

Aus der Klinik für Kieferorthopädie
Universitätsklinikum des Saarlandes, Homburg/Saar
Direktor: Prof. Dr. J. A. Lisson

**Skelettale und dentoalveoläre Effekte des Funktionsreglers nach
Fränkel Typ 3 (FR-3) – eine retrospektive kephalometrische
Studie**

**Skeletal and dentoalveolar effects of function regulator by
Fränkel type 3 (FR-3) – a retrospective cephalometric study**

**Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnheilkunde
der Medizinischen Fakultät**

der UNIVERSITÄT DES SAARLANDES

2025

Vorgelegt von: Lynn Fröhlich
Geboren am: 07.01.1997 in Dinslaken

Tag der Promotion: 26.02.2026

Dekan: Prof. Dr. Matthias Hannig

1. Berichterstatter: Prof. Dr. Gero Kinzinger

2. Berichterstatter: Prof. Dr. Emmanouil Liodakis

Für meine geliebte Familie.

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung.....	1
1.1 Deutsche Zusammenfassung	1
1.2 Abstract	2
2. Einleitung	4
2.1 Grundlagen der Klasse-III-Anomalie.....	4
2.1.1 Morphologische Klassifikationen in der Literatur	4
2.1.2 Ätiologie.....	5
2.1.3 Epidemiologie	6
2.1.4 Diagnose einer Klasse-III-Anomalie mittels Fernröntgenseitenbild.....	7
2.1.5 Therapiemöglichkeiten.....	8
2.2 Funktionsregler nach Fränkel Typ 3 (FR-3).....	10
2.2.1 Indikation und Anwendungsgebiete.....	10
2.2.2 Historische Entwicklung und Philosophie nach Fränkel.....	11
2.2.3 Wirkung und therapeutische Effekte.....	12
2.2.4 Studienlage zum Funktionsregler nach Fränkel Typ 3 (FR-3).....	13
2.3 Aktuelle Studienlage zur Gaumennahterweiterung und Delairemaske und ihre Auswirkungen auf die Suturen.....	14
2.4 Ziel der vorliegenden Arbeit	16
3. Material und Methodik.....	17
3.1 Ethikantrag	17
3.2 Patienten	17
3.2.1 Behandlungsapparatur.....	19
3.3 Methode.....	19
3.3.1 Fernröntgenseitenbild.....	19
3.3.2 Fernröntgenseitenbildanalyse.....	20
3.3.2.1 Referenzpunkte	20
3.3.2.2 Winkel- und Streckenmessungen.....	23
3.3.2.3 Sagittal-skelettale Streckenmessungen des Oberkiefers	30
3.3.3 Diagramme.....	33
3.3.4 Statistik	34
3.3.5 Methodenfehler nach Dahlberg.....	34

4. Ergebnisse	37
4.1 Allgemein.....	37
4.2 Sagittale Winkel- und Streckenmessungen	37
4.2.1 Ergebnisse innerhalb der Gruppen.....	37
4.2.2 Ergebnisse zwischen den Gruppen.....	38
4.3 Sagittal-skelettale Winkelmessungen zur Beurteilung des Maxillarwinkels in Anlehnung an Delaire und der Lageveränderung von Spina nasalis anterior.....	40
4.3.1 Ergebnisse innerhalb der Gruppen.....	40
4.3.2 Ergebnisse zwischen den Gruppen.....	41
4.4 Vertikale Winkel- und Streckenmessungen	43
4.4.1 Ergebnisse innerhalb der Gruppen.....	43
4.4.2 Ergebnisse zwischen den Gruppen.....	45
4.5 Weichteilmessungen und dentale Winkelmessungen.....	46
4.5.1 Ergebnisse innerhalb der Gruppen.....	46
4.5.2 Ergebnisse zwischen den Gruppen.....	47
4.6 Sagittal-skelettale Streckenmessungen des Oberkiefers	48
4.6.1 Ergebnisse innerhalb der Gruppen.....	48
4.6.2 Ergebnisse zwischen den Gruppen.....	52
5. Diskussion	56
5.1 Patientengut, Methode und Vergleichbarkeit der Ergebnisse, mögliche Limitationen der Studie.....	56
5.2 Ergebnisse der Studie und literarischer Vergleich	57
5.2.1 Sagittale Winkel- und Streckenmessungen.....	59
5.2.2 Sagittal-skelettale Winkelmessungen zur Beurteilung des Maxillarwinkels in Anlehnung an Delaire und der Lageveränderung von Spina nasalis anterior.....	60
5.2.3 Vertikale Winkel- und Streckenmessungen	60
5.2.4 Weichteilmessungen und dentale Winkelmessungen	61
5.2.5 Sagittal-skelettale Streckenmessungen des Oberkiefers	62
5.2.5.1 Morphologische Veränderung der Gaumen- und Oberkieferlänge und der palatinalen und maxillären Suturen	64
5.3 Rückschlüsse der Studie.....	67
6. Literatur- und Abkürzungsverzeichnis.....	69
6.1 Literaturverzeichnis.....	69
6.2 Abkürzungsverzeichnis	78

7. Publikation / Danksagung.....	79
7.1 Publikation	79
7.2 Danksagung.....	79
8. Lebenslauf.....	80

1. Zusammenfassung

1.1 Deutsche Zusammenfassung

Hintergrund und Ziel: Der Funktionsregler nach Fränkel Typ 3 (FR-3) wird bei heranwachsenden Patienten mit einer Klasse-III-Anomalie häufig als funktionskieferorthopädisches Gerät eingesetzt. Eine klare Übereinstimmung hinsichtlich der kraniofazialen Therapieeffekte konnte in der bisherigen Literatur jedoch nicht festgestellt werden, dabei bleibt insbesondere der therapeutische Einfluss auf die Maxilla und Mandibula umstritten. Ziel dieser Studie war die Evaluation skelettaler und dentoalveolärer Behandlungseffekte und die Feststellung, inwiefern altersabhängige Therapieergebnisse auftreten und sich die sagittale Dimension der Maxilla unter der FR-3-Therapie verändert. Ergänzend stellt sich die Frage, ob Längenveränderungen der Maxilla Hinweise auf eine mögliche Beeinflussung des suturalen Wachstums durch den FR-3 liefern können.

Patienten und Methode: Für die vorliegende Studie wurden Fernröntgenseitenbilder von insgesamt 99 Patienten, die im Rahmen einer kieferorthopädischen Therapie mit einem FR-3 behandelt wurden, retrospektiv ausgewertet. Der Untersuchungszeitraum umfasste die Zeitpunkte T1 (vor Behandlungsbeginn) und T2 (nach Behandlung mit dem FR-3). Die Einteilung des Patientenkollektivs erfolgte in 3 Gruppen anhand des chronologischen Alters zu Behandlungsbeginn (PG1: Patienten < 10 Jahre, PG2: Patienten zwischen 10 und < 12 Jahre und PG3: Patienten $\geq$ 12 Jahre). Die kephalometrische Auswertung umfasste skelettale-, dentale- und Weichteilanalysen sowie spezifische metrische Messungen im Oberkiefer.

