesem Bereich dicker als in der umliegenden Nachbarregion (Abb. 33).

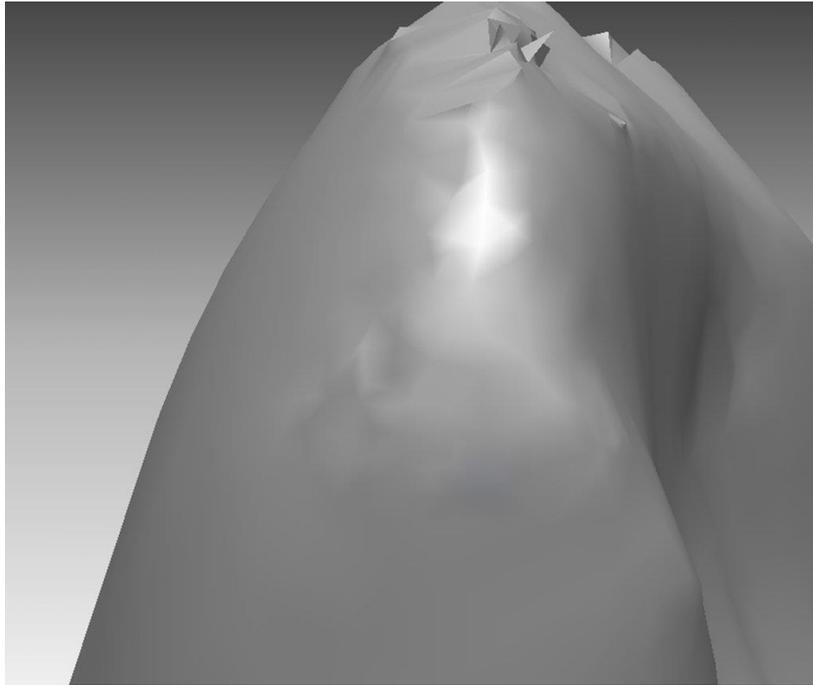


Abb. 33: Inzisal ungleichmäßig applizierte Titandioxidschicht („Haufenbildung“), die im Scan zu einer verfälschten Oberflächenform führt.

Besonders bei den Approximalfächern der Unterkieferfrontzähne besteht die Gefahr, dass solche Ungleichmäßigkeiten der Titandioxidverteilung auftreten, da die Kontaktregion dieser Zähne nahe der Inzisalkante liegt. Besondere Sorgfalt bei der Titandioxid-Applikation ist auch im Zahnzwischenraumbereich bei reduzierten Zahnfleischpapillen erforderlich: Durch die fehlende Weichgewebsbedeckung im Zahnzwischenraum besteht hier ebenso das Risiko der „Haufenbildung“ (Abb. 34). Alternativ gibt es auch emulsionsartige Lacke, die Titandioxid enthalten und mit einem speziellen Pinsel aufgetragen werden. Diese können alternativ zu den Titandioxidsprays verwendet werden. Vergleichende Anwendungstests müssen zeigen, ob sich durch die unterschiedlichen Trägersubstanzen signifikante Unterschiede in der Scangenaugigkeit der Oberflächen der behandelten Zähne ergeben.



Abb. 34: Mit Titandioxid-Pulver besprühtes Unterkieferzahnbogen-Modell. Die Approximalräume 31/32, 41/42 und 42/43 zeigen reduzierte Zahnfleischpapillen. Bei 31/32 ist der Zwischenraum nach Titandioxid-Applikation weiterhin durchgängig und somit die angrenzenden Kontaktflächen der Zähne gut für den Scanner erkennbar. In den Approximalräumen 41/42 und 42/43 führt die „Haufenbildung“ des Titandioxids zu nicht scanbaren Approximalflächen.

5.3 Scangenaugigkeit und Methodenfehler

Der *OraScanner*® hat laut Herstellerangaben eine Auflösung von 0,05 mm. In der qualitativen Kontaktpunktanalyse wurde ein approximaler Zahnkontakt als vorhanden definiert, wenn der Abstand der benachbarten Zähne kleiner oder gleich 0,1 mm betrug. In der quantitativen Kontaktpunktanalyse wurde ein Kontaktpunkt als übereinstimmend definiert, wenn die Abweichung der Lage eines Kontaktpunktes auf der X-Achse kleiner oder gleich 0,1 mm zwischen Originalzahn und *SureSmile*®-Zahn war. Mittels der Dahlberg-Formel wurde der durchschnittliche methodische Fehler für die Scangenaugigkeit an der mesialen und distalen Zahnfläche mit 0,035 mm bestimmt. Somit liegt der methodische Fehler noch unter der maximalen Auflösung des *OraScanner*®. Dies bestätigt die Zuverlässigkeit der verwendeten Messmethode.

5.4 Softwareanalyse

Das Programm *Rapidform*® ist eine Software, mit deren Hilfe sowohl die von *SureSmile*® bearbeiteten Zahnschans als auch die gescannten Originalzähne virtuell übereinander gelagert werden können, um im Anschluss Differenzen in den Zahnformen vermessen zu können. Das Programm ist von der Firma OraMetrix® unabhängig und gewährleistet so die Neutralität bei der Datenermittlung und –auswertung.

Zunächst wurden die Daten der *SureSmile*®-Zähne und der Originalzähne im Arbeitsschritt der Registrierung übereinander gelagert. Im Anschluss daran wurde für jeden Zahn ein Koordinatensystem erstellt, um Abweichungen der Zahnformen metrisch anhand dieses Koordinatensystems in den drei Raumrichtungen vermessen zu können. Die Erstellung des Koordinatensystems erfolgte manuell, das heißt die Längsachse des Zahnes bildete die Z-Achse und stößt senkrecht im Bereich der Inzisalkante bzw. Okklusalfäche auf die XY-Ebene, welche in *Rapidform*® frei drehbar war. Die freie Drehbarkeit der XY-Ebene diente dazu, die X-Achse gemäß der mesiodistalen Ausrichtung des Zahnes im Zahnbogen anzulegen. Somit entstand für jeden Zahn ein neu ausgerichtetes Koordinatensystem, anhand dessen Original- und korrespondierender *SureSmile*®-Zahn vermessen wurden (Abb. 23).

Die Vermessung der Kontaktpunkte erfolgte durch Differenzbildung der Koordinaten-Werte der *SureSmile*®- und Originalzähne. Hieraus ergab sich ein positiver Betrag, der die Basis der statistischen Auswertungen bildete. Die zahnbezogenen Koordinatensysteme in *Rapidform*® waren die Voraussetzung, dass mittels der Software die gleichen anatomischen Strecken an den unterschiedlichen Zähnen verglichen werden konnten: Das heißt, dass an jedem Zahn der Betrag der X-Wert-Differenz den Unterschied zwischen *SureSmile*®- und Originalzahn in mesiodistaler Richtung charakterisierte. Der Schritt der Festlegung der zahnbezogenen Koordinatensysteme stellt einen wesentlichen zeitintensiven Aufwand in der Bedienung der Software *Rapidform*® dar. Dies war jedoch nicht anders möglich, da das Programm nicht in der Lage ist, die mesiodistale Ausrichtung der einzelnen Zähne im Zahnbogen selbstständig zu erkennen. Wäre dies gegeben, so könnte das Programm nur anhand eines globalen Koordinatensystems jede beliebige Streckendifferenz (und somit auch die wichtige mesiodistale Ausdehnung) mittels vektorieller Berechnung im dreidimensionalen Raum kalkulieren. In dem vorhandenen Entwicklungsstadium der Software können die mesiodistalen Betragsdifferenzen nur zwischen den verschiedenen Zahngruppen verglichen werden, wenn gilt, dass die individuell ausgerichtete X-Achse an jedem Zahn parallel zu der mesiodistalen Ausrichtung des Zahnes ist.

Eine weitere Einschränkung der Software *Rapidform*® bestand darin, dass es keine visuelle Kontrolle der Kontaktpunkte ermöglichte. Um die bei der qualitativen Zahnkontaktanalyse rechnerisch ermittelten Werte auch visuell überprüfen zu können, wurde ein zweites Computerprogramm hinzugezogen: *GeoAnalyzer*®. Zwei benachbarte Zähne können im Programm *GeoAnalyzer*® beliebig vergrößert werden, um auch kleinste Abstände zwischen benachbarten Zähnen darstellen zu können. Hierzu wurde von apikal nach inzisal der Zahn mit Hilfe der Clipping-Plane quer durchfahren, sodass man Einsicht in den Zahn von apikal in Richtung Inzisalkante erhielt. Lag nun im Approximalbereich ein Kontakt zum Nachbarzahn vor, so markierte die Software diesen Berührungsbereich in einer Kontrastfarbe. Dies ermöglichte eine zusätzliche Kontrolle der Ergebnisse bezüglich der Untersuchung auf das Vorhandensein von Kontakten. Das Programm *GeoAnalyzer*® stammt aus dem Hause OraMetrix® und erfüllt deswegen nicht das Kriterium einer firmenunabhängigen Analysesoftware. Allerdings besitzt *GeoAnalyzer*® alle Funktionen, die auch *Rapidform*® zur metrischen Vermessung bei der quantitativen Kontaktpunktanalyse anwendet und darüber hinaus die visuelle Kontrollmöglichkeit mittels Clipping-Plane, die bei der qualitativen Zahnkontaktanalyse angewendet wurde.

5.5 Qualitative Zahnkontaktanalyse

Die qualitative Zahnkontaktanalyse ergab, dass in Summe nur 57,7 % (n=120) der Zahnkontakte beim Vergleich von Originalzähnen mit *SureSmile*®-Zähnen übereinstimmten. Hiervon entfielen 48,6 % (n=101) auf die Gruppe 11 (*SureSmile*®- und Originalzähne haben Kontakt) und 9,1 % (n=19) auf die Gruppe 00 (*SureSmile*®- und Originalzähne haben keinen Kontakt). Als Maß der Übereinstimmung der qualitativen Zahnkontaktanalyse ergab sich ein Kappa von 0,044. Somit liegt eine schlechte Übereinstimmung zwischen *SureSmile*®- und Originalzahnkontakten vor. Der durchgeführte McNemar-Test ergab beim Vergleich der Gruppe 01 (*SureSmile*®-Zähne ohne Kontakt und Originalzähne mit Kontakt) und der Gruppe 10 (*SureSmile*®-Zähne mit Kontakt und Originalzähne ohne Kontakt) einen p-Wert <0,001. Somit modelliert die *SureSmile*®-Software signifikant mehr falsch-positive Kontakte, als dass sie vorhandene Originalzahnkontakte fälschlicherweise nicht modelliert. Dieses galt auch bei getrennter Betrachtung von Ober- und Unterkiefer.

11,1 % (n=23) der Zahnkontakte (Gruppe 01) wurden an den Originalzähnen durch die Beurteilung mittels der Analysesoftware *GeoAnalyzer*® als vorhanden eingestuft, jedoch nicht an den *SureSmile*®-Zähnen modelliert. Im Gegensatz dazu wurde in 31,2 % (n=65) an den *SureSmile*®-Zähnen ein Kontakt modelliert, obwohl an den Originalzähnen kein Kontakt vorhanden war (Gruppe 10). In Summe (Gruppe 01 und 10) werden demnach in 42,3 % der

Fälle die approximalen Zahnkontakte nicht entsprechend der Originalzahnsituation modelliert. Dies deutet insbesondere darauf hin, dass die Informationen aus dem *SureSmile*®-Datenerfassungsbogen (Abb. 4) nur unzureichend in die Software-Modellierung einbezogen wurden. Der geringe Grad der Übereinstimmung zwischen Originalzähnen und *SureSmile*®-Zähnen in der qualitativen Zahnkontaktanalyse ist somit auch einem firmeninternen Bearbeitungsfehler anzulasten, indem offensichtlich die klinischen Kontaktpunktinformationen keine oder nur unzureichende Berücksichtigung bei der Datenverarbeitung fanden. Diese mangelhafte Berücksichtigung der klinisch erhobenen Befunde kann letztendlich dazu führen, dass therapeutische Maßnahmen im Sinne einer approximalen Schmelzreduktion zu häufig durch die Software empfohlen werden, ohne dass der klinische Bedarf dafür gegeben ist. In 31,2 % modellierte die *SureSmile*®-Software approximale Zahnkontakte, die klinisch nicht vorhanden waren. In diesen Fällen fehlt der Software für die Therapieplanung also ein approximaler Abstand, der zwar klinisch vorhanden und auch dokumentiert war, jedoch fälschlicherweise nicht berücksichtigt wurde. Empfiehlt die Software in diesen Kontaktpunktbereichen eine approximale Schmelzreduktion (Abb. 35 und Anhang VI: Setup-Erstellung mit *SureSmile*® an einem Unterkieferzahnmodell, 12.6), so würde es zu einem klinisch unnötigen Zahnhartsubstanzabtrag kommen. Eine Weiterentwicklung der *SureSmile*®-Software (aktueller Stand März 2012) soll dieses Problem verhindern, indem die klinische Beurteilung der approximalen Zahnkontakte durch die röntgenologische dreidimensionale Darstellung der Zähne mittels DVT bzw. 3D Cone Beam CT ergänzt wird. Die röntgenologischen 3D-Daten liegen der Firma OraMetric® bei der Modellierung der Zahnschans vor und somit kann in fraglichen Situationen auf die bildgebende 3D-Diagnostik zurückgegriffen werden.

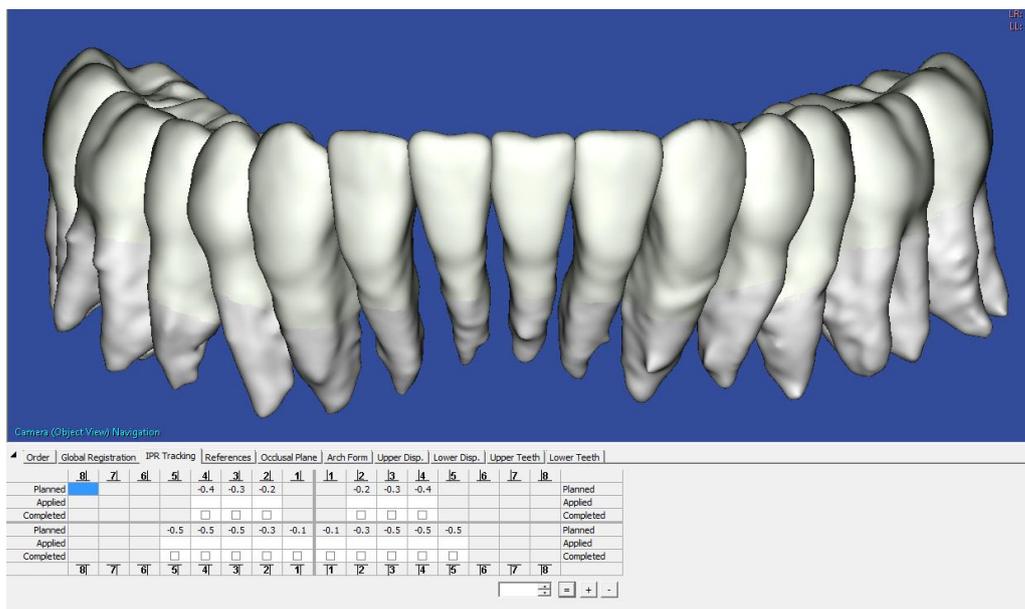


Abb. 35: Von der *SureSmile*®-Software erstelltes Setup mit Angaben zur approximalen Schmelzreduktion im abgebildeten Unterkiefer. Empfohlene Reduktion pro Zahn: 0,1 mm für die Zähne 41 und 31 sowie 0,3 mm für die Zähne 32 und 42 und 0,5 mm für Zähne 33, 34, 35, 43, 44, 45.

5.6 Quantitative Kontaktpunktanalyse

Die quantitative Kontaktpunktanalyse erfolgte, indem für jeden Zahn ein individuelles Koordinatensystem erstellt wurde und für alle drei Raumrichtungen die Werte der Kontaktpunkt-Koordinaten von Originalzähnen und *SureSmile*®-Zähnen voneinander subtrahiert und die hieraus resultierenden Differenzen als positive Beträge verglichen wurden. Durch diese zahnspezifischen Koordinatensysteme konnte auf eine Vektorrechnung zur Bestimmung der Kontaktpunktdifferenzen verzichtet werden. Dies bedeutete allerdings auch einen entscheidenden Mehraufwand, ist derzeit aber nicht anders lösbar, da die Analyse-Software (sowohl *Rapidform*® als auch *GeoAnalyzer*®) eine Berechnung mit Hilfe eines globalen Koordinatensystems nicht vorsieht. Entscheidend für das Zustandekommen von approximalen Kontaktpunkten zwischen zwei benachbarten Zähnen ist die mesiodistale Ausdehnung der Zähne. Aus diesem Grund wurden zwar alle drei Werte zur Kontaktpunktanalyse für die drei Raumrichtungen bestimmt und es zeigten sich bei den X-Werten in der beschreibenden Statistik die geringsten durchschnittlichen Abweichungen (Tab. 4) der Kontaktpunktage zwischen Original- und *SureSmile*®-Zähnen und die geringste Streuung der Werte (Abb. 32), aber nur die mesiodistalen Differenzen (= X-Werte) zur Kontaktpunktbeurteilung wurden ausgewertet. Hierbei zeigte sich, dass die Oberkiefer-Molaren die Zähne sind, die die größten Abweichungen in der Lage der Kontaktpunkte zwischen Original- und *SureSmile*®-Zähnen aufweisen (Tab. 5). Dies kann begründet sein in der großen Formvariabilität der Oberkiefer-Molaren mit trapezförmiger bis dreieckiger Kronenform [100, 107, 108] (Abb. 36). Untere Molaren und Frontzähne wiederum sind dagegen in der Form eher symmetrisch, so dass die Abweichungen der Kontaktpunkte von Original- und *SureSmile*®-Zähnen geringer ausfallen (Tab. 5). Ursache hierfür sind die in der *SureSmile*®-Software verwendeten Templates, die nur zwei Auswahlmöglichkeiten bei der Kontaktpunktreakonstruktion bieten. Je unsymmetrischer eine Zahnform ist, desto unwahrscheinlicher werden individuelle Ausprägungen durch diese eingeschränkte Template-Auswahl wiedergegeben. Durch eine Erweiterung der Template-Bibliothek könnte wahrscheinlich eine bessere Individualisierung der softwaregestützten Zahnmodellierung erreicht werden. Bei dem prothetischen CAD/CAM-System Cerec® 3D wurde so durch eine Erweiterung der Template-Datenbank die okklusale Kauflächengestaltung und die Zahnmodellierung optimiert [109].

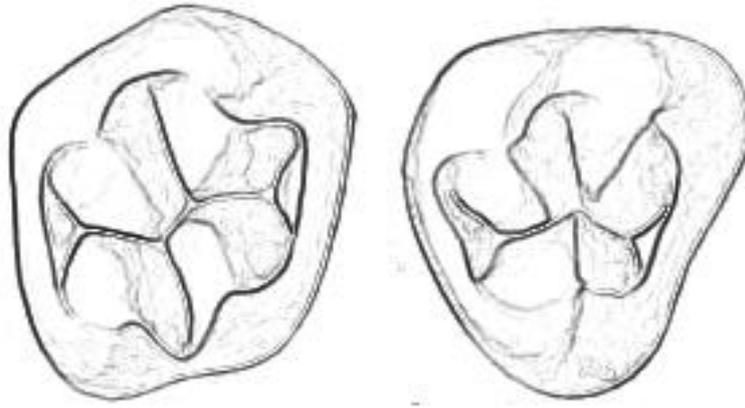


Abb. 36: Formvariabilität der OK-Molaren mit trapezförmiger bis dreieckiger Kronenform

Um die klinische Relevanz bei der Kontaktpunktanalyse zu berücksichtigen, wurden alle Differenzbeträge zwischen Original- und *SureSmile*®-Zähnen, die kleiner oder gleich 0,1 mm waren als übereinstimmende Kontaktpunkte interpretiert. Alle Werte, die darüber lagen, wurden als nicht übereinstimmende Kontaktpunkte eingestuft. Legt man diese Toleranz-Grenze zugrunde, so wurden 58,9 % (n=245) von insgesamt 416 untersuchten Kontaktpunkten an *SureSmile*®-Zähnen übereinstimmend mit den Originalzähnen erstellt.

Mittels univariater bzw. multivariater statistischer Verfahren konnten Aussagen zur Abhängigkeit der Kontaktpunktabweichung zwischen Original- und *SureSmile*®-Zähnen hinsichtlich der Einflussfaktoren wie Lage (Ober-/Unterkiefer) und Region (Frontzahn/Prämolar/Molar) getroffen werden. Dies geschah für jeden Zahn nach mesialen und distalen Kontaktpunkten getrennt.

In der univariaten Analyse bezüglich der Lage (Oberkiefer versus Unterkiefer) zeigte sich, dass die Kontaktpunkte der Original- und *SureSmile*®-Zähne im Unterkiefer sowohl mesial als auch distal häufiger übereinstimmten als im Oberkiefer. Die Unterschiede waren jedoch nicht signifikant ($p=0,103$ für mesial und $p=0,660$ für distal). Somit kann ausgeschlossen werden, dass weder die manuelle Führung des *OraScanners*® beim Scanvorgang noch die softwarebasierte Modellierung der Kontaktpunkte eine Lage-Abhängigkeit bezüglich Ober- oder Unterkiefer aufweist und dies die Genauigkeit beeinflusst.

