

Aus dem Institut für 3D-Dentalradiologie – MESANTIS Berlin

DISSERTATION

**Vergleich der Zahnwurzelangulationen in
konventionellen digitalen und aus 3D-Datensätzen
rekonstruierten Panoramaschichtaufnahmen**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doctor medicinae dentariae

(Dr. med. dent.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät

Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Franziska Siebald

aus Leipzig

Datum der Promotion: 22.09.2017

**Meinen lieben Eltern –
in großer Dankbarkeit für ihre Unterstützung und ihr Vertrauen.**

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	11
Abstract	13
1 Einleitung	15
1.1 Klassifikationen und Definitionen in der Kieferorthopädie	16
1.1.1 Angle-Klassifikation	17
1.1.2 „key ridge“	17
1.1.3 Sechs Schlüssel zur Normalokklusion.....	18
1.1.4 Angulation und Inklination der Zähne	20
1.2 Bildgebende Diagnostik in der Kieferorthopädie	21
1.2.1 Konventionelle Panoramaschichtaufnahme	22
1.2.2 Volumentomographie.....	25
1.2.3 Metrische Genauigkeit bildgebender Diagnostik hinsichtlich mesiodistaler Wurzelangulationen	27
1.2.4 Strahlenbelastung.....	32
2 Fragestellung	34
3 Material und Methoden	36
3.1 Allgemeine Methoden	36
3.1.1 Modelle	36
3.1.2 Patienten	39
3.2 Spezielle Methoden.....	39
3.2.1 Fehlerberechnung der Zylinderangulationen	39
3.2.2 Mesiodistale Zylinderangulationen in Abhängigkeit von der Methode.....	39
3.2.3 Bukkolinguale Zylinderangulation	45
3.2.4 Einfluss der bukkolingualen Angulationen	45
3.2.5 Einfluss der Zylinderbogenkrümmung	46
3.2.6 Einfluss der Modellposition im Röntgengerät	46
3.2.7 Fehlerberechnung der Zahnwurzelangulationen	47

3.2.8	Mesiodistale Zahnwurzelangulationen in Abhängigkeit von der Methode	47
3.2.9	Bukklinguale Zahnwurzelangulationen	49
3.3	Statistische Auswertung der erhobenen Daten	50
4	Ergebnisse	54
4.1	Fehlerberechnung der Zylinderangulationen	55
4.2	Mesiodistale Zylinderangulationen in Abhängigkeit von der Methode	55
4.3	Bukklinguale Zylinderangulationen	62
4.4	Einfluss der bukkolingualen Angulationen.....	65
4.5	Einfluss der Zylinderbogenkrümmung.....	68
4.6	Einfluss der Modellposition im Röntgengerät.....	70
4.7	Fehlerberechnung der Zahnwurzelangulationen.....	71
4.8	Mesiodistale Zahnwurzelangulationen in Abhängigkeit von der Methode.....	71
4.9	Bukklinguale Zahnwurzelangulationen.....	74
5	Diskussion	75
5.1	Diskussion der Methoden.....	76
5.1.1	Allgemeine Methoden.....	76
5.1.2	Modelle	76
5.1.3	Patienten	77
5.1.4	Statistische Methoden	77
5.2	Diskussion der Ergebnisse.....	79
5.2.1	Fehlerberechnung der Zylinderangulationen	79
5.2.2	Mesiodistale Zylinderangulationen in Abhängigkeit von der Methode.....	79
5.2.3	Bukklinguale Zylinderangulationen	82
5.2.4	Einfluss der bukkolingualen Zylinderangulation	82
5.2.5	Einfluss der Zylinderbogenkrümmung	84
5.2.6	Einfluss der Modellposition im Röntgengerät	87
5.2.7	Fehlerberechnung der Zahnwurzelangulationen	89
5.2.8	Mesiodistale Zahnwurzelangulationen in Abhängigkeit der Methode.....	89
5.2.9	Bukklinguale Zahnwurzelangulationen	92

6	Literaturverzeichnis	94
7	Anhang	101
7.1	Ergebnisse statistischer Tests	101
7.2	Danksagung	103
7.3	Lebenslauf.....	104
7.4	Eidesstattliche Erklärung.....	105

Abkürzungsverzeichnis

3D	dreidimensional
BL	bukkolingual
CAD/CAM	Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing
CBCT	Cone Beam Computerized Tomography
CT	Computertomographie
DICOM	Digital Imaging and Communications in Medicine
DVT	Dentale Volumetomographie
FOV	Field of Fiew
FRS	Fernröntgenseitbild
ICRP	International Commission on Radiological Protection
MD	mesiodistal
MSCT	Multislice Computerized Tomography
OK	Oberkiefer
OPG	Orthopantomogramm
opgsie	Analyse zur Berechnung der mesiodistalen Angulationen
PAN_3D	rekonstruierte Panoramascichtaufnahme aus 3D DVT Datensätzen
PSA	Panoramascichtaufnahme
PROG	Programm Mo, Winkelberechnungsprogramm
PSAa	konventionelle Panoramascichtaufnahme in anteriorer Modellposition
PSAi	konventionelle Panoramascichtaufnahme in idealer Modellposition
PSAw	konventionelle Panoramascichtaufnahme in gewinkelter Modellposition
UK	Unterkiefer

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bukkolinguale und mesiodistale Zylinderangulationen	38
Tabelle 2: Technische Daten des KaVo 3D eXam® [Kavo Dental GmbH 2009]	40
Tabelle 3: Methodenfehler nach Dahlberg δ , Zylinderangulationen	55
Tabelle 4: Reliabilitätskoeffizienten Cronbach´s Alpha, Zylinderangulationen	55
Tabelle 5: Deskriptive Statistik durchschnittlicher mesiodistaler Zylinderangulationen...	56
Tabelle 6: Maß der Abweichungen der mesiodistalen Zylinderangulationen zur Referenz, Modell A	58
Tabelle 7: Maß der Abweichungen der mesiodistalen Zylinderangulationen zur Referenz, Modell B	59
Tabelle 8: Korrelationskoeffizient r nach Pearson, Signifikanz (2-seitig), Zylinder N=56	60
Tabelle 9: t-Test bei gepaarten Stichproben mesiodistaler Zylinderangulationen.....	60
Tabelle 10: Effektstärke Cohen´s d mesiodistaler Zylinderangulationen	60
Tabelle 11: Deskriptive Statistik durchschnittlicher bukkolingualer Zylinderangulationen.	62
Tabelle 12: Maß der Abweichungen bukkolingualer Zylinderangulationen, Modelle A und B	63
Tabelle 13: Korrelationen r nach Pearson, Signifikanz (2-seitig), Zylinder N=56	64
Tabelle 14: t-Test bei gepaarten Stichproben bukkolingualer Zylinderangulationen.....	64
Tabelle 15: Effektstärke Cohen´s d bukkolingualer Zylinderangulationen	64
Tabelle 16: Methodenfehler nach Dahlberg δ , Zahnwurzelangulationen	71
Tabelle 17: Summen absoluter mesiodistaler (3D) bzw. bukkolingualer Zylinderangulationen (3D), Summen absoluter Differenzen 3D-reko PSA, 3D-PSA, Patienten 1, 2, 3, Oberkiefer, Unterkiefer	73
Tabelle 18: Absolute Differenzen mesiodistaler Zylinderangulationen, Modell A.....	101
Tabelle 19: Absolute Differenzen mesiodistaler Zylinderangulationen, Modell B.....	102

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Krafteinwirkung bei mesioangulierten Sechsjahrmolaren [Risse 2005].....	18
Abb. 2: Angulation bei vestibulärer Ansicht (links), Inklination bei approximaler Ansicht (rechts) [Daskalogiannakis 2003]	20
Abb. 3: Technik der Tomographie mit drei Rotationszentren nach Paatero [Graber 1967].....	22
Abb. 4: Prinzip der Panoramaschichttechnik [Rother 2001]	23
Abb. 5: Schichtebene konventioneller Panoramaschichtaufnahmen [Fuhrmann 2013]	23
Abb. 6: Positionen zur Schichtebene und Abbildungsgenauigkeit, Position korrekt, anterior, posterior [Schwenzer, Ehrenfeld 2000]	24
Abb. 7: Fächerstrahl der CT (links) und Kegelstrahl der DVT (rechts) [Sukovic 2003]....	26
Abb. 8: Abbildungsschärfe mit Halbschattendarstellung (links) und Objektvergrößerung (rechts) [Schwenzer, Ehrenfeld 2000]	27
Abb. 9: Objektverzerrung [Schwenzer 2000]	28
Abb. 10: Technische Zeichnungen zur Festlegung der Tangentenebenen der Zylinderpunkte	37
Abb. 11: Modell A mit Quadranten 1-4, Modell B mit Quadranten 5-8.....	37
Abb. 12: Dreidimensionale Darstellung, Modell A, <i>Volume Render Mode</i>	40
Abb. 13: Ausrichtung, Modell A, horizontale, sagittale und okklusale Ebene, <i>Volume Render Mode</i>	41
Abb. 14: Zylinderbogenebene (braune Kurve) in der Schnittebene (rote Linie), Panoramaansicht des Zylinderbogens mit Winkelmessung, <i>Arch Section Mode</i>	41
Abb. 15: Zylinder mit mesiodistalen Angulationen, oberer Block, Modell A.....	42
Abb. 16: Zylinder mit mesiodistalen Angulationen, unterer Block, Modell A.....	42
Abb. 17: Rekonstruierte Panoramaschichtaufnahme, Modell A	43
Abb. 18: Festlegung der Zylinderachsen, Analyse opgsie, FR-Win.....	43
Abb. 19: Konventionelle Panoramaschichtaufnahme, Modell A, ideale Position.....	43
Abb. 20: Konventionelle Panoramaschichtaufnahme, Modell B, ideale Position.....	44
Abb. 21: Konventionelle Panoramaschichtaufnahme, Modell A, anteriore Position	44
Abb. 22: Konventionelle Panoramaschichtaufnahme, Modell B, anteriore Position	44

Abb. 23: Konventionelle Panoramaschichtaufnahme, Modell A, angulierte Position.....	44
Abb. 24: Konventionelle Panoramaschichtaufnahme, Modell B, angulierte Position.....	44
Abb. 25: Zylinderbogenebene (braun), cross section (grün), bukkolinguale Winkelmessung, <i>Arch Section Mode</i>	45
Abb. 26: Ausrichtung eines Schädels in Sagittal- und Frontalansicht, <i>Volume Render Mode</i>	47
Abb. 27: Rekonstruierte PSA, Oberkiefer, Unterkiefer, mesiodistale Winkel, <i>Arch Section Mode</i>	48
Abb. 28: Frontalansicht eines Schädels mit Schnittebene (rot), Schichtebene (braun) in Schnittebene, rekonstruierte PSA, <i>Arch Section Mode</i>	48
Abb. 29: Rekonstruierte PSA, Oberkiefer, Unterkiefer, Okklusionsebenen, Zahnachsen, FR-Win	49
Abb. 30: Konventionelle PSA, Okklusionsebenen, Zahnachsen, FR-Win	49
Abb. 31: Schnittebenen mit Kronenmitten, Oberkiefer, Unterkiefer, cross section Zahn 11 und 47, bukkolinguale Winkelmessung, <i>Arch Section Mode</i>	50
Abb. 32: Effektstärke Cohen´s d [Tran 2011].....	52
Abb. 33: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus, Modelle A und B, Patienten 1, 2 und 3.....	54
Abb. 34: Fehlerbalkendiagramme, Maximal-, Mittel- und Minimalwerte, Referenz (rot), Durchgänge 1-5 (schwarz)	56
Abb. 35: Box-Plot-Diagramm, Häufigkeitsverteilungen der mesiodistalen Zylinderangulationen	57
Abb. 36: Bland-Altman-Plots, Verzerrung (Linien), Übereinstimmungsgrenzen (gestrichelte Linien)	61
Abb. 37: Fehlerbalkendiagramm, Maximal-, Mittel- und Minimalwerte, Referenz (rot), Durchgänge 1-5 (schwarz)	62
Abb. 38: Box-Plot-Diagramm, Häufigkeitsverteilung der bukkolingualen Zylinderangulationen	62
Abb. 39: Bland-Altman-Plot, Verzerrung (Linie), Übereinstimmungsgrenzen (gestrichelte Linien)	64
Abb. 40: Liniendiagramme, durchschnittliche mesiodistale Differenzen, Zylinder 1-7, oberen Blöcke, Modelle A und B, Verfahren reko PSA (rot), 3D (grün), PSAi (lila).....	65

Abb. 41: Liniendiagramme, durchschnittliche mesiodistale Differenzen, Zylinder 1-7, untere Blöcke, Modelle A und B, Verfahren reko PSA (rot), 3D (grün), PSAi (lila).....	66
Abb. 42: Summen der absoluten Abweichungen mesiodistaler Angulationen, Summen der bukkolingualen Angulationen aller Zylinder, obere Quadranten 1, 2, 5, 6, untere Quadranten 3, 4, 7, 8, Modelle A und B, Verfahren reko PSA (rot), 3D (grün), PSAi (lila)	67
Abb. 43: Streudiagramme mit Trendlinien, mesiodistale Differenzen, Referenzen, Modelle A und B	68
Abb. 44: Darstellung der durchschnittlichen Abweichungen mesiodistaler Zylinderangulationen der 7 Zylinder aus 8 Quadranten, Verfahren 3D, reko PSA, PSAi	69
Abb. 45: Liniendiagramme, Summen absoluter Abweichungen mesiodistaler Angulationen, Zylinder 1-7, Quadranten 1, 2, 5, 6 bzw. 3, 4, 7, 8, Modelle A und B, Verfahren reko PSA (rot), 3D (grün), PSAi (lila), mittlere Referenzen bl (Balken blau) und md (Balken türkis)	70
Abb. 46: Liniendiagramme, durchschnittliche mesiodistale Differenzen, Zylinder 1-7, Quadranten 1,2,5,6 bzw. 3,4,7,8, Modelle A und B, Verfahren reko PSA (rot), 3D (grün), PSAi (lila).....	70
Abb. 47: Liniendiagramme, durchschnittliche mesiodistale Differenzen, Zylinder 1-7, Quadranten 1, 2, 5, 6 bzw. 3, 4, 7, 8, Modelle A und B, Verfahren PSAi (blau), PSAa (rot), PSAw (grün), mittlere Referenzen bl (Balken blau) und md (türkis).	71
Abb. 48: Absolute mesiodistale Zahnwurzelangulationen, Patient 1, 2, 3, Oberkiefer, Unterkiefer, reko PSA (lila), PSA (orange), 3D (blau)	72
Abb. 49: Liniendiagramme, absolute mesiodistale Angulationen, Patienten 1 (blau), 2 (rot), 3 (grün), Referenzwerte der Zylinderangulationen (grau gestrichelt), Modelle A und B	74
Abb. 50: Liniendiagramme, absolute bukkolinguale Angulationen, Patienten 1 (blau), 2 (rot), 3 (grün), maximale und minimale Referenzen (grau gestrichelt), Modelle A und B.....	74

Zusammenfassung

Problemstellung: In dieser Studie sollte die Genauigkeit der mesiodistalen Zahnwurzelangulationen aus 3D DVT-Datensätzen, sowie rekonstruierten- und konventionellen digitalen PSA gegenübergestellt und hinsichtlich der Einflussfaktoren bukkolinguale Angulation, Stärke der Zahnbogenkrümmung und Positionierungsfehler untersucht werden. Zudem wurde die Erfassung von bukkolingualen Zahnwurzelangulationen aus 3D DVT Datensätzen geprüft. **Material und Methode:** Zunächst wurden zwei Modelle mit insgesamt 56 Zylinderbohrungen mit festgelegten Angulationen in mesiodistaler und bukkolingualer Richtung angefertigt und nach röntgenopaker Markierung mittels des dentalen Volumentomographen KaVo 3D eXam und des konventionellen digitalen Orthopantomographen Orthophos DS Ceph Plus radiologisch untersucht. Die Rekonstruktion der Panoramadarstellung aus den 3D DVT Datensätzen und die Ermittlung der Angulationen der DVT Aufnahmen erfolgte mittels der 3D Imaging Software Invivo 5 bzw. der Analyse opsie der Diagnostiksoftware FR-Win für die mesiodistalen Angulationen der rekonstruierten und konventionell digitalen PSA. Weiterhin wurden vorhandene Dentale Volumentomographien und konventionelle Panoramaschichtaufnahmen von drei Patienten analog der Modelle vermessen und unter Berücksichtigung der Erkenntnisse der Modelluntersuchungen interpretiert. **Ergebnisse:** Die beiden Methoden der dreidimensionalen Röntgentechnik aus den direkten 3D Messungen und den rekonstruierten Panoramadarstellungen liefern hochgenaue Ergebnisse hinsichtlich der mesiodistalen, sowie der bukkolingualen Angulationen der Zylinder für die untersuchten Modelle. Die Darstellungen der konventionellen Panoramaschichtaufnahmen weisen erhöhte Abweichungen der ermittelten mesiodistalen Zylinderneigungen in Abhängigkeit der Höhe der bukkolingualen Winkel, sowie der Modellpositionen während der Röntgenaufnahmen auf. Der Einfluss der Zylinderbogenkrümmung konnte in dieser Studie aufgrund des komplexen Versuchsaufbaus nicht hinreichend geklärt werden. Die Ergebnisse der Patienten zeigen, analog zu den Modellvermessungen, eine hohe Übereinstimmung der rekonstruierten PSA mit denen der direkten Messungen der 3D DVT Datensätze (Goldstandard). Die Abweichungen des konventionellen Verfahrens sind hingegen deutlich höher. Die Begründungen der Darstellungsungenauigkeiten im Rahmen der Betrachtungen der o.g. Einflussfaktoren lassen sich auf die Messungen der Patienten gut übertragen. **Schlussfolgerungen:** Die Analyse der mesiodistalen

Zylinderangulationen aus 3D DVT Datensätzen und den daraus rekonstruierten Panoramadarstellungen sind der konventionellen Panoramafilmaufnahme deutlich überlegen. Die direkte Bestimmung der bukkolingualen Zahnwurzelangulationen aus den 3D DVT Datensätzen bietet einen zuverlässigen Mehrwert im Rahmen der kieferorthopädischen Diagnostik.

Schlagerörter: DVT, rekonstruierte PSA, mesiodistale Angulation, bukkolinguale Angulation, Inklination

Abstract

Introduction: The purpose of this academic research is to define the accuracy of mesiodistal angulation of the tooth root from 3D DVT datasets and reconstructed, as well as conventional digital PSA, confronted and being evaluated on the following influencing factors: buccolingual angulation, amount of jaw curvature and positioning errors. Furthermore, 3D DVT datasets have been evaluated to identify if the buccolingual angulation of the tooth roots have been captured in the data. **Materials and methods:** In the first instance, two models with a total of 56 cylindrical drillings and set angulations in mesiodistal and buccolingual direction were custom built. After the application of a radiopaque marker these models have undergone a radiological examination using both, the digital volume tomography unit (CBCT) KaVo 3D eXam, as well as a conventional digital panoramic radiograph Orthophos DS Ceph Plus. The reconstruction of the panorama image from the 3D DVD datasets and the determination of the angulations of the DVT images was done using the 3D imaging software Invivo 5, as well as by analyzing the diagnostic software FR Win for the mesiodistal angulations of reconstructed and conventional digital PSA. Furthermore, existing dental volume tomography data and conventional panorama tomography images of three patients were measured and, with simultaneous consideration of the results of the model examinations, interpreted. **Results:** Both methods of the three-dimensional radiological examination, from the direct 3D measurement and the reconstructed panorama display, deliver high-precision results with regards to the mesiodistal as well as the buccolingual angulations of the cylinder of the models examined. The representation of the conventional panorama tomography show considerable deviations of the measured mesiodistal cylinder angle, depending on the level of the buccolingual angle and on the position of the model at the time of taking the X-ray image. Due to the complex nature of the experimental set up, the effect of the cylinder curvature could not sufficiently be explained. The results of the patients show, in keeping with data from model measurements, a high accordance of the reconstructed PSA with the direct measurements of the 3D DVT data sets (gold standards). The justifications of the imprecisions of the presentations in the course of the observations of the mentioned influencing factors can well be transferred on the measurements of the patients. **Conclusions:** The analysis of the mesiodistal cylinder angulation from 3D DVD datasets and the resulting panorama images is far superior to the conventional

panorama tomography. The direct determination of the buccolingual angulations of the tooth root from 3D DVT datasets offers a reliable added value within the scope of orthodontic diagnostic.

Key words: DVT, reconstructed PSA, mesiodistal angulation, buccolingual angulation, inclination

1 Einleitung

Die Kieferorthopädie als Fachdisziplin der Zahnheilkunde beschäftigt sich mit dem Erkennen, Verhüten und Behandeln von Zahn- und Kieferfehlstellungen. [Daskalogiannakis 2003] Die englische Bezeichnung „orthodontics“ leitet sich aus dem Griechischen, von den Wörtern „orthos“ (= gerade, richtig) und odontos (= des Zahnes) ab. Doch die Ziele der kieferorthopädischen Therapie beinhalten wesentlich mehr als gerade, ordnungsgemäß stehende Zähne. In der Therapie von Gebissfehlbildungen und Zahnstellungsanomalien wird unter durch skelettale und vor allem dentoalveoläre Korrekturen mittels kieferorthopädischer Apparaturen das erstrebenswerte Ziel des eugnathen Gebisses im Sinne eines morphologischen und funktionellen Optimums verfolgt. [Schopf 2000]

Nach Schopf ist dieses gekennzeichnet durch die vollständige Anzahl der Zähne mit normalen Zahnformen, harmonisch geformte Zahnbögen ohne Engstände oder Lücken, korrekte Größe und Form der Kieferbasen mit optimaler Einlagerung in den Schädel, Übereinstimmung der Kiefermitten, eine ungehinderte statische und dynamische Okklusion, eine regulär vertikale und horizontale Frontzahnstufe, sowie eine korrekte sagittale und vertikale Relation der Kieferbasen und Zahnreihen zueinander. [Schopf 2000] Somit betrachtet die Kieferorthopädie das gesamte stomatognathe System mit zahlreichen Messgrößen, die im Rahmen der individuellen Norm des Patienten in einer gewissen Verhältnismäßigkeit zu einander stehen.

Professor Asbjörn Hasund folgend, sollte bei Beurteilung der klinischen Situation stets mit den absoluten Werten einer „Norm“ verglichen, diese jedoch nicht zwingend als Ziel angestrebt werden, um unter Berücksichtigung der individuellen Gegebenheiten und Zusammenhänge des Patienten ein stabiles Behandlungsergebnis zu erreichen. [Segner, Hasund 2003]

Neben der Fernröntgenseitenaufnahme (FRS) für die kephalometrische Analyse des Patientenschädels in der Mediansagittalebene gilt seit vielen Jahrzehnten das Orthopantomogramm zur Erfassung der Anzahl, Lage, Größe und Form von Zähnen und Zahnkeimen, sowie deren mesiodistale Orientierung in den Kiefern als Standardaufnahme der röntgenologischen Diagnostik in der Kieferorthopädie. Zusätzlich bietet diese Panoramadarstellung Informationen über den Zustand der Parodontien und Kiefergelenke bzw. die knöchernen Verhältnisse der Kiefer. Allerdings kommt es bei den konventionellen Verfahren durch die Projektion von

hintereinanderliegenden dreidimensionalen anatomischen Strukturen auf eine zweidimensionale Abbildungsfläche zur Summation der Darstellungen (Summationseffekt) mit der Gefahr von Fehlinterpretationen bei der Auswertung. [Fuhrmann 2013] Des Weiteren ergeben sich durch unterschiedliche Abstände der zu fokussierenden Objekte zur Film- bzw. Sensorebene verschiedene Vergrößerungen, die zu verzerrten Abbildungen führen und metrische Analysen beeinflussen können. Hier liegt der Vorteil dreidimensionaler Röntgenverfahren wie Computertomographie (CT) und Dentaler Volumetomographie (DVT). Aufgrund der relativ hohen Strahlenbelastung konnte sich die Computertomographie als röntgenologisches Standardverfahren in der Zahnheilkunde nicht durchsetzen und ist nur nach strenger Indikationsstellung bei komplexen Fragestellungen oder in der Tumordiagnostik anzuwenden. [Fuhrmann 2003] Seit fast 20 Jahren steht die Dentale Volumentechnologie als relativ neues dreidimensionales Aufnahmeverfahren für die präzise Diagnostik zahlreicher anatomischer und dentaler Strukturen zur Verfügung und ermöglicht überlagerungsfreie Darstellungen mit hohem Aussagegehalt bei vergleichsweise geringer Strahlenbelastung.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung und der Vergleich mesiodistaler Zahnwurzelangulationen in konventionellen und aus DVT-Datensätzen rekonstruierten Panoramaschichtaufnahmen mit denen aus 3D DVT-Daten direkt erfassten Werten, sowie die Ermittlung der bukkolingualen Neigungen der Zahnachsen und dessen Einfluss auf die Darstellungsgenauigkeit der mesiodistalen Angulationen in zweidimensionalen Röntgenaufnahmen unter Berücksichtigung des Krümmungsgrades der Zahnbögen.

1.1 Klassifikationen und Definitionen in der Kieferorthopädie

Die Definition und Einordnung bestimmter Merkmale in verschiedene Gruppen ist in den Wissenschaften weit verbreitet. So wurde auch in der Kieferorthopädie durch Edward H. Angle schon früh mit der Einteilung in die noch heute international anerkannten Diagnosegruppen begonnen, die im Laufe der Geschichte der Kieferorthopädie stetig erweitert wurden und heute als Leitlinien für die Therapieplanung in der täglichen Praxis Anwendung finden.

1.1.1 Angle-Klassifikation

Die klassische Einteilung von Edward H. Angle aus dem Jahr 1899 berücksichtigt Normen und Abweichungen der Okklusion in der Sagittalebene beim Schlussbiss, wobei Mesial- oder Distalwanderungen von Seitenzähnen nicht rekonstruiert und somit Okklusion und Kieferlagebeziehung gleichgesetzt werden. [Sander 2011]

Angle orientierte sich sowohl an der Stellung der oberen zu den unteren Sechsjahrmolaren als auch an der Relation der oberen zu den unteren Eckzähnen. Greift der mesiobukkale Höcker des ersten Oberkiefermolaren in die bukkale Furche zwischen mesio- und mediobukkalen Höcker des ersten unteren Molaren, so entspricht dies der Norm- bzw. Neutralokklusion. Im Falle dieser Angle-Klasse I liegt der obere Eckzahn zwischen Eckzahn und erstem Prämolaren des Unterkiefers. Die Angle Klasse II ist gekennzeichnet durch die distale Lage des Unterkiefers im Verhältnis zum Oberkiefer hinsichtlich der beschriebenen neutralen Verzahnung. Eine weitere Unterteilung der Angle-Klasse II erfolgt unter Berücksichtigung der Frontzahnstellung. Die auf den Labialstand der Oberkieferfront zurückzuführende vergrößerte sagittale Stufe gehört der Angle-Klasse II/1 an. Steil sehende Inzisivi erzeugen den Deckbiss der Angle-Klasse II/2. Die mesiale Lage des Unterkiefers in Relation zum Oberkiefer hinsichtlich der ersten Molaren und Eckzähne ist Merkmal der Angle-Klasse III. [Rakosi, Jonas 1989] Die Angulation und Inklination der Zähne findet bei der Einstufung in die Angle-Klassen I-III zunächst keine Beachtung. Erst bei Betrachtung der Besonderheiten der ersten oberen Molaren wird auf dessen mesiodistale Neigung eingegangen und eine fehlerhafte Stellung dieses Zahnes überwiegend als Resultat einer abweichenden Kronenposition unter Beibehaltung der Wurzelspitze formuliert. Laut Angle übernimmt der obere erste bleibende Molar eine Kontrollfunktion, da er als erster durchbrechender Zahn der permanenten Dentition mit seiner Position im Zahnbogen den weiteren Zahndurchbruch lenkt, die meiste Kaukraft aufnimmt und den am stärksten verankerten Zahn des menschlichen Gebisses darstellt. Daher verleiht er ihm den Titel „Schlüssel zur normalen Okklusion“. [Angle 1908, Sander 2011]

1.1.2 „key ridge“

Die bereits von Angle - in Bezug auf die Funktion - als die wichtigsten Zähne des menschlichen Gebisses [Angle 1908] und als „Schlüssel der Okklusion“ [Angle 1906] bezeichneten ersten oberen Molaren, gewannen 1951 durch die von Atkinson

formulierte Definition des „key ridge“ zusätzlich an Bedeutung. Er beschrieb diesen als die Lagebeziehung der oberen Molaren zum Kieferknochen, wobei die Verlängerung der Längsachse des ersten, oberen Molaren über das Jochbein auf die Sutura zygomaticofrontalis verläuft und den Jochbeinpfeiler bildet, der die durch die Molaren aufgenommenen Kaukräfte neutralisiert. Eine verstärkte mesio-distale Angulation von Molaren hat eine veränderte Position der Molarenkrone zum Ansatz des key ridge zur Folge. Durch die Weiterleitung der Kaukräfte entsteht somit eine unphysiologische Belastung des von der Normangulation abweichenden Zahnes und der anschließenden knöchernen Strukturen. [Risse 2005] (Abb.1)

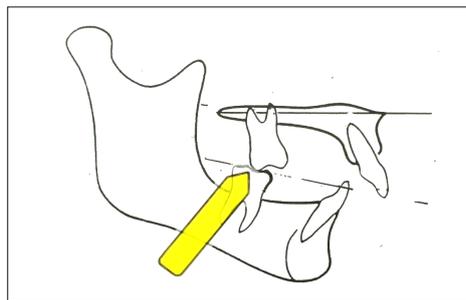


Abb. 1: Krafteinwirkung bei mesioangulierten Sechsjahrmolaren [Risse 2005]

Analysen von Cattaneo, Dalstra und Melson belegen den Einfluss der mesiodistalen Ausrichtung der oberen Molaren auf die okklusale Druckübertragung. Große Kompressionsbelastung der knöchernen Strukturen kann bei Abweichungen von der optimalen Angulation Dehiszenzen und Fenestrationsen verursachen. [Cattaneo 2003]

1.1.3 Sechs Schlüssel zur Normalokklusion

Zwei Jahre nach Einführung der Straight-Wire-Technik in die Multibandtherapie, veröffentlichte Lawrence F. Andrews im Jahre 1972 die „Sechs Schlüssel der normalen Okklusion“ und ergänzte dadurch die Klassifikation von Angle entscheidend. Er betrachtete die Stellung der Zähne in allen Ebenen des Raumes im Verhältnis zur Okklusionsebene und zu den knöchernen Basen. Im Rahmen seiner Untersuchungen von insgesamt 120 Gipsmodelle kieferorthopädisch unbehandelter Patienten mit bestmöglicher, natürlicher, statischer Okklusion formulierte Andrews sechs signifikante Charakteristiken als die wesentlichen Behandlungsziele der kieferorthopädischen Therapie. [Andrews 1976]

Schlüssel I: Molarenrelation

Die distalen Flächen der distalen Randleisten der oberen Molaren okkludieren mit den mesialen Flächen der mesialen Randleisten der unteren Molaren, wobei der mesiobukkale Höcker des oberen Molaren in die Grube zwischen mesialen und mittleren Höcker des unteren Molaren und der mesiolinguale Höcker des Oberkiefermolaren in die mittlere Fossa des Unterkiefermolaren greifen. [Andrews 1976]

Schlüssel II: Kronenangulation

Die gingivalen Anteile der Zahnkronen liegen distal im Verhältnis zu ihren okklusalen Anteilen. Die Ausprägung dieser mesiodistalen Neigung, auch als Tip bezeichnet, ist abhängig vom Zahntyp. [Andrews 1976]

Schlüssel III: Kronenneigung

Der okklusale Anteil der labialen Kronen der mittleren und seitlichen oberen Inzicivi liegt labialer als ihr gingivaler Anteil. Bei allen anderen Zähnen verhält es sich umgekehrt, wobei in den Seitenzahngewebieten die Kronenneigung nach posterior zunimmt. [Andrews 1976]

Schlüssel IV: Rotationen

Die Zähne weisen keine Rotationen auf, da rotiert stehende Molaren oder Prämolaren mehr Platz und rotierte Frontzähne weniger Platz im Zahnbogen in Anspruch nehmen und dies hätte eine Störung der Normalokklusion zur Folge. [Andrews 1976]

Schlüssel V: Enger Kontakt

Die Zähne befinden sich in engem Kontakt zueinander. [Andrews 1976]

Schlüssel VI: Spee'sche Kurve

Die Kurve der sagittalen Verbindung aller Zähne wird durch den höchsten Höcker des zweiten Unterkiefermolaren und der Schneidekante des unteren mittleren Incisivus gebildet und ist im tiefsten Punkt nicht mehr als 1,5 mm von der Okklusionsebene entfernt. Eine flache Spee'sche Kurve begünstigt die Normalokklusion. [Andrews 1976]

1.1.4 Angulation und Inklination der Zähne

Die Diagnostik dentaler Fehlstellungen erfolgt in der Kieferorthopädie in allen drei Raumebenen nach deren Rotations- und Translationsgraden. Translationen von Zähnen in vertikaler Richtung werden als Supra- beziehungsweise Infraposition sowie in horizontaler Richtung als Bukkal- beziehungsweise Lingualstand bezeichnet. Rotationen werden entsprechend ihrer Rotationsachse unterschieden, zum Einen die Rotationen um die Längsachse des Zahnes und zum Anderen die Inklination („Torque“) mit Drehung um die Horizontalachse des Zahnes, bzw. die Angulation („Tip“) um dessen Sagittalachse. Die Angaben der entsprechenden Winkel für Angulation und Inklination erfolgen jeweils zur Senkrechten der Okklusionsebene in vestibulooraler bzw. in mesiodistaler Richtung wie in Abb. 2 dargestellt. [Daskalogiannakis 2003]

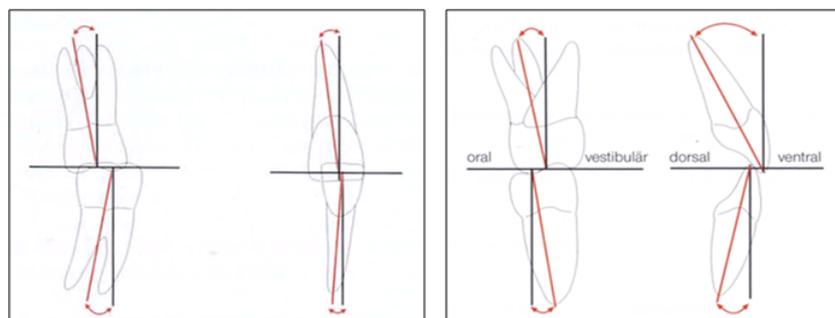


Abb. 2: Angulation bei vestibulärer Ansicht (links), Inklination bei approximaler Ansicht (rechts)
[Daskalogiannakis 2003]

Die angestrebte Parallelität der Zahnwurzeln und die daraus resultierenden gleichmäßigen interradikulären Abstände werden in der kieferorthopädischen Praxis häufig auf der Grundlage von konventionellen digitalen oder analogen Panoramaschichtaufnahmen während der Behandlung mit festsitzenden Multibracketapparaturen geprüft. In einer 10-Jahres Longitudinal Studie von Kim und Mitarbeitern wurde ein verminderter Abstand der Zahnwurzeln mit einem erhöhten Verlust des alveolären Knochens in Zusammenhang gebracht. [Kim et al. 2008]. Vermylen und Mitarbeiter beschrieben 2005 den erhöhten Verlust des interdentalen Knochenangebotes bei erhöhter Wurzeldichte, vor allem bei parodontal erkrankten Patienten und brachten dies mit dem vorzeitigen Verlust der betroffenen Zähne in Verbindung. [Vermylen et al. 2005] Des Weiteren ist die Bestimmung des interradikulären Knochenangebotes von wesentlicher Bedeutung für die erfolgreiche Implantation im Rahmen der prothetischen Versorgung sowie für die Insertion und

Langzeitstabilität von Verankerungspins in der kieferorthopädischen Therapie. [Asscherickx et al. 2008] Die Angaben für die Sicherheitsabstände von Minipins zum Parodont der benachbarten Zähne reichen von 0,5 mm [Ludwig et al. 2008] bis 2 mm [Liou et al. 2004], wobei Liou und Mitarbeiter auf die Migration von Verankerungspins während der kieferorthopädischen Krafteinwirkung hinweisen. Die Empfehlungen für Abstände prothetischer Implantate zur Zahnwurzel liegen bei 1,5 bis 2 mm, wobei konvergierende Wurzeln die erfolgreiche Insertion stark einschränken können. Dies ist ein wichtiger Aspekt bei Implantationen der oberen seitlichen Schneidezähne neben gekippt stehenden Eckzähnen. Hier ist die präzise röntgenologische Diagnostik der Zahnwurzelangulationen im Rahmen der kieferorthopädischen Vorbehandlung und Implantatplanung von entscheidender Bedeutung für den Behandlungserfolg. Insbesondere bei umfangreichen kieferorthopädischen Zahnbewegungen wie beispielsweise dem kieferorthopädischen Lückenschluss bei Nichtanlagen bzw. nach Extraktionen oder dem Auflösen von starken Engständen ist sowohl die klinische als auch die röntgenologische Kontrolle der Zahnwurzelangulationen unter klinischer Berücksichtigung vestibulärer Knochenstrukturen von Bedeutung. Fehlerhafte Inklinationen von Einzelzähnen oder Zahngruppen stören nicht nur die Ästhetik des Gingivaverlaufes im Sinne einer disharmonisch verlaufenden Gingivalinie, sie erhöhen auch die Gefahr der Entstehung von Rezidiven nach kieferorthopädischer Behandlung und späteren Rezessionen. [Rothe et al. 2006]

1.2 Bildgebende Diagnostik in der Kieferorthopädie

In der modernen Kieferorthopädie nimmt die röntgenologische Beurteilung des Zahnbestandes und deren benachbarter Strukturen im Rahmen einer umfassenden Diagnostik eine zentrale Rolle ein. Die kieferorthopädische Behandlung wäre ohne Anfertigung eines vollständigen Röntgenbefundes zu Beginn und während des Therapieverlaufs daher unverzichtbar. Im folgenden Abschnitt werden die in dieser Untersuchung eingesetzten röntgenologischen Verfahren zur Darstellung der mesiodistalen Zahnwurzelangulationen beschrieben.

