

Aus der Klinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer- und Plastische Gesichtschirurgie
der Universität Würzburg

Direktor: Prof. Dr. med. Dr. med. dent. A. C. Kübler

Vergleichende Analysen zwischen dreidimensionaler und
konventioneller Kephalmetrie bei Dysgnathiepatienten

-

**Digitale Volumentomographie versus
laterales Fernröntgenseitenbild**

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde der

Medizinischen Fakultät

der

Julius-Maximilians-Universität Würzburg

vorgelegt von

Stefan Hartmann

aus Randersacker

Würzburg, April 2010

Referent: Prof. Dr. med. Dr. med. dent. A. C. Kübler

Korreferentin: Prof. Dr. med. dent. A. Stellzig-Eisenhauer

Dekan: Prof. Dr. med. M. Frosch

Tag der mündlichen Prüfung: 20.09.2010

Der Promovend ist Zahnarzt

Meiner Familie

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Kephaleximetrie	1
1.2 Fernröntgenseitenbild (FRS)	2
1.3 Cone-beam computed tomography (CB-CT) oder Digitale Volumentomographie (DVT)	3
1.4 3D-Kephaleximetrie	5
1.5 Nomenklatur und Ätiologie der Dysgnathien	7
2. Fragestellung	8
2.1. Grundsätzliche Überlegungen	8
2.2. Fragestellung	9
2.2.1. Prüfung der Methode	9
2.2.2. Auswertung des Patientenkollektivs	9
3. Material und Methoden	10
3.1. Patientenkollektiv	10
3.2. Geräte und Software	12
3.2.1. GALILEOS Comfort®	12
3.2.2. ORTHOPHOS XG®	12
3.2.3. SIDEXIS neXt Generation®	13
3.2.4. MAXILIM®	13
3.2.5. FRwin professional®	14
3.2.6. EXCEL®	14
3.2.7. STATISTICA®	14
3.3. Prüfung der Methode	15
3.4. Auswertung des Patientenkollektivs	15
3.5. Datenerhebung	15
3.6. Auswertung	17
3.6.1. Bezugspunkte der kephaleximetrischen Analyse	17
3.6.2. Anguläre Messungen der kephaleximetrischen Analyse	19

3.6.3. Lineare Messungen der kephalometrischen Analyse	19
3.6.4. Auswertung Fernröntgenseitenbild	20
3.6.5. Auswertung CB-CT-Scan	22
3.7. Statistische Auswertung	24
4. Ergebnisse	25
4.1. Prüfung der Methode – FRS	25
4.1.1. SNA	25
4.1.2. $\underline{1}$ -SN	26
4.1.3. $\underline{1}$ -SpP	27
4.1.4. SN-SpP	28
4.1.5. $\bar{1}$ -MeGo	29
4.1.6. ArGoMe	30
4.1.7. NSAr	31
4.1.8. S-N	32
4.1.9. N-Spa	33
4.1.10. Spa-Spp	35
4.1.11. P_1 -Me	36
4.2. Prüfung der Methode – CB-CT	37
4.2.1. SNA*	37
4.2.2. $\underline{1}$ -SN*	38
4.2.3. $\underline{1}$ -SpP*	39
4.2.4. SN-SpP*	40
4.2.5. $\bar{1}$ -MeGo*	41
4.2.6. ArGoMe _R	42
4.2.7. ArGoMe _L	44
4.2.8. NSAr _R	45
4.2.9. NSAr _L	46
4.2.10. S-N*	47
4.2.11. N-Spa*	48
4.2.12. Spp-Spa*	49
4.2.13. P_1 -Me _R	50
4.2.14. P_1 -Me _L	51

4.2.15. Zwischenergebnis I: Prüfung der Methode	52
4.3. Vergleich der Varianzen	53
4.3.1. Untersucher 1	54
4.3.2. Untersucher 2	55
4.3.3. Zwischenergebnis II: Vergleich der Varianzen	55
4.4. Auswertung des Patientenkollektivs	57
4.4.1. Anguläre Messungen	57
4.4.2. Lineare Messungen	58
4.4.3. Differenzen zwischen FRS und CB-CT (Medianebene)	60
4.4.4. Differenzen zwischen FRS und CB-CT (Paramedianebene)	61
4.4.5. Zwischenergebnis III: Auswertung des Patientenkollektivs	62
5. Diskussion	63
5.1. Patientenkollektiv	63
5.2. Zwischenergebnis I: Prüfung der Methode	64
5.3. Zwischenergebnis II: Vergleich der Varianzen	66
5.4. Zwischenergebnis III: Auswertung des Patientenkollektivs	67
6. Zusammenfassung	70
7. Literaturverzeichnis	72
8. Danksagung	
9. Lebenslauf	

1. Einleitung

1.1. Kephalometrie

Der Begriff Kephalometrie kommt aus dem Griechischen und setzt sich aus den Worten „kephale“ für „Kopf“ und „metron“ für „Maß“ zusammen (*Drescher 2000*). Es finden sich Aufzeichnungen, die belegen, dass bereits seit dem 15. Jahrhundert der Wunsch danach besteht die Morphologie des menschlichen Schädels genau zu erfassen und gegebenenfalls zu bewerten. So behandeln die Studien von *Dürer* und *da Vinci* schon im Mittelalter die Charakterisierung einer symmetrischen und damit harmonischen Gesichtsform (*Steinhäuser 1989*). Mit der Entdeckung der Röntgenstrahlen durch *Röntgen* im Jahre 1895 eröffnen sich neue Möglichkeiten der Analyse (*Röntgen 1895*). Die ersten Versuche standardisiert Winkel und Strecken, wie sie auch heute bekannt sind, zu messen gehen auf *Broca* im Jahre 1865 zurück (*Brodie 1941*). *Hofrath* und *Broadbent* erforschen unabhängig von einander dann in den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts ein Verfahren, bei dem der Gesichtsschädel und die darüber liegenden Weichteile der Patienten in einer Lateralansicht annähernd maßstabsgetreu und reproduzierbar abgebildet werden können (*Broadbent 1931; Hofrath 1931*). Im Laufe der Zeit werden immer mehr Punkte, Strecken und Ebenen beschrieben, um eine immer weiter reichende Auswertung vornehmen zu können. Zum heutigen Zeitpunkt stehen mehr als 100 verschiedene Methoden der Auswertung zur Verfügung (*Downs 1956*).

Auch heute ist die Kephalometrie unter Zuhilfenahme des Fernröntgenseitenbildes (FRS) nach wie vor Bestandteil einer jeden kieferorthopädischen Behandlung. Neben den radiologischen Ungenauigkeiten, beinhaltet die Beurteilung durch einen oder mehrere Behandler vielfältige weitere Fehlerquellen. So ist die Identifikation der relevanten Landmarken nach wie vor ein viel beschriebenes, häufig untersuchtes aber schlussendlich nicht gelöstes Problem dieses Analyseverfahrens. *Houston* zeigt dies in seinen Mitte der 80er-Jahre des 20. Jahrhunderts veröffentlichten Studien eindrucksvoll (*Houston 1983; Houston et al. 1986*).

Weiterhin zeigen sich aufschlussreiche Unterschiede bei der Art der Auswertung. So vergleichen etwa *Yu et al.* die Positionierung verschiedener Landmarken mit unterschiedlichen Methoden (*Yu et al. 2008*). Die Auswertung am PC mit spezieller

Software und das „Durchzeichnen“ mit der Hand, zeigen signifikante Unterschiede bei der Identifikation verschiedener Referenzpunkte. Auch legt die Untersuchung nahe, dass die computergestützte Auswertung insbesondere bei Bildern mit hoher Radioluzenz eine genauere Analyse ermöglicht. In der heutigen Zeit werden viele Röntgenbilder mit spezieller Software befundet, was den Zeitaufwand verringert und gleichzeitig Ablese- und Übertragungsfehler minimiert (*Yu et al. 2008*).

Der Vergleich zwischen konventionell aufgenommenen lateralen FRS und aus dreidimensionalen Daten rekonstruierten lateralen Kephalogrammen zeigt indes keine signifikanten Unterschiede (*van Vlijmen et al. 2009*).

Eine Studie von *Wylie et al.* vergleicht die präoperativ auf Grundlage von Kephalogrammen geplanten Verlagerungsmaße bei Dysgnathie-Patienten mit dem tatsächlich umgesetzten OP-Ergebnis. Hier kommt es zu erheblichen Unterschieden zwischen dem vorher geplanten und später umgesetzten Verlagerungsmaß. Dies unterstreicht die Wichtigkeit exakter Untersuchungsmethoden (*Wylie et al. 1987*).

1.2. Fernröntgenseitenbild

Das Protokoll für das laterale Fernröntgenseitenbild wird 1931 von *Hofrath* und *Broadbent* in die Kieferorthopädie eingeführt und ist auch heute noch ein wesentlicher Bestandteil der kieferorthopädischen Diagnostik, Planung und Verlaufskontrolle (*Broadbent 1931; Hofrath 1931*). Heute wird die Aufnahme aus einer Entfernung von 1,5 Metern durchgeführt. Die Aufnahme wird mit links anliegendem Kopf, in maximaler Schlussbissstellung, stehend und geradeausblickend, bei entspannter Körperhaltung und geschlossenen Lippen durchgeführt. Das Fernröntgenseitenbild hat trotz seiner Standardisierung hinsichtlich des Abstandes und der genauen Positionierung des Patienten zur Röntgenquelle und zum Film bzw. Detektor weiterhin einige systemimmanente Schwächen. Diese Art der Röntgenaufnahme wird immer einen Körper zweidimensional abbilden - dies führt zwangsläufig zu einem Verlust der räumlichen Information. Weiterhin lässt sich trotz des großen Abstandes des Objektes zur Strahlenquelle und des kleinen Abstandes zum Film der Projektionsfehler nicht vollständig beseitigen. Auch Verschattungen ergeben sich ganz zwangsläufig durch die einseitige Durchstrahlung des untersuchten Objekts. Weiterhin führen entweder eine nicht sachgemäße Positionierung des Kopfes des Patienten oder eine

Asymmetrie im Bereich des Gesichtsschädels des Untersuchten unabwendbar zu Doppelkonturen, die später in der kephalometrischen Analyse nur unbefriedigend bewertet werden können.

Hier zeigt eine Studie von *Hassan et al.* signifikante Unterschiede zwischen ordnungsgemäß und rotiert positionierten Schädeln bei zweidimensionalen Aufnahmen – wohingegen dreidimensionale Aufnahmen keine signifikanten Differenzen bei unterschiedlicher Positionierung zeigen (*Hassan et al. 2009*).

Bislang bleibt das Fernröntgenseitenbild der Goldstandard für die normale kieferorthopädische Befundung. In der Diagnostik von Patienten mit starken Asymmetrien im Bereich des Gesichtsschädels, oder kraniofazialen Syndromen, bieten dreidimensionale Verfahren deutliche Vorteile (*Kragsskov et al. 1997*).

1.3. Cone-beam computed tomography (CB-CT) oder Digitale Volumentomographie (DVT)

Die Cone-beam computed tomography (CB-CT) oder Digitale Volumentomographie (DVT) ist ein neues röntgenologisches Verfahren zur Erzeugung dreidimensionaler Rekonstruktionen und Schichtbilder.

Die Anfänge der Cone-beam computed tomography reichen bis in die 1970er Jahre zurück (*Webb 1990*). Zu Beginn ihrer Entwicklung wurde die CB-CT vornehmlich zur Angiographie verwendet.

Die erste praxistaugliche CB-CT-Scanner im Bereich dentaler und mund-, kiefergesichtschirurgischer Anwendung, der NewTom DVT9000[®], wird allerdings erst 1998 von der Firma QR[®] aus Verona konstruiert (*Mozzato et al. 1998*). Mittlerweile findet sich ein weitreichendes Einsatzgebiet der Digitalen Volumentomographie im Bereich der Kopf-Hals- sowie der oralen Chirurgie (*Miracle, Mukherji 2009*). Im Unterschied zu konventionellen computer-tomographischen Verfahren wird bei der CB-CT kein scheibenförmiges sondern ein kegelförmiges Strahlenbündel erzeugt, welches den Schädel durchquert und auf einen Flachdetektor trifft. Bei allen gegenwärtig kommerziell erhältlichen Geräten funktioniert die Strahlenerzeugung nach demselben Prinzip, die Geräte unterschieden sich lediglich in der Form der Bildaufnahme und –verarbeitung.

Sowohl die Charged-coupled-device-Sensoren (CCD) als auch die daneben zum Einsatz kommenden amorphous silicon flat panel detectors (FPD) haben in Studien ihre Genauigkeit und Verlässlichkeit bewiesen (*Queresby et al. 2008*).

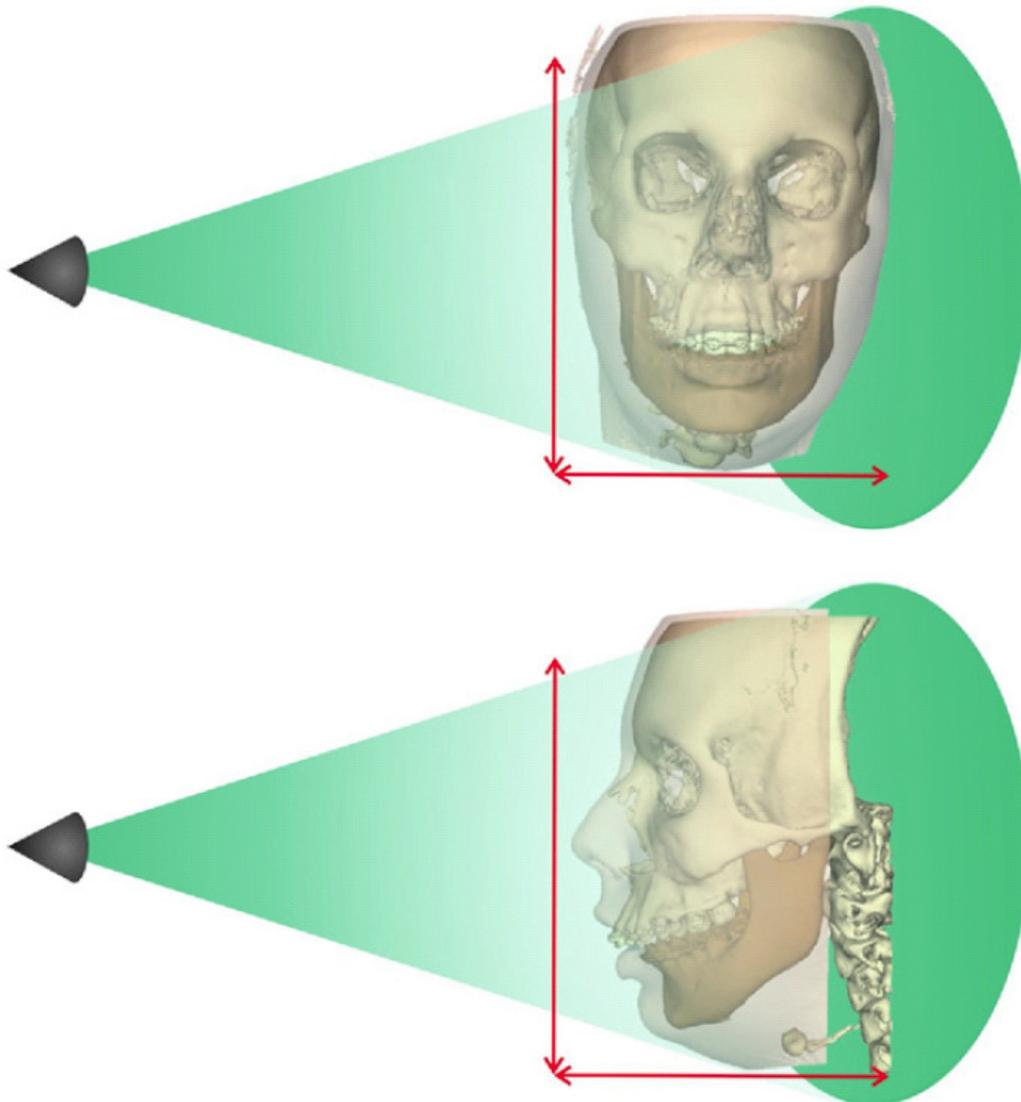


Abbildung 1.1 Kegelförmiges Strahlenbündel, welches den Schädel durchquert. Das dargestellte Untersuchungsvolumen entspricht nicht dem in der Studie verwendeten GALILEOS Comfort[®]. Nach *Svennen et al. 2009*

Die Strahlenquelle führt im Rahmen eines Untersuchungsdurchgangs, ähnlich dem Vorgehen beim Orthopantomogramm (OPG), eine Umlaufbewegung um den sitzenden oder stehenden Patienten durch. Die innerhalb von etwa 15 Sekunden gewonnenen Rohdaten, je nach Gerät und Voreinstellung zwischen 100 und 400 Bilder, werden später mithilfe spezieller Software aufbereitet und ermöglichen dem Betrachter Rekonstruktionen in allen drei Raumebenen, ohne den Patienten weiterer Röntgenstrahlung auszusetzen. Genauso wie die übliche Computertomographie bietet auch die CB-CT eine sehr gute

Auflösung und ermöglicht dadurch die genaue Untersuchung knöcherner Strukturen (Ziegler *et al.* 2002). Mittlerweile bietet die CB-CT einen großen Einsatzbereich in der prä- und postoperativen Diagnostik, der von der einfachen Implantatinsertion bis hin zu komplexen Operationen an Lippen-Kiefer-Gaumen-Segelspalten reicht (Miracle, Mukberji 2009; Queresby *et al.* 2008; Wörtche *et al.* 2006). Die CB-CT ergänzt sowohl die zahnärztlichen Radiologie als auch die dreidimensionale Computertomographie. In der Vergangenheit zeigte sich, dass vor allem für niedergelassene Ärzte die Anschaffung eines Mehrzeilen-Spiral-Computertomographen wegen des erheblichen finanziellen Aufwandes nicht infrage kam (Mozzso *et al.* 1998). Besondere Bedeutung kommt der CB-CT auch deshalb zu, weil sie im Unterschied zur konventionellen Mehrzeilen-Spiral-CT den Patienten einer deutlich geringeren Strahlendosis exponiert (Mozzso *et al.* 1998; Mah *et al.* 2003; Swennen, Schutysen 2006).

Der Austausch und Transfer kraniofazialer CB-CT-Datensätzen wird in den meisten Fällen, analog zu konventionellen CT-Daten, mittels des DiCOM-Formats durchgeführt (Grauer *et al.* 2009).

1.4. 3D-Kephalometrie

In letzter Zeit werden vermehrt Applikationen zur dreidimensionalen Analyse des Schädels angeboten. Auch hier stellt sich die Frage nach der Genauigkeit der Analyse. Periago und Scarfe belegen in ihrer Studie, dass die Messung mittels spezieller an einem 3D-Modell, das mit der Cone-beam computed tomography (CB-CT) gewonnen wurde, signifikant schlechter ist als die direkte Messung am Untersuchungsschädel (Periago *et al.* 2008).

Trotzdem bietet die dreidimensionale Kephalometrie gegenüber dem konventionellen FRS Vorteile. Verschattungen und Überlagerungen gehören im Zeitalter der Computertomographie der Vergangenheit an (Papadopoulos *et al.* 2005). Die Auswertung von konventionellen und aus CB-CTs gewonnenen lateralen Kephalogrammen zeigt indes, dass die Reproduzierbarkeit der ermittelten Ergebnisse allerdings bei den CB-CT-Scans höher ist (van Vlijmen *et al.* 2009).

Die hohe Genauigkeit und Verlässlichkeit bei kephalometrischen Messungen auf Grundlage der CB-CT ist mehrfach beschrieben worden (*Cevitanes et al. 2005; Cevitanes et al. 2007; Chien et al. 2009*). So können etwa *Berco et al.* zeigen, dass metrische Messungen des kraniofazialen Komplexes mittels CB-CT-Daten verlässliche Ergebnisse liefern, die zudem keine klinisch relevanten Unterschiede zwischen verschiedenen Untersuchern zeigen (*Berco et al. 2009*). In der gleichen Studie konnte außerdem gezeigt werden, dass die Orientierung des Schädels während des Scanvorgangs keinen wesentlichen Einfluss auf die erhobenen Daten bewirkt. Die Untersuchung von *Ludlow et al.* zeigt allerdings, dass die Reproduzierbarkeit von dreidimensionalen Messungen in mediolateraler Richtung – also einer Direktion, die eine laterale Schichtaufnahme, wie das FRS, nicht abdeckt – nur eingeschränkt vorhanden ist (*Ludlow et al. 2009*). Dies erklärt sich aus einer inadäquaten Definition der verwendeten Landmarken. Auch in der 3D-Kephalometrie werden zumeist die gleichen Referenzpunkte wie bei der konventionellen, zweidimensionalen Kephalemetrie verwendet. Die Definition der Punkte enthält allerdings folglich keine Aussage über die dritte, in diesem Fall mediolaterale, Dimension.

Eine Vielzahl von Studien und Untersuchungen, die sich mit der Genauigkeit der CB-CT bei kephalometrischen Messungen befassen, nutzen als Untersuchungsobjekt keine Patienten, sondern fixierte Schädelpräparate.

Vergleichsuntersuchungen zwischen 3D-Oberflächenscannern und CB-CT-Scans, wie etwa eine Studie von *Moerenhout et al.*, zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Aufnahmemodalitäten (*Moerenhout et al. 2009*).

Aufgrund der hohen Genauigkeit der CB-CT-Scans und mittels entsprechender Software ist es in Einzelfällen bereits möglich, die komplette Operationsplanung der orthognathen Chirurgie inklusive der Herstellung der Splinte, ohne die Verwendung von Gipsmodellen und Wachsbissregistraten durchzuführen (*Swennen et al. 2009*).

Die Problematik des Projektionsfehlers ist auch bei der CB-CT noch nicht vollständig geklärt, da sich auch hier nicht immer vergrößerungsfreie Rekonstruktionen zeigen (*Lascala et al. 2004*).

Bei der Untersuchung der Gesichtswichteile hat die konventionelle Fernröntgenseitenaufnahme noch Vorteile gegenüber der CB-CT (*Swennen, Schutysler 2006*). Im Vergleich zur Mehrzeilen-Spiral-Computertomographie (MS-CT) ermöglicht die CB-CT allerdings eine bessere Beurteilung der Weichteile, wenngleich der Weichteilkontrast der MS-CT besser ist als der der CB-CT. Die CB-CT wird zumeist sitzend oder im Stehen durchgeführt, was im Unterschied zu einer im Liegen angefertigten MS-CT-Aufnahme zu einer naturgetreuen Ausformung der Gesichtswichteile führt (*Swennen, Schutysler 2006*).

Unabhängig von der Güte der radiologischen Untersuchung und der späteren kephalometrischen Aufarbeitung der Daten, ist das ästhetische Outcome, also das genaue Ausmaß der Veränderung der bedeckenden Gesichtswichteile nach Umgestaltung ihrer skelettalen Grundlage im Rahmen von Dysgnathie-Operationen, zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht vorhersagbar (*Queresby et al. 2008*). Weitere dahingehende Untersuchungen sind deshalb von großem Interesse.

1.5. Nomenklatur und Ätiologie der Dysgnathien

Verschiedenste Nomenklaturen zur Einteilung der Malokklusion wurden in der Vergangenheit ebenso zahlreich entwickelt, wie auch wieder modifiziert und verworfen. Die Einteilung von *Angle* aus dem Jahr 1899 ist auch heute noch internationaler Standard, was die Beurteilung der Okklusion in der Sagittalen betrifft (*Angle 1899*). Auf Grundlage von Angles Überlegungen erfolgt die Einteilung auch heute noch nach folgendem Schema:

Angle-Klasse I	Neutralbisslage
Angle-Klasse II	Distalbisslage
II/1	Distalbisslage mit Protrusion der Schneidezähne
II/2	Distalbisslage mit Retrusion der Schneidezähne
Angle-Klasse III	Mesialbisslage

2. Fragestellung

2.1. Grundsätzliche Überlegungen zur Anfertigung der Studie

Ziel dieser Arbeit war es, die Genauigkeit kephalometrischer Messungen, welche aus CB-CT-Scans und herkömmlichen lateralen FRS gewonnen wurden, zu vergleichen. Als Messpunkte, Strecken und Winkel wurden sowohl jene Parameter erhoben, welche im Rahmen der orthognathen Chirurgie wesentlicher Veränderung unterliegen als auch solche, die sich durch einen operativen Eingriff nicht verändern sollten. Im Unterschied zu den meisten anderen Studien zu diesem Themenkomplex, stehen bei dieser Studie klinische Beispiele und damit auch die Anwendung der oben genannten Verfahren im Fokus der Untersuchung.

Es soll konkret geklärt werden, ob es möglich ist, die konventionelle Fernröntgenseitenaufnahme, die immer prä- und postoperativ nach orthognather Chirurgie angefertigt wird und ohnehin Bestandteil einer jeden kieferorthopädischen Therapie ist, durch CB-CT-Scans zu ersetzen. Ferner soll überprüft werden, ob durch die dreidimensionale Aufarbeitung der Röntgenbilder und die Möglichkeit Messpunkte räumlich zu platzieren signifikante Unterschiede in der Befundung des gleichen Patienten auftreten. Typische Fehlerquellen der konventionellen zweidimensionalen Röntgenaufnahme wie etwa Überlagerungen, Projektionsfehler und die Unmöglichkeit einer exakten räumlichen Orientierung werden anhand des Vergleichs zwischen zwei- und dreidimensionaler Aufnahme analysiert und bewertet.

2.2. Fragestellung

2.2.1. Prüfung der Methode

- Unterscheiden sich die Messungen im FRS in klinisch relevantem Ausmaß, wenn sie von zwei unabhängigen Untersuchern durchgeführt werden?
- Unterscheiden sich die Messungen im CB-CT in klinisch relevantem Ausmaß, wenn sie von zwei unabhängigen Untersuchern durchgeführt werden?
- Unterscheiden sich die Varianzen der FRS-Messungen von den Varianzen der CB-CT-Messungen?
- Zeigen sich Unterschiede hinsichtlich des Vergleichs der Varianzen zwischen FRS und CB-CT bei der Betrachtung linearer und angulärer Messungen?