In der univariaten Analyse bezüglich der Region (Frontzähne/Prämolaren/Molaren) zeigte sich, dass im Oberkiefer die größte Häufigkeit der Übereinstimmung der Kontaktpunkte von Original- und *SureSmile*®-Zähnen bei den Frontzähnen bestand. Dies galt sowohl für die mesialen als auch die distalen Kontaktpunkte. Die geringste Häufigkeit der Übereinstimmung lag bei den mesialen und distalen Kontaktpunkten der Molaren vor. Im Unterkiefer bestand bezogen auf die mesialen Kontaktpunkte die größte Häufigkeit der Übereinstimmung an den Frontzähnen und die geringste Übereinstimmung an den Prämolaren. Im Hinblick auf die

distalen Kontaktpunkte zeigte sich die größte Übereinstimmung an den Molaren und die geringste Übereinstimmung an den Frontzähnen. Es konnten allerdings weder mesial noch distal signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Zahngruppen im Ober- bzw. Unterkiefer bezüglich der Häufigkeit der übereinstimmenden Kontaktpunkte von *SureSmile*®- und Originalzähnen festgestellt werden. Daraus ergibt sich, dass in keiner der drei Zahngruppen die mesialen oder distalen Kontaktpunkte weder im Ober- noch im Unterkiefer im Rahmen des Scanverfahrens oder bei der Softwaremodellierung benachteiligt sind. Hieraus folgt, dass bei der klinischen Anwendung des *OraScanners*® darauf geachtet wird, dass die Kamera ausreichend in alle Approximalräume eingeschwenkt wird, damit schwer zugängliche Bereiche möglichst vollständig abgebildet werden können, denn es ist unerheblich, um welchen Zahnzwischenraum es sich handelt, da keine signifikanten Unterschiede zwischen den Zahngruppen pro Kiefer nachweisbar waren.

Bei der multivariaten Analyse wurden die gleichzeitigen Einflussfaktoren Lage und Region so kombiniert, dass Oberkiefer-Zahngruppen mit den korrespondierenden Unterkiefer-Zahngruppen verglichen werden konnten. Hierdurch wurde es möglich, auf signifikante Unterschiede hinsichtlich der Häufigkeit der Übereinstimmung der Kontaktpunkte von Original- und *SureSmile*®-Zähnen kieferübergreifend zu testen. Weder an den mesialen noch an den distalen Kontaktpunkten konnten signifikante Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Zahngruppen im Oberkiefer einerseits und den korrespondierenden Zahngruppen im Unterkiefer andererseits ermittelt werden. Das bedeutet, dass weder die Lage noch die Region einen signifikanten Einfluss auf die Genauigkeit der Rekonstruktion der approximalen Bereiche durch die Software *SureSmile*® hat.

6 Beantwortung der Fragestellungen

Die *SureSmile*®-Software dient dazu, den optischen Scan eines bezahnten Kiefers in ein virtuelles 3D-Modell zu überführen, anhand dessen eine genaue Modellanalyse, Planung und kieferorthopädische Behandlung durchgeführt wird. Beim Scanverfahren ist in den engen Kontaktbereichen der Zähne die exakte Erfassung der approximalen Zahnoberflächen nur eingeschränkt möglich. Daher werden diese optischen Datenlücken an den 3D-Modellen mit Hilfe der softwaregestützten Überlagerung mit idealisierten Zahnformen (Templates) ergänzt und modelliert. Dies geschieht durch die Verarbeitung von klinischen Unterlagen und Scandaten, die bei der Firma OraMetric® mit Hilfe der *SureSmile*®-Software bearbeitet werden. Die Analyse dieser approximalen Modellierung der Zahnoberflächen war das Ziel der vorliegenden Arbeit. Die in der Einleitung formulierten Fragestellungen können nun wie folgt beantwortet werden:

1. *Erkennt die SureSmile®-Software die approximalen Kontakte anhand des Kieferscans und erstellt diese im digitalen Modell übereinstimmend mit den approximalen Kontakten im Originalzahnmodell?*

Die *SureSmile*®-Software hat in 57,7 % vorhandene Zahnkontakte und nicht vorhandene Zahnkontakte übereinstimmend mit der Ausgangssituation der Originalzähne erkannt. Dies deutet in der Kappa-Analyse auf eine schlechte Übereinstimmung hin. Es wurden signifikant mehr falsch-positive Kontakte durch die *SureSmile*®-Bearbeitung erstellt als dass vorhandene Originalzahnkontakte fälschlicherweise nicht modelliert wurden. Das heißt, das *SureSmile*®-Verfahren neigt zu einer Übermodellierung approximaler Kontakte. Außerdem deutet das Ergebnis darauf hin, dass die klinischen Befunde zur Beurteilung der approximalen Kontakte, die in der *SureSmile*®-Software in dem integrierten Datenerfassungsbogen gesammelt werden, nur unzureichend in die Datenverarbeitung bei der Firma OraMetric® mit einbezogen wurden.

2. *Wie groß ist das Ausmaß der Abweichung und die Häufigkeit der Übereinstimmung der Kontaktpunkte von Originalzähnen und SureSmile®-Zähnen in mesiodistaler Richtung?*

Das Ausmaß der mesiodistalen Abweichung der 416 analysierten Kontaktpunkte (in acht Ober- und acht Unterkiefermodellen) von Original- und *SureSmile*®-Zähnen beträgt im

Mittelwert 0,099 mm mit einer Standardabweichung von 0,080 mm und einem Maximum von 0,563 mm. 58,9 % der Kontaktpunkte wurden an *SureSmile*®-Zähnen übereinstimmend mit den Originalzähnen erstellt. Bei 41,1 % der modellierten *SureSmile*®-Kontaktpunkte war die Abweichung von den Originalkontaktpunkten größer als 0,1 mm.

- 3. Gibt es bei der softwarebasierten Kontaktpunkt-Modellierung einen Einfluss auf die Genauigkeit abhängig von der Region und damit der Zahnform der Frontzähne, Prämolaren und Molaren oder bezüglich der Lage im Oberkiefer oder Unterkiefer?*

Die univariate Analyse der Häufigkeit der Übereinstimmung der Kontaktpunkte von Original- und *SureSmile*®-Zähnen ergab sowohl hinsichtlich der Lage der Zähne (im Ober- oder Unterkiefer) als auch der Region (Frontzahn, Prämolare, Molar) keine signifikanten Unterschiede. Die multivariate Analyse untersuchte den gleichzeitigen Einfluss von Lage und Region und erbrachte ebensowenig signifikante Unterschiede in der Häufigkeit der Übereinstimmung der Kontaktpunkte von *SureSmile*®- und Originalzähnen.

7 Zusammenfassung

Das *SureSmile*®-System der Firma OraMetrix® (Richardson, Texas, USA) ist ein kieferorthopädisches Behandlungssystem, das zur Erstellung des Setups digitale Kiefermodelle verwendet, die mittels eines intraoralen Scanners (*OraScanner*®) von der Patientensituation angefertigt wurden. Der Bereich der approximalen Zahnkontakte kann dabei vom Scanner optisch nicht erfasst werden und wird von der *SureSmile*®-Software mit Hilfe idealisierter Zahnformen virtuell modelliert werden (=“*SureSmile*®-Zähne“). Die Untersuchung der Genauigkeit dieser softwarebasierten Modellierung sowie die Abhängigkeit von der Lokalisation des Zahnes war Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Hierzu wurden jeweils acht Ober- und Unterkiefer-Modelle aus extrahierten Zähnen mit dem *OraScanner*® optisch erfasst. Zusätzlich wurden die aus den Modellen entnommenen Einzelzähne gescannt (=“Originalzähne“). Unter Zuhilfenahme der Reverse-Engineering-Software-Pakete *Rapidform*® und *GeoAnalyzer*® wurden die Originalzähne im Bereich der Approximalflächen mit den *SureSmile*®-Zähnen verglichen.

Es zeigte sich, dass nur 57,7 % der vorhandenen und nicht vorhandenen Approximalkontakte zwischen Original- und *SureSmile*®-Zähnen übereinstimmten (Kappa=0,044). Dabei modellierte die *SureSmile*®-Software signifikant mehr falsch-positive Kontakte als dass sie vorhandene Originalzahnkontakte fälschlicherweise nicht modellierte ($p < 0,001$).

Das Ausmaß der mesiodistalen Abweichung von insgesamt 416 analysierten Kontaktpunkten von Original- und *SureSmile*®-Zähnen betrug im Mittelwert 0,099 mm mit einer Standardabweichung von 0,080 mm und einem Maximum von 0,563 mm.

Um die klinische Relevanz bei der Kontaktpunktanalyse zu berücksichtigen, wurden alle Differenzbeträge zwischen Original- und *SureSmile*®-Zähnen, die kleiner oder gleich 0,1 mm waren, als übereinstimmende Kontaktpunkte interpretiert.

Legt man diese Toleranz-Grenze zugrunde, so wurden 58,9 % der Kontaktpunkte an *SureSmile*®-Zähnen übereinstimmend mit den Originalzähnen erstellt. Die univariate Analyse der Häufigkeit der Übereinstimmung der Kontaktpunkte von Original- und *SureSmile*®-Zähnen ergab sowohl hinsichtlich der Lage der Zähne (im Ober- oder Unterkiefer) als auch der Region (Frontzahn, Prämolare, Molare) keine signifikanten Unterschiede. Die multivariate Analyse hinsichtlich eines gleichzeitigen Einflusses von Lage und Region erbrachte ebensowenig signifikante Unterschiede in der Häufigkeit der Übereinstimmung der Kontaktpunkte.

8 Summary

The *SureSmile*[®]-system (Orametrix[®], Richardson, Texas, USA) is an orthodontic treatment software. It uses virtual jaw models generated by intraoral scans (*OraScanner*[®]) of the patients situation for the orthodontic setup. The intraoral scans miss the surfaces of approximal tooth contacts due to optical limitations. These approximal surfaces are virtually reconstructed by the *SureSmile*[®]-software using idealized tooth templates (= *SureSmile*[®] theeth).

The aim at this study was to evaluate the software-based reconstruction of the approximal situation regarding accuracy and dependence on tooth position.

Eight upper and eight lower jaw models composed from extracted teeth were scanned with the *OraScanner*[®]. Furthermore all teeth were scanned separately (= original teeth) to compare the approximal surfaces of the original teeth with the *SureSmile*[®] teeth using the reverse engineering software *Rapidform*[®] and *GeoAnalyzer*[®].

In only 57.7 % the approximal contact points of the *SureSmile*[®] teeth matched the contact points of the original teeth ($\kappa=0.044$). The *SureSmile*[®] software significantly reconstructed more contact points between teeth of existing original teeth contacts ($p<0,001$).

416 approximal contact points were analyzed. The arithmetic mean of mesiodistal deviation of contact points of original teeth and *SureSmile*[®] teeth was 0.099 mm with a maximum value of 0.563 mm and a standard deviation of 0.080 mm.

With regard to clinical relevance all contact point differences between original teeth and *SureSmile*[®] teeth of 0.1 mm or below were considered matching contact points. By applying this tolerance 58.9 % of the approximal contacts were correctly rebuilt by the *SureSmile*[®] software.

Applying this level of tolerance 58.9 % of the *SureSmile*[®] contact points were created identically to the original teeth. There were no significant differences neither in the univariate analysis nor in the multivariate analysis regarding to the location (upper or lower jaw) or region (anterior teeth, bicuspid, molars).

9 Literaturverzeichnis

- [1] Quaas S, Weber A, Luthardt RG. Die Anwendung dentaler CAD/CAM-Verfahren in der Praxis. ZWR. 2006;115(November):504-12.
- [2] Quaas S, Rudolph H. Dreidimensionale Analyseverfahren beim Einsatz dentaler CAD/CAM-Technologien. Digital dental news. 2008 Mai;2:6-12.
- [3] Young JM, Altshuler BR. Laser holography in dentistry. The Journal of prosthetic dentistry. 1977;38:216-25.
- [4] Liu P-R. A panorama of dental CAD/CAM restorative systems. Comp. 2005 July;26(7):507-13.
- [5] Nathaniel P. CAD/CAM dentistry. Ann R Australas Coll Dent Surg. 1996 Apr;13:99-107.
- [6] Duret F, Blouin JL, Duret B. CAD-CAM in dentistry. Journal of the American Dental Association (1939). 1988 Nov;117(6):715-20.
- [7] Duret F, Preston JD. CAD/CAM imaging in dentistry. Curr Opin Dent. 1991 Apr;1(2):150-4.
- [8] Mörmann WH. The evolution of the CEREC system. Journal of the American Dental Association (1939). 2006 Sep;137 7-13.
- [9] Rekow ED. A review of the developments in dental CAD/CAM systems. Curr Opin Dent. 1992 Jun;2:25-33.
- [10] Strietzel R, Lahl C. CAD/CAM-Systeme in Labor und Praxis. München: Neuer Merkur 2007.
- [11] Quaas S, Rudolph H. Kommunikation ist alles - Schnittstellen der CAD/CAM-Systeme. Digital Dental News. 2007;1:20-3.
- [12] Duret F. Dental CAD/CAM. Journal of the American Dental Association (1939). 1992 Jun;123(6):11-2, 4.
- [13] Rekow ED, Erdman AG, Riley DR, Klamecki B. CAD/CAM for dental restorations-some of the curious challenges. IEEE Trans Biomed Eng. 1991 Apr;38(4):314-8.
- [14] Andersson M, Carlsson L, Persson M, Bergman B. Accuracy of machine milling and spark erosion with a CAD/CAM system. The Journal of prosthetic dentistry. 1996 Aug;76(2):187-93.
- [15] Andersson M, Oden A. A new all-ceramic crown: a dense-sintered, high purity alumina coping with porcelain. Acta Odontol Scand. 1993;51:59-64.
- [16] Rekow ED. Computer-aided design and manufacturing in dentistry: a review of the state of the art. The Journal of prosthetic dentistry. 1987 Oct;58(4):512-6.
- [17] Rekow ED. Dental CAD/CAM systems: a 20-year success story. Journal of the American Dental Association (1939). 2006 Sep;137:5-6.
- [18] Heymann HO, Bayne SC, Sturdevant JR, Wilder AD, Roberson TM. The clinical performance of CAD/CAM-generated ceramic inlays. JADA. 1996 August;127:1171-81.

- [19] Miyazaki T, Hotta Y, Kunii J, Kuriyama S, Tamaki Y. A review of dental CAD/CAM: current status and future perspectives from 20 years of experience. *Dental materials journal*. 2009 Jan;28(1):44-56.
- [20] Bindl A, Mörmann WH. Marginal and internal fit of all-ceramic CAD/CAM crown-copings an chamfer preparations. *J Oral Rehab*. 2005;32:441-7.
- [21] Silli SM, Silli E. Individuelle ideale Bracketplatzierung mit Hilfe von computergestütztem virtuellen Setup und Roboter. *Inf Orthod Kieferorthop*. 2000;32(3):247-56.
- [22] Reich S, Botsis O, Deligiannis P, Mehl A. Fit of surgical guides-manufactured by InLab 3D. *International journal of computerized dentistry*. 2007 Oct;10(4):329-37.
- [23] Muratore F, Varvara G, Tripodi D, de Simone R, Pascetta C, Festa F. CEREC 3 for orthodontics: a tool for treating deep bite. *International journal of computerized dentistry*. 2002 Jan;5(1):25-31.
- [24] Otto T, De Nisco S. Eine prospektive, klinische 10-Jahresstudie von Cerec CAD/CAM-Inlays und -Onlays. *Int J Prosthodont*. 2002;15:122-8.
- [25] Reich S, Seiwert B, Wichmann M, Ziegler K, Lerch S. Kauflächengestaltung bei 3 Cerec-Software-Versionen. *ZWR*. 2004;113(10):437-44.
- [26] Mörmann WH, Schug J. Grinding precision and accuracy of fit of CEREC 2 CAD/CAM inlays. *JADA*. 1997 January;128:47-53.
- [27] Vult von Steyern P, Jonsson O, Nilner K. Five-year evaluation of posterior all-ceramic three-unit (In-Ceram). *The Journal of prosthetic dentistry*. 2001;85:544-50.
- [28] Giordano R. Materials for chairside CAD/CAM-produced restorations. *Am Dent Assoc*. 2006 September;137:14-21.
- [29] Preston JD, Duret F. CAD/CAM in dentistry. *Oral Health*. 1997 Mar;87(3):17-20, 3-4, 6-7.
- [30] Schenk O. Zahnmedizin und Informatik wachsen zusammen. *ZWR*. 2004;113(11):514-8.
- [31] Sjögren G, Bergmann M, Molin M, Bessing C. A clinical examination of ceramic (Cerec) inlays. *Acta Odontol Scand* 1992;50:171-8.
- [32] Touati B, Miara P, Nathanson D. *Esthetic dentistry and ceramic restorations*. London Martin Dunitz 1999.
- [33] Fasbinder DJ. The CEREC system: 25 years of chairside CAD/CAM dentistry. *Journal of the American Dental Association (1939)*. 2010 Jun;141(2):3-4.
- [34] Motohashi N, Kuroda T. A 3D computer-aided design system applied to diagnosis and treatment planning in orthodontics and orthognathic surgery. *Eur J Orthod*. 1999 Jun;21(3):263-74.
- [35] Okumura H, Chen LH, Yokoe Y, Tsutsumi S, Oka M. CAD/CAM fabrication of occlusal splints for orthognathic surgery. *J Clin Orthod*. 1999 Apr;33(4):231-5.
- [36] Sassani F, Elmajian A, Roberts S. Computer-assisted fabrication of orthodontic appliances: considering the possibilities. *Journal of the American Dental Association (1939)*. 1995 Sep;126(9):1296-300.

- [37] Vlaskalic V, Boyd RL, Hordt C, Miethke R-R. Die kieferorthopädische Behandlung mit dem Invisalign-System. *Kieferorthop.* 2001;15:17-24.
- [38] Miller RJ, Kuo E, Choi W. Validation of Align Technology's Treat III digital model superimposition tool and its case application. *Orthod Craniofac Res.* 2003;6(1):143-9.
- [39] Kesling HD. The philosophy of the tooth positioning appliance. *Am J Orthod Oral Surg.* 1945 June;31(6):297-304.
- [40] Ponitz RJ. Invisible retainers. *American journal of orthodontics.* 1971 Mar;59(3):266-72.
- [41] Bollen AM, Huang G, King G, Hujoel P, Ma T. Activation time and material stiffness of sequential removable orthodontic appliances. Part 1: Ability to complete treatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2003 Nov;124(5):496-501.
- [42] Sheridan JJ, LeDoux W, McMinn R. Essix retainers: fabrication and supervision for permanent retention. *J Clin Orthod.* 1993 Jan;27(1):37-45.
- [43] Vlaskalic V, Boyd RL. Clinical evolution of the Invisalign appliance. *J Calif Dent Assoc.* 2002 Oct;30(10):769-76.
- [44] Melkos AB. Advances in digital technology and orthodontics: a reference to the Invisalign method. *Med Sci Monit.* 2005 May;11(5):139-142.
- [45] Djeu G, Shelton C, Maganzini A. Outcome assessment of Invisalign and traditional orthodontic treatment compared with the American Board of Orthodontics objective grading system. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2005 Sep;128(3):292-8.
- [46] Boyd RL. Orthodontic treatment of complex malocclusions with the Invisalign appliance. *PCSO Bulletin.* 2000;72:30-2.
- [47] Nedwed V, Miethke R-R. Motivation, acceptance and problems of Invisalign patients. *J Orofac Orthop.* 2005 Mar;66(2):162-73.
- [48] Clements KM, Bollen A-M, Huang G, King G, Hujoel P, Ma T. Activation time and material stiffness of sequential removable orthodontic appliances Part 2: Dental improvements. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2002;124(5):502-8.
- [49] Meier B, Wiemer KB, Miethke R-R. Invisalign - patient profiling. Analysis of a prospective survey. *J Orofac Orthop.* 2003 sep;64(5):352-8.
- [50] Kravitz ND, Kusnoto B, BeGole E, Obrez A, Agran B. How well does Invisalign work? A prospective clinical study evaluating the efficacy of tooth movement with Invisalign. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2009 Jan;135(1):27-35.
- [51] Kunico D, Maganzini A, Shelton C, Freeman K. Invisalign and traditional orthodontic treatment ostretention outcomes compared using the American Board of Orthodontics objective grading system. *An Orthod.* 2007;77(5):864-9.
- [52] Boyd RL, Vlaskalic V. Three-dimensional diagnosis and orthodontic treatment of complex malocclusions with the Invisalign appliance. *Sem Orthod.* 2001 December;7(4):274-93.
- [53] Brachwitz J, Miethke RR. Die Entwicklungsgeschichte von Align Technology. *Kieferorthop.* 2001;15:55-6.
- [54] Tuncay OC. *The Invisalign System.* New Malden: quintessence bokks 2006.