Ergebnisse: Die Auswertung der Fernröntgenseitenbilder zeigte altersabhängige Therapieeffekte, die sich in PG1 am ausgeprägtesten und in PG3 am geringsten darstellten. Eine Zunahme der Oberkieferlänge beziehungsweise eine Verlängerung des Spinaplanums in anteroposteriore Richtung war nur bei einem Behandlungsbeginn vor dem 12. Lebensjahr zu verzeichnen. Zudem konnten in den beiden jüngeren Patientengruppen (PG1, PG2) ein hoch signifikanter Anstieg des SNA-Winkels, in PG2 zusätzlich ein hoch signifikanter Anstieg des ANB-Winkels beobachtet werden. Änderungen des SNB-Winkels konnten nicht aufgezeigt werden. Die sagittale Lagebeziehung der Kiefer, bestimmt durch die Wits-Wert-Messung, hat sich in PG1 tendenziell verbessert, in PG3 dagegen signifikant verschlechtert. In keiner Gruppe konnte eine Inklinationsänderung der oberen oder unteren Frontzähne beobachtet werden.

Schlussfolgerungen: Die Ergebnisse stützen die These, dass sich die Haupteffekte des FR-3 auf den nasomaxillären Komplex beziehen, welche bei einem Behandlungsstart vor dem 10. Lebensjahr besonders signifikant ausfallen. Mit steigendem Alter reduzieren sich diese Effekte und es beginnt sich eine geringe Wachstumsumlenkung des Unterkiefers in die Vertikale anzudeuten. Eine altersabhängige

Verlängerung der Maxilla entlang des Spinaplanums scheint ein zusätzliches Therapieresultat des FR-3 zu sein. Aus den Ergebnissen ist deshalb die Annahme abzuleiten, dass bei einem Behandlungsstart vor dem 12. Lebensjahr eine suturale Beeinflussung ein zusätzlicher Therapieeffekt der FR-3-Behandlung sein könnte.

1.2 Abstract

Background and objective: The function regulator by Fränkel type 3 (FR-3) is often used as a functional orthodontic appliance in growing patients with Class III anomalies. However, a clear consensus regarding its craniofacial therapeutic effects has not been established in the existing literature, with particular controversy remaining over its impact on the maxilla and mandible. The aim of this study was to evaluate skeletal and dentoalveolar treatment effects and to determine the extent to which age-dependent treatment outcomes occur and how the sagittal dimension of the maxilla changes under FR-3 therapy. In addition, the question arises whether changes in maxillary length may indicate a potential influence of the FR-3 on sutural growth.

Patients and methods: For the present study, lateral cephalometric radiographs of a total of 99 patients who had undergone orthodontic treatment with an FR-3 appliance were retrospectively evaluated. The observation period included two time points: T1 (before the start of treatment) and T2 (after treatment with the FR-3). Patients were divided into three groups based on their chronological age at the start of treatment (PG1: patients < 10 years, PG2: patients between 10 and < 12 years, and PG3: patients $\geq$ 12 years). The cephalometric evaluation included skeletal, dental and soft tissue analyses as well as specific metric measurements in the maxilla.

Results: The analysis of the lateral cephalometric radiographs showed age-dependent treatment effects, which were most pronounced in PG1 and least pronounced in PG3. An increase in maxillary length or an extension of the palatal plane in the anteroposterior direction was observed only when treatment was started before the age of 12. In addition, a highly significant increase in the SNA angle was observed in the two younger patient groups (PG1 and PG2), while PG2 also showed a highly significant increase in the ANB angle. No changes in the SNB angle could be demonstrated. The sagittal jaw relationship, determined by the Wits value measurement, tended to improve in PG1, but deteriorated significantly in PG3. No changes in the inclination of the upper or lower anterior teeth were observed in any of the groups.

Conclusions: The results support the hypothesis that the main effects of the FR-3 relate to the nasomaxillary complex, which are particularly significant when treatment is initiated before the age of 10. With increasing age, these effects diminish and a slight vertical redirection of mandibular growth begins to emerge. An age-dependent lengthening of the maxilla along the palatal plane appears to be an

additional treatment result of the FR-3. The findings therefore suggest that when treatment is started before the age of 12, sutural effects may represent an additional therapeutic outcome of FR-3 treatment.

2. Einleitung

2.1 Grundlagen der Klasse-III-Anomalie

Die Klasse-III-Anomalie stellt etwa 1/4 aller therapiebedürftigen Dysgnathien im kieferorthopädischen Behandlungsspektrum dar [101] und bedarf durch ihr heterogenes Erscheinungsbild einer genauen orofazialen Diagnostik und Therapie. Als Hauptsymptom lässt sich die relative Vorverlagerung des Unterkiefers zum Oberkiefer festlegen, welche mit einer Angle-Klasse III vergesellschaftet ist [29,101]. Extraoral weisen die Patienten häufig ein gerades bis konkaves Profil mit positiver Lippentreppe und einem zurückliegenden beziehungsweise hypoplastischen Mittelgesicht auf. Das Kinn erscheint meist prominent mit verstrichener oder nur schwach ausgeprägter Mentolabialfalte [29]. Intraoral bildet sich eine Klasse-III-Verzahnung meist in Kombination mit einem Kopfbiss oder umgekehrten Überbiss der Front ab. Häufig liegt darüber hinaus ein transversales Defizit zwischen Ober- und Unterkiefer vor, was in einem ein- oder beidseitigen lateralen Kreuzbiss resultieren kann. Aufgrund der variablen Ausprägungsformen in der Vertikalen können klinisch auch ein offener Biss, ein Kopfbiss oder ein Tiefbiss auftreten. Durch Kompensationsmechanismen stellen sich die oberen Frontzähne meist prokliniert, die unteren Frontzähne rekliniert dar [29]. Infolge des verstärkten Unterkieferwachstums und damit erhöhten Platzangebotes kann bereits im frühen Wechselgebiss eine lückige Unterkieferfront ersichtlich werden. Oft ist darüber hinaus eine weite Keimlage der bleibenden Unterkieferzähne zu beobachten und der Zahnwechsel setzt verfrüht ein [101].

Grundlegendes therapeutisches Ziel bei der Behandlung der skelettalen Klasse III liegt schlussfolgernd in der Nachentwicklung und Förderung des Oberkieferwachstums, bei gleichzeitiger Hemmung des Unterkieferwachstums. Deshalb ist häufig eine frühe kieferorthopädische Intervention angezeigt, um das (suturale) Oberkieferwachstum nutzen zu können. Lediglich bei der kieferorthopädisch-kieferchirurgischen Kombinationstherapie empfiehlt sich der Behandlungsbeginn erst kurz vor beziehungsweise nach Wachstumsabschluss, um einem Rezidiv entgegenwirken zu können [101].