1.2.1 Konventionelle Panoramaschichtaufnahme

Die Panoramaschichtaufnahme (PSA) stellt als Summationsröntgenaufnahme eine zweidimensionale Übersicht der gesamten Dentition sowie der knöchernen Verhältnisse beider Kiefer mit deren benachbarter Strukturen dar und findet in zahnärztlichen, kieferorthopädischen und oralchirurgischen Praxen im Rahmen der Diagnostik und Therapieplanung häufig Anwendung. Das Prinzip des Orthopantomogramms als Entwicklung aus der Tomographie ließ sich Bocage bereits 1921 patentieren. [Pasler 2008] Die ersten röntgenologischen Aufnahmen im Sinne einer Panorama-Übersichtsdarstellung der Zähne und Kiefer wurden 1933 von dem Japaner Numata durchgeführt, wobei ein intraoraler Film lingual positioniert und von einem extraoral den Kiefer umlaufenden Röntgenstrahler mit Schlitzeblende belichtet wurde. Die entscheidende Basis für die Darstellung gebogener Schichtebenen lieferte schließlich Heckmann im Jahre 1939 durch den Entwurf eines Gerätes, welches sowohl ein schmales Strahlenbündel als auch den Röntgenfilm um den Patienten fahren ließ. [Heckmann 1939, Fuhrmann 2013] Zehn Jahre später fand dieses Konzept Umsetzung in der Gerätekonstruktion des Finnen Paatero. Die klinische Anwendung verbreitete sich jedoch erst in den 1960er Jahren. [Rother 2001] Während der klassischen konventionellen Schichtaufnahme findet eine Bewegung von Röntgenstrahler und Kassetten- bzw. Sensorträger im Uhrzeigersinn um eine Drehebene statt. Schon Paatero erreichte durch den Einsatz von drei getrennten Rotationsachsen eine elliptische Krümmung dieser Ebene. (Abb. 3) Diese Technik wurde in den modernen Geräten mit einer harmonisch fortlaufenden Steuerung entlang der Drehzentren verbessert und folgend die Erfassung der Zahnbögen optimiert.

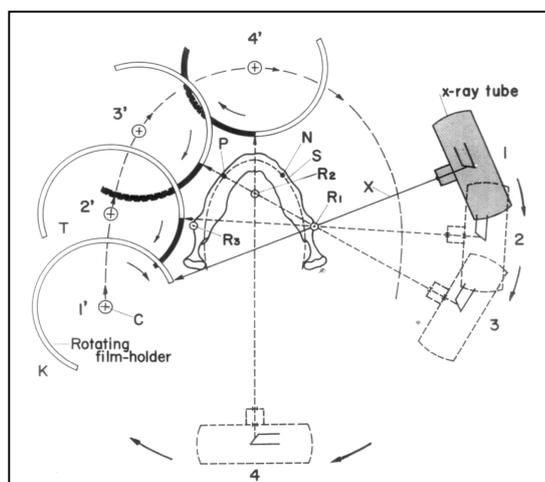


Abb. 3: Technik der Tomographie mit drei Rotationszentren nach Paatero [Graber 1967]

Die Primärblende schmälert mit einem vertikalen Schlitz am Strahler das austretende Strahlenbündel und bestimmt somit den Schichtwinkel und die daraus resultierende Schichtstärke der Abbildung, sodass von einer Zonographie gesprochen werden kann. Das Nutzstrahlenbündel passiert das Objekt und gelangt durch eine Sekundärschlitzblende, die für das Abfangen der Streustrahlung sorgt, auf den Bildempfänger, der sich in gegensinniger Richtung zur Rotationsrichtung des Gerätes bewegt. (Abb. 4)

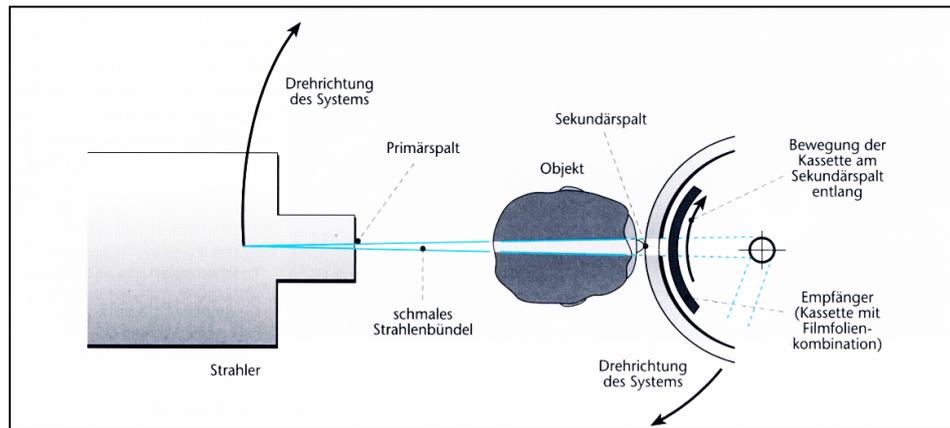


Abb. 4: Prinzip der Panoramaschichttechnik [Rother 2001]

Es werden diejenigen Strukturen scharf abgebildet, die sich in dem Bereich befinden, in dem die lineare Geschwindigkeit des Strahlers und die Geschwindigkeit der Filmebene übereinstimmen. Außerhalb dieser zentralen Schichtebene liegende Objekte werden aufgrund abweichender Bewegungsgeschwindigkeiten verwischt dargestellt. [Rother 2001] Die Schichtstärke der Aufnahme ist abhängig von der Breite der Schlitzblende und dem Abstand von der Drehachse zur Schichtebene. Der auf einer vorgegebenen Bahn laufende Drehpunkt bewirkt eine Änderung der Distanz zur Schichtebene und infolge dessen eine Varianz der Schichtstärke von 10 mm in der Front und 20-30 mm im Seitenzahnbereich. [Fuhrmann 2013] (Abb. 5)

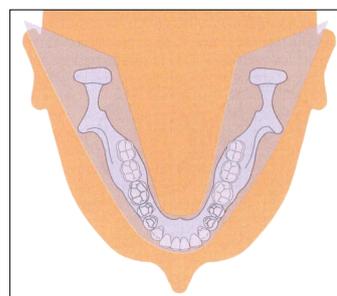


Abb. 5: Schichtebene konventioneller Panoramaschichtaufnahmen [Fuhrmann 2013]

Die Ausrichtung der Drehachsen ist auf den Verlauf idealer Kieferbögen mit orthoradialem Strahlengang abgestimmt. Der Strahler ist schräg, circa 4-7° nach kranio-kaudal zur Horizontalebene ausgerichtet. Eine fehlerhafte Position des Patienten im Röntgengerät, die individuelle Form des Zahnbogens oder eine starke bukkolinguale Neigung der Zähne oder der Kiefer können eine Entfernung des darzustellenden Bereiches von der zentralen Schichtebene mit daraus resultierender reduzierter Abbildungsschärfe zur Folge haben. [Fuhrmann 2013] Befindet sich das abzubildende Objekt außerhalb der Schichtebene und in zu großer Entfernung vom Bildträger, so erscheint es vergrößert und unscharf. Im Falle einer Positionierung des Objektes mit zu geringem Abstand zum Bildträger erscheint dieses verkleinert und verwischt. Dies kann bei Betrachtung der Panoramaschichtaufnahme zur Fehlinterpretation der mesiodistalen Neigung der Zähne führen. (Abb. 6)

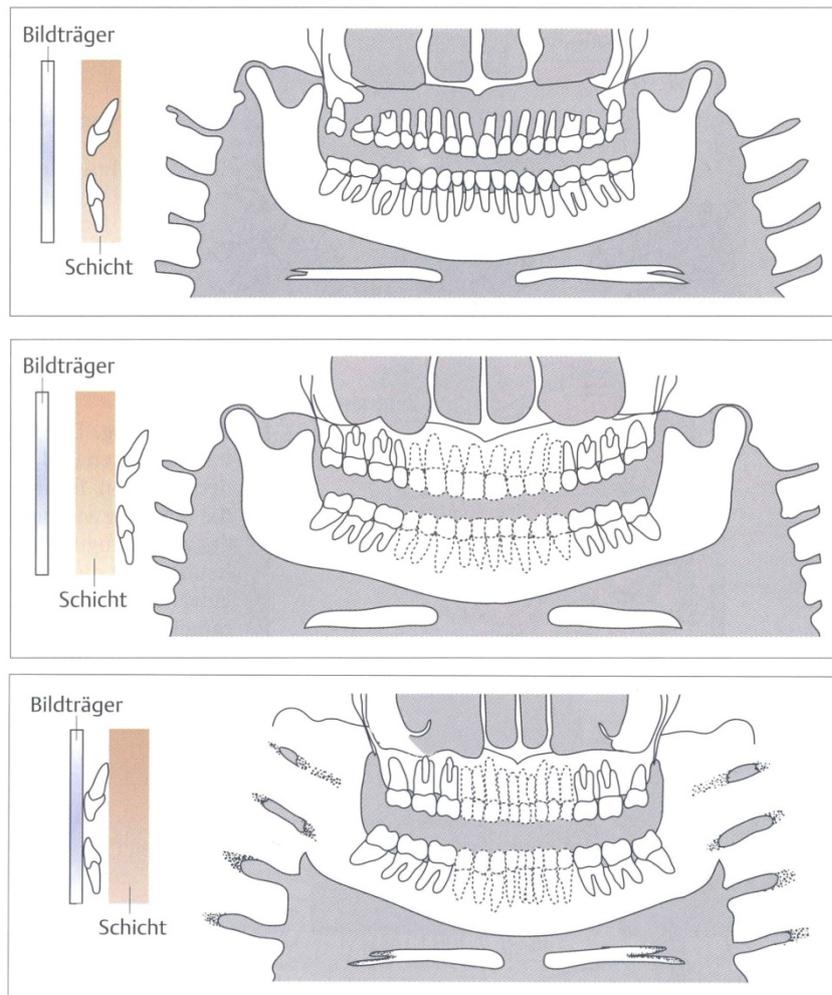


Abb. 6: Positionen zur Schichtebene und Abbildungsgenauigkeit, Position korrekt, anterior, posterior [Schwenzer, Ehrenfeld 2000]

Die zunächst verwendeten Bildempfänger setzten sich aus der Kombination eines Röntgenfilms mit Folien zusammen, dessen Strahlenempfindlichkeit durch die Weiterentwicklung von Emulsionstechnologien und Verstärkerfolien immer weiter gesteigert werden konnte. Jedoch brachte erst die Einführung der digitalen Röntgentechnik in den 1980er Jahren durch den Ersatz der Film-Folien-Kombinationen durch Sensoren oder Speicherfolien eine deutliche Reduktion der notwendigen Strahlendosis. [Benz, Mouyen 1991]

1.2.2 Volumentomographie

Die Dentale Volumentomographie (DVT) und die Computertomographie (CT) stellen die gegenwärtigen dreidimensionalen röntgenologischen Aufnahmeverfahren dar, die hinsichtlich ihrer Möglichkeiten der Hartgewebsvisualisierung des Mund,- Kiefer-, Gesichtsbereichs als gleichwertig zu betrachten sind. Bezüglich der Strahlenbelastung weisen sie erhebliche Unterschiede auf. [Haßfeld, Rother 2008] Im Vergleich zu den klassischen Summationsröntgenbildern entstehen bei beiden Techniken durch das röntgenologische Abtasten des Objektes aus verschiedenen Richtungen und eine darauffolgende Berechnung dieser Daten überlagerungsfreie Darstellungen. [Galanski, Prokop 1998]

Die von Hounsfield und Cormack 1972 [Fuhrmann 2013] unabhängig voneinander beschriebene CT ermöglichte durch den Einsatz eines eng eingegrenzten Strahlenbündels mit Hilfe eines speziellen Röhren-Detektoren-Systems erstmals die Darstellung dünner überlagerungsfreier Aufnahmeschichten. 1989 erfolgte die Einführung der Weiterentwicklung zur Spiral-Computertomographie durch Kalender. Diese erzeugte infolge der kontinuierlichen Vorschubbewegung des Patienten während der sich wiederholenden Rotationen des Röhren-Detektoren-Systems eine spiralförmige Abtastfigur. Mit Einführung der Dentalen Volumentomographie (DVT) geschah ein bahnbrechender Schritt in Richtung der Akquirierung von Volumendatensätzen. Bereits 1998 kam diese CT-ähnliche Geräteeinheit von Mozzo et al. in der Zahnmedizin zum Einsatz. [Fuhrmann 2013] In der Literatur und im angloamerikanischen Raum wird sehr häufig die Bezeichnung „Cone Beam Computerized Tomography“ (CBCT) verwendet. Dieser Begriff beschreibt das Prinzip des Verfahrens wesentlich, da die Datenerfassung mittels eines konusförmigen Strahlenbündels erfolgt, welches alle im

Darstellungsbereich liegenden Objekte durch nur einen Umlauf des Strahler-Detektoren-Systems aus allen Richtungen erfasst. (Abb. 7)

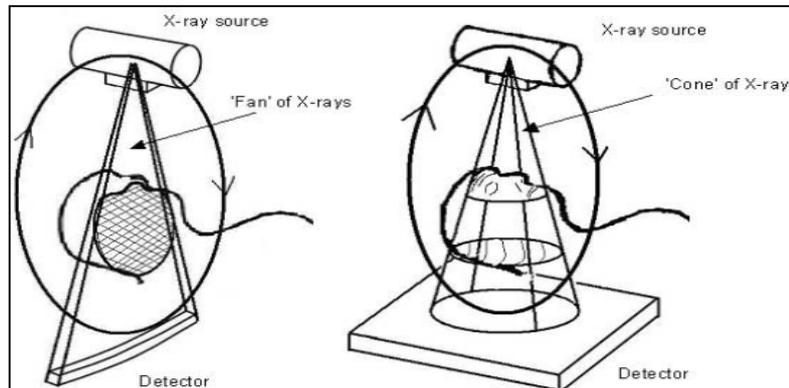


Abb. 7: Fächerstrahl der CT (links) und Kegelstrahl der DVT (rechts) [Sukovic 2003]

Die Röntgenstrahlung während eines DVT wird in der Regel nicht kontinuierlich appliziert, vielmehr finden in Abhängigkeit vom Gerät 200-450 Einzelprojektionen [Schulze 2007] in unterschiedlichen Winkelpositionen statt. Daher entspricht die Expositionszeit nicht der Aufnahmedauer. Die aus zahlreichen unterschiedlichen Absorptionswerten bestehenden zweidimensionalen Durchleuchtungsbilder enthalten unterschiedliche Absorptionswerte und bilden in ihrer Gesamtheit die Basis für die Primärrekonstruktion, die nach der Radon'schen Gleichung von 1917 und dem, speziell für die DVT-Technik, entwickelten Feldkamp-Algorithmus von 1984 erfolgen. [Fuhrmann 2013] Das Erstellen von beliebigen Sekundärrekonstruktionen als axiale, sagittale und coronale Schnitte des gewonnenen dreidimensionalen Datensatzes erweitert die diagnostischen Möglichkeiten in der kieferchirurgischen, kieferorthopädischen und zahnärztlichen Praxis um ein Vielfaches.

DVT-Indikationen in der Kieferorthopädie [DGKFO Stellungnahme 2008]:

- 1 Diagnostik von Anomalien des Zahnbestandes zur Beurteilung der anatomischen Form und Topographie noch nicht durchgebrochener überzähliger Zähne
- 2 Diagnostik von Anomalien und Dysplasien der Zahnwurzeln einschließlich konventionell röntgenologisch nicht erkennbarer Wurzelresorptionen
- 3 Bewertung von Zahndurchbruchstörungen
- 4 Ermittlung der Topographie retinierter und verlagelter Zähne
- 5 Beurteilung pathologischer Knochenstrukturen
- 6 3D- Diagnostik komplexer angeborener und erworbener kraniofazialer Fehlbildungen, Gesichts- und Kieferasymmetrien

- 7 3D-Diagnostik der Spaltmorphologie bei LKG-Spalten, Planung und Kontrolle der Kieferspaltosteoplastik
- 8 Darstellung des peridental Knochenangebotes zur prognostischen Bewertung geplanter Zahnbewegungen (bei parodontal vorgeschädigten Zähnen, Planung von Zahnbewegung spaltangrenzender Zähne bei LKG-Spalten)

1.2.3 Metrische Genauigkeit bildgebender Diagnostik hinsichtlich mesiodistaler Wurzelangulationen

Die hohe Abbildungsschärfe eines Objektes ist abhängig von der Größe der Halbschattenbreite, die sich aus den Abständen von Fokus zu Objekt und von Objekt zu Filmebene, sowie der Fokusgröße ergibt. Je größer die Distanz eines darzustellenden Körpers zum Fokus und je kleiner der Abstand zur Filmebene bei einem möglichst punktförmigen Fokus, desto besser ist die Abbildungsschärfe. Ebenso verhält es sich mit der Objektvergrößerung. Ein Körper erfährt weniger Vergrößerung, je näher dieser der Bildebene ist. Demzufolge werden nur Körper, die parallel zur Filmebene sind gleichmäßig vergrößert. (Abb. 8)

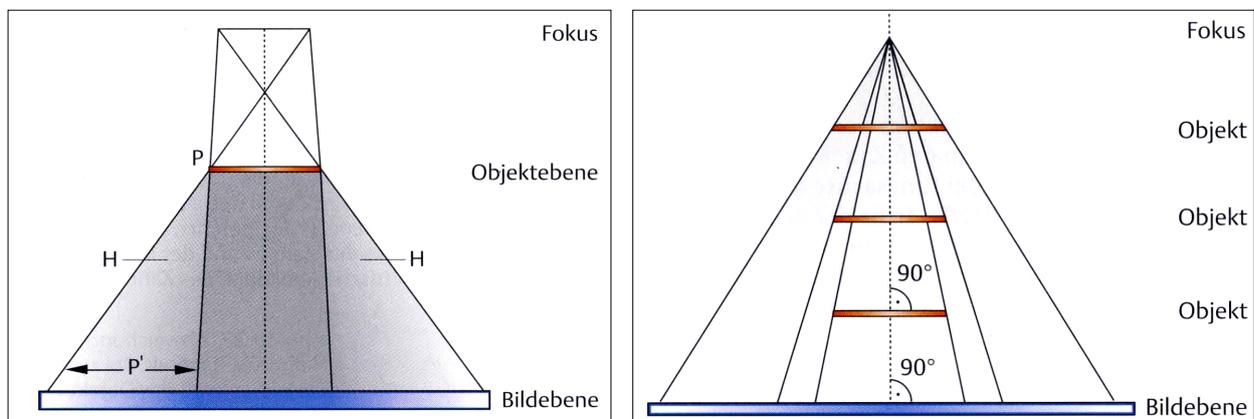


Abb. 8: Abbildungsschärfe mit Halbschattendarstellung (links) und Objektvergrößerung (rechts)
[Schwenzer, Ehrenfeld 2000]

Verhalten sich Objektachse und Bildebene nicht parallel zueinander, so verläuft der Zentralstrahl zu einer oder beiden Ebenen nicht senkrecht. Dies hat eine ungleichmäßige Vergrößerung, die in der Abbildung 9 dargestellte Objektverzerrung, zur Folge. [Schwenzer, Ehrenfeld 2000]

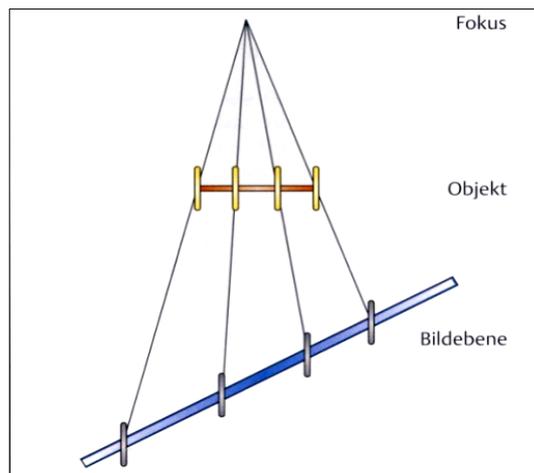


Abb. 9: Objektverzerrung [Schwenzer 2000]

Bei jeder konventionellen Panoramafotografie werden die Strukturen in Abhängigkeit ihres Abstandes zur Filmebene unterschiedlich stark vergrößert projiziert. Anguläre Abweichungen in der Darstellung entstehen durch eine Kombination aus der vertikalen und horizontalen Verzerrung von Objekten. [Hauck 1970]

Graber beschrieb 1967 in einem Artikel des American Journal of Orthodontics die diagnostischen Möglichkeiten der Panoramadarstellungen zweier unterschiedlicher Geräte und wies auf die Möglichkeit der Beurteilung von Wurzelparallelitäten hin, ohne die Nachteile der Aufnahmetechnik wie inhomogene Vergrößerungen, Verzerrungen, mangelnde Bildschärfe, sowie unzuverlässige Darstellung der Zahnbogenlängen und der Platzverhältnisse zu vernachlässigen. Er erwähnte bereits damals die Tendenz der verstärkt projizierten Mesialangulation von maxillären und mandibulären Incisiven aufgrund ihrer labialen Inklination, vor allem im Unterkiefer. [Graber 1967]

Rowse und Brueggemann schilderten 1971 und 1967 die linearen und angulären Verzerrungen in röntgenologischen Panoramadarstellungen und dessen Ausmaß in Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren. [Rowse 1971, Brueggemann 1967]

Weitere Autoren beschrieben, wie bereits Graber, den Einfluss der Position des Zahnes im Zahnbogen und der Asymmetrie der Zahnbögen, sowie der Kopfhaltung und die Bewegungen der Patienten während des Aufnahmevorganges auf die Darstellungsgenauigkeit der mesiodistalen Angulationen in konventionellen PSA. [Graber 1967, Phillip und Hurst 1978]

Bereits 1988 fertigten Lucchesi et al. parabelförmige Plexiglasblöcke mit 10 Bohrungen und darin fixierten Metallstiften zur Simulation der Zahnachsen an und verglichen die

mesiodistalen Angulationen von Zahnfilm- und Panoramaschichtaufnahmen. Dabei wichen die Werte der PSA stärker von den eigentlichen ab als diejenigen, der Zahnfilmaufnahmen. [Lucchesi et al. 1988]

Lee untersuchte 2005 gezielt die Auswirkungen von Torqueveränderungen in konventionellen Panoramasdarstellungen und beschrieb eine apikale Mesialposition lingual geneigter bzw. Distalposition bukkal geneigter Prämolaren in den Röntgendarstellungen. Er empfahl bei röntgenologisch inkorrekt anguliert erscheinenden Zähnen stets auch die klinische Situation bezüglich des Torques zu prüfen. [Lee 2005]

Im Jahre 2008 veröffentlichten Garcia-Figueroa et al. die Ergebnisse ihrer Arbeiten zum Einfluss der bukkolingualen Neigungen der Zähne auf die in konventionellen PSA dargestellten mesiodistalen Winkel. Die Messungen wurden mit Hilfe eines Typodonten idealer Dentition und Okklusion an insgesamt vier Zahnpaaren in vier Quadranten vorgenommen, wobei Änderungen der Neigungen nach bukkal und lingual jeweils 10° betragen. Die röntgenologische Auswertung ergab Abweichungen bis zu -14°. Im Fall einer bukkal geneigten Eckzahnwurzel kam es zu deren Distalprojektion und die Lingualneigung der Prämolaren erzeugte eine Mesialprojektion der Wurzelspitze, sodass eine Wurzelkonvergenz erfolgte. Die entgegengesetzten Neigungen resultierten in divergierenden Zahnwurzeln. Diese Kon- bzw. Divergenzen finden eine größere Ausprägung in der Maxilla im Vergleich zur Mandibula. Bukkolinguale Veränderungen im Frontzahnbereich haben nach Garcia-Figueroa et al. klinisch keine relevanten Veränderungen der mesiodistalen Angulationen zur Folge. Die Stellung der Molaren wurde in dieser Studie nicht mit einbezogen. [Garcia-Figueroa 2008]

Nur 26,7 % der Ergebnisse der Untersuchungen von Ann Maria Owens und Ama Johal an konventionellen Panoramaschichtaufnahmen waren mit Abweichungen von $\pm 2,5^\circ$ klinisch akzeptabel.

Des Weiteren publizierten Brezniak et al. 2012 den Fallbericht einer Patientin, deren mesial gekippte Eckzähne in der konventionellen Panoramaschichtaufnahme verfälscht aufrecht und folgend parallel zu deren Nachbarzähnen erschienen und verwiesen auf die Ungenauigkeit der mesiodistalen Darstellung von Zähnen. [Brezniak et al. 2012]

Hinsichtlich der metrischen Genauigkeit ergaben die Untersuchungen von Mischkowski et al. einen mittleren absoluten prozentualen Messfehler von $0,98\% \pm 0,73\%$ für

lineare Distanzen und $6,01\% \pm 1,49\%$ für Volumenmessungen in DVT-Aufnahmen und schlussfolgerten für die klinische Anwendung befriedigende Ergebnisse. [Mischkowski 2007] Die konventionellen Panoramaschichtaufnahmen lassen die Objekte hingegen mit Vergrößerungen um den Faktor 1,21-1,29 in vertikaler Richtung und 1,15-1,35 in horizontaler Richtung erscheinen, [Gomez-Roman et al. 1999] während die von Gomez-Roman und Kollegen ermittelte höhere lineare Genauigkeit der vertikalen gegenüber der horizontalen Dimension bezüglich vergrößerter Darstellungen in konventionellen Panoramaschichtaufnahmen nach der von Van Elslande et al. recherchierten Metastudie bestätigt werden konnte. [Van Elslande et al. 2008] Andere Autoren begründen die Ungenauigkeiten von DVT Messungen lediglich mit den Einschränkungen durch die zum Einsatz kommenden Voxelgrößen. [Ludlow et al. 2007, Bouwens et al. 2011]

Peck et al. verglichen erstmals lineare und anguläre Messungen aus konventionellen Panoramaschicht- und dreidimensionalen DVT-Aufnahmen mit denen, der Gipsmodelle von fünf Patienten und definierten schlussfolgernd in einem weiteren Untersuchungsabschnitt die Werte der DVT Messungen als Goldstandard. Im Vergleich der mesiodistalen Angulationen aus PSA und Goldstandard wurden signifikante Unterschiede in 75% evaluiert und die klinische Relevanz der ungenauen Repräsentation mesiodistaler Zahnwurzelneigungen in konventionellen PSA diskutiert. [Peck et al. 2007]

Die Ergebnisse von Lund und Gröndahl ergaben eine hohe Präzision linearer Messungen in axialer, frontaler und sagittaler Ebene des Accitomo FDP Tomographen. [Lund, Gröndahl, Gröndahl 2009]

Im Jahre 2012 wurden von Tong et al. umfangreiche Studien zu Zahnwurzelangulationen von 76 Patienten veröffentlicht. Die Untersuchungen schlossen sowohl die bukkolingualen als auch die mesiodistalen Winkel der gesamten Dentition der Patienten ein. Nach Import der DICOM Daten der angefertigten DVT Aufnahmen in die 3D-Imaging-Software Dolphin kam die erstmals in der Literatur beschriebene University of Southern California root vector analysis software zum Einsatz. Dieses Programm verwendet Algorithmen zur Berechnung der Neigungen aller Zahnachsen auf Basis von Markierungen der Kronen- und Wurzelspitzenmittelpunkte in einem konstruierten dreidimensionalen Koordinatensystem und wurde bereits in einer zuvor durchlaufenen Arbeit auf Validität getestet. [Tong et al. 2012-1] Sie verglichen

zudem die ermittelten Werte mit denen der von Andrews beschriebenen „Sechs Schlüssel zur Normalokklusion“ und konnten Gemeinsamkeiten, aber auch Abweichungen feststellen. Die im Vergleich auffälligen Unterschiede betrafen bezüglich der mesiodistalen Angulationen vor allem die Molaren des Ober- und Unterkiefers. Hinsichtlich der bukkolingualen Angulationen waren in beiden Kiefern erheblich größere Werte der Berechnungen mittels des Programms gegenüber Andrews' Vorgaben nachweisbar. Bei dieser Gegenüberstellung muss jedoch die Unterschiedlichkeit der Messverfahren Berücksichtigung finden. Andrews' Arbeiten wurden an den Oberflächen von 120 Gipsmodellen durchgeführt, Tong et al. betrachteten die gesamten Zahnachsen von Kronen- und Wurzelspitzenmittelpunkt. [Tong et al. 2012-2]

Liu und Kollegen beschrieben ein Jahr später in ihren Studien abweichende mesiodistale Winkel in Panoramaschichtaufnahmen infolge von Veränderungen der Kopfhaltung und der bukkolingualen Inklinationen der Inzisiven. Ihre Untersuchungen wurden an konventionellen Panoramaschicht- und entsprechenden DVT-Aufnahmen von 20 Patienten mittels InVivo Dental 5.0 durchgeführt. Counterclockwise Rotationen während der Aufnahme hatten erhöhte distale Wurzelangulationen in der Maxilla und verkleinerte in der Mandibula zur Folge mit einer stärkeren Auswirkung auf die Oberkieferdentition. Zusammenfassend empfehlen Liu und Kollegen bei der Erstellung von Panoramaschichtaufnahmen aus 3D DVT Datensätzen die getrennte Ausrichtung von Maxilla nach der Frankfurter Horizontalen und der Mandibula nach der Okklusionsebene. Des Weiteren sollte eine Kalibrierung entsprechend der bukkolingualen Inklination erfolgen, um die mesiodistalen Angulationen zu erfassen. [Liu et al. 2013]

Im Jahr 2011 wurden die Ergebnisse der Typodontenuntersuchungen von McKee et al. und Peck et al., bis auf eine entgegengesetzte Ausrichtung der Zahnwurzeln der mittleren oberen Inzisiven, in den von Bouwens durchgeführten Untersuchungen entsprechender Patientenaufnahmen betätigt und die Vorteile der DVT beleuchtet. [Bouwens 2011]

Van Elslande schlussfolgerte nach eigenen Studien 2010, dass die Projektionen der mesiodistalen Angulationen in rekonstruierten Panoramadarstellungen (DVT) aufgrund ihrer Genauigkeit im Vergleich zu den konventionellen PSA die Grundlage zur Beurteilung der Wurzelparallelität im Rahmen der kiefeorthopädischen Therapien darstellen sollte. [Van Elslande et al. 2010]

Die jüngsten Untersuchungen hinsichtlich mesiodistaler Angulationen von Lei et al. aus dem Jahr 2014 belegen, dass die Dentale Volumentomographie eine zuverlässige Erhebungsmethode für die Zähne 16 bis 26 und 36 bis 46 darstellt. [Lei et al. 2014]

1.2.4 Strahlenbelastung

Die meist verbreiteten Übersichtsaufnahmen in der Kieferorthopädie sind die Panoramaschichtaufnahme und das Fernröntgenseitbild (FRS). Die effektiven Dosen digitaler Panoramaschichtaufnahmen liegen nach den Untersuchungen von Ludlow, Davies-Ludlow und Brooks in Abhängigkeit vom Gerätetyp in einem Bereich von 14,2 μSv und 24,3 μSv , für die Strahlenbelastung eines FRS werden in dieser Arbeit 5,6 μSv angegeben. [Ludlow, Davies-Ludlow, Brooks 2008] Aktuellen Unterrichtungen der Bundesregierung für das Jahr 2012 zufolge liegt die mittlere effektive Dosis durch die natürliche und die zivilisatorisch veränderte natürliche Strahlenexposition für eine Person in Deutschland bei 2-3 mSv und die, der medizinischen Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlung zugrundeliegende Strahlung schätzungsweise bei 1,9 mSv, sodass die Gesamtexposition etwa 4 mSv pro Jahr und Einwohner beträgt. [Bundesamt für Strahlenschutz 2014]

Der prozentuale Anteil der kollektiven effektiven Dosis der in der Zahnmedizin vorgenommenen Verfahren an der aller verschiedener röntgenologischen Untersuchungsarten in der Medizin hat mit 0,3 % den kleinsten Anteil, wobei die CT mit 63% den größten Beitrag zur kollektiven effektiven Dosis beiträgt. [Bundesamt für Strahlenschutz, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2014]

Seit Einführung der DVT als dreidimensionales röntgenologisches Verfahren in die Zahnmedizin wurden zahlreiche Studien mit stark variierenden Ergebnissen im Vergleich der effektiven Dosen von Computertomografie (CT) und DVT veröffentlicht. Beispielsweise wurde von Copenrath et al. eine dreifach höhere effektive Strahlenbelastung für die CT im Verhältnis zur DVT angegeben. [Copenrath et al. 2008]

Untersuchungen von Haschimoto und Mitarbeitern ergaben 400-fach höhere Dosen für die CT. [Haschimoto et al. 2006]

Aufgrund dieser stark voneinander abweichenden Ergebnisse forderte Bumann im Jahre 2009 die Einhaltung der aktuellen Richtlinien der Internationalen Strahlenschutzkommission (International Commission on Radiological Protection, ICRP) bei der Erfassung der effektiven Dosen radiologischer Verfahren. Diese existieren in den Versionen von 1990, 2005 und 2007 und unterscheiden sich durch unterschiedliche Vorgaben der Organwichtungsfaktoren hinsichtlich ihrer Größe der Strahlenbelastungen für den Organismus. [Bumann 2009]

Ludlow und Ivanovic orientierten sich bei ihren Untersuchungen der effektiven Strahlendosen von DVT- und CT-Geräten im Jahre 2008 an den ICRP Richtlinien von 2007 und erhielten in Abhängigkeit des Field of Views (FoV) für die DVT 68-1073 μ SV für ein Large-FoV und 69-560 μ SV für ein Medium-FoV im Vergleich zu 860 μ SV für eine 64-slice Multidetektor CT. Sie verglichen ihre Berechnung mit denen nach den ICRP Richtlinien von 1990 und erhielten um 23-224% höhere effektive Dosen bei Erfüllung der neuesten Richtlinien. [Ludlow, Ivanovic 2008] Loubele und Mitarbeiter verglichen 2009 drei DVT- mit drei Multislice CT- (MSCT) Geräten hinsichtlich ihrer effektiven Dosen ebenfalls unter Berücksichtigung der ICRP 103 Richtlinien von 2007 und registrierten für die DVT 13-82 μ SV gegenüber 474-1160 μ SV der MSCT. [Loubele et al. 2009] Die Strahlenbelastung der erhältlichen DVT-Scanner variiert in Abhängigkeit des einstellbaren FoV, der unterschiedlichen Gerätetypen und des zu erfassenden Gewebeareals. [Krause 2013, Tsiklakis et al. 2005] In der digitalen Volumentomographie bedingen unterschiedliche Aufnahmeprotokolle und Verkleinerungen des FoV signifikante Reduktionen der effektiven Dosen für den Patienten, wobei im Rahmen der Untersuchungen von Ludlow und Walker im Jahre 2013 höhere Werte bei Kindern im Vergleich zu Erwachsenen ermittelt wurden. [Ludlow, Walker 2013] Hofmann et al. empfehlen auch bei dem Einsatz von dosisreduzierten MSCT-Geräten zur Reduktion der Strahlenbelastung die Scanparameter wie Röhrenstrom und Röhrenspannung der diagnostischen Fragestellung anzupassen, um einen Kompromiss zwischen Bildqualität und effektiver Dosis zu erhalten. [Hofmann et al. 2014]

2 Fragestellung

Ziele der Kieferorthopädie sind die Erkennung, Prophylaxe und Behandlung von Zahnfehlstellungen. [Pschyrembel 2001] Während der orthodontischen Therapie werden vor allem im Rahmen großer Zahnbewegungen zur Kontrolle der Wurzelparallelität Panoramaschichtaufnahmen durchgeführt. Eine korrekte Interpretation der mesiodistalen Wurzelangulationen der Zähne mittels zweidimensionaler Summationsröntgenaufnahmen wäre jedoch nur bei absoluter Parallelität von Objekt und Film zu erwarten. Jede Entfernung eines darzustellenden Objektes von der zentralen Schichtebene durch das Abweichen der individuellen Zahnbogenform bzw. Zahnbogenkrümmung des Patienten von dem durch multiple Drehachsen definierten Verlauf des Röntgengerätes, sowie durch starke bukkolinguale Wurzelangulationen hat eine Verzerrung zur Folge. [Scarfe et al. 1993] Diese können zu einer verfälschten Darstellung der Zahnachsenneigung und fehlerhaften Diagnosen führen.