- [55] Drechsler T. Align Technology stellt Invisalign 3G vor. Kieferorthopädische Nachrichten. 2011 June;24.
- [56] Phan X, Ling PH. Clinical limitations of Invisalign. Journal (Canadian Dental Association). 2007 Apr;73(3):263-6.
- [57] Wong BH. Invisalign A to Z. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2002 May;121(5):540-1.
- [58] Joffe L. Invisalign: early experiences. Journal of orthodontics. 2003 Dec;30(4):348-52.
- [59] Boyd RL, Miller JR, Vlaskalic V. The Invisalign system in adult orthodontics: mild crowding and space closure cases. J Clin Orthod. 2000;34(4):203-12.
- [60] Hajeer MY, Millett DT, Ayoub AF, Siebert JP. Applications of 3D imaging in orthodontics: part II. Journal of orthodontics. 2004 Jun;31(2):154-62.
- [61] Kuo E, Miller RJ. Automated custom-manufacturing technology in orthodontics. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2003 May;123(5):578-81.
- [62] Womack WR, Ahn JH, Ammari Z, Castillo A. A new approach to correction of crowding. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2002 March;122:310-6.
- [63] Krieger E, Seiferth J, Saric I, Jung BA, Wehrbein H. Accuracy of Invisalign treatments in the anterior tooth region. First results. J Orofac Orthop. 2011 Mar;72(2):141-9.
- [64] Bishop A, Womack WR, Derakhshan M. An esthetic and removable orthodontic treatment option for patients: Invisalign. Dent Assist. 2002 Sep-Oct;71(5):14-7.
- [65] Vlaskalic V, Boyd RL. Orthodontic treatment of a mildly crowded malocclusion using the Invisalign System. Aust Orthod J. 2001 Mar;17(1):41-6.
- [66] Owen AH. Accelerated Invisalign treatment. J Clin Orthod. 2001 Jun;35(6):381-5.
- [67] Wiechmann D. A new bracket system for lingual orthodontic treatment. Part 1: Theoretical background and development. J Orofac Orthop. 2002 May;63(3):234-45.
- [68] Stamm T, Hohoff A, Ehmer U. A subjective comparison of two lingual bracket systems. Eur J Orthod. 2005 Aug;27(4):420-6.
- [69] Wiechmann D. A new bracket system for lingual orthodontic treatment. Part 2: First clinical experiences and further development. J Orofac Orthop. 2003 Sep;64(5):372-88.
- [70] Thalheim A, Wiechmann D. Lingualtechnik - eine etablierte Behandlungsmethode in der Kieferorthopädie. ZWR. 2009;118(3):108-11.
- [71] McCrostie HS. Lingual orthodontics: The future. Sem Orthod. 2006 September;12(3):211-4.
- [72] Echarri P. Revisiting the history of lingual orthodontics: a basis for the future. Sem Orthod. 2006 September;12(3):153-9.
- [73] Thalheim A, Schwestka-Polly R. Clinical Realisation of a Setup in Lingual Orthodontics. Inf Orthod Kieferorthop. 2008;40:277-82.
- [74] Pauls AH. Therapeutic accuracy of individualized brackets in lingual orthodontics. J Orofac Orthop. 2010 Sep;71(5):348-61.

- [75] Svedja M, Chiari S, Bantleon H-P. Laborprozesse in der Lingualtechnik - unterschiedliche Varianten. *Inf Orthod Kieferorthop.* 2005;37:255-62.
- [76] Rummel V, Wiechmann D, Sachdeva RC. Precision finishing in lingual orthodontics. *J Clin Orthod.* 1999 Feb;33(2):101-13.
- [77] Verma D, Bourauel C, May O, Jager A. Testing a computer-assisted bending machine for manufacturing orthodontic treatment elements. *Biomed Tech.* 2000 Oct;45(10):265-71.
- [78] Cha BK, Lee JY, Jost-Brinkmann P-G. Analysis of tooth movement in extraction cases using three-dimensional reverse engineering technology. *Eur J Orthod.* 2007;29:325-31.
- [79] Fischer-Brandies H, Orthuber W, Pohle L, Sellenrieck D. Bending and torquing accuracy of the bending art system (BAS). *J Orofac Orthop.* 1996 Feb;57(1):16-23.
- [80] Bolender CJ, Bounoure GM, Barat Y. Extraktion versus Nonextraktion. München: Neuer Merkur GmbH 1995.
- [81] Van der Linden F. Diagnose und Behandlungsplanung in der Kieferorthopädie. Berlin: Quintessenz 1996.
- [82] Sachdeva R. SureSmile technology in a patient-centered orthodontic practice. *J Clin Orthod.* 2001 Apr;35(4):245-53.
- [83] Sachdeva R. Sure-Smile: technology driven solution for orthodontics. *Tex Dent J.* 2002 Jul;119(7):608-15.
- [84] Scholz RP, Sachdeva R. Interview with an innovator: SureSmile Chief Clinical Officer Rohit C. L. Sachseva. *Am J orthod Dentofac Orthop.* 2010;138:231-8.
- [85] Bittner W-T. Hightech-KFO höchster Präzision (1). *kieferorthopädie Nachrichten.* 2011 June;1, 4-7.
- [86] Müller-Hartwich R, Präger TM, Jost-Brinkmann P-G. SureSmile-CAD/CAM system for orthodontic treatment planning, simulation and fabrication of customized archwires. *International journal of computerized dentistry.* 2007 Jan;10(1):53-62.
- [87] Wiechmann D. Lingual orthodontics (part 1): laboratory procedure. *J Orofac Orthop.* 1999;60(5):371-9.
- [88] Müller-Hartwich R, Präger TM, Jost-Brinkmann P-G. Orthodontic CAD/CAM system for treatment planning, appliance design and wire bending. *int J CARS.* 2007;2(1):522-6.
- [89] Bittner W-T. Hightech-KFO höchster Präzision (2). *Kieferorthopädie Nachrichten.* 2011 July/August;1, 4-7.
- [90] Sachdeva R, Fruge JF, Fruge AM, Ingraham R, Petty WD, Bielik KL, et al. SureSmile: a report of clinical findings. *J Clin Orthod.* 2005 May;39(5):297-315.
- [91] Mah J, Sachdeva R. Computer-assisted orthodontic treatment: the SureSmile process. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2001 Jul;120(1):85-7.
- [92] Alcaniz M, Montserrat C, Grau V, Chinesta F, Ramon A, Albalat S. An advanced system for the simulation and planning of orthodontic treatment. *Medical image analysis.* 1998 Mar;2(1):61-77.

- [93] Mah J, Bumann A. Technology to create the three-dimensional patient record. *Sem Orthod*. 2001;7(4):251-7.
- [94] Maurer W, De Boer I, Schneider F, Dossel O. 3D localization of electrodes on and in the human body based on biplanar roentgen images. *Biomed Tech*. 1998;43:474-5.
- [95] Halazonetis DJ. Acquisition of 3-dimensional shapes from images. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2001 May;119(5):556-60.
- [96] Moles R. The SureSmile System in orthodontic practice. *J Clin Orthod*. 2009;43(3):161-74.
- [97] Schumacher GH. *Anatomie und Biochemie der Zähne*. Stuttgart: Fischer 1990.
- [98] Probst FA. *Dreidimensionale Untersuchungen zur Morphologie der Frontzähne*. München: Ludwig-Maximilians-Universität; 2007.
- [99] Schumacher GH. *Odontographie: Anatomie der Zähne und des Gebisses*. Heidelberg: A.Hüthig 1995.
- [100] Scott GR, Turner CG. *The anthropology of modern human teeth*. Cambridge 1997.
- [101] Sterrett JD, Oliver T, Robinson F, Fortson W, Knaak B, Russell CM. Width/ length ratios of normal clinical crowns of the maxillary anterior dentition in man. *J Clin Periodontol*. 1999;26:153-7.
- [102] Eichner K, Kappert HF. *Zahnärztliche Werkstoffkunde und ihre Verarbeitung*. Heidelberg: Verlag Hüthig GmbH 1996.
- [103] Meyer BJA, Mörmann WH, Lutz F. Optimierung der Puder-Applikation bei der Cerec-Methode mit umweltfreundlichen Treibgasen. *Schweiz Monatsschr Zahnmed*. 1990;100:1462-8.
- [104] Quaas S. CAD/CAM-Systeme für die Praxis. *ZM*. 2008;98(23):52-8.
- [105] Quaas S, Loos R, Sporbeck H, Luthardt RG. Analyse des Einflusses der Puderapplikation auf die Genauigkeit optischer Digitalisierungen. *Dtsch Zahnärztl Z* 2005;60:96-9.
- [106] Rudolph H, Luthardt RG, Walter MH. Computer-aided analysis of the influence of digitizing and surfacing on the accuracy in dental CAD/CAM technology. *Computers in biology and medicine*. 2007 May;37(5):579-87.
- [107] Garn SM. *Human Races*. 3 ed. Springfield 1971.
- [108] Lehmann K, Hellwig E. *Einführung in die restaurative Zahnheilkunde*. 8 ed: Urban und Schwarzenberg 1998.
- [109] Mehl A, Kern M. Automatische Kauflächenrekonstruktion durch intelligente CAD/CAM-Software. *dentalfresh*. 2008;1:12-4.

10 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Aufgenommene Patientendaten im <i>SureSmile</i> ®-Diagnostikbogen: Kieferscan mit dem <i>OraScanner</i> ®, Patientenfoto und Fernröntgenseitenbild.	16
Abb. 2: Intraorales Foto, Panoramaschichtaufnahme und digitaler Planungsbogen, auf dem der Kieferorthopäde die entsprechenden Behandlungsparameter für den Patienten auswählt.	16
Abb. 3: Aufsicht auf den <i>OraScanner</i> ® mit viereckigem Umlenkspiegel links, an einem Griff fixiert.	20
Abb. 4: <i>SureSmile</i> ®-Datenerfassungsbogen zur Beurteilung des Vorhandenseins von approximalen Zahnkontakten.	22
Abb. 5: Unbearbeiteter, partieller Scan eines Oberkiefers in okklusaler Ansicht, im <i>SureSmile</i> ®-Programm aufgerufen. Der Scan ist aus Einzelbildern (Frames) zusammengesetzt. In den approximalen Bereichen sind die fehlenden Scandaten ersichtlich (grüner Hintergrund schimmert durch:⇒). Oberflächen, die noch zu bearbeiten sind, sind in pink dargestellt.	23
Abb. 6: Darstellung des Oberkiefers aus Abb. 5 nach erfolgter Registrierung des Zahnbogenscans mit Nachkorrektur von Scanartefakten und Oberflächenglättung sowie Nachmodellierung, gefärbt in Pink zur Weiterbearbeitung. Nicht gescannte Bereiche scheinen weiterhin grün durch.	24
Abb. 7: Automatische Zahnerkennung durch die Software. Einzelne Zahngruppen sind in unterschiedlichen Farben dargestellt. In dieser Darstellung sind die Zahngruppen vom mittleren Schneidezahn bis zum 2. Prämolaren abgebildet.	25
Abb. 8: „Matching“: Nicht gescannte Bereiche wurden mit Hilfe von Templates aus einer Datenbank vervollständigt und so die fehlenden Bereiche der Zähne im Scan rekonstruiert. Diese anatomischen Ergänzungen der Scans sind gelb dargestellt.	26
Abb. 9: Oberkiefer vollständig von der Software nachbearbeitet, sodass alle Zähne eine lückenlose Oberfläche haben und Nachbarzahnkontakt im approximalen Bereich aufweisen. Zusätzlich wurde eine Gingiva konstruiert (vgl. Abb. 5 - Abb. 8).	27
Abb. 10: Unterkieferzahnbogen mit Engstand in der Front in Wachs aufgestellt und mit Titandioxidspray bearbeitet.	30
Abb. 11: Okklusalan sicht des Zahnbogens aus Abb. 10.	30
Abb. 12: Vollständiger Unterkieferzahnbogenscan des Modells aus Abb. 10 und Abb. 11 ...	31

Abb. 13: Oberer erster Prämolare mit einem Hölzchen, das mit Sekundenkleber an der mesialen Wurzeloberfläche fixiert wurde. Der Zahn wurde für den Scanvorgang mit einer weißen Titandioxidschicht versehen.....	33
Abb. 14: Screenshot eines gescannten Originalzahnes 12, aufgerufen im <i>SureSmile</i> ®-Programm mit mesial an der Wurzeloberfläche befestigter Halte-vorrichtung.....	33
Abb. 15: Originalzahn 41 und der zugehörige Unterkieferzahnbogenscan wurden im Computerprogramm <i>Rapidform</i> ® aufgerufen.	35
Abb. 16: Initial-Registrierung: am Zahn 41 wurden sowohl am Originalzahn als auch innerhalb des Unterkieferzahnbogenscans vier Punkte manuell markiert, die die Software zur Orientierung und Überlagerung benötigt.	35
Abb. 17: Der Zahn 41 wurde anhand von vier ausgewählten Markierungspunkten von der Software initial in den Unterkiefer registriert.	36
Abb. 18: Die Befehlsabfolge zur Fein-Registrierung wurde links oben im Bild aufgerufen. Die mittels Punkten markierten Bereiche am Originalzahn sind den markierten Bereichen im Zahnbogen zugeordnet worden und der Zahn wurde im Rahmen der Initialregistrierung an die entsprechende Stelle im Zahnbogen eingefügt.....	36
Abb. 19: In dem Unterkieferzahnbogenscan wurde der Zahn 41 fertig einregistriert, indem die Zahnkrone des Originalzahnes und die des Zahnes im Zahnbogen zur Deckung gebracht wurden.....	37
Abb. 20: Angelegte Hüllbox mit den Ebenen, die sich an der äußeren Begrenzung des Zahnes 11 orientieren. Die XY-Ebene wurde von der Software vorgeschlagen und ist noch nicht optimal ausgerichtet. Sie musste manuell am PC durch entsprechende Drehung korrigiert werden. Die XZ- und YZ-Ebenen richteten sich nach der Ausrichtung der XY-Ebene automatisch aus.....	38
Abb. 21: Definition des zahnspezifischen Koordinatensystems und der entsprechenden Ebenen: Der inzisal-apikal verlaufende blaue Pfeil stellt die Z-Achse dar und trifft im rechten Winkel auf die XY-Ebene. Der mesiodistal ausgerichtete rote Pfeil stellt die X-Achse dar, die auf der YZ-Ebene im rechten Winkel trifft. Der orovestibuläre grüne Pfeil trifft auf die XZ-Ebene und zeigt den Verlauf der Y-Achse.....	39
Abb. 22: Zahn 11 mit an Hand der XY-Ebene erstelltem Koordinatensystem. Die XY-Ebene wurde manuell am PC so ausgerichtet, dass die Pfeile des Koordinatensystems in die zugehörige Richtung der X-, Y- und Z-Achse zeigen.....	40

- Abb. 23: Screenshot einer Zahnreihe 21-27 mit individuell erstellten Koordinatensystemen je Zahn im Programm *Rapidform*®. Die von *SureSmile*® nachbearbeiteten Zähne und die einregistrierten Originalzähne sind hier im Bild im koronalen Bereich bereits überlagert. 41
- Abb. 24: Tessellation (Parkettierung) der Oberfläche eines Zahnes: glatte Oberflächenbereiche stellen sich mit wenigen großen Dreiecken dar, Kanten und Unebenheiten mit vielen kleinen Dreiecken..... 42
- Abb. 25: Ermittlung des Approximalkontaktpunktes am Beispiel zweier Originalzähne 11 und 21 durch die Berechnung des geringsten Abstandes zwischen den zwei Zähnen. Links: Auswahlbereich der berechneten Oberfläche farblich markiert, rechts: Darstellung der Abstandsvektoren in rot. Die Zahl im Bild (0,36733 mm) steht für den geringsten gemessenen Abstand zwischen den beiden Zähnen..... 43
- Abb. 26: Auf der Zahnoberfläche des Zahnes 41 ist das isolierte Dreieck aus der Kontaktfläche in blau sichtbar (⇒). Dieses Dreieck hat den geringsten Abstand zum Nachbarzahn und stellt somit das Zentrum der Kontaktfläche dar. Die Zahnabstände werden durch das Programm farblich codiert: von 0 mm (tiefblau) bis 0,4 mm (rot). 44
- Abb. 27: *GeoAnalyzer*®: Der Abstand zwischen zwei Zähnen wird farblich dargestellt und kann anhand der Skala abgelesen werden. Der grüne Bereich stellt den engsten Kontakt mit dem Nachbarzahn dar..... 47
- Abb. 28: Blick von inzisal auf die Schnittebene des Zahnes 13 nach Übereinanderlagerung der zehn Einzelzahnschans in *GeoAnalyzer*®. Die Höhe der Schnittebene ist im Zentrum der Grafik zusätzlich eingeblendet. Die gelben Linien am linken und rechten Bildrand stellen die vergrößerten Übereinanderlagerungen der mesialen bzw. distalen Approximalflächen dar, die nachfolgend auf Abweichungen vermessen wurden. 49
- Abb. 29: Vergrößerter Ausschnitt der mesialen Approximalflächen der zehn Einzelzahnschans mit Überlagerung des 0,01 mm Gitters zur Vermessung. Es wurden die Abstände der einzelnen Punkte auf der Linie vermessen, die von rechts nach links durch die Mitte des Fadenkreuzes verläuft..... 50
- Abb. 30: Prozentuale Verteilung der unterschiedlichen Kontaktgruppen Gruppe 00: *SureSmile*®- und Originalzähne ohne Kontakt Gruppe 01: *SureSmile*®-Zähne ohne Kontakt und Originalzähne mit Kontakt Gruppe 10: *SureSmile*®-Zähne mit Kontakt und Originalzähne ohne Kontakt Gruppe 11: *SureSmile*®- und Originalzähne mit Kontakt 53
- Abb. 31: Nach Ober- und Unterkiefer getrennt aufgeführte Verteilung der Kontaktgruppen. 00: *SureSmile*®- und Originalzähne ohne Kontakt 01: *SureSmile*®-Zähne ohne Kontakt und Originalzähne mit Kontakt 10: *SureSmile*®-Zähne mit Kontakt und Originalzähne ohne Kontakt 11: *SureSmile*®- und Originalzähne mit Kontakt..... 55

- Abb. 32: Boxplot vom Ausmaß der Abweichung der Kontaktpunkte von *SureSmile*®- und Originalzähnen (in mm) bezogen auf die drei Raumrichtungen..... 57
- Abb. 33: Inzisal ungleichmäßig applizierte Titandioxidschicht („Haufenbildung“), die im Scan zu einer verfälschten Oberflächenform führt..... 67
- Abb. 34: Mit Titandioxid-Pulver besprühtes Unterkieferzahnbogen-Modell. Die Approximalräume 31/32, 41/42 und 42/43 zeigen reduzierte Zahnfleischpapillen. Bei 31/32 ist der Zwischenraum nach Titandioxid-Applikation weiterhin durchgängig und somit die angrenzenden Kontaktflächen der Zähne gut für den Scanner erkennbar. In den Approximalräumen 41/42 und 42/43 führt die „Haufenbildung“ des Titandioxids zu nicht scanbaren Approximalflächen. 68
- Abb. 35: Von der *SureSmile*®-Software erstelltes Setup mit Angaben zur approximalen Schmelzreduktion im abgebildeten Unterkiefer. Empfohlene Reduktion pro Zahn: 0,1 mm für die Zähne 41 und 31 sowie 0,3 mm für die Zähne 32 und 42 und 0,5 mm für Zähne 33, 34, 35, 43, 44, 45..... 72
- Abb. 36: Formvariabilität der OK-Molaren mit trapezförmiger bis dreieckiger Kronenform... 73

11 Tabellenverzeichnis

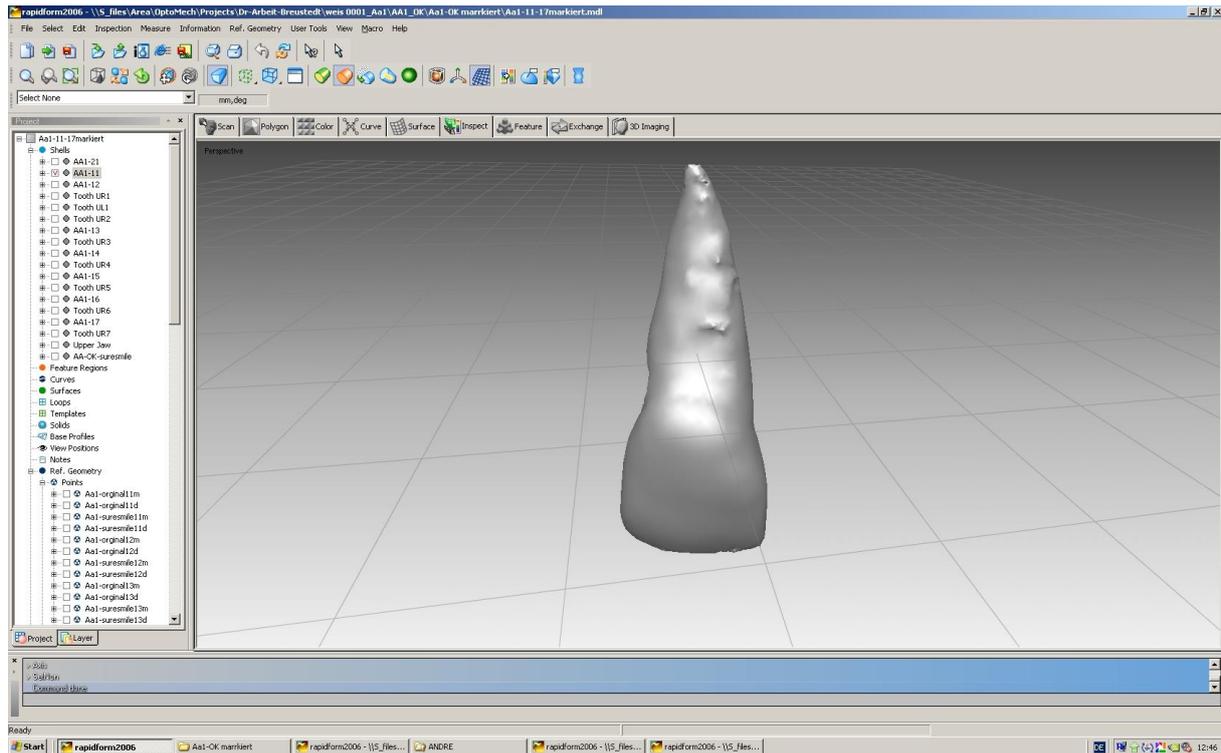
Tab. 1: Definierte Zahngruppen und Anzahl der untersuchten Originalzähne und <i>SureSmile</i> ®-Zähne.	45
Tab. 2: Gruppeneinteilung der möglichen Kontaktkombinationen bei der qualitativen Zahnkontaktanalyse.	48
Tab. 3: Zur Fehleranalyse wurde die Dahlberg-Formel verwendet. Diese ergibt eine Stichproben-Standardabweichung von 0,044 mm für die distalen und 0,025 mm für die mesialen Zahnflächenscans, was einen durchschnittlichen methodischen Fehler von 0,035 mm für die Scangenaugigkeit ergibt.	51
Tab. 4: Statistische Auswertung aller X-, Y- und Z-Werte (X: mesiodistale Richtung, Y: orovestibuläre Richtung, Z: inzisal-apikale Richtung) bezüglich der Abweichung der Kontaktpunkte von <i>SureSmile</i> ®-Zähnen und Originalzähnen.	56
Tab. 5: Statistische Auswertung der einzelnen Zahngruppen, unterteilt in Ober- und Unterkiefer bezüglich der Abweichungen in der Lage der Kontaktpunkte der <i>SureSmile</i> ®- und Originalzähne in mesiodistaler Ausdehnung (X-Werte).	58
Tab. 6: Ergebnis der Übereinstimmung der Kontaktpunktlage in mesiodistaler Richtung (X-Achse) von <i>SureSmile</i> ®- und Originalzähnen.	59
Tab. 7: Häufigkeit der übereinstimmenden und nicht übereinstimmenden mesialen bzw. distalen Kontaktpunkte von <i>SureSmile</i> ®- und Originalzähnen im Ober- und Unterkiefer.	60
Tab. 8: Häufigkeit der übereinstimmenden und nicht übereinstimmenden mesialen bzw. distalen Kontaktpunkte von <i>SureSmile</i> ®- und Originalzähnen im Ober- bzw. Unterkiefer bezogen auf die Zahngruppen FZ, PM, M.	62