2.2.2. Auswertung des Patientenkollektivs

- Wie unterscheiden sich die einzelnen Messwerte zwischen CB-CT und FRS im Mittel?
- Wie verhalten sich die mittleren Abweichungen für mediane und paramediane Parameter?

3. Material und Methoden

3.1. Patientenkollektiv

Bei den Patienten handelte es sich um Dysgnathiepatienten, die sich im Zeitraum von November 2007 bis September 2009 in der Klinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer- und Plastische Gesichtschirurgie der Universität Würzburg einer Umstellungsosteotomie unterzogen. Die Patienten waren zum Zeitpunkt des CB-CT-Scans im Mittel 27,3 Jahre (SD: 9,26) alt. Sie wiesen entweder eine Anomalie des Kiefer-Schädelbasis-Verhältnisses, eine Anomalie der Zahnbögen oder eine Kombination aus beidem, auf. Die Patienten stammten zum einen Teil aus überweisenden Praxen zum anderen und überwiegenden Teil aus der Poliklinik für Kieferorthopädie der Universität Würzburg. Es handelt sich bei der Untersuchung um eine retrospektive Querschnittstudie.

Einschlusskriterien für die Studie waren:

- Operativ zu korrigierende Dysgnathie (in der Universitätsklinik Würzburg)
- Präoperativer CB-CT-Scan
- Präoperatives laterales FRS in ausreichender Zeichenschärfe mit Skalierung zur Erfassung der Metrik
- Abgeschlossenes Gesichtsschädelwachstum

Ausschlusskriterien für die Studie waren:

- Kraniofaziale Syndrome
- Lippen-Kiefer-Gaumen-Segelspalten
- Benigne und maligne Veränderungen im Bereich des Gesichtsschädels
- Unzureichende radiologische Unterlagen

Alter, Geschlecht sowie Ausprägung der Dysgnathie fanden bei der Auswahl keine Berücksichtigung. Zwischen der lateralen FRS und dem CB-CT-Scan lagen im Mittel 8,1 Monate (SD: 11,94).

Da nicht bei allen lateralen FRS eine Skalierung zur korrekten Erfassung der Metrik vorhanden war, wurden die angulären Messungen an 36 Patienten, die metrischen Messungen aber nur an 30 Patienten durchgeführt.

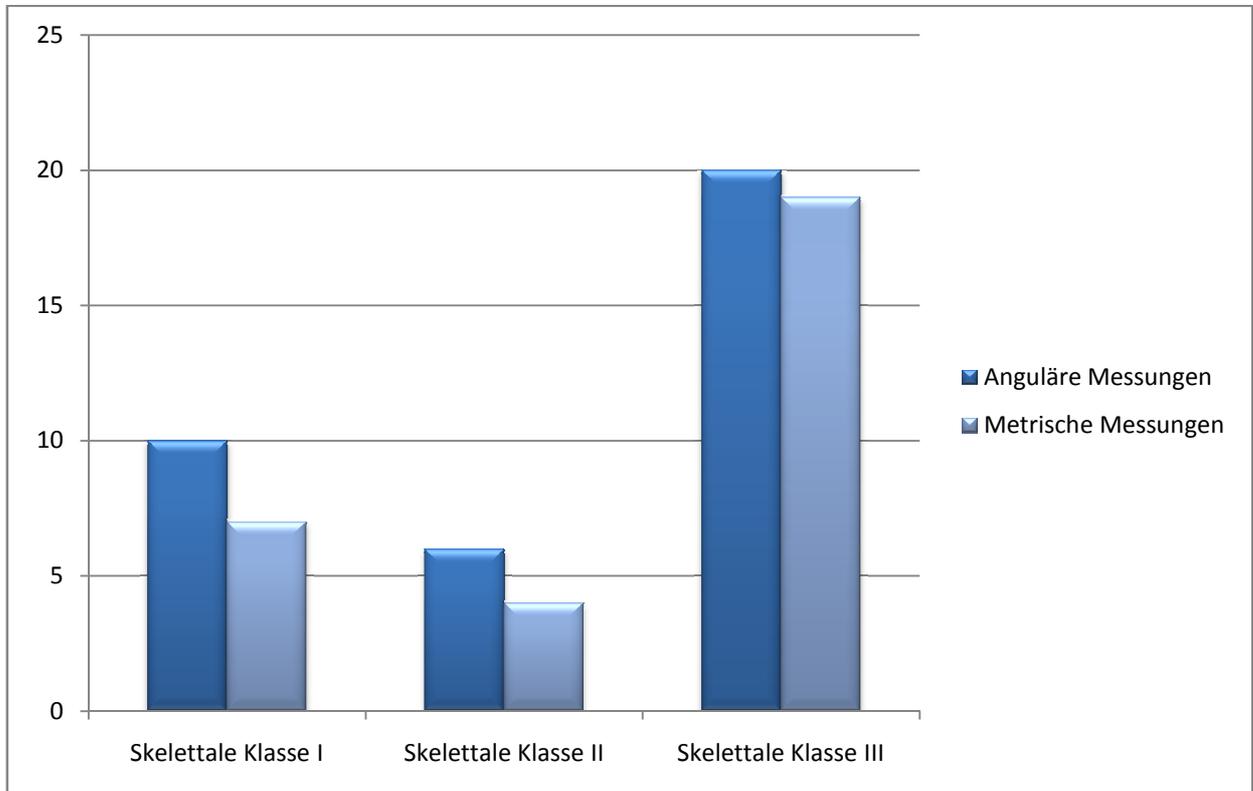


Abbildung 3.1 Verteilung der Skelettalen Klassen auf die angulären und metrischen Messungen

Die Auswertung der Aufnahmen erfolgte zufällig durch zwei unabhängige, mit den Analysemethoden und der verwendeten Software MAXILIM[®] vertrauten Prüfern.

3.2. Geräte und Software

3.2.1. GALILEOS Comfort® (Sirona, Bensheim, Germany)

Als CB-CT-Scanner kam das Gerät GALILEOS Comfort® zum Einsatz.

Aufnahmevolumen	(15 x 15 x 15) cm ³
Isotrope Voxelgröße	0.3 oder 0.15 mm
Aufnahmedauer / Belichtungszeit	14 s / 2 - 6 s
Spannung des Röntgenstrahlers	85 kV
Stromstärke des Röntgenstrahlers	5-7 mA
Effektivdosis	29µSv/68µSv (21 mAs, 85 kV)

Tabelle 3.1 Technische Eigenschaften GALILEOS Comfort® (Quelle: Sirona, Bensheim, Germany)

3.2.2. ORTHOPHOS XG® (Sirona, Bensheim, Germany)

Die lateralen Fernröntgenseitenbilder wurden digital mit dem Gerät ORTHOPHOS XG® angefertigt.

Effektive Belichtungszeit	270 ms
Spannung des Röntgenstrahlers	60-90 kV
Stromstärke des Röntgenstrahlers	3-16 mA
Aufbisshöhe	800-1850 mm

Tabelle 3.2 Technische Eigenschaften ORTHOPHOS XG® (Quelle: Sirona, Bensheim, Germany)



Abbildung 3.2 GALILEOS Comfort®



Abbildung 3.3 ORTHOPHOS XG®

3.2.3. SIDEXIS neXt Generation® (Sirona, Bensheim, Germany)

Die mit dem GALILEOS®-System verbundene Software SIDEXIS neXt Generation® (Version 2.3) diente nur der Aufnahme und Archivierung der Daten. Die in SIDEXIS neXt Generation® enthaltene Analysefunktion eignete sich nicht für die kephalometrische Beurteilung der Daten.

3.2.4. MAXILIM® (Medicim®, Mechelen, Belgium)

MAXILIM® (Version 2.2.2.1) ist eine Software, die die mithilfe eines CB-CTs gewonnenen Daten aufbereitet und dreidimensionale Rekonstruktionen erzeugt. Sie eignet sich deshalb zur Operationsplanung im Bereich der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie und ermöglicht mit dem Zusatzprogramm „3D cephalometry“ eine kephalometrische Analyse des Patienten.

3.2.5. FRwin professional® (Computer Konkret®, Falkenstein, Germany)

Die Auswertung der konventionellen Fernröntgenseitenbilder erfolgte mit der Software FRwin professional®. Dieses Programm wird in der Poliklinik für Kieferorthopädie der Universität Würzburg standardmäßig verwendet.

3.2.6. EXCEL® (Microsoft®, Redmond, USA)

Die Erhebung und Archivierung der Daten erfolgte mit Microsoft® EXCEL® (Version 2007).

3.2.7. STATISTICA® (StatSoft®, Tulsa, USA)

Die statistische Auswertung der Datensätze sowie die Erstellung der Boxplots wurden mit dem Programm STATISTICA® (Version 9.0) durchgeführt.

3.3. Prüfung der Methode

Zur grundsätzlichen Überprüfung der Messmethode wurden jeweils ein FRS und ein CB-CT-Scan zufällig ausgewählt. Anschließend wurden die beiden Bilder von beiden Untersuchern jeweils 30 Mal ausgewertet. Um den Lerneffekt bei der Auswertung zu minimieren, wurden die Bilder je im Abstand einer Woche ausgewertet. Mittlere Abweichungen von weniger als einem Millimeter bzw. Grad wurden als klinisch nicht relevant gewertet.

3.4. Auswertung des Patientenkollektivs

Zum eigentlichen Vergleich zwischen CB-CT und lateralem FRS wurden die patientenspezifischen Bilder (je ein laterales FRS und ein CB-CT-Scan) zufällig auf die Untersucher verteilt. Die Auswertungen der FRS-Bilder und Volumina des gleichen Patienten wurden einander gegenübergestellt. Die Messungen sind im 3D-Modell und im lateralen FRS jeweils nur ein Mal durchgeführt worden, um einer klinisch realistischen Anwendung Rechnung zu tragen. Auch hier sind Abweichungen unter einem Millimeter bzw. einem Grad als klinisch nicht relevant eingestuft worden.

3.5. Datenerhebung

Von allen in die Studie eingeschlossenen Patienten wurde präoperativ jeweils ein Fernröntgenseitenbild und ein CB-CT-Scan anfertigt. Die Fernröntgenseitenbilder wurden standardisiert aus einer Entfernung von 1,5 m aufgenommen. Die Aufnahmen führten entweder die überweisenden kieferorthopädischen Kollegen oder die Röntgenabteilung der Klinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer- und Plastische Gesichtschirurgie der Universität Würzburg durch.

Die aus dem CB-CT gewonnenen Daten wurden aus dem Programm SIDEXIS[®] im DiCOM[®]-Format in das Programm MAXILIM[®] Version 2.2.2.1 exportiert. MAXILIM[®]

enthält eine Bearbeitungssoftware („3D cephalometry“-Tool der MAXILIM®-Version 2.2.2.1) für kephalometrische Messungen, mithilfe der die Auswertung der Daten stattfand.

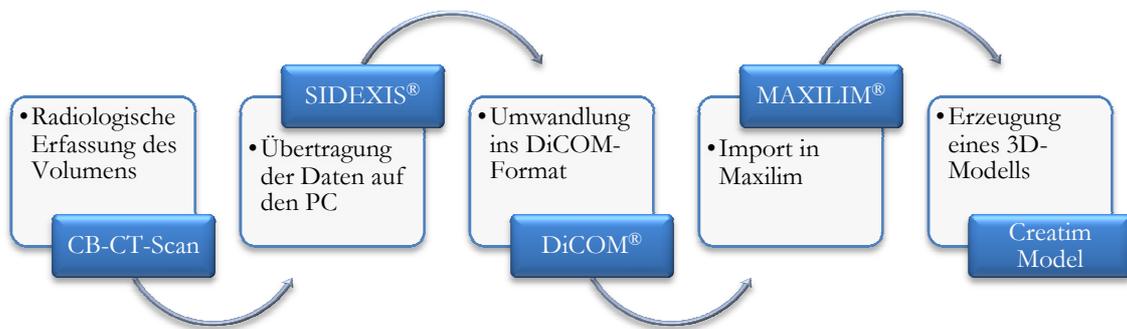


Abbildung 3.4 Datenfluss 3D-Kephalometrie

3.6. Auswertung

3.6.1. Bezugspunkte der kephalometrischen Analyse

Bei der Auswertung der FRS-Bilder wurde in Anlehnung an *Rakosi (Rakosi 1984)* eine Fernröntgenseiten-Analyse, wie sie auch in der Poliklinik für Kieferorthopädie der Universität Würzburg zur Anwendung kommt, durchgeführt. Im Folgenden werden die für diese Analyse wesentlichen Bezugspunkte näher erläutert. Es handelt sich hierbei um anatomische, röntgenologische und konstruierte Punkte.

Nasion (N): Ventro-kraniales Ende der Sutura nasofrontalis in der Median-Sagittal-Ebene. Es handelt sich um einen anatomischen Punkt.

Sella (S): Mittelpunkt der Fossa hypophysialis in der Median-Sagittal-Ebene. Es handelt sich um einen röntgenologischen Punkt.

A-Punkt (A): Der tiefste Punkt an der äußeren Krümmung des Processus alveolaris maxillae zwischen den Punkten Spina nasalis anterior und Prosthion in der Median-Sagittal-Ebene. Es handelt sich um einen anatomischen Punkt.

Tangentenpunkt am Unterkieferkörper (P_1): Kaudalster Punkt der äußeren Krümmung des Unterkieferkörpers im Bereich der Protuberantia masseterica. Es handelt sich um einen anatomischen Punkt.

Tangentenpunkt am aufsteigenden Unterkieferast (P_2): Dorsalster Punkt des aufsteigenden Unterkieferastes im Bereich des Kieferwinkels. Es handelt sich um einen anatomischen Punkt.

Gonion (Go): Schnittpunkt des Mandibularplanums (MeP_1) und der hinteren Ramuslinie (ArP_2). Es handelt sich um einen konstruierten Punkt.

Menton (Me): Kaudalster Punkt an der Kontur der Unterkiefersymphyse. Es handelt sich um einen anatomischen Punkt.

Articulare (Ar): Schnittpunkt zwischen dem Hinterrand des Ramus ascendens des Unterkiefers und dem äußeren Rand der Schädelbasis. Es handelt sich um einen röntgenologischen Punkt.

Spina nasalis anterior (Spa): Die am weitesten anterior gelegene Spitze der knöchernen Spina nasalis anterior. Es handelt sich um einen anatomischen Punkt.

Spina nasalis posterior (Spp): Schnittpunkt der vorderen Wand der Fossa pterygopalatina mit dem Nasenboden. Dieser Punkt ist die dorsale Begrenzung der Maxilla. Es handelt sich um einen röntgenologischen Punkt.

Incision $\underline{1}$ ($\underline{1}$): Spitze der Inzisalkante des am weitesten anterior liegenden oberen mittleren Schneidezahns. Es handelt sich um einen anatomischen Punkt.

Apicale $\underline{1}$ ($\underline{1}$): Wurzelspitze des am weitesten anterior liegenden oberen mittleren Schneidezahns in der Längsachse des Zahns. Es handelt sich um einen anatomischen Punkt.

Incision $\bar{1}$ ($\bar{1}$): Spitze der Inzisalkante des am weitesten anterior liegenden unteren mittleren Schneidezahns. Es handelt sich um einen anatomischen Punkt.

Apicale $\bar{1}$ ($\bar{1}$): Wurzelspitze des am weitesten anterior liegenden unteren mittleren Schneidezahns in der Längsachse des Zahns. Es handelt sich um einen anatomischen Punkt.

Die Identifikation der Landmarken der CB-CT-Scans erfolgte an in Anlehnung an *Swennen, Schutysler* und *Hausamen* (*Swennen et al. 2006*). Die Punkte P_1 , P_2 , Gonion, Menton und Articulare wurden für beide Seiten des Schädels einzeln positioniert. Alle anderen Punkte decken sich mit der Definition der FRS-Auswertung.

3.6.2. Anguläre Messungen der kephalometrischen Analyse

Im lateralen FRS ergibt sich projektionsbedingt, dass keine seitenungleichen Messungen durchgeführt werden können. Für die Volumina hingegen ergibt sich folgende Gliederung:

Winkel, die in der Medianebene gemessen wurden:

- SNA-Winkel (SNA)
- Winkel der OK-Incisiven zur vorderen Schädelbasis SN ($\underline{1}$ -SN)
- Winkel der OK-Incisiven zur Oberkiefergrundebene ($\underline{1}$ -SpP)
- Oberkiefer-Neigung gegen die vordere Schädelbasis (SN-SpP)
- Winkel der UK-Incisiven zur Unterkiefergrundebene ($\bar{1}$ -MeGo)

Winkel, die in der Paramedianebene gemessen wurden:

- Kieferwinkel rechts (ArGoMe_R)
- Kieferwinkel links (ArGoMe_L)
- Sattelwinkel rechts (NSAr_R)
- Sattelwinkel links (NSAr_L)

3.6.3. Lineare Messungen der kephalometrischen Analyse

Analog der angulären Messung ist auch hier keine seitenungleiche Messung im lateralen FRS möglich. Die Gliederung der Volumina ergibt sich wie folgt:

Strecken, die in der Medianebene gemessen wurden:

- Strecke Sella – Nasion (S-N)
- Strecke Nasion – Spina nasalis anterior (N-Spa)
- Strecke Spina nasalis anterior – Spina nasalis posterior (Spa-Spp)

Strecken, die in der Paramedianebene gemessen wurden:

- Strecke P₁ – Menton rechts (P₁-Me_R)
- Strecke P₁ – Menton links (P₁-Me_L)

Zur besseren Unterscheidung erhalten die Messungen des CB-CTs, die sich in der Medianebene befinden ein „*“. Paramediane Messungen im CB-CT sind durch die entsprechende Seitenangabe im Index zu unterscheiden.

Das GALILEOS[®]-System verfügt zur Positionierung des Patienten über einen Aufbiss für die Ober- und Unterkieferincisiven. Das Einbeißen der Patienten in die Positionierungshilfe lässt einen Vergleich vertikaler Messungen zwischen CB-CT und FRS nicht zu. Als weiteres Problem erwies sich die unvollständige Darstellung der Kinnregion bei Patienten mit einer Skelettalen Klasse III. In den meisten Fällen war das Aufnahmevolumen von 15*15*15 cm des GALILEOS[®]-Systems nicht ausreichend, um die Punkte Gnathion und Pogonion befriedigend und verzerrungsfrei darzustellen. Aus diesem Grund wurde die Längenmessung des Unterkiefers im Sinne einer Messung zwischen den Punkten P₁ und Menton durchgeführt.

Da im konventionellen lateralen FRS die Parameter nicht seitenungleich gemessen werden können, erfolgte die Bildung der Differenz der im 3D-Modell für jede Seite einzeln ermittelten Parameter (P₁-Me_R, P₁-Me_L, NSAr_R, NSAr_L, ArGoMe_R, ArGoMe_L) gegen einen (für beide Seiten als gleich angenommenen) FRS-Wert.

3.6.4. Auswertung Fernröntgenseitenbild

Die Werte für die Metrik wurden auf einem im Verhältnis 1:1 ausgedruckten FRS mittels eines Stechzirkels erhoben. Der Sattelwinkel NSAr wurde ebenfalls auf dem ausgedruckten FRS mithilfe eines Geodreiecks ermittelt. Die Messwerte wurden auf einen halben Millimeter bzw. ein halbes Grad gerundet. Die weiteren angulären Messungen wurden mit dem Programm FRwin vorgenommen. Bei Strukturen, die eine Doppelkontur zeigen, wurde eine gemittelte Konturlinie verwendet. Für die korrekte Metrik wurden die FRS-Bilder vor der Auswertung am PC mittels eines speziellen Tools skaliert.

3.6.5. Auswertung CB-CT-Scan

Die gewonnenen CB-CT-Rohdaten wurden mittels DiCOM[®]-Format von SIDEXIS[®] in MAXILIM[®] übertragen. Die importierten Daten wurden in ein „Creatim Model“ umgewandelt – es handelt sich hierbei um eine dreidimensionale Rekonstruktion aus den Schichtbildern. Das Programm MAXILIM[®] bietet neben bereits konfigurierten Analysen die Möglichkeit ein eigenes Untersuchungsprotokoll zu definieren. Die oben genannten Punkte der konventionellen Kephalemetrie wurden in das Protokoll eingefügt und die Untersuchung durchgeführt. Das dreidimensionale Modell wird mithilfe einer programmeigenen Positionierungshilfe in ein Raster aus drei Raumebenen navigiert. Für die korrekte Ausrichtung des Schädels ist die Identifikation zweier bilateral-symmetrischer Punkte – hier bieten sich der tiefste Punkt der Margo infraorbitalis links und rechts an - in der Ventralansicht sowie das Auffinden von Sella und Nasion nötig.

Das Identifizieren der Positionierungspunkte und die damit verbundene Ausrichtung des Schädelmodells sind Grundlage jeder Auswertung. MAXILIM[®] generiert anschließend ein virtuelles laterales und frontales Kephalogramm, wobei vor allem Ersteres für die korrekte Positionierung der röntgenologischen Punkte Articulare und Menton nötig ist. In der sich daran anschließenden Analyse stehen dem Untersucher drei Möglichkeiten zur Verfügung, einen gesuchten Punkt zu finden. Die erste Möglichkeit ist das Auffinden mittels des lateralen oder frontalen Kephalogramms. Als zweite Möglichkeit können Punkte direkt auf dem dreidimensionalen Modell gesetzt werden. Die dritte Möglichkeit ist die freie Positionierung im untersuchten Volumen. Hierbei ist die Identifikation schwer zu beurteilender Punkte wie etwa Spina nasalis posterior zweifelsfrei möglich. Mit Hilfe von Schnittbildern in allen drei Raumrichtungen ist das freie Navigieren durch das gesamte Untersuchungsvolumen sowie das Auffinden aller relevanten anatomischen Strukturen möglich. Die Schnitte haben eine rechnerische Schichtstärke von 0,289mm. Diese Methode findet neben der Bestimmung der Spina nasalis posterior vor allem Anwendung beim Auffinden der Wurzelspitzen und Schneidekanten der Ober- und Unterkieferincisiven.

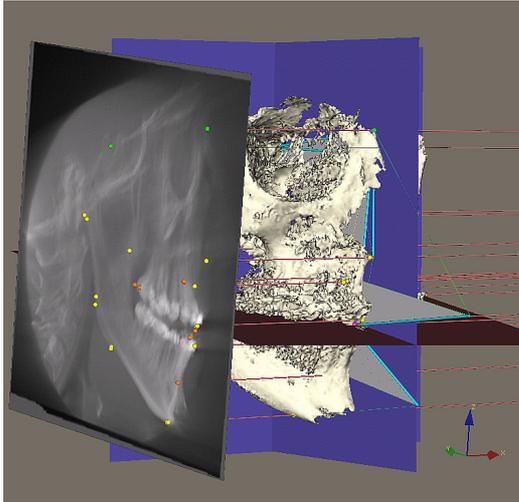


Abbildung 3.6a

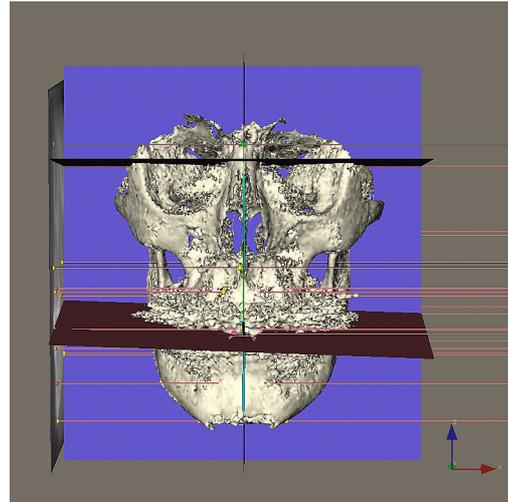


Abbildung 3.6b

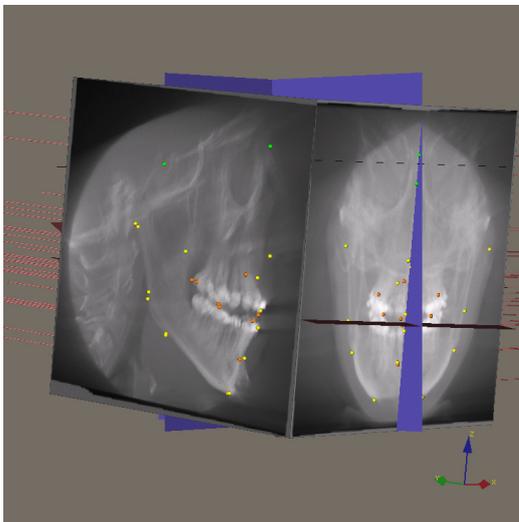


Abbildung 3.6c

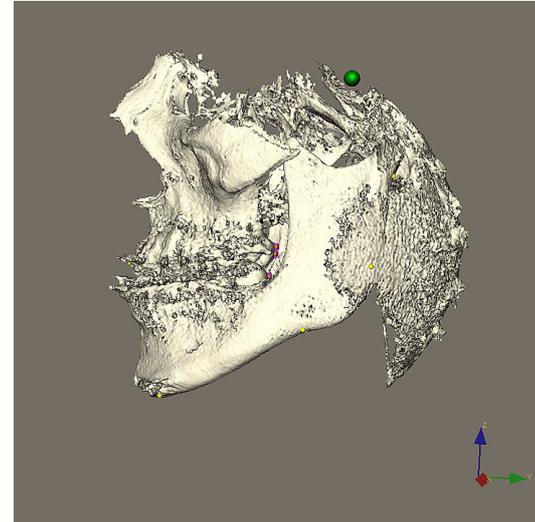


Abbildung 3.6d

Abbildung 3.6a zeigt ein rechtsseitiges virtuelles laterales Cephalogramm sowie das 3D-Modell und die zugehörige Referenzebenen. Auf Abbildung 3.6b ist derselbe Fall in der Frontalansicht zu sehen. Ein frontales und laterales Cephalogramm sowie die markierten Landmarken zeigt Abbildung 3.6c. Abbildung 3.6d zeigt das 3D-Modell des Gesichtsschädels mit den gesetzten Landmarken in der Lateralansicht. Auf den Abbildungen ist eine unvollständig dargestellte Kinnregion zu erkennen, die aus einem zu geringen Untersuchungsvolumen resultiert.