In der vorliegenden Studie wurden zunächst zwei Modelle mit definierten Zylinderangulationen in festgelegter Anordnung eines harmonischen Zylinderbogens untersucht und deren mesiodistale Winkel aus konventionellen Panoramaschichtaufnahmen (konv PSA), rekonstruierten Panoramadarstellungen aus DVT-Daten (reko PSA) und direkten 3D Messungen des DVT-Datensatzes (3D) mit den definierten Angulationen der Modelle (Goldstandard) verglichen, um die Darstellungsgenauigkeit der Zylinderangulationen für die verschiedenen Verfahren zu bestimmen. Im zweiten Teil der Untersuchung wurden die gleichen röntgenologischen Verfahren von insgesamt drei Patienten analysiert und im Anschluss die folgenden Hypothesen geprüft:

- 1 Der Methodenfehler nach Dahlberg ist für die intraindividuellen Messungen der mesiodistalen Zylinderangulationen anhand der PSA, reko PSA und 3D, sowie der bukkolinguale Angulationen mithilfe der 3D Methode hinreichend niedrig.
- 2 Die Darstellung der mesiodistalen Angulationen in PSA, reko PSA und 3D führen zu unterschiedlichen Ergebnissen im Vergleich zum Goldstandard.
- 3 Die bukkolinguale Zylinderangulationen sind mit der 3D Methode erfassbar und unterscheiden sich nicht signifikant im Vergleich zum Goldstandard.

- 4 Die bukkolingualen Zylinderangulationen beeinflussen dessen mesiodistale Darstellungen in PSA, reko PSA und 3D.
- 5 Die Stärke der Zylinderbogenkrümmung beeinflusst die Darstellung der mesiodistalen Zylinderangulationen in PSA, reko PSA und 3D.
- 6 Die Position der Modelle im Röntgengerät beeinflusst die Darstellung der mesiodistalen Zylinderangulationen in PSA.
- 7 Der Methodenfehler nach Dahlberg ist für die intraindividuellen Messungen der mesiodistalen Zahnwurzelangulationen der Patienten anhand der PSA, reko PSA und 3D, sowie der bukkolingualen Angulationen mithilfe der 3D Methode hinreichend niedrig.
- 8 Die Darstellung der mesiodistalen Zahnwurzelangulationen in PSA, reko PSA und 3D-Aufnahmen der Patienten führen zu untereinander stark abweichenden Ergebnissen.
- 9 Die bukkolingualen Zahnwurzelangulationen sind analog zu denen, der Zylinderangulationen mit der 3D Methode erfassbar.

3 Material und Methoden

Die Herstellung und Untersuchung von zwei Modellen mit je 28 Zylindern ermöglicht mittels der unten aufgeführten Methoden die Erfassung der Genauigkeit der mesiodistalen Zylinderangulationen, sowie deren Einflussfaktoren und liefert somit wichtige Informationen für die Interpretation der Zahnwurzelangulationen aus Panoramaschicht- und DVT-Aufnahmen von drei repräsentativ untersuchten Patienten.

3.1 Allgemeine Methoden

3.1.1 Modelle

Nach umfangreicher Recherche hinsichtlich eines geeigneten Versuchsaufbaus wurde bei der Herstellung der Modelle auf den Entwurf von Lucchesi und Notjé zurückgegriffen. Deren Plexiglasblöcke mit 10 metallstiftgefüllten Bohrungen wurden in der vorliegenden Untersuchung modifiziert und die metallischen Füllkörper durch das röntgenopake Material UHU® patafix ersetzt. Des Weiteren wurde die Anzahl entsprechend der humanen Dentition auf 28 je Modell erhöht. [Lucchesi, Notjé 1988]

Zunächst wurden vier Acrylamidblöcke (1,5 cm x 10 cm x 10 cm) mit jeweils 14 zylindrischen Hohlräumen von circa 10mm Tiefe und einem Durchmesser von 1,5 mm versehen. Diese wurden unter Anwendung des CAD/CAM-Verfahrens mit der CNC-Fräsmaschine DMU 40 monoBLOCK angefertigt, wodurch sowohl das präzise Ansetzen an definierten Punkten als auch die Ausrichtung des Bohrers in allen Raumebenen gewährleistet wird. Die Zylinderbohrungen wurden in festgelegten Abständen entlang von parabelförmigen Bögen (Zylinderbögen), die in Form und Verlauf den idealen Zahnbögen der oberen und unteren permanenten Dentition menschlicher Kiefer entsprechen, durchgeführt. Die Punkte der Zylinder auf den Oberflächen der Blöcke (=Blockebene) werden folgend als Zylinderpunkte bezeichnet, deren Positionen der Anordnung von Kronenmittelpunkten in idealen Zahnbögen gleichen.

Die mesiodistalen Winkel entstehen durch die auf die Tangentenebene projizierte Zylinderachse und die Schnittgerade von Tangentenebene und Blockebene. Die Tangentenebenen stellen die Ebenen der Tangenten der Zylinderbögen in den jeweiligen Zylinderpunkten dar und verlaufen senkrecht zur Blockebene. Für die Definition der bukkolingualen Angulationen wurde die Konstruktion der Senkrechterebene notwendig, die im rechten Winkel zur Tangentenebene und zur

Blockebene verläuft, sodass die bukkolingalen Winkel durch die auf die Senkrechterebene projizierte Zylinderachse und die Schnittgerade von Senkrechterebene und Blockebene definiert ist. (Abb. 10)

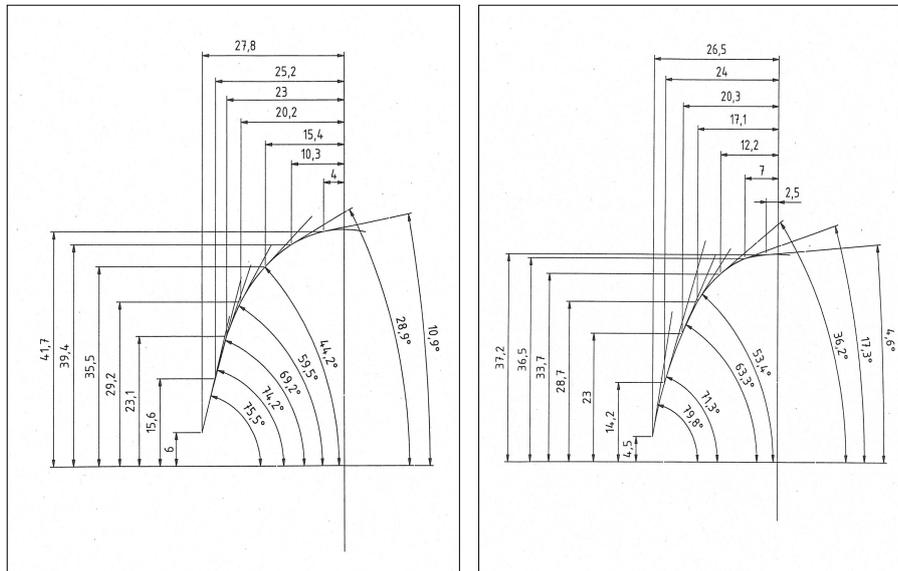


Abb. 10: Technische Zeichnungen zur Festlegung der Tangentenebenen der Zylinderpunkte

Die aufgrund der Bohrungen entstandenen zylindrischen Hohlräume wurden mit dem röntgenopaken Material gefüllt und die oberen Blöcke mit den unteren Blöcken in deren Blockebenen zusammengefügt, sodass zwei Modelle bestehend aus je zwei Blöcken entstanden. Die 14 Zylinder jedes Blockes repräsentieren in vereinfachter Darstellung die Zahnachsen idealer menschlicher Ober- und Unterkiefer der permanenten Dentition. Analog des FDI-Schemas erfolgte die Unterteilung der Modelle in Quadranten und die Nummerierung der Zylinder innerhalb dieser Quadranten von 1 bis 7. Das Modell A enthält die Quadranten 1-4, das Modell B die Quadranten 5-8. Die fusionierten Blockebenen entsprechen einer optimierten planen Okklusionsebene. (Abb. 11)

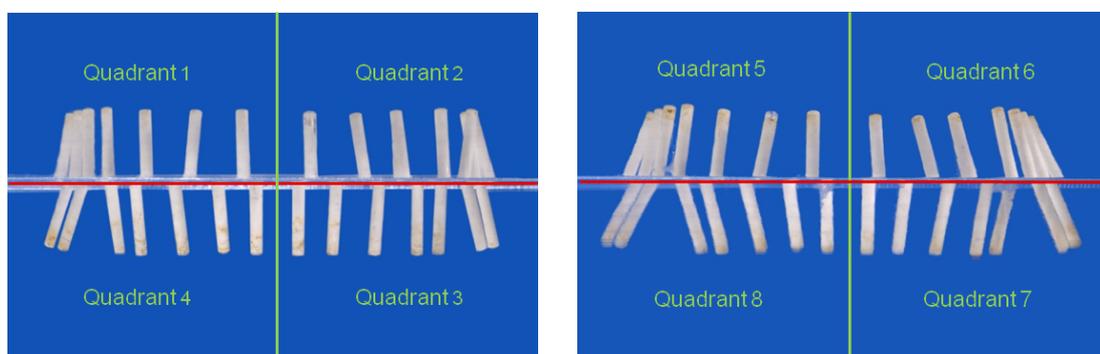


Abb. 11: Modell A mit Quadranten 1-4, Modell B mit Quadranten 5-8

Die Angulationen der Zylinder wurden auf Grundlage der Werte von Andrews und Schumacher festgelegt. [Andrews 1974, Schumacher 1985, Risse 2005] Die unterschiedlich großen mesiodistalen Winkel der Zylinder 1 bis 7 sind für die oberen bzw. unteren Quadranten entsprechend ihrer Zylinder Nummer identisch, wohingegen eine Vergrößerung der bukkolingualen Ausrichtung um 5° von Quadrant zu Quadrant vorgenommen wurde, sodass jede mesiodistale Angulation der Zylinder 1 bis 7 mit vier unterschiedlichen bukkolingualen Winkeln kombiniert wurde. (Tabelle 1)

Tabelle 1: Bukklinguale und mesiodistale Zylinderangulationen

Angulationen Modell A			Angulationen Modell B		
Zylinder	Bukklingual in °	Mesiodistal in °	Zylinder	Bukklingual in °	Mesiodistal in °
17	10	2	57	20 (+10)	2
16	5	7	56	15 (+10)	7
15	1	5	55	11 (+10)	5
14	1	6	54	11 (+10)	6
13	12	14	53	22 (+10)	14
12	20	6	52	30 (+10)	6
11	20	5	51	30 (+10)	5
21	25 (+5)	5	61	35 (+15)	5
22	25 (+5)	6	62	35 (+15)	6
23	17 (+5)	14	63	27 (+15)	14
24	6 (+5)	6	64	16 (+15)	6
25	6 (+5)	5	65	16 (+15)	5
26	10 (+5)	7	66	20 (+15)	7
27	15 (+5)	2	67	25 (+15)	2
37	-10	16	77	-20 (-10)	16
36	-10	9	76	-20 (-10)	9
35	5	5	75	15 (+10)	5
34	3	3	74	13 (+10)	3
33	10	3	73	20 (+10)	3
32	15	2	72	25 (+10)	2
31	12	1	71	22 (+10)	1
41	17 (+5)	1	81	27 (+15)	1
42	20 (+5)	2	82	30 (+15)	2
43	15 (+5)	3	83	25 (+15)	3
44	8 (+5)	3	84	18 (+15)	3
45	10 (+5)	5	85	20 (+15)	5
46	-15 (-5)	9	86	-25 (-15)	9
47	-15 (-5)	16	87	-25 (-15)	16

Nach Fertigstellung der Modelle wurde jeweils eine dreidimensionale Röntgenaufnahme mit dem Dentalen Volumetomographen KaVo 3D eXam (KaVo Dental GmbH, Biberach/Riß, Deutschland) im Institut für 3D-Dentalradiologie - MESANTIS® Berlin und eine konventionelle Panoramaschichtaufnahme mit dem digitalen Panoramagerät Orthophos XG plus (Sirona Dental Systems GmbH, Bensheim, Deutschland) in der kieferorthopädischen Praxis Michael Müller und Kollegen, Berlin durchgeführt.

3.1.2 Patienten

Das verwendete röntgenologische Untersuchungsmaterial entstammt der kieferorthopädischen Praxis „Ihre Kieferorthopäden in Berlin“ unter der Leitung von Prof. Dr. Axel Bumann, Dr. Kerstin Wiemer & Partner sowie dem 3D-Röntgeninstitut Mesantis® Berlin. Ziel dieser Arbeit war die Prüfung der klinischen Anwendung unterschiedlicher Methoden zur Bestimmung der mesiodistalen und bukkolingualen Zahnwurzelangulationen am Patienten. Zum Einsatz kamen zeitnahe Aufnahmen von DVT und konventionellen Panoramaschichtaufnahmen von drei Patienten mit harmonisch geformten Zahnbögen.

3.2 Spezielle Methoden

3.2.1 Fehlerberechnung der Zylinderangulationen

Eine aussagekräftige Bewertung erhobener Daten ist nur bei ausreichend hohen Genauigkeiten der Messungen möglich. Um die methodischen Fehler der durchgeführten Studie zu bestimmen wurden die Methodenfehler nach Dahlberg und die Reliabilitätskoeffizienten Cronbach's Alpha im Rahmen der statistischen Analyse bestimmt.

3.2.2 Mesiodistale Zylinderangulationen in Abhängigkeit von der Methode

Die dreidimensionalen röntgenologischen Aufnahmen erfolgten durch Steuerung eines mit dem Röntgengerät verbundenen Desktopcomputer. Die DVT der Modelle A und B wurden mit identischen Aufnahmeparametern angefertigt. Die technischen Daten des in der vorliegenden Studie zum Einsatz gebrachten Dentalen Volumetomographen KaVo 3D eXam sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: Technische Daten des KaVo 3D eXam® [Kavo Dental GmbH 2009]

Technische Daten	KaVo 3D eXam®
Sensortyp	Silizium-Flat-Panel
Strahlenprofil	Cone-Beam
Graustufung	14 Bit
Röhrenspannung	90-120kV
Röhrenstromstärke	3-8 mA
Bilderfassung	360° Rotation
Voxelgrößen	0,4 / 0,3 / 0,25 / 0,2 / 0,125 mm Kantenlänge
FoV (Höhe x Durchmesser)	13,50 x 16,50 cm - 17 x 23 cm
Bilderfassungsdauer	8,9/26,9
Rekonstruktionszeit	unter 2 min

Die Voxelgröße der Modellaufnahmen beträgt 0,2 mm Kantenlänge bei 5 mA Röhrenstromstärke und 120 kV Röhrenspannung. Mit Hilfe eines speziell angefertigten Sockels und Knetsilikon wurden die Modelle so auf der Kinnstütze des Gerätes fixiert, dass sowohl die Mitte als auch die Blockebene des jeweiligen Modells mit den Linien des geräteintegrierten Lichtkreuzes übereinstimmten. Der Export der Aufnahmedaten in die 3D-Imaging- und Planungs-Software Invivo 5 (Anatomage Inc., San Rose, Californien) erfolgte im DICOM-Format an einem von Mesantis® Berlin bereitgestellten Rechner. Diese Software ermöglicht eine dreidimensionale Darstellung der Modelle und die Rekonstruktion der Volumendaten zu zahlreichen Schichtdarstellungen. Die folgenden Abbildungen zeigen die verschiedenen Ansichten der Ausrichtung im *Volume Render Mode* am Beispiel des Modells A. (Abb. 12, Abb. 13)

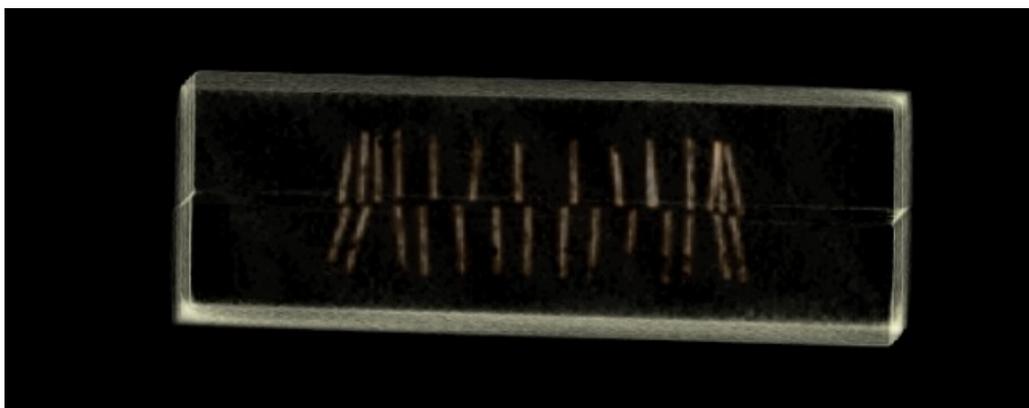


Abb. 12: Dreidimensionale Darstellung, Modell A, *Volume Render Mode*

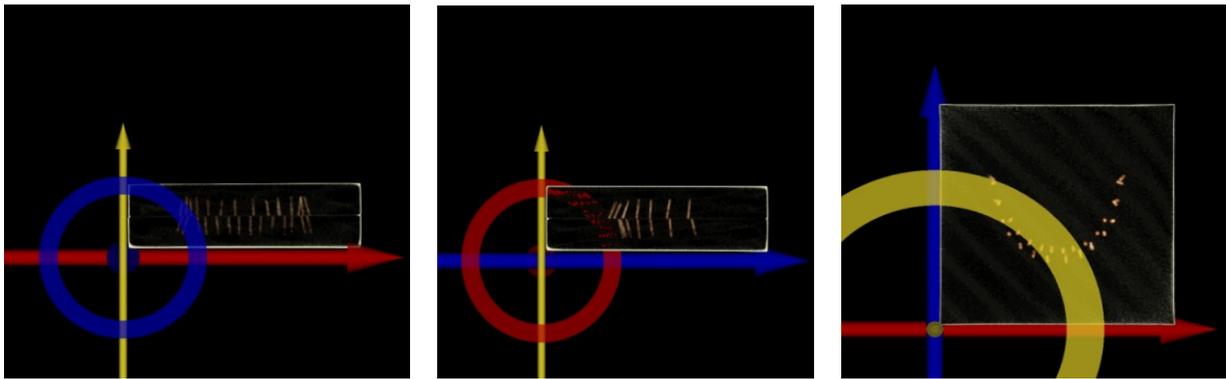


Abb. 13: Ausrichtung, Modell A, horizontale, sagittale und okklusale Ebene, *Volume Render Mode*

Zunächst wurden die mesiodistalen Angulationen direkt aus den 3D DVT Datensätzen (3D) im *Arch Section Mode* der Software. Nach Kalibrierung der Modelle erfolgte die Einstellung einer zur Blockebene parallelen und möglichst nahen Schicht in der koronalen Ansicht (Abbildung 14, rote Linie) Dieses Vorgehen gewährleistet die Darstellung aller Zylinderquerschnitte für die Festlegung der parabelförmigen Zylinderbogenebene mittels 30 manuell gesetzter Markierungspunkte (14, braune Linie) durch die Anwendung der *Focal Through Option*. Alle 14 Zylinder wurden hierbei markiert und zusätzlich in jedem Zylinderzwischenraum ein weiterer Punkt, sowie ein Start- und Endpunkt gesetzt, um eine komplette Ansicht der Zylinder in der Panoramadarstellung zu erhalten. (Abb. 14)

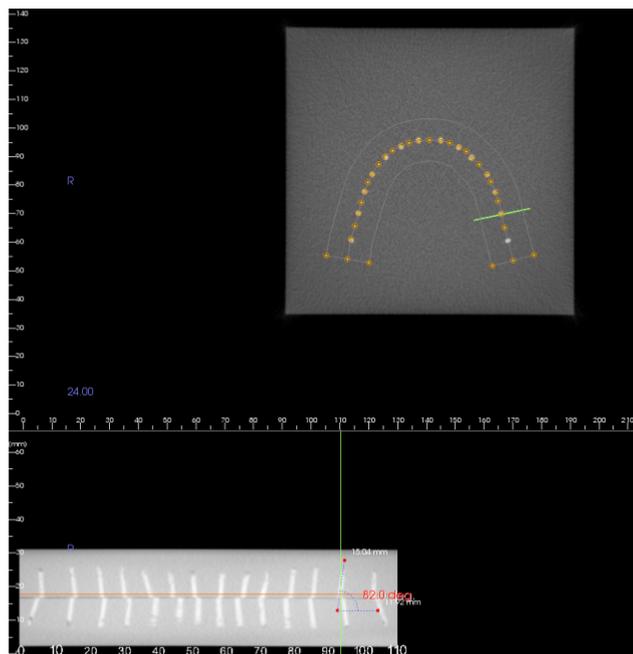


Abb. 14: Zylinderbogenebene (braune Kurve) in der Schnittebene (rote Linie), Panoramaansicht des Zylinderbogens mit Winkelmessung, *Arch Section Mode*

Die Winkel der mesiodistalen Angulation ergeben sich aus der Längsachse der gefüllten Bohrungen und der dargestellten Blockebene. Sowohl die Ausrichtung der Modelle im *Volume Render Mode* als auch die Festlegung der Zylinderbögen und die Messungen der einzelnen mesiodistalen Angulationen wurden für jeden Block fünfmal durchgeführt. (Abb. 15, Abb. 16)

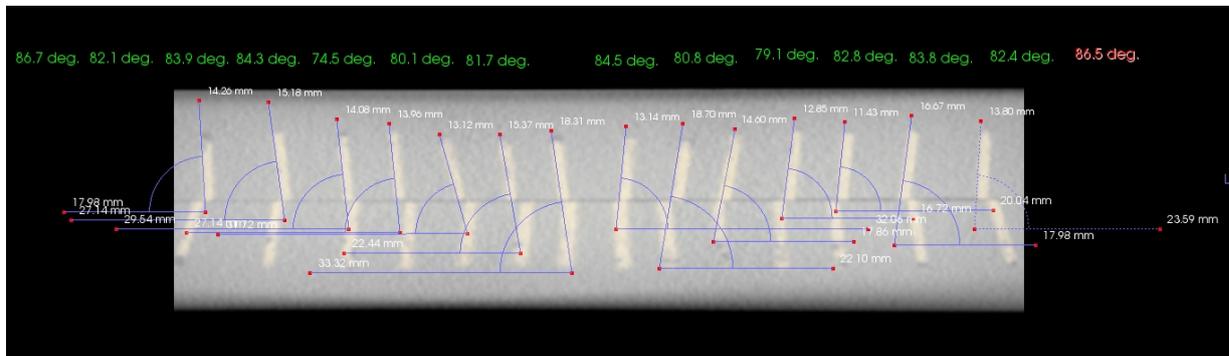


Abb. 15: Zylinder mit mesiodistalen Angulationen, oberer Block, Modell A

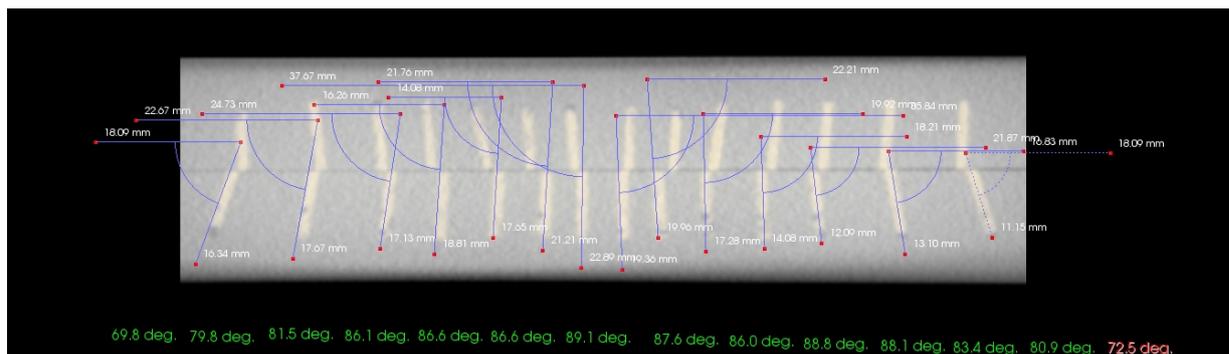


Abb. 16: Zylinder mit mesiodistalen Angulationen, unterer Block, Modell A

In einem weiteren Abschnitt wurden nach erneuter Ausrichtung der dreidimensionalen Darstellungen der Modelle in sagittaler, vertikaler und koronaler Ebene im *Volume Render Mode* die Rekonstruktionen idealer Panoramaansichten im *Arch Section Mode* durchgeführt. Diese wurden für den oberen und den unteren Block jeweils getrennt voneinander erstellt. Hier wurde zunächst die Einstellung einer Schicht parallel zur Blockebene mit geringstmöglichem Abstand zu dieser vorgenommen. Die *Create New Spline* Option ermöglicht das Setzen zahlreicher Punkte entlang der aus den Querschnitten der gefüllten Bohrungen gebildeten Parabel und bietet dadurch die Rekonstruktion einer optimalen Panoramaansicht der Zylinder. (Abb. 17)

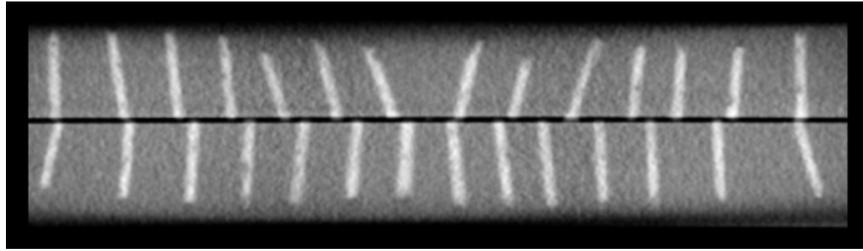


Abb. 17: Rekonstruierte Panoramascichtaufnahme, Modell A

Danach wurden die rekonstruierten Panoramascichtaufnahmen (reko PSA) in das Diagnostikprogramm FR-win (Fa. Computer Konkret, Falkenstein, Deutschland) importiert und die Analyse opgsie definiert, die es ermöglicht die mesiodistalen Angulationen der Zylinder zu bestimmen. Hierbei wurden die Zylinderachsen durch Markierung von zwei Punkten mit Mindestabstand von 5 mm erfasst und die Winkel zu der - durch sechs Punkte festgelegten - Blockebene vom Programm berechnet. (Abb. 18) Die 28 Winkel einer Auswertung werden vom Programm in einer Tabelle aufgelistet.

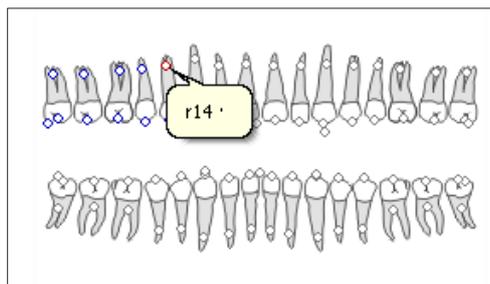


Abb. 18: Festlegung der Zylinderachsen, Analyse opgsie, FR-Win

Im Anschluss wurden die Modelle mit einer speziell auf die Untersuchungskörper abgestimmten Halterung in dem digitalen 2D Röntgengerät Orthophos XG plus (Sirona Dental Systems GmbH, Bensheim, Deutschland) fixiert. Jedes Modell wurde in idealer (PSAi), anteriorer (PSAa) und nach posterior angulierter (PSAw) Position bei einer Röhrenspannung von 60-62 kV und einer Röhrenstromstärke von 12-16 mA aufgenommen. Die Ausrichtung erfolgte mit den geräteintegrierten Lichtvisieren. (Abb. 19 – Abb. 24)

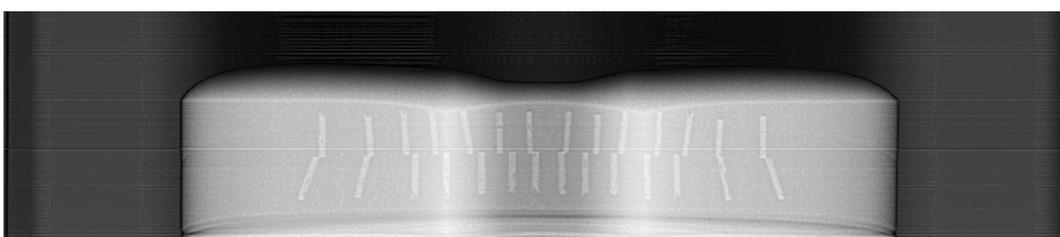


Abb. 19: Konventionelle Panoramascichtaufnahme, Modell A, ideale Position

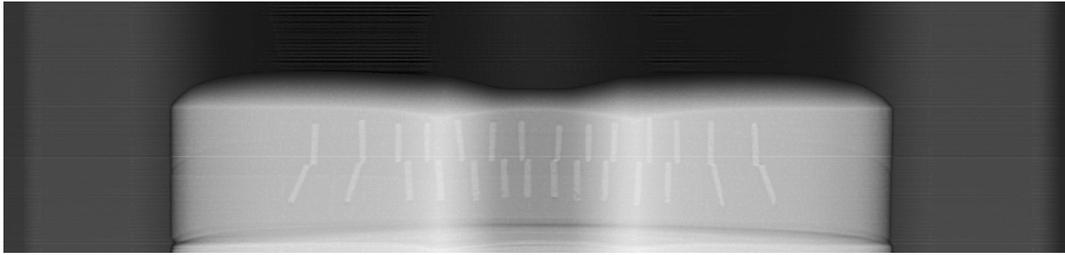


Abb. 20: Konventionelle Panoramaschichtaufnahme, Modell B, ideale Position

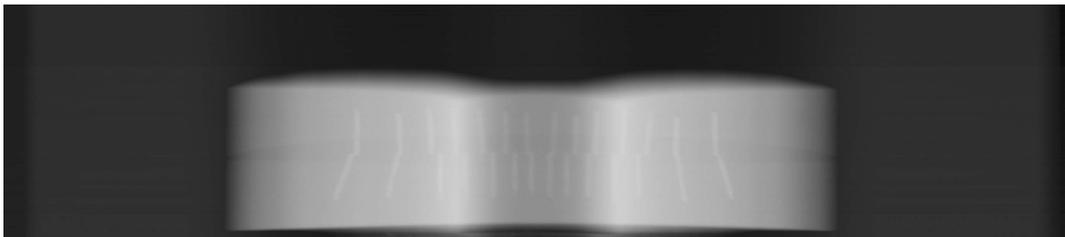


Abb. 21: Konventionelle Panoramaschichtaufnahme, Modell A, anteriore Position

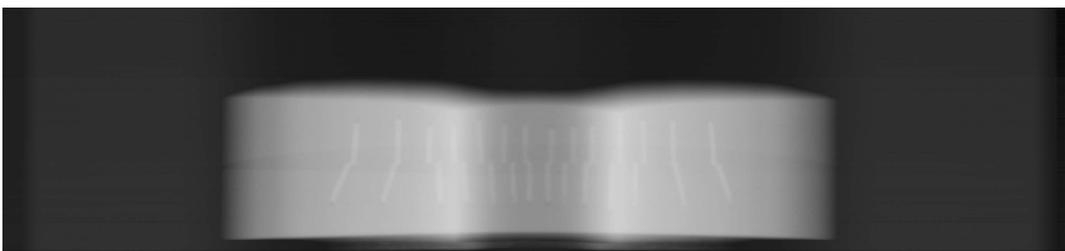


Abb. 22: Konventionelle Panoramaschichtaufnahme, Modell B, anteriore Position

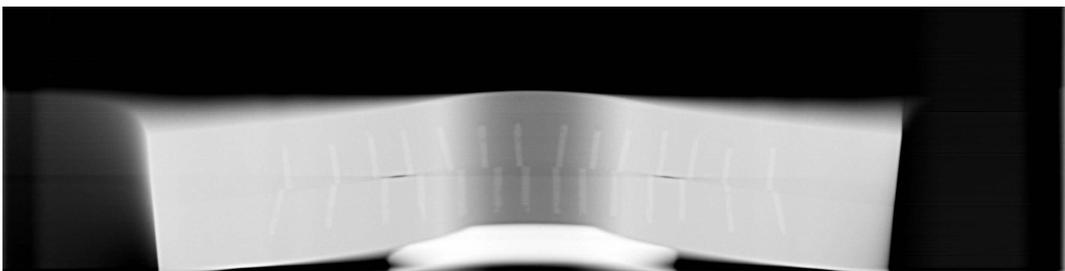


Abb. 23: Konventionelle Panoramaschichtaufnahme, Modell A, angulierte Position



Abb. 24: Konventionelle Panoramaschichtaufnahme, Modell B, angulierte Position

3.2.3 Bukklinguale Zylinderangulation

Einen weiteren Vorteil der dreidimensionalen Röntgentechnik stellt die Möglichkeit zur Bestimmung der bukkolingualen Zahnwurzelangulationen dar. Die Erhebung der entsprechenden Winkel der Zylinder erfolgte über den 3D DVT Datensatz mithilfe der Software Invivo 5 analog der Beschreibung zur Erfassung der mesiodistalen Angulationen. Nach Ausrichtung der einzelnen Blöcke der zwei Modelle in allen Raumebenen im *Volume Render Mode* und Erstellung der parabelförmigen Zylinderbogenebenen im *Arch Section Mode* erfolgte die Darstellung verschiedener Ansichten, wie in Abbildung 25 dargestellt. So ist die Orientierung der einzelnen *cross sections* des Zylinderbogens stets nachvollziehbar. Die bukkolingualen Winkel ergeben sich aus den Längsachsen der Zylinder zur Blockebene in den *cross sections*. Durch die Limitierung der Schichtdicke auf 5mm konnten alle Zylinder für die Erfassung der bukkolingualen Angulationen in den *cross sections* gut dargestellt werden. (Abb. 25)

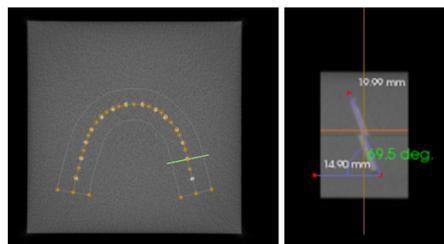


Abb. 25: Zylinderbogenebene (braun), cross section (grün), bukklinguale Winkelmessung, *Arch Section Mode*

3.2.4 Einfluss der bukkolingualen Angulationen

Die Methoden PSAa und PSAw werden zur Erfassung des Einflusses der bukkolingualen Angulationen vernachlässigt und unter Punkt 3.2.6 näher betrachtet.