12 Anhang

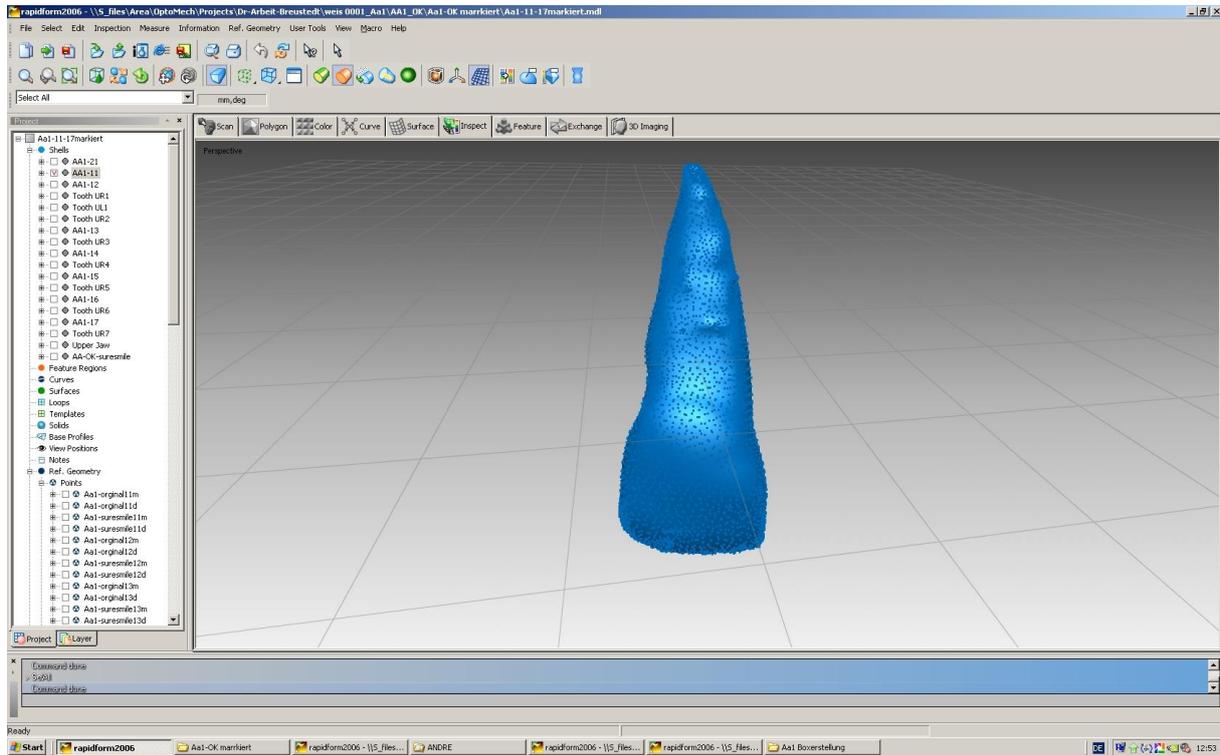
12.1 Anhang I: Koordinatensystemerstellung

Es folgen die Einzelschritte der Bedienung der Software *Rapidform*® zur Erstellung von zahnbezogenen Koordinatensystemen an Hand des Beispielzahnes 11.

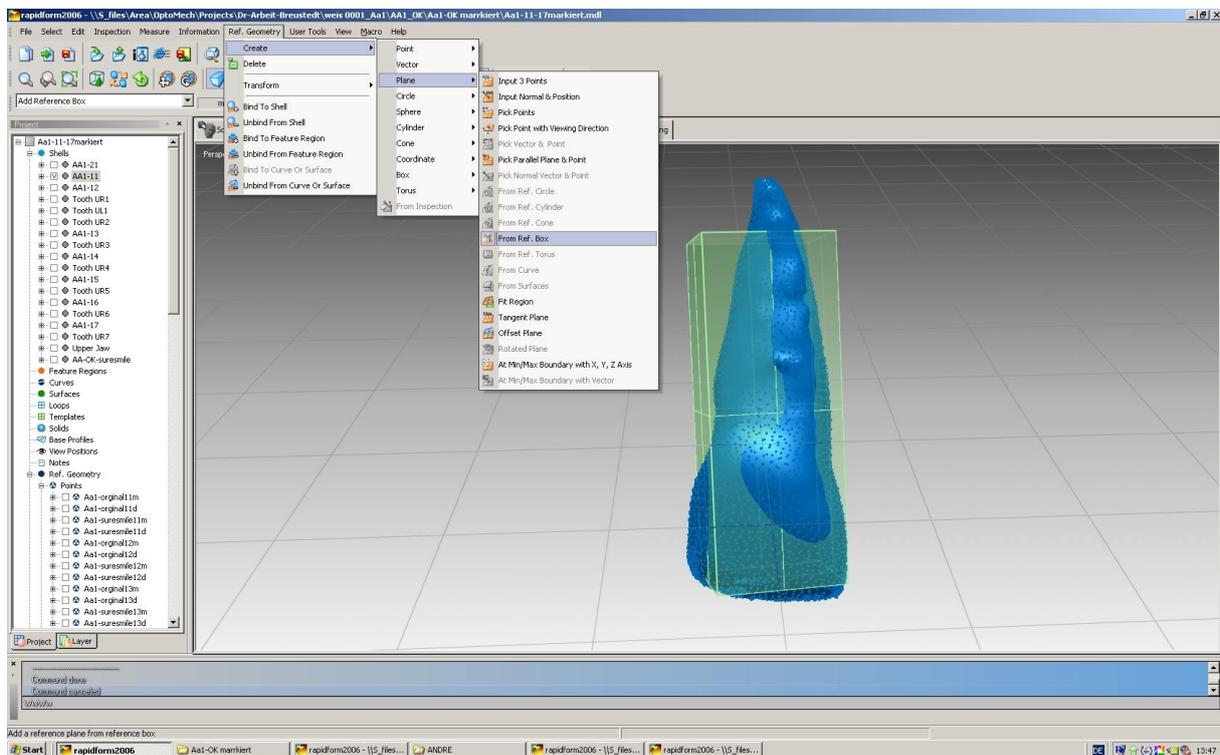
1. Schritt: Das Importieren des Originalzahnes 11. Der Zahn wird aus der Datenbank ausgewählt und im Softwareprogramm *Rapidform*® aufgerufen.



2. Schritt: Das Markieren des ausgewählten und im Folgenden zu bearbeitenden Zahnes. Mit dem Button der Taskleiste „select >> all“ wird der ausgewählte Zahn farbig (blau) markiert.

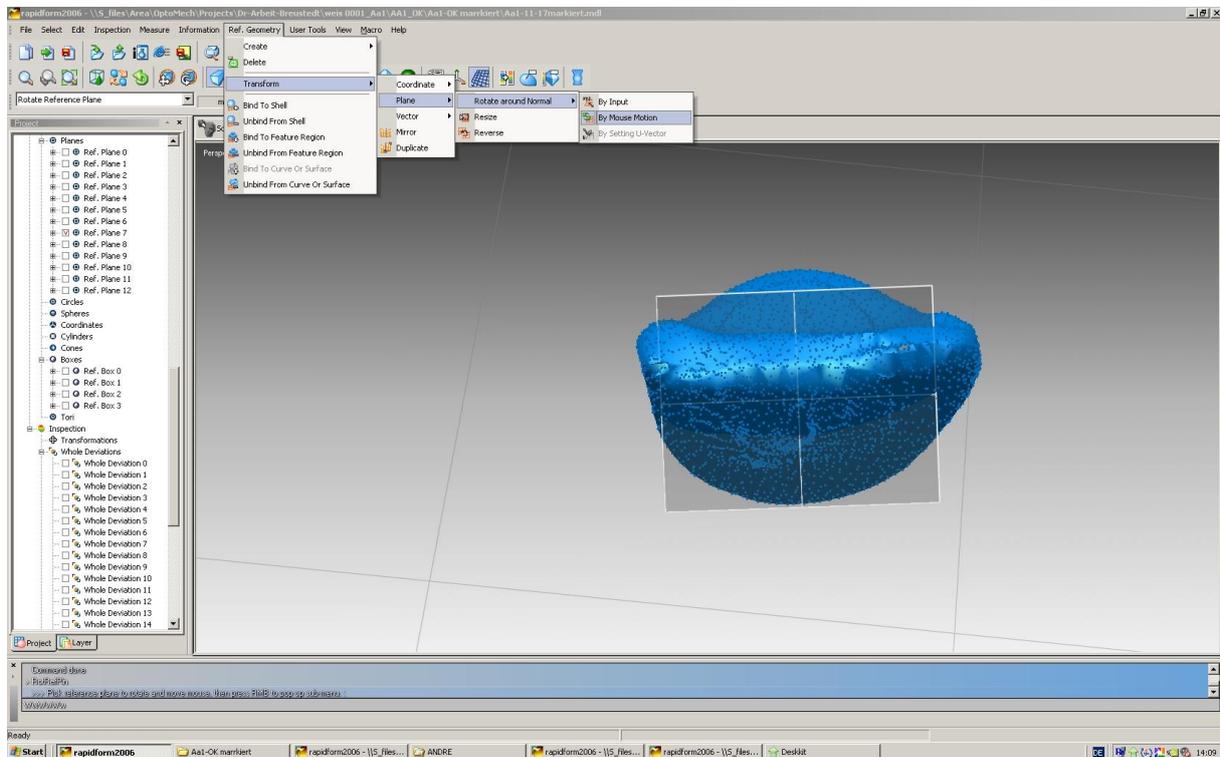


3. Schritt: Das Erstellen einer Hüllbox um den blau markierten Zahn. Mit der Befehlsabfolge „reference geometry >> create >> box >> fit region“ und im Anschluss „add fit geometry“ >> create“ kriecht die Software eine so genannte Hüllbox um den Zahn.



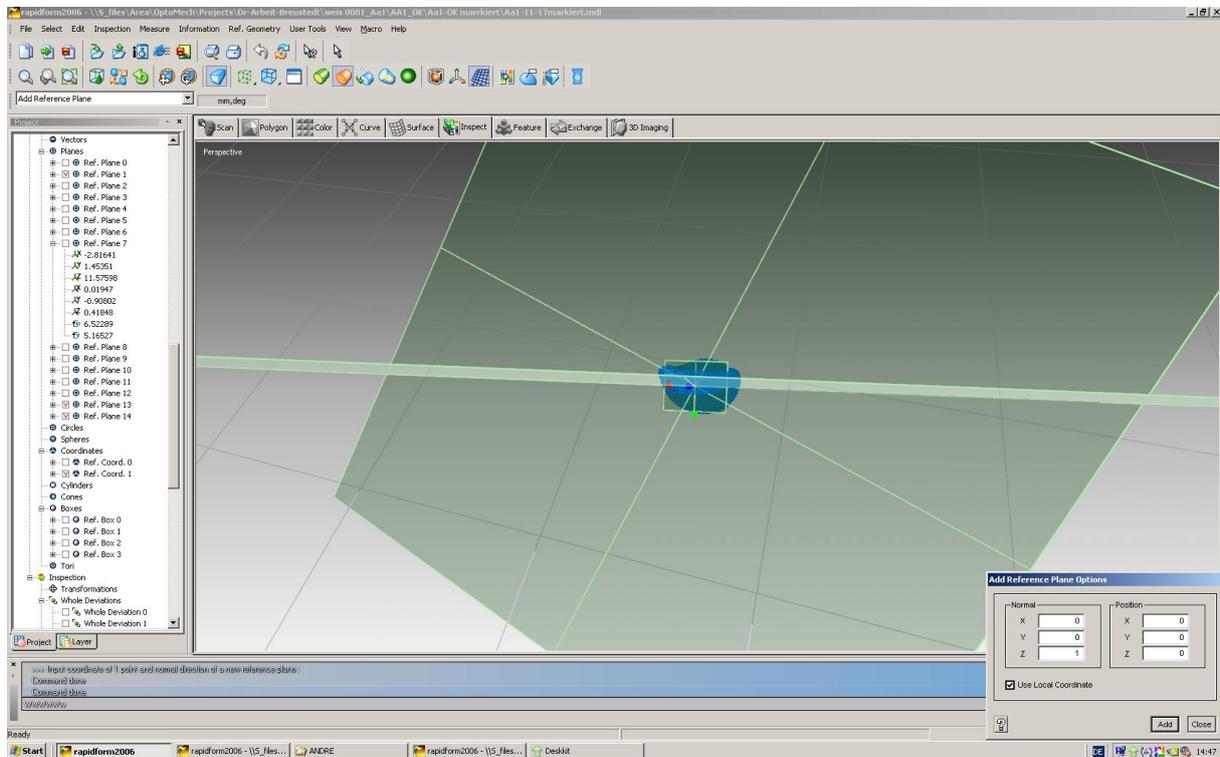
4. Schritt: Erstellen der 6 Ebenen. Mit der Anweisung „reference geometry >> create >> plane >> from reference box“ erstellt das Programm *Rapidform*® 6 Ebenen, die durch die Hüllbox hindurch laufen.

5. Schritt: Die Z-Ebene wird manuell ausgewählt, denn sie ist die Ausgangsebene, die parallel mit der Mittellinie zum Inzisalkantenverlauf des ausgewählten Zahnes ausgerichtet werden muss. Folgende Befehlsabfolge ist anzuwählen: „reference geometry >> transform >> plane >> rotate around normal >> by mouse motion“.



6. Schritt: Das Erstellen des Koordinatensystems basiert auf der Grundlage der Z-Ebene. Es wird die Befehlsabfolge: „reference geometry >> create >> coordinate >> from plane“ gewählt und im Anschluss die ausgesuchte Ebene durch Anklicken markiert. Im Anschluss wird die Befehlsabfolge „add reference coordinate from reference plane“ ausgewählt und mit „ok“ bestätigt.

7. Schritt: Erstellung zwei weiterer Bezugsebenen mit Hilfe des Koordinatensystems. Mit der Befehlsabfolge „reference geometry >> create >> plane >> input in a normal position“ wird die zu erstellende Y-Ebene ausgewählt. Im Anschluss erfolgt die Anweisung: „add reference plane options“ sowie „use local coordinate >> add“. Das Softwareprogramm erstellt dann die Y-Ebene. Für die Erstellung der X-Ebene sind folgende Befehle notwendig: „add reference plane options“ und „use local coordinate >> add“.

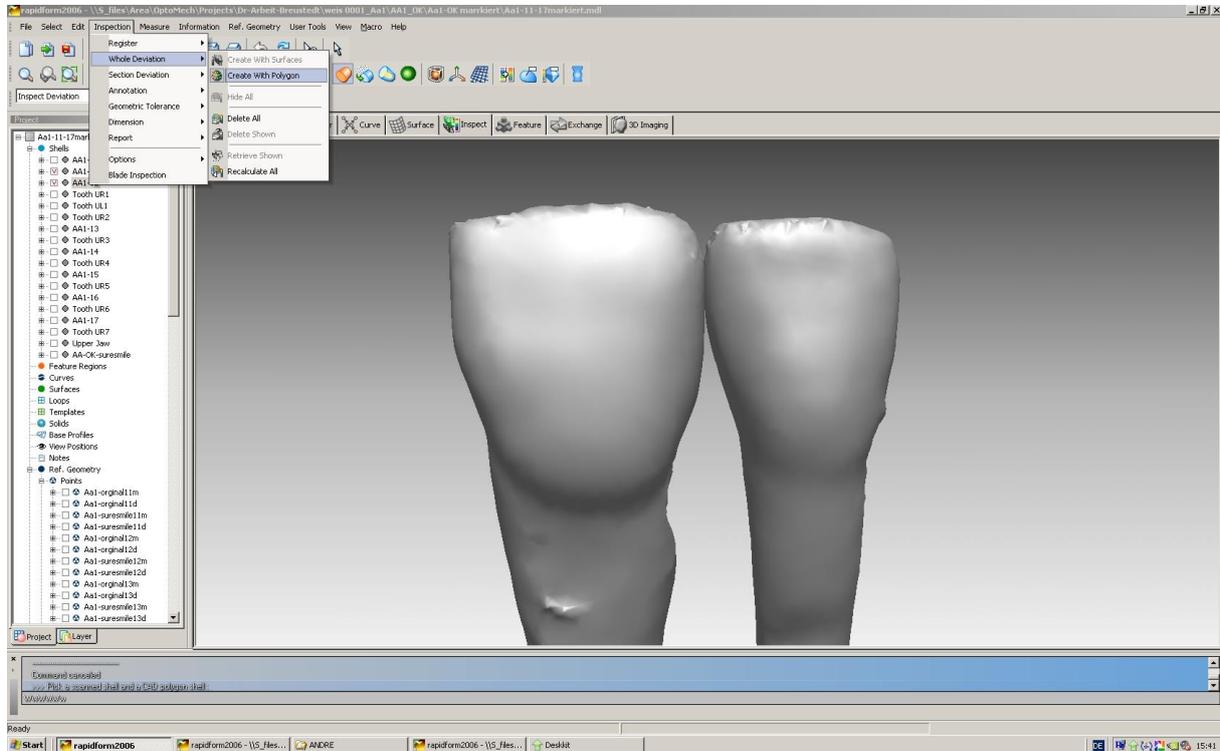


Alle drei Referenzebenen durchkreuzen den Zahn 11, auf den man von inzisal nach apikal blickt (durch Z-Ebene wird X gebildet und durch X-Ebene Z festgelegt).

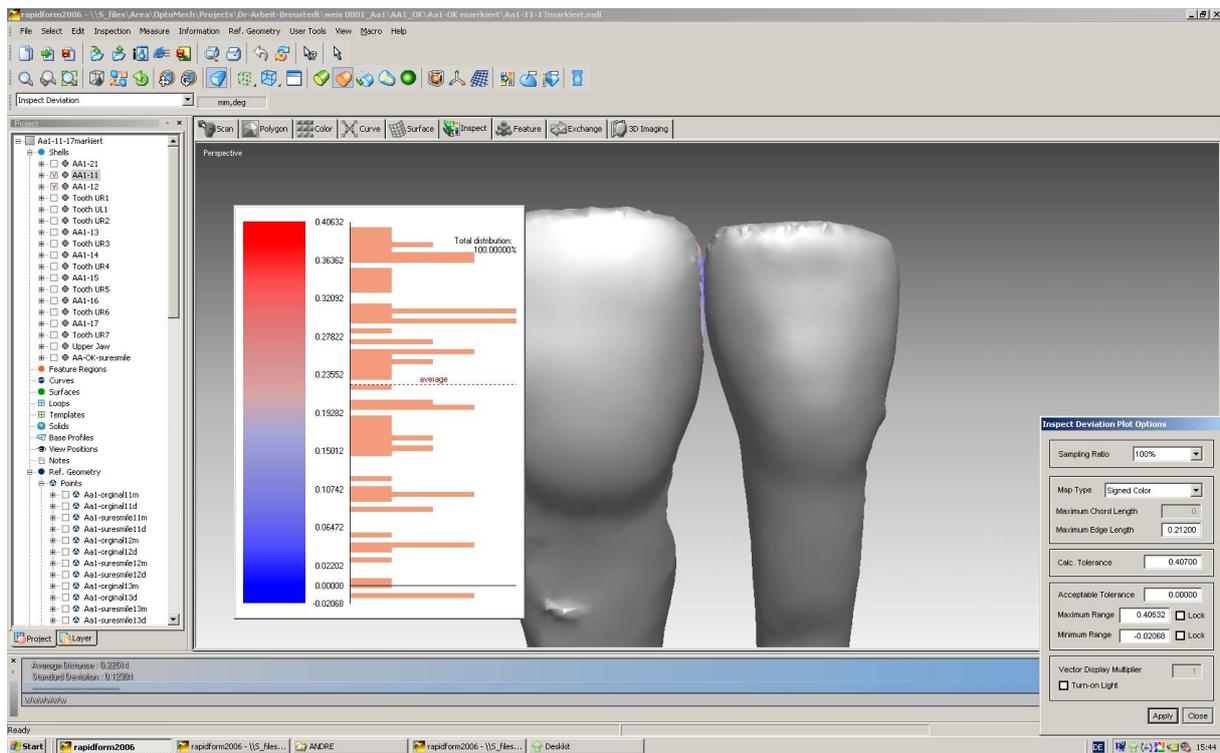
12.2 Anhang II: Definieren der Kontaktpunkte

Die Kontaktpunktfindung wird im Folgenden am Beispiel des Zahnes 11 distal demonstriert.

1. Schritt: Originalzahn 11 und 12 werden im Computerprogramm *Rapidform®* geladen. Im Anschluss folgt die Befehlseingabe: „inspection >> whole deviation >> create with polygon“.