2.1.1 Morphologische Klassifikationen in der Literatur

Die Unterteilung der Klasse-III-Anomalien erfolgt häufig basierend auf ihrer Ursache, wobei oftmals der Begriff der Progenie oder des progenen Formkreises Verwendung findet. So ist eine modifizierte Aufgliederung nach Bimler in 4 Erscheinungsformen geläufig: der Progenie, welche sich durch eine sagittale und meist auch vertikale Überentwicklung des Unterkiefers manifestiert, der Pseudoprogenie, welche durch eine hypoplastische Maxilla beziehungsweise eine sagittale Unterentwicklung des

Oberkiefers hervorgerufen wird, dem progenen Zwangsbiss, welcher durch okklusale Störkontakte entstehen kann, sowie dem frontalen Kreuzbiss bei neutraler Bisslage [12,97]. Letzterer entsteht hauptsächlich durch eine veränderte Achsenstellung der oberen und unteren Frontzähne [97]. Eine alternative Unterteilung geht auf Reichenbach [94] zurück, welcher ergänzend Kombinationen der Fehlstellungen mit einfließen lässt: Neben den vier zuvor genannten Formen werden zusätzlich die Makrogenie, die Progenie mit Mikrognathie sowie die Kombination aus Makrogenie und Mikrognathie berücksichtigt. Die Makrogenie stellt dabei den frontalen Kreuzbiss bei überentwickeltem Unterkiefer dar, wohingegen die Mikrognathie den unterentwickelten Oberkiefer abbildet [101]. Dies verdeutlicht, dass eine Hypoplasie des Oberkiefers bei gleichzeitiger Überentwicklung des Unterkiefers auftreten kann. Neben der Einteilung in der sagittalen Ebene erfolgt häufig auch eine Aufteilung in der vertikalen Dimension: Die Klasse-III-Malokklusion wird dabei, zusätzlich zum neutralen Wachstumsmuster, in zwei grundlegende morphologische Typen unterteilt: den divergenten und den konvergenten Typ [45]. Charakteristische Merkmale der divergenten Klasse III sind eine divergierende palatinale, okklusale und mandibuläre Ebene, ein vergrößerter Gonionwinkel sowie mitunter ein anterior offener Biss, während der konvergente Typ sich durch parallele palatinale, okklusale und mandibuläre Ebenen, einen spitzen Gonionwinkel sowie einen tiefen anterioren Überbiss auszeichnet [45].

2.1.2 Ätiologie

Angesichts der komplexen und multifaktoriellen Ätiologie der Klasse-III-Anomalie ist eine präzise diagnostische Abklärung entscheidend, um eine zielgerichtete und effektive Therapie durchführen zu können. In der frühen Literatur wurde die Ätiologie der Progenie anfangs kontrovers diskutiert. Angle und Korkhaus vertraten die Ansicht, dass es keine vererbte Disposition gäbe [29,62] wohingegen Schulze und Wiese schlussfolgerten, dass die Veranlagung zur Klasse-III-Anomalie zwar vererbbar sei, jedoch ein multifaktorieller Mechanismus, welcher aus verschiedenen genetischen und epigenetischen Faktoren besteht, erforderlich sei, um das Auftreten der Progenie auszulösen [29,103]. Die aktuelle Literatur geht bei der Progenie und der Pseudoprogenie ebenfalls von einer erblichen Veranlagung aus, der ein polygenes beziehungsweise multifaktorielles genetisches System zugrunde liegt [101,104]. Darüber hinaus nimmt Schulze die Existenz von Sonderformen mit dominant vererbtem Muster an [104]. Die Ausprägung der Anomalie kann zudem durch exogene Faktoren, wie beispielsweise das Vorliegen von Habits, sowohl gefördert als auch kompensiert werden [104]. Hierzu zählen eine chronische Mundatmung, Zungendysfunktionen wie eine kaudale Zungenruhelage, Traumata, Aplasien und Zahnverlust, sowie Narbenzüge bei LKG-Spalten, die das transversale und sagittale Oberkieferwachstum hemmen und gleichzeitig das Unterkieferwachstum verstärken [38,101]. Fränkel schrieb der muskulären Fehlfunktion eine entscheidende Rolle zu: bei der skelettalen Progenie ist die obere Weichteilkapsel in ihrem Raum eingeeignet, während der untere Teil der äußeren Weichteilkapsel

eine überschüssige Entwicklung aufweist. Ursächlich ist hierbei ein Hypertonus der Protraktoren bei Unterentwicklung der Retraktoren, was zu einer verstärkten Entwicklung des Unterkiefers nach anterior führt [40]. Der progene Zwangsbiss entsteht hingegen meist durch dentoalveoläre Fehlstellungen, welche den Unterkiefer in Schlussbissposition in einer weiter anterior gelegenen Position fixieren [101]. Gründe hierfür können Durchbruchsstörungen der Inzisiven, persistierende Milchzähne oder deren fehlende Abrasion sein [28,104]. Unbehandelt kann sich der progene Zwangsbiss skelettal manifestieren und im weiteren Verlauf zu einer echten Progenie führen. Ursachen des frontalen Kreuzbisses bei neutraler Bisslage können ein lingualer Durchbruchsweg der oberen Frontzähne, Traumata im Milchgebiss, bei denen es zu einer Verlagerung der Zahnkeime kommt, verzögerter Durchbruch der Milchzähne, Überzählige Zähne sowie eine unzureichende Zahnbogenlänge sein [71,112,113].

2.1.3 Epidemiologie

Die Prävalenz der Klasse-III-Anomalie variiert erheblich zwischen, aber auch innerhalb der verschiedenen Populationen, wodurch sich weltweit eine heterogene Verteilung abbildet [43]. Aktuellen Studien zufolge liegt die durchschnittliche weltweite Prävalenz von Malokklusionen bei etwa 56 % [68], wobei die globale Prävalenz der Klasse-III-Anomalie dabei mit rund 5,93 % - 7,04 % angegeben wird [4,43]. In Europa beträgt die Gesamtprävalenz von Malokklusionen etwa 72 %, Klasse-III-Anomalien weisen bei Kindern hierbei eine Prävalenz von 3 % auf [68]. Die höchste Verbreitung in der Bevölkerung wird in Übersichtsarbeiten allerdings für Asien (insbesondere für Südostasien) mit bis zu 15,08 % angegeben [43], aber auch in Südamerika zeigt sich mit einer Prävalenz von 7,83 % ein hohes Auftreten der Klasse-III-Anomalie [20]. In Afrika variiert die Prävalenz zwischen 1,22 % und 4,59 %, während Indien mit 1,19 % die niedrigste Rate aufweist [43].

Die Angaben zur prozentualen Verteilung von Klasse-III-Anomalien bei retrognathen Maxilla oder prognathen Mandibula variieren in der Literatur deutlich. In ihren Untersuchungen an 3358 jungen Männern fanden Staudt und Kiliaridis bei 47,4 % der Probanden eine orthognathe Maxilla in Verbindung mit einer prognathen Mandibula vor. Eine retrognathe Maxilla bei gleichzeitig orthognathen Mandibula wurde bei 19,3 % festgestellt und Kombinationen beider Ausprägungen traten in 8,7 % der Fälle auf [107]. Sanborn dokumentierte in seiner Untersuchung eine ähnliche Prävalenz von 9,5 % für diese Kombinationen [98], während Ellis und McNamara einen deutlich höheren Anteil von 30,1 % beobachteten. Zudem waren das Auftreten einer maxillären Retrognathie bei orthognathen Mandibula und das einer mandibulären Prognathie bei orthognathen Maxilla etwa gleich häufig verteilt (19,5 % und 19,2 %) [30]. Jacobson et al. stellten die höchste Prävalenz bei der isolierten mandibulären Prognathie bei 40,63 % der Männer und 55,89 % der Frauen fest, gefolgt von der isolierten maxillären Retrognathie (28,12 % bei Männern und 23,53 % bei Frauen) [45].