Aufgrund der Verstärkung der bukkolingualen Angulationen für die Quadranten 1 (BL=x), 2 (B= x+5°), 5 (BL=x+10°) und 6 (BL=x+15°) der oberen und die Quadranten 3 (BL=x), 4 (BL=x+5°), 7 (BL=x+10°) und 8 (BL=x+15°) der unteren Blöcke um jeweils 5° von Quadrant zu Quadrant konnte der Einfluss der bukkolingualen Angulationen auf die Darstellung der mesiodistalen Neigungen anhand von Vergleichen vorgenommen werden.

Des Weiteren wurden die Summen der absoluten mesiodistalen Differenzen gegen die Summen der bukkolingualen Winkel der Referenzen aufgetragen, sowie die mesiodistalen Differenzen gegen die entsprechenden bukkolingualen Referenzen.

3.2.5 Einfluss der Zylinderbogenkrümmung

Die Methoden PSAa und PSAw werden zur Erfassung des Einflusses der Zylinderbogenkrümmung vernachlässigt und unter Punkt 3.2.6 näher betrachtet.

Um den Einfluss der Krümmung der Zylinderbögen auf die Darstellungsgenauigkeit der mesiodistalen Angulationen zu ermöglichen, wurden zunächst für jedes Verfahren die Differenzen zu den Referenzen der sieben Zylinder beleuchtet. Da alle Zylinder der Positionen 1-7 in den 8 Quadranten die gleiche Krümmung besitzen, wurden die sieben Zylinder mit den 8 Differenzen der einzelnen Quadranten dargestellt und miteinander verglichen. Die Zylinderbogenkrümmung der Positionen 1, 2 und 3 ist im Vergleich zu der, der Positionen 4 und 5 stärker und geht im Bereich der Zylinder 6 und 7 gegen Null.

Anschließend wurden die Summen der absoluten mesiodistalen Differenzen für jeden Zylinder berechnet und in Liniendiagrammen für die oberen und unteren Blöcke separat dargestellt, um die Positionen im Zylinderbogen mit den höchsten Gesamtdifferenzen zu erfassen.

Die Betrachtung der mesiodistalen Differenzen wurde für die oberen und unteren Blöcke ebenfalls getrennt analysiert.

3.2.6 Einfluss der Modellposition im Röntgengerät

Eine vom Ideal abweichende Position der Modelle verhindert die Übereinstimmung von Zylinderbogen und orthoradialem Verlauf des Röntgenstrahlers. Durch die Entfernung der Zylinder von der Schichtebene ergeben sich unterschiedliche Vergrößerungsfaktoren entlang der Zylinderbögen und der einzelnen Zylinderachsen mit der Gefahr einer fehlerhaften Darstellung der mesiodistalen Angulationen. Im Rahmen der Untersuchungen wurden die Modelle A und B während der Aufnahme in idealer, anteriorer und posterior angulierter Position fixiert. Die Festlegung der idealen Position erfolgte unter strengster Beachtung der Übereinstimmung der Medianebene von Modell und vertikalem Lichtvisier sowie der Parallelität von Blockebene und Frankfurter Horizontale mithilfe des horizontalen Lichtvisiers, wobei der Inzisalpunkt der Modelle auf Höhe der Einbisshalterung des Röntgengerätes gewählt wurde. Während der Aufnahmen in anteriorer Position wurden die Modelle im Gerät um 2,5 cm nach ventral versetzt. Hingegen entsprach die posteriore Kippung im Wesentlichen der idealen Position, wobei das anteriore Anheben der Modelle über die Höhe der

Einbisshalterung hinaus in einer Dorsalneigung der Blockebene in Relation zur Frankfurter Horizontalen resultierte.

3.2.7 Fehlerberechnung der Zahnwurzelangulationen

Die Bestimmung des methodischen Fehlers wurde analog der Fehlerberechnungen der Zylinderangulationen im Rahmen der statistischen Analyse durchgeführt.

3.2.8 Mesiodistale Zahnwurzelangulationen in Abhängigkeit von der Methode

Einschlusskriterien der vorliegenden Patientendatensätze bildeten DVT-Aufnahmen mit vollständig dargestellten dentalen Regionen von mit mindestens 28 optimal im Zahnbogen stehenden Zähnen und harmonisch ausgeformten Zahnbögen. Die 3D DVT-Datensätze wurden in der 3D-Imaging- und Planungs-Software Invivo 5 eines von Mesantis® Berlin bereitgestellten Rechners aufgerufen und die Schädel im *Volume Render Mode* in allen Raumebenen ausgerichtet. (Abb. 26)

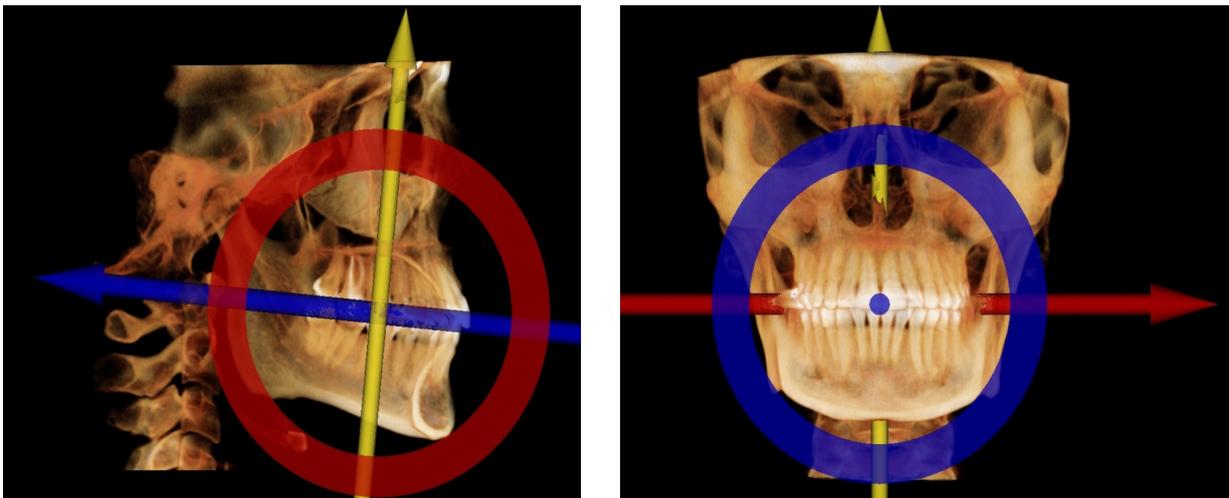


Abb. 26: Ausrichtung eines Schädels in Sagittal- und Frontalansicht, *Volume Render Mode*

Für die parallel zur Okklusionsebene eingestellte Schicht der koronalen Ansicht des *Arch Section Mode* wurde zunächst die Ebene gesucht, die alle Kronenmittelpunkte der Ober- bzw. Unterkieferdentition optimal erfasst (Schnittebene). Durch das Setzen von 30 Markierungspunkten mit Hilfe der *Focal Through Option* wurde die ideale parabelförmige Schichtebene für die Zahnbögen konstruiert. Die Messungen der mesiodistalen Wurzelangulationen der Zahnlängsachsen wurden im *Arch Section Mode* vorgenommen. (Abb. 27)

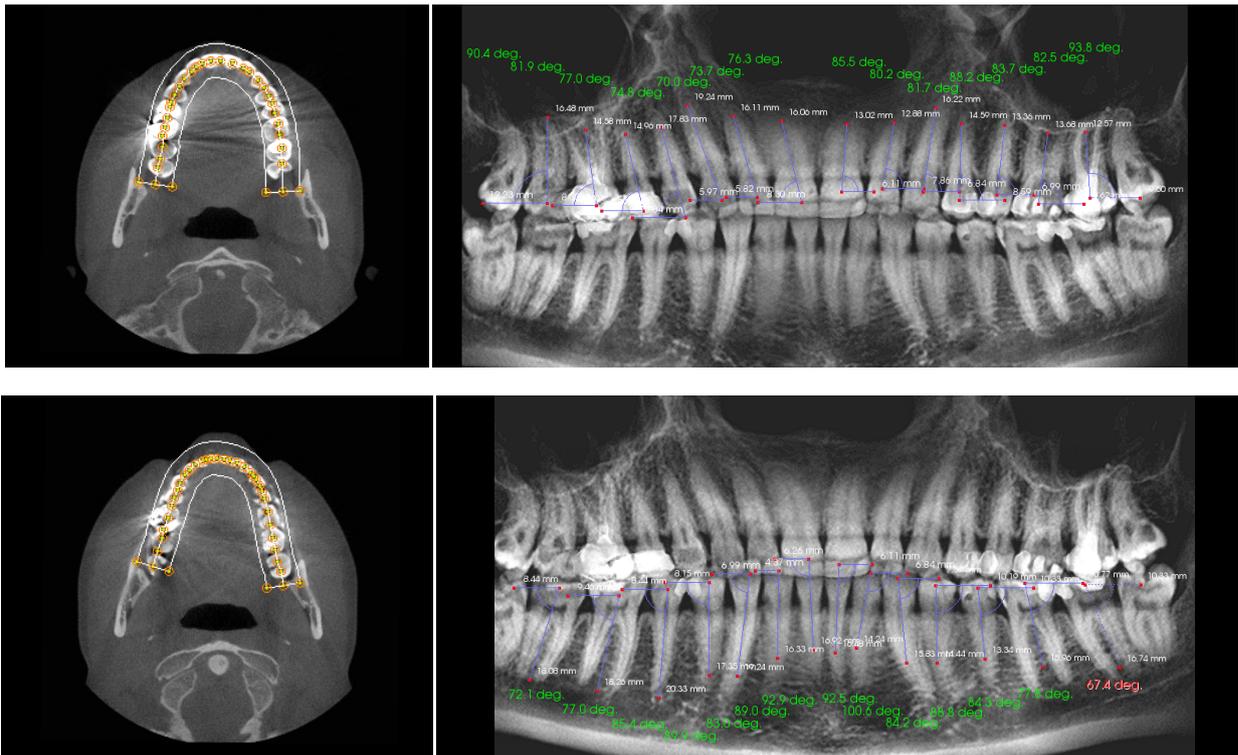


Abb. 27: Rekonstruierte PSA, Oberkiefer, Unterkiefer, mesiodistale Winkel, Arch Section Mode

Die Rekonstruktion der Panoramaaufnahmen aus den 3D DVT Datensätzen der Patienten erfolgte am ausgerichteten Schädel im Arch Section Mode. Die Konstruktion der idealen Zahnbogenebene mittels der Focal Through Option wurde für Ober- und Unterkiefer getrennt voneinander vorgenommen, um möglichst präzise Panoramadarstellungen jedes Kiefers zu erstellen, die jeden Kronenmittelpunkt in der Schichtebene erfasst. (Abb. 28) Die Rekonstruktionen wurden in die Diagnostiksoftware FR-Win importiert und deren mesiodistale Wurzelangulationen mittels der opisie Analyse gemessen. (Abb. 29)



Abb. 28: Frontalansicht eines Schädels mit Schnittebene (rot), Schichtebene (braun) in Schnittebene, rekonstruierte PSA, Arch Section Mode

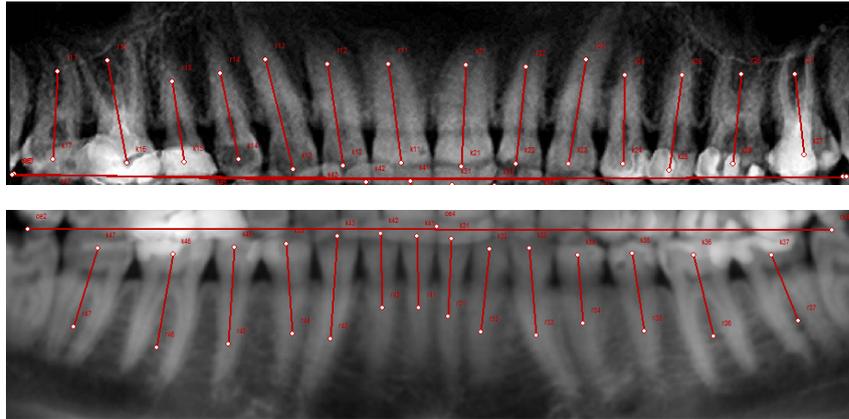


Abb. 29: Rekonstruierte PSA, Oberkiefer, Unterkiefer, Okklusionsebenen, Zahnachsen, FR-Win

Die Auswertung der mesiodistalen Wurzelangulationen der konventionellen Panoramaschichtaufnahmen der Patienten wurde analog der Messungen der Modelle mit der Analyse opgsie im Diagnostikprogramm FR-Win durchgeführt. Die Unterteilung der Okklusionsebene in sechs wurde zur Optimierung der Winkelbestimmung für die Bereiche 17-13, 13-23, 23-27, 37-33, 33-43, und 43-47 vorgenommen. (Abb. 30) Die Analyse wurde im Abstand von vier Wochen fünfmal durchgeführt.

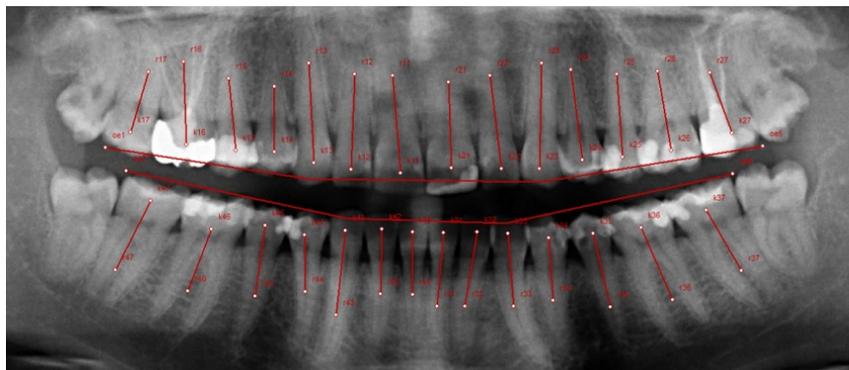


Abb. 30: Konventionelle PSA, Okklusionsebenen, Zahnachsen, FR-Win

3.2.9 Bukklinguale Zahnwurzelangulationen

Zur Bestimmung der bukkolingualen Angulationen wurden nach Ausrichtung der Schädel im *Volume Render Mode* und Festlegung der idealen Schichtebene im *Arch Section Mode* 14 cross sections als 5 mm starke Schichten für jeden Zahn im Kronenmittelpunkt erstellt und die bukkolingualen Wurzelangulationen als Winkel zwischen Zahnlängsachse und Okklusionsebene abgetragen. Dieses Vorgehen wurde für jeden Kiefer separat durchgeführt. (Abb. 31)

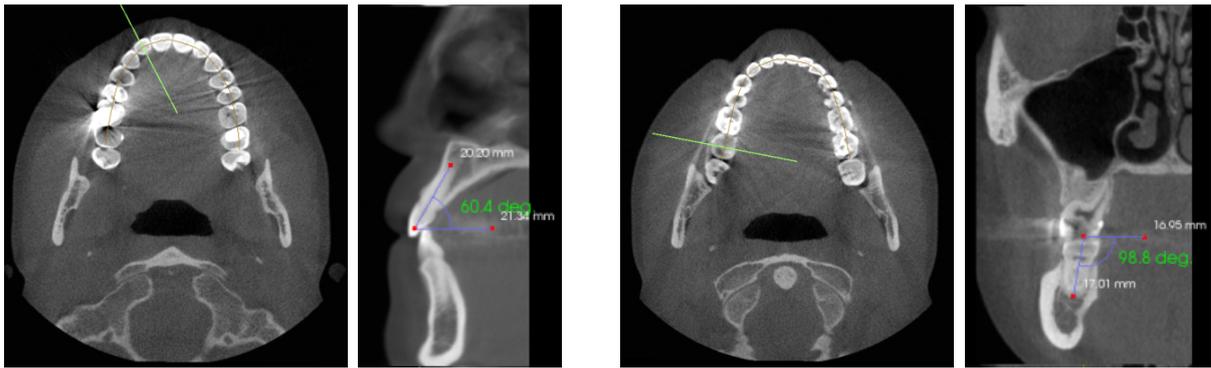


Abb. 31: Schnittebenen mit Kronenmitten, Oberkiefer, Unterkiefer, cross section Zahn 11 und 47, bukkolinguale Winkelmessung, Arch Section Mode

3.3 Statistische Auswertung der erhobenen Daten

Die statistische Datenanalyse der erhobenen Messwerte wurde mit Hilfe des Tabellenkalkulationsprogramms Excel® 2007 (Microsoft Deutschland GmbH, Unterschleißheim, Deutschland) und der Statistiksoftware SPSS Version 17.0 (SPSS INC., Chicago, IL, USA) durchgeführt. Zur Auswertung lagen im Gesamten 1680 Messpunkte beziehungsweise Winkel der Modelle A und B, sowie 504 Messungen von drei Patienten vor. Die erhobenen Daten wurden in speziell angelegte Tabellen manuell eingegeben, die als Grundlage für die statistischen Analysen dienten.

Zunächst wurde der Methodenfehler anhand der Formel von Dahlberg erhoben. Hierfür dienten 28 zufällig gewählte Messungen, die im Abstand von 4 Wochen wiederholt durchgeführt wurden. Die Bestimmung dieses methodischen Fehlers erfolgte unter Berücksichtigung der verschiedenen Aufnahmetechniken der Modelle bzw. des Patienten. Die von Dahlberg angegebene Formel (1) lautet wie folgt: [Dahlberg 1940]

$$\delta = \sqrt{\sum d^2 / 2n} \quad (1)$$

Die Formel beschreibt das Ausmaß der Schwankungsbreite zweier Werte einer wiederholten Messung, wobei d für die Differenz zwischen Einzelwert und Mittelwert der beiden Einzelmessungen und n für die Anzahl der wiederholten Messungen steht. Eine große Annäherung von δ an Null bestätigt einen geringen Methodenfehler.

Für die Beurteilung der Zuverlässigkeit der Methoden wurde der Reliabilitätskoeffizient Cronbachs Alpha bestimmt. Dieser prüft die interne Konsistenz von Messverfahren und

beruht auf den Korrelationen der fünf Messungen (Items) der angewandten Methoden. Cronbachs Alpha wird nachfolgender Formel (2) berechnet. [Krüger et al. 2014]

$$\alpha = \frac{N \cdot r}{1 + (N-1) \cdot r} \quad (2)$$

Hier entspricht N der Anzahl der Items und r der mittleren Interkorrelation der N Items. Hohe Werte sprechen für ein in sich hoch konsistentes Messverfahren.

Im Rahmen der deskriptiven Statistik wurden die arithmetischen Mittel als Lagemaße, die Standardabweichungen als Maße für die Streuung um den Mittelwert, sowie Minima und Maxima der fünf Messdurchgänge getrennt nach den Ermittlungsverfahren und Angulationsrichtungen der Winkel gebildet und mittels Fehlerbalkendiagrammen dargestellt.

Für den Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der Winkel innerhalb der Verfahren wurden für die mesiodistalen bzw. bukkolingualen Angulationen Box-Plot-Diagramme angefertigt. Die dargestellten Boxen werden durch ein 25%- und ein 75%- Perzentil begrenzt und schließen 50% der erhobenen Werte ein. Die Stempel beinhalten jene Werte, die noch keine Ausreißer sind. Die außerhalb dieser Bereiche liegenden, als Ausreißer bezeichneten Winkel weichen 1,5 bis 3 Boxhöhen von den jeweiligen Perzentilen ab. Abweichungen von mehr als 3 Boxhöhen werden Extremfälle genannt.

Zusätzlich wurden die durchschnittlichen Abweichungen der Mittelwerte zu den Referenzwerten für alle Zylinder berechnet, um die Genauigkeit der Ergebnisse zu prüfen. Hierfür wurden nach der unten aufgeführten Formel (3) die Wurzeln der durchschnittlichen quadrierten Differenzen der fünf Messungen jedes Zylinders gebildet und miteinander verglichen. Werte nahe der Null sind Ausdruck für die hohe Validität (Gültigkeit) der Ergebnisse.

$$\text{Abweichung} = \sqrt{((\text{Mess1} - \text{Ref})^2 + (\text{Mess2} - \text{Ref})^2 + (\text{Mess3} - \text{Ref})^2 + (\text{Mess4} - \text{Ref})^2 + (\text{Mess5} - \text{Ref})^2)/5} \quad (3)$$

Der Korrelationsquotient nach Pearson ist ein dimensionsloses Maß für den linearen Zusammenhang zwischen zwei Variablen. Nimmt er einen Wert von 1 an, so spricht dies für einen vollständig positiven Zusammenhang, nähern sich die Werte -1, entspricht dies einer vollständig negativen Korrelation, wobei Werte um Null auf einen nicht linearen Zusammenhang hindeuten.

Die weitere Prüfung der Hypothesen erfolgte unter Annahme der Normalverteilung der Messwerte mittels des gepaarten t-Tests. Die Ergebnisse statistischer Tests werden mittels des p-Wertes beschrieben, der die Wahrscheinlichkeit, dass die Teststatistik dem beobachteten Wert entspricht oder einen extremeren Wert annimmt, entspricht, wobei stets von der Nullhypothese ausgegangen wird. [Bender R, Lange S, 2007] Zur Bewertung der Signifikanztests wurde vor der Datenerhebung die maximale Irrtumswahrscheinlichkeit, die den Fehler der 1. Art – die Ablehnung der Nullhypothese, obwohl sie wahr ist – auf das Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ (5%) festgelegt. Kleinere p-Werte bedeuten statistische Signifikanz zum Niveau α . Die Prüfung auf Signifikanz der Abweichungen der erhobenen Daten von den Referenzwerten der mesiodistalen bzw. bukkolingualen Angulationen wurde unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Methoden durchgeführt.

Im Anschluss des gepaarten t-Tests wurde die Effektstärke Cohen´s d berechnet. Diese gibt den Abstand zweier Verteilungen in der Einheit ihrer gemeinsamen Standardabweichung an, wobei die Normalverteilung und die Homogenität der Varianzen vorausgesetzt werden. Die Einteilung nach Cohen 1988 erfolgte für Werte ab 0,2 in kleine, ab 0,5 in mittlere und ab 0,8 in große Effekte. [Tran 2011] (Abb. 32)

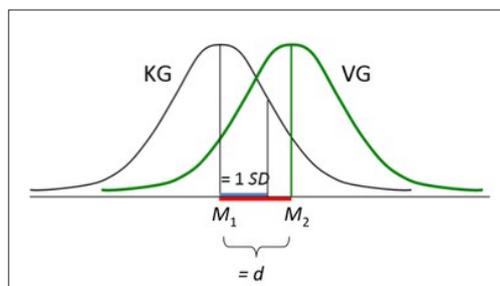


Abb. 32: Effektstärke Cohen´s d [Tran 2011]

Laut Grouven und Kollegen ist die alleinige Beleuchtung der durchschnittlichen Differenzen von Messwerten (Verzerrung) nicht ausreichend für eine Beurteilung der Genauigkeit von Messmethoden. [Grouven et al. 2007] Sie empfehlen das grafische Verfahren nach Bland und Altman zur Darstellung der Verzerrung und Streuung von Daten. [Grouven et al. 2007] Hierbei werden die Differenzen korrespondierender Werte der Verfahren zur Referenz gegen deren Mittelwerte grafisch gegeneinander aufgetragen. Somit werden die durchschnittliche Übereinstimmung der Verfahren und die Streuung der Differenzen der Wertepaare ersichtlich, sowie die durchschnittliche Abweichung der Methode als Verzerrung d ablesbar. Die ermöglicht eine Beurteilung

der individuellen Abweichungen der verschiedenen Messmethoden. 95% der Werte liegen im Bereich $d \pm 2s$ (s = Standardabweichung der Differenzen) und werden als *limit of agreement* (=Übereinstimmungsgrenze) bezeichnet.

Des Weiteren wurden anhand von Liniendiagrammen die Summen der mesiodistalen Winkelabweichungen der Zylinder 1-7 für die oberen und unteren Quadranten grafisch dargestellt. Mit Hilfe dieser Diagramme können Aussagen über den Einfluss der mesiodistalen und bukkolingualen Winkel, sowie der Zylinderbogenkrümmung getroffen werden.

Im Rahmen der Untersuchungen bezüglich der Abweichungen mesiodistaler Zylinderangulationen im Vergleich zur Referenz, wurde zunächst die Darstellung der Zusammenhänge von bukkolingualer und mesiodistalen Angulationen vorgenommen und miteinander verglichen. Für jeden Zylinder mit gleicher mesiodistaler Ausrichtung lagen vier unterschiedliche bukkolinguale Winkel vor, sodass die Angulationen von Zylinder 1-7 der Quadranten 1,2,5 und 6 der oberen Blöcke und der Quadranten 3,4,7 und 8 der unteren Blöcke gegenübergestellt werden konnten.

Anschließend wurden die Positionen der Zylinder im Zahnbogen betrachtet. Hierbei wurden die unterschiedlichen Verfahren zur Ermittlung der mesiodistalen Winkel hinsichtlich ihrer Darstellungsgenauigkeit in Abhängigkeit der Krümmungsgrade des Zylinderbogens in Diagrammen beleuchtet.

Für die grafische Darstellung der Relationen der mesiodistalen und bukkolingualen Winkel wurden die Summen der absoluten durchschnittlichen Abweichungen der 7 Zylinder in Liniendiagrammen gegen die Summen der bukkolingualen Angulationen aufgetragen. Dabei wurden die oberen und unteren Blöcke getrennt voneinander betrachtet.

Zudem wurde im Rahmen der Untersuchungen der Einfluss der Modellposition während der konventionellen Panoramaschichtaufnahme auf die mesiodistalen Zylinderangulationen geprüft. Hierfür dienten die Ergebnisse der drei unterschiedlichen Positionen der Modelle in idealer, anteriorer und gekippter Stellung.

Die Auswertung bezüglich der mesiodistalen und bukkolingualen Wurzelangulationen von drei ausgewählten Patienten erfolgte durch den Vergleich der Verfahren 3D, reko PSA und PSAi mit Hilfe von Tabellen und Diagrammen.

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Messungen von 56 Zylindern der Modelle A und B, sowie von 84 Zähnen der Patienten 1, 2 und 3 ausgewertet und miteinander verglichen. Das folgende Schema der Abbildung 33 stellt einen Überblick der Untersuchungen dar.

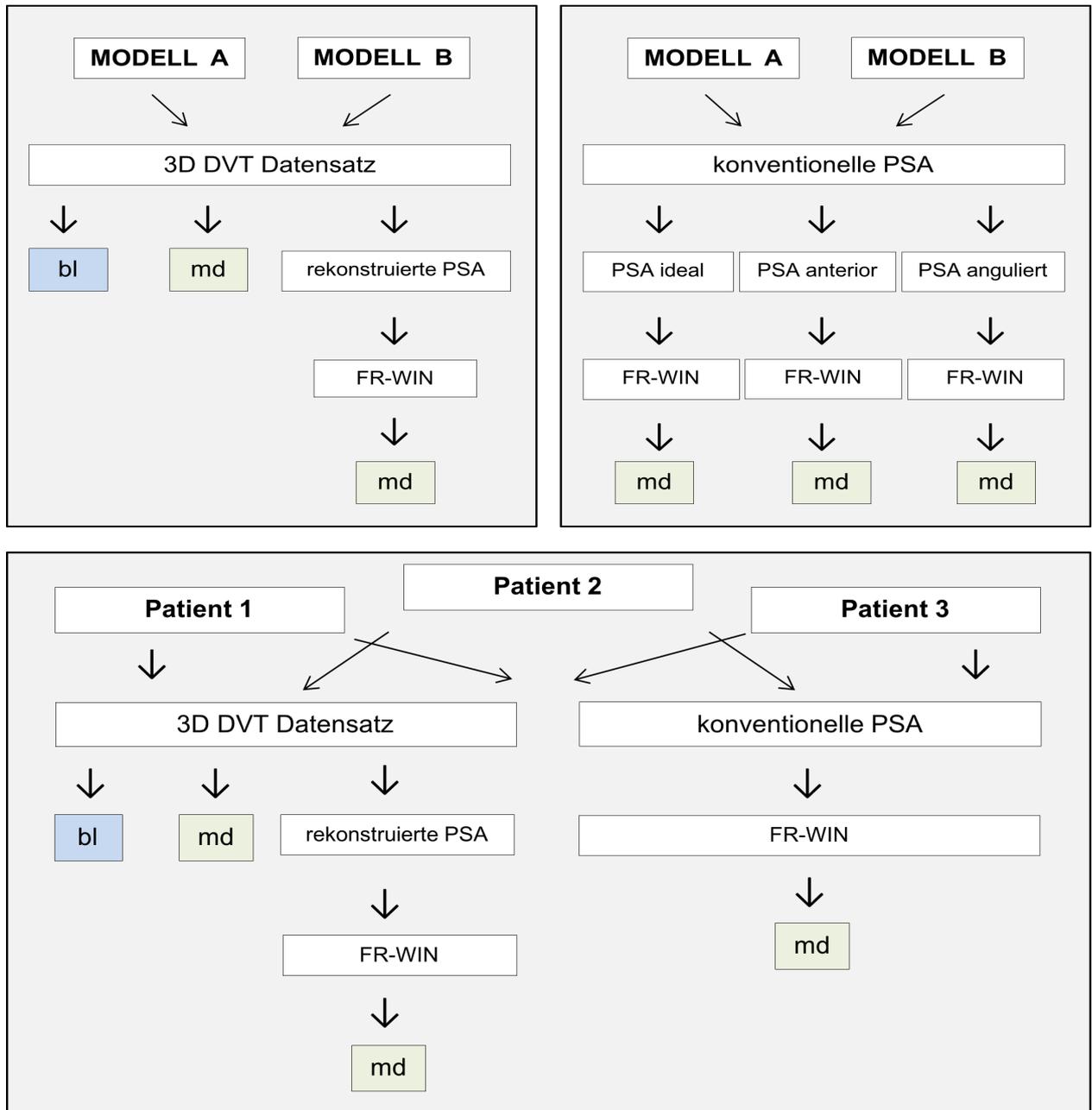


Abb. 33: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus, Modelle A und B, Patienten 1, 2 und 3

4.1 Fehlerberechnung der Zylinderangulationen

Der Methodenfehler nach Dahlberg δ weist mit Werten zwischen 0,41 und 0,6 für alle Verfahren eine gute intraindividuelle Reproduzierbarkeit auf. Die Ergebnisse aus 28 Messungen sind in Tabelle 3 für die verschiedenen Winkel und Verfahren zusammengefasst. Die methodischen Fehler liegen relativ nah beieinander und weisen nur für die Verfahren PSAa und PSAw geringfügig höhere Werte auf. (Tabelle 3)

Tabelle 3: Methodenfehler nach Dahlberg δ , Zylinderangulationen

BL 3D	MD 3D	MD reko PSA	MD PSAi	MD PSAa	MD PSAw
0,42	0,44	0,5	0,41	0,59	0,6

Hinsichtlich der Zuverlässigkeit der erhobenen Daten kann von einer hohen internen Konsistenz der Verfahren gesprochen werden. Die Ergebnisse der Reliabilitätskoeffizienten zur Bestimmung der mesiodistalen und bukkolingualen Angulationen belegen eine hohe Genauigkeit bzw. Reproduzierbarkeit der Messungen. (Tabelle 4)

Tabelle 4: Reliabilitätskoeffizienten Cronbach's Alpha, Zylinderangulationen

Messverfahren	Cronbachs Alpha	Anzahl der Items
BL_3D	,999	5
MD_3D	,989	5
reko PSA	,983	5
PSAi	,994	5
PSAa	,992	5
PSAw	,988	5

4.2 Mesiodistale Zylinderangulationen in Abhängigkeit von der Methode

Hinsichtlich der Ergebnisse der mesiodistalen Zylinderangulationen liegen die Mittelwerte der fünf Messreihen aller Verfahren nah beieinander, wobei die Messungen der DVT-Methoden im Mittel zu vergrößerten und die, der konventionellen Panoramaschichtaufnahmen zu verkleinerten Ergebnissen führen. Die Methoden PSAw und reko PSA liefern im Durchschnitt mit $-0,97^\circ$ bzw. $+0,98^\circ$ die geringsten und die Verfahren PSAi und PSAa mit $-3,68^\circ$ bzw. $-3,44^\circ$ die größten Mittelwertabweichungen. Die Standardabweichungen liegen für die 3D-Messungen nahe dem Goldstandard und

sind mit denen der reko PSA Methode deutlich geringer als die, der konventionellen Aufnahmeverfahren. (Abb. 34, Tabelle 5)