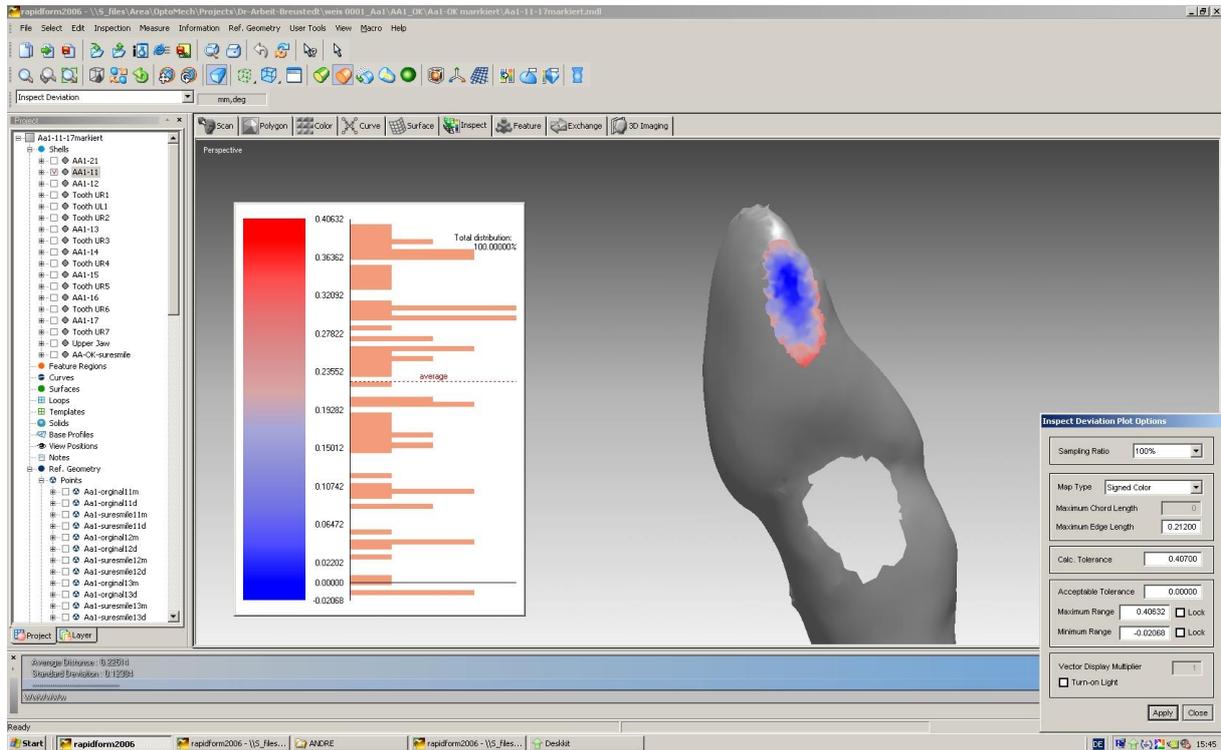


2. Schritt: Beide Zähne werden nacheinander angeklickt, der zweite Zahn erhält von der Software den markierten Kontaktbereich.

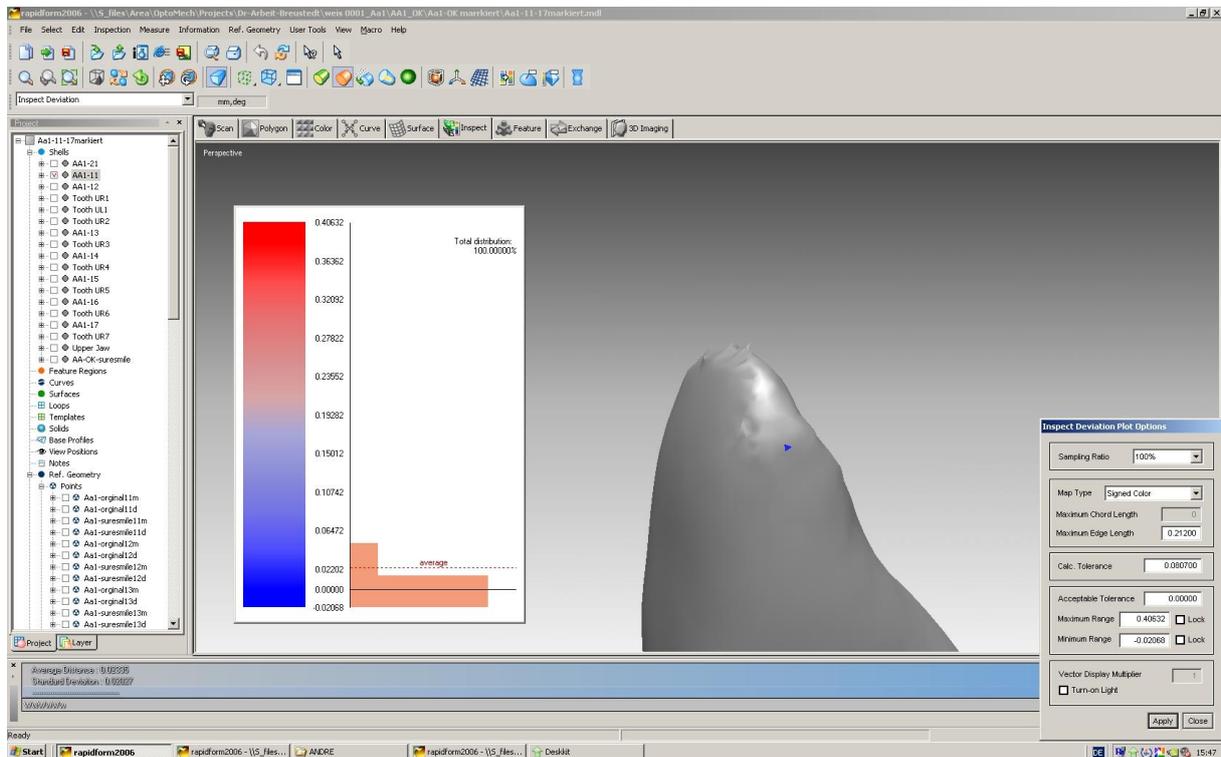


Die Berührungsfläche im Kontaktpunktbereich stellt sich als farbiges Diagramm dar, der Kontaktbereich ist analog dazu an den entsprechenden Zahnflächen gefärbt. Im unteren rechten Bildrand sind die Grenzwerte der Einschränkung des Zielkontaktbereiches ersichtlic.

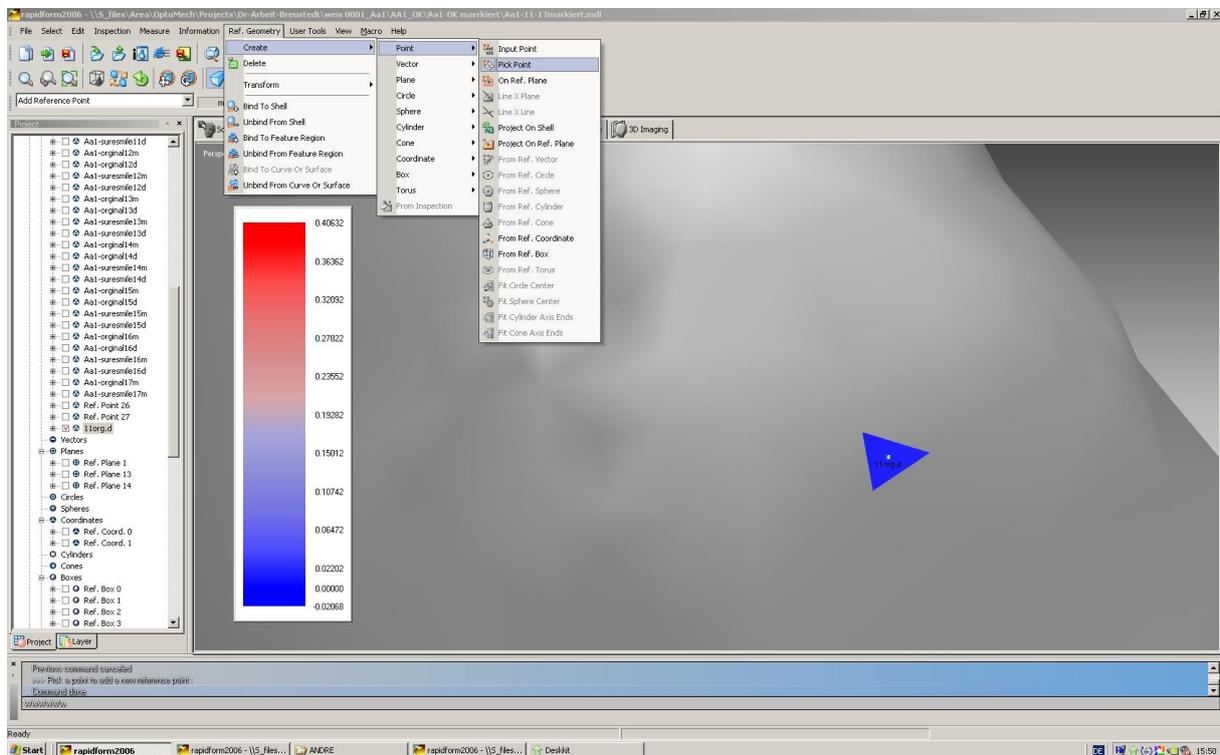
3. Schritt: Der Nachbarzahn wird ausblendet und die farbig markierte Kontaktfläche wird durch Rotation dem Betrachter zugewandt.



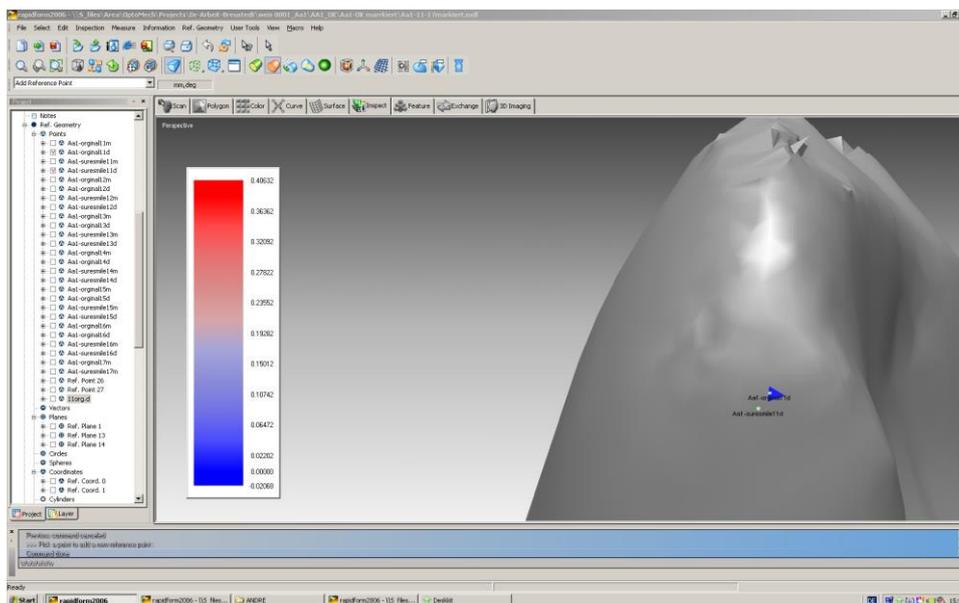
4. Schritt: Mit Hilfe des Befehls: „calculated tolerance“ wird die Kontaktfläche bis auf ein letztes zentrales Dreieck reduziert. Das gleichzeitig eingeblendete Farbdigramm spiegelt den Abstand zwischen den beiden Kontaktpunkten der benachbarten Zähne wider.



5. Schritt: Der zentrale Punkt im ausgewählten Dreieck muss mittig markiert werden. Dazu werden die einzelnen Schritte „reference geometry >> create >> point >> pick point“ ausgewählt. Das Dreieck wird dazu vergrößert und manuell der Mittelpunkt des Dreiecks festlegt und im Anschluss beschriftet.



6. Schritt: Ebenso wie an Zahn 11 wird am Nachbarzahn 12 verfahren, um dort den mesialen Kontaktpunkt zu bestimmen. Im Anschluss erfolgt diese Kontaktpunktermittlung und Markierung an den von SureSmile® nachmodellierten Zähnen.



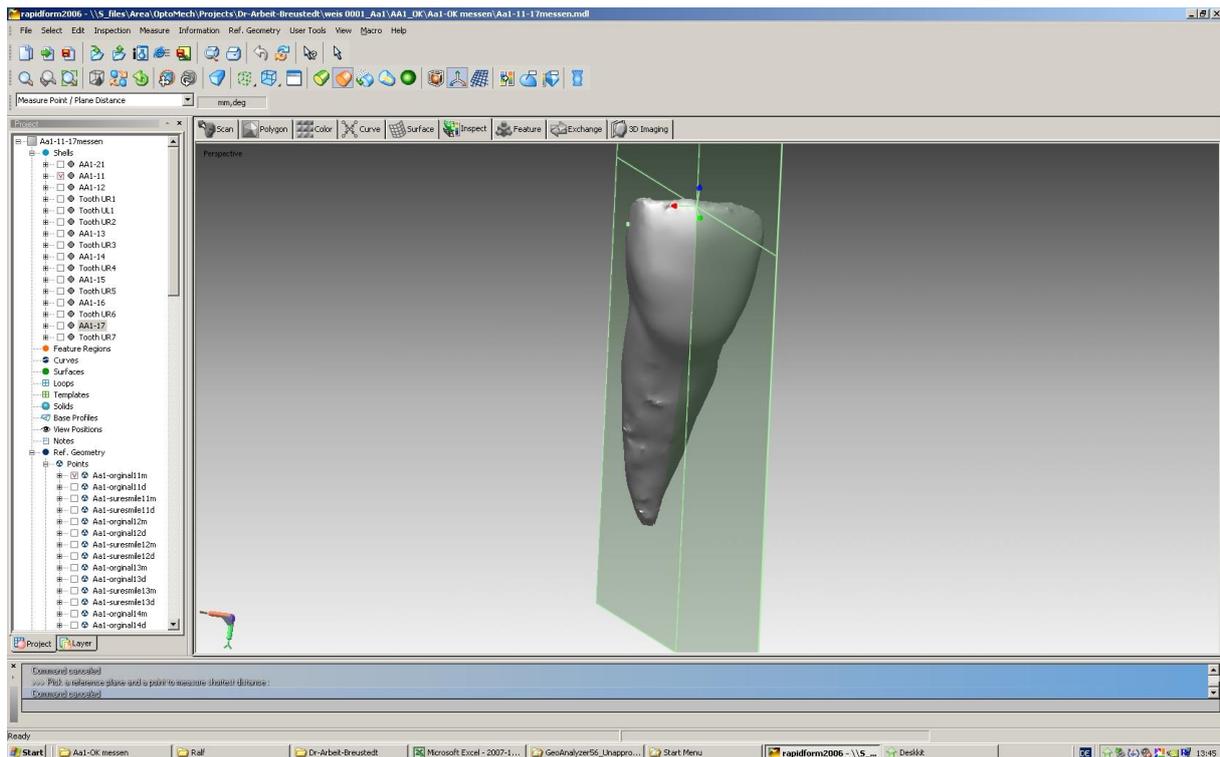
SureSmile®- und Originalzahnkontaktpunkt sind in diesem Bild gleichzeitig aufgerufen.

Man kann eine kleine Abweichung in der Lage der Punkte erkennen.

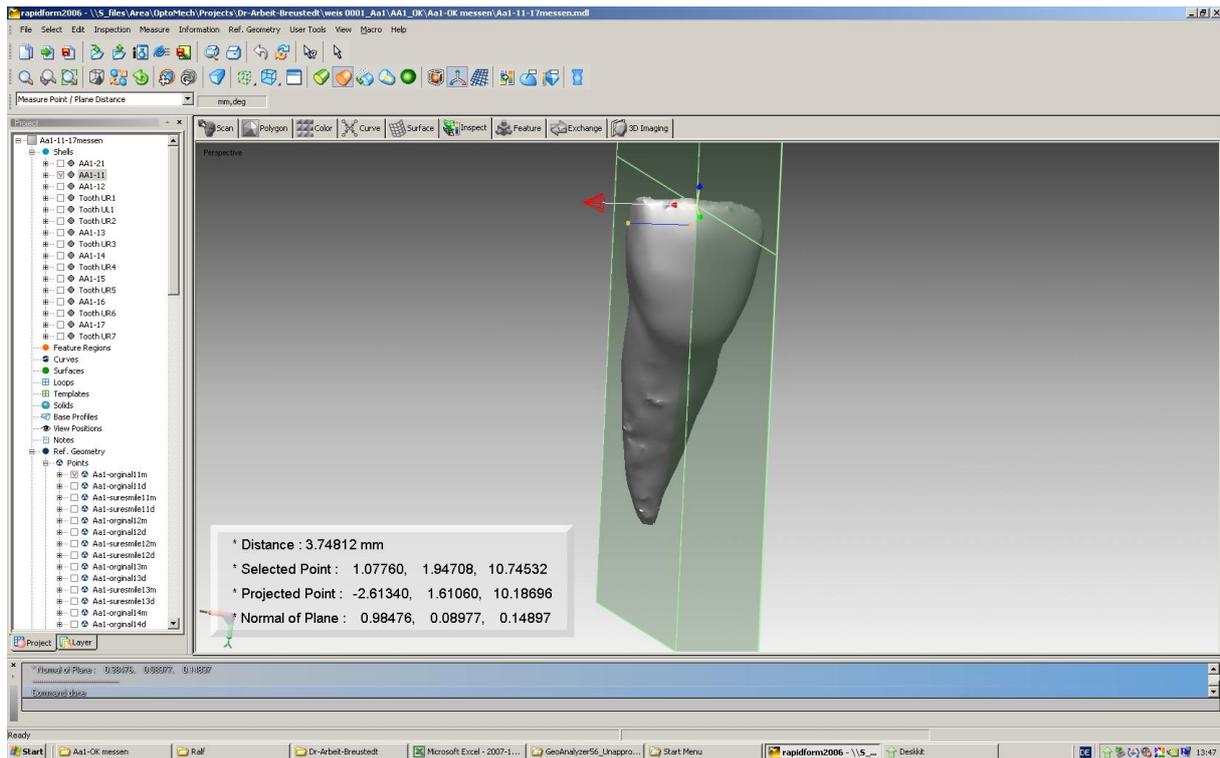
12.3 Anhang III: Definition der Kontaktpunkte in X, Y und Z

Nach Erstellung des Koordinatensystems und Bestimmung der Kontaktpunkte werden den Kontaktpunkten je ein X-, Y- und ein Z-Wert zugeordnet.

1. Schritt: Aufrufen des Zahnes in *Rapidform*® mit seinem Koordinatensystem, dem festgelegten Kontaktpunkt und der Bezugsebene, die zur Berechnung des entsprechenden Koordinaten-Wertes dient: Als Beispiel dient im Folgenden die Auswahl des Zahnes 11 mit der YZ-Bezugsebene zur Berechnung des X-Wertes.

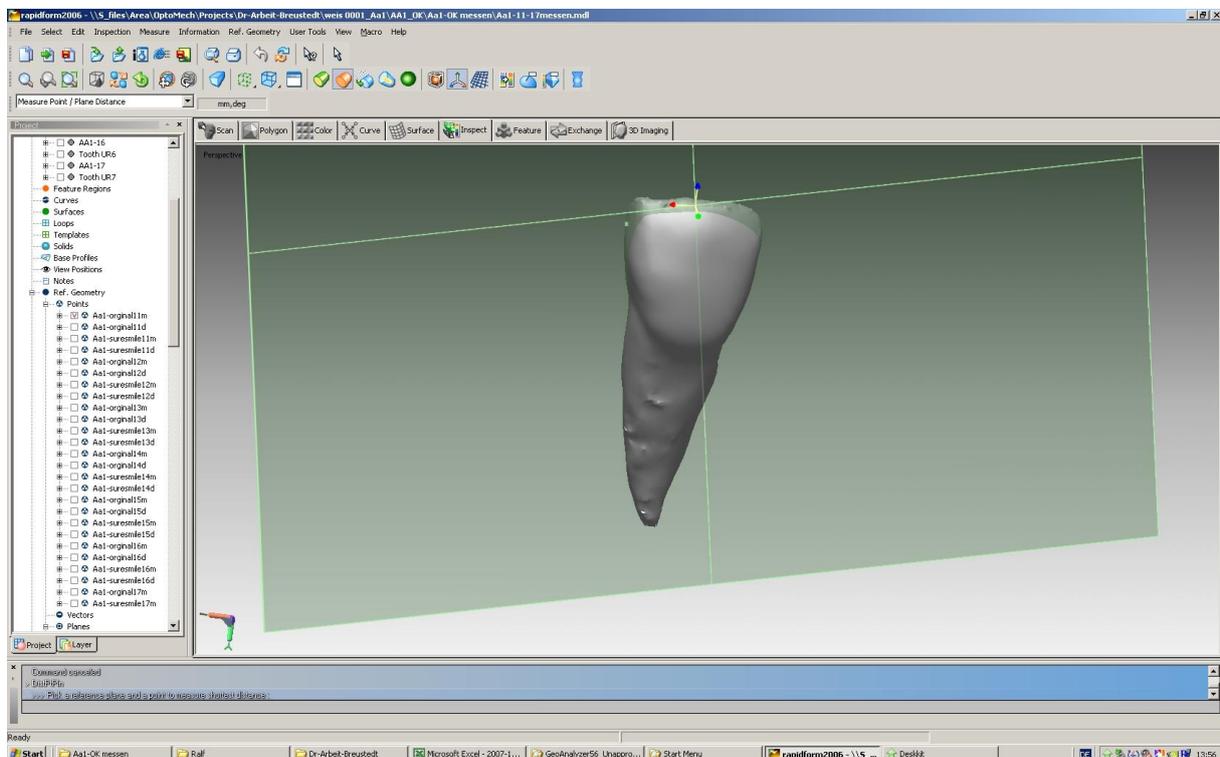


Der Zahn 11 ist im Programm *Rapidform*® aufgerufen. Auf der Inzisalkante ist das Koordinatensystem mit seinen drei Achsen sichtbar. Von inzisal nach apikal läuft durch den Zahn die aufgerufene YZ-Ebene. Befehlsabfolge zur Messung des x-Wertes: "measure >> distance >> point/ reference plane", es wird zuerst die Ebene, dann der zu vermessende Punkt markiert.