3.7. Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der Daten wurde von der studentischen Statistikberatung des Lehrstuhls für Statistik der Universität Würzburg unterstützt. Die Analyse erfolgte mit STATISTICA® (Version 9.0).

Da die Stichprobenanzahl bei allen Messungen ≥ 30 war, kann auf Grundlage des zentralen Grenzwertsatzes auf die Forderung nach exakter Normalverteilung verzichtet werden (*Genschel, Becker 2005*).

Das arithmetische Mittel, der Median, die Standardabweichung und die Varianz wurden als wichtigste statistische Kennzahlen bestimmt.

Zum Vergleich der mittleren Differenzen zwischen CB-CT und FRS kam der Einstichproben-T-Test zur Anwendung. Die Varianzen wurden mittels des F-Tests auf signifikante Unterschiede hin überprüft.

Folgende Signifikanzniveaus kommen zur Anwendung:

- $p \leq 0,001$ = höchst signifikant (***)
- $p \leq 0,01$ = hoch signifikant (**)
- $p \leq 0,05$ = signifikant (*)
- $p > 0,05$ = nicht signifikant

4. Ergebnisse

4.1. Prüfung der Methode – FRS

4.1.1. SNA

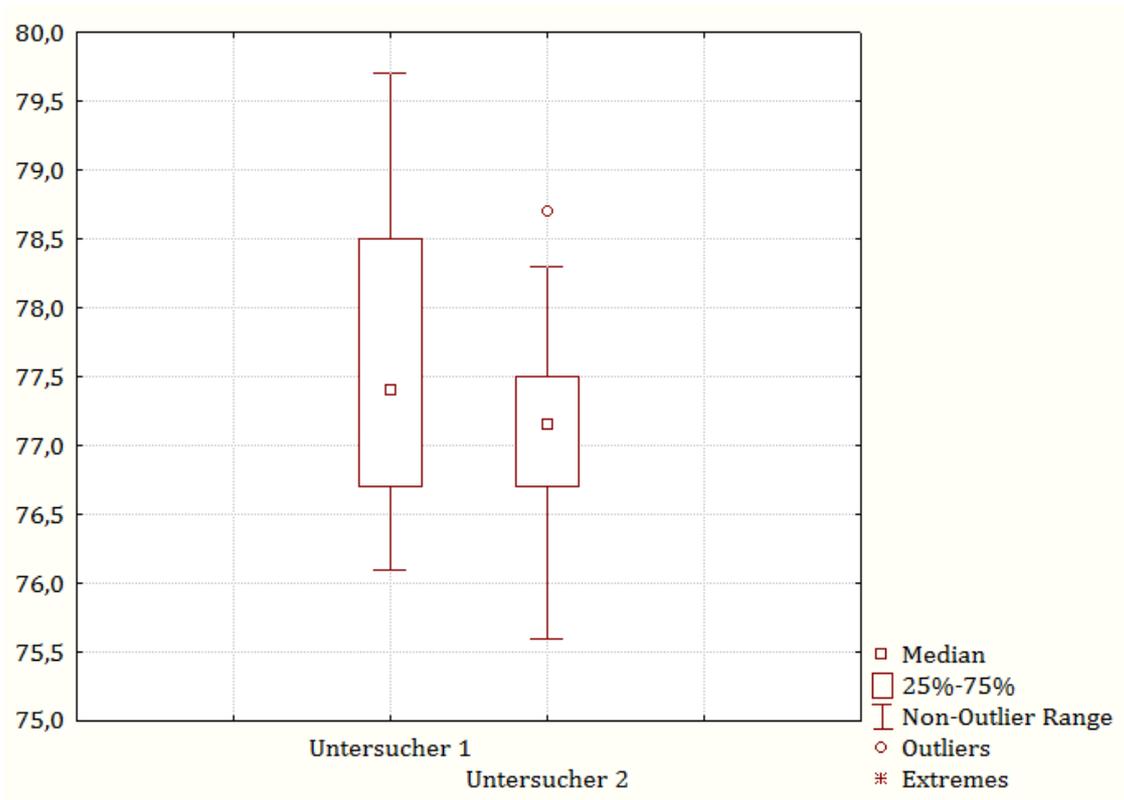


Abbildung 4.1 Boxplot und Whisker für SNA

Bei der statistischen Auswertung der Messung des SNA-Winkels zeigt sich bei Untersucher 1 ein Median von $77,57^\circ$ und ein Mittelwert von $77,40^\circ$ (SD: 1,09). Für Untersucher 2 ergibt sich ein Median von $77,15^\circ$ sowie ein Mittelwert von $77,13$ (SD: 0,69). Bei Untersucher 2 liegen also Mittelwert und Median enger zusammen, außerdem ist die Standardabweichung geringer als bei Untersucher 1. Allerdings findet sich bei Untersucher 2 ein so genannter „milder Ausreißer“, also ein Messwert der außerhalb des Whiskers aber noch innerhalb des 1,5- bis 3-fachen Interquartilsabstands, liegt. Weiterhin ist ersichtlich, dass die Whisker bei Untersucher 1 asymmetrisch sind, was Aufschluss über eine schiefe Verteilung der Werte gibt. Bei der Auswertung von Untersucher 2 zeigt sich ein kleinerer Wertebereich in dem sich 50% der mittleren Daten befinden, als bei Untersucher 1.

Der Boxplot mit Whiskern illustriert gemeinsam mit den Standardabweichungen und den dazugehörigen Mittelwerten, dass die Messungen der beiden Untersucher sich in keinem klinisch relevanten Ausmaß von einander unterscheiden.

4.1.2. 1-SN

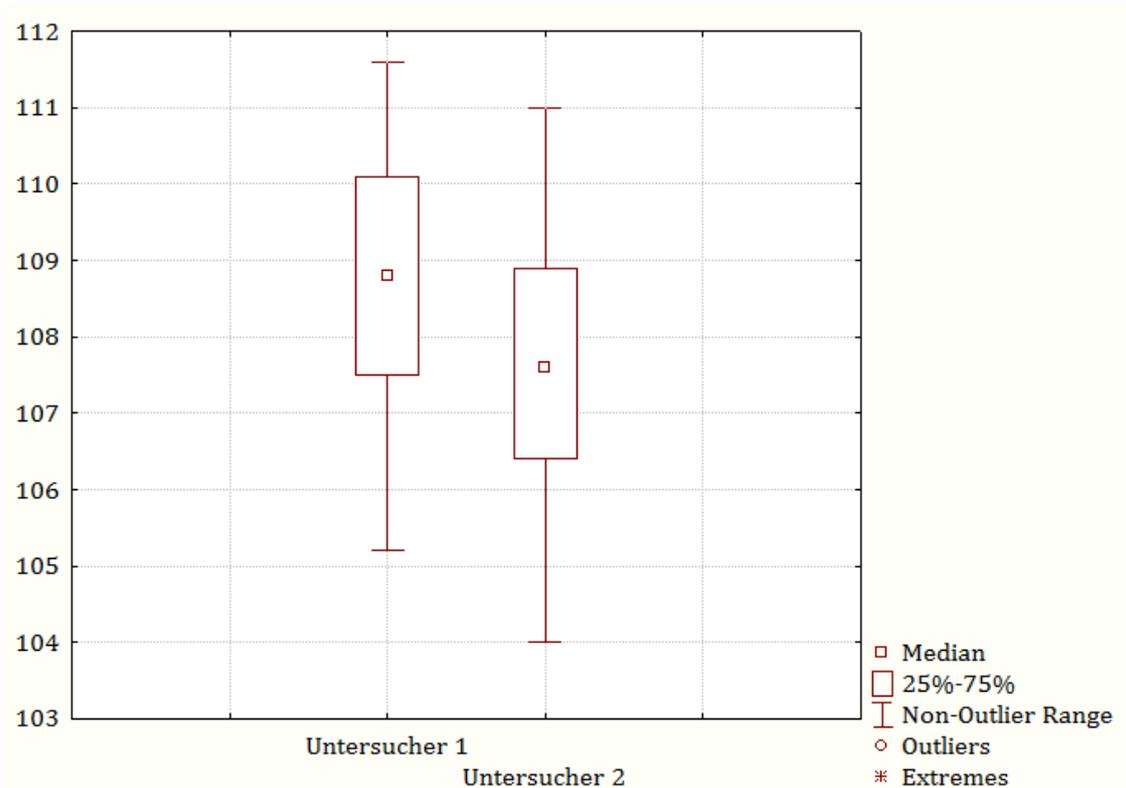


Abbildung 4.2 Boxplot und Whisker für 1-SN

Bei der Auswertung der Messung der Neigung der Oberkiefer-Incisiven zeigt sich für Untersucher 1 ein Median von $108,8^\circ$ sowie ein Mittelwert von $108,54^\circ$ (SD: 1,79). Die Messungen von Untersucher 2 zeigen einen Median von $107,6^\circ$ und einen Mittelwert von $107,46^\circ$ (SD: 1,96). Bei beiden Untersuchern liegt der Median in der Mitte der Box. Die Grafik zeigt für beide Untersucher eine symmetrische Anordnung der Whisker. Die Boxen beider Untersucher überlappen sich.

Auch hier illustriert die Abbildung unter Beachtung der Standardabweichungen und Mittelwerte, dass die Messungen der beiden Untersucher sich nicht in klinisch bedeutsamem Maß von einander unterscheiden.

4.1.3. 1-SpP

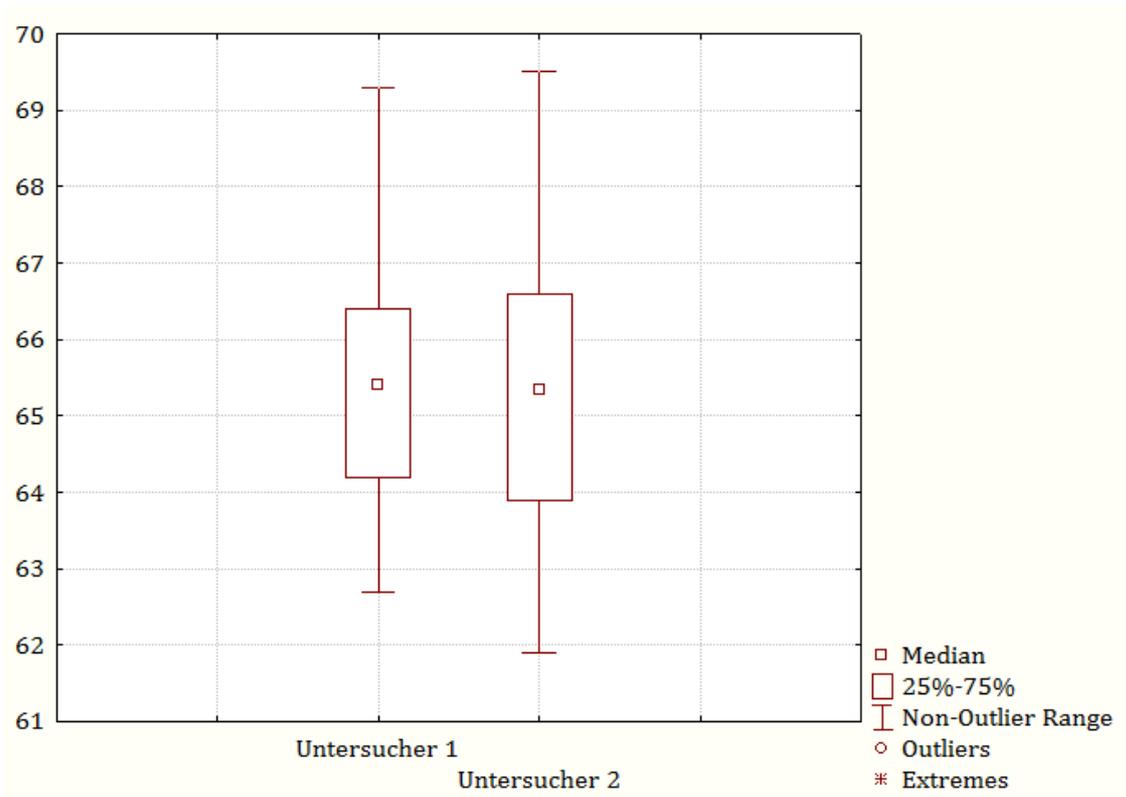


Abbildung 4.3 Boxplot und Whisker für 1-SpP

Der Median für Untersucher 1 liegt bei $65,4^\circ$. Der Mittelwert liegt bei $65,56^\circ$ (SD: 1,72). Bei Untersucher 2 liegt der Median bei $65,35^\circ$ und der Mittelwert bei $65,34^\circ$ (SD: 1,99). Der Median ist bei beiden Untersuchern in der Mitte der Box zu finden. Die verhältnismäßig große Standardabweichung der Messwerte wird durch die weite Spanne der Boxen und Whisker illustriert. Die Whisker von Untersucher 1 sind im Unterschied zu Untersucher 2 leicht asymmetrisch angeordnet. Die Boxen der beiden Untersuchern überlappen sich.

Die Abbildung veranschaulicht, mit Beachtung der Mittelwerte und Standardabweichungen, dass beim Vergleich der Messungen von Untersucher 1 und Untersucher 2 keine klinisch erheblichen Unterschiede zu verzeichnen sind.

4.1.4. SN-SpP

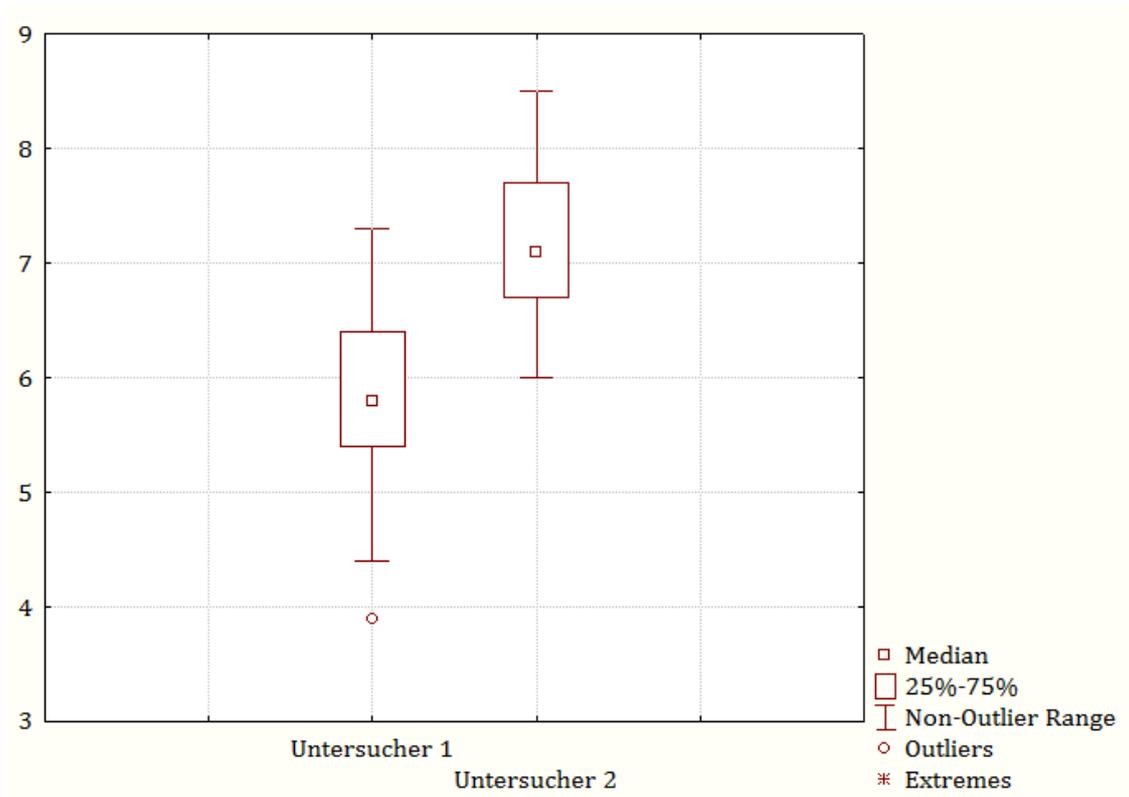
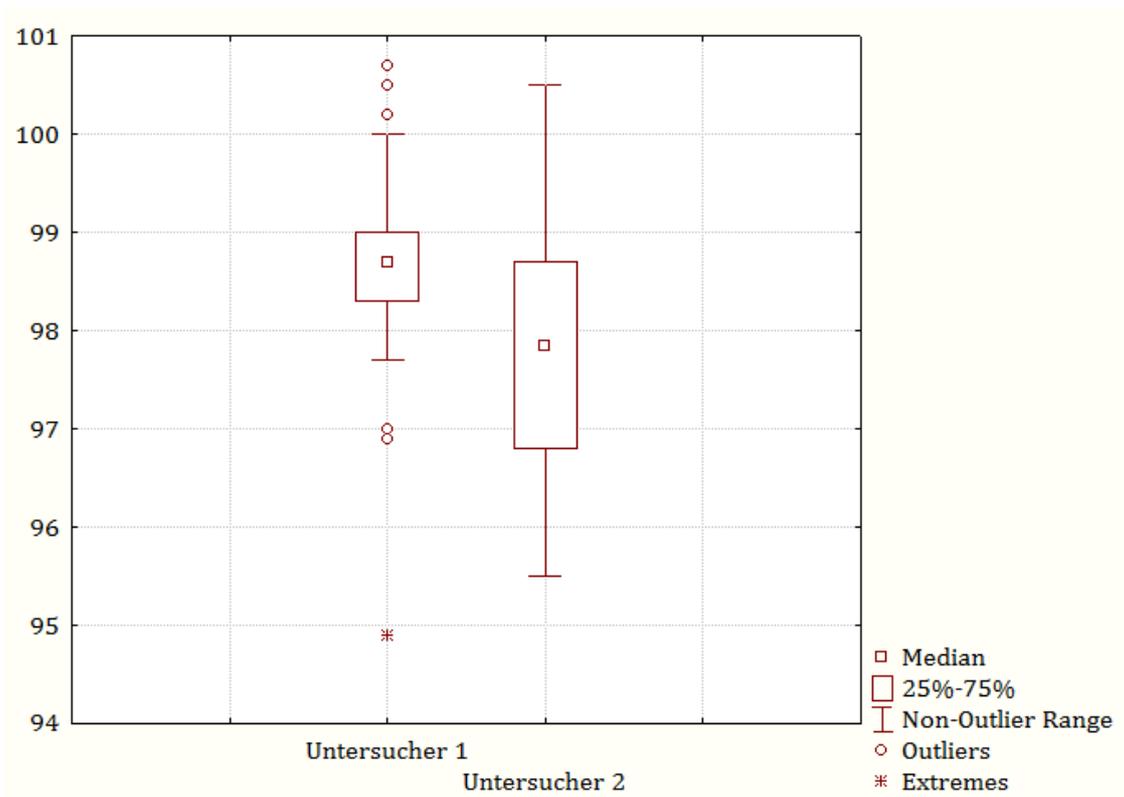


Abbildung 4.4 Boxplot und Whisker für SN-SpP

Der Zentralwert für Untersucher 1 liegt bei $5,8^\circ$. Der Mittelwert liegt bei $5,9^\circ$ (SD: 0,88). Für Untersucher 2 ergibt sich entsprechend ein Median von $7,1^\circ$ und Mittelwert von $7,2^\circ$ (SD: 0,67). Bei beiden Prüfern liegt der Median in der Mitte der Box und die Whisker sind symmetrisch angeordnet. Bei Untersucher 1 findet sich ein milder Ausreißer. Im Gegensatz zu allen anderen FRS-Messungen überlappen sich die Boxen der beiden Untersucher nicht.

Die Grafik zeigt bei Beachtung der Mittelwerte und Standardabweichungen, dass die Messungen der beiden Untersucher sich im Mittel um $1,3$ Grad von einander unterscheiden.

4.1.5. $\bar{1}$ -MeGoAbbildung 4.5 Boxplot und Whisker für $\bar{1}$ -MeGo

Bei der statistischen Auswertung der Messung der Neigung der Unterkiefer-Incisiven zeigen sich für beide Untersucher deutlichere Unterschiede als bei den anderen Messungen. Der Median der Messungen von Untersucher 1 liegt bei $98,7^\circ$ und der Mittelwert bei $98,66^\circ$ (SD: 1,16). Für Untersucher 2 ergibt sich ein Median von $97,85^\circ$ sowie ein Mittelwert von $97,79^\circ$ (SD: 1,21). Bei Untersucher 1 finden sich insgesamt sechs Ausreißer, von denen fünf innerhalb des 3-fachen Interquartilsabstandes liegen. Ein Messwert liegt sogar außerhalb des 3-fachen Interquartilsabstandes und wird somit als extremer Ausreißer bezeichnet. Untersucher 2 hingegen misst ohne Ausreißer, aber innerhalb einer größeren Spanne – was sich in deutlich größeren Interquartilsabständen widerspiegelt. Dennoch unterscheiden sich sowohl Mittelwert als auch Median der beiden Untersucher nur um weniger als 1° .

Der Boxplot mit Whiskern illustriert auf Grundlage der genannten Mittelwerte und Standardabweichungen dennoch, dass die Messungen der beiden Untersucher sich nicht klinisch relevant von einander unterscheiden.

4.1.6. ArGoMe

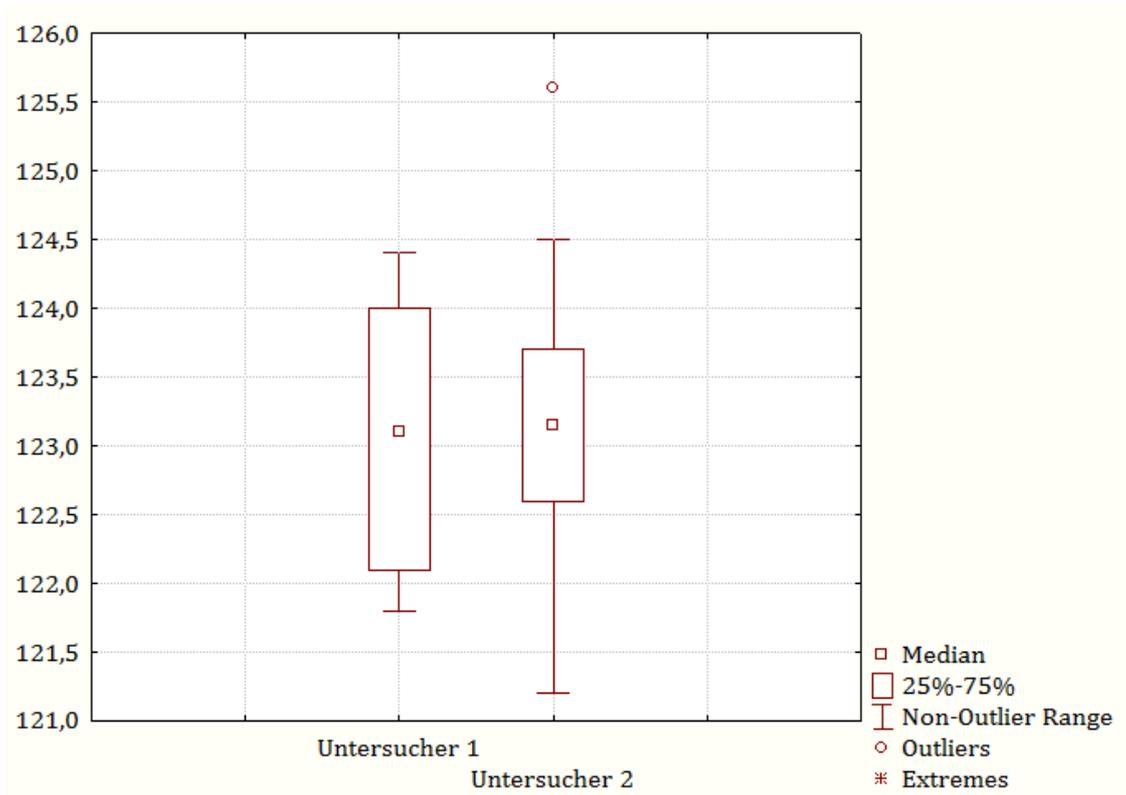


Abbildung 4.6 Boxplot und Whisker für ArGoMe

Die statistische Auswertung der Messung des Kieferwinkels zeigt bei Untersucher 1 ein Median von $123,1^\circ$ und ein Mittelwert von $123,04^\circ$ (SD: 0,89). Die Messungen von Untersucher 2 zeigen einen Median von $123,15^\circ$ und einen Mittelwert von $123,2$ (SD: 0,89). Bei beiden Untersuchern liegt der Median in der Mitte der Box. Die Grafik zeigt für beide Untersucher eine symmetrische Anordnung der Whisker. Für Untersucher 2 findet sich ein milder Ausreißer.

Auch hier illustriert die Abbildung zusammen mit den Mittelwerten und Standardabweichungen, dass die Messungen der beiden Untersucher sich nicht in klinisch relevantem Ausmaß von einander unterscheiden.