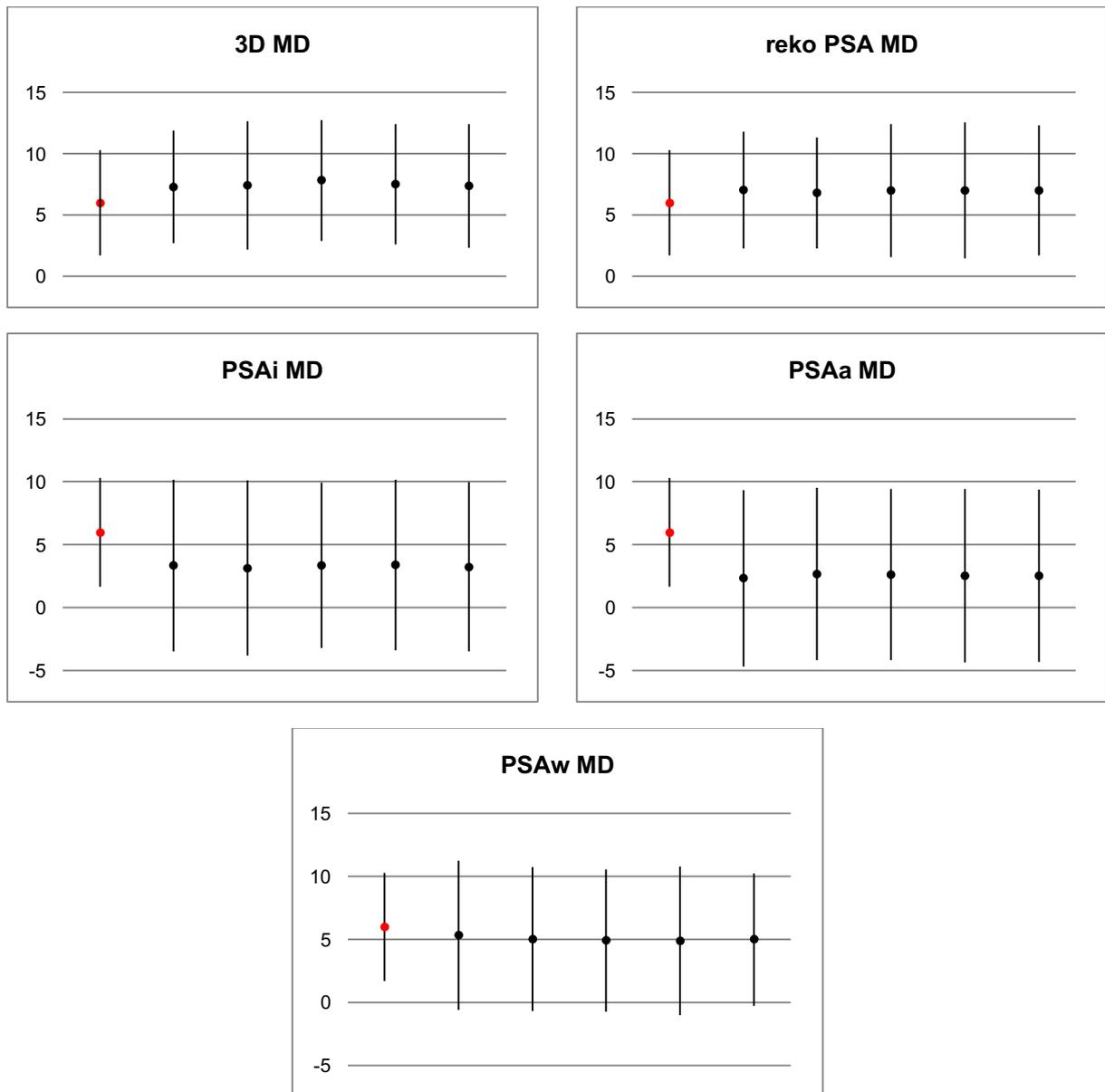


Abb. 34: Fehlerbalkendiagramme, Maximal-, Mittel- und Minimalwerte, Referenz (rot), Durchgänge 1-5 (schwarz)

Tabelle 5: Deskriptive Statistik durchschnittlicher mesiodistaler Zylinderangulationen

Methode	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
Referenz	56	1	16	5,9821	4,30007
3D	56	0,62	22,04	7,4675	4,950142
reko PSA	56	-0,46	21,78	6,95784	5,123272
PSAi	56	-4,94	24,36	3,30038	6,77116
PSAa	56	-5,7	24,58	2,54108	6,866786
PSAw	56	-2,52	22,02	5,01034	5,687434

Bezüglich der Häufigkeitsverteilungen im Rahmen der explorativen Datenanalyse stellt das Verfahren reko PSA die beste Methode dar, dicht gefolgt von den Messungen der 3D Methode. Das unten aufgeführte Box-Plot-Diagramm der Abbildung 35 zeigt eine hohe Übereinstimmung dieser beiden DVT Mediane mit der Referenz, während die Mediane der konventionellen Verfahren deutlich weiter unterhalb des Referenzmedians liegen. Die Ausreißer der Referenz beschränken sich auf die Zylinder 3 der oberen (5,10, 33) und die Zylinder 7 der unteren Blöcke (15, 28, 43, 56). Bei den Methoden 3D und PSAw umfassen diese ausschließlich den unteren Zylinder 7 und die konventionellen Aufnahmen in idealer (PSAi) und anteriorer Modellposition (PSAa) liefern als ungenaueste Verfahren zusätzlich zu den extrem abweichenden Zylindern 7, alle unteren Zylinder 6 (16, 27, 44, 55) als Ausreißer bzw. Extremfälle. Trotz stark vergrößert erfasster Ausreißer und Extremfälle der konventionellen Technik sind die Winkel im Durchschnitt jedoch zu klein dargestellt. (Abb. 35)

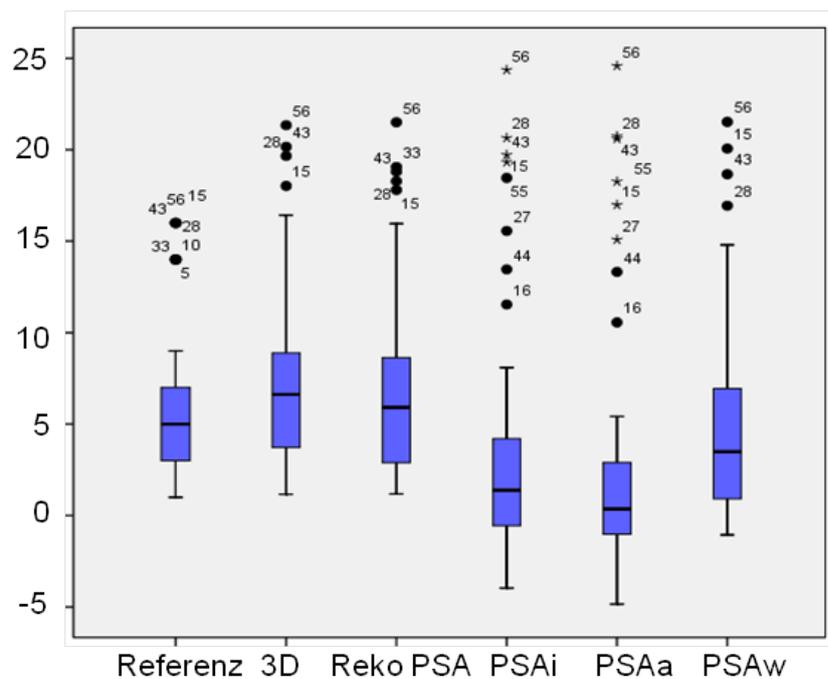


Abb. 35: Box-Plot-Diagramm, Häufigkeitsverteilungen der mesiodistalen Zylinderangulationen

Die Maße der durchschnittlichen Abweichungen einzelner Zylinder jedes Verfahrens sind für die Modelle A und B in den Tabellen 6 und 7 dargestellt und Werte >5 farblich markiert. Die aufgeführten Zahlen stehen als Maß für die Abweichungen von der Referenz, wobei Werte nahe Null eine geringe Abweichung bedeuten. Die präzisesten Erhebungen der mesiodistalen Angulationen erfolgten auf Grundlage der Dentalen Volumenttechnologie. Die durchschnittlichen Abweichungen betragen für die

rekonstruierten PSA (reko PSA) 1,88 und für die direkten Messungen aus den 3D DVT Datensätzen (3D) 1,95. Die ermittelten Werte der konventionellen Panoramaaufnahmen erreichen maximale Abweichungen von bis zu 13,13 (PSAi), 14,15 in (PSAa) und 9,18 (PSAw). Das Maß der Abweichung verhält sich unter den konventionellen Verfahren für die Methode PSAw mit 3,23 im Durchschnitt der 56 Zylinder am besten im Vergleich zu 4,47 (PSAi) und 5,11 (PSAa). Vor allem die Messungen des Modells B (Zylinder 57-87) mit den vergrößert gewählten bukkolingualen Angulationen weisen vermehrt hohe Abweichungen der ermittelten mesiodistalen Winkel in den konventionellen Panoramafotografien auf, das gilt besonders für die Darstellungen in idealer und anteriorer Modellposition. (Tabelle 6, Tabelle 7) Die absoluten Differenzen der durchschnittlichen mesiodistalen Winkelmessungen sind in den Tabellen 18 und 19 des Anhangs, zusammengefasst.

Tabelle 6: Maß der Abweichungen der mesiodistalen Zylinderangulationen zur Referenz, Modell A

Zylinder	Referenz	3D	reko PSA	PSAi	PSAa	PSAw
17	2	1,4050	0,8521	2,1762	1,7573	2,9523
16	7	1,6769	1,5633	3,2184	2,8167	4,9759
15	5	2,1592	1,3416	1,1009	2,4356	3,3383
14	6	0,7510	0,7085	1,9173	3,4240	2,5853
13	14	1,6829	2,1643	5,9676	8,7568	4,2881
12	6	2,6739	2,9843	5,7947	6,0645	1,8226
11	5	3,0903	3,8864	3,5544	5,1494	0,9829
21	5	0,5119	1,4021	0,9920	2,1223	2,9893
22	6	2,8468	1,9298	2,7107	6,2876	1,8778
23	14	2,5231	2,5850	9,5060	12,7322	8,0515
24	6	1,5479	1,5086	3,6373	2,7210	4,2916
25	-5	0,6782	1,4920	1,1018	0,8544	2,0640
26	7	1,0545	1,1446	5,2879	4,3669	4,0937
27	2	1,6982	2,2204	4,1701	4,2993	2,8021
37	16	2,0703	1,9110	3,5401	1,3936	4,4283
36	9	1,6781	1,5460	2,5826	1,8221	4,8021
35	5	1,9529	1,7094	1,6577	4,0107	2,3048
34	3	1,0498	0,7183	1,2961	3,2994	3,0397
33	3	1,1619	1,8232	1,7590	4,1720	2,8450
32	2	1,3476	1,3409	2,3156	2,8976	1,4724
31	1	0,6663	1,3733	0,9899	1,0325	1,9058
41	1	1,3907	1,6673	1,4206	1,0668	1,0286
42	2	1,2050	1,8601	1,5518	3,5037	3,3793
43	3	0,7225	1,3431	3,5799	4,5521	1,3183
44	3	1,1234	1,0714	1,4546	4,2837	1,0286
45	5	2,3841	2,6661	2,7691	4,5471	1,0780
46	9	1,5343	1,5697	6,6076	6,1790	4,3683
47	16	3,7601	2,5542	4,8444	4,8881	2,0283

Tabelle 7: Maß der Abweichungen der mesiodistalen Zylinderangulationen zur Referenz, Modell B

Zylinder	Referenz	3D	reko PSA	PSAi	PSAa	PSAw
57	2	2,2222	1,5007	4,8311	5,1484	2,5908
56	7	1,3528	1,5498	6,0356	8,1006	4,3412
55	5	2,1194	1,2923	7,1131	5,7952	5,8287
54	6	1,3077	1,4128	6,6197	5,6299	5,2566
53	14	3,0361	5,5834	8,6114	10,7368	4,4940
52	6	3,3791	0,8729	8,2301	7,7436	1,3015
51	5	0,9654	1,7292	2,9237	4,7661	1,4276
61	5	2,0523	0,8509	2,3829	3,8784	4,2676
62	6	6,3179	3,2175	4,4373	6,2983	3,0153
63	14	1,1900	2,5020	13,1274	14,1544	9,1767
64	6	0,8832	1,5153	7,7372	4,9491	6,4299
65	5	1,5218	0,6542	6,9327	6,6150	6,1905
66	7	0,5329	1,0507	8,1887	7,5439	6,1727
67	1	4,4672	2,8252	5,0577	5,8761	1,2091
77	16	4,2483	3,1591	3,8215	4,6742	2,7946
76	9	2,7115	2,0144	4,5880	4,5712	3,1315
75	5	1,2720	1,7844	5,1072	5,4944	3,1142
74	3	1,9910	1,2377	4,2818	5,4792	2,1913
73	3	1,5646	1,3130	3,6981	4,2797	1,7877
72	2	1,4751	2,1000	1,7550	1,5987	1,7251
71	1	1,0334	1,1428	1,1393	1,0677	3,3923
81	1	0,7899	2,1624	1,6619	1,7743	0,5060
82	2	1,3878	1,2353	5,7592	5,5809	2,9131
83	3	1,9110	2,0391	6,9055	7,6307	0,9455
84	3	4,0132	1,6679	6,8289	7,5761	3,0483
85	5	1,9241	1,4443	7,2150	9,6713	2,8754
86	9	1,4353	2,1185	9,4762	9,2877	5,9749
87	16	5,9513	6,2217	8,4449	8,6143	5,7886

Die Korrelationsquotienten nach Pearson zeigen starke Korrelationen der Winkelmessungen und Referenzwerte für die drei Verfahren der konventionellen PSA und sehr starke Korrelationen für die DVT Verfahren. Dies belegt deren lineare Zusammenhänge mit einer Signifikanz auf dem Niveau von 0,01, wie in Tabelle 8 dargestellt. Die Ergebnisse des t-Tests sind in Tabelle 9 aufgeführt und die im Anschluss der Singnifikanztests berechneten Effektstärken in Tabelle 10 angegeben. Laut der Einteilung nach Cohen 1988 wurde ein kleiner Effekt für die DVT Verfahren 3D und reko PSA, sowie der konventionellen Aufnahme PSAi beziehungsweise eine mittlere Effektstärke für PSAa ermittelt. Hingegen bleibt die Methode PSAw effektfrei. (Tabelle 8 bis Tabelle 10)

Tabelle 8: Korrelationskoeffizient r nach Pearson, Signifikanz (2-seitig), Zylinder N=56

		Referenz	3D	reko PSA	PSAi	PSAa	PSAw
Referenz	Korrelation nach Pearson	1	,957**	,964**	,761**	,739**	,782**
	Signifikanz (2-seitig)		,000	,000	,000	,000	,000
	N	56	56	56	56	56	56
3D	Korrelation nach Pearson	,957**	1	,974**	,767**	,746**	,808**
	Signifikanz (2-seitig)	,000		,000	,000	,000	,000
	N	56	56	56	56	56	56
reko PSA	Korrelation nach Pearson	,964**	,974**	1	,777**	,758**	,795**
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000		,000	,000	,000
	N	56	56	56	56	56	56
PSAi	Korrelation nach Pearson	,761**	,767**	,777**	1	,980**	,926**
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000		,000	,000
	N	56	56	56	56	56	56
PSAa	Korrelation nach Pearson	,739**	,746**	,758**	,980**	1	,879**
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000		,000
	N	56	56	56	56	56	56
PSAw	Korrelation nach Pearson	,782**	,808**	,795**	,926**	,879**	1
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,000	
	N	56	56	56	56	56	56

Tabelle 9: t-Test bei gepaarten Stichproben mesiodistaler Zylinderangulationen

Methoden	Gepaarte Differenzen					T	df	Sig. (2-seitig)
				95% Konfidenzintervall der Differenz				
	Mittelwert-differenz	Standard-abweichung	Standardfehler des Mittelwertes	Untere	Obere			
Ref - 3D-DVT	-1,48536	1,44934	,19368	-1,87349	-1,09722	-7,669	55	,000
Ref - reko PSA	-0,97571	1,41092	,18854	-1,35356	-,59787	-5,175	55	,000
Ref - PSAi	2,68179	4,41209	,58959	1,50022	3,86335	4,549	55	,000
Ref - PSAa	3,44107	4,60345	,61516	2,20826	4,67388	5,594	55	,000
Ref - PSAw	0,97179	3,45969	,46232	,04527	1,89830	2,102	55	,040

Tabelle 10: Effektstärke Cohen's d mesiodistaler Zylinderangulationen

Referenz vs.	Mittelwert Differenz	Varianz Summe		Cohen's d
3D-DVT	-1,48536	42,00	4,583	-0,324
reko PSA	-0,97571	43,21	4,648	-0,210
PSAi	2,68179	63,30	5,626	0,477
PSAa	3,44107	64,11	5,662	0,608
PSAw	0,97179	49,36	4,968	0,196

Die Gegenüberstellung korrespondierender Differenzen und Mittelwerte, sowie die daraus resultierenden Übereinstimmungsgrenzen c (limits of agreement, $c=d\pm 1,96s$, s =Standardabweichung) und Verzerrungen d der Bland-Altman-Plots verdeutlichen erneut, dass die Methoden zur Bestimmung der mesiodistalen Angulationen mittels DVT zu höheren und die, der konventionellen PSA zu niedrigeren Messwerten im Vergleich zur Referenz führen. [Medizinische Fakultät Mannheim der Universität Heidelberg 2010] Die PSAw- ($d=-0,97^\circ$) und reko PSA-Ergebnisse ($d=0,98^\circ$) liefern die geringsten und die mittels des PSAa- ($d=3,44^\circ$) und PSAi-Verfahrens ($d=2,68^\circ$) bestimmten Werte die stärksten Verzerrungen. Bei dem Verfahren 3D liegen die Übereinstimmungsgrenzen am dichtesten beieinander. Hier wird in 95% der Fälle ein Messwert erhoben, der bis zu $2,84^\circ$ größer beziehungsweise bis zu $1,36^\circ$ kleiner ist als der Referenzwert. Der Übereinstimmungsbereich für die Methode reko PSA reicht über insgesamt $5,35^\circ$, wobei 95% der Ergebnisse bis zu $3,74^\circ$ größer bzw. bis zu $1,79^\circ$ kleiner erfasst werden. Die konventionellen Panoramaschichtaufnahmen hingegen liefern erheblich größere Übereinstimmungsbereiche mit Abweichungen von $5,97^\circ$ (PSAi), $5,58^\circ$ (PSAa) bzw. $5,81^\circ$ (PSAw) nach oben und $11,32^\circ$ (PSAi), $12,46^\circ$ (PSAa) bzw. $7,75^\circ$ (PSAw) nach unten in 95% der erhobenen Daten. (Abb. 36)

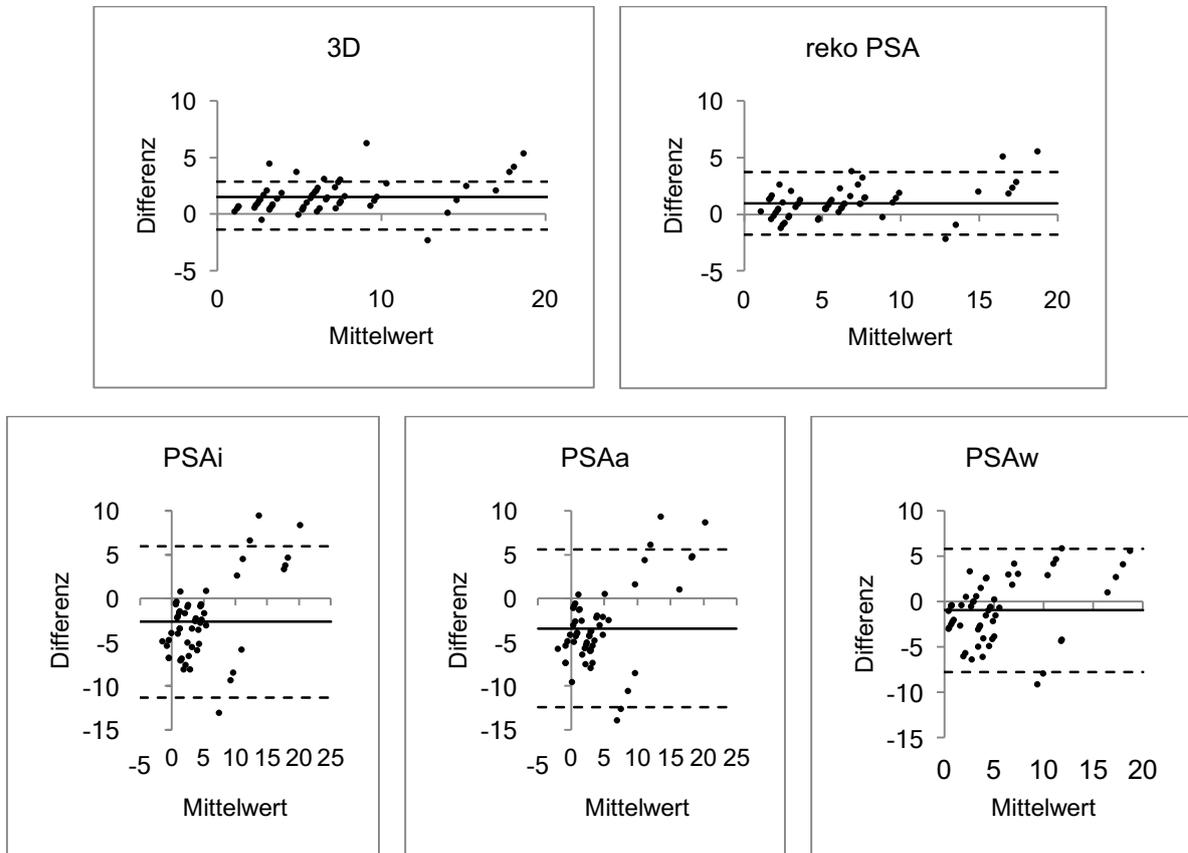


Abb. 36: Bland-Altman-Plots, Verzerrung (Linien), Übereinstimmungsgrenzen (gestrichelte Linien)

4.3 Bukklinguale Zylinderangulationen

Das Verfahren 3D bietet durchweg sehr gute Ergebnisse. Einen Überblick der Mittelwerte aus den fünf Durchgängen der 56 Winkelmessungen für die bukkolingualen Angulationen bieten das folgende Fehlerbalkendiagramm der Abb. 37 und die Tabelle 11. Die Mittelwerte der fünf Messreihen liegen in einem Bereich von 10,99 bis 12,82 im Vergleich zu dem Mittelwert der Referenz von 12,86. Maxima, Minima und Standardabweichung weichen ebenfalls nur geringfügig von denen, der Referenzen ab.

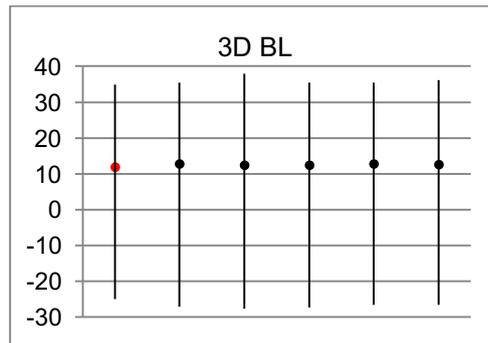


Abb. 37: Fehlerbalkendiagramm, Maximal-, Mittel- und Minimalwerte, Referenz (rot), Durchgänge 1-5 (schwarz)

Tabelle 11: Deskriptive Statistik durchschnittlicher bukkolingualer Zylinderangulationen

Methode	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
Referenz	56	-25	35	11,8571	14,87087
3D	56	-27,016	36,076	12,63592	15,559938

Das Box-Plot-Diagramm der Abbildung 38 zur Darstellung der Häufigkeitsverteilung der bukkolingualen Zylinderangulationen zeigt mit einem nahezu identischen Verhalten der Mediane, Boxhöhen und Ausreißer sehr hohe Übereinstimmungen der Methode mit der Referenz. Zylinder 6 im 4. Quadranten (Zylinder 27) tritt zusätzlich als Ausreißer auf.

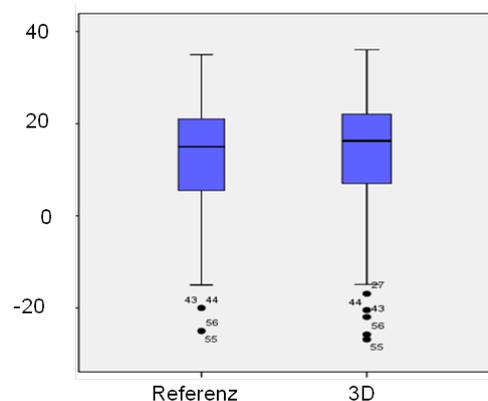


Abb. 38: Box-Plot-Diagramm, Häufigkeitsverteilung der bukkolingualen Zylinderangulationen

Die Maße der durchschnittlichen Abweichungen von den Referenzen sind für die bukkolingualen Angulationen im Vergleich zu den Ergebnissen der mesiodistalen Winkelmessungen deutlich präziser. Lediglich Zylinder 5 des 4. Quadranten und Zylinder 3 des 6. Quadranten übersteigen den Wert 3. Das durchschnittliche Maß der bukkolingualen Zylinderabweichungen liegt bei 1,48 im Vergleich zu den mesiodistalen mit 1,88 (reko PSA), 1,95 (3D), 3,23 (PSAw), 4,47 (PSAi) und 5,11 (PSAa). (Tabelle 12)

Tabelle 12: Maß der Abweichungen bukkolingualer Zylinderangulationen, Modelle A und B

Zylinder	Referenz	3D	Zylinder	Referenz	3D
17	10	0,93487967	57	20	1,67341567
16	5	1,63890207	56	15	1,39157465
15	1	1,03053384	55	11	0,99563045
14	1	0,70569115	54	11	0,93213733
13	12	2,12132034	53	22	2,65820992
12	20	0,86486993	52	30	0,88863941
11	20	2,04646036	51	30	1,35339573
21	25	1,96723156	61	35	1,45920526
22	25	1,81603965	62	35	1,11261853
23	17	2,22755471	63	27	3,60886686
24	6	1,42478068	64	16	1,48299697
25	-6	0,34058773	65	16	1,08734539
26	10	1,80333025	66	20	0,82190024
27	15	1,36161669	67	25	1,02003921
37	-10	0,65366658	77	-20	2,40914923
36	-10	0,76545411	76	-20	1,26885775
35	5	1,96843085	75	15	0,52998113
34	3	1,72821295	74	13	1,04884699
33	10	1,72721742	73	20	0,66024238
32	15	2,88992733	72	25	0,43588989
31	12	1,12832619	71	22	0,56667451
41	17	2,05424439	81	27	1,25047191
42	20	1,02473411	82	30	1,55434874
43	15	0,84951751	83	25	1,63917052
44	8	1,08410332	84	18	2,58641064
45	10	3,16820454	85	20	1,85862315
46	-15	2,21321486	86	-25	1,88554501
47	-15	1,6448465	87	-25	1,4994399

Der Korrelationsquotient nach Pearson ergab sehr starke Korrelationen der Mittel- und Referenzwerte mit einer Signifikanz auf dem Niveau von 0,01 und belegt den linearen Zusammenhang. (Tabelle 13) Die Ergebnisse des t-Tests sind in Tabelle 14 zusammengefasst. Die errechneten Effektstärken ergeben nach der Cohen Einteilung keine Effekte für das Verfahren 3D. (Tabelle 15)

Tabelle 13: Korrelationen r nach Pearson, Signifikanz (2-seitig), Zylinder N=56

		Referenz	3D
Referenz	Korrelation nach Pearson	1	,998**
	Signifikanz (2-seitig)		,000
	N	56	56
3D	Korrelation nach Pearson	,998**	1
	Signifikanz (2-seitig)	,000	
	N	56	56

Tabelle 14: t-Test bei gepaarten Stichproben bukkolingualer Zylinderangulationen

	Gepaarte Differenzen					T	df	Sig. (2-seitig)
				95% Konfidenzintervall der Differenz				
	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes	Untere	Obere			
Referenz - 3D	-,77879	1,12222	,14996	-1,07932	-,47825	-5,193	55	,000

Tabelle 15: Effektstärke Cohen's d bukkolingualer Zylinderangulationen

Referenz vs.	Mittelwert Differenz	Varianz Summe		Cohen's d
3D	-,77879	462,44	15,206	-0,051

Der folgende Bland-Altman-Plot verhält sich hinsichtlich der bukkolingualen Angulationen ähnlich wie der, der mesiodistalen Winkel für die Methode 3D und zeigt mit den Übereinstimmungsgrenzen 2,98° und -1,42° einen kleinen Streubereich der Werte, sowie eine geringe Verzerrung ($d=0,78^\circ$). (Abb. 39)

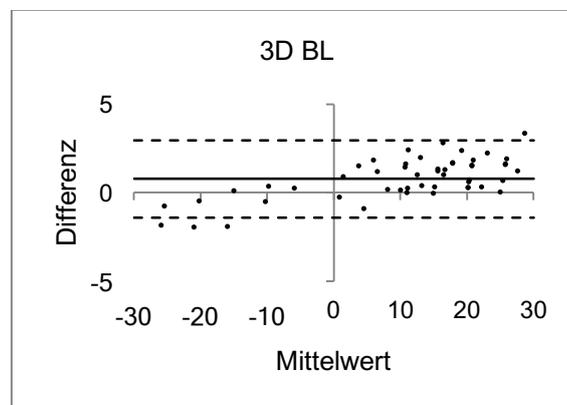


Abb. 39: Bland-Altman-Plot, Verzerrung d (Linie), Übereinstimmungsgrenzen (gestrichelte Linien)

4.4 Einfluss der bukkolingualen Angulationen

In den folgenden acht Diagrammen der Abbildungen 40 und 41 werden die Abweichungen der mesiodistalen Angulationen der 7 Zylinder für jede Methode getrennt nach Quadranten zusammengestellt und die Diagramme der oberen bzw. unteren Blöcke gegenübergestellt. Ausschließlich bei dem konventionellen Verfahren PSAi wachsen mit steigenden Quadranten und damit stetig steigender bukkolingualer Angulation der Zylinder auch deren durchschnittliche Abweichungen der mesiodistalen Angulation, sodass von einem klaren Einflussfaktor ausgegangen werden kann. Dies ist besonders bei den oberen Zylindern 1, 3 und 5, sowie den unteren Zylindern 2 bzw. 3 und vor allem 5, 6 und 7 auffällig. Insbesondere die zunehmend negativen bukkolingualen Angulationen der unteren endständigen Zylinder 6 und 7 weichen in vergrößerte mesiodistale Winkel ab und erreichen bei Zylinder 6 in Quadrant 8 eine maximale Differenz von $+9,46^\circ$. Die dreidimensionalen Verfahren erreichen ausschließlich bei Zylinder 2 (reko PSA, Quadrant 5) und Zylinder 3 (3D, Quadrant 6) Differenzen von $>5^\circ$. (Abb. 40, Abb. 41)

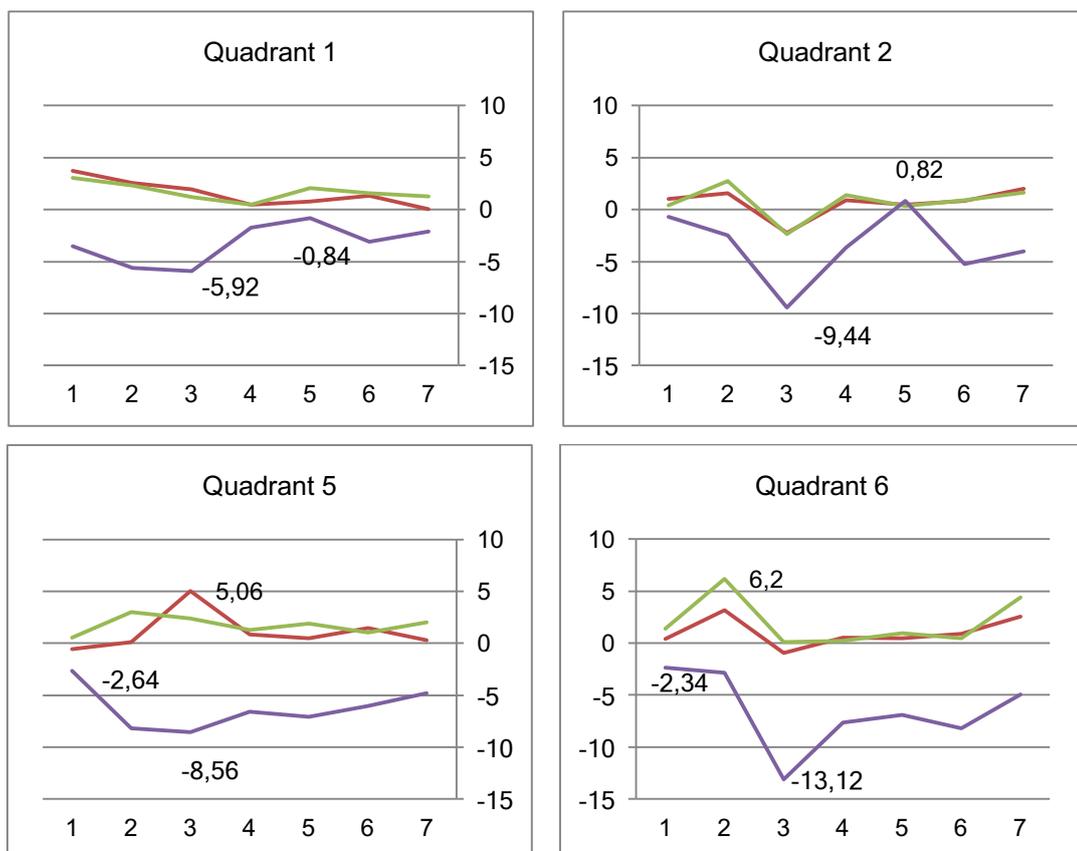


Abb. 40: Liniendiagramme, durchschnittliche mesiodistale Differenzen, Zylinder 1-7, oberen Blöcke, Modelle A und B, Verfahren reko PSA (rot), 3D (grün), PSAi (lila)