Williams und Aarhus beobachteten bei 50 % der Kinder mit einer Klasse-III-Anomalie eine Retrognathie der Maxilla und bei 40% eine Prognathie der Mandibula [118]. Jacobson et al. stellten bei etwa 13 % der Kinder eine isolierte mandibuläre Prognathie und bei 7,55 % - 10 % eine isolierte maxilläre Retrognathie fest. Der Großteil der Fälle (58,48 % bis 60 %) zeigte jedoch eine Kombination aus beiden Befunden [45]. In Deutschland wurden zudem bei 3,4 % - 5,1 % der Kinder ein frontaler Kreuzbiss der permanenten Zähne dokumentiert [70].

2.1.4 Diagnose einer Klasse-III-Anomalie mittels Fernröntgenseitenbild

Das Fernröntgenseitenbild gilt seit der Einführung in die Kieferorthopädie (1931 von Hofrath und Broadbent) als eines der wichtigsten diagnostischen Mittel zur Beurteilung des Gesichtsschädels [46]. Die Aufnahme erfolgt in der Regel mit links anliegendem Schädel (Norma lateralis) und einem Fokus-Film-Abstand von 1,50 Meter, wodurch die Aufnahmeverzerrung möglichst gering gehalten wird. Für die röntgenkephalometrische Analyse werden anatomische, röntgenologische sowie konstruierte Referenzpunkte bestimmt, welche der Konstruktion von Bezugslinien- und Ebenen dienen. Durch die Verwendung eines Weichteilfilters aus Aluminium ist nicht nur eine gute Reproduzierbarkeit von skelettalen- und dentalen Punkten, sondern auch die von Weichteilpunkten zur Bestimmung des Profils möglich [46]. Durch den Einbau von röntgenopaken Normskalen, meist in die Nasenstütze, ist im Anschluss eine Kalibrierung der Bilddatei und damit auch eine Streckenmessung durchführbar. Inzwischen ist die Verwendung digitaler Röntgengeräte mittels Sensor gängig, wodurch die effektive Dosis im Vergleich zu konventionellen Fernröntgenseitenbildern um ca. die Hälfte reduziert werden konnte [115]. Die Auswertung des Fernröntgenseitenbildes (Kephalemetrie) ist obligater Bestandteil der kieferorthopädischen Diagnostik und lässt Aussagen über die schädelbezügliche Lage der Kiefer beziehungsweise Kieferbasen zueinander und ihre Relation zur Schädelbasis zu. Zudem ist durch die Messung der Achsenstellung der Dentition und metrische Analyse der Gesichtsschädelstrukturen eine differenzierte Kausalitätsanalyse von skelettalen und dentoalveolären Fehlstellungen möglich. Durch Bestimmung von Richtung und Ausmaß des skelettalen Wachstums des Gesichtsschädels erlaubt es sich zudem eine Vorhersage von therapie- und wachstumsbedingter Entwicklung zu tätigen [102].

Folgende kephalometrische Werte treten in Verbindung mit einer skelettalen Klasse-III-Anomalie auf:

- Verkleinerter SNA-Winkel
- Vergrößerter SNB-Winkel
- Vergrößerter SN-Pog-Winkel
- Verkleinerter ANB-Winkel
- Verkleinerter Wits-Wert
- Vergrößerter Kieferwinkel (Gonionwinkel)
- Verkleinerter Sella-Nasion-Abstand

- Vergrößerte Unterkieferlänge
- Vergrößerte untere Gesichtshöhe (Sp-Me)
- Protrusion der oberen Schneidezähne und Retrusion der unteren Schneidezähne (dentale Kompensation)
- Konkaves Profil

Bei der Diagnose der Klasse-III-Anomalie im Milch- oder frühen Wechselgebiss erweist sich das Fernröntgenseitenbild oft als weniger aussagekräftig, da abweichende SNA- und SNB-Werte in diesem Alter meist nur bei stark ausgeprägten Fällen auftreten. Daher kommt der intra- und extraoralen Befundung in dieser Entwicklungsphase eine besonders hohe diagnostische Bedeutung zu [29]. Zu beachten ist, dass obig genannte Werte auch stets in Relation zueinander betrachtet werden sollten. Ein vergrößerter SNB-Winkel stellt bei ebenfalls entsprechend vergrößertem SNA-Winkel nicht zwingend eine Klasse-III-Anomalie dar.

2.1.5 Therapiemöglichkeiten

Um eine weitere Exazerbation des Befundes zu verhindern, besteht bei Patienten mit einer Klasse-III-Anomalie in der Regel ein unmittelbarer Behandlungsbedarf. Allgemein können die Behandlungsprinzipien in prophylaktische, orthopädische, orthodontische und chirurgische Maßnahmen aufgeteilt werden, welche in Abhängigkeit von Patientenalter und Ausprägung der Anomalie angewandt werden [46]. Die Durchführung der entsprechenden Maßnahmen sollten bereits im Milchgebiss oder frühen Wechselgebiss begonnen werden, um eine Förderung des Oberkieferwachstums und eine Hemmung beziehungsweise Umlenkung des Unterkieferwachstums zu ermöglichen und potenzielle artikuläre Fixierungen eines Zwangsbisses zu verhindern. In diesem Rahmen sind das Einschleifen oder Entfernen von zwangsbissverursachenden Milchzähnen, eine frühzeitige Überstellung der Frontzähne mittels Beißspatel oder Oberkieferplatte und das Verwenden einer Kopf-Kinn-Kappe möglich [101]. Früher erfolgte die Kraftapplikation über die Kopf-Kinn-Kappe direkt auf die Kondylen. Inzwischen wird eine Wachstumsumlenkung des Unterkiefers nach dorsal und kaudal mittels geringerem Kraftvektor unterhalb der Kondylen durchgeführt, was für die Patienten deutlich besser zu tolerieren ist. Der Einsatz starker Kräfte, die zu einer Kompression des Kiefergelenkes führen, wird daher nicht mehr empfohlen [93]. Die funktionelle Therapie von Dyskinesien und Habits wie der Zungendysfunktion, insbesondere einer kaudalen Zungenruhelage, dem Zungenstoßschlucken oder der habituellen Mundatmung, zählt ebenfalls zu den prophylaktischen Maßnahmen und sollte begleitend zur kieferorthopädischen Behandlung erfolgen [116]. Bei ausbleibender Normalisierung der Funktionen besteht insbesondere für die Klasse-III-Anomalien ein erhöhtes Risiko für ein morphologisches Rezidiv [38].