4.1.7. NSAr

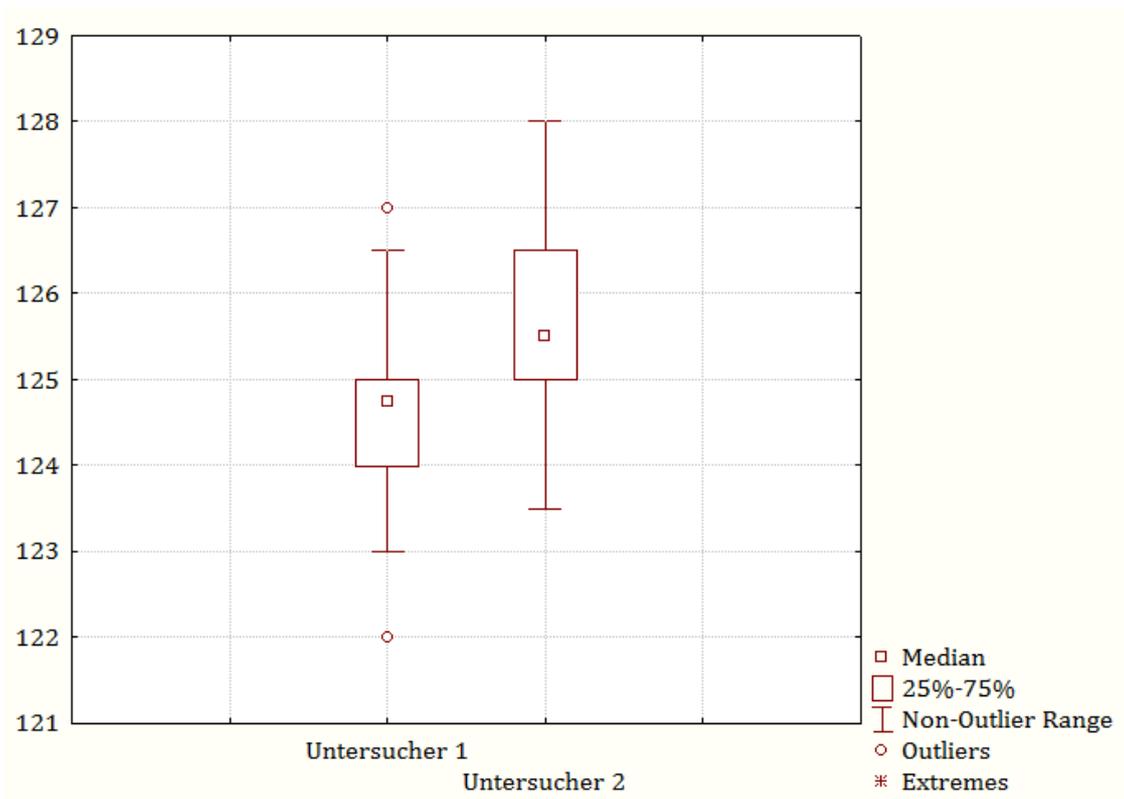


Abbildung 4.7 Boxplot und Whisker für NSAr

Für Untersucher 1 liegt der Zentralwert bei 124,75°. Der Mittelwert liegt bei 124,7° (SD: 1,17). Bei Untersucher 2 liegt der Median bei 125,5° und der Mittelwert bei 125,67° (SD: 1,12). Der Median liegt bei beiden Untersuchern nicht der Mitte der Box, was auf eine schiefe Verteilung der Werte hindeutet. Die Whisker von Untersucher 1 sind im Unterschied zu Untersucher 2 leicht asymmetrisch angeordnet. Die Boxen für beide Untersucher überschneiden sich nur knapp. Bei Untersucher 1 finden sich zwei milde Ausreißer, jeweils im oberen und unteren Bereich der Messwerte.

Wie die Darstellung unter Berücksichtigung der Standardabweichungen und Mittelwerte zeigt, ist bei der unabhängigen Messung von Untersucher 1 und 2 kein klinisch bedeutsamer Unterschied zu erwarten.

4.1.8. S-N

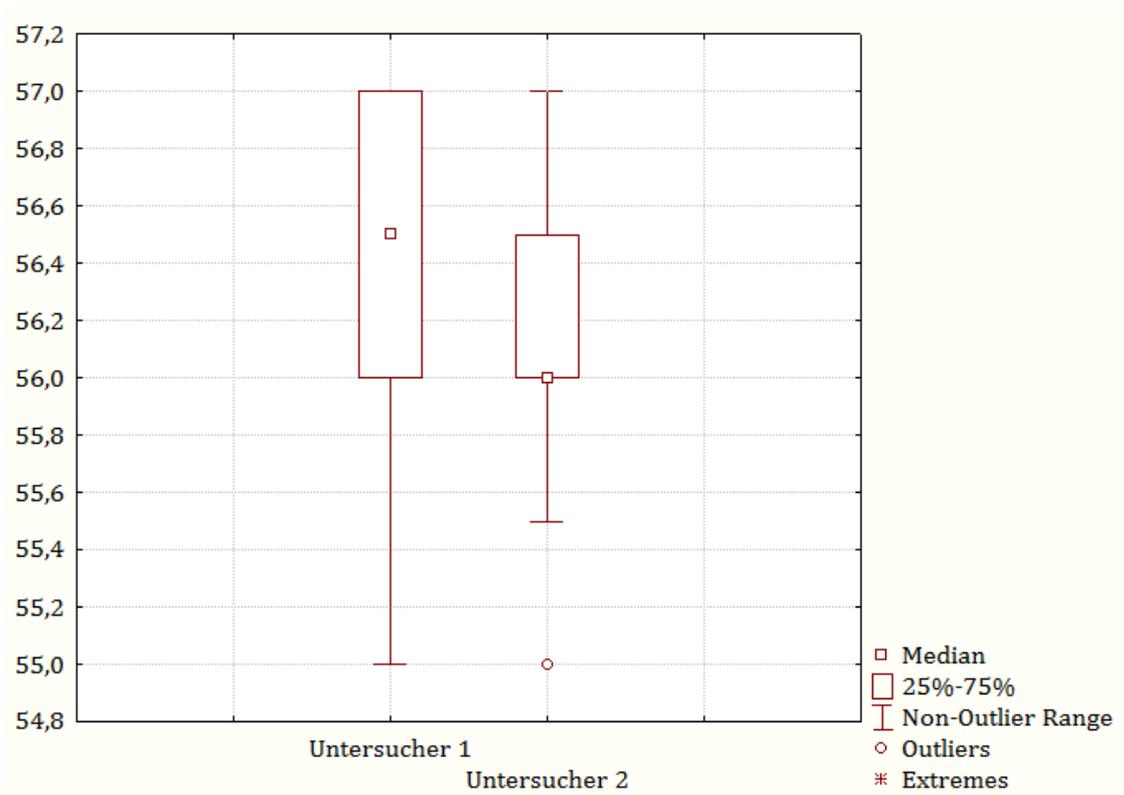


Abbildung 4.8 Boxplot und Whisker für S-N

Bei der Auswertung der Messung der Strecke Sella - Nasion zeigt sich erneut eine asymmetrische Verteilung der Messwerte für Untersucher 1 und 2. Beim ersten Untersucher liegt der Median in der Mitte der Box – es gibt allerdings keinen oberen Whisker. Dies bedeutet, dass der Messwert von 57 mm, welcher die Box nach oben hin begrenzt nicht nur das Ende des oberen Interquartilsabstandes ist, sondern auch den maximal gemessenen Wert darstellt. Es ergibt sich entsprechend für Untersucher 1 ein Median von 56,5 mm sowie ein Mittelwert von 56,45 mm (SD: 0,51). Die Messungen von Untersucher 2 zeigen eine gänzlich andere Verteilung der Werte. Hier liegt der Median ganz am Rande der Box, die Whisker sind symmetrisch. Die Messwerte sind hier schief in Richtung des minimalen Wertes von 55 mm verteilt. Der Median der Messungen von Untersucher 2 liegt bei 56 mm, bei einem Mittelwert von 56,18 mm (SD: 0,62). Die Spannweite beider Untersucher ist identisch und hat ihr Maximum bei 57 mm und das Minimum entsprechend bei 55 mm.

Auf Grundlage der angeführten Mittelwerte und Standardabweichungen illustriert das Schema, dass die Messungen der beiden Untersucher sich nicht in klinisch relevantem Umfang von einander unterscheiden. Insbesondere unter Berücksichtigung der geringen Differenzen zwischen den Zentral- und Mittelwerten beider Untersucher wird der klinisch nicht relevante Unterschied evident.

4.1.9. N-Spa

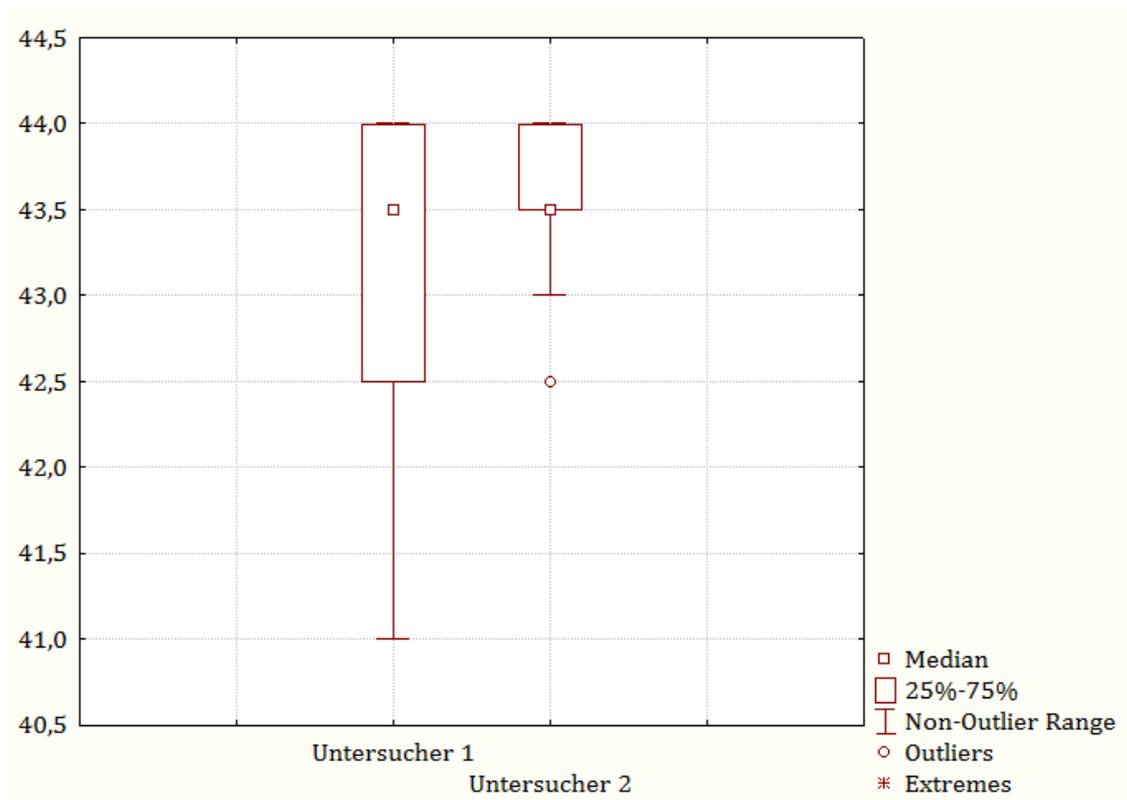


Abbildung 4.9 Boxplot und Whisker für N-Spa

Die statistische Auswertung der Messung der Strecke Spina nasalis anterior - Nasion zeigt auch eine asymmetrische Verteilung der Messwerte für Untersucher 1 und 2. Der Boxplot für Untersucher 1 zeigt einen Median, der nicht in der Mitte der Box liegt. Weiterhin findet sich kein oberer Whisker, was auch hier bedeutet, dass der Messwert von 44 mm, welcher die Box nach oben hin begrenzt nicht nur das Ende des oberen Interquartilsabstandes ist, sondern auch den maximale gemessenen Wert darstellt. Der Median für Untersucher 1 liegt bei 43,5 mm, der Mittelwert bei 43,26 mm (SD: 0,85). Die Messungen von Untersucher 2

zeigen eine andere Verteilung der Werte. Hier liegt der Median auf dem unteren Rand der Box, ein oberer Whisker fehlt ebenfalls. Die Messwerte sind schief in Richtung des minimalen Wertes von 42,5 mm verteilt. Der Messwert von 42,5 mm stellt bei Gegenüberstellung mit den anderen Messwerten und der sich daraus ergebenden Verteilung der Werte von Untersucher 2 einen milden Ausreißer dar. Der Median der Messungen von Untersucher 2 liegt bei 43,5 mm. Es ergibt sich ein Mittelwert von 43,53 mm (SD: 0,41). Die Spannweite beider Untersucher unterscheidet sich im unteren Bereich um 1,5 Millimeter. Weiterhin auffällig ist der große Unterschied der Boxenausdehnung, welcher eine deutlich engere Verteilung der Werte bei Untersucher 2 zeigt. Dies zeigt sich auch in der vergleichsweise niedrigen Standardabweichung.

Ungeachtet der angeführten Einschränkungen zeigt die Grafik mit Berücksichtigung der Mittelwerte und Standardabweichungen deutlich, dass die Messungen der beiden Untersucher sich nicht in relevanter Ausprägung von einander unterscheiden. Der Median beider Untersucher ist gleich, der Mittelwert unterscheidet sich nur um 0,27 mm.

4.1.10. Spa-Spp

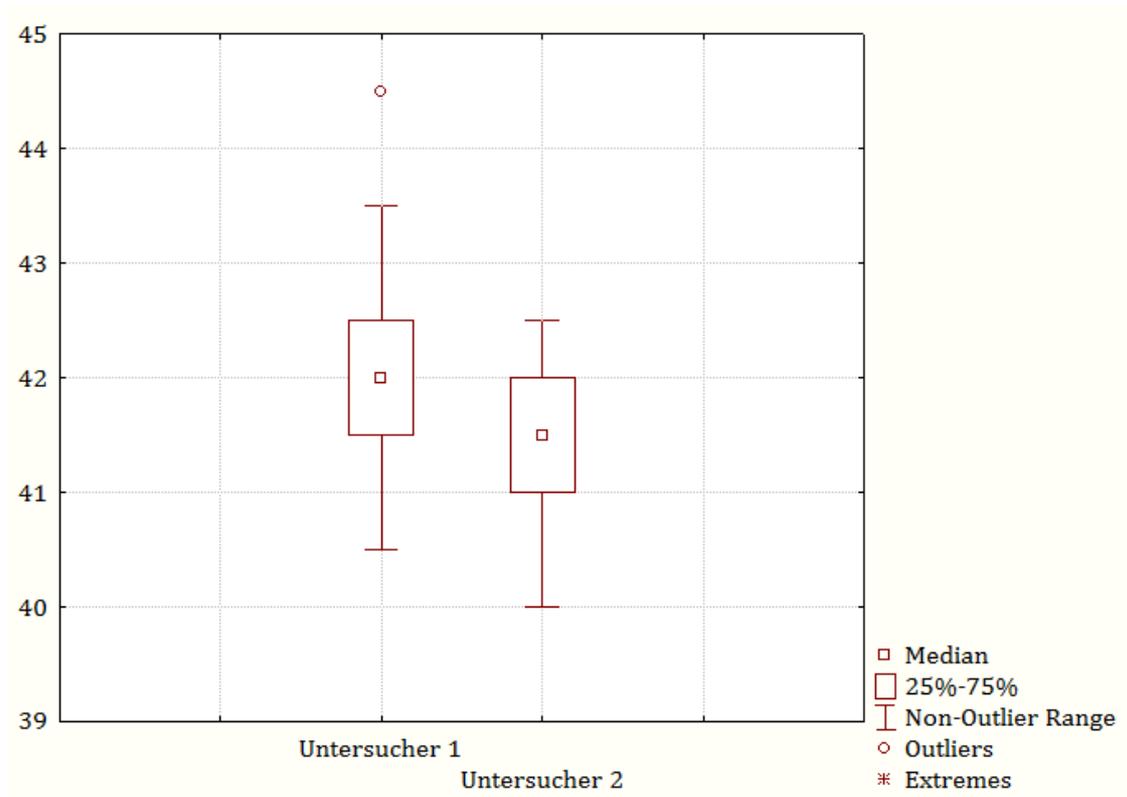
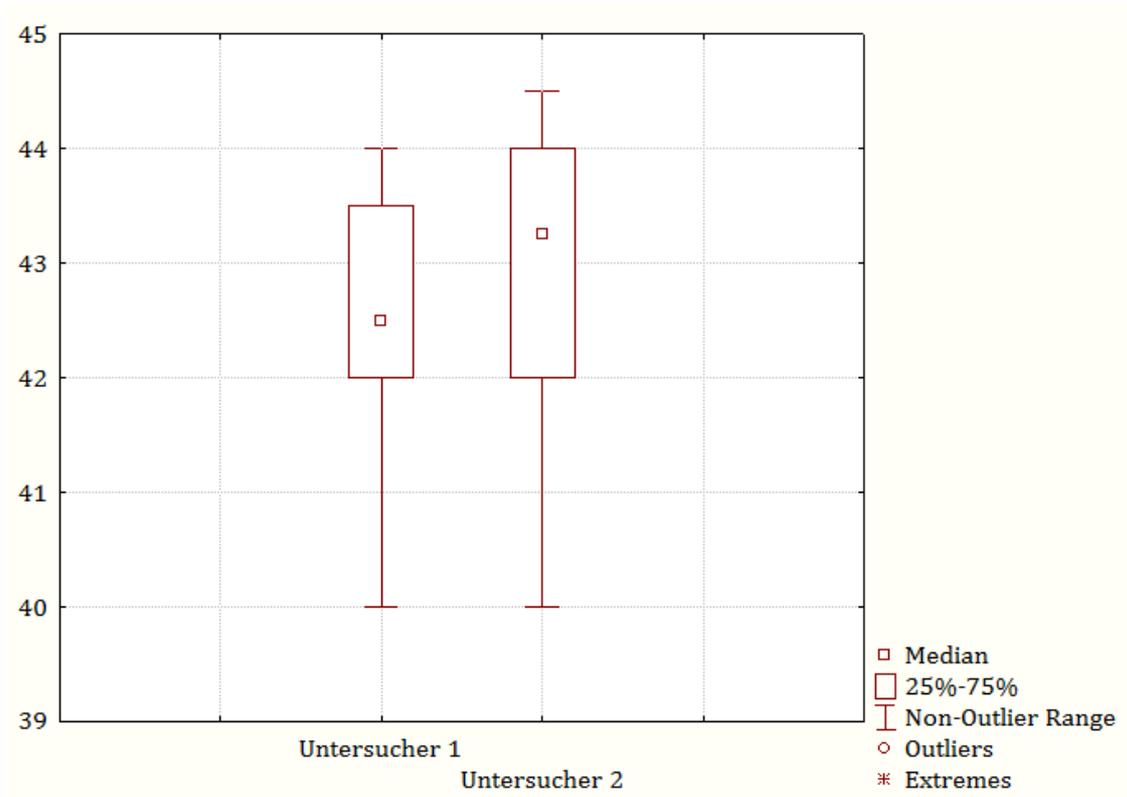


Abbildung 4.10 Boxplot und Whisker für Spa-Spp

Bei der Auswertung der Messung der Strecke Spina nasalis anterior – Spina nasalis posterior zeigt sich ein sehr gleichmäßige Verteilung der Werte für beide Untersucher. So ist der Median für Untersucher 1 bei 42 mm, der Mittelwert liegt bei 42,07 mm (SD: 0,82). Die Messungen von Untersucher 2 zeigten einen Median von 41,5 mm und einen Mittelwert von 41,43 mm (SD: 0,64). Bei beiden Untersuchern liegt der Median in der Mitte der Box. Die Whisker von Untersucher 2 sind leicht asymmetrisch. Bei Untersucher 1 findet sich ein milder Ausreißer im oberen Bereich der Darstellung. Die Boxen beider Untersucher überlappen sich. Außerdem ist besonders die vergleichsweise geringe Standardabweichung der Messungen bei beiden Untersuchern hervorzuheben.

Auch hier illustriert die Abbildung zusammen mit den Mittelwerten und Standardabweichungen, dass die Messungen der beiden Untersucher sich nicht klinisch relevant von einander unterscheiden, da sich sogar die Boxen überlappen.

4.1.11. P_1 -MeAbbildung 4.11 Boxplot und Whisker für P_1 -Me

Bei der Analyse der Messung der Unterkiefer-Länge zeigen sich sowohl für Untersucher 1 als auch für Untersucher 2 asymmetrische Whisker und Zentralwerte, die nicht genau in der Mitte der Boxen liegen. Es ergibt sich entsprechend für Untersucher 1 ein Median von 42,5 mm sowie ein Mittelwert von 42,58 mm (SD: 1,08). Die Messungen von Untersucher 2 zeigten einen Median von 43,25 mm und einen Mittelwert von 42,82 mm (SD: 1,35). Für beide Untersucher zeigen sich deutlich nach unten verlängerte Whisker, wobei beide bei 40 mm einen gemeinsamen Endpunkt finden.

Das Schema illustriert unter Berücksichtigung der Mittelwerte und Standardabweichungen, dass die Messungen der beiden Untersucher sich nicht klinisch relevant von einander unterscheiden, da sich sogar die Boxen überlappen.

4.2. Prüfung der Methode – CB-CT

4.2.1. SNA*

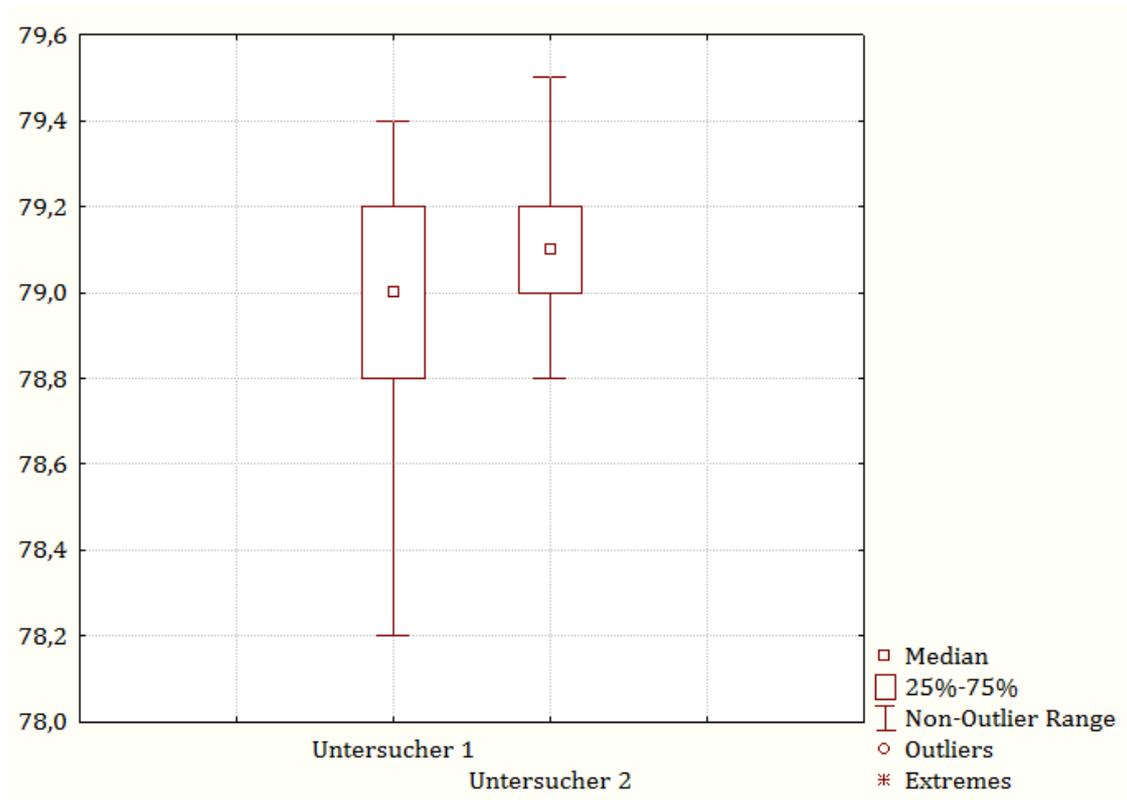


Abbildung 4.12 Boxplot und Whisker für SNA*

Die Analyse der Messung des SNA-Winkels durch Untersucher 1 ergibt einen Median von 79° und einen Mittelwert von $78,94^\circ$ (SD: 0,27). Für Untersucher 2 ergab sich bei der gleichen Messung ein Median von $79,1^\circ$ und ein Mittelwert von $79,11^\circ$ (SD: 0,14). Auffallend ist, dass die Mittelwerte beider Untersucher, bei deutlich kleinerer Standardabweichung, weniger differieren, wie bei einer vergleichbaren FRS-Messung desselben Parameters. Der Median liegt bei beiden Prüfern in der Mitte der Box, die Whisker sind leicht asymmetrisch. Auffällig ist zudem der Größenunterschied der beiden Boxen, was für eine engere Verteilung der Messwerte um den Median bei Untersucher 2 spricht. Auch die Whisker der beiden Untersucher unterscheiden sich hinsichtlich der Ausdehnung. Bei Untersucher 2 fällt in diesem Zusammenhang eine sehr kleine Spannweite der Messungen auf. Beide Boxen überlappen sich.

Aus der Darstellung und den genannten statistischen Parametern wird deutlich, dass die Messung des SNA-Winkels durch beide Untersucher keine relevanten Unterschiede erwarten lässt.