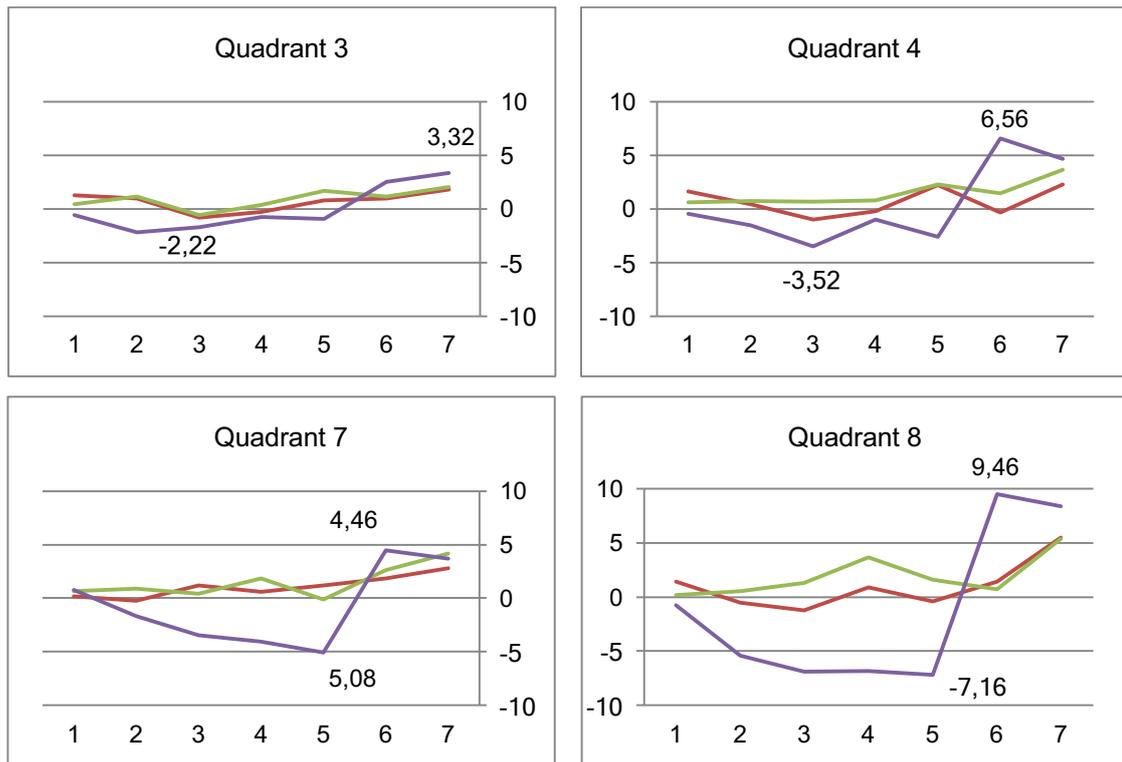


Abb. 41: Liniendiagramme, durchschnittliche mesiodistale Differenzen, Zylinder 1-7, untere Blöcke, Modelle A und B, Verfahren reko PSA (rot), 3D (grün), PSAi (lila)

Das Verhalten der Summen der absoluten durchschnittlichen Abweichungen der 7 Zylinder und der Summen der bukkolingualen Angulationen ist in den folgenden Diagrammen der Abbildung 42 für die Quadranten 1-8 grafisch dargestellt. Die Linien deuten in den Quadranten 5, 6, 3, 4, 7 und 8 der Verfahren auf eine positive Korrelation hin, da fast ausschließlich ein Anstieg der mesiodistalen Abweichungen mit steigendem bukkolingualen Winkel der oberen bzw. unteren Blöcke vorliegt. Dies ist besonders stark bei den konventionellen Panoramaschichtaufnahmen ausgeprägt. Die geringsten Abweichungen der Zylinder in mesiodistaler Richtung weisen die rekonstruierten Panoramaschichtaufnahmen (reko PSA) gefolgt von den 3D Messungen des DVT (3D) auf, wobei eine Korrelation der oberen Blöcke mittels des Verfahrens reko PSA nicht nachgewiesen werden konnte. (Abb. 42)

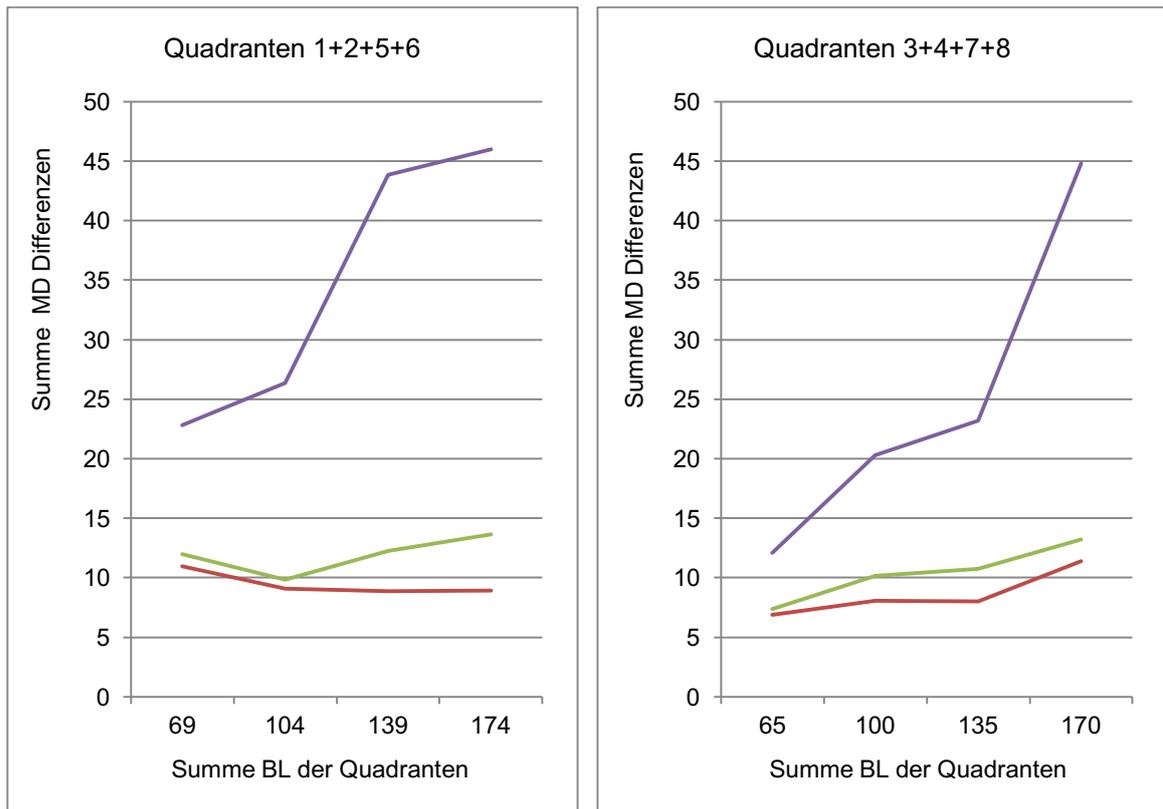


Abb. 42: Summen der absoluten Abweichungen mesiodistaler Angulationen, Summen der bukkolingualen Angulationen aller Zylinder, obere Quadranten 1, 2, 5, 6, untere Quadranten 3, 4, 7, 8, Modelle A und B, Verfahren reko PSA (rot), 3D (grün), PSAi (lila)

Die Richtung der mesiodistalen Differenzen wurde in den nachfolgenden drei Streudiagrammen der Abbildung 43 durch die Gegenüberstellung der mesiodistalen Abweichungen und der bukkolingualen Winkel getrennt nach Verfahren dargestellt. Die Grafiken der direkten Messungen aus den 3D Datensätzen (3D) sowie die, der rekonstruierten Panoramaschichtaufnahmen (reko PSA) zeigen den geringsten Einfluss auf die mesiodistalen Winkelmessungen, wobei die Differenzen der 3D DVT Datensätze (3D) mit stärker abnehmenden bzw. zunehmenden bukkolingualen Angulationen verstärkt in negative Werte und die der rekonstruierten Darstellung (reko PSA) in positive Richtung streuen, wie der Verlauf der polynomischen Trendlinien zeigt. Das Streudiagramm der konventionellen Panoramaschichtaufnahmen in idealer Modellposition (PSAi) bietet die größten Differenzen in positive sowie negative Richtung, wobei negative bukkolinguale Angulationen zu stark negativen Differenzen führen und hohe positive bukkolinguale Werte zu vergrößerten Abweichungen in mesiodistaler Richtung. (Abb. 43)

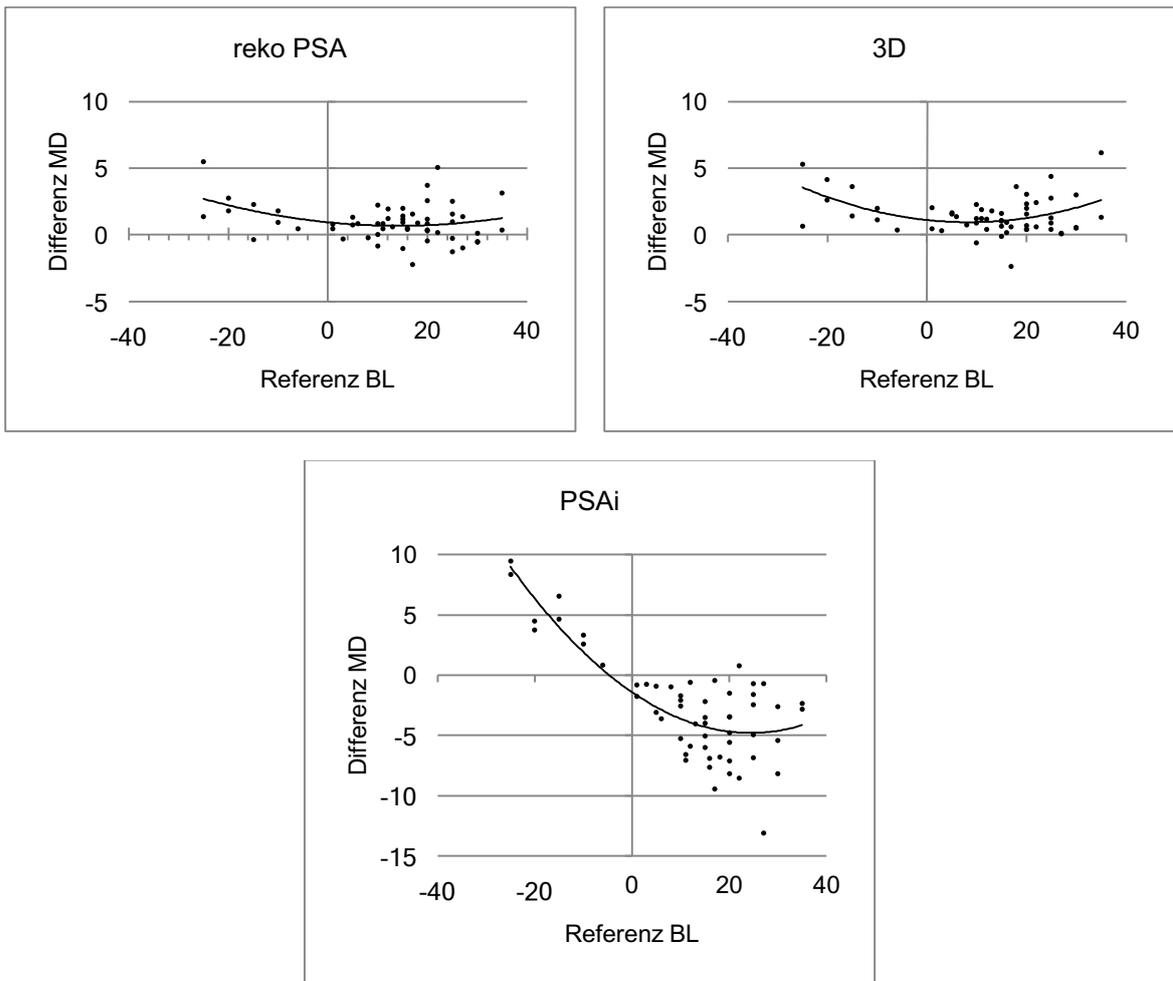


Abb. 43: Streudiagramme mit Trendlinien, mesiodistale Differenzen, bukkolinguale Referenzen, Modelle A und B

4.5 Einfluss der Zylinderbogenkrümmung

Die Streuung der Werte der DVT-Methoden (3D, reko PSA) verhält sich für die einzelnen Zylinder über alle Quadranten ähnlich, wobei Zylinder 3 bei den reko PSA Messungen mit $7,28^\circ$ die stärksten Streuungen der dreidimensionalen Verfahren aufweist. Hingegen sind die Streuungen der konventionellen Panoramaschichtaufnahme (PSAi) deutlich größer. Sie liegen im Fall von Zylinder 3 und 7 mehr als 10° auseinander und erreichen maximal divergierende Werte von $17,64^\circ$ in Position 6. Die geringste Streuung dieses Verfahrens ist bei Zylinder 1 mit $4,28^\circ$ voneinander abweichenden Ergebnissen zu verzeichnen und unterliegt damit nur knapp den maximalen Abweichungen der DVT Methoden. Die Durchschnitte aus 7 Zylindern betragen mit $3,63^\circ$ (3D) und $3,8^\circ$ (reko PSA) für Ergebnisse der PSAi mit $9,83^\circ$ fast das Dreifache. (Abb. 44)

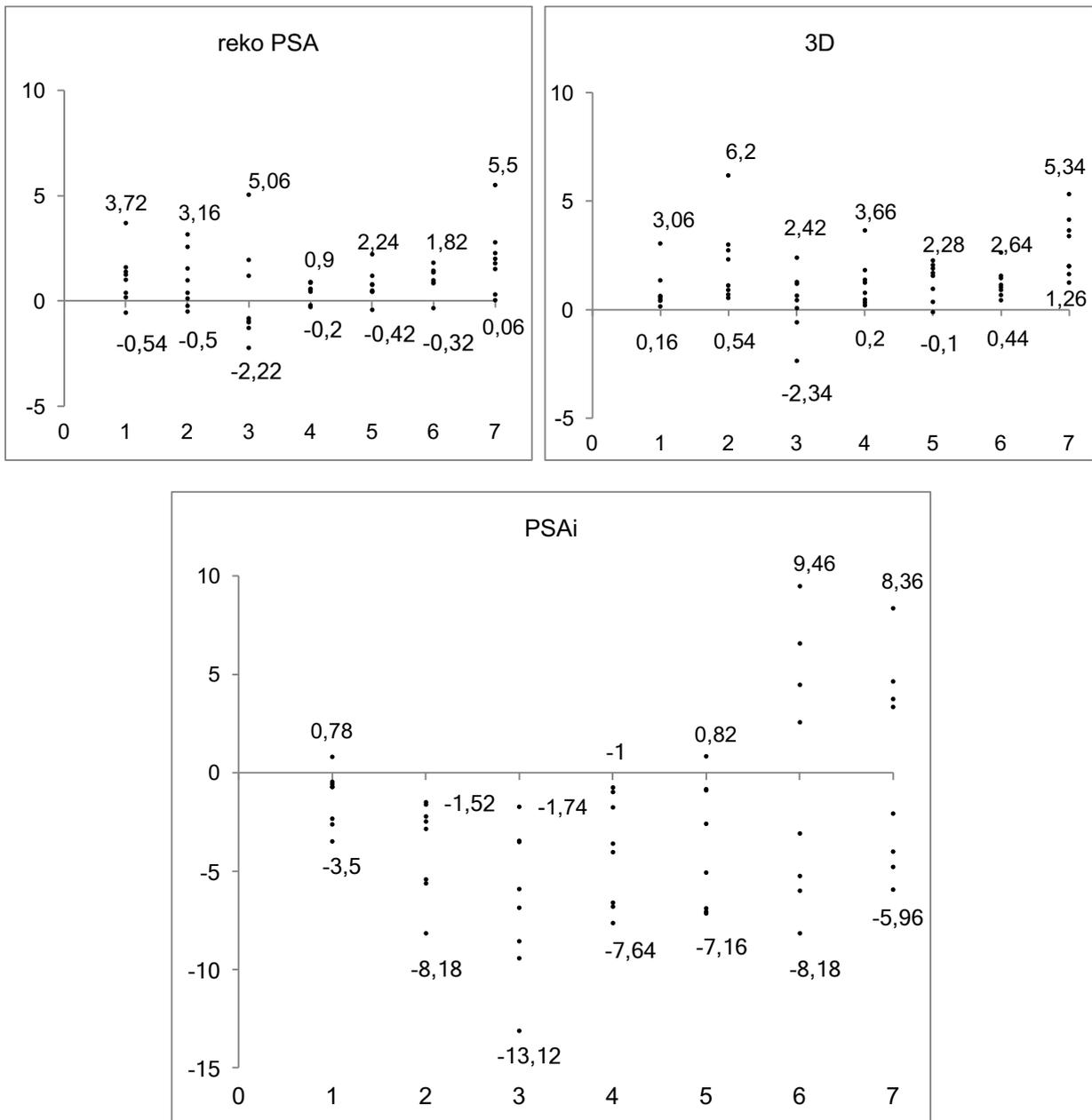


Abb. 44: Darstellung der durchschnittlichen Abweichungen mesiodistaler Zylinderangulationen der 7 Zylinder aus 8 Quadranten, Verfahren 3D, reko PSA, PSAi

Bei Betrachtung der Summen der absoluten Differenzen der Zylinder in den folgenden beiden Diagrammen der Abbildung 45 zeigt der Verlauf der Linien des konventionellen Verfahrens (PSAi) mit Abstand die schlechteste Methode. Die stärksten Abweichungen betreffen die Zylinder (3, 6, 7) mit den bereits erwähnten größten Streuungen. Dieses Verhalten zeigt sich auch bei den Verfahren 3D und reko PSA für die Zylinder 2 und 7 bzw. 3 und 7. (Abb. 45)

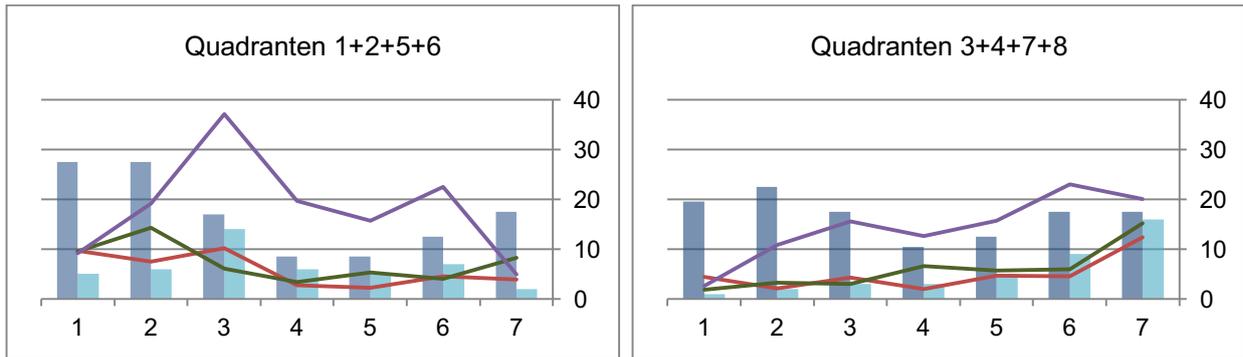


Abb. 45: Liniendiagramme, Summen absoluter Abweichungen mesiodistaler Angulationen, Zylinder 1-7, Quadranten 1, 2, 5, 6 bzw. 3, 4, 7, 8, Modelle A und B, Verfahren reko PSA (rot), 3D (grün), PSAi (lila), mittlere Referenzen bl (Balken blau) und md (Balken türkis)

Hinsichtlich der durchschnittlichen Abweichungen zeigen die Liniendiagramme für die dreidimensionalen Verfahren ähnliche Verläufe wie die, der absoluten Summen. Die Kurve des konventionellen Verfahrens hingegen wird bis auf die Zylinder 6 und 7 der unteren Blöcke gespiegelt, da es sich hier zum größten Teil, um Differenzen im Sinne zu gering erfasster mesiodistaler Winkel handelt. Die maximale durchschnittliche Abweichung der Methode reko PSA weist Zylinder 7 der unteren Quadranten mit $3,095^\circ$ auf. Auch Methode 3D besitzt in dieser Zylinderposition mit $3,795^\circ$ seine größte durchschnittliche Differenz. Die Methode PSAi erreicht bei dem unteren 7. Zylinder eine Abweichung von $5,01^\circ$ und weist maximale Differenzen in positive Richtung von $5,76^\circ$ bei Zylinder 7 bzw. in negative Richtung um $-9,26^\circ$ bei Zylinder 3 der oberen Blöcke auf. (Abb. 46)

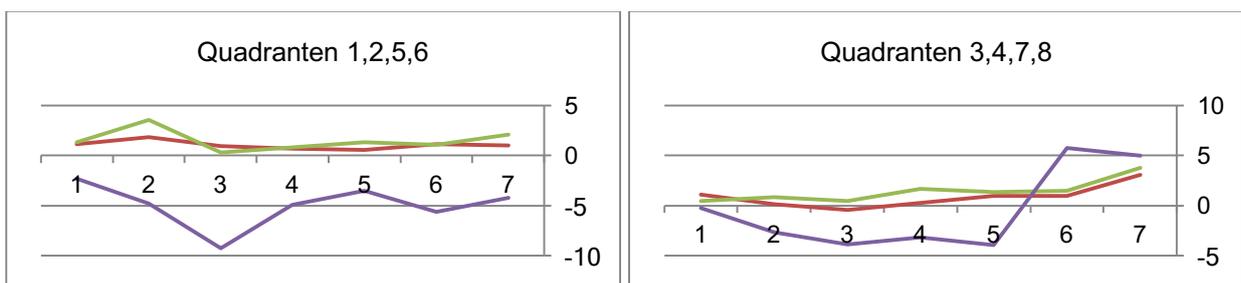


Abb. 46: Liniendiagramme, durchschnittliche mesiodistale Differenzen, Zylinder 1-7, Quadranten 1, 2, 5, 6 bzw. 3, 4, 7, 8, Modelle A und B, Verfahren reko PSA (rot), 3D (grün), PSAi (lila)

4.6 Einfluss der Modellposition im Röntgengerät

Hinsichtlich der Genauigkeiten der Winkelmessungen unter Berücksichtigung der Modellposition während der konventionellen Panoramaschichtaufnahme lieferten die

Aufnahmen in gewinkelter Position (PSAw) die geringsten durchschnittlichen Abweichungen. Die Kurven der Verfahren PSAi und PSAa stimmen weitestgehend miteinander überein, wobei die Aufnahmen in idealer Position geringfügig schlechter ausfallen. Die folgenden Grafiken zeigen die durchschnittlichen Differenzen zu den Referenzen der mesiodistalen Angulationen. Im posterioren Bereich des Zylinderbogens (Zylinder 6 und 7) der oberen Blöcke sind die Abweichungen aller Methoden gering, wohingegen die, der übrigen Zylinder, vor allem des Zylinders 3, stärker variieren. Die Quadranten der unteren Blöcke zeigen maximale Differenzen bei Zylinder 5 in negative Richtung und für die Zylinder 6 und 7 in positive Richtung. (Abb. 47)

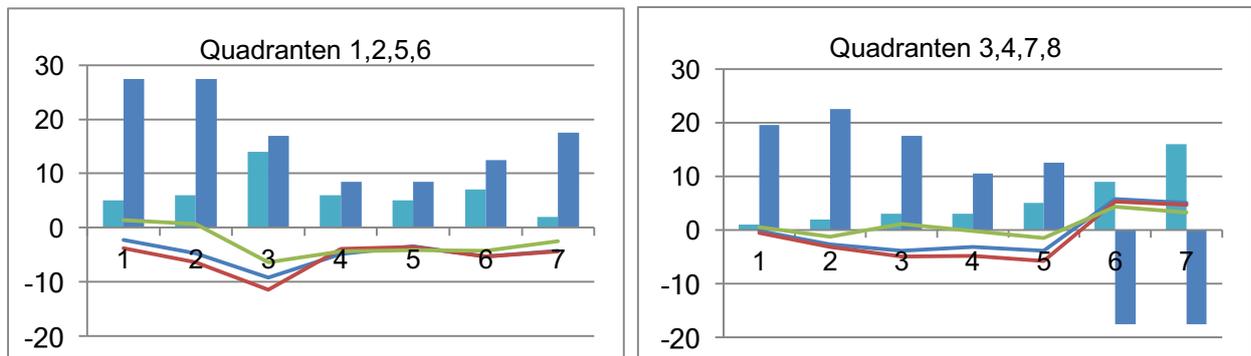


Abb. 47: Liniendiagramme, durchschnittliche mesiodistale Differenzen, Zylinder 1-7, Quadranten 1, 2, 5, 6 bzw. 3, 4, 7, 8, Modelle A und B, Verfahren PSAi (blau), PSAa (rot), PSAw (grün), mittlere Referenzen bl (Balken blau) und md (türkis)

4.7 Fehlerberechnung der Zahnwurzelangulationen

Die Tabelle 16 zeigt durchgehend geringe Werte des Methodenfehlers nach Dahlberg für die Zahnwurzelangulationen der drei Patienten mit Werten unter 1 und dementsprechend hoher Reliabilität. Die 3D DVT Methoden weisen im Vergleich zu denen der Panoramaschichtaufnahmen eine deutlich höhere Zuverlässigkeit auf.

Tabelle 16: Methodenfehler nach Dahlberg δ , Zahnwurzelangulationen

BL 3D	MD 3D	MD reko PSA	MD PSAi
0,62	0,58	0,87	0,8

4.8 Mesiodistale Zahnwurzelangulationen in Abhängigkeit von der Methode

Grundlage für die nachfolgend beschriebenen mesiodistalen Winkel von drei röntgenologisch erfassten Patienten stellen die Untersuchungen der bereits

beschriebenen Modelle dar. Die mesiodistalen Angulationen der Verfahren 3D, reko PSA und PSA wurden zum Vergleich in Liniendiagrammen dargestellt und Ober- bzw. Unterkiefer getrennt voneinander beleuchtet. Es wird - analog zu den Ergebnissen der Modelle - eine hohe Übereinstimmung der Verfahren 3D und reko PSA deutlich. Dies ist besonders gut in beiden Kiefern von Patient 1, sowie in den Unterkiefern von Patient 2 und 3 zu verfolgen. Die Differenzen der mesiodistalen Angulationen der Oberkiefer der Patienten 2 und 3 weisen im Vergleich höhere Abweichungen auf, jedoch bleiben diese stets unter denen, der konventionellen PSA. (Abb. 48)

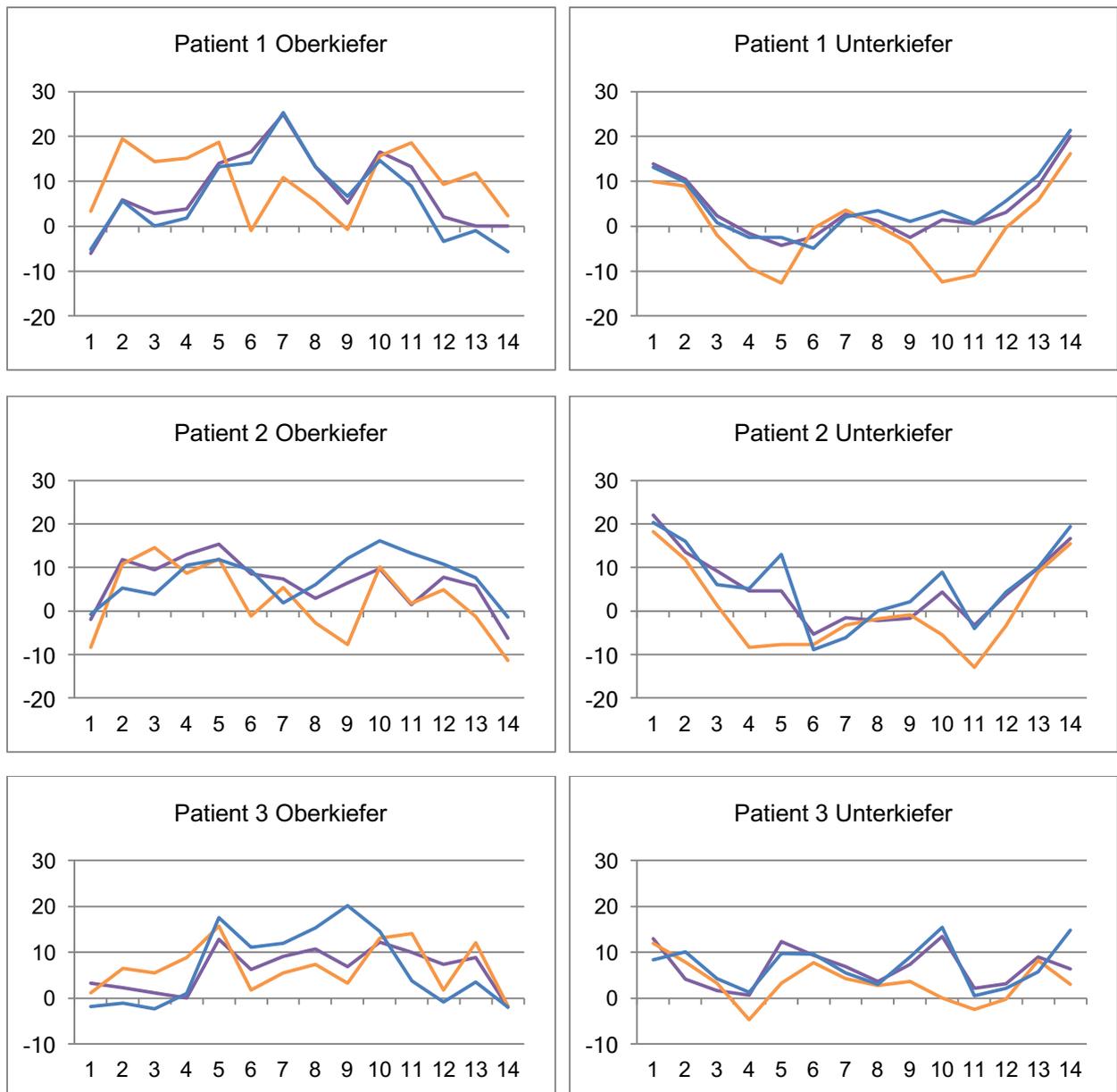


Abb. 48: Absolute mesiodistale Zahnwurzelangulationen, Patient 1, 2, 3, Oberkiefer, Unterkiefer, reko PSA (lila), PSA (orange), 3D (blau)

Folgendend wird das Verfahren 3D als Goldstandard für die Auswertungen der erhobenen Daten der Patienten betrachtet. Die Summen der absoluten Beträge der mesiodistalen und bukkolingualen Winkel des Verfahrens 3D, sowie die Summen der Differenzen der Methode 3D zu den Verfahren reko PSA und PSA sind in Tabelle 17 zusammengefasst. Im Gesamten betrachtet sind die Abweichungen von reko PSA zum Verfahren 3D wesentlich geringer. Sie liegen bei nur 44% der Abweichungen der konventionellen PSA vom Verfahren 3D. Die Patienten unterscheiden sich sowohl hinsichtlich der Höhe der Summen ihrer bukkolingualen als auch der mesiodistalen Angulationen untereinander. Die Summen der mesiodistalen Winkel liegen zwischen 88,4° und 124,5° für einen Kiefer, hingegen erreichen die der bukkolingualen Angulationen mit Werten von 147,6° bis 278,1° im Gesamten fast das Doppelte.

Korrelationen der Winkelsummen und der Abweichungen der verschiedenen Verfahren zum Goldstandard konnten nicht nachgewiesen werden.

Tabelle 17: Summen absoluter mesiodistaler (3D) bzw. bukkolingualer Zylinderangulationen (3D), Summen absoluter Differenzen 3D-reko PSA, 3D-PSA, Patienten 1, 2, 3, Oberkiefer, Unterkiefer

	Summe der absoluten Beträge der Winkel bl 3D	Summe der absoluten Beträge der Winkel md 3D	Summe der absoluten Differenzen 3D-reko PSA	Summe der absoluten Differenzen 3D-PSA
Pat 1 OK	171,7	118,7	29,5	144,3
Pat 1 UK	188,4	88,4	23,2	81,8
Gesamt Pat 1	360,1	207,1	52,7	226,1
Pat 2 OK	278,1	110,8	62,4	110,6
Pat 2 UK	147,6	124,5	39,2	90,3
Gesamt Pat 2	425,7	235,3	101,6	200,9
Pat 3 OK	185	107	65,7	92,2
Pat 3 UK	238,6	99,3	36,5	63,2
Gesamt Pat 3	423,6	206,3	102,2	155,4
Summe Pat 1-3	1209,4	643,1	256,5	582,4

Der Verlauf der mesiodistalen Kurven der 3D Winkelmessungen lässt vor allem Unterschiede in den Fronzahnbereichen von Ober- und Unterkiefer aller Patienten erkennen. Die größten Angulationen befinden sich im Bereich der Unterkiefermolaren und Eckzähne und mit Ausnahme von Patient 3 auch im Oberkieferfrontzahnbereich. (Abb. 49)

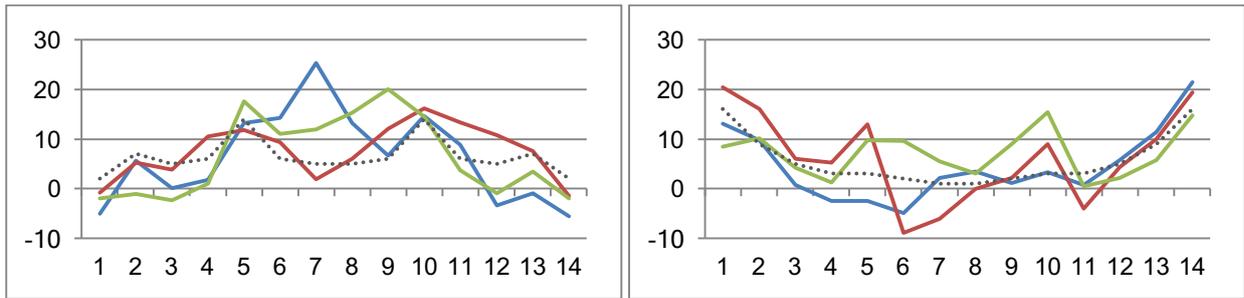


Abb. 49: Liniendiagramme, absolute mesiodistale Zahnwurzelangulationen, Patienten 1 (blau), 2 (rot), 3 (grün), Referenzen der Zylinderangulationen (grau gestrichelt), Modelle A und B

4.9 Bukklinguale Zahnwurzelangulationen

Die Kurven der bukkolingualen Angulationen der Liniendiagramme der folgenden Abbildung verlaufen für die drei ausgewählten Patienten harmonisch und symmetrisch. Sowohl im Oberkiefer als auch im Unterkiefer wurden die größten positiven bukkolingualen Angulationen im Front- und Eckzahngebiet mit maximalen Werten von $33,5^\circ$ (Patient 2) im Ober- und $30,7^\circ$ (Patient 3) im Unterkiefer erfasst. Negative bukkolinguale Angulation wurden im Oberkiefer ausschließlich bei den Patienten 1 und 3 im Prämolaren- bzw. Molarenbereich ermittelt. Im Unterkiefer hingegen wurden negative Winkel von $-4,8^\circ$ bis $-20,3^\circ$ aller Molaren bei jedem Patienten nachgewiesen. Im Gesamten betrachtet haben die Patienten 2 im Oberkiefer und 3 im Unterkiefer in Summe mit Abstand die stärksten Winkel. Alle Kurven verlaufen relativ harmonisch und unter den Quadranten symmetrisch mit Abweichungen der bukkolingualen Angulationen vom harmonischen Kurvenverlauf bei den Zähnen 11, 44, 47 (Patient 1), sowie 22, 26 (Patient 2) und 22, 42 (Patient 3) im Sinne potentieller dentaler Fehlstellungen. (Abb.50)

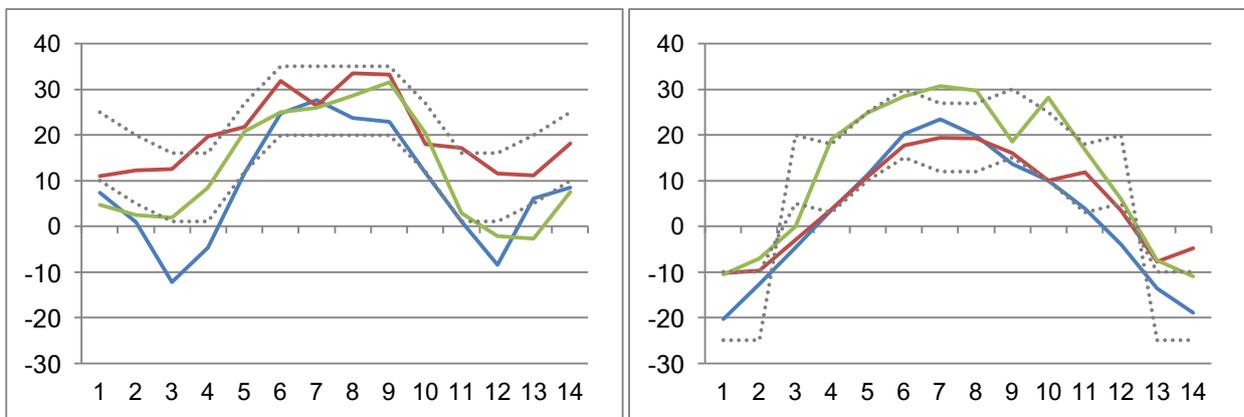


Abb. 50: Liniendiagramme, absolute bukklinguale Angulationen, Patienten 1 (blau), 2 (rot), 3 (grün), maximale und minimale Referenzen (grau gestrichelt), Modelle A und B

5 Diskussion

Die digitale Volumentomographie nimmt bereits seit vielen Jahren einen hohen Stellenwert als dreidimensionales Bildgebungsverfahren in der Zahnmedizin, vor allem in der Implantologie, ein und findet seit einigen Jahren zunehmend Beachtung im Rahmen der kieferorthopädischen Diagnostik. Vor allem in der Kieferorthopädie gilt zu berücksichtigen, dass die Regelungen der Röntgenverordnung für Kinder und Jugendlichen aufgrund des höheren Strahlenrisikos im Vergleich zu Erwachsenen in besonderem Maße gelten. [Schulze 2013] Die Durchführung jeder röntgenologischen Untersuchung sollte stets nach dem ALARA-Prinzip, d.h. mit der für die Fragestellung geringstmöglichen Strahlenbelastung bei hoher diagnostischer Aussagekraft bezüglich der Abbildungsqualität, erfolgen. [Schulze 2013] Neben den in Kapitel 1.2.2 formulierten rechtfertigenden Indikationen der DVT schätzt Holberg die Elimination von verzerrten und überlagerten Darstellungen bei der 3D-Kephalometrie gegenüber der konventionellen Fernröntgenseitaufnahme, verweist jedoch unter Berücksichtigung von Strahlenbelastung und eines erhöhten ökonomischen Aufwandes auf die individuelle Anwendung der DVT. [Holberg 2007] Wohingegen Kamp et al. die Rechtfertigung des routinemäßigen Einsatzes aufgrund der vergleichsweise geringfügig höheren Strahlenbelastung im Verhältnis zur Summe der gängigen Röntgenaufnahmen in der Kieferorthopädie sehen. [Kamp et al. 2007]

Ebenso wie die präzise dreidimensionale Lokalisation verlagelter Zähne und deren benachbarter Strukturen als die Voraussetzung für eine zielgerichtete Bewegung zur erfolgreichen Einordnung, gelten auch die präzisen Darstellungen von Zahnwurzelinklination und die Beurteilung der peridentalen knöchernen Morphologie hinsichtlich des bukkolingualen Knochenangebotes als bedeutende Mehrinformation der DVT, um iatrogene Fenestrationsen oder Dehiszenzen auszuschließen.