Die orthopädischen Maßnahmen nutzen das vorhandene Wachstum, insbesondere das des Oberkiefers aus, um eine Förderung der Oberkieferentwicklung und eine Wachstumshemmung des Unterkiefers zu erreichen. Herausnehmbare funktionskieferorthopädische Geräte wie der Umkehr-Bionator und der FR-3 zielen dabei vor allem auf die Nachentwicklung des Oberkiefers in der (frühen) Wechselgebissphase ab [101], werden jedoch vorrangig bei milden bis moderaten Ausprägungen von Klasse-III-Fällen empfohlen [93]. Bei ausgeprägter Retrognathie der Maxilla ist das Konzept der maxillären Protraktion unter Ausnutzung des suturalen Oberkieferwachstums die bevorzugte Therapiemethode. Die Gesichtsmaske nach Delaire induziert dabei in Kombination mit festsitzenden Geräten, eine Ventralentwicklung des Oberkiefers durch Erweiterung und Anregung der sekundären Wachstumszentren des Gesichtsschädels [29,101]. Der optimale Zeitpunkt für die Therapie liegt nach dem Durchbruch der ersten bleibenden Molaren und Schneidezähne im Oberkiefer. Der Kraftvektor ist nach ventrokaudal ausgerichtet und sollte idealerweise durch das Widerstandszentrum der Maxilla verlaufen, um die maxilläre Rotation zu limitieren. In der Praxis liegt er jedoch etwas kaudaler, was zu einer Abwärtsbewegung der posterioren Maxilla sowie einer Bisshebung führt [93]. Besteht gleichzeitig ein transversales Defizit, so ist die maxilläre Protraktion in Kombination mit einer forcierten Gaumennahterweiterung (GNE) indiziert. Zur Anwendung im frühen Wechselgebiss kommt hierbei die Kappenschiene, im weiter fortgeschrittenen Zahnwechsel die klassische Gaumennahterweiterungs-Apparatur zur Anwendung [6]. Bei vorangeschrittener Verknöcherung der Sutura palatina mediana ist anstelle der konventionellen Gaumennahterweiterung die Minischrauben-unterstützte schnelle Gaumennahterweiterung (MARPE) [120] und nach abgeschlossenem Wachstum die chirurgisch unterstützte Gaumennahterweiterung indiziert (SARPE) [18]. Eine wirksame Methode zur Protraktion des Oberkiefers besteht zudem in der Anwendung von skelettal verankerten Klasse-III-Gummizügen, welche die Kraft auf die Kiefer anstelle der Zähne übertragen. Der ideale Behandlungszeitraum befindet sich in der pubertären Wachstumsphase zwischen dem 12. und 14. Lebensjahr und stellt somit eine wirkungsvolle Alternative für Patienten dar, die das optimale Zeitfenster für eine Therapie mittels Gesichtsmaske bereits überschritten haben [93].

Orthodontische Maßnahmen können begleitend zu den orthopädischen Therapieansätzen stattfinden. Bei rein dental bedingten Klasse-III-Anomalien, welche sich durch fehlerhafte Achsenstellung der Dentition darstellen, sowie bei nur mild ausgeprägten skelettalen Befunden, bei denen eine orthopädische Korrektur nicht mehr möglich ist, kann jedoch auch eine alleinige dentoalveoläre Korrektur unter Berücksichtigung der anatomischen Grenzen erfolgen. Im ersten Fall liegt der Fokus auf der Korrektur der fehlerhaften Achsenstellung der Zähne, im zweiten Fall auf der dentoalveolären Kompensation der skelettalen Diskrepanz im Sinne einer Camouflage-Therapie. Hierbei werden eine maximal mögliche Protrusion der oberen Frontzähne und eine maximal mögliche Retrusion der unteren Frontzähne durchgeführt. Um die anatomischen Grenzen nicht zu überschreiten, sollte ergänzend die Extraktion unterer Prämolaren oder eines unteren Frontzahnes in Erwägung gezogen werden [29,93].

Bei ausgeprägten skelettalen Fehlbildungen, bei denen eine rein konservative kieferorthopädische Behandlung keine erfolgversprechende Prognose bietet, sollte in der Regel auf eine dentoalveoläre Kompensation verzichtet werden. Stattdessen ist nach Abschluss des Wachstums eine chirurgische Lage- beziehungsweise Größenkorrektur der jeweiligen Kiefer anzustreben; die präoperative kieferorthopädische Behandlung im Sinne einer Dekompensation wird für gewöhnlich 1 bis 2 Jahre vor dem chirurgischen Eingriff eingeleitet [101].

2.2 Funktionsregler nach Fränkel Typ 3 (FR-3)

Der FR-3 wurde bereits um das Jahr 1957 von Fränkel in Anlehnung an das Roux'sche Konzept einer „funktionellen Orthopädie“ entwickelt [74] und dient der Behandlung von Klasse-III-Anomalien. Das primäre therapeutische Ziel des FR-3 ist neben der Korrektur von morphologischen Aberrationen die Behebung funktioneller Abweichungen und Dysfunktionen und damit die Gewährleistung einer physiologischen Entwicklung. Die Korrektur der Kiefer- und Zahnfehlstellungen findet nicht nur durch eine direkte, mechanische Wirkung des Gerätes, sondern auch durch eine Adaption des Gewebes an die neue Funktion statt. Häufig wird der Funktionsregler auch als kieferorthopädisches Gymnastikgerät bezeichnet, da die Apparatur überwiegend schleimhautgetragen ist und das Wachstum der Kiefer funktionell beeinflussen soll [40]. Da der Funktionsregler den enoralen Raum kaum einschränkt, sind während des Tragens Abläufe wie das Schlucken oder Sprechen ungehindert möglich [101]. Infolgedessen wirkt er sich besonders effizient auf die Motorik und den Muskeltonus aus und kann die Aneignung neuer orofazialer Funktionsmuster ermöglichen [41].

2.2.1 Indikation und Anwendungsgebiete

Die Behandlungsindikation für den FR-3 liegt bei Klasse-III-Anomalien mit einer Unterentwicklung des Oberkiefers und/oder Überentwicklung des Unterkiefers [60], häufig kombiniert mit einer Entwicklungshemmung im Mittelgesicht. Der FR-3 zielt hierbei vor allem auf eine Nachentwicklung des Oberkiefers ab, soll sich aber auch insbesondere bei der Behandlung von Klasse-III-Anomalien mit skelettaler Hyperdivergenz beziehungsweise posteriorer Rotation des Unterkiefers als besonders wirkungsvoll erweisen [37,59]. Zu empfehlen ist ein Behandlungsstart im frühen Wechselgebiss, vor allem dann, wenn mit einer besonders ausgeprägten Dysgnathieentwicklung zu rechnen ist oder familiäre Dispositionen vorliegen. Nach einer erfolgreichen transversalen und/oder sagittalen Nachentwicklung des Oberkiefers, etwa durch die kombinierte Anwendung von Delairemaske und

Gaumennahterweiterungsapparatur, kann der FR-3 auch im Sinne einer Retentionsapparatur verwendet werden [59,87].