4.2.2. 1-SN*

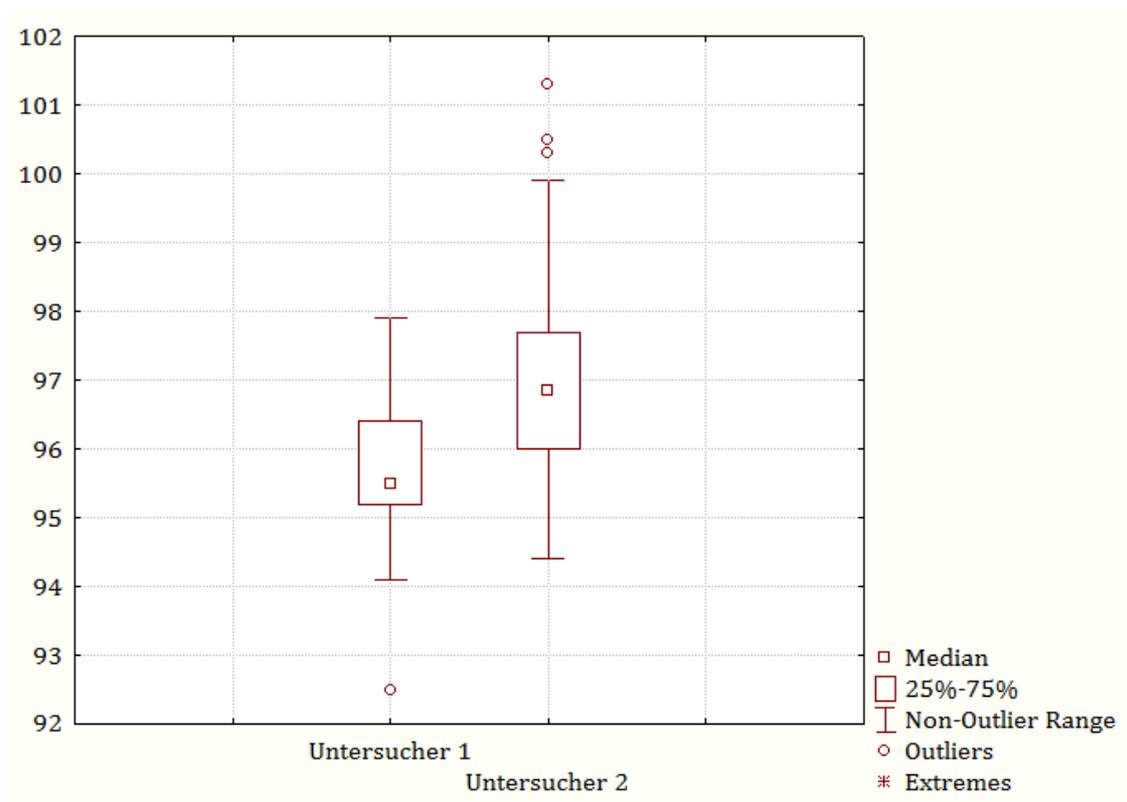


Abbildung 4.13 Boxplot und Whisker für 1-SN*

Die statistische Analyse der Messung der Neigung der Oberkiefer-Incisiven zeigt Unterschiede zwischen beiden Untersuchern. So findet sich etwa bei Untersucher 1 ein milder Ausreißer im unteren Bereich der Messwerte, wohingegen bei Untersucher 2 drei milde Ausreißer über der Begrenzung durch den oberen Whisker deutlich zu erkennen sind. Der Zentralwert für Untersucher 1 liegt bei 95,5°, der Mittelwert bei 95,68° (SD: 1,13). Für Untersucher 2 ergibt sich entsprechend ein Median von 96,85° und ein Mittelwert von 97,2° (SD: 1,73). Für Untersucher 1 zeigt sich, dass der Median nicht in der Mitte der Box liegt und die Whisker leicht asymmetrisch sind. Bei Untersucher 2 finden sich annähernd symmetrische Whisker und ein in der Mitte der Box liegender Median -

symmetrischen Whisker eine gleichmäßige Verteilung der Messwerte erkennen. Bei Untersucher 2 liegt der Median tendenziell im oberen Drittel der Box.

Das Schema illustriert, dass keine klinisch relevanten Differenzen bei der Messung durch Untersucher 1 und 2 zu erwarten sind.

4.2.4. SN-SpP*

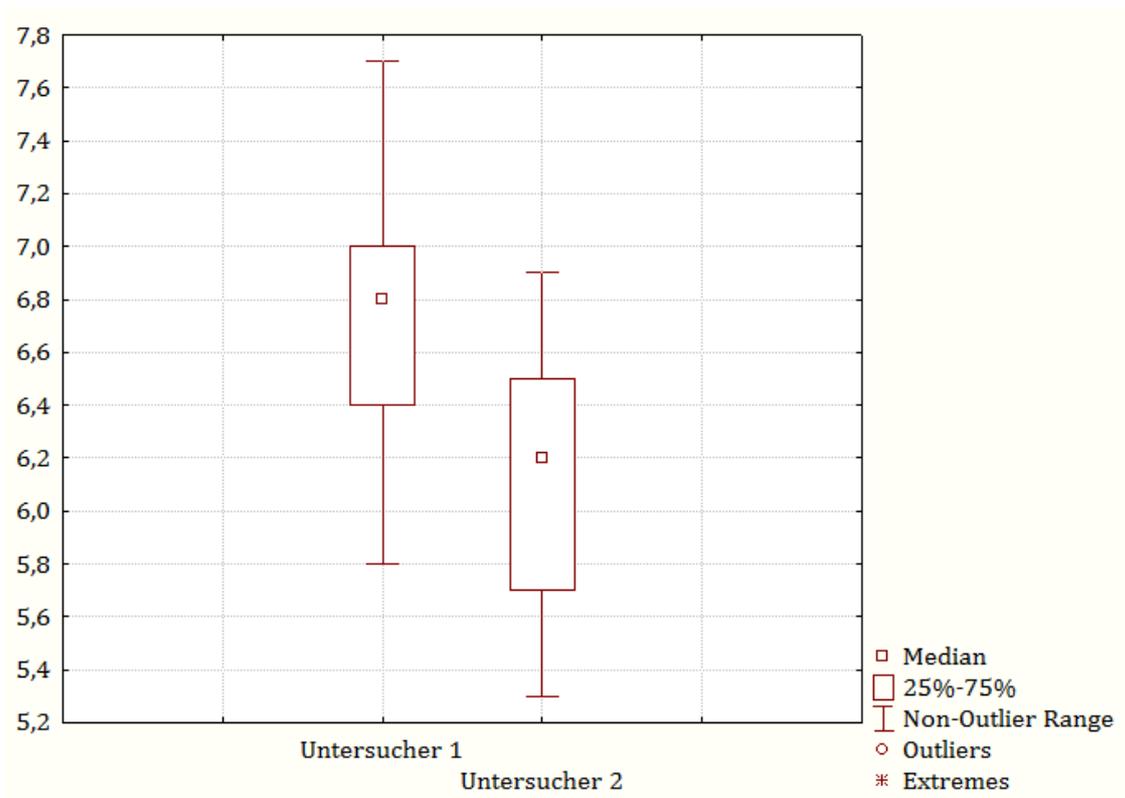


Abbildung 4.15 Boxplot und Whisker für SN-SpP*

Bei der Auswertung der Messung der Oberkiefer-Neigung zeigte sich eine für beide Untersucher ähnliche Verteilung der Messwerte. So ist der Median für Untersucher 1 bei 6,8°, der Mittelwert liegt bei 6,76° (SD: 0,48). Die Messungen von Untersucher 2 zeigten einen Median von 6,2° und einen Mittelwert von 6,09° (SD: 0,49). Bei beiden Untersuchern liegt der Median im oberen Drittel der Box. Die Whisker beider Untersucher sind annähernd symmetrisch, zeigen aber in ihrer Ausdehnung deutliche Unterschiede. Die

Spannweite der Whisker beider Untersucher ist unter klinischen Gesichtspunkten als sehr gering zu werten. Es zeigt sich weiterhin eine Überlappung der Boxen beider Untersucher.

Auch hier illustriert die Abbildung unter Berücksichtigung der Standardabweichungen und Mittelwerte für beide Untersucher, dass die Messungen der beiden Untersucher sich nicht klinisch relevant von einander unterscheiden.

4.2.5. $\bar{1}$ -MeGo*

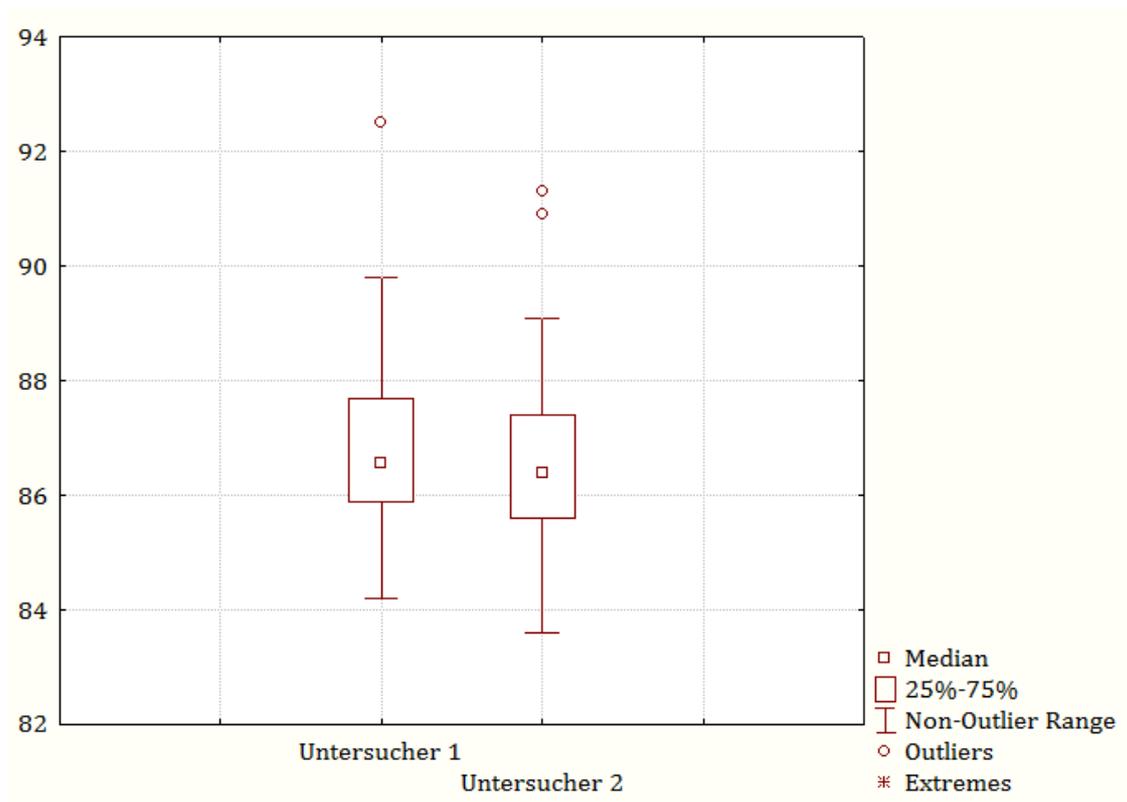


Abbildung 4.16 Boxplot und Whisker für $\bar{1}$ -MeGo

Bei der Auswertung der Messung der Neigung der Unterkiefer-Incisiven zeigte sich eine relativ gleichmäßige Verteilung der Werte für beide Untersucher. So ist der Median für Untersucher 1 bei 86,55° zu finden, der Mittelwert liegt bei 86,93 (SD: 1,6). Die Messungen von Untersucher 2 zeigen einen Median von 86,4° und einen Mittelwert von 86,61° (SD: 1,73). Bei beiden Untersuchern liegt der Median annähernd in der Mitte der Box. Die Whisker beider Untersucher sind fast symmetrisch. Bei Untersucher 1 findet sich ein

milder Ausreißer oberhalb des Whiskers. Auch bei Untersucher 2 kommt es zu insgesamt zwei Ausreißern oberhalb des Whiskers. Der Umstand, dass sich die Mittelwerte nur gering unterscheiden – lediglich eine Differenz von $0,32^\circ$ – wird durch die große Standardabweichung der Mittelwerte und die Ausreißer, die beide Untersucher zeigen, wieder relativiert. Die Boxen beider Untersucher überlappen sich.

Auch hier zeigt die Abbildung unter Berücksichtigung der Mittelwerte und der Standardabweichung, dass die Messungen der beiden Untersucher sich nur in klinisch unerheblicher Weise von einander unterscheiden, da sich sogar die Boxen überlappen.

4.2.6. ArGoMe_R

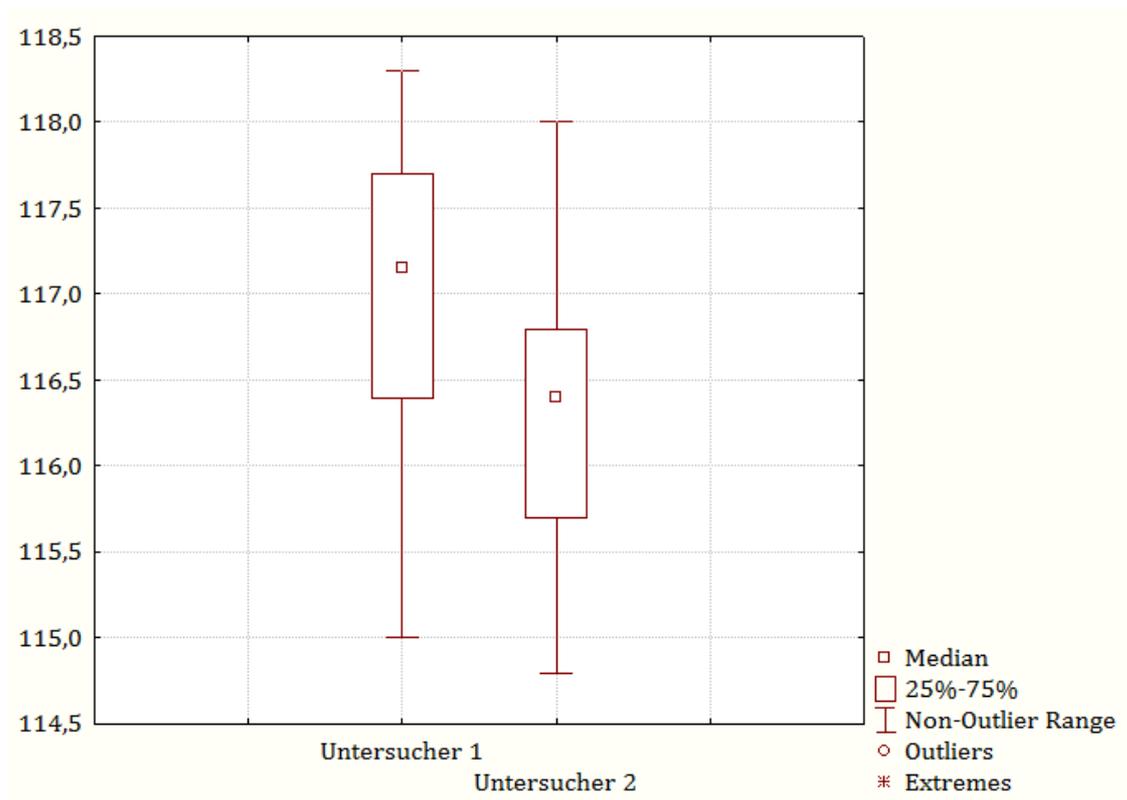
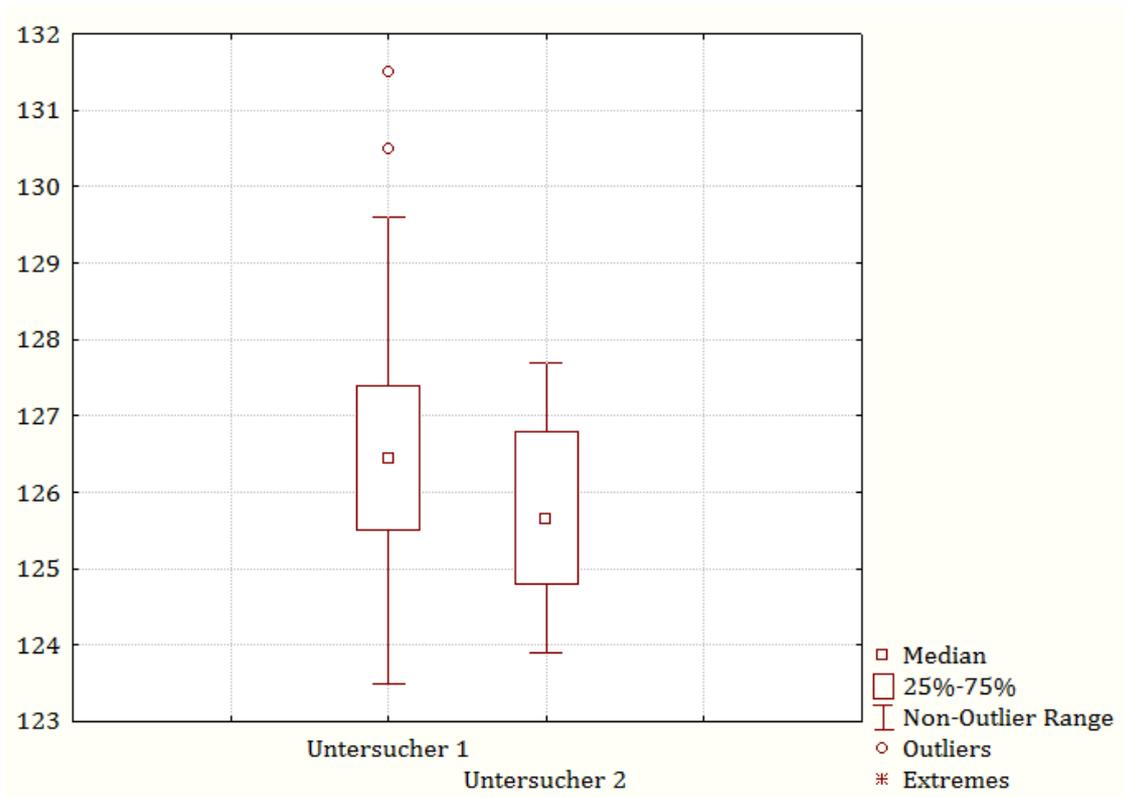


Abbildung 4.17 Boxplot und Whisker für ArGoMe_R

Die statistische Auswertung der Messung des Kieferwinkels auf der rechten Seite zeigt eine für beide Untersucher vergleichbare Verteilung der Messwerte. So findet sich für Untersucher 1 ein Median von $117,15^\circ$ sowie ein Mittelwert von $117,03^\circ$ (SD: 0,84). Bei

Untersucher 2 liegt der Median bei $116,4^\circ$ und der Mittelwert bei $116,29^\circ$ (SD: 0,8). Die Whisker von Untersucher 1 sind asymmetrisch, wohingegen die Verteilung der Werte bei Untersucher 2 einen annähernd symmetrischen Eindruck vermittelt. Auch der Median beider Untersucher liegt nicht in der Mitte der Box, sondern ist nach oben hin verschoben. Die Messung für den Kieferwinkel auf der rechten Seite zeigt, im Unterschied zur vorangegangenen Messung auf der linken Seite, für beide Untersucher ein vergleichbares Bild. Die Whisker zeigen für beide Untersucher eine verhältnismäßig kleine Spannweite.

Die Grafik zeigt klar, dass die Messung durch beide Untersucher mit Bedacht auf die errechneten Mittelwerte und Standardabweichungen zu klinisch nicht relevanten Unterschieden führt.

4.2.7. ArGoMe_LAbbildung 4.18 Boxplot und Whisker für ArGoMe_L

Bei der statistischen Auswertung der Messung des Kieferwinkels auf der linken Seite offenbaren sich geringe Unterschiede zwischen beiden Untersuchern. Der Median der Messungen von Untersucher 1 lag bei 126,45° und der Mittelwert bei 126,72° (SD: 1,78), wohingegen der Median für Untersucher 2 bei 125,65° und der Mittelwert bei 125,82° (SD: 1,21) lag. Die Standardabweichung ist für beide Untersucher deutlich höher als bei der vergleichbaren FRS-Messung des Kieferwinkels und auch die Differenz der Mittelwerte ist höher. Ausschlaggebend für die relativ große Differenz der Mittelwerte sind die beiden milden Ausreißer im oberen Bereich der Darstellung von Untersucher 1. Generell lässt sich feststellen, dass bei Untersucher 2 eine deutlich kleinere Spannweite zu verzeichnen ist. Dennoch unterscheiden sich sowohl Mittelwert als auch Median der beiden Untersucher nur um weniger als 1°.

Der Boxplot mit Whiskern illustriert unter Berücksichtigung der Mittelwerte und Standardabweichungen dennoch, dass die Messungen der beiden Untersucher sich nicht klinisch relevant von einander unterscheiden, da sich sogar die Boxen überlappen.

4.2.8. NSAr_R

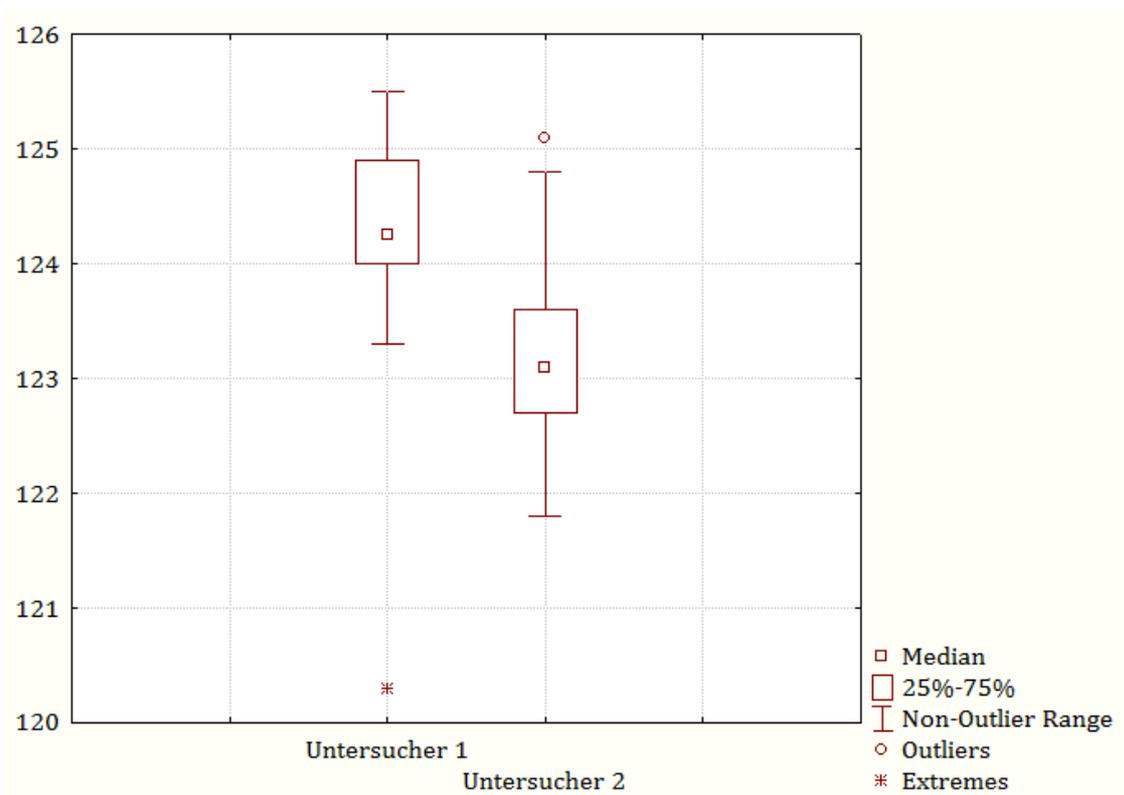


Abbildung 4.19 Boxplot und Whisker für NSAr_R

Die Auswertung der Messung zum Sattelwinkel rechts bringt Unterschiede zwischen beiden Untersuchern hervor. Während bei Untersucher 1 ein extremer Ausreißer, also ein Messwert außerhalb des 3-fachen Interquartilsabstandes, im unteren Bereich der Messreihe zu verzeichnen ist, zeigt sich bei Untersucher 2 ein milder Ausreißer im oberen Messbereich. Der Median liegt bei Untersucher 1 im unteren Drittel der Box, was eine leicht schiefe Verteilung der Werte andeutet. Der Median von Untersucher 2 hingegen zeigt keine Auffälligkeiten. Die Whisker beider Untersucher sind annähernd symmetrisch und von geringer Ausdehnung. Der Median von Untersucher 1 liegt bei 124,25°, der Mittelwert liegt ebenfalls bei 124,25° (SD: 0,97). Für Untersucher 2 ergibt sich ein Median von 123,1°

bei einem Mittelwert von $123,18^\circ$ (SD: 0,77). Auffallend ist, dass sich die Boxen nicht überlappen.

Die Illustration zeigt unter Berücksichtigung der Mittelwerte und Standardabweichungen, dass zwischen beiden Untersuchern eine mittlere Differenz von mehr als einem Grad zu erwarten. Dies überschreitet den angenommenen klinischen Toleranzbereich.

4.2.9. NSAr_L

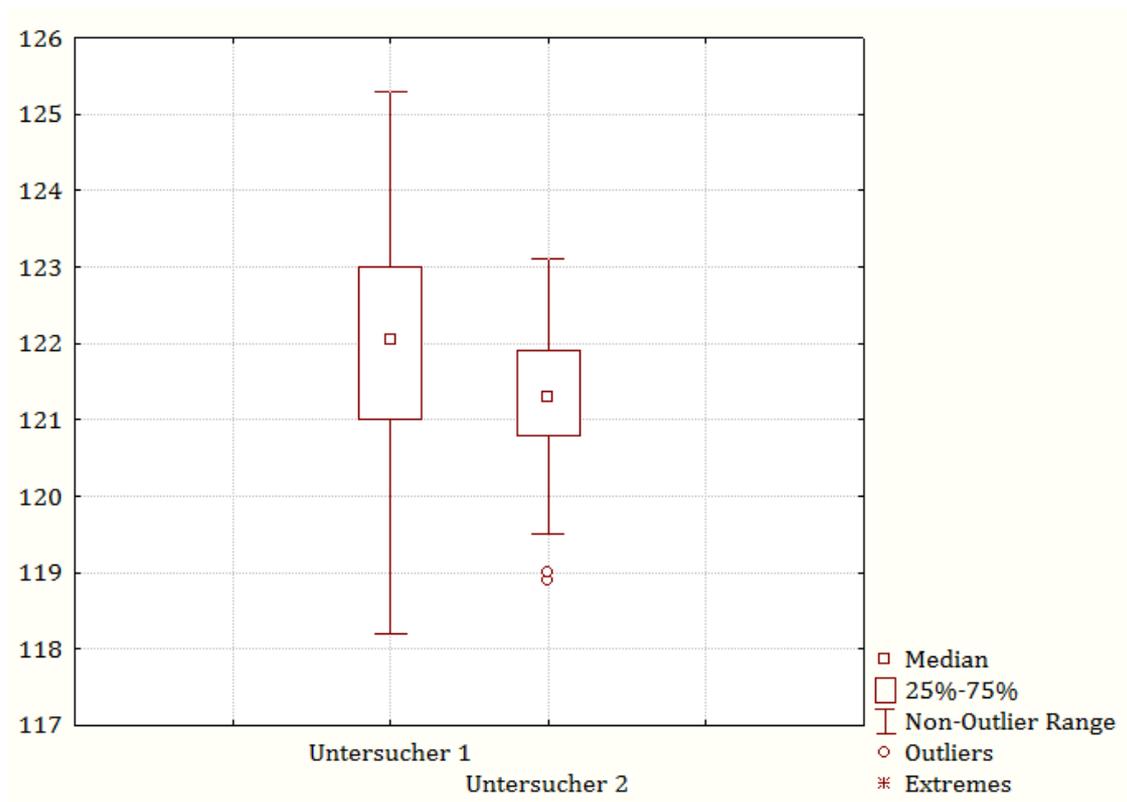


Abbildung 4.20 Boxplot und Whisker für NSAr_L.