Es gilt abzuwägen, ob die zusätzlichen diagnostischen Informationen eines dreidimensionalen Verfahrens den Ersatz der zweidimensionalen Röntgenaufnahmen in der Kieferorthopädie durch die digitale Volumentomographie rechtfertigt und inwiefern die Beurteilung der mesiodistalen und bukkolingualen Wurzelangulationen im Rahmen dentoalveolärer Zahnfehlstellungen einen zusätzlichen Beitrag für die Behandlungsplanung beitragen kann.

5.1 Diskussion der Methoden

5.1.1 Allgemeine Methoden

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Analyse von Zahnwurzelangulationen des dentalen Volumentomographen KaVo 3D eXam im Vergleich zu konventionellen digitalen Panoramaschichtaufnahmen. Die Grundlage für die Untersuchungen bildeten die Messergebnisse von zwei speziell angefertigten Modellen aus Plexiglasblöcken und drei Patienten.

5.1.2 Modelle

Bereits 1988 fertigten Lucchesi et al. parabelförmige Plexiglasblöcke mit 10 Bohrungen und 10 Metallstiften zur Simulation der Zahnachsen an, um Untersuchungen hinsichtlich mesiodistaler Zahnwurzelangulationen von Zahnfilm- und Panoramaschichtaufnahmen durchzuführen. [Lucchesi et al. 1988] Andere Autoren fixierten ideale Typodontenmodelle in menschlichen Schädeln [McKee et al. 2002, Garcia-Figueroa 2008, Johal, Owens 2008, Elslände 2010], während Peck und Kollegen Gipsmodelle von Patienten präparierten. [Peck et al. 2007]

Bei der Modellherstellung der vorliegenden Studie wurde vor allem bei der Präparation der Zylinder auf definierte Formen geachtet. Zudem wurde im Rahmen von Vorversuchen die Eignung der eingesetzten Materialien und der Aufnahmeparameter sichergestellt, um klare Darstellungen in den röntgenologischen Aufnahmen zu erhalten. Die Einteilung der Modelle in vier Quadranten, sowie die Festlegung der Blockebene als Referenzebene gewährleisteten eine gute Reproduzierbarkeit der Messpunkte. Zusätzlich konnte aufgrund der Anwendung des CAD/CAM Verfahrens für die Zylinderbohrungen eine hohe Präzision bezüglich der Anordnung und Ausrichtung der Zylinder ermöglicht werden. Die Einstellungen wurden entsprechend der Herstellerempfehlungen der zum Einsatz gebrachten Röntgengeräte für beide Modelle eingehalten. Für die sichere und reproduzierbare Fixierung der Modelle während der Aufnahmen dienten speziell angefertigte Silikonsockel.

Nach Übertragung der Scandaten in das DICOM-Format, wurden die DVT-Datensätzen mit der 3D-Imaging-Software Invivo 5 standardisiert ausgerichtet und dreidimensional vermessen. Die manuelle Rekonstruktion der Panoramaschichtdarstellungen aus DVT-Datensätzen erfolgte, den Empfehlungen von Liu et al. folgend, für jeden Zahnbogen

separat, um jeden Zylinder exakt zu erfassen. Diese entsprechend des Zylinderbogenverlaufs ideal rekonstruierten Ansichten wurden, wie auch die konventionellen digitalen Panoramaschichtaufnahmen in die kieferorthopädische Diagnostiksoftware FR-Win importiert und mittels des speziellen Analyseverfahrens opgsie ausgewertet. [Liu et al. 2014] Die Ausrichtungen, Rekonstruktionen und Vermessungen wurden unter vergleichbaren Bedingungen im Abstand von mindestens 4 Wochen fünffach durchgeführt und die Daten für die statistische Auswertung in Exceltabellen übertragen.

5.1.3 Patienten

Auf die DVT-Datensätze im DICOM-Format und die konventionellen digitalen Panoramaschichtaufnahmen konnte aus den Archiven von MESANTIS® Berlin und der kieferorthopädischen Praxis „Ihre Kieferorthopäden in Berlin“ zugegriffen werden, sodass für diese Studie kein Patient einer nicht medizinisch induzierten röntgenologischen Untersuchung unterzogen wurde. Die Wahl der Patienten wurde bewusst in unterschiedlichen Alters- und Geschlechtsgruppen, sowie unabhängig vom kieferorthopädischen Behandlungsbedarf getroffen, um ein möglichst breites Feld von Zahnwurzelangulationen zu erfassen. Die röntgenologische Untersuchung der Patienten wurde unter strengster Einhaltung der Herstellerangaben und -empfehlungen vorgenommen. Dennoch lassen sich Abweichungen von der Idealposition des Patientenschädels bzw. Bewegungen des Patienten während der konventionellen Aufnahme nie zu 100% ausschließen. Hinweise hierfür könnten beispielsweise Asymmetrien der Kiefer, Unterschiede der Zahngrößen oder Zahnformen im Röntgenbild sein, die bei den durchgeführten Studien als Ausschlusskriterium galten. Analog der Modelluntersuchungen wurden die Ausrichtungen, Rekonstruktionen und Vermessungen im Abstand von 4 Wochen unter vergleichbaren Bedingungen fünffach durchgeführt und die erhobenen Daten in Exceltabellen übertragen.

5.1.4 Statistische Methoden

Ziel der statischen Auswertung ist die Anwendung adäquater Analysen zur Beurteilung der Genauigkeit unterschiedlicher Messmethoden unter Beachtung der im folgenden Kapitel beschriebenen Empfehlungen von Grouven und Kollegen. [Grouven et al. 2007]

Zunächst dienten die Methodenfehler nach Dahlberg, sowie die Reliabilitätskoeffizienten zur zuverlässigen Prüfung von Genauigkeit und Reproduzierbarkeit von wiederholten Messungen. Hinsichtlich der Durchführung der Wiederholungsmessungen sollten durch einen zeitlichen Abstand von mindestens 4 Wochen möglichst gleiche Bedingungen zur Bestimmung der Referenzpunkte erreicht werden.

Im Anschluss wurden die Ergebnisse der unterschiedlichen Methoden miteinander verglichen. Dies ist nicht durch eine einzelne statistische Maßzahl umfassend möglich, sondern bedarf der Betrachtung einer Vielzahl von Tests und grafischen Darstellungen. [Grouven et al. 2007]

Der Korrelationsquotient nach Pearson diene als Maß für den Grad der Übereinstimmung der Messungen, wobei zu berücksichtigen gilt, dass eine hohe Korrelation nicht zwingend eine hohe Übereinstimmung bedeutet. [Grouven et al. 2007] Im Fall der vorliegenden Arbeit ist - nach Grouven und Kollegen - aufgrund der Messung gleicher Größen eine gewisse Korrelation im Sinne eines linearen Zusammenhangs in Abhängigkeit des Wertebereichs der jeweiligen Angulationen zu erwarten. Auch die Betrachtung der Mittelwertdifferenzen mit Hilfe des t-Tests lässt lediglich die Beurteilung der durchschnittlichen Verzerrung zu, welche die Abweichungen der individuellen Messungen nicht berücksichtigt. Daher wurde die grafische Methode nach Bland-Altman herangezogen, um die Differenzen der Methoden unter Berücksichtigung der Streuung der Daten, sowie systemische Abweichungen und Ausreißer zu erfassen. [Grouven et al. 2007] Des Weiteren wurden in den Betrachtungen der Häufigkeitsverteilungen und der Maße der durchschnittlichen Abweichungen die Zylinder im Einzelnen analysiert und grafisch dargestellt.

Die Untersuchung potentieller Einflussfaktoren bei der Erfassung mesiodistaler Zylinderangulationen erfolgte mit Linien- und Streudiagrammen unter Berücksichtigung der einzelnen Zylinder.

5.2 Diskussion der Ergebnisse

5.2.1 Fehlerberechnung der Zylinderangulationen

Methodenfehler können im Fall der vorliegenden Arbeit in einer fehlerhaften Positionierung der Modelle während der konventionellen Panoramaschichtaufnahmen, in einer ungenauen Ausrichtung der 3D DVT Daten bzw. einer abweichenden Festlegung der Zylinderbogenebene begründet liegen. Des Weiteren können Fehler im Ablauf der Bearbeitung, Auswertung und Berechnung der Daten durch vereinzelt zu Ungenauigkeiten führen.

Die methodischen Fehler nach Dahlberg und die Reliabilitätskoeffizienten Cronbach's Alpha der Verfahren PSAi, PSAa, PSAw, reko PSA und 3D belegen die hohe Genauigkeit der intraindividuellen Erfassung und eine gute Reproduzierbarkeit der mesiodistalen bzw. bukkolingualen Zylinderangulationen der Modelle. Damit gilt die Hypothese 1 als bestätigt und die Basis für weitere Untersuchungen bezüglich der Quantifizierung der Unterschiede der Methoden als geschaffen.

5.2.2 Mesiodistale Zylinderangulationen in Abhängigkeit von der Methode

Aufgrund der unterschiedlichen Vergrößerungsfaktoren in vertikaler und horizontaler Dimension bei konventionellen Panoramaschichtaufnahmen, ist - unabhängig von den in dieser Studie untersuchten Einflussfaktoren der mesiodistalen Winkel - von einer erhöhten angulären Ungenauigkeit gegenüber der Dentalen Volumentomographie auszugehen. [Gomesz-Roman et al.1999, Van Elslande 2008]

Die jüngsten Untersuchungen hinsichtlich mesiodistaler Angulationen von Lei et al. aus dem Jahr 2014 belegen, dass die Dentale Volumentomographie eine zuverlässige Erhebungsmethode für die untersuchten Zähne (16-26 und 36-46) darstellt, vor allem im Vergleich zu konventionellen Panoramaschichtaufnahmen. [Lei et al. 2014] Den darauf basierenden Erwartungen entsprechend, lieferten in der vorliegenden Studie die Methoden der dreidimensionalen Röntgentechnik die präzisesten Ergebnisse. Wenig ungenauer ist das Verfahren PSAw, währenddessen die Methoden PSAi und PSAa am schlechtesten abschneiden. Der Vergleich der durchschnittlichen Maße für die Abweichungen zeigt mit 1,88 (rekoPSA) und 1,95 (3D) der DVT Methoden, sowie 3,23 (PSAw), 4,47 (PSAi) und 5,11 (PSAa) für die konventionellen Verfahren den deutlichen Unterschied der Methoden.

Lucchesi et al. bemängelten bereits 1988 abweichende Angulationen ihrer zum Einsatz gebrachten Metallstifte in konventionellen Panoramadarstellungen. [Lucchesi et al. 1988] Auch andere Autoren warnen vor falschen Darstellungen der mesiodistalen Angulationen auf Grundlage der konventionellen Aufnahmetechnik aufgrund unterschiedlicher Einflussfaktoren. [Graber 1967, McKee 2001, Lee 2005, Peck 2007, Garcia-Figueroa 2008, Bowens 2011, Brezniak 2012]

In der vorliegenden Arbeit zeigt die statistische Analyse in Abhängigkeit des Verfahrens Abweichungen in konträre Richtungen. Während die mesiodistalen Winkel der DVT Methoden zu vergrößerten Winkelmessungen führen, fallen die, der konventionellen Aufnahmen fast ausschließlich zu klein aus. Dies bedeutet, dass die Zylinder mittels der konventionellen Schichtaufnahmen im Mittel paralleler und mit Hilfe der DVT Methoden leicht übertrieben dargestellt werden als sie in Wirklichkeit sind.

Die Betrachtung der Häufigkeitsverteilungen liefert einen Überblick der Ausmaße und der Richtungen der mittleren Abweichungen für die einzelnen Verfahren und identifiziert für die konventionellen Panoramuschichtaufnahmen die einzelnen Ausreißer und Extremfälle mit hohen positiven Winkelmessungen trotz der mittleren Verschiebung in negative Richtung. Dies weist auf eine extreme Inhomogenität und Streuung der Differenzen vor allem für die Verfahren PSAi und PSAa hin. Hingegen werden die Zylinder mit den Verfahren 3D und reko PSA mit deutlich geringeren Abweichungen erfasst, wobei nur jeweils zwei Zylinder des Modells B das gesetzte Maß der Abweichung von 5 erreichen. Im Vergleich überschreiten die Messergebnisse der konventionellen Verfahren dieses Maß für das Modell B um ein Vielfaches. Bei Modell A beschränken sich die größten Abweichungen auf die Zylinder 1-3 der oberen Quadranten der Verfahren PSAi und PSAa, während bei Modell B - ausschließlich des 7. Quadranten - fast jeder Zylinder von einer erhöhten Ungenauigkeit betroffen ist und die oberen dritten Zylinder mit extremen Differenzen erneut auffallen. Die unterschiedlichen Abweichungen der Messergebnisse des Modells B im Vergleich zu Modell A treffen in unterschiedlicher Ausprägung für alle Verfahren zu und liefern den ersten Hinweis auf den Einfluss der bukkolingualen Winkel auf die Darstellungsgenauigkeit der mesiodistalen Angulationen. Diese Abhängigkeit wird in Kapitel 5.2.4 ausführlich diskutiert.

Hinsichtlich der konventionellen Verfahren sind die Messungen mittels PSAw im Vergleich zu PSAi und PSAa wesentlich genauer. Weniger Zylinder haben geringere

Differenzen zur Referenz, vor allem bei Modell A. Daher ist PSAw an dritter Stelle der präzisen Methoden. Die Unterschiede in Abhängigkeit der Modellposition während der röntgenologischen Untersuchung bestätigen den in der Literatur vielfach beschriebenen Einfluss der Positionierung des Objektes im Röntgengerät auf die Darstellungen der Panoramaschichtaufnahme. Kapitel 5.2.6 dieser Niederschrift dient der näheren Beleuchtung dieser Abhängigkeit.

Der Korrelationsquotient nach Pearson zeigt die - laut Grouven und Kollegen - zu erwartenden starken positiven Korrelationen im Sinne linearer Zusammenhänge der Ergebnisse aller Methoden mit der Referenz wie in Kapitel 5.1.4 bereits diskutiert wurde. Der gepaarte t-Test ergab für alle Verfahren statistisch signifikante Unterschiede zur Referenz. Hier gilt zu berücksichtigen, dass dies nicht gleichbedeutend mit der klinischen Relevanz ist. Hinsichtlich der mesiodistalen Zahnwurzelangulationen kursieren in der Literatur Angaben von 5° als tolerierbarer Messfehler der mesiodistalen Zahnwurzelangulationen für die klinische Praxis. [Stramotas 2002] Diese Differenzen werden für die Verfahren reko PSA und 3D allerdings nur für zwei Zylinder (4 %) erreicht, während 9 (16 %, PSAw) bis 24 (43 %, PSAa) der 56 Zylinder der konventionellen Methoden über 5° Differenz aufweisen. Andere Autoren stufen bereits Abweichungen von über $\pm 2,5^\circ$ als klinisch nicht akzeptabel ein. [Owens und Johal 2008] In diesem Fall verhielten sich die Abweichungen der Ergebnisse aus den konventionellen Aufnahmen mit 59 % (PSAw) bis 79 % (PSAa) als klinisch relevant, während 18-20 % der DVT Verfahren nicht ausreichend wären.

Die Schlussfolgerung von Dana Van Elslande und Kollegen wird nach Abschluss dieser Untersuchungen bestätigt. Demzufolge sollten die aus 3D DVT Datensätzen rekonstruierten Panoramaschichtaufnahmen für die Beurteilung der mesiodistalen Zahnwurzelangulationen der konventionellen Technik vorgezogen werden. [Van Elslande et al. 2010] Dabei sollte für die Analyse nicht anhand der Standardeinstellung der Schichtebene durch die Imaging Software erfolgen, sondern stets nach manueller Festlegung des Zahnbogenverlaufs vollzogen werden.

Hinsichtlich der klinischen Relevanz unterscheiden sich die Ergebnisse der Verfahren entscheidend, sodass die zweite Hypothese bestätigt werden kann. Die DVT Methoden sind dem konventionellen Verfahren deutlich überlegen.

5.2.3 Bukklinguale Zylinderangulationen

Die Bestimmung der bukkolingualen Angulationen war vor Entwicklung der DVT ausschließlich über die konventionelle Fernröntgenseitaufnahme für die Frontzahninklinationen bzw. mit Hilfe der posterior-anterior Aufnahme für die Molaren bei minderer Bildqualität möglich. [Tong et al. 2012] Seit Einführung der dreidimensionalen Röntgentechnik wurden nur wenige Studien zur direkten Erfassung der bukkolingualen Angulationen veröffentlicht. Als bahnbrechend gilt die Definition des USC Root Vector Analysis Programm im Dolphin 3D Modul von Tong und Kollegen im Jahre 2012 zur akkuraten dreidimensionalen Evaluierung der Zahnachsen. [Tong et al. 2012]

Das Verfahren 3D der vorliegenden Studie bietet für die Erfassung der bukkolingualen Winkel durchweg valide Ergebnisse. Die Differenzen zu den Referenzwerten liegen mit ihrem durchschnittlichen Maß der Abweichung unter denen, der mesiodistalen Winkel der dreidimensionalen Verfahren. Dies könnte an dem nicht unwesentlich größeren Wertebereich der Angulationen in bukklinguale Richtung liegen, bei dem eine geringe Fehlinterpretation der Referenzpunkte bei der Beurteilung der Genauigkeit weniger ins Gewicht fällt als die kleiner gewählten mesiodistalen Winkel.

Im Bland-Altman-Plot zeigen sich für die bukkolingualen Angulationen geringere Verzerrungen mit niedrigeren Streuungsbereichen im Vergleich zu den Verfahren der mesiodistalen Messungen. Der Vergleich der Methoden zeigt trotz des starken linearen Zusammenhangs der Mittel- und Referenzwerte laut Korrelationsquotienten nach Pearson eine hohe Signifikanz der Mittelwertunterschiede (t-Test). Die errechneten Effektstärken ergeben nach der Cohen Einteilung keinen Effekt für das Verfahren 3D zur Ermittlung der bukkolingualen Winkel.

Die bukkolingualen Zylinderangulationen der 3D Methode unterscheiden sich nicht signifikant im Vergleich zur Referenz und damit gilt die Hypothese 3 als bestätigt.

5.2.4 Einfluss der bukkolingualen Zylinderangulation

Da die bukkolingualen Ausrichtungen von Quadrant zu Quadrant um je 5° vergrößert wurden, sind wie bei den Studien von Garcia-Figueroa und Kollegen Aussagen über die Auswirkungen von insgesamt 20° Änderung für jeden Zylinder möglich. [Garcia-Figueroa et al. 2008] Die Liniendiagramme der Summen aller mesiodistalen

Zylinderabweichungen der Quadranten zeigen die Eindeutigkeit einer Abhängigkeit der mesiodistalen Angulationen von der Stärke der bukkolingualen Neigung. Dies ist für die DVT Verfahren aufgrund der sehr geringen Ausprägung zu vernachlässigen. Der Anstieg der Differenzen in den konventionellen Aufnahmen hingegen beträgt in Summe fast 25° für die oberen und mehr als 30° für die unteren Quadranten und ist daher weitaus deutlicher zu verzeichnen. Dies geht konform mit den Untersuchungsergebnissen von Graber. Er erwähnte bereits damals die Tendenz der Mesialangulation der maxillären und mandibulären Incisiven aufgrund deren labialer Inklinationen vor allem im Unterkiefer. [Graber 1967]

In der vorliegenden Studie zeigt die Gegenüberstellung der Diagramme für die einzelnen Quadranten eine relative Konstanz der dreidimensionalen Verfahren im Vergleich zu den zunehmenden Differenzen der konventionellen Panoramaschichtaufnahmen. Für die Quadranten der unteren Blöcke lässt sich Folgendes zusammenfassen. Der Zylinder 1 erfährt bei einer sehr geringen mesiodistalen Neigung von nur 1°, unabhängig von den bukkolingualen Veränderungen, die geringsten Abweichungen. Die Zylinder 2 bis 5 mit mesiodistalen Winkeln von 2° bis 5° zeigen zu weit mesiale Projektionen ihrer Zylinderspitzen, die sich bei steigender bukkolingualer Angulation verstärken. Die Zylinderspitzen in den Positionen 6 und 7 bei negativen bukkolingualen Winkeln werden hingegen stärker distal dargestellt. Diese Umkehr von verkleinert zu vergrößert erscheinenden mesiodistalen Angulationen tritt nur bei den konventionellen Panoramaschichtaufnahmen auf und liefert erneut den Beweis der Abhängigkeit der mesiodistalen Darstellung von der bukkolingualen Angulation für dieses Verfahren, wobei auf die ebenfalls stark gewählten mesiodistalen Winkel von 9° bzw. 16° der unteren Zylinder 6 und 7 verwiesen werden muss, die für eine zusätzliche Verstärkung der Verzerrung verantwortlich sind, sodass von einer gegenseitigen Verstärkung ausgegangen werden muss. Das wird von dem wegen eines Fehlers bei der Versuchsdurchführung fälschlicherweise negativ ausgerichteten Zylinder 5 des 2. Quadranten bestätigt. Zusammenfassend gilt, dass eine Mesialprojektion bukkal geneigter und eine Distalprojektion lingual inklinierter Zylinder entsteht. Demzufolge ist Vorsicht bei der Interpretation von mesiodistalen Angulierungen von Zähnen in konventionellen Panoramaschichtaufnahmen geboten. [Owens und Johal 2008] Diese Erkenntnis widerspricht den Ergebnissen von Judy Lee mit ihrer Beschreibung der apikalen Mesialposition lingual geneigter bzw. Distalposition bukkal

geneigter Prämolaren in den konventionellen Röntgendarstellungen. Ihrer Empfehlung, bei röntgenologisch inkorrekt anguliert erscheinenden Zähnen, stets auch die klinische Situation bezüglich der Neigungen zu prüfen, sollte dennoch gefolgt werden. [Lee 2005]

Die Projektionen der Eckzähne und Prämolaren der vorliegenden Studie stimmen mit denen von Garcia-Figueroa und Kollegen überein. [Garcia-Figueroa et al. 2008]

Ein Fallbericht von Brezniak und Kollegen bezieht sich auf die falsche Projektion eines Eckzahnes. Eine starke Lingualneigung des Zahnes könnte die Ursache sein, die zu einer Mesialprojektion der Wurzelspitze führt, wie es in den Studien von Garcia-Figueroa festgehalten wurde [Garcia-Figueroa 2008] und im Rahmen der vorliegenden Arbeit bestätigt werden kann.

Hinsichtlich der DVT Verfahren ist in der vorliegenden Studie lediglich der Zylinder 7 der unteren Quadranten leicht auffällig. Hier scheint mit der Kombination der relativ hohen bukkolingualen Angulation von -25° und der ebenfalls hoch gewählten mesiodistalen Angulation von 16° die Grenze für eine genaue Darstellung überschritten. Da diese Werte klinisch in der Regel nicht auftreten, kann im Rahmen dieser Studie das DVT - entsprechend der Erwartungen - als Verfahren zur präzisen Erfassung der mesiodistalen Angulationen ohne klinisch relevanten Einfluss der bukkolingualen Zylinderneigungen bestätigt werden.

Die Hypothese 4 ist demzufolge nur für das konventionelle Verfahren zutreffend. Die bukkolingualen Angulationen der DVT Methoden beeinflussen die mesiodistalen Winkel der Zylinder nicht.

Untersuchungen an Gipsmodellen hinsichtlich angulärer Messungen mit konventionellen PSA wie beispielsweise von Peck et al. sind nach den Erkenntnissen dieser Studie nicht zu empfehlen, da die radioopaken Markierungen der Zahnachsenpunkte auf der Oberfläche der Gipsmodelle keine Umsetzung klinisch realistischer bukkolingualer Winkel zulassen und demzufolge starke Verzerrungen resultieren. [Peck et al. 2007]

5.2.5 Einfluss der Zylinderbogenkrümmung

Die 1978 von Phillip und Hurst beschriebene Abhängigkeit der mesiodistalen Verzerrung von der Position des Zahnes im Zahnbogen bildete die Grundlage für die

Untersuchung des Zusammenhanges von der Stärke der Zylinderbogenkrümmung und der mesiodistalen Darstellung der Zylinder. Hurst 1978]

Die Ergebnisse von McKee und Kollegen deuten auf eine Zone erhöhter Gefahr von ungenauen Messungen im Bereich starker Zahnbogenkrümmungen hin, da im Vergleich zur Referenz im Oberkiefer anterior verstärkt mesiale und posterior verstärkt distale Projektionen der Wurzeln mit übertriebener Divergenz der Zahnachsen von Eckzähnen und ersten Prämolaren auftraten. Auch im Unterkiefer wurden stärker mesial abgebildete Wurzelspitzen vor allem im Bereich der Eckzähne und der ersten Prämolaren mit verstärkter Konvergenz von seitlichen Schneidezähnen und Eckzähnen nachgewiesen. [McKee et al. 2002]

Die Untersuchungen von Owens und Johal geben aufgrund von verfälscht dargestellten Konvergenzen oberer Eckzähne und Prämolaren bzw. Divergenzen unterer seitlicher Schneide- und Eckzähne in konventionellen Panoramaschichtaufnahmen ebenfalls einen Hinweis auf die mangelhafte Erfassung des Zahnbogenverlaufs im Bereich starker Zahnbogenkrümmung bzw. am Drehachsenübergang. [Owens und Johal 2008]

Zudem bestärken die röntgenologischen Auswertungen von Garcia-Figueroa et al. mit den quadrant- und segmentabhängigen Winkelabweichungen die Annahme eines Einflusses der Zylinderbogenkrümmung und gaben Anlass für die Formulierung der Hypothese 5. In diesem Fall wäre in den Positionen 1 bis 4 von hohen Abweichungen auszugehen und in den Regionen der Zylinder 5 bis 7 mit geringen Differenzen zu den Referenzwerten zu rechnen, wie es in der Literatur von Samawi und Burke für die angulären Verzerrungen in Panoramaschichtaufnahmen beschrieben wurde. [Samawi, Burke 1984] In der vorliegenden Arbeit zeigen die Liniendiagramme für die Summen der absoluten Abweichungen der Zylinder 1-7 aus den vier oberen und den vier unteren Quadranten diesen Verlauf, weder für die konventionelle PSA, noch für die DVT Methoden. Neben Zylinder 3 weist auch der Zylinder 6 für das konventionelle Verfahren trotz der unterschiedlich stark gekrümmten Zylinderbögen in diesen Positionen die höchsten Abweichungen in Summe auf. Ebenso widersprechen die Ergebnisse der Zylinder 7 der unteren Blöcke mit starken Diskrepanzen und der in hoher Krümmung stehenden Zylinder 1 und 2 mit relativ geringen Abweichungen dieser Theorie.

Die Kurven der Liniendiagramme für die durchschnittlichen mesiodistalen Differenzen sind für die DVT Methoden annähernd identisch und die Werte gering. Der Einfluss der Intensität der Bogenkrümmung auf die Erfassungsgenauigkeit kann aufgrund der

vorliegenden Ergebnisse demzufolge nicht bestätigt werden. Dies kann mit der hohen Übereinstimmung von Zahnbogenebene und Abbildungsebene und der damit verbundenen Reduktion der Verzerrungen auf ein Minimum begründet werden.

Hinsichtlich mesiodistaler Abweichungen der einzelnen Zylinder des konventionellen Verfahrens, treten große Differenzen in Abhängigkeit von der Höhe der mesiodistalen Winkel auf. Hierbei werden fast ausschließlich zu kleine mesiodistale Angulationen erfasst, was eine relativ hohe Zylinderparallelität vortäuscht. Im Besonderen gilt dies für die dritten Zylinder der oberen Blöcke. Diese Beobachtungen gehen konform mit denen früherer Studien der Autoren Garcia-Figueroa et al., Lee, McKee et al., Brezniak et al., sowie Samawi und Burke bezüglich der zu gering anguliert erscheinenden Eckzähne des Oberkiefers. [Garcia-Figueroa et al. 2008, Lee 2005, McKee et al. 2002, Brezniak et al. 2012, Samawi und Burke 1984]

Bei den Zylindern der Position 3 treffen mehrere potentielle Einflussfaktoren zusammen. Zum einen wird durch die hohe Zylinderbogenkrümmung in diesem Bereich im Zusammenspiel mit hohen mesiodistalen Winkeln der Zylinder für die Entfernung der Zylinderspitze von der „abbiegenden“ Schichtebene gesorgt, was eine Verzerrung der Darstellung bedeutet. Zum anderen tragen die starken bukkolingualen Winkel der Zylinder 3 zu einer Annäherung in Relation zur dargestellten Schicht mit zusätzlicher Verzerrung bei. Es gilt daher zu berücksichtigen, dass eine bestimmte Höhe bukkolingualer Winkel in Abhängigkeit des Krümmungsgrades zur Annäherung des Zylinders in die Richtung der Schichtebene führen kann. Das bedeutet für die in der Krümmung stehenden Zylinder, dass diese bei großer mesiodistaler Angulation durch eine ebenfalls große bukkolinguale Neigung im Gesamten relativ wenig mesiodistale Verzerrung erfahren. Außerdem ist, der Theorie zufolge, im Bereich der größten Krümmung der Zylinderbögen die Erfassung der Zylinder in der Schichtebene mittels multipler Drehpunkte des konventionellen Aufnahmegerätes am schwierigsten und die Schichtebene laut Fuhrmann am schmalsten. [Fuhrmann 2013] Die von McKee und Kollegen beschriebene Gefahrenzone verfälschter projizierter Wurzelneigungen im Bereich der Eckzähne in konventionellen Panoramaschichtaufnahmen kann in der vorliegenden Studie bestätigt werden. [McKee et al. 2002]

Es gilt zu berücksichtigen, dass sich Verzerrungen aufgrund der Kombination unterschiedlicher einflussnehmender Variablen, gegenseitig aufheben können. Die Untersuchung des Einflusses der Zylinderbogenkrümmung kann daher aufgrund der

komplexen Versuchsanordnung nicht eindeutig geklärt werden. Die Anfertigung von Modellen mit 28 identisch bukkolingual und mesiodistal geneigten Zylindern ist notwendig, um die Abhängigkeit der Darstellungsgenauigkeit der Zylinder vom Krümmungsgrad des Zylinderbogens während der konventionellen Panoramaschichtaufnahme endgültig zu klären. Anhand der Ergebnisse der vorliegenden Studie muss von der Hypothese 5 Abstand genommen werden.

5.2.6 Einfluss der Modellposition im Röntgengerät

Die Veränderungen der Modellposition während der konventionellen Aufnahmetechnik in der vorliegenden Studie sollen neue Erkenntnisse über das Maß und die Richtung der Abweichungen aufgrund haltungsbedingter Verzerrungen geben. Entsprechend der in Kapitel 1.2.1 beschriebenen Projektionsregeln erscheinen die Zylinder der konventionellen Aufnahme in anteriorer Position in den oberen Quadranten mit verstärkter Parallelität im Vergleich zur idealen Position und erfahren in der vorliegenden Studie die größten Abweichungen. Für die unteren Quadranten hingegen werden die Zylinder 1 bis 5 in idealer Stellung annähernd parallel dargestellt, währenddessen die anteriore Versetzung der Modelle eine Umkehr der mesiodistalen Richtung der Abweichung bedingt. Das Kippen der Modelle während der röntgenologischen Untersuchung führt zu den präzisesten Ergebnissen. Dies widerspricht den Untersuchungen von Stramotas et al., die hinsichtlich ihres kranial gekippten Akrylmodells deutlich höhere anguläre Differenzen der fixierten Metallstifte im Vergleich zum ideal positionierten Modell erhielten. [Stramotas 2002] McKee und Kollegen beschrieben eine relative Toleranz der mandibulären Angulationen in mesiodistaler Richtung in Relation zu den Zahnwurzelangulationen der Maxilla bei einer up/down Rotation des Kopfes, während sich die Sensibilitäten für rechts/links Drehungen hinsichtlich der Kiefer entgegengesetzt verhalten. [McKee et al. 2001]

Der Vergleich der mesiodistalen Angulationen von Liu und Kollegen an konventionellen Panoramaschichtaufnahmen und entsprechenden DVT von 20 Patienten zeigt bei anteinklinierter Kopfhaltung erhöhte distale Wurzelangulationen in der Maxilla und verkleinerte in der Mandibula. [Liu et al. 2013] Dieses Erkenntnis liefert auch die im Folgenden beschriebene Erklärung der genaueren Darstellung der Modelle in angulierter Position in der vorliegenden Studie. Durch die Angulation der Modelle

kommt es zu veränderten bukkolingualen Winkeln in Relation zur Schichtebene und demzufolge zu konträren Abweichungen für Maxilla und Mandibula analog der Schilderungen des bukkolingualen Einflussfaktors.