2.2.2 Historische Entwicklung und Philosophie nach Fränkel

Neben dem Funktionsregler Typ 3 entwickelte Fränkel auch den Funktionsregler Typ 1 und 2, welche bei Klasse-II-Anomalien Verwendung fanden, sowie den Funktionsregler Typ 4, welcher bei skelettaler Hyperdivergenz mit frontal offenem Biss eingesetzt wurde [59]. Ziel eines funktionskieferorthopädischen Gerätes sollte der Erhalt der natürlichen Kommunikation zwischen Muskulatur und Alveolarknochen, sowie des natürlichen Kontaktes zwischen Zunge und Alveolarfortsatz und Gaumen sein. Die Kaukräfte sollten dabei nicht in funktionsfremde Richtungen gelenkt werden. Darüber hinaus wurde besonders auf einen intakten Lippenschluss geachtet [38,40]. Die ersten Entwicklungen der Funktionsregler gründeten auf den Erfahrungen, die während der Verwendung von Bukkalplatten gesammelt werden konnten. Diese zeigten effektive Therapieresultate bei der Behandlung von Deckbissfällen auf und führten zu positiven Veränderungen der Gesichtsweichteile [40].

Fränkel stellte die Hypothese auf, dass ein ungestörter Ablauf der Vitalfunktionen nur dann gewährleistet ist, wenn während der Schädelentwicklung lokale Induktions- und Koordinationsmechanismen ungehindert wirken können. Das Vorhandensein reaktiver, kompensatorischer Knochenwachstumszonen stellt dafür eine grundlegende Voraussetzung dar. Jede wachstumsbedingte Formveränderung führt zur Umstellung umgebender Strukturen und übt eine biomechanische Induktionswirkung auf das umliegende Gewebe aus [38]. Fränkel schlussfolgerte, dass mechanische Belastung Knochenumbauprozesse initiieren kann, sofern diese eine richtungsstabile und ausreichend anhaltende Deformation der bindegewebigen oder knöchernen Matrix bewirkt [40,82]. Er wies zudem der apikalen Basis des Alveolarfortsatzes eine besondere Gewichtung zu: Solange diese sich durch den Zahnwechsel noch in einer stetigen Entwicklung befindet, ist eine therapeutische Beeinflussung möglich [38]. Er verwies zudem auf die Eruptionsprozesse im Wechselgebiss, welche den wesentlichen wachstumsinduzierenden Faktor darstellen. Durch die Beeinflussung des perioralen Weichgewebes auf diese Prozesse kann es bei Dysfunktionen wie tonischen Aberrationen zu Störungen des Zahndurchbruchs und einer Entwicklungshemmung kommen, was wiederum zu einer Unterentwicklung des Zahnbogens mit Platzmangel und Engständen führt [34,40].

2.2.3 Wirkung und therapeutische Effekte

Der therapeutische Effekt des Funktionsreglers nach Fränkel Typ 3 (FR-3) beruht vor allem in einer transversalen und sagittalen Nachentwicklung des Oberkiefers sowie in einer Hemmung beziehungsweise Umlenkung des Unterkieferwachstums nach dorsal [37,40,59].

Die Wirkungsweise basiert zum einen auf gerichteter Druckapplikation: Die Bereiche, welche mit den Drahtelementen oder dem Kunststoff im direkten Kontakt stehen, werden einem entsprechenden Druck ausgesetzt. Diese Kraft kann muskulären Ursprungs sein (funktionsaktiv), oder durch Federkraft mittels Drahtelementen hervorgerufen werden (federaktiv). Kurze und stärkere Drahtelemente üben durch die Aktivität der Muskulatur vor allem funktionsaktive Wirkungen aus, während lange und dünne Drähte, wie die Protrusionsfeder im Oberkiefer, eine federaktive Kraftübertragung vorweisen, was zu einer Protrusion des Inzisivensegmentes führt. Über den Labialbogen und die enganliegenden Seitenschilder wird vor allem im Unterkiefer eine Druckeinwirkung ausgeübt, welche diesen im Sinne einer Dorsalverlagerung beeinflusst und eine weitere Vorwärtsbewegung hemmt. Dentale Effekte können in diesem Zusammenhang durch eine Retrusion der unteren Frontzähne auftreten, wenn die Protraktoren der Dorsalverlagerung entgegenwirken und somit die Druckapplikation auf den Labialbogen übertragen wird [40,111].

Zum anderen besteht die Wirkung des FR-3 durch Druckelimination, der Fränkel besondere Wichtigkeit zuschrieb [38]: Die abstehenden Vestibulärschilder des Funktionsreglers eliminieren den Druck auf den Oberkiefer, der durch das umliegende Weichgewebe, wie die Muskulatur, entsteht. Diese Druckelimination findet einerseits transversal durch die Seitenschilder und sagittal durch die Lippenpelotten statt, andererseits wird eine unphysiologische interinzisale beziehungsweise interokklusale Einlagerung der Lippen und Wange verhindert [38]. Fränkel nennt zudem eine direkte Wirkung durch das Ausschalten des Wangendrucks und eine indirekte Wirkung dadurch, dass der Zungendruck überwiegen kann und die oberen Seitenzähne sich nach vestibulär aufrichten können [40]. Ein weiterer Wirkmechanismus des Funktionsreglers liegt in der gerichteten Zugapplikation: Durch die im Oberkiefer vom Alveolarfortsatz abstehenden Wangenschilder und frontalen Pelotten wird eine Zugspannung in der Umschlagfalte kreiert. Hierdurch entsteht eine Dehnung und Vergrößerung der äußeren Weichteilkapsel des Oberkiefers sowie eine Zugbeanspruchung auf das Periost und die äußeren Alveolenwände [40]. Der Kraftvektor ist nach vestibulär gerichtet und wird zusätzlich durch die Wechselwirkung der Protraktoren verstärkt, da eine anteriore Unterkieferverlagerung eine anteriore Bewegung der Lippenpelotten und Seitenschilder zur Folge hat. Eine konstante Zugspannung setzt einen ausreichenden Abstand der Lippenpelotten zur Umschlagfalte voraus. Durch die Interaktion aus Druckelimination und Zugspannung wird das appositionelle Knochenwachstum an den Außenflächen der Maxilla, insbesondere im anterioren Bereich gefördert [39,75,111].

2.2.4 Studienlage zum Funktionsregler nach Fränkel Typ 3 (FR-3)

Zahlreiche Studien haben sich in den letzten Jahrzehnten mit den skelettalen und dentoalveolären Effekten des FR-3 beschäftigt. Die Ergebnisse legen nahe, dass die Therapie mit dem FR-3 sowohl dentale als auch skelettale Korrekturen der orofazialen Strukturen bewirken kann. Generalisierte Übereinstimmungen lassen sich dahingehend finden, dass der therapeutische Effekt auf die Mandibula durch eine Wachstumsumlenkung in eine dorsokaudale beziehungsweise dorsale und posteriore Richtung erreicht wird [10,51,52,73,111].