Die Auswertung der Messungen zum Sattelwinkel links zeigen für Untersucher 1 einen Median von $122,05^\circ$ und einen Mittelwert von $122,08^\circ$ (SD: 1,57). Für Untersucher 2 ergibt sich entsprechend ein Median von $121,3^\circ$ und ein Mittelwert von $121,27^\circ$ (SD: 1,05). Die Whisker beider Untersucher sind symmetrisch, der Median liegt jeweils in der Mitte der Box. Auffallend sind die beiden milden Ausreißer im unteren Bereich der Illustration für Untersucher 2. Im direkten Vergleich fällt zusätzlich die deutlich größere Spannweite der

Whisker für Untersucher 1 auf. Außerdem zeigt sich ein klarer Unterschied in der Größe der Boxen. Auch hier zeigt sich eine deutlich engere Begrenzung des oberen und unteren Quartils für Untersucher 2.

Zusammen mit den Mittelwerten und den Standardabweichungen zeigt die Grafik keine klinisch relevanten Differenzen zwischen beiden Untersuchern.

4.2.10. S-N*

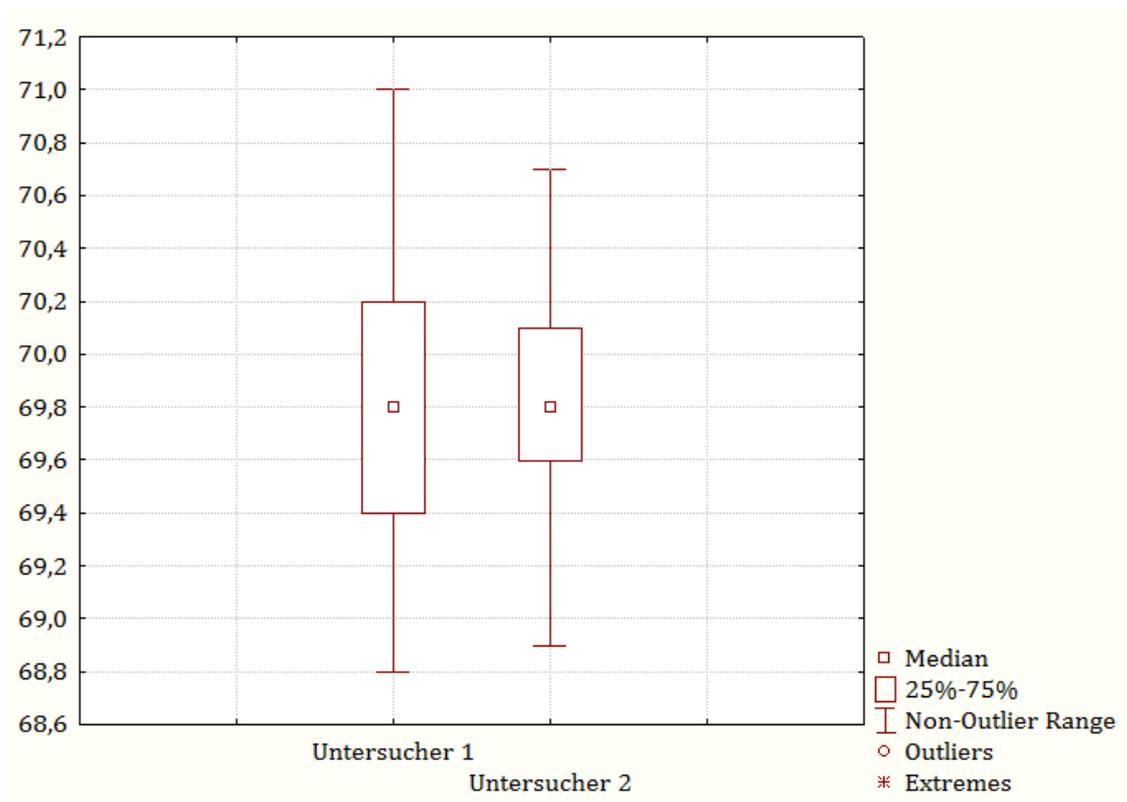


Abbildung 4.21 Boxplot und Whisker für S-N*

Die Analyse der Messreihe der Strecke Sella – Nasion zeigt für beide Untersucher ein ähnliches Bild. Die Whisker beider Untersucher sind annähernd symmetrisch, der Median liegt jeweils in der Mitte der Box. Die Spannweite der Messungen ist für Untersucher 2 geringfügig kleiner als für Untersucher 1. Es ergibt sich für Untersucher 1 ein Median von 69,8 mm und ein Mittelwert von 69,78 mm (SD: 0,51). Für Untersucher 2 ergibt sich ebenfalls ein Median von 69,8 mm und ein Mittelwert von 69,77 mm (SD: 0,47).

Der Vergleich der Mittelwerte beider Untersucher zeigt lediglich eine Differenz von 0,01 Millimeter bei einer für beide Untersucher sehr geringen Standardabweichung. Unter klinischen Gesichtspunkten, bringt der Vergleich beider Untersucher keine relevanten Unterschiede hervor.

4.2.11. N-Spa*

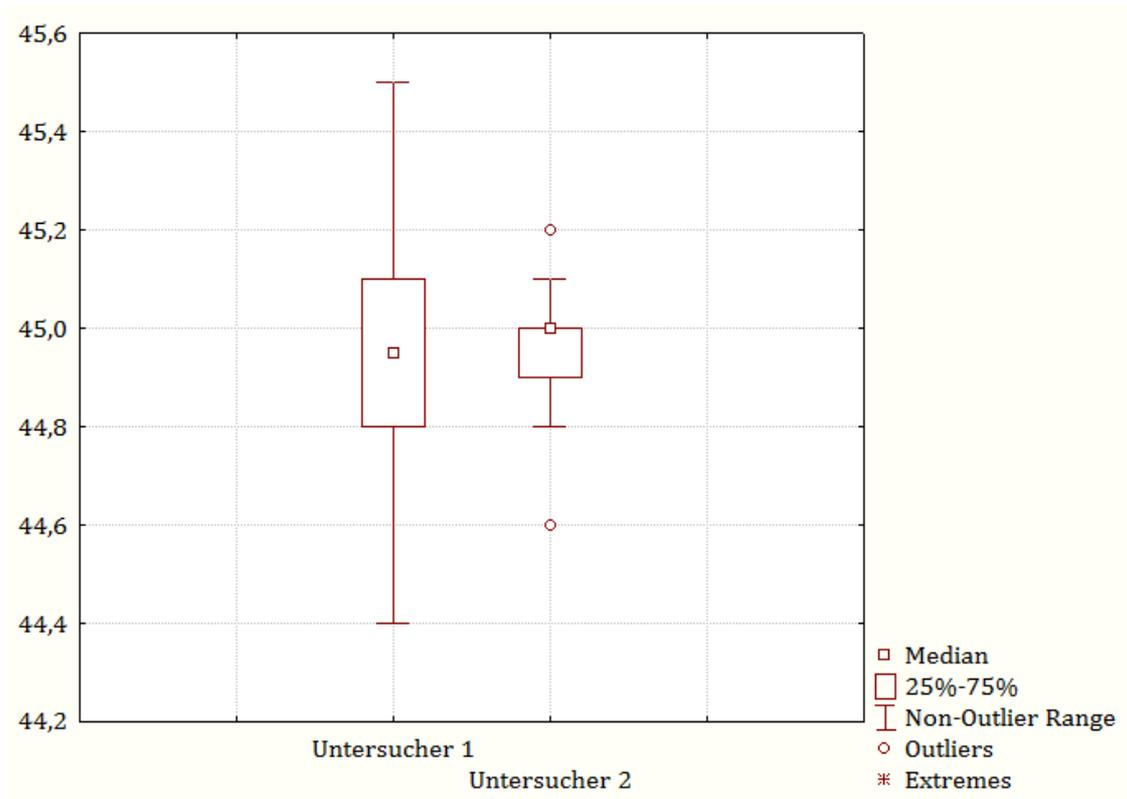


Abbildung 4.22 Boxplot und Whisker für N-Spa*

Die Auswertung der Messreihe der Strecke Spina nasalis anterior – Nasion zeigt für beide Untersucher eine unterschiedliche Verteilung der Messwerte. Während für beide Untersucher die Whisker annähernd symmetrisch sind, zeigt sich bei Untersucher 2 im Unterschied zu Untersucher 1 ein Median, der nicht in der Mitte der Box liegt, sowie zwei milde Ausreißer, jeweils im oberen und im unteren Bereich. Der Median für Untersucher 1 liegt bei 44,95 mm, der Mittelwert bei 44,96 mm (SD: 0,24). Für Untersucher 2 liegt der Zentralwert bei 45 mm, der Mittelwert liegt – wie bei Untersucher 1 – bei 44,96 mm (SD: 0,14). Auffallend für beide Prüfer ist außerdem die geringe Standardabweichung.

Die Abbildung illustriert zusammen mit den genannten Kennzahlen, dass Messung durch beide Untersucher nicht zu klinisch relevanten Unterschieden führt.

4.2.12. Spa-Spp*

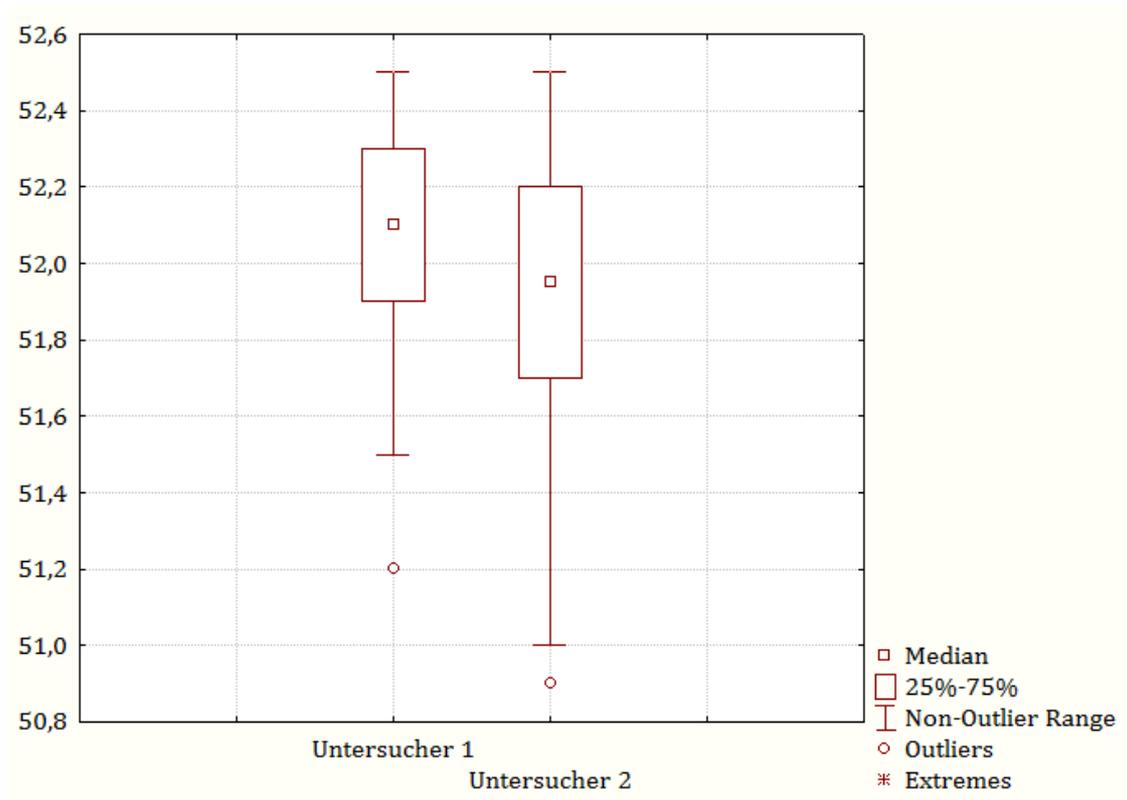


Abbildung 4.23 Boxplot und Whisker für Spa-Spp

Die statistische Auswertung der Messung der Oberkiefer-Länge zeigt eine für beide Untersucher vergleichbare Verteilung der Messwerte. So findet sich für Untersucher 1 ein Median von 52,1 Millimetern sowie ein Mittelwert von 52,06 Millimetern (SD: 0,3). Bei Untersucher 2 liegt der Median bei 51,95 Millimetern und der Mittelwert bei 51,9 Millimetern (SD: 0,44). Die Spannweite der unteren Whisker ist für beide Untersucher größer als die der oberen. Ebenso finden sich bei beiden Untersuchern zwei milde Ausreißer im unteren Bereich der Messwerte. Der obere Maximalwert ist für beide Untersucher gleich und liegt bei 52,3 Millimetern. Der Median beider Untersucher liegt in der Mitte der Box. Die Boxen überlappen sich.

Die Grafik zeigt unter Berücksichtigung der Mittelwerte und Standardabweichungen, dass es keine klinisch relevanten Abweichungen zwischen beiden Untersuchern gibt.

4.2.13. P_1 - Me_R

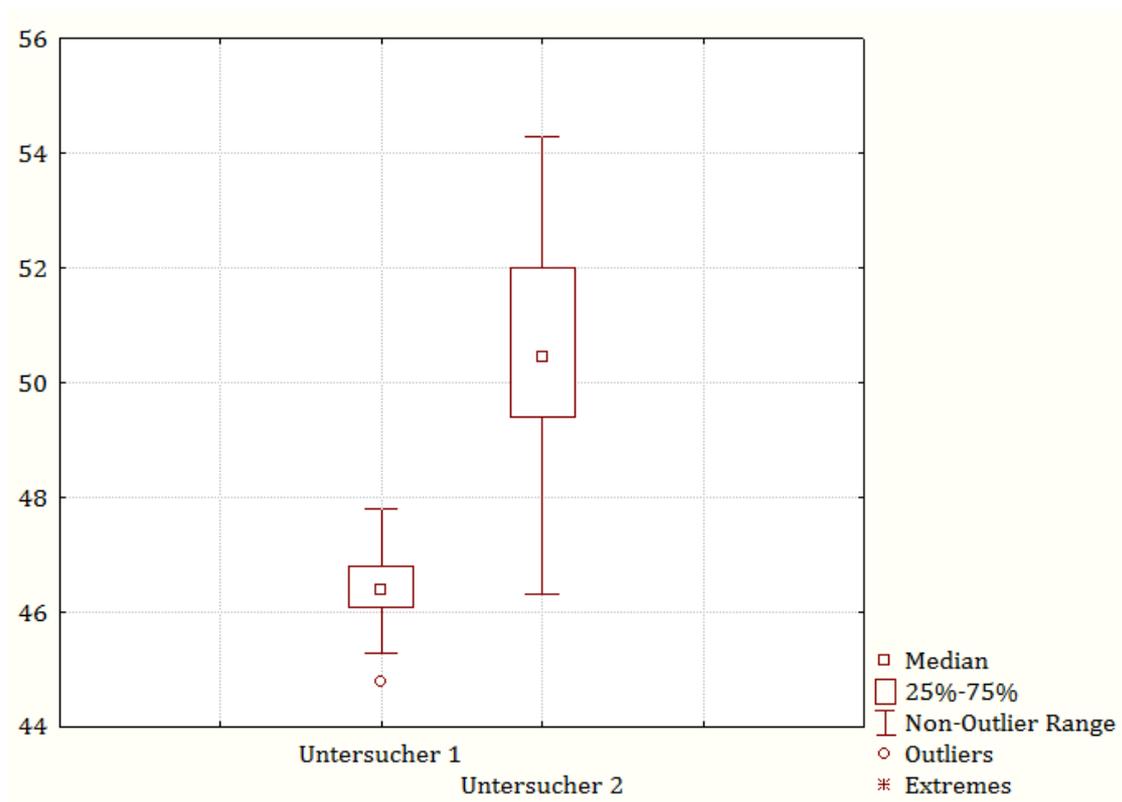


Abbildung 4.24 Boxplot und Whisker für P_1 - Me_R

Die Auswertung der Messung der Unterkiefer-Länge auf der rechten Seite zeigt ein ähnliches Bild wie die Messung auf der linken Seite. Wieder ist zu erkennen, dass sich die Verteilung der Messwerte beider Untersucher deutlich unterscheidet. Untersucher 1 misst erneut innerhalb einer erheblich kleineren Spannweite als Untersucher 2, allerdings ist ein milder Ausreißer am unteren Ende der Messreihe zu verzeichnen. Für beide Untersucher gilt erneut, dass die Whisker symmetrisch sind. Der Median von 46,4 mm für Untersucher 1 liegt zentral in der Box. Als Mittelwert wird ebenfalls 46,4 mm (SD: 0,65) errechnet. Bei Untersucher 2 befindet der Median von 50,45 mm nicht in der Mitte der Box, was für eine leicht schiefe Verteilung in Richtung der kleineren Messwerte spricht. Hier liegt der Mittelwert bei 50,79 mm (SD: 2,0).

Wie schon bei der Messung auf der linken Seite, findet sich auch bei der Messung auf der rechten Seite eine deutliche Differenz zwischen den Mittelwerten beider Untersucher. Der Unterschied von 4,39 Millimetern ist klinisch relevant und übersteigt den Toleranzbereich von einem Millimeter deutlich.

4.2.14. P_1 - Me_L

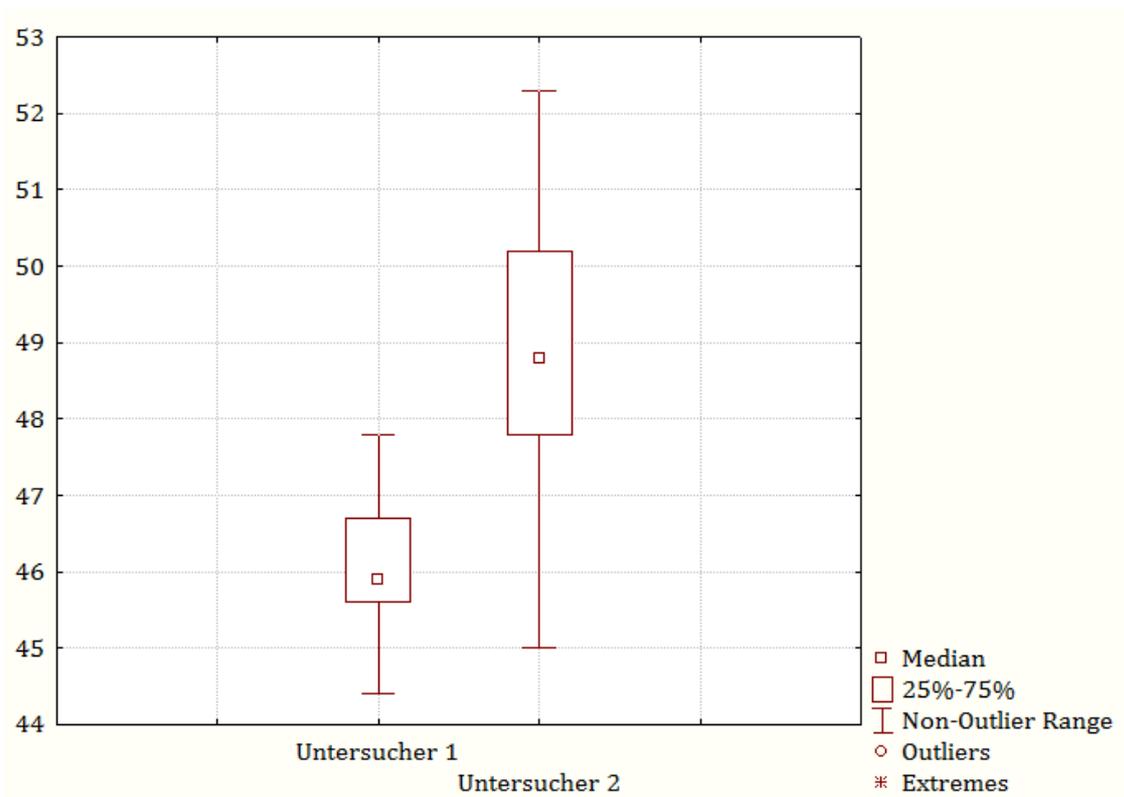


Abbildung 4.25 Boxplot und Whisker für P_1 - Me_L .

Die Analyse der Messungen zur Unterkiefer-Länge links zeigt für beide Untersucher eine unterschiedliche Verteilung der Messereignisse. Zwar sind die Whisker beider Untersucher symmetrisch, allerdings unterscheiden sie sich hinsichtlich ihrer Spannweite deutlich. Außerdem zeigt sich, dass der Median von Untersucher 1 nicht in der Mitte, sondern im unteren Drittel der Box liegt. Es ergibt sich für Untersucher 1 ein Median von 45,9 mm sowie ein Mittelwert von 46,13 mm (SD: 0,87). Für Untersucher 2 liegt der Median bei 48,8 mm und der Mittelwert bei 48,83 mm (SD: 1,6). Deutlich zu erkennen ist außerdem, dass

sich wie schon bei der Messung zum Sattelwinkel rechts, die Boxen nicht überlagern. Es zeigt sich eine mittlere Differenz zwischen beiden Untersuchern von 2,93 mm.

Die Grafik zeigt zusammen mit den Mittelwerten und den Standardabweichungen, dass die Unterschiede zwischen beiden Untersuchern klinisch relevant zu sein scheinen.

4.2.15. Zwischenergebnis I: Prüfung der Methode

Die Daten zeigen insgesamt, dass es zwischen beiden Untersuchern bei den FRS-Messungen nur bei der Bestimmung der Oberkieferneigung ($\Delta=1,3^\circ$) zu mittleren Unterschieden von mehr als einem Grad gekommen ist. Die CB-CT-Messungen indes zeigen häufiger und deutlicher Unterschiede zwischen beiden Prüfern. P_1-Me_R ($\Delta=4,39$ mm) und P_1-Me_L ($\Delta=2,93$ mm) sowie $\perp-SN$ ($\Delta=1,53^\circ$) und $NSAr_R$ ($\Delta=1,07$) zeigen zum Teil erhebliche Unterschiede zwischen beiden Prüfern. Die Mehrzahl der Messwerte zeigt allerdings keine klinisch relevanten Unterschiede zwischen beiden Untersuchern.

Die Differenzen zwischen beiden Untersuchern sind im Mittel im CB-CT doppelt so hoch wie im FRS (CB-CT: 1,04; FRS: 0,55). Der größte Unterschied zwischen beiden Untersuchern wurde bei metrischen Messungen im CB-CT festgestellt (P_1-Me_R , $\Delta=4,39$ mm). Der kleinste Unterschied im gesamten Feld wurde allerdings ebenfalls bei metrischen Messungen im CB-CT festgestellt (N-Spa, $\Delta=0,00$ mm).

4.3. Vergleich der Varianzen

Die Varianz als Quadrat der Standardabweichung ist ein Maß für die Streubreite der Messungen und ist deshalb im übertragenen Sinne ein wichtiger Parameter für die Güte der Messung. Im Folgenden soll nun getestet werden, ob sich die Varianzen der einzelnen Messungen für FRS und CB-CT signifikant unterscheiden und damit Aussagen über eventuelle Unterschiede hinsichtlich der Qualität der Messung zulassen. Die Varianzen für beide Messmethoden werden mithilfe des F-Tests miteinander verglichen. Angegeben sind in den Tabellen jeweils nur die Standardabweichungen.

Bei einem p-Wert von $\leq 0,05$ ist mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit $\leq 5\%$ von signifikant unterschiedlichen Varianzen auszugehen.

Der F-Test wird für alle gemessenen Parameter und für beide Untersucher separat durchgeführt.

Folgende Signifikanzniveaus kommen zur Anwendung:

- $p \leq 0,001$ = höchst signifikant (***)
- $p \leq 0,01$ = hoch signifikant (**)
- $p \leq 0,05$ = signifikant (*)
- $p > 0,05$ = nicht signifikant

4.3.1. Untersucher 1

Parameter	n (FRS)	n (CB-CT)	SD (FRS)	SD (CB-CT)	F-Ratio	p
SNA	30	30	1,09	0,27	15,80	0,0000 ^{***}
$\underline{1}$ -SN	30	30	1,79	1,13	2,50	0,0162 [*]
$\underline{1}$ -SpP	30	30	1,72	1,23	1,93	0,0813
SN-SpP	30	30	0,88	0,48	3,31	0,0019 ^{**}
$\bar{1}$ -MeGo	30	30	1,16	1,60	1,89	0,0931
ArGoMe _R	30	30	0,89	0,84	1,13	0,7519
ArGoMe _L	30	30	0,89	1,78	3,97	0,0004 ^{***}
NSAr _R	30	30	1,17	0,97	1,46	0,3098
NSAr _L	30	30	1,17	1,57	1,79	0,1211
S-N	30	30	0,51	0,51	1,01	0,9683
N-Spa	30	30	0,85	0,24	12,06	0,0000 ^{***}
Spa-Spp	30	30	0,82	0,30	7,42	0,0000 ^{***}
P ₁ -Me _R	30	30	1,08	0,65	2,77	0,0078 ^{**}
P ₁ -Me _L	30	30	1,08	0,87	1,54	0,2515

Tabelle 4.1 Standardabweichungen der Parameter für Untersucher 1

Die Tabelle zeigt, dass die Standardabweichungen bzw. Varianzen für die CB-CT-Messungen im Vergleich zu den FRS-Messungen in elf von 14 Fällen geringer sind.