Während die Differenzen zu den Referenzen der idealen und anterioren Positionen mit der Größe der mesiodistalen Winkel zunehmen, werden die Zylinder 1, 2 und 3 der oberen Quadranten mit geringeren Abweichungen, sowie die Zylinder 1 bis 5 der unteren Quadranten mit den kleinsten Differenzen projiziert. Wie in Kapitel 5.2.4 bereits beschrieben reagieren die Darstellungen der Zylinder in konventionellen Panoramaschichtaufnahmen empfindlich auf hohe bukkolinguale Neigungen in Bezug zur Schichtebene. Aus diesem Grund war von einer Auswirkung einer veränderten Modellposition auf die Darstellungsgenauigkeit auszugehen. Dies ist aufgrund der Anordnung der Zylinder analog der harmonischen Zahnbogenform für die Zylinder 1 bis 3 zutreffend. Hier kommt es durch die Neigung der Modelle zu einer Verschiebung der Zylinder in die Richtung der Schichtebene, wobei die oberen Zylinderspitzen die Schichtebene durchqueren, was zu einer Verkleinerung der mesiodistalen Angulation führt und damit die Verzerrung durch die bukkolingualen Angulationen aufhebt. Die unteren Zylinder erfahren durch die Anteinklination der Modelle eine Reduktion der bukkolingualen Winkel in Relation zur Schichtebene und daraus resultierend geringere Verzerrungen, sowie präzisere Darstellungen hinsichtlich der mesiodistalen Angulationen. Für die seitlich angeordneten Zylinder erfolgt kein positiv ausgleichender Effekt durch das Kippen der Modelle, da es hier zu einer Parallelverschiebung der Zylinder im Verhältnis zur Schichtebene kommt und die Erfassung der mesiodistalen Winkel im Rahmen der Analyse opsgie anhand individueller Okklusionsebenen für die seitlichen Zylinder erfolgt. Die Differenzen verhalten sich für die Zylinder der Seiten in allen Positionen gleich. Dies zeigt auch die Betrachtung der Zylinder 6 und 7 der unteren Quadranten mit jeweils hohen negativen bukkolingualen Angulationen, die zu einer deutlichen Distalprojektion der Zylinderspitzen führen, während alle anderen Zylinder parallel dargestellt werden als sie sind.

Schlussfolgernd wird der Hypothese 6 aufgrund der unterschiedlich starken Abweichungen der mesiodistalen Angulationen in Abhängigkeit von der Position der Modelle im Röntgengerät während der konventionellen PSA zugestimmt.

5.2.7 Fehlerberechnung der Zahnwurzelangulationen

Hinsichtlich der Fehlerquellen tragen der Summationseffekt der konventionellen Panoramaschichtaufnahmen der Patienten mit komplexen anatomischen Strukturen und die Spee´kurve einen zusätzlichen Teil der bereits für die Modelluntersuchungen formulierten methodischen Fehler bei. Die Ergebnisse der Berechnungen des Methodenfehlers nach Dahlberg und des Korrelationskoeffizienten zeigen eine hohe Genauigkeit bzw. Reproduzierbarkeit der Messungen am Patienten, wobei die direkten 3D Messungen der Winkel etwas besser abschneiden als die Panoramadarstellungen. Dieser geringfügige Unterschied - vor allem im Hinblick auf die Fehlerberechnungen der Modellangulationen - liegt in der erschwerten Reproduzierbarkeit der Okklusionsebene als Referenzebene aufgrund der anatomischen Gegebenheiten begründet. Die Angaben bilden die Basis für die weiterführende Statistik des Vergleichs der unterschiedlichen Verfahren zur Erfassung der bukkolingualen und mesiodistalen Winkel der Zahnwurzelangulationen. Demzufolge findet die Hypothese 7 ihre Bestätigung.

5.2.8 Mesiodistale Zahnwurzelangulationen in Abhängigkeit der Methode

Die Auswahl der mesiodistalen Angulationen für die Zylinder bei der Herstellung der Modelle treffen die Werte der Patienten nicht zu 100%. Im Oberkiefer wurden bei allen Patienten für die Seitenzahnggebiete geringere und für das Frontzahnggebiet höhere Winkel erfasst. Für die oberen zweiten Molaren wurden ausschließlich negative Werte festgestellt. Die Winkel der Unterkiefer stimmen im Seitenzahnggebiet gut mit den gewählten Werten der Modelle überein, hingegen erweisen sich individuelle Unterschiede hinsichtlich der unteren Frontzahngangulationen. Im Vergleich zu Schlüssel II nach Andrews ergeben sich für die mesiodistalen Angulationen der Patienten ebenfalls Unterschiede. Dies betrifft vor allem die zweiten Molaren der Oberkiefer hinsichtlich ihrer negativen Angulationen. Bezüglich der Abweichungen im Frontzahnggebiet sollten keine Parallelen zu Andrews´ Formulierungen gezogen werden, da die Wahl der Patienten der vorliegenden Studie nicht im Sinne von Andrews´ „nichtorthopädischen Normalfällen“ vorgenommen wurde. [Andrews 1976]

Grundlage für die Auswertung der mesiodistalen Winkelmessungen der drei röntgenologisch erfassten Patienten stellen die Erkenntnisse der untersuchten Modelle A und B dar. Da im Rahmen der Modelluntersuchungen der Einfluss der mesiodistalen

Winkel auf deren Darstellungsgenauigkeit in Abhängigkeit der verschiedenen Verfahren festgestellt wurde, muss dieser Wert für alle Interpretationen stets einbezogen werden.

Folgend wird im Besonderen auf die Differenzen der konventionellen PSA zu den 3D DVT Darstellungen (Goldstandard) eingegangen.

Die Betrachtung der mesiodistalen Angulationen bestätigt die hohe Übereinstimmung der Verfahren 3D und reko PSA der Messungen der Patientenaufnahmen. Dies ist vor allem bei Betrachtung der Angulationen der Unterkiefer deutlich zu erkennen. Parallelen sind hinsichtlich eines Vergleichs der konventionellen Darstellungen mit den DVT Verfahren vor allem im Bereich der unteren Zahnwurzeln 3 und 4 im Sinne verstärkter Mesialprojektionen der Wurzelspitzen zu verzeichnen. Dies liegt in der Unterteilung der Okklusionsebene in die Bereiche 47-44, 43-33 und 34-37 begründet. Der Verlauf dieser Okklusionslinie erfolgt nicht harmonisch, sondern in geraden Abschnitten, die in stumpfen Winkeln zu einander stehen. Hierbei werden die Prämolaren in die Auswertung der Seitenzähne einbezogen, obwohl ihnen ein Übergangsbereich zwischen Front- und Seitenzähnen zugewiesen werden müsste, der die Angulationen in mesiodistale Richtung korrekt wiedergeben würde. Aus diesem Grund wird die Neigung der unteren Eckzähne und Prämolaren mit Hilfe der Analyse opgsie zu gering erfasst.

Dieser Schwachpunkt der Analyse muss sich folglich auch im Oberkiefer der konventionellen Darstellungen widerspiegeln, da sich die Dreiteilung der Okklusionsebene auch hier dem harmonischen Verlauf der Zähne widersetzt. Die Differenzen der mesiodistalen Angulationen der Oberkieferdentition zeigen jedoch nur bei dem Patienten 1 ein deutliches Muster. Die Zähne 3 bis 7 beider Quadranten zeigen Differenzen im Sinne zu stark distal projizierter Wurzelspitzen im Vergleich zu den DVT Methoden, die Zähne 1 und 2 weichen in die entgegengesetzte Richtung vom Goldstandard ab. Die Interpretation lässt daher für die konventionelle Aufnahme eine verstärkte Parallelität im Frontzahnbereich mit übertrieben dargestellter Neigung der Seitenzähne zu, deren Größenordnung als klinisch relevant einzustufen ist.

Bei den Patienten 2 und 3 weichen die Kurven der Oberkieferangulationen der beiden DVT Verfahren stärker voneinander ab, sodass auch die Differenzen der konventionellen Panoramaschichtaufnahme komplexer betrachtet werden müssen. Als Ursachen für eine ungenauere Darstellung im Vergleich zu Patient 1 sind die Größen der bukkolingualen Angulationen, Unregelmäßigkeiten im Verlauf der Zahnbögen, sowie eine fehlerhafte Kopfhaltung denkbar.

Für die Incisiven der oberen Quadranten wurden, mit Ausnahme von Zahn 11 des Patienten 2, die kleinsten Angulationen mittels des konventionellen Verfahrens gemessen, wobei die mesiodistalen Winkel der seitlichen Schneidezähne die geringsten Werte aufweisen und bei den Patienten 1 und 2 negative Angulationen erreichen. Hier sind die Winkel der konventionellen Panoramaschichtaufnahme für die Zähne 3 bis 7 beider Quadranten deutlich größer als die, der DVT Verfahren. Diese Abweichungen treten in geringerer Ausprägung bei Patient 3 in Erscheinung. Währenddessen sich die Differenzen für die oberen Seitenzahngebiete des Patienten 2 diffus verteilen.

In Summe liegen die Abweichungen der mesiodistalen Angulationen des konventionellen Verfahrens im Vergleich zum Goldstandard (3D) bei allen Patienten deutlich über denen, der rekonstruierten Panoramaschichtaufnahmen. Dies ist besonders stark in den Oberkiefern ausgeprägt. Den Modelluntersuchungen zufolge, reagieren die oberen Zylinder hinsichtlich der Darstellungsgenauigkeit empfindlicher auf Fehler bei der Positionierung während der röntgenologischen Aufnahme und auf hohe bukkolinguale Angulationen. Das beschriebene Muster der Abweichungen für den Oberkiefer des Patienten 1 deutet auf eine falsche Kopfhaltung während der Aufnahme hin. Die bukkolinguale Angulationen liegen im Frontzahnbereich der Oberkiefer aller Patienten im gleichen Wertebereich, doch nur bei Patient 1 wurden die mesiodistalen Winkel mittels des konventionellen Verfahrens mit mangelhafter Genauigkeit dargestellt. Da eine zu weit anteriore Positionierung während der konventionellen Panoramaschichtaufnahme aufgrund des Geräteaufbaus weitestgehend ausgeschlossen werden kann, deuten die zu gering erfassten Winkel auf eine zu stark anteinklinierte Kopfhaltung hin. Des Weiteren kann aufgrund der seitenungleichen Differenzen der Seitenzahngebiete eine zusätzlich seitlich geneigte Haltung des Kopfes spekuliert werden, die in geringerer Ausprägung auch bei Patient 2 im Oberkiefer zu verzeichnen ist. Diese Beobachtungen beschrieben Stamotas et al., sowie Owens und Johal in ihren Arbeiten. [Stamotas et al. 2002, Owens und Johal 2008] Patient 3 ähnelt im Verlauf des Liniendiagramms der Oberkiefer mit verkleinerten Messungen im Frontzahnbereich und vergrößert dargestellten Winkeln im Seitenzahnbereich dem Patienten 1, sodass ebenfalls eine fehlerhafte Kopfhaltung stattgefunden haben könnte. Die Ergebnisse der konventionellen Panoramaschichtaufnahmen haben im Vergleich zu den 3D Verfahren zum Teil sehr starke Abweichungen. Die Methoden der

rekonstruierten Darstellungen und der 3D Messungen zeigen jedoch ähnliche Werte, sodass die Hypothese 8 nur zum Teil bestätigt werden kann.

Die in der vorliegenden Studie aufgeführten Projektionsabweichungen liefern eine Erklärung für die Ergebnisse der Untersuchungen von Bennemann und Kollegen hinsichtlich der Distanzabweichungen von Minipins und benachbarter Zahnwurzeln in konventionellen Panoramaschichtaufnahmen. Sie stellten im Rahmen ihrer Forschungsarbeiten zur Beurteilung der Position von Minischrauben fest, dass der Abstand zwischen Minischraube und Zahnwurzel oftmals nicht mit den Messungen des DVT übereinstimmten. [Bennemann et al. 2012] Dies liefert wertvolle Informationen für die Planung und den Verlauf kieferorthopädischer Behandlungen anhand von konventionellen Panoramaschichtaufnahmen, denen die Dentale Volumentechnologie auch bei dem Einsatz orthodontischer Minipins der Vorzug gegeben werden sollte.

5.2.9 Bukklinguale Zahnwurzelangulationen

Der harmonische und symmetrische Verlauf der Kurven in den erstellten Liniendiagrammen lässt auf eine hohe Treffsicherheit der erfassten Werte hinsichtlich ihrer wahren Zahnwurzelangulationen schließen. Ein Vergleich zu den von Andrews beschriebenen Werten der Kronenneigung lässt sich nur begrenzt ziehen, da im Rahmen der Untersuchungen nicht die Zahnachsen, sondern die Tangenten der Kronenlängsachsen an den Kronenmittelpunkten einbezogen wurden. [Andrews 1976]

Die bukkolingualen Winkel sind im Bereich der Frontzähne aller Kiefer im Sinne einer Bukkalkippung am größten und nehmen kontinuierlich in Richtung der Molaren ab. Es treten vereinzelt palatinale Kippstände der maxillären Prämolaren und Sechsjahrmolaren auf. Im Unterkiefer hingegen wurde die Lingualkippung der Molaren zu 100% nachgewiesen. Die für die Modelle gewählten bukkolingualen Winkel der Zylinder schließen die Werte der Winkelmessungen der Patienten fast ausschließlich ein, sodass der Stellenwert der Modelle für die klinische Interpretation erheblich steigt.

An dieser Stelle können nun anhand der Erkenntnisse der Modelluntersuchungen die Darstellungsungenauigkeiten der mesiodistalen Zahnwurzelangulationen in konventionellen Panoramaschichtaufnahmen aufgrund der bukkolingualer Inklinationen diskutiert werden. Ebenso wie die gekippte Kopfhaltung bzw. Modellstellung kommt es bei Änderungen der bukkolingualen Winkel zwingend zu veränderten Winkeln der

mesiodistalen Zahnachsen in Relation zur Schichtebene und folglich zu Verzerrungen der Darstellungen.

Die Methode 3D kann zur Erfassung der bukkolingualen Zahnwurzelangulationen angewendet werden. Demzufolge hat die Hypothese 9 ihre Richtigkeit.

6 Literaturverzeichnis

- 1 Andrews LF. Die Straight-Wire-Apparatur. 1976 Lawrence F. Andrews, San Diego California
- 2 Angle EH: Behandlung der Okklusionsanomalien der Zähne, Angle´s System, Hermann Meusser Verlag, Berlin 1908, p. 15.
- 3 Angle EH: The Upper First Permanent Molar as a Basis of Diagnosis. Items of Interest, June 1906.
- 4 Asscherickx K, Vande Vannet B, Wehrbein H, Sabzevar MM. Success rate of Miniscrews relative to their position of adjacent roots. Eur J Orthod 2008 Aug;30(4):330-5.
- 5 Bender R, Lange S. Was ist der p-Wert?; Dtsch Med Wochenschr 2007; 132:e15-e16
- 6 Bennemann R, Baxmann M, Keilig L, Reimann S, Braumann B, Bouraurel C, Evaluating miniscrew position using orthopantomograms compared to cone-beam computed-tomography; J Orofac Orthop 2012; 73: 236-248.
- 7 Benz C, Mouyen F. Evaluation of the new RadioVisioGraphy system image quality. Oral Surg Oral Med Oral Pathol 1991; 72(5): 627-31.
- 8 Bumann A. DVT - Für und Wider aus Sicht des Anwenders (3), KN Nr. 4, Apr 2009.
- 9 Bundesamt für Strahlenschutz, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahr 2012: Unterrichtung durch die Bundesregierung. 3. April 2014.
- 10 Brueggemann I. Evaluation of the Panorex unit. Oral Surg 1967; 24: 348-358.
- 11 Brezniak N, Birnboim-Blau G, Bar-Hama P, Zoizner R, Dinbar A, Wasserstein A. The Inaccuracy of the panoramic radiograph as a tool to determine tooth inclination: Refuat Hapeh Vehashinayim (1993), 2012 Jan; 29(1): 36-9, 65.
- 12 Cattaneo, PM, Dalstra, M, Melson, B: The Transfer of occlusal Forces through the Maxillary Molars: A Finite Elementy Study, AJODO 2003; 123: 367-73.
- 13 Coppentrath E, Draenert F, Lechel U, Veit R, Meindl T, Reiser M, Mueller-Lisse U, Rofo, 2008 May; 180(5): 396-401.

- 14 Dahlberg G. Statistical Methods for Medical and Biological Students. New York: Interscience Publications 1940: 122-32.
- 15 Daskalogiannakis J, Miethke RR, Serogl HG, Sernetz F. Lexikon kieferorthopädischer Begriffe. 2003 Herausgeber FPGM van der Linden F, RR Miethke, McNamara JA, S. 6, S.87.
- 16 Fuhrmann A, Schulze D, Rother U, Vesper M. Digital Transversal Slice Imaging in Dentalmaxillofacial Radiology: From Pantomography to Digital Volume Tomography. Int J Comput Dent. 2003 Apr; 6(2): 129-40.
- 17 Fuhrmann A. Zahnärztliche Radiologie: ZMK Praxis. 2013 Georg Thieme Verlag KG, S. 44ff.
- 18 Galanski M, Prokop M (1998) Ganzkörper-Computertomographie. Georg-Thieme Verlag. Stuttgart
- 19 Garcia-Figueroa MA, Raboud DW, Lam EW, Heo G, Major PW. Effect of buccolingual root angulation on the mesiodistal angulation shown on panoramic radiographs. Am J Orthod Dentofacial Orthop 2008; 134: 93-9.
- 20 Gomez-Roman G, Lukas D, Beniashvili R, Schulte W. Area-dependent enlargement ratios of panoramic tomography on orthograde patient positioning and its significance for implant dentistry. Int J Oral Maxillofac Implants. 1999 Mar-Apr; 14(2): 248-57.
- 21 Graber TM. Panoramic radiography in orthodontic diagnosis. American Journal of orthodontics 1967:53:799-821.
- 22 Grouven U, Bender R, Ziegler A, Lange S. Vergleich von Messmethoden – Artikel Nr. 24 der Statistik-Serie in der DMW. Dtsch Med Wochenschr 2007; 132: e69-e73.
- 23 Hardy TC, Suri L, Stark P. Influence of patient head positioning on measured axial tooth inclination in panoramic radiography. J Orthod. 2009 Jun; 26(2): 103-10.
- 24 Hashimoto K, Kawaschima S, Araki M, Iwai K, Sawada K, Akiyama Y. Comparison of image performance between cone-beam computed tomography for dental use and four-row multidetector helical CT; Journal of Oral Science, Vol. 48, No. 1, 27-34, 2006.

- 25 Haßfeld S, Rother U. Röntgendiagnostik in der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie. Der MGK-Chirurg 2008 Sep, Vol 1, Issue 2, S.137-147.
- 26 Heckmann, K. Die Röntgenperspektive und ihre Umwandlung durch eine neue Aufnahmetechnik. Fortschr Röntgenstr 1939; 60: 144-157.
- 27 Hofmann E, Schmid M, Lell M, Hirschfelder U, Cone beam computed tomography and low-dose multi-slice computed tomography in orthodontics and dentistry; J Orofac Orthop Sep 2014, 75(5): 384-98.
- 28 Holberg C. Kephalemtrie – Quo vadis?. Bayerisches Zahnärzteblatt 5/2007, 33-35.
- 29 Kamp N, Drechsler T, Frank E, Bumann A. Kieferorthopädische Behandlungsplanung als rechtfertigende Indikation für die digitale Volumentomographie. 41 Jahrestagung der Arbeitsgemeinschaft für Röntgenologie in der DGZMK, Berlin 2007.
- 30 Kavo Dental GmbH. *Benutzerhandbuch für KaVo 3D eXam*. 2009:14-1.
- 31 Kim T et al., Root proximity as a risk factor for progression of alveolar bone loss: The Veterans Affairs Dental Longitudinal Study. J Periodontal, 2008 Apr; 79(4): 654-9.
- 32 Krause J, Untersuchungen zum erforderlichen Field of View für die bildgebende 3D-Diagnostik in der Zahnmedizin, Dissertation, 2013.
- 33 Krüger D, Parchmann I, Schecker H (Hrsg.). Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung. 2014 Springer Verlag, XXIII, 439 S. 62.
- 34 Lee J. The effects of buccolingual root torque on the appearance of root angulation on panoramic radiographs. Am J Orthod Dentofacial Orthop 2005; 127: 393.
- 35 Lei Q, Zhou L, Lei L, Wang Y. Comparison of mesiodistal tooth angulations determined through traditional panoramic radiographs and cone beam CT panoramic images. Hua Xi Kou Qiang Yi Xue Za Zhi. 2014 Aug; 32(4): 331-5.
- 36 Liou E, Pai B, Lin J. Do Minscrews remain stationary under orthodontic forces? Am J Orthod Dentofacial Orthop 2004; 126: 42-7.

- 37 Liu SQ, Wen FJ, Chen H, Liu Y. Variation in mesiodistal root angulation of panoramic images generated from Cone-Beam computed tomography. *Chin J Dent Res* 16 (2013), No. 2 (09.01.2014).
- 38 Loubele M, Bogaerts R, Van Dijck E, Pauwels R, Vanheusden S, Suetens P, Marchal G, Sanderink G, Jacobs R, Comparison between effective radiation dose of CBCT and MSCT scanners for dentomaxillofacial applications. *Eur J Radiol* 2009 Sep; 71(3): 461-8.
- 39 Lucchesi MV, Nortjé CJ. Suitability of the panoramic radiograph for assessment of mesiodistal angulation of teeth in the buccal segments of the mandible. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 1988; 94: 303-10.
- 40 Ludlow JB, Laster WS, See M, Bailey LJ, Hershey HG. Accuracy of measurements of mandibular anatomy in cone beam computed tomography images. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2007; 103:534-42.
- 41 Ludlow JB, Davies-Ludlow LE, Brooks SL. Patient risk related to commensal dental radiographic examinations: the impact of 2007 International Commission on Radiological Protection recommendations regarding dose calculation. *J Am Dent Assoc.* 2008; 139(9): 1237-43.
- 42 Ludlow JB, Ivanovic M, Comparative dosimetry of dental CBCT devices and 64-slice CT for oral and maxillofacial radiology; *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*; 2008 Jul; 106(1): 106-14.
- 43 Ludlow JB, Walker C. Assessment of phantom dosimetry and image quality of i-CAT FLX cone-beam computed tomography. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2013; 144: 802-17.
- 44 Ludwig B, Glasl B, Lietz T, Lisson A. Minischrauben in der Praxis, Serie Minischrauben I-IV; *Kieferorthopädie Nachrichten*; Kompendium Minischrauben 2008; 6-35.
- 45 Lund H, Gröndahl K, Gröndahl H-G, Accuracy and precision of linear measurements in cone beam computed tomograms obtained with different reconstruction techniques; *J Dentomaxillofac Radiol* 2009; 38; 379-386.
- 46 Medizinische Fakultät Mannheim der Universität Heidelberg; Med. Statistik, Biomathematik und Informationsverarbeitung; Moodle-Kurs Excel 2010; http://www.umm.uni-heidelberg.de/inst/biom/edv_kurse/skripten/Excel/Bland/Altman.pdf

- 47 McKee IW, Glover KE, Williamson PC, Lam EW, Heo G, Major PW. The effect of vertical and horizontal head positioning in panoramic radiography on mesiodistal tooth angulations. *Angle Orthod.* 2001 Dec; 71(6):442-51.
- 48 McKee IW, Williamson PC, Lam EW, Heo G, Glover KE, Major PW. The accuracy of 4 panoramic units in the projection of mesiodistal tooth angulations. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 2002; 121: 166-75.
- 49 Mischkowski RA, Pulsfort R, Ritter L, Neugebauer J, Brochhagen HG, Keeve E, Zöller JE. Geometric accuracy of a newly developed cone-beam device for maxillofacial imaging. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2007 Oct; 104(4): 551-9.
- 50 Owens AM, Johal A. Near-End of Treatment Panoramic Radiograph in the Assessment of Mesiodistal Root Angulation. *Angle Orthodontist*, Vol 78, No 3, 2008.
- 51 Pasler FA. *Zahnärztliche Radiologie*, 5., aktualisierte Auflage. 2008 Georg Thieme Verlag KG, S. 47ff.
- 52 Peck JL, Sameshima GT, Miller A, Worth P, Hatcher DC. Mesiodistal Root Angulation Using Panoramic and Cone Beam CT. *Angle Orthod*, Vol 77, No 2, 2007.
- 53 Philipp RG, Hurst RV. The cant of the occlusal plane and distortion in the panoramic radiograph. *Angle Orthod.* 1978; 48:317-323.
- 54 Rakosi T, Jonas I. *Farbatlanten der Zahnmedizin, Band 8, Kieferorthopädie Diagnostik*, Herausgeber: Klaus H. Rateitschak, 1989 Georg Thieme Verlag Stuttgart New York, S.46-47.
- 55 Risse G. Die Angulation der ersten permanenten oberen Molaren, der Schlüssel zur funktionellen Okklusion, *Umf. Dentof. Orthod. Und Kieferorthop.*, 1-2, 2005.
- 56 Rothe LE, Bollen AM, Little RM, Chaison JB, Chen CSK, Hollender LG; Trabecular and cortical bone risk factors for orthodontic relapse, *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2006; 130(4):476-84.
- 57 Rother UJ. *Moderne bildgebende Diagnostik in der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde*. 2001 Urban und Fischer Verlag München Jena, S 74ff.

- 58 Rowse CW. Notes on interpretation of the orthopantomogram. *Brit Dent J* 1971; 130:425-434.
- 59 Pschyrembel. *Klinisches Wörterbuch*. Herausgeber: Willibald Pschyrembel. 2001 Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, S. 855.
- 60 Samawi SS, Burke PH. Angular distorsion in the orthopantomogram. *Br J Orthod*. 1984 Apr; 11(2):100-7.
- 61 Sander FG, Schwenger N, Ehrenfeld M. *Zahn-Mund-Kieferheilkunde: Kieferorthopädie*. 2011 Georg Thieme Verlag KG, S. 25-26.
- 62 Scarfe WC, Nummikoski P, McDavid WD, Welander U, Tronje G. Radiographic interproximal angulations: implications for rotational panoramic radiography. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*. 1993 Nov; 176(5):664-72.
- 63 Schopf P. *Curriculum Kieferorthopädie Band I*. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage; Quintessenz Verlags-GmbH, 2000:54.
- 64 Schumacher GH: *Funktionelle Anatomie des orofacialen Systems*, Hüthig Verlag, 1985; 155.
- 65 Schulze D. Bildgebende Diagnostik in der Zahnheilkunde. Von der Kathodenstrahlung zur digitalen Radiographie. Teil 1. *Digital Dental News* 2007; 1:33-39
- 66 Schulze R. s2k-Leitlinie Dentale digitale Volumetomographie, Version Nr. 9; 5. August 2013.
- 67 Schwenger N (Hrsg.), Ehrenfeld M (Hrsg.). *Allgemeine Chirurgie*, Band 1. 2000 Georg Thieme Verlag Stuttgart New York, S. 237ff.
- 68 Segner D, Hasund A. *Individualisierte Kephalemetrie*. 2003 Dietmar Segner, Verlag und Vertrieb, S. 67.
- 69 Stramotas S, Geenty JP, Petocz P, Darendeliler A. Accuracy of linear and angular measurements on panoramic radiographs taken at various positions in vitro. *European Journal of Orthodontics* 24 (2002) 43-52.
- 70 Sukovic P. Cone beam computed tomography in craniofacial imaging. *Orthodontics & craniofacial research* 6 Suppl 1, 31-36; discussion 179-182, 2003.

- 71 Tong H, Enciso R, Van Elslande D, Major P, Sameshima GT. A new method to measure mesiodistal angulation and faciolingual inclination of each whole tooth using volumetric cone-beam computed tomography images. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2012; 142(1):133-43.
- 72 Tong H, Kwon D, Shi J, Sakai N, Enciso R, Sameshima GT. Mesiodistal angulation and faciolingual inclination of each whole tooth in 2-dimensional space in patients with near-normal occlusion. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 2012; 141:604-17.
- 73 Tran U, VO Ausgewählte Methoden, SS 2011, www.ppcms.univie.ac.at
- 74 Tsiklakis K, Donta C, Gavala S, et al. Dose reduction in maxillofacial imaging using low dose Cone Beam CT. *Eur J Radiol.* 2005; 56(3):413-7.
- 75 Van Elslande DC, Russett SJ, Major PW, Flores-Mir C. Mandibular asymmetry diagnosis with panoramic imaging. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 2008 Aug; 134(2):183-92.
- 76 Van Elslande D, Heo G, Flores-Mir C, Carey J, Major PW. Accuracy of mesiodistal root angulation projected by cone-beam computed tomographic panoramic-like images. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 2010; 137:S94-9.
- 77 Vermylen K, De Quincey GN, van't Hof MA, Wollfe GN, Renggli HH. Classification, reproducibility and prevalence of root proximity in periodontal patients, *J Clin Periodontal*, 2005 Mar; 32(3):254-9.

7 Anhang

7.1 Ergebnisse statistischer Tests

Tabelle 18: Absolute Differenzen mesiodistaler Zylinderangulationen, Modell A

Zylinder	Referenz	3D	reko PSA	PSAi	PSAa	PSAw
17	2	1,26	0,06	-2,08	-1,4	-2,88
16	7	1,56	1,36	-3,1	-2,54	-4,92
15	5	2,06	0,8	-0,84	-2,28	-3,12
14	6	0,48	0,46	-1,76	-3,16	-2,16
13	14	1,2	1,96	-5,92	-8,58	-4,24
12	6	2,34	2,58	-5,62	-5,9	-1,58
11	5	3,06	3,72	-3,5	-5,08	-0,62
21	5	0,42	1,02	-0,72	-2,04	2,96
22	6	2,76	1,56	-2,48	-6,02	1,82
23	14	-2,34	-2,22	-9,44	-12,72	-7,94
24	6	1,4	0,88	-3,62	-2,2	-4,06
25	5	0,36	0,5	0,82	0,42	-1,56
26	7	0,92	0,86	-5,26	-4,26	-3,9
27	2	1,64	2,02	-4,02	-4,24	-2,56
37	16	2,02	1,8	3,32	0,98	4,06
36	9	1,16	0,98	2,54	1,56	4,64
35	5	1,7	0,78	-0,92	-3,86	0,2
34	3	0,34	-0,28	-0,76	-2,62	2,6
33	3	-0,58	-0,8	-1,74	-3,98	2,5
32	2	1,12	0,98	-2,22	-2,68	-0,44
31	1	0,44	1,26	-0,6	-0,94	-0,48
41	1	0,62	1,6	-0,46	-0,66	-0,5
42	2	0,72	0,4	-1,52	-3,16	-3,04
43	3	0,66	-1	-3,52	-4,34	0,54
44	3	0,78	-0,2	-1	-4,18	-0,02
45	5	2,28	2,24	-2,6	-4,32	-0,62
46	9	1,46	-0,32	6,56	6,08	4,14
47	16	3,66	2,28	4,64	4,74	0,94

Tabelle 19: Absolute Differenzen mesiodistaler Zylinderangulationen, Modell B

Zylinder	Referenz	3D	reko PSA	PSAi	PSAa	PSAw
57	2	2,02	0,32	-4,8	-4,98	-2,28
56	7	1,06	1,46	-6	-8	-4,18
55	5	1,92	0,46	-7,08	-5,76	-5,74
54	6	1,26	0,88	-6,6	-5,44	-5,04
53	14	2,42	5,06	-8,56	-10,66	-4,4
52	6	3,02	0,14	-8,18	-7,6	-0,74
51	5	0,56	-0,54	-2,64	-4,4	-0,98
61	5	1,36	0,4	-2,34	-3,82	4,16
62	6	6,2	3,16	-2,86	-6,08	3
63	14	0,08	-0,96	-13,12	-14,04	-9,12
64	6	0,2	0,52	-7,64	-4,86	-6,4
65	5	0,96	0,44	-6,9	-6,5	-6,06
66	7	0,44	0,88	-8,18	-7,46	-6,14
67	1	4,4	1,54	-4,96	-5,84	-1,1
77	16	4,16	2,8	3,72	4,6	2,66
76	9	2,64	1,82	4,46	4,32	2,9
75	5	-0,1	1,2	-5,08	-5,4	-2,82
74	3	1,84	0,6	-4,06	-5,06	-0,54
73	3	0,44	1,2	-3,48	-4,04	1,48
72	2	0,92	-0,22	-1,64	-1,32	0,48
71	1	0,64	0,18	0,78	0,36	3,28
81	1	0,16	1,4	-0,74	-1,2	-0,4
82	2	0,54	-0,5	-5,44	-5,46	-2,06
83	3	1,28	-1,26	-6,86	-7,44	-0,06
84	3	3,66	0,9	-6,82	-7,46	-2,72
85	5	1,58	-0,42	-7,16	-9,62	-2,68
86	9	0,68	1,4	9,46	9,26	5,8
87	16	5,34	5,5	8,36	8,58	5,52

7.2 Danksagung

Ich danke in erster Linie Herrn Prof. Dr. Axel Bumann für die Überlassung des Dissertationsthemas, seine stets motivierende Betreuung, sowie die blitzschnelle Beantwortung sämtlicher Fragestellungen.

Ein großer Dank gilt dem Team von Mesantis® Berlin für Hilfsbereitschaft bei den DVT-Aufnahmen, sowie für die Bereitstellung der Arbeitsrechner und vor allem für die geduldige Unterstützung im Umgang mit der Software InVivo 5.0.

Herrn Dr. Hietschold und vor allem Patrick Scheibe und Team danke ich für die überaus kompetente und zielführende Beratung hinsichtlich zahlreicher statistischer Fragestellungen.

Zudem gilt ein großer Dank Dr. Katrin Splith und Mascha Heine für die kritische Auseinandersetzung hinsichtlich der Optimierung von Stil und Form dieser Arbeit.

Abschließend möchte ich meiner Familie - im Besonderen meinen Eltern - und meinen Freunden für die höchst geschätzte bedingungslose finanzielle und vor allem mentale Unterstützung herzlichst danken, ohne welche dieser Werdegang undenkbar gewesen wäre. Des Weiteren gilt ein großer Dank meinem Sohn, Jakob Konstantin Siebald, der mir ohne etwas davon zu ahnen gezeigt hat, wie unvermutet weit man über sich hinauswachsen kann.

7.3 Lebenslauf

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

7.4 Eidesstattliche Erklärung

„Ich, Franziska Siebald, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertationsschrift mit dem Thema „Vergleich der Zahnwurzelangulationen in konventionellen digitalen und aus 3D-Datensätzen rekonstruierten Panoramaschichtaufnahmen“ selbständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung (siehe „Uniform Requirements for Manuscripts (URM)“ des ICMJE – www.icmje.org) kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) entsprechen den URM (siehe oben) und werden von mir verantwortet.

Meine Anteile an etwaigen Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem Betreuer angegeben sind. Sämtliche Publikationen, die aus dieser Dissertation hervorgegangen sind und bei denen ich Autor bin, entsprechen den URM (siehe oben) und werden von mir verantwortet.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§156, §161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.“

Datum

Unterschrift