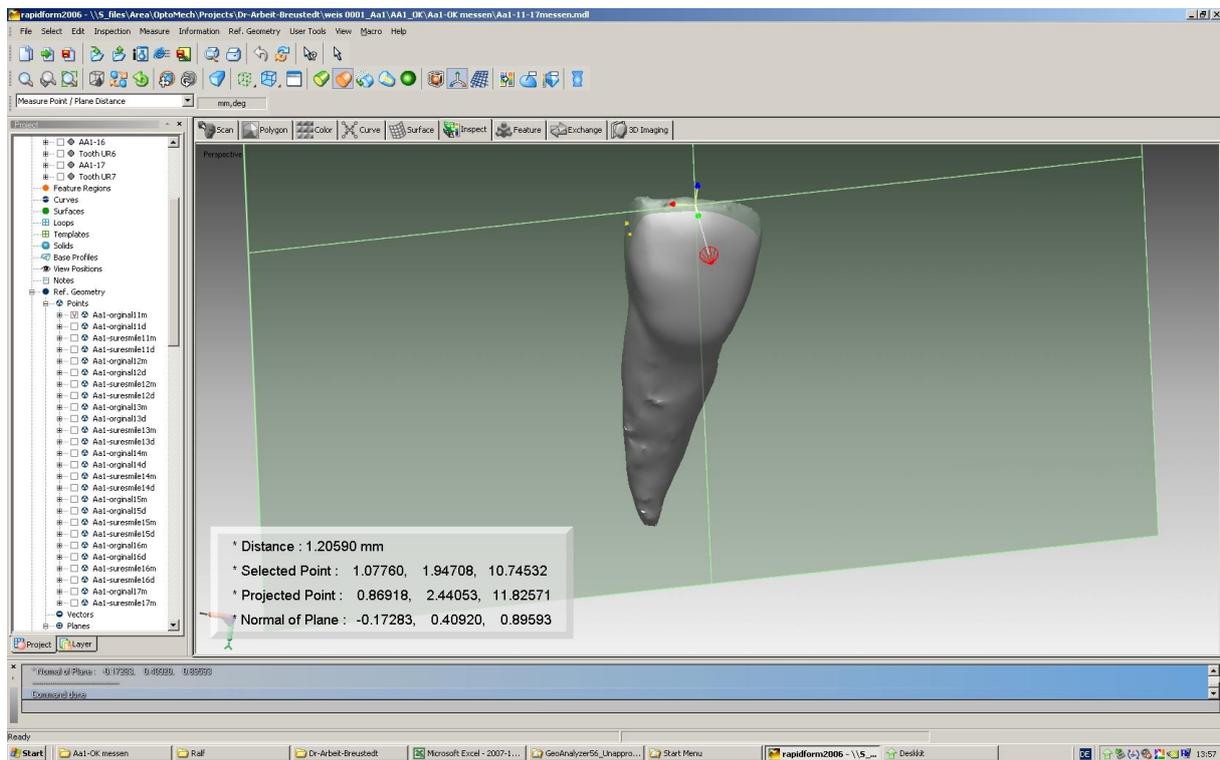


Nach Ausführung der Messung erscheint das Feld mit den Messwerten für den ausgewählten Punkt im linken unteren Bildteil.

2. Schritt: Messung des Y-Wertes: „measure >> distance >> point/reference plane“

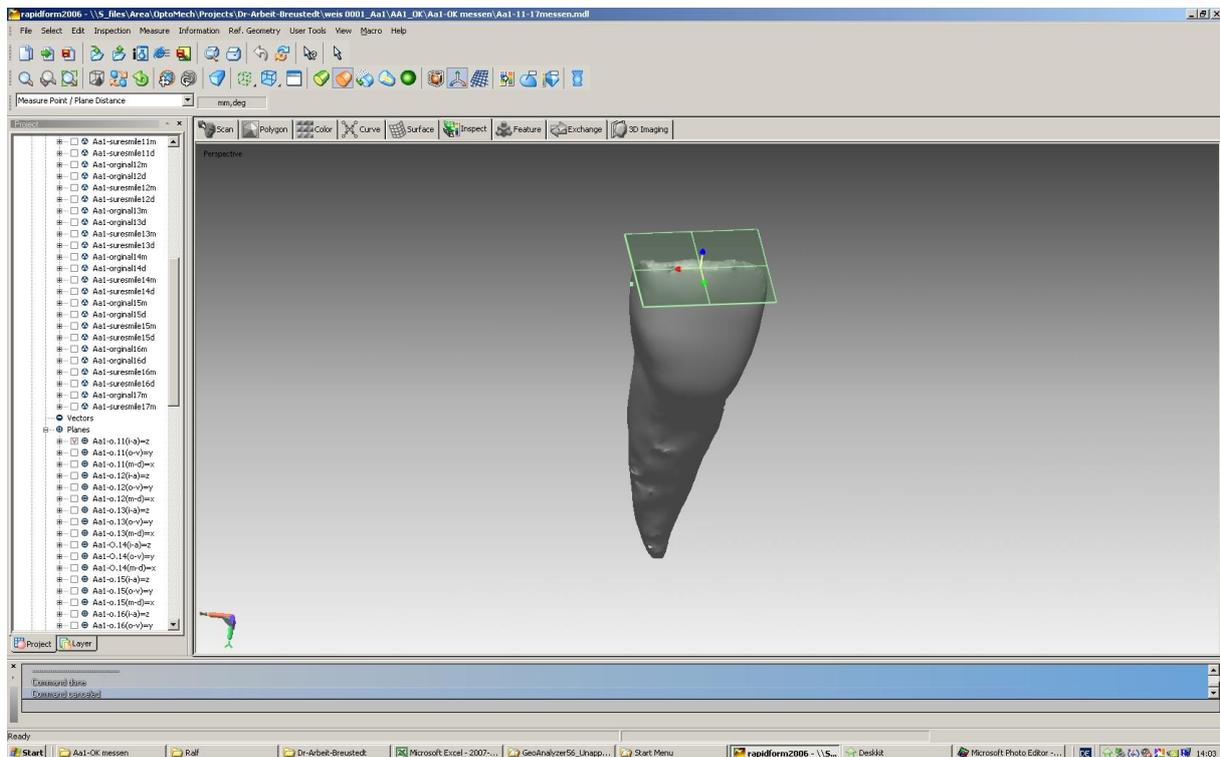


Die XZ-Ebene ist aufgerufen und läuft von mesial nach distal durch den Zahn 11. In der Bildmitte sind der zu vermessende markierte Punkt und das zugehörige Koordinatensystem des Zahnes 11 ersichtlich.

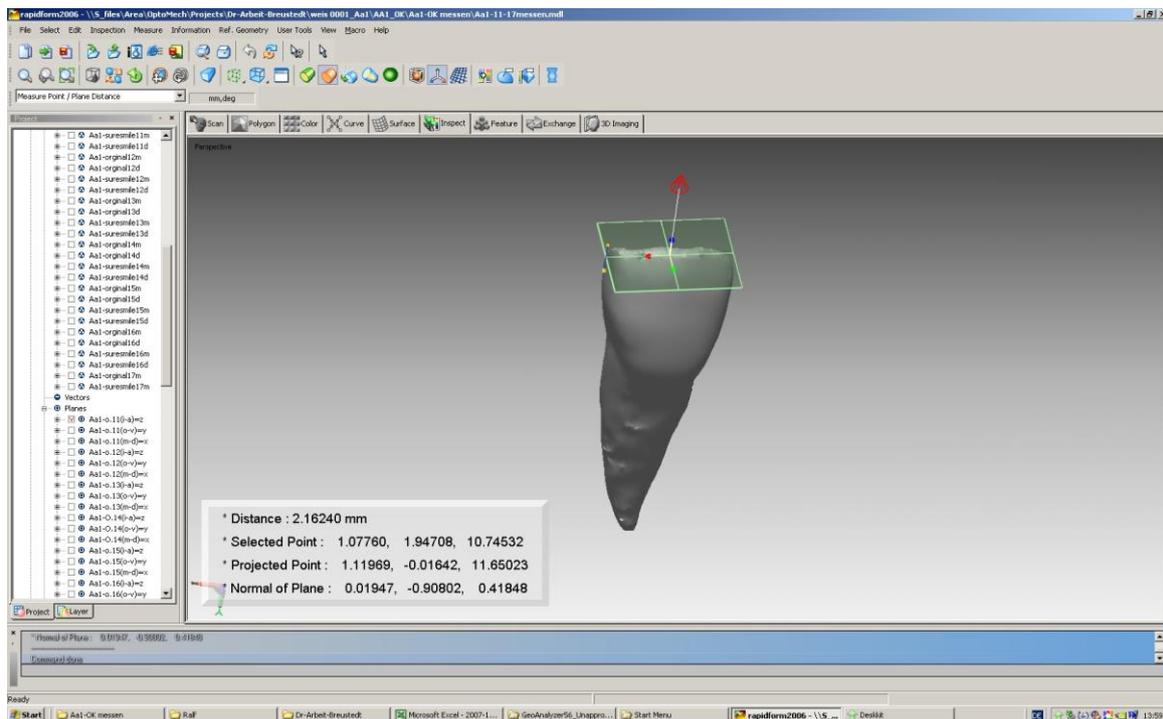


Einblendung der Messdaten. In der Mitte der Zahnkrone ist die vermessene Achse mit einem roten Punkt dargestellt.

4. Schritt: Messung des Z-Wertes: „measure >> distance >> point/reference plane“



Die Z-Ebene und das erstellte Koordinatensystem des Zahnes 11 liegen senkrecht auf der Inzisalkante, der entsprechende Punkt zur Berechnung ist markiert.

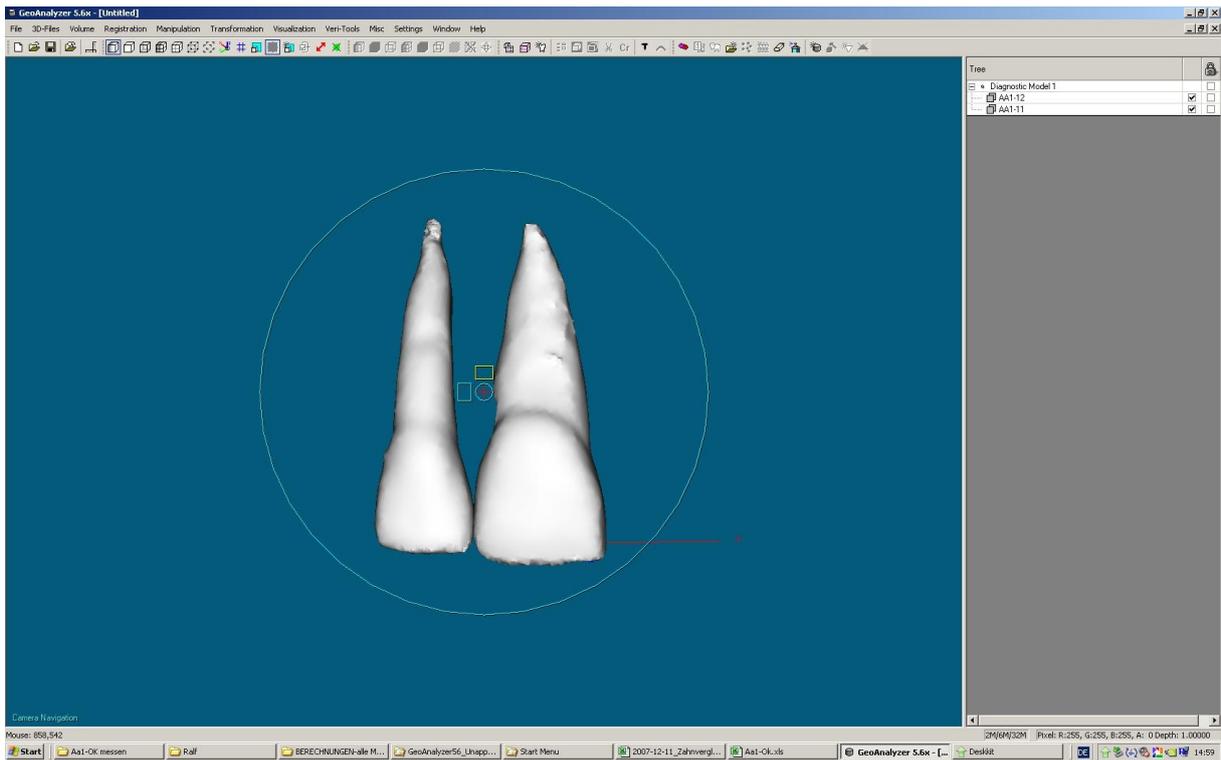


Die Z-Wert-Messung wird eingeblendet. Die Achse des berechneten Wertes wird durch den Pfeil mit der roten Spitze auf der Inzisalkante dargestellt.

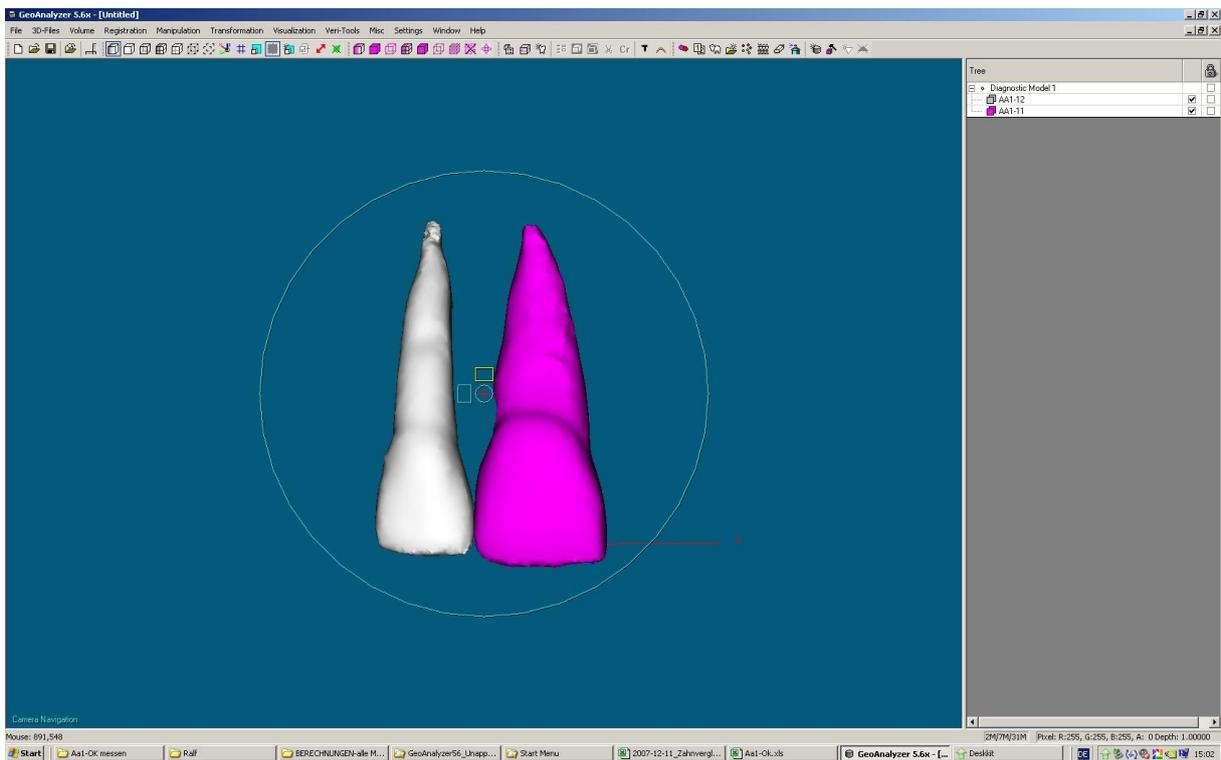
12.4 Anhang IV: Abstandsmessung mit *GeoAnalyzer*®

Untersuchung zweier benachbarter Zähne auf approximalen Kontakt am Beispiel der Zähne 11 und 12:

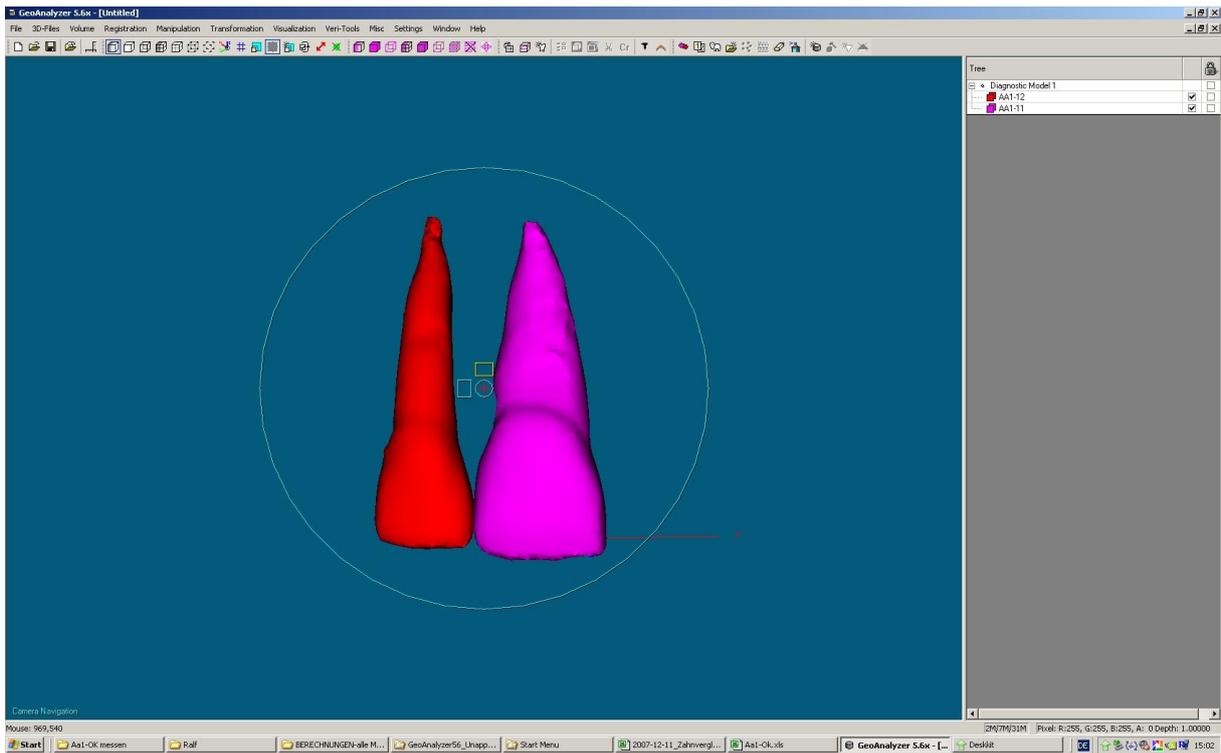
1. Schritt: Aufrufen der Zähne 11 und 12.



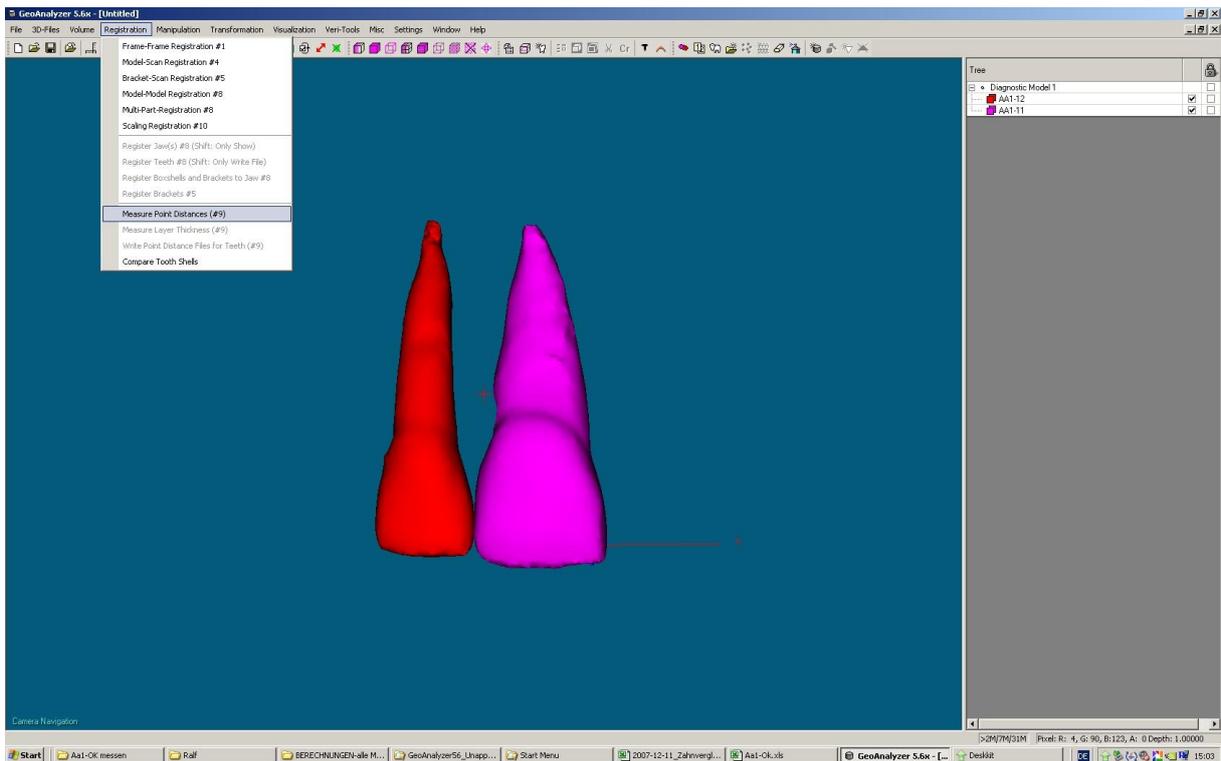
2. Schritt: Zahn 11 wird als erstes durch Anklicken markiert und erscheint pink.