Aus der Tabelle wird allerdings ersichtlich, dass sich die Varianzen beim Vergleich zwischen CB-CT und FRS nur bei den folgenden Parametern signifikant unterscheiden:

- SNA (***)
- $\underline{1}$ -SN (*)
- SN-SpP (**)
- ArGoMe_L (***)
- N-Spa (***)
- Spa-Spp (***)
- P₁-Me_R (**)

4.3.2. Untersucher 2

Parameter	n (FRS)	n (CB-CT)	SD (FRS)	SD (CB-CT)	F-Ratio	p
SNA	30	30	0,69	0,14	22,67	0,0000***
$\bar{1}$ -SN	30	30	1,96	1,73	1,29	0,5009
$\bar{1}$ -SpP	30	30	1,99	1,80	1,22	0,6017
SN-SpP	30	30	0,67	0,49	1,90	0,0896
$\bar{1}$ -MeGo	30	30	1,21	1,73	2,02	0,0629
ArGoMe _R	30	30	0,89	0,80	1,23	0,5814
ArGoMe _L	30	30	0,89	1,11	1,56	0,2393
NSAr _R	30	30	1,12	0,77	2,11	0,0489*
NSAr _L	30	30	1,12	1,05	1,15	0,7176
S-N	30	30	0,62	0,47	1,74	0,1424
N-Spa	30	30	0,41	0,15	8,12	0,0000***
Spa-Spp	30	30	0,64	0,44	2,10	0,0501
P ₁ -Me _R	30	30	1,35	2,01	2,22	0,0360*
P ₁ -Me _L	30	30	1,35	1,60	1,41	0,3565

Tabelle 4.2 Standardabweichungen der Parameter für Untersucher 2

Die Tabelle von Untersucher 2 zeigt, dass die Varianzen der CB-CT-Messung in zehn von 14 Fällen kleiner sind als die Varianzen der vergleichbaren FRS-Messung.

Signifikante Unterschiede ergaben sich allerdings nur für die folgenden Parameter:

- SNA (***)
- NSAr_R (*)
- N-Spa (***)
- P₁-Me_R (*)

4.3.3. Zwischenergebnis II: Vergleich der Varianzen

Beim Vergleich beider Untersucher ist auffallend, dass sich bei beiden die Varianzen von SNA und von N-Spa zwischen FRS und CB-CT höchst signifikant unterscheiden. Außerdem ist bei beiden Prüfern die Varianz der CB-CT-Messungen in der Mehrzahl der Fälle Mehrheit – zehn bzw. elf von 14 Messungen (71% bzw. 79%) - kleiner. Die Annahme, dass sich die Varianzen bei metrischen Messungen, aufgrund geringerer Anzahl auszuwählender Punkte, auch weniger deutlich unterscheiden würden als bei angulären

Messungen, konnte auf Grundlage der erhobenen Daten nicht bestätigt werden. Darüberhinaus lassen sich beim Vergleich beider Untersucher keine weiteren Trends erkennen.

4.4. Auswertung des Patientenkollektivs

Um die Anwendbarkeit der 3D-Kephalometrie im Vergleich zur konventionellen FRS-Aufnahme zu evaluieren, wurden nun die neun angulären Messungen (SNA, $\underline{1}$ -SN, $\underline{1}$ -SpP, SN-SpP, $\bar{1}$ -MeGo, ArGoMe_R, ArGoMe_L sowie NSAr_R und NSAr_L) an 36 der Patienten mittels FRS und CB-CT durchgeführt. Ebenso wurden die fünf metrischen Messungen (S-N, N-Spa, Spa-Spp sowie P₁-Me_R und P₁-Me_L) der 30 Patienten jeweils mittels FRS und CB-CT durchgeführt. Da im konventionellen FRS die Parameter nicht seitenungleich gemessen werden können, erfolgte die Bildung der Differenz der im 3D-Modell für jede Seite einzeln ermittelten Parameter (P₁-Me_R und P₁-Me_L, ArGoMe_R und ArGoMe_L, NSAr_R und NSAr_L) gegen den FRS-Wert (P₁-Me, ArGoMe, NSAr).

Der Mittelwert ist die mittlere Differenz zwischen beiden Verfahren über alle Patienten. War der gemessene Wert im FRS-Bild kleiner als im CB-CT, so wurde der Differenz ein negatives Vorzeichen angefügt.

Die Auswertung der beiden Aufnahmen erfolgte zufällig, aber gleichmäßig verteilt durch einen der beiden Untersucher.

4.4.1. Anguläre Messungen

Parameter	n	Mittelwert	Konfidenz - 95,00%	Konfidenz 95,00%	Min.	Max.	SD
SNA	36	-1,10	-1,95	-0,25	-7,2	2,9	2,52
$\underline{1}$ -SN	36	-0,01	-2,16	2,14	-23,4	12,1	6,36
$\underline{1}$ -SpP	36	0,39	-1,79	2,58	-11,6	23,2	6,46
SN-SpP	36	0,17	-0,65	0,98	-5,5	5,4	2,40
$\bar{1}$ -MeGo	36	0,12	-1,75	1,98	-16,8	9,5	5,51
ArGoMe _R	36	0,34	-1,14	1,83	-11,1	8	4,39
ArGoMe _L	36	-1,97	-3,73	-0,21	-13,3	6,3	5,21
NSAr _R	36	3,09	1,92	4,25	-3,9	9,5	3,44
NSAr _L	36	4,44	3,16	5,72	-3,2	16,2	3,78

Tabelle 4.3 Statistische Kennzahlen der angulären Parameter

Tabelle 4.3 zeigt, dass sich die Differenzen zwischen FRS und CB-CT besonders klar bei NSAr_R und NSAr_L zeigen. Hier sind Abweichungen von deutlich über einem Grad zu verzeichnen. Auch ArGoMe_L zeigte im Mittel eine Abweichung von knapp zwei Grad. Die anderen Parameter zeigen Abweichungen, die im Mittel zum Teil deutlich unter einem

Grad liegen. Bei der Betrachtung der Konfidenzintervalle zeigen sich signifikante Unterschiede. So schließen sowohl die Mittelwerte von SNA als auch $NSAr_R$ und $NSAr_L$ sowie $ArGoMe_L$ die Zahl 0 nicht in ihren 95%-Konfidenzintervall ein. Dies bedeutet, dass im Mittel davon ausgegangen werden kann, dass die Messungen für die genannten Parameter sich zwischen CB-CT und FRS signifikant unterscheiden werden (vgl. T-Test).

4.4.2. Lineare Messungen

Parameter	n	Mittelwert	Konfidenz - 95,00%	Konfidenz 95,00%	Min.	Max.	SD
S-N	30	-1,03	-1,66	-0,39	-4,7	3,2	1,69
N-Spa	30	0,81	-0,30	1,92	-6,2	10,3	2,97
Spa-Spp	30	-0,34	-1,71	1,04	-6,7	10,3	3,68
P_1-Me_R	30	1,02	-1,01	3,06	-11,4	9,3	5,44
P_1-Me_L	30	2,05	0,08	4,02	-9,1	11,1	5,28

Tabelle 4.4 Statistische Kennzahlen der metrischen Parameter

Tabelle 4.4 zeigt, dass sich die Abweichungen im Mittel vor allem bei P_1-Me_L deutlich zwischen FRS und CB-CT unterscheiden. Die anderen Werte liegen um oder unter einem Millimeter. Wichtig ist außerdem, dass das 95%-Konfidenzintervall des Mittelwerts der Abweichungen von P_1-Me_R und S-N die Zahl 0 nicht miteinschließt. Wäre der Mittelwert der Differenzen zwischen CB-CT und FRS 0 Millimeter bzw. würde das Konfidenzintervall (hier 95%) die Zahl 0 einschließen, so wären auch hier im Mittel keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Verfahren zu erwarten. Für die Messung von S-N und P_1-Me_L bedeutet dies, dass sich signifikante Unterschiede zwischen FRS und CB-CT zeigen (vgl. T-Test).

Parameter	n	Mittelwert	SD	SF	t-Wert	FG	p
SNA	36	-1,10	2,52	0,42	-2,62	35	0,0129*
\perp -SN	36	-0,01	6,36	1,06	-0,01	35	0,9938
\perp -SpP	36	0,39	6,46	1,08	0,37	35	0,7164
SN-SpP	36	0,17	2,40	0,40	0,42	35	0,6795
\bar{I} -MeGo	36	0,12	5,51	0,92	0,13	35	0,8997
ArGoMe _R	36	0,34	4,39	0,73	0,47	35	0,6434
ArGoMe _L	36	-1,97	5,21	0,87	-2,27	35	0,0293*
NSAr _R	36	3,09	3,44	0,57	5,38	35	0,0000***
NSAr _L	36	4,44	3,78	0,63	7,04	35	0,0000***
S-N	30	-1,03	1,69	0,31	-3,32	29	0,0024**
N-Spa	30	0,81	2,97	0,54	1,50	29	0,1457
Spa-Spp	30	-0,34	3,68	0,67	-0,50	29	0,6202
P ₁ -Me _R	30	1,02	5,44	0,99	1,03	29	0,3117
P ₁ -Me _L	30	2,05	5,28	0,96	2,12	29	0,0423*

Tabelle 4.5 Einstichproben-T-Test gegen 0 für alle Parameter

Tabelle 4.5 zeigt einen Einstichproben-T-Test für alle gemessenen Parameter. Signifikante Unterschiede zwischen FRS- und CB-CT-Messung zeigten sich bei den Winkeln SNA, ArGoMe_L, NSAr_R, NSAr_L und den Strecken S-N sowie P₁-Me_L.

4.4.3. Differenzen zwischen FRS und CB-CT (Mediane Ebene)

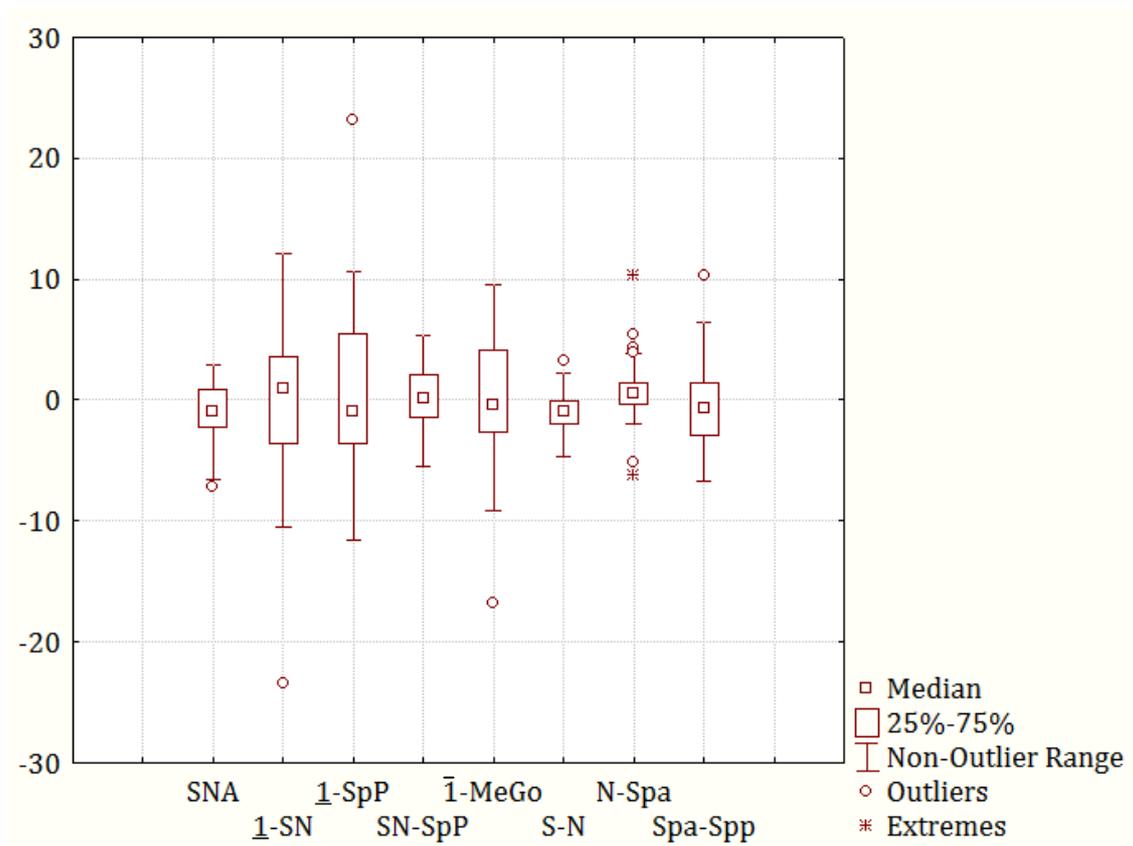


Abbildung 4.26 Differenzen in der Mediane Ebene

Die Abbildung zeigt die Differenzen zwischen CB-CT und FRS bezüglich der in der Mediane Ebene ermittelten Werte. Es ist ersichtlich, dass sich mit Ausnahme der Parameter $\underline{1}$ -SpP, $\underline{1}$ -SN und $\bar{1}$ -MeGo die Werte sehr harmonisch und relativ eng um die Zahl 0 verteilen. Die Box Plots für die genannten Parameter zeigen außerdem eine leicht schiefe Verteilung der Werte an, was sich abermals in der nicht mittigen Lokalisation des Medians innerhalb der Box zeigt. Für die Differenzen der Strecke N-Spa zeigen insgesamt sechs Ausreißer – zwei schwere und vier milde. Trotzdem ist das Spektrum der ermittelten Werte auch mit den Ausreißern für diese Strecke deutlich geringer als für die Parameter $\underline{1}$ -SpP, $\underline{1}$ -SN und $\bar{1}$ -MeGo. Die exakten Maxima und Minima sind den voranstehenden Tabellen zu entnehmen

4.4.4. Differenzen zwischen FRS und CB-CT (Paramedianebene)

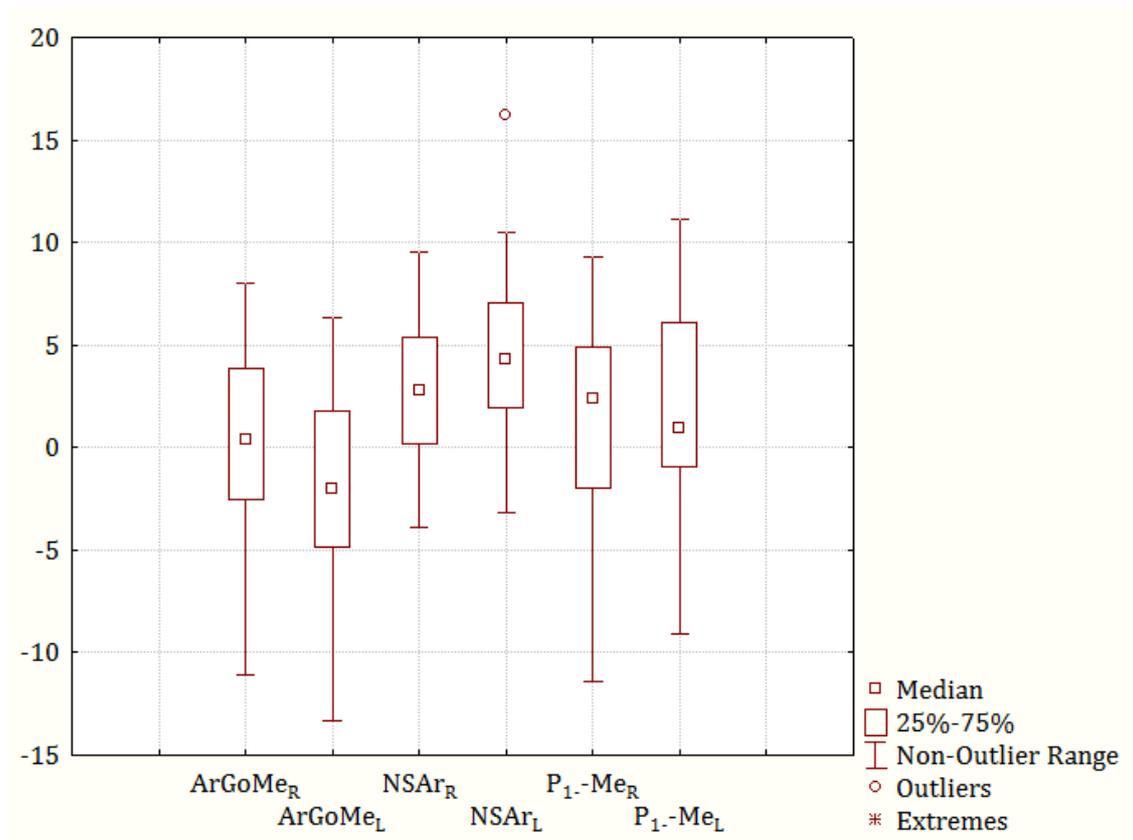


Abbildung 4.27 Differenzen in der Paramedianebene

Die Abbildung zeigt die Differenzen zwischen CB-CT und FRS bei den paramedianen Messungen. Bis auf die beiden Sattelwinkel zeigen sich relativ unharmonisch verteilte Werte. Die Lage der Boxen und des Medians sowie die der Mittelwerte für die Sattelwinkel offenbaren allerdings auch hier deutliche Unterschiede zwischen FRS und CB-CT. Die Box Plots der Messungen für die Unterkieferlängen sowie für die Kieferwinkel zeigen entweder deutlich asymmetrische Whisker (ArGoMe_L, ArGoMe_R sowie P₁-Me_R) oder auffallend schief verteilte Werte, gekennzeichnet durch die nicht mittige Lage des Medians in der Box (P₁-Me_L). Die genauen Maxima und Minima für die einzelnen Parameter sind der weiter oben angeführten Tabelle zu entnehmen.

4.4.5. Zwischenergebnis III: Auswertung des Patientenkollektivs

Für die paramedianen Messungen lässt sich zusammenfassend feststellen, dass $ArGoMe_L$, $NSAr_R$, $NSAr_L$, und P_1-Me_L deutlich (über ein Grad bzw. Millimeter) zwischen CB-CT und FRS differieren. Von den sechs untersuchten paramedianen Messungen zeigen also vier wesentliche Abweichungen zwischen CB-CT und FRS – das entspricht 66% der analysierten Parameter. Höchst signifikante Unterschiede zeigten sich bei den beiden Sattelwinkeln $NSAr_R$ und $NSAr_L$. Der Wert P_1-Me_R differiert zwischen beiden Methoden zwar um mehr als einen Millimeter, allerdings zeigte der Einstichproben-T-Test gegen 0 hier keine Signifikanz für dieses Ergebnis.

Bei den medianen Werten differieren SNA und S-N im Mittel um mehr als ein Grad bzw. Millimeter zwischen CB-CT und FRS. Hier kam es also bei 25% der untersuchten Parameter zu wesentlichen Unterschieden zwischen beiden Untersuchungsmethoden. Die Strecke S-N zeigte hoch signifikante Unterschiede zwischen beiden Methoden.

Weiterhin ist für die medianen Werte festzustellen, dass die Neigung der Frontzähne zwar im Mittel zwischen CB-CT und FRS keine wesentlichen Unterschiede offenbart, allerdings die größte Spannweite der ermittelten Differenzen zeigt.

Die FRS-Werte waren im Schnitt größer als die ermittelten CB-CT-Werte.

5. Diskussion

5.1. Material und Methode

Die Verwendung von Fernröntgenseitenbildern zur kieferorthopädischen Befunderhebung ist allgemein anerkannt und etablierter Standard, wenngleich viele Studien in der Vergangenheit auf Unzulänglichkeiten der Methode hingewiesen haben (*Houston 1983; Houston et al. 1986; Ludlow et al. 2009; Hurst et al. 2007; Wylie et al. 1987*). Eine Studie von *Chen et al.* zeigte selbst zwischen digitaler und manueller Vermessung signifikante, wenn auch nicht klinisch relevante Unterschiede (*Chen et al. 2004*).

Beim Fernröntgenseitenbild, aber auch bei jeder anderen kephalometrischen Auswertung kommt es zu Erkennungsfehlern. Dies beruht im Wesentlichen entweder auf schlecht erkennbaren Strukturen oder auf einer unzureichenden Definition der Referenzpunkte. Die Reduktion eines Körpers auf eine Schichtebene führt, wie etwa im FRS, zu Doppelkonturen, Verschattungen und Überlagerungen. Die Konvention zum Umgang mit diesem Phänomen, wie etwa das Verwenden einer gemittelten Korrekturlinie, führt unweigerlich zu weniger exakten Ergebnissen.

Wenngleich die Größenkalibrierung der Bilder mit großer Sorgfalt durchgeführt wurde, so lässt sich auch an dieser Stelle eine bestimmte Ungenauigkeit nicht vollständig vermeiden.

Bei allen Röntgenverfahren, so auch dem Fernröntgenseitenbild, ist davon auszugehen, dass das entstandene Bild nicht, oder nur näherungsweise durch Parallelprojektion, erzeugt wird. Der daraus resultierende Abbildungsfehler entsteht durch die strahlenförmige Ausbreitung der Röntgenquelle. Dies ist bei linearen Messungen auf Grundlage röntgenologischer Datenerhebung immer zu berücksichtigen.

Die CB-CT ermöglicht es, verlässliche und reproduzierbare Messungen im Bereich des kraniofazialen Komplexes durchzuführen. Dies wurde durch verschiedene Untersuchungen hinreichend gezeigt (*Ziegler et al. 2002; Queresby et al. 2008; Moreira et al. 2009*).

Swennen und *Schutysker* haben im Jahr 2006 die Eigenschaften des verwendeten Programms MAXILIM[®] beschrieben und die Qualität, mit der Auswertungen vorgenommen werden können, beschrieben (*Swennen, Schutysker 2006*). Die Auswertung der CB-CT-Scans mit MAXILIM[®] ist deshalb als verlässlich zu bewerten.

Vorhergehende Studien von *Kumar et al.* haben gezeigt, dass 2-D-Kephalogramme generiert aus CB-CT-Datensätzen sowohl mit der direkten Messung am Schädel (bei anatomischen Präparaten) als auch mit konventionellen FRS-Aufnahmen echter Patienten vergleichbar sind (*Kumar et al. 2007, Kumar et al. 2008*).

Auch wenn für die 3D-Kephalometrie die gleichen Bezugspunkte verwendet werden wie für die 2D-Kephalometrie, ist die Identifikation der Punkte in 3D-Verfahren signifikant präziser, obwohl die Definition ihrer Lage keine Aussage über die dritte Dimension macht (*Ludlow et al. 2009*).

Da alle Patienten zum Zeitpunkt der Röntgenaufnahme, sowohl der FRS- als auch der CB-CT-Scans, eine Multiband- bzw. Multibracket-Apparatur trugen, kam es zur verstärkten Artefaktbildung im Bereich der Zähne. Die Auswirkung auf das Messergebnis ist allerdings als gering einzustufen, da diese Effekte im FRS zu keinen nennenswerten Irritationen führen. Im CB-CT wird der Problematik der Artefaktbildung dahingehend begegnet, dass problematische Punkte nicht auf der Oberfläche der dreidimensionalen Schädelrekonstruktion gesucht und gesetzt werden, sondern durch Schnittbilder in allen drei Raumebenen eindeutig lokalisiert werden können.

Gegenüber anderen Untersuchungen mit fixierten Schädelpräparaten entsteht bei einer in-vivo Untersuchung mit Patienten noch zusätzlich Streuung der Röntgenstrahlen durch die bedeckenden Weichteile. Dieser Effekt ist allerdings als unwesentlich einzuschätzen (*Ritter et al. 2009*).

Das Kollektiv von mehr als dreißig zufällig ausgewählten Patienten ermöglicht es, auf Grundlage statistischer Überlegungen ein aussagekräftiges Ergebnis zu formulieren.

5.2. Zwischenergebnis I: Prüfung der Methode

Die Ergebnisse aus Teil I der Untersuchung zeigen, dass die Differenzen zwischen beiden Untersuchern bei den CB-CT-Scans im Mittel etwa doppelt so hoch sind wie bei einer vergleichbaren FRS-Aufnahme. So unterscheiden sich im CB-CT sowohl die Messungen von $P_1\text{-Me}_R$ und $P_1\text{-Me}_L$ als die von $NSAr_R$ und von $\underline{1}\text{-SN}$ zwischen beiden Untersuchern deutlich. $\underline{1}\text{-SN}$ unterscheidet sich auch bei der FRS-Messung zwischen beiden Untersuchern in einem Maß, das außerhalb der klinischen Toleranzgrenze von einem Grad liegt (*Sandler 1988*).

Für beide Methoden haben sich vergleichbar kleine Standardabweichungen ermitteln lassen, was zum einen die Verlässlichkeit der jeweiligen Methode und zum anderen die Vergleichbarkeit der Methoden untereinander unterstreicht.

Dieses Teilergebnis steht dennoch im Widerspruch zu einer Studie von *Chien et al.* aus dem Jahr 2009 (*Chien et al. 2009*). Auch in dieser in-vivo-Studie wurden zwei- und dreidimensionale Aufnahmen durch unabhängige Untersucher ausgewertet. Hier zeigte sich, dass die mittleren Differenzen zwischen verschiedenen Untersuchern bei 3D-Bildern im Mittel geringer als bei der vergleichbaren zweidimensionalen Aufnahme sind. Auch die Standardabweichung für jeden einzelnen Untersucher war bei den 3D-Bildern geringer. In der Studie von *Chien et al.* wurde allerdings eine geringere Anzahl von Aufnahmen durch eine größere Anzahl von Untersuchern ausgewertet, insoweit ist aufgrund statistischer Überlegungen ein Vergleich beider Studien nur begrenzt möglich.

Aus den oben genannten Werten der vorliegenden Untersuchung ist zu erkennen, dass sich bei den CB-CT-Auswertungen in erster Linie die Messungen der Unterkieferparameter als deutlich unterschiedlich darstellten. Hier unterscheiden sich auch die Standardabweichungen beider Untersucher deutlich. *Chien et al.* zeigen in ihrer Studie ebenfalls, dass sich die größten Differenzen hinsichtlich der Identifikation verschiedener Landmarken bei drei Unterkiefer-Referenzpunkten finden. Auch in der vorliegenden Studie gab es erkennbare Schwierigkeiten die Unterkieferlängen, basierend auf zwei Tangentenpunkten, reproduzierbar zu messen. Die hohe Standardabweichung zeigt die große Streubreite der Messereignisse. Da in der vorliegenden Arbeit lediglich zwei Prüfer miteinander verglichen wurden, sind die Differenzen derart deutlich. Die deutlichen Unterschiede zwischen der vorliegenden Studie und der Studie von *Chien et al.* relativieren sich allerdings aufgrund des schon oben ausgeführten, anderen Studiendesigns.