Auf skelettaler Ebene wurde unter anderem von Pangrazio-Kulbersh et al. und Baik et al. eine Anteriorverlagerung der Maxilla [87], sowie eine Hemmung einer weiteren Translation der Mandibula durch Wachstumsumlenkung in eine dorsokaudale Richtung beobachtet [10]. Auch McNamara und Hume dokumentierten bei der FR-3-Therapie eine Umlenkung des Unterkieferwachstums in vertikale Richtung. Zudem zeigte sich während der Behandlung eine Zunahme der unteren Gesichtshöhe, während gleichzeitig eine Verkleinerung des unteren Gonionwinkels festgestellt wurde [73,87]. Auch Ülgen und Firatli kamen in ihren Untersuchungen zu ähnlichen Ergebnissen [111]. Im Gegensatz zu Fränkel, welcher skelettale Effekte auf den Oberkiefer, inklusive einer Knochenapposition am A-Punkt beobachtete [39], konnte in ihren Studien jedoch keine signifikante Veränderung des SNA-Winkels nachgewiesen werden [111]. McNamara und Hume stellten zwar skelettale Effekte auf den Oberkiefer fest, jedoch eher im Sinne einer anterioren und kaudalen Bewegung des gesamten Maxillarkomplexes [73]. Kerr und Ten Have verzeichneten hingegen weder skelettale Effekte auf die Maxilla noch ein Vorwärtswachstum des Maxillarkomplexes. Zudem war in ihren Studien keine signifikante Hemmung des Unterkieferwachstums beziehungsweise der Unterkieferlänge im Vergleich zur Kontrollgruppe zu erkennen [52]. Viel eher wurde laut Kerr et al. der therapeutische Effekt des FR-3 durch eine Proklination der oberen- und Reklination der unteren Frontzähne erzielt [51].

Das Vorliegen dentaler Effekte wurde einheitlich auch in den anderen Studien beobachtet: Ülgen und Firatli verzeichneten eine signifikante Vergrößerung des overjets, bei Retrusion der Unterkieferfront und eine Verkleinerung des overbites [111], McNamara und Hume konnten eine Proklination der oberen Front, jedoch keine Reklination der unteren Front erkennen, zudem führten die oberen Molaren eine nach anterior und kaudal gerichtete Bewegung durch [73]. Im Gegensatz dazu stellten Baik et al. eine Proklination der oberen Inzisiven, ausgeprägter jedoch eine Reklination der unteren Frontzähne fest. Signifikante Unterschiede wurden zudem in der Zunahme des overjets, nicht aber eine Veränderung des overbites aufgezeichnet. Ebenfalls war eine mesiokaudale Bewegung der oberen Molaren beobachtet worden [10]. Loh und Kerr sahen die Korrektur des anterioren Kreuzbisses durch eine Veränderung der Inklination der Schneidezähne sowie durch eine Rückrotation des Unterkiefers, begleitet von einer Zunahme der Gesichtshöhe. [67]

Die aktuelle Studienlage zu den suturalen Effekten des FR-3 auf den Oberkiefer ist bislang noch unzureichend. Während Oktay et al. von keinerlei skelettalen Effekten auf die Maxilla und ihren Suturen

ausgingen [86], vermutete McNamara, dass während der FR-3-Therapie zumindest eine geringe Expansion in den maxillären beziehungsweise palatinalen Suturen erfolgt, während der Großteil der Erweiterung lateral im Alveolarbereich stattfindet [75].

2.3 Aktuelle Studienlage zur Gaumennahterweiterung und Delairemaske und ihre Auswirkungen auf die Suturen

Suturales Wachstum und Prozesse wie Apposition und Resorption, die für den Erhalt der Gesamtform und Proportionen der Knochen während des Wachstums notwendig sind, stellen eine zentrale Komponente bei der Entwicklung des nasomaxillären Komplexes dar [88]. Zielstrukturen der Gaumennahterweiterung (GNE) und der maxillären Protraktion sind insbesondere die suturalen Verbindungen. In der wissenschaftlichen Literatur werden unterschiedliche Ergebnisse hinsichtlich der Auswirkungen einer GNE in Kombination mit maxillärer Protraktion auf die Maxilla beschrieben. Während Vaughn et al. in ihren Gruppenvergleichen keine signifikanten Unterschiede zwischen einer GNE-unterstützten Protraktion im Vergleich zur alleinigen Protraktion mittels Gesichtsmaske feststellen konnten [114], vermuteten Foersch et al., dass die Protraktion in Kombination mit der GNE die sagittale Entwicklung der Maxilla positiv beeinflusst. Dabei galt die transversale Erweiterung nicht als primärer Erfolgsfaktor, jedoch traten zahnbezogene Nebenwirkungen häufiger auf, wenn keine Expansion durchgeführt wurde [36]. Die Effekte der kombinierten Expansion und Protraktion betreffen zum einen die Sutura palatina mediana, zum anderen sind auch deutliche Auswirkungen auf benachbarte Strukturen, wie auf die Apertura piriformis, den Jochbeinpfiler, den Processus pterygoideus, sowie die Sutura temporozygomatice, Sutura zygomaticomaxillaris und Sutura pterygopalatina nachweisbar [1,2,19]. Priyadarshini et al. beobachteten eine Abwärts- und Vorwärtsbewegung des Oberkiefers mit einer Tendenz zur posterioren Rotation und stellten das höchste Spannungsgeschehen entlang der Sutura palatina mediana, der Sutura pterygomaxillaris, Sutura nasomaxillaris und der Sutura frontomaxillaris fest [92]. Für das Konzept der alternierenden Aktivierung/Deaktivierung der Suturen (Alt-RAMEC) konnten in der Literatur zudem verstärkende Effekte hinsichtlich der Oberkieferverlagerung mittels Gesichtsmaske dargestellt werden [36,89]. Koriath und Versluis schrieben der GNE sowohl für die Korrektur von transversalen Diskrepanzen als auch für die Protraktion des Oberkiefers durch Remodellierung der zirkummaxillären Suturen einen therapeutischen Nutzen zu [36]. Kim et al. kamen ebenfalls zu dem Schluss, dass eine transversale Expansion den Effekt der Oberkieferprotraktion verbessern und dentale Veränderungen verringern kann. Die Studie zeigte darüber hinaus, dass insbesondere bei jüngeren Patienten bis zum 10. Lebensjahr eine Protraktion in Kombination mit einer initialen Expansionsphase zu ausgeprägteren skelettalen Effekten führt [55]. Delaire et al. hoben ebenfalls die Relevanz des Patientenalters hervor: Die GNE-unterstützte Protraktion der Maxilla war