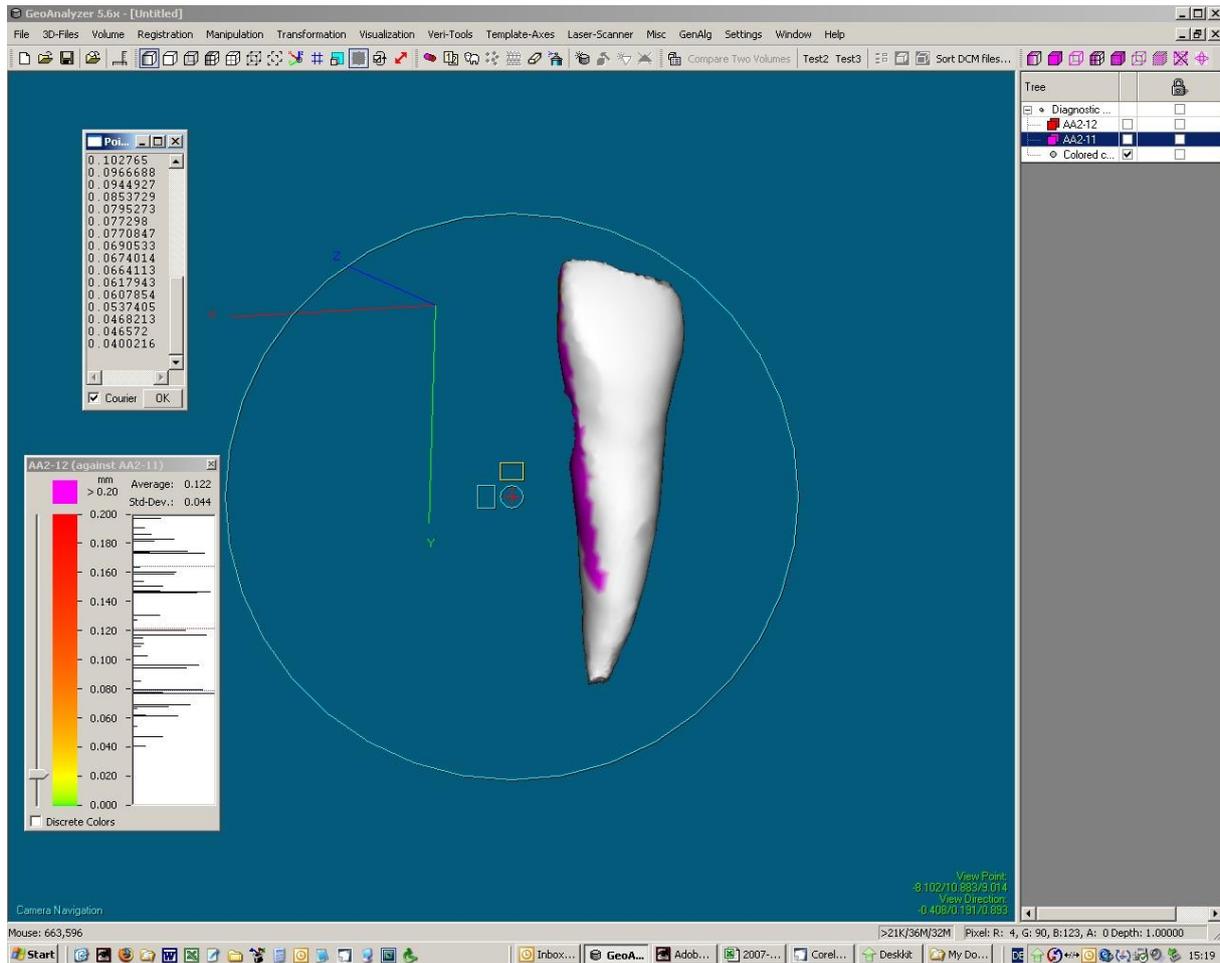
3. Schritt: Zahn 12 wird durch Anklicken und Strg-Taste rot markiert.



4. Schritt: Das Messen erfolgt durch die Befehlsabfolge „registration >> measure point distance“

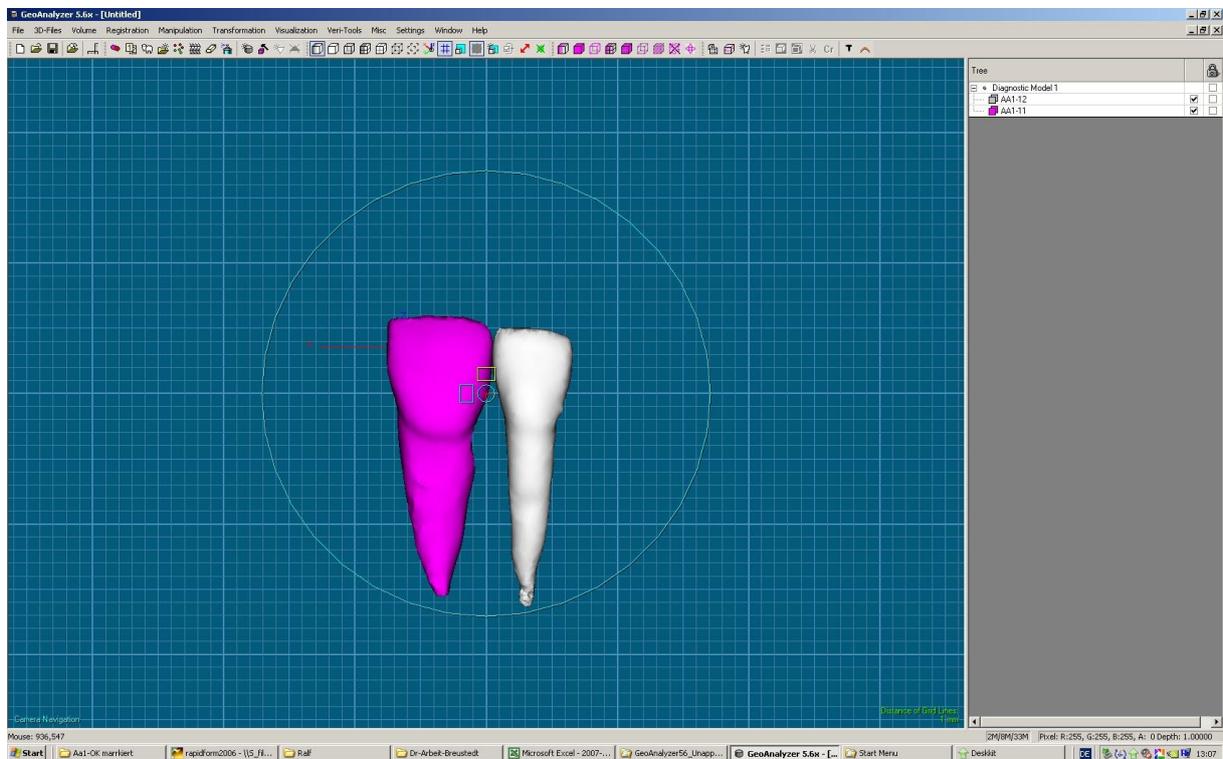


5. Schritt: Der berechnete Wert des geringsten Abstands zwischen 11 und 12 erscheint sowohl in der numerischen Tabelle links als auch in der analogen Farbskala darunter.

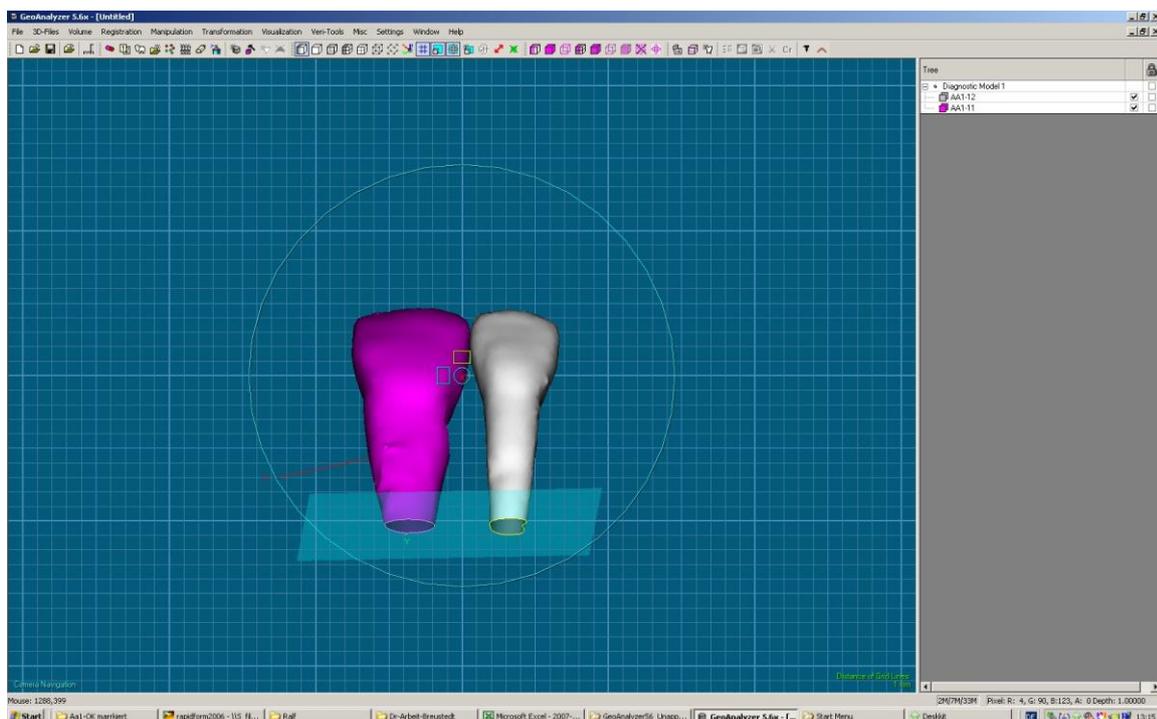


12.5 Anhang V: GeoAnalyzer® Clipping-Plane-Funktion

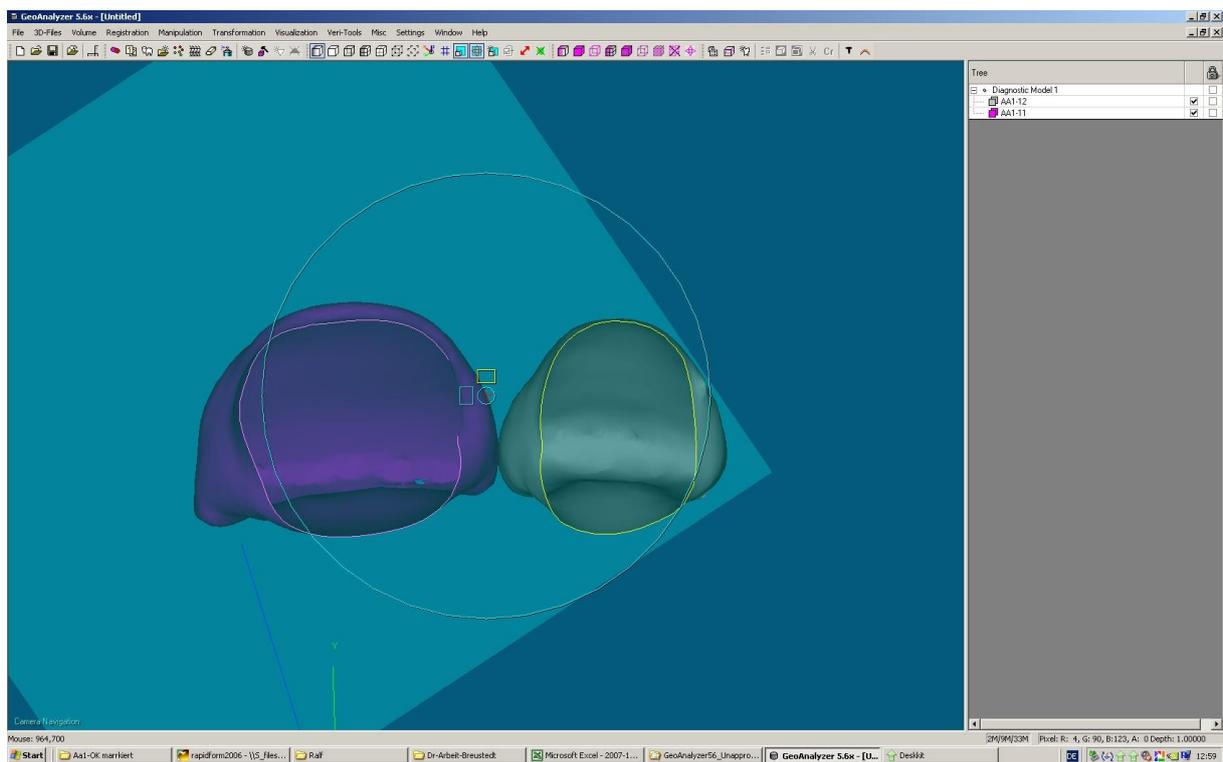
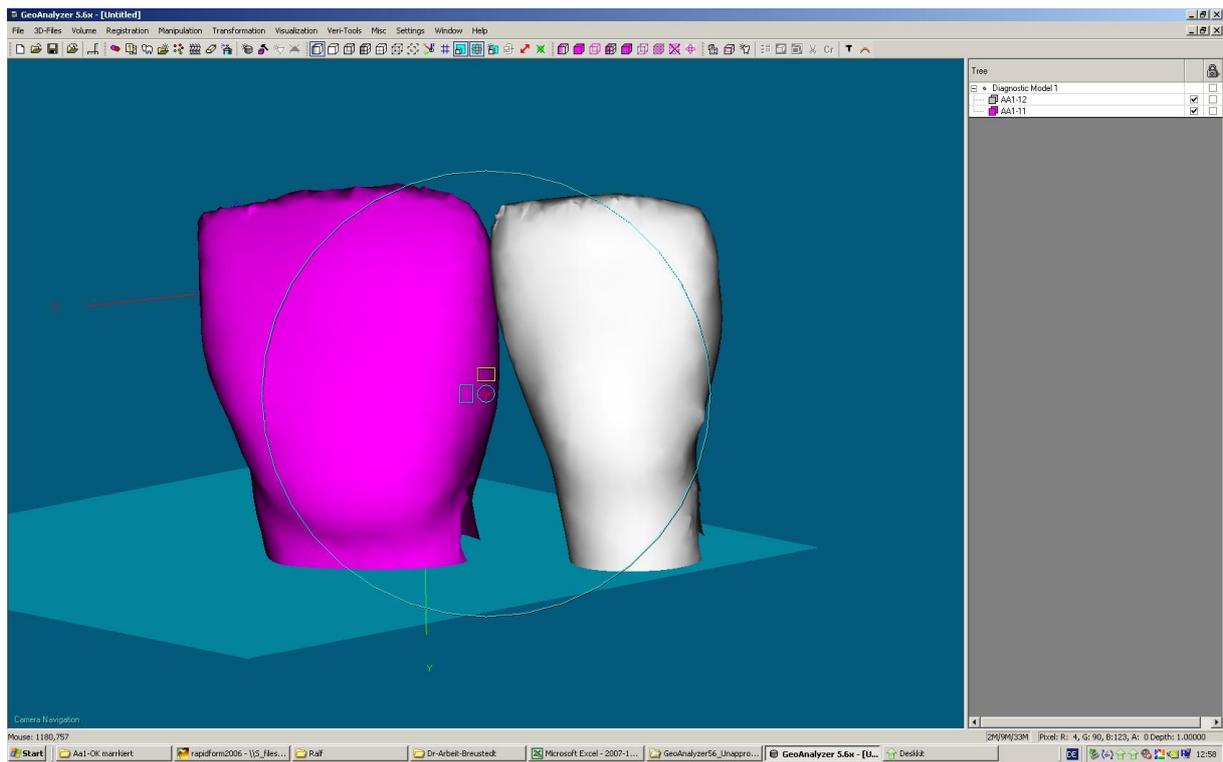
1. Schritt: Die Zähne 11 und 12 sind in GeoAnalyzer® aufgerufen und ein Raster zur visuellen Abmessung wurde darübergelegt. Zahn 11 ist farbig markiert.



2. Schritt: Die Clipping-Plane wurde über die apikalen Bereiche der Zähne gelegt und eine Innenansicht der Zähne ist von apikal möglich.

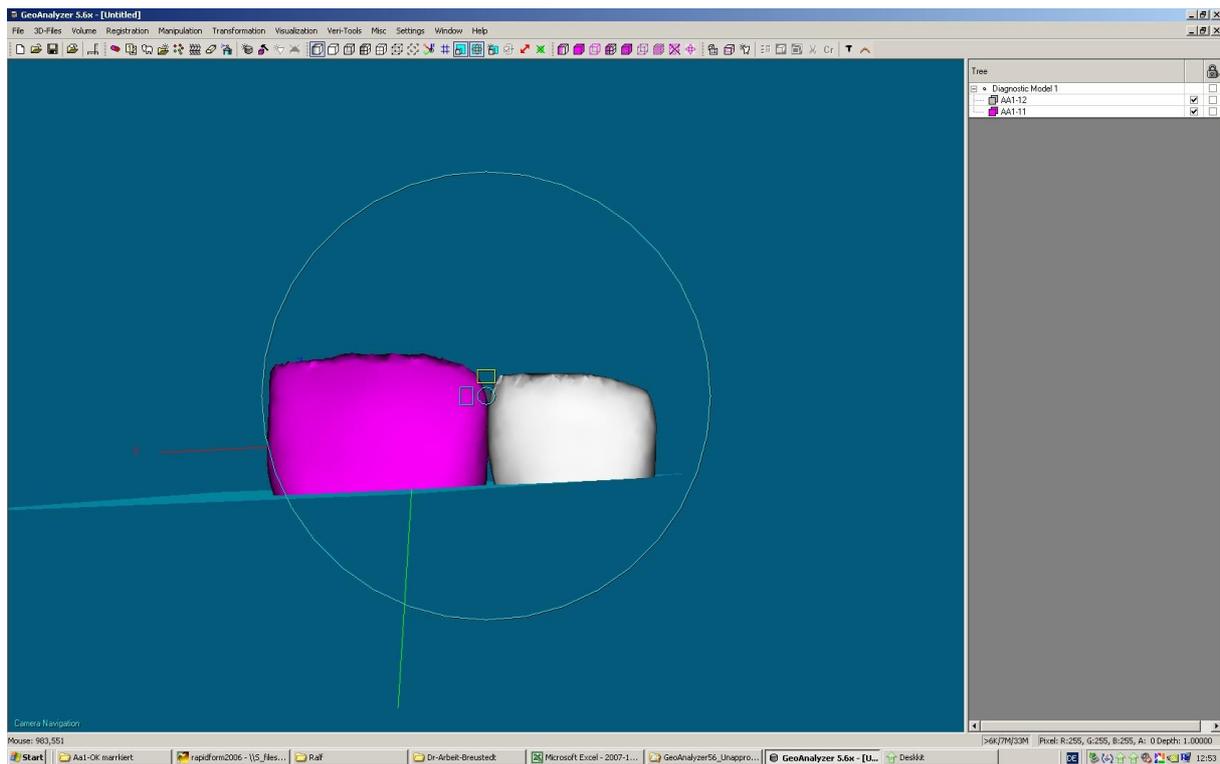


3. Schritt: Die Clipping-Plane wurde von apikal nach inzisal bewegt.

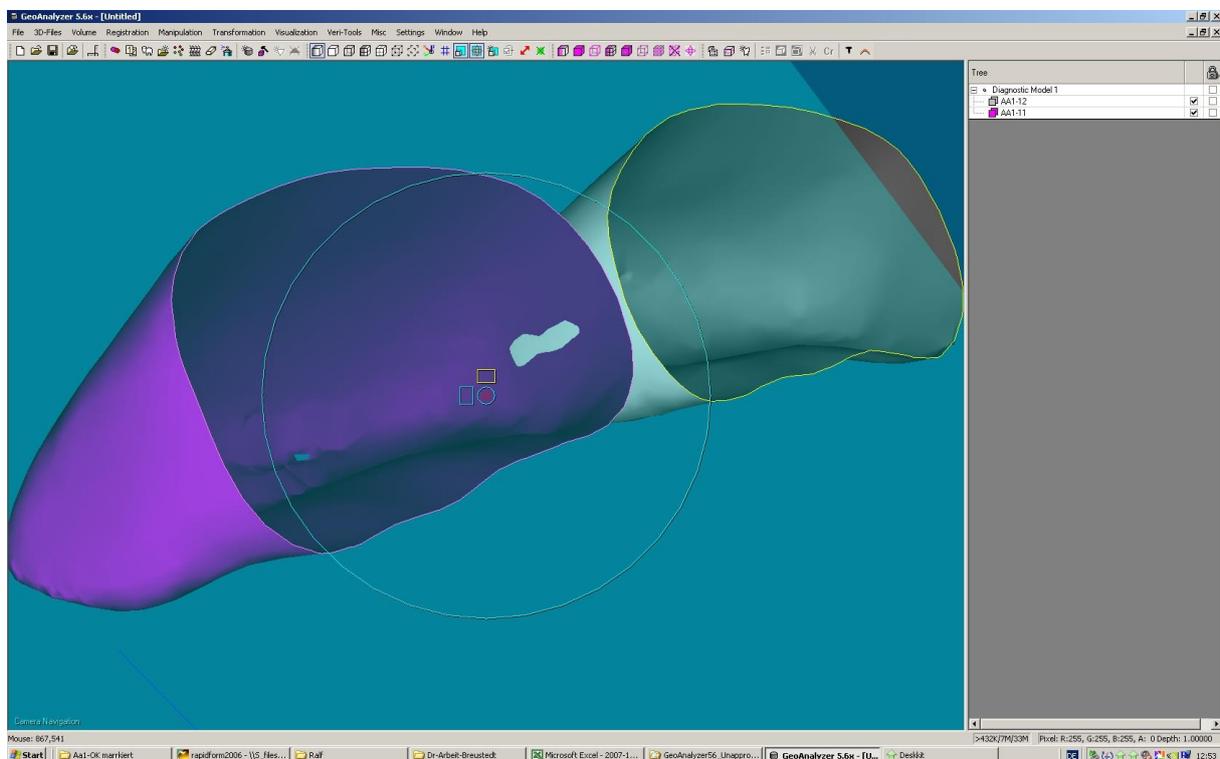


Nach entsprechender Drehung ist die Ansicht von apikal nach inzisal in die Zähne hinein möglich.