Die Bestimmung der Unterkieferlänge ist deshalb erschwert, weil das Auffinden eines Tangentenpunktes an ebenen Unterkieferkörpern nicht in reproduzierbarer Weise möglich ist. Ein ausgeprägtes Antegonion notch, welches die Identifikation erleichtert, ist nicht bei allen Patienten vorhanden. Dies zeigt auch die Studie von *Kumar et al.* aus dem Jahr 2007 – hier war es ebenfalls zu statistisch signifikanten Differenzen bei der Bestimmung der Unterkieferlänge gekommen (*Kumar et al. 2007*).

Die Tatsache, dass sich die CB-CT-Messungen in der vorliegenden Studie häufiger und deutlicher zwischen den Untersuchern unterscheiden als vergleichbare FRS-Messungen, könnte in der Anwesenheit systematischer Fehler begründet sein. Die hochauflösende CB-CT-Messung erlaubt eine sehr präzise Identifikation verschiedener Referenzpunkte (*Brown et al. 2009*), wohingegen im FRS einige Punkte innerhalb eines deutlich größeren Interpretationsspielraumes liegen (*Ludlow et al. 2009; Hurst et al. 2007*). Die Ungenauigkeit sowie die geringe Reproduzierbarkeit bei der Bestimmung kephalometrischer Referenzpunkte in konventionellen Röntgenaufnahmen ist auch in älteren Studien aus den 1970ern und -80ern hinreichend dokumentiert (*Baumrind, Frantz 1971; Midtgård et al. 1974; Houston 1983*).

Vor diesem Hintergrund erscheint die Überlegung statthaft, dass bei der Auswertung des CB-CT-Scans beide Untersucher systematisch und exakt unterschiedliche Punkte identifiziert haben und zur Vermessung herangezogen haben. Es ist deshalb möglich, dass sich die Messungen bei schwer identifizierbaren Referenzpunkten zwischen beiden Untersuchern bei einer „exakteren“ Methode im Mittel häufiger und deutlicher unterscheiden als bei einer Methode, die erwiesenermaßen Probleme bei der genauen Identifikation der Landmarken zeigt.

Kalibrierungs- oder Projektionsfehler scheiden als Erklärung für die deutlichen Unterschiede aus, da beide Untersucher das gleiche Bild mit derselben Kalibrierung vermessen haben.

Abseits der Unterkieferlängenmessung decken sich die Ergebnisse mit der gegenwärtigen Studienlage.

5.3. Zwischenergebnis II: Vergleich der Varianzen

Die Ergebnisse aus Teil II zeigen, dass sich die Varianzen, als Ausdruck einer gewissen Ungenauigkeit der Messung, zum Teil höchst signifikant zwischen FRS- und CB-CT-Messung unterscheiden. Die Varianz als Ausdruck der Ungenauigkeit bzw. Verlässlichkeit der Messung zu verwenden erscheint begründet, da sie die Streubreite der Messergebnisse um einen Mittelwert darstellt. Je größer die Varianz also ist, desto größer ist die Spannweite der Messergebnisse. Für beide Untersucher hat sich gezeigt, dass die Varianzen der CB-CT-

Messungen in der deutlichen Mehrzahl der Fälle – zehn bzw. elf von 14 Messungen – unter denen der FRS-Messung liegen. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von *Ludlow et al.* (*Ludlow et al. 2009*). Hier wurde ebenso gezeigt, dass die Varianzen der Referenzpunktidentifikation bei dreidimensionalen Auswertungen in der Mehrzahl der Fälle geringer sind als bei konventionellen FRS-Aufnahmen.

Bei beiden Untersuchern zeigten sich höchst signifikante Unterschiede beim Vergleich der Varianzen von SNA und N-Spa. Eine Studie von *Ludlow et al.* zeigte analog, dass sich die Varianzen der Referenzpunktidentifikation zwischen FRS und CB-CT bei den Punkten Nasion, A-Punkt und Spina nasalis anterior signifikant unterscheiden (*Ludlow et al. 2009*; *Hurst et al. 2007*). Die Region des Oberkiefers zwischen der Spina nasalis anterior und Prosthion ist bei einigen Patienten im FRS-Bild in nicht ausreichende Schärfe darstellbar. Das genaue Abgrenzen der knöchernen Strukturen gegenüber den bedeckenden Weichteilen fällt bei Fernröntgenseitenbildern schwerer als bei Cone-beam computed tomography. Dies zeigt sich offensichtlich gerade in den genannten Parametern, da die Spina nasalis anterior und auch der A-Punkt innerhalb der beschriebenen Region liegen.

Im Vergleich zur FRS-Messung lassen sich bei der dreidimensionalen Darstellung im CB-CT die bedeckenden Weichgewebe sehr gut ausblenden und ermöglichen so die exakte Identifikation der Referenzpunkte.

5.4. Zwischenergebnis III: Auswertung des Patientenkollektivs

Die Ergebnisse des Teilbereichs III zeigen, dass vor allem die paramedianen Werte zwischen FRS und CB-CT deutlich (über ein Millimeter) differieren. Dies zeigen auch die Studien von *Hurst* und *Ludlow* (*Hurst et al. 2007*; *Ludlow et al. 2009*). Die Differenzen der paramedianen Parameter sind auf beiden Seiten des Kiefers nicht gleich. Dies erklärt sich durch die unterschiedliche und nicht symmetrische Ausformung der beiden Anteile der Unterkieferspange.

Sowohl $NSAr_R$ und $NSAr_L$ als auch $ArGoMe_L$ und die Unterkieferlänge P_1-Me_L offenbaren im Mittel signifikante Unterschiede von über einem Millimeter bzw. Grad zwischen den beiden Untersuchungsmodalitäten. Dies erscheint mit Berücksichtigung der Tatsache, dass ein wesentlicher Bezugspunkt der genannten angulären Messungen der Referenzpunkt

„Articulare“ ist, als nicht unwahrscheinlich. Articulare als Schnittpunkt des aufsteigenden Unterkieferastes mit dem äußeren Rand der Schädelbasis zeigt im FRS häufig Doppelkonturen, die zur weiteren Auswertung gemittelt werden müssen. Da es sich um einen röntgenologischen Punkt - also einen Punkt, der sich aus der Überlagerung zweier röntgendichter Verschattungen ergibt - handelt, ist dieser Punkt im CB-CT ohne Hilfsmittel nicht darstellbar. Wie schon in den Methoden erwähnt wurde bei der CB-CT-Analyse eine Stelle am Ramus ascendens bestimmt, die auf einem virtuellen lateralen Kephalogramm des rekonstruierten dreidimensionalen Schädels die Schädelbasis schneiden würde.

Insofern ist auch in der dreidimensionalen Analyse dieser Punkt nur näherungsweise zu ermitteln und somit deutlich stärker fehlerbehaftet als klar identifizierbare anatomische Strukturen. Durch die Verwendung eines Frontzahnaufbisses mit einer Stärke von einem Millimeter zur Positionierung des Kopfes im CB-CT, kommt es zudem zu einer geringgradigen, wahrscheinlich nicht messbaren, Verschiebung des konstruierten Punktes entlang des äußeren Randes der Schädelbasis. Das geringe Ausmaß der Verschiebung wird deutlich, wenn man sich die Stärke des Aufbisses sowie die Entfernung des Rotationszentrums und das physiologisch vorhandene Spiel in den Kiefergelenken vergegenwärtigt. Wenngleich die Abweichung gering ist, so wäre doch eine Aufnahmetechnik mit einer Kinnstütze und Ohroliven und ohne Frontzahnaufbiss wünschenswert. Hier zeigt das GALILEOS-System deutliche Schwächen gegenüber dem konventionellen FRS. Auch eine Beurteilung der Vertikalen ist mit dem GALILEOS-System und dem verwendeten Aufbiss nicht möglich.

Die beschriebenen systematischen Unzulänglichkeiten finden wahrscheinlich in den höchst signifikanten Unterschieden, die bei den Sattelwinkeln $NSAr_R$ und $NSAr_L$ festgestellt wurden, ihren Ausdruck. Die Messung des Sattelwinkels beinhaltet die erschwerte Bestimmung der Tangentenpunkte am Unterkiefer sowie die Problematik der Identifikation von Articulare. Weiterhin liegen die Punkte in der Paramedianebene, was beim Vergleich von FRS und CB-CT zu einer zusätzlichen Ungenauigkeit führt und deshalb die deutlichen Unterschiede begründet.

Bei P_1-Me_R zeigten sich zwar mittlere Differenzen von mehr als einem Millimeter, der Einstichproben-T-Test gegen 0 zeigte allerdings keinen signifikanten p-Wert.

Der Winkel SNA unterscheidet sich zwischen beiden Untersuchungsmodalitäten signifikant. Ebenso zeigte die Strecke S-N hoch signifikante Unterschiede zwischen FRS und CB-CT. Das Ausmaß der Differenz ist bei den medianen Parametern allerdings mit $1,1^\circ$ bzw. 1,03 mm deutlich kleiner als bei den paramedianen Werten.

Hinsichtlich der Stellung der Ober- und Unterkieferfrontzähne ($\underline{1}$ -SN, $\underline{1}$ -SpP und \bar{I} -MeGo) zeigt sich, dass die Werte sich zwar im Mittel nicht wesentlich von einander unterscheiden, allerdings ist ein sehr großes Spektrum an Messwerten zu verzeichnen.

Die Messung der Neigung der Frontzähne in Ober- und Unterkiefer sollte eigentlich eine exakte Bestimmung der Wurzelspitzen und Inzisalkanten der oberen und unteren Schneidezähne beinhalten. Dies ist in einer Schichtaufnahme, wie es das Fernröntgenseitenbild seines Wesens nach ist, nicht möglich. Streng genommen ist es bei der Fernröntgenseitenanalyse auch nicht möglich, zwischen den beiden mittleren Incisiven des Ober- bzw. Unterkiefers zu differenzieren. Je nach Stellung der Frontzähne und Anatomie der vorderen Kieferregion liegen bis zu sechs Zähne im Strahlengang – hierbei ist eine eindeutige Identifikation eines Zahnes anhand seiner Inzisalkante und Wurzelspitze nicht möglich. Die CB-CT hingegen ermöglicht mittels der rekonstruierten Schichtaufnahmen eine genaue Lokalisation der Wurzelspitzen und Inzisalkanten der Zähne 11 bzw. 41. Hieraus mögen sich die zum Teil deutlichen Unterschiede zwischen FRS und CB-CT hinsichtlich der Stellung der Frontzähne ergeben. Weiterhin zu bedenken bleibt, dass zwischen den Aufnahmen im Mittel 8,1 Monate lagen. Gerade Veränderungen der Frontzahnneigung durch kieferorthopädische Torque- und Kippbewegungen könnten hier die zum Teil erheblichen Differenzen zwischen FRS und CB-CT erklären.

6. Zusammenfassung

In der vorliegenden retrospektiven Querschnittstudie wurde untersucht, ob sich zwei- und dreidimensionale Kephalmetrie bei Dysgnathiepatienten unterscheidet. Zur Auswertung herangezogen wurden standardisiert aufgenommene Fernröntgenseitenbilder (FRS) und Cone-beam computed tomography (CB-CT)-Scans von 36 Patienten. Die Aufnahmen wurden im Zeitraum von November 2007 bis September 2009 angefertigt. Alle Patienten wurden in der Universitätsklinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer- und Plastische Gesichtschirurgie aufgrund ihrer Dysgnathie operativ versorgt. Die Auswahl der Patienten erfolgte zufällig und unabhängig von Geschlecht, Alter sowie der Schwere der Dysgnathie bzw. dem Ausmaß der operativen Intervention. Die Auswertung erfolgte präoperativ durch zwei unabhängige Prüfer mit hinreichender Erfahrung bei der Analyse von zwei- und dreidimensionalen Aufnahmen. Vor dem Vergleich der konventionellen Schichtaufnahmen und der korrespondierenden Volumina des gleichen Patienten miteinander, wurde zunächst eine Prüfung der Methode für beide Verfahren und Untersucher vorgenommen.

Die Auswertung der FRS-Bilder wurde zum einen mittels der Software FRwin[®] professional der Firma Computer Konkret[®] (Falkenstein, Germany), zum anderen manuell durchgeführt. Die Analyse der CB-CT-Volumina erfolgte mit der Software MAXILIM[®] (Version 2.2.2.1) der Firma Medicim[®] (Mechelen, Belgium).

Die Ergebnisse wurden statistisch deskriptiv und mithilfe eines Einstichproben-T-Test sowie eines F-Tests ausgewertet und interpretiert. Als Signifikanzniveau wurde $p \leq 0,05$ gewählt.

In der Studie konnte gezeigt werden, dass sich die beiden Untersucher bei der Auswertung eines dreidimensionalen Bildes häufiger und deutlicher unterscheiden als bei einer vergleichbaren Analyse auf Grundlage eines zweidimensionalen Bildes.

Die Standardabweichungen waren für die Auswertungen der Volumina kleiner. Insbesondere die Messung der Unterkieferlänge zeigte bei dreidimensionalen Bildern deutliche Unterschiede zwischen beiden Untersuchern. Die große Mehrzahl der anderen Messwerte zeigte hingegen keine relevanten Unterschiede zwischen den Untersuchern.

Die Varianzen der Messungen waren für die 3-D-Kephalometrie in 71% bzw. 79% der Fälle kleiner als in einer vergleichbaren zweidimensionalen FRS-Messung. Es zeigte sich kein Anhalt für Zusammenhänge zwischen der Anzahl der Referenzpunkte, die einer Messung zugrunde liegen und der entsprechenden Varianz des untersuchten Parameters.

Beim direkten Vergleich zwischen zwei- und dreidimensionalem Bild wurden bei 66% der paramedianen Parameter, aber nur bei 25% der medianen Variablen gemittelte Differenzen von mehr als einem Millimeter bzw. Grad festgestellt. Es kommt also bei Parametern, die außerhalb der Schädelmedian-Ebene liegen, häufiger zu klinisch relevanten Differenzen zwischen lateralem FRS und CB-CT.

Die Neigung der Frontzähne für Ober- und Unterkiefer stellt insofern eine Ausnahme in der Gruppe der medianen Parameter dar, als sich die gemittelten Differenzen nicht in klinisch relevantem Ausmaß unterscheiden, die Spannweite der ermittelten Differenzen allerdings die größten Minima und Maxima in der gesamten Untersuchung zeigten. Dies bedeutet, dass die größten absoluten Differenzen zwischen einzelnen FRS- und CB-CT-Bildern bei Messungen der Neigung von Frontzähnen ermittelt wurden und zeigt die Problematik der exakten Bestimmung dieser Variablen.

Die Sattelwinkel links und rechts, der linke Kieferwinkel, die Unterkieferlänge links, der SNA-Winkel und die Strecke S-N zeigten signifikante Abweichungen zwischen beiden Messmethoden.

Die CB-CT kann zusammen mit der 3D-Kephalometrie bei Patienten mit fazialen Asymmetrien einen Zugewinn an Information gegenüber der konventionellen Schichtaufnahme bedeuten. Hier zeigen sich die Vorteile einer überlagerungsfreien und präzisen Darstellung des Gesichtsschädels klar.

7. Literaturverzeichnis

Angle EH

Classification of malocclusion.

Dent Cosmos. 1899;41:248-64, 350-7

Baumrind S, Frantz RC

The reliability of head film measurements: 1. Landmark identification.

Am J Orthod. 1971;60(2):111-27

Berco M, Rigali PH, Miner RM, DeLuca S, Anderson NK, Will LA

Accuracy and reliability of linear cephalometric measurements from cone-beam computed tomography scans of a dry human skull.

Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2009;136(1):17.e1-17.e9

Broadbent BH

A new x-ray technique and its application to orthodontics.

Angle Orthod. 1931;1:45-66

Brodie AG

On the growth pattern of the human head from the third month to the eighth year of life.

Am J Anat. 1941;68:209-61

Brown AA, Scarfe WC, Scheetz JP, Silveira AM, Farman AG

Linear accuracy of cone beam CT derived 3D images.

Angle Orthod. 2009;(1):150-7

Cevidanes LHS, Bailey LJ, Tucker GR Jr, Styner MA, Mol A, Phillips CL

Superimposition of 3D cone-beam CT models of orthognathic surgery patients.

Dentomaxillofac Radiol. 2005;34(6):369-75

Cevidane LHS, Bailey LJ, Tucker SF, Styner MA, Mol A, Phillips CL

Three-dimensional cone-beam computed tomography for assessment of mandibular changes after orthognathic surgery.

Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2007;131(1):44–50

Chen YJ, Chen SK, Yao JC, Chang HF

The effects of differences in landmark identification on the cephalometric measurements in traditional versus digitized cephalometry.

Angle Orthod. 2004;74(2):155–61

Chien PC, Parks ET, Eraso F, Hartsfield JK, Roberts WE, Ofner W

Comparison of reliability in anatomical landmark identification using two-dimensional digital cephalometrics and three-dimensional cone beam computed tomography in vivo.

Dentomaxillofac Radiol. 2009;(5):262–73

Downs WB

Analysis of the dentofacial profile.

Angle Orthod. 1956;26:191–212.

Drescher D

Fernröntgenanalyse.

In: Praxis der Zahnheilkunde, Bd. 11, Urban & Fischer, München & Jena, 2000

Genschel U, Becker C

Schließende Statistik - Grundlegende Methoden.

Springer, Berlin & Heidelberg, 2005

Grauer D, Cevidane LHS, Proffit WR

Working with DICOM craniofacial images.

Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2009;136(3):460–70

Hassan B, van der Stelt P, Sanderink G

Accuracy of three-dimensional measurements obtained from cone beam computed tomography surface-rendered images for cephalometric analysis: influence of patient scanning position.

Eur J Orthod. 2009;31(2):129–34.

Hofrath H

Die Bedeutung von Röntgenfern- und Abstandsaufnahme für die Diagnostik der Kieferanomalien.

Fortschr Orthodont. 1931;1:232–58

Houston WJB

The analysis of errors in orthodontic measurements.

Am J Orthod Dentofacial Orthop. 1983;83(5):382–90

Houston WJB, Maher RE, McElroy D, Sherriff M

Sources of error in measurements from cephalometric radiographs.

Eur J Orthod. 1986;8(3):149–51

Hurst CA, Eppley BL, Havlik RJ, Sadove AM

Surgical cephalometrics: applications and developments.

Plast Reconstr Surg. 2007;120(6):92–104

Kragstov J, Bosch C, Gyldensted C, Sindet-Pedersen S

Comparison of the reliability of craniofacial anatomic landmarks based on cephalometric radiographs and three-dimensional CT scans.

Cleft Palate Craniofac J. 1997;34(2):111–6

Kumar V, Ludlow JB, Cevitanes LHS, Mol, A

In vivo comparison of conventional and cone beam CT synthesized cephalograms.

Angle Orthod. 2008;78(5):873–9

Kumar V, Ludlow JB, Mol A, Cevitanes LHS

Comparison of conventional and cone beam CT synthesized cephalograms.

Dentomaxillofac Radiol. 2007;36(5):263–9

Lascala CA, Panella J, Marques MM

Analysis of the accuracy of linear measurements obtained by cone beam computed tomography (CBCT-NewTom).

Dentomaxillofac Radiol. 2004;33(5):291–4

Ludlow JB, Gubler M, Cevidanes LHS, Mol A

Precision of cephalometric landmark identification: Cone-beam computed tomography vs conventional cephalometric views.

Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2009;136(3):312–3

Mah JK, Danforth RA, Bumann A, Hatcher D

Radiation absorbed in maxillofacial imaging with a new dental computed tomography device.

Oral Surg Oral Med Oral Path Oral Radiol Endod. 2003;96(4):508–13

Midtgård J, Björk, G, Linder-Aronson S

Reproducibility of cephalometric landmarks and errors of measurements of cephalometric cranial distances.

Angle Orthod. 1974;44(1):56–61

Miracle AC, Mukherji SK

Conebeam CT of the head and neck, Part 2: clinical applications.

Am J Neuroradiol. 2009;30(7):1285–92

Moerenhout BA, Gelaude F, Swennen GR, Casselman JW, van der Sloten J, Mommaerts MY

Accuracy and repeatability of cone-beam computed tomography (CBCT) measurements used in the determination of facial indices in the laboratory setup.

J Craniomaxillofac Surg. 2009;37(1):18–23

Moreira CR, Sales MA, Lopes PM, Cavalcanti MG

Assessment of linear and angular measurements on three-dimensional cone-beam computed tomographic images.

Oral Surg Oral Med Oral Path Oral Radiol Endod. 2009;108(3):430–6

Mozzo P, Procacci C, Tacconi A, Martini PT, Andreis IA

A new volumetric CT machine for dental imaging based on the cone-beam technique: preliminary results.

Eur Radiol. 1998;8(9):1558–64

Papadopoulos MA, Jannowitz C, Boettcher P, Henke J, Stolla R, Zeilhofer HF

Three-dimensional fetal cephalometry: an evaluation of the reliability of cephalometric measurements based on three-dimensional CT reconstructions and on dry skulls of sheep fetuses.

J Craniomaxillofac Surg. 2005;33(4):229–37

Periago DR, Scarfe WC, Moshiri M, Scheetz JP, Silveira AM, Farman AG

Linear accuracy and reliability of cone beam CT derived 3-dimensional images constructed using an orthodontic volumetric rendering program.

Angle Orthod. 2008;78(3):387–95

Quereshy FA, Savell TA, Palomo JA

Applications of cone beam computed tomography in the practice of oral and maxillofacial surgery.

J Oral Maxillofac Surg. 2008;66(4):791–6

Rakosi T

Atlas und Anleitung zur praktischen Fernröntgenanalyse.

2. Aufl., Hanser, München & Wien, 1984

Ritter L, Mischkowski RA, Neugebauer J, Dreiseidler T, Scheer M, Keeve E, Zöller E

The influence of body mass index, age, implants, and dental restorations on image quality of cone beam computed tomography.

Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod. 2009;108(3):e108-16

Röntgen WC

Über eine neue Art von Strahlen. Vorläufige Mitteilung.

Sitzungsberichte der Würzburger Physik.-Medic.-Gesellschaft 1895:137–47

Sandler PJ

Reproducibility of cephalometric measurements.

Br J Orthod 1988;15:105–10

Steinhäuser EW

Proportionen des ästhetischen Gesichts im Vergleich zur bildenden Kunst.

In: Fortschritte der Kiefer- und Gesichtschirurgie; Band 34

Thieme, Stuttgart, 1989

Swennen GR, Mollemans W, De Clercq C, Abeloos J, Lamoral P, Lippens F

A cone-beam computed tomography triple scan procedure to obtain a three-dimensional augmented virtual skull model appropriate for orthognathic surgery planning.

J Craniofac Surg. 2009;20(2):297–307

Swennen GR, Schutyser F

Three-dimensional cephalometry: Spiral multi-slice vs cone-beam computed tomography.

Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2006;130(3):410–6

Swennen GR, Mollemans W, Schutyser F

Three-dimensional treatment planning of orthognathic surgery in the era of virtual imaging.

J Oral Maxillofac Surg. 2009;67:2080-92

Swennen GR, Schutyser F, Hausamen JE

Three-dimensional cephalometry. A color atlas and manual.

Springer, Berlin, 2006

van Vlijmen OJ, Bergé SJ, Swennen GR, Bronkhorst EM, Katsaros C, Kuijpers-Jagtman AM

Comparison of cephalometric radiographs obtained from cone-beam computed tomography scans and conventional radiographs.

J Oral Maxillofac Surg. 2009;67(1):92–7

Webb S

Non-standard CT scanners: their role in radiotherapy.

Int J Radiat Oncol Biol Phys. 1990;19(6):1589–1607

Wörtche R, Hassfeld S, Lux CJ, Müssig E, Hensley FW, Krempien R, Hofele C

Clinical application of cone beam digital volume tomography in children with cleft lip and palate.

Dentomaxillofac Radiol. 2006;35(2):88–94

Wylie GA, Fish LC, Epker BN

Cephalometrics: a comparison of five analyses currently used in the diagnosis of dentofacial deformities.

Int J Adult Orthodon Orthognath Surg. 1987;2(1):15–36

Yu SH, Nahm DS, Baek SH

Reliability of landmark identification on monitor-displayed lateral cephalometric images.

Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2008;133(6):790.e1-790.e6

Ziegler CM, Wörtche R, Brief J, Hassfeld S

Clinical indications for digital volume tomography in oral and maxillofacial surgery.

Dentomaxillofac Radiol. 2002;31(2):126–30

8. Danksagung

Herrn Prof. Dr. med. Dr. med. dent. A. C. Kübler, Direktor der Klinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer- und Plastische Gesichtschirurgie der Universität Würzburg, gilt mein Dank für die freundliche Überlassung des Themas und die Erstellung des Referats.

Frau Prof. Dr. med. dent. A. Stellzig-Eisenhauer, Direktorin der Poliklinik für Kieferorthopädie der Universität Würzburg, danke ich für die Erstellung des Korreferats sowie für die Möglichkeit, in den Räumen der Poliklinik für Kieferorthopädie diese Arbeit anfertigen zu können.

Der Röntgenabteilung der Klinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer- und Plastische Gesichtschirurgie danke ich für die angefertigten Aufnahmen und die unkomplizierte Zusammenarbeit.

Allen zuweisenden Kieferorthopäden, die unsere Anfragen und Bitten stets freundlich und zügig beantwortet haben, möchte ich ebenfalls herzlich danken.

Besonderer Dank gilt meinem Betreuer Herrn Dr. med. Dr. med. dent. M. Kochel, Oberarzt der Klinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer- und Plastische Gesichtschirurgie der Universität Würzburg, für die Idee zu dieser Arbeit und die unermüdliche Unterstützung.

Ebenso danke ich Frau Dr. med. dent. J. Kochel, wissenschaftliche Mitarbeiterin der Poliklinik für Kieferorthopädie der Universität Würzburg, für ihre Anregungen und Vorschläge im Zusammenhang mit dieser Arbeit.

Frau Dipl.-Math. Kristina Lurz, wissenschaftliche Mitarbeiter am Lehrstuhl für Statistik der Universität Würzburg, danke ich für die Unterstützung bei der Erstellung der Statistik.

Meinem Kollegen Herrn Benjamin „Benhelm“ Widmaier danke ich für die lustigen Stunden, die wir zusammen verbracht haben.