4. Schritt: Die Clipping-Plane liegt unterhalb des approximalen Kontaktbereichs.

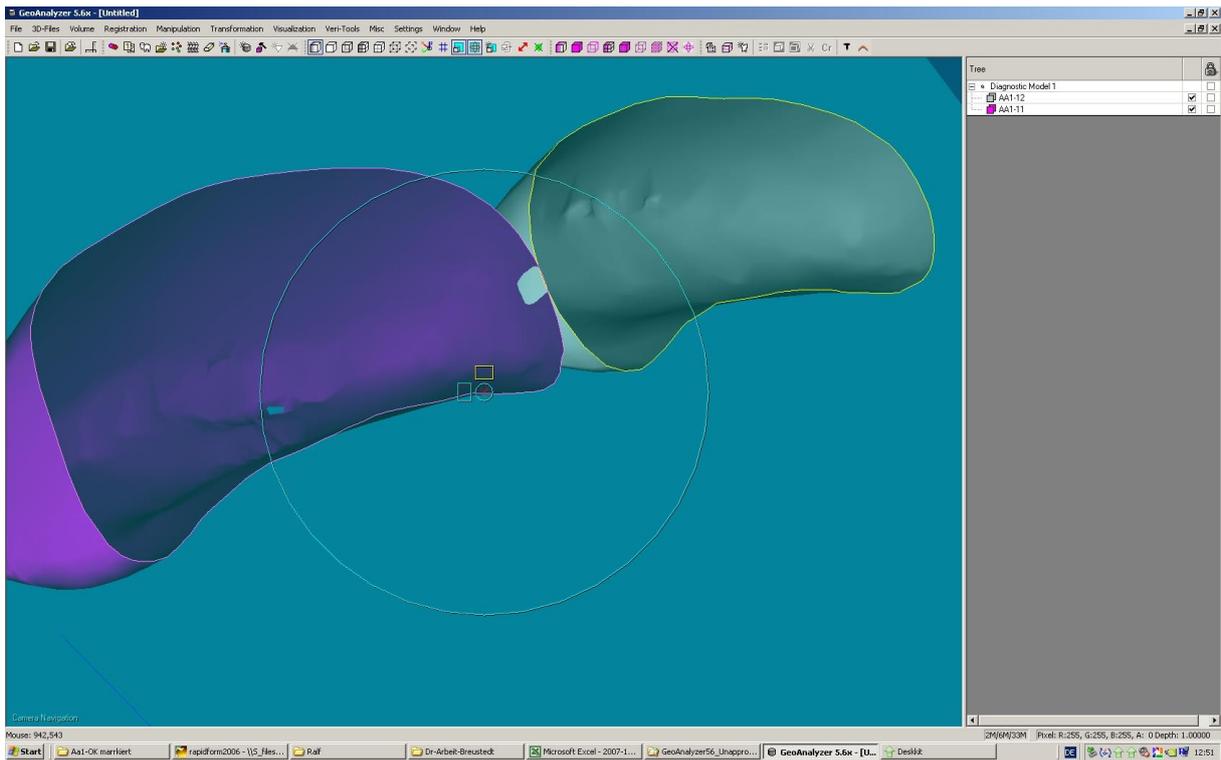


5. Schritt: Die Zähne werden gedreht, um die mögliche Kontaktfläche darzustellen.

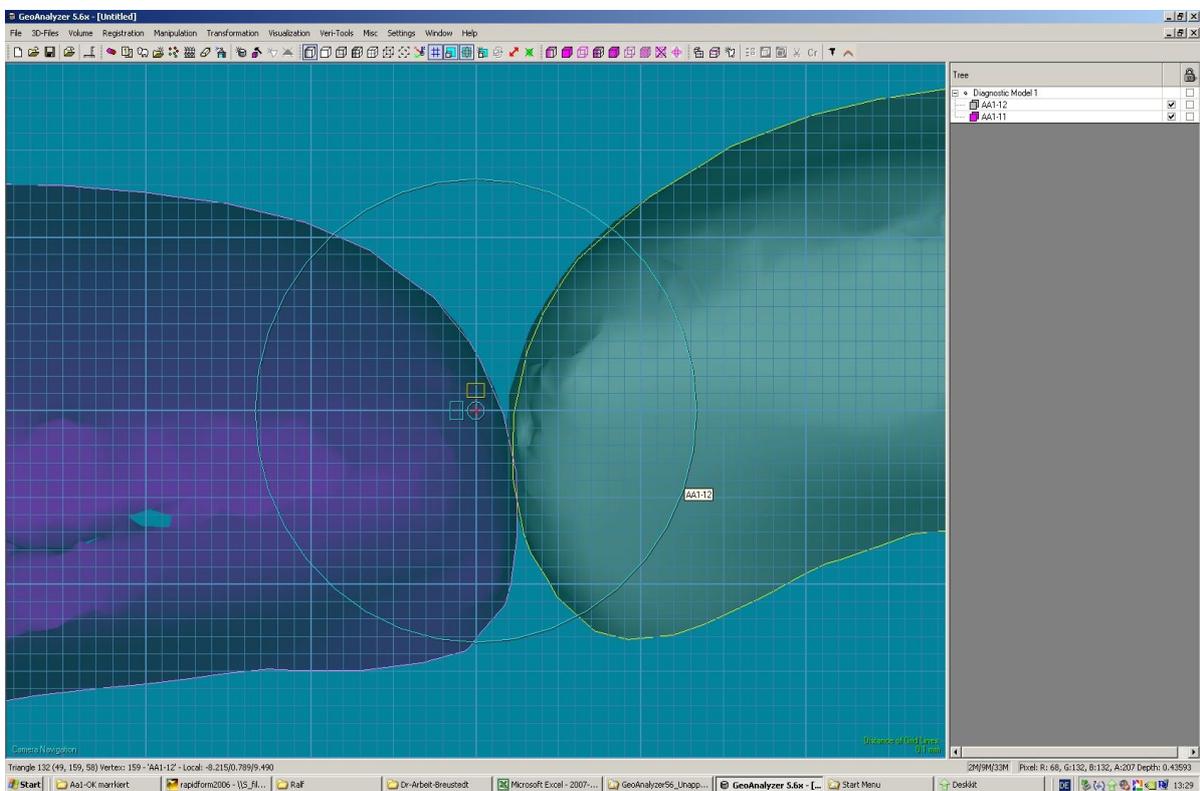


Die Ansicht in den mesialen Kontaktbereich von Zahn 12: Die Kontaktfläche zwischen den beiden Zähnen ist transparent dargestellt.

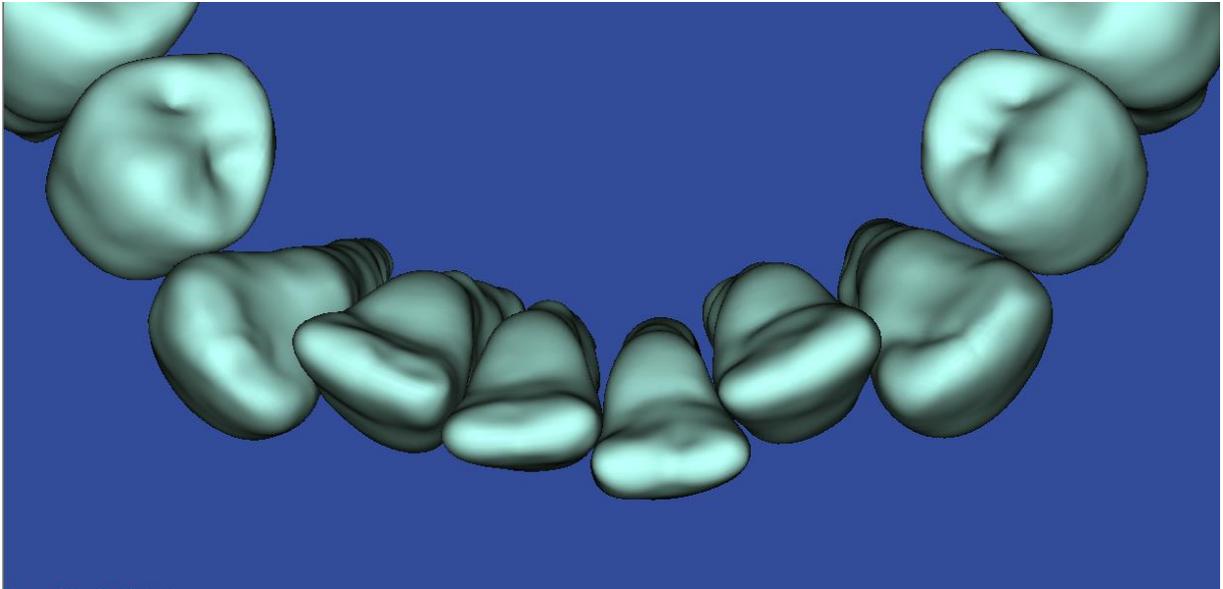
6. Schritt: Die Clipping-Plane wird bis in den Kontaktbereich verschoben.



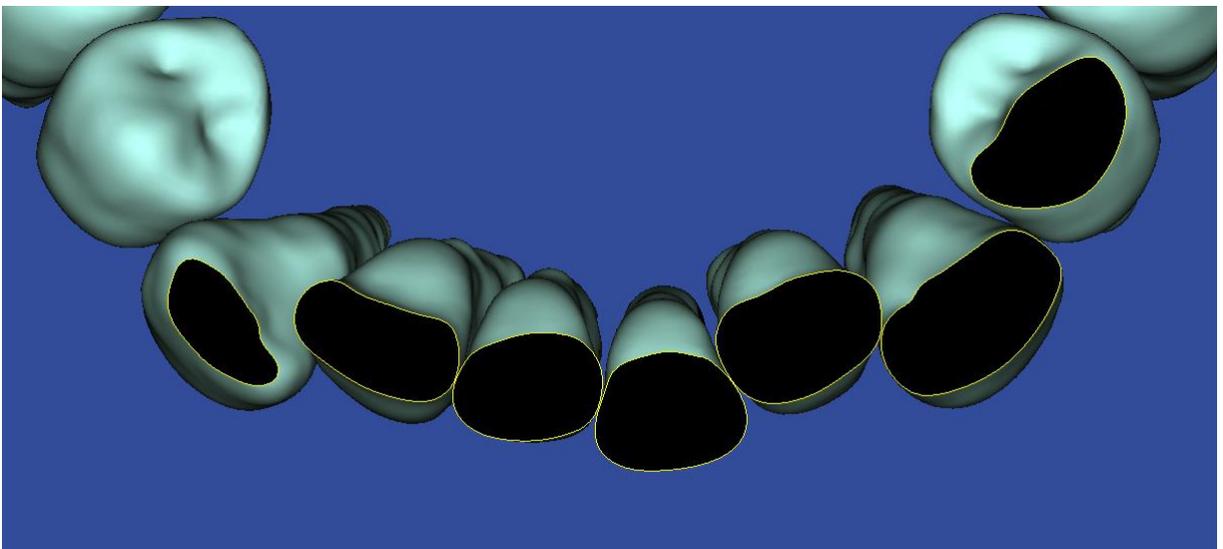
7. Schritt: Zur genauen Analyse besteht die Möglichkeit, nach beliebiger Vergrößerung Linien des Lineals darüberzulegen und Messungen vorzunehmen.



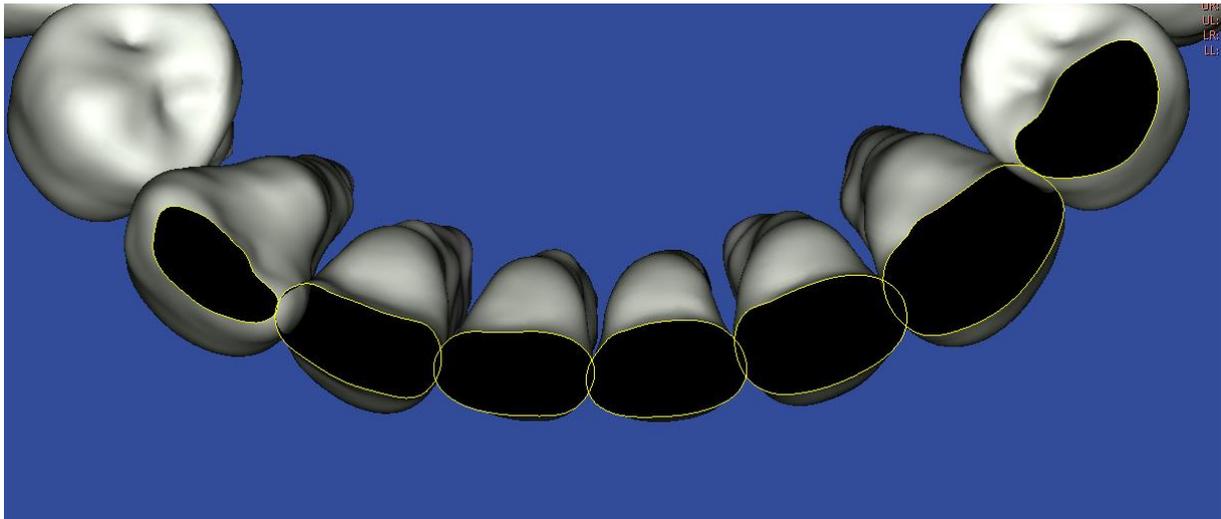
12.6 Anhang VI: Setup-Erstellung mit *SureSmile*® an einem Unterkieferzahnmodell



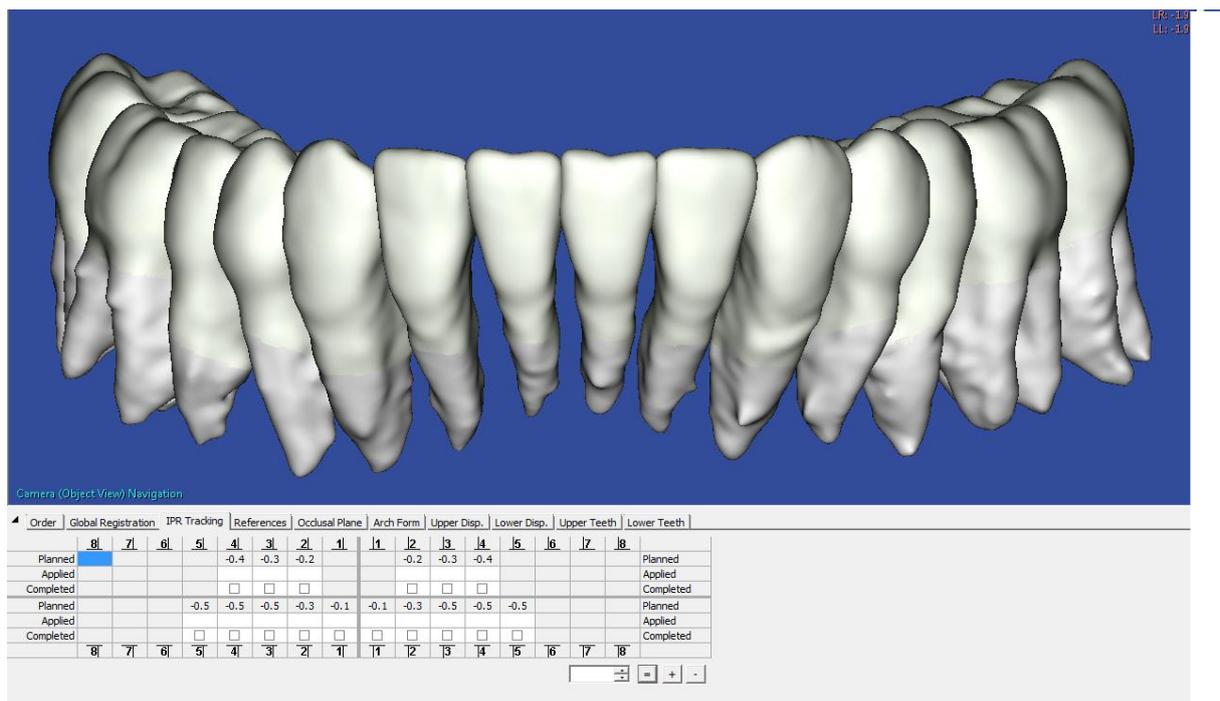
Aufsicht auf eine gescannte Unterkiefer-Engstandsituation. Diese Zähne sollen mittels eines Setups und der entsprechenden Berechnung des notwendigen Platzangebotes in einen ausgeformten Unterkieferbogen umgestellt werden.



Über die Unterkieferzähne wurde die Clipping-Plane gelegt, damit man in die Zähne in Höhe der Kontaktbereiche hineinschauen kann. Die Zähne stehen noch in Ausgangsposition.



Die Zähne der Unterkieferengstandsituation wurden nun so ausgerichtet, dass ein optimal ausgeformter Unterkieferbogen entsteht. Durch die Clipping-Plane lässt sich erkennen, dass die Zähne im Kontaktbereich ineinander hineinragen. Diese Überlappung wird von der Software berechnet und muss entfernt werden. Dies soll hier mittels approximaler Schmelzreduktion geschehen.



Von SureSmile® erstelltes Unterkiefer-Setup-Modell. Unter dem Modell ist eine Tabelle eingefügt, die geplante Schmelzreduzierungen je Zahn vorschlägt, um das Behandlungsergebnis der Abbildung zu erreichen. An den Zähnen 41 und 42 sollen 0,1 mm sowie an den Zähnen 12 und 22 sollen 0,2 mm Schmelz approximal entfernt werden. Zähne 13, 23, 32 und 42 sollen um 0,3 mm approximal reduziert werden, an den Zähnen 14 und 24 werden 0,2 mm Platz benötigt und die Zähne 33, 34, 35 sowie 43, 44 und 45 sollen um 0,5 mm approximal reduziert werden.

13 Danksagung

Ich möchte mich vielmals bei meinem Doktorvater Prof. P.-G. Jost-Brinkmann für die Vergabe des äußerst interessanten Themas meiner Dissertation und die jahrelange intensive Betreuung bedanken.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Betreuer Dr. Ralf Müller-Hartwich, der mich während der ganzen Arbeit mit konstruktiven Vorschlägen unterstützte und mir beratend zur Seite stand. All die Jahre hat er mich kontinuierlich begleitet und sich jederzeit zuverlässig um meine Anliegen gekümmert.

Des Weiteren möchte ich mich herzlich bei der Firma OraMetrix® und ganz besonders bei Friedrich Riemeier und seinem Team bedanken. Ohne die fachkompetente Unterstützung, die freundliche Überlassung des Arbeitsplatzes in der Firma OraMetrix® und die Möglichkeit der Nutzung der Software sowie die intensive Betreuung durch die Mitarbeiter des Teams wäre ein Zustandekommen dieser Arbeit nicht möglich gewesen.

Mein persönlicher Dank gilt besonders André Schwarzenbach und Ulf Lohmann, Mitarbeiter des Teams von Herrn Riemeier. Sie standen mir mit viel Geduld und ausführlichen Erklärungen stets zur Seite und auch über größere räumliche Entfernungen wurde der Kontakt per E-Mail intensiv fortgesetzt, sodass ein Abschluss der Arbeit möglich war.

Ich danke meiner Familie für die jahrelange Fürsorge, Liebe und Unterstützung sowie die unermüdliche Motivation, diese Arbeit zu vollenden.

Bei meinem Großvater, Prof. Alfred Breustedt möchte ich mich von Herzen bedanken, da er mir den Weg in die Zahnmedizin gezeigt hat und damit meinem Leben einen besonderen Sinn gegeben hat. Für ihn war die Vollendung des Studiums mit dem Abschluss der Dissertation ein besonderes Anliegen, da er selbst viele Dissertationen betreut hat und mir immer liebevoll seine Hilfe angeboten hat, die ich leider nicht mehr in Anspruch nehmen konnte.

Ganz herzlich danke ich meinem Freund, Dr. Hajo Peters, der mich stets mit viel Liebe und unermüdlichem Ehrgeiz fasziniert. Er stand mir all die Jahre liebevoll zur Seite und unterstützt mich mit Elan und Durchhaltevermögen. Unseren gemeinsamen Lebensweg haben wir bisher mit viel Freude und Enthusiasmus beschritten und unser Ziel bleibt immer, das Glück nie aus den Augen zu verlieren.

14 Lebenslauf

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

15 Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere an Eides statt, dass diese Dissertation von mir selbst angefertigt wurde und ohne unzulässige Hilfe Dritter verfasst wurde. Sie stellt auch in Teilen keine Kopie anderer Arbeiten dar. Die benutzte Literatur ist vollständig angegeben.

Ariane Breustedt