umso effektiver, je jünger der Patient war, da diese eng mit dem Wachstum in den Suturen und dem speziellen Wachstum des Oberkiefers zusammenhängt [24]. Bacetti et al. konnten in ihren Studien zur GNE-unterstützten Protraktion insbesondere in der Frühbehandlungsgruppe eine effektive Vorverlagerung der Oberkieferstrukturen erzielen, während in der Spätbehandlungsgruppe kein signifikanter Zugewinn an Oberkieferwachstum im Vergleich zu den entsprechenden unbehandelten Kontrollpersonen festgestellt wurde [6]. Auch bei der isolierten GNE-Therapie kamen weitere Autoren zu dem Ergebnis, dass die Anwendung der GNE-Behandlung in der prä-peak-Phase der Pubertät zu ausgeprägteren transversalen skelettalen Veränderungen führt als in der post-peak-Phase [8,9,14,106]. Bacetti et al. stellten außerdem fest, dass die Anwendung der GNE in der post-peak-Phase zu stärkeren dentoalveolären Veränderungen führte [9]. Kinzinger et al. konnten in einer Studie anhand von DVT- und Modellanalysen darstellen, dass die maxilläre Erweiterung nach GNE bei Kindern bis zum 10. Lebensjahr überwiegend parallel verlief, während sich mit zunehmendem Alter, insbesondere ab dem 12. Lebensjahr, ein V-förmiger Öffnungsmodus darstellte (transversal: anterior > posterior und vertikal: inferior > superior) [56], welcher auch von Weissheimer et al. beobachtet werden konnte [116]. Die paarigen pterygopalatomaxillären Suturen waren lediglich in der jüngsten Patientengruppe (< 10 Jahren) geöffnet, bei älteren Patienten hingegen vollständig geschlossen. Die altersabhängigen Effekte der Gaumennahterweiterung sind auf Lageveränderungen der maxillären Rotations- und Widerstandszentren zurückzuführen [56]. Auch bei der kombinierten Behandlung mit GNE und Delaire-Maske konnte aufgezeigt werden, dass der Reifegrad der palatinalen und maxillären Suturen einen entscheidenden Einfluss auf den Therapieerfolg darstellt [57]. Vor dem 12. Lebensjahr konnten signifikant größere Längenzunahmen des Gaumens beobachtet werden als bei älteren Patienten, zudem konnte eine signifikante Verbesserung der basalen Kieferrelation durch maxilläre Ventralverlagerung nur bei Patienten unter 12 Jahren dargestellt werden. Insbesondere die Sutura palatina transversa wies hierbei in DVT-Aufnahmen altersabhängige morphologische Veränderungen auf [57].

Auch Sayar und Kilinc schlussfolgerten, dass eine differenzierte Betrachtung in Abhängigkeit vom Patientenalter erforderlich ist, da das skelettale Reifungsniveau maßgeblich die biologische Reaktion auf eine suturale Distraction beeinflusst [100].

2.4 Ziel der vorliegenden Arbeit

In der Literatur sind bisher kaum morphologische Untersuchungen dokumentiert, welche mögliche Auswirkungen des Funktionsreglers nach Fränkel Typ 3 (FR-3) auf die Suturen des Oberkiefers, insbesondere der Sutura palatina transversa, beleuchten. Diese Arbeit versucht herauszuarbeiten, ob es anhand einer kephalometrischen Studie möglich ist, neben den bekannten skelettalen und dentalen Effekten auch therapeutische Effekte auf die Länge des Oberkiefers nachweisen zu können.

Ziel war somit die Beantwortung folgender Fragen:

- Ändert sich die sagittale Länge der Maxilla während der Therapie mit dem FR-3?
- Liefern diese Längenveränderungen erste Hinweise dahingehend, ob eine Behandlung mit dem FR-3 auch suturale Effekte ausüben kann?
- Ist diese Änderung abhängig vom Alter?
- Stimmen bisherige Studien zu dentalen und skelettalen Effekten des FR-3 mit den Ergebnissen aus dieser Studie überein?
- Ist eine Therapieempfehlung zum optimalen Therapiezeitpunkt mit einem FR-3 abzuleiten?

3. Material und Methodik

3.1 Ethikantrag

Ein Votum der Ethikkommission war für die vorliegende Studie nicht erforderlich, da es sich um eine retrospektive Studie handelt und die Daten anonymisiert wurden.

3.2 Patienten

Das Patientenkollektiv der Studie umfasste insgesamt 99 Patienten, welche eine Behandlung in einer Fachzahnarztpraxis für Kieferorthopädie erhielten. Einschlusskriterium für die Studie war das Vorliegen einer Angle-Klasse III, welche sich in einer Retro- oder Mikrognathie des Oberkiefers manifestierte. Alle Patienten (52 weiblich, 47 männlich) wurden ausschließlich mit dem Funktionsregler nach Fränkel Typ 3 (FR-3) behandelt.

Die Apparatur sollte täglich mindestens 11 Stunden getragen werden. Die Einhaltung dieser Tragezeit wurde durch einen in der Apparatur integrierten TheraMon®-Chip (MC Technology GmbH, Hargelsberg, Österreich) geprüft.

Patienten mit orofazialen Syndromen, Fehlbildungen der Kiefer, extrahierten Zähnen im Oberkiefer, sowie mit einer Prognathie des Unterkiefers bei gleichzeitiger Orthognathie des Oberkiefers wurden von der Studie ausgeschlossen.

Die Einteilung des Patientenkollektivs erfolgte anhand des chronologischen Alters zum Zeitpunkt des Behandlungsstartes mit dem FR-3. Hieraus ergab sich eine Zuordnung in die Gruppe PG1 (Patientengruppe 1) für Patienten < 10 Jahre, PG2 (Patientengruppe 2) für Patienten zwischen 10 und < 12 Jahre und eine Zuordnung in die Gruppe PG3 (Patientengruppe 3) für Patienten ≥ 12 Jahre.

Das Kollektiv der Gruppe PG1 bestand aus 37 Patienten, davon 18 männliche und 19 weibliche Patienten. Das durchschnittliche Alter bei Eingliederung des FR-3 betrug bei PG1 8,41 Jahre. PG2 bestand ebenfalls aus 37 Patienten, davon 16 männliche und 21 weibliche Patienten. Das Durchschnittsalter bei Eingliederung des FR-3 betrug 11,07 Jahre. Patientengruppe 3 bestand aus insgesamt 25 Patienten, hiervon waren 13 männlich und 12 weiblich und das durchschnittliche Alter bei Eingliederung betrug 12,72 Jahre.

Die exakten Angaben zur Einteilung der Patienten, Alter zum Zeitpunkt des Anfangsbefundes und Abstand zwischen diesem zum Behandlungsstart, sowie Abstand zwischen den dokumentierten Fernröntgenseitenbildern zum Zeitpunkt T1 und T2 können den darauffolgenden Tabellen entnommen werden.

PG1 = Patientengruppe 1, Alter: < 10 Jahre (n = 37)

PG2 = Patientengruppe 2, Alter: 10 - < 12 Jahre (n = 37)

PG3 = Patientengruppe 3, Alter: $\geq$ 12 Jahre (n = 25)

Fernröntgenseitenbild	Zeitpunkt (T)
Anfangsröntgenbild	T1: Vor Behandlungsbeginn
Zwischenröntgenbild	T2: Nach Therapie mit FR-3

PG1	Mittelwert (M)	Standardabweichung (SD)
Alter T1 (in Jahren)	8,25	1,08
Alter bei Start mit FR-3 (in Jahren)	8,42	1,07
Abstand zwischen T1 und Start mit FR-3 (in Monaten)	2,08	1,19
Tragedauer FR-3 (in Monaten)	13,18	4,07
Alter T2 (in Jahren)	9,5	1,0

PG2	Mittelwert (M)	Standardabweichung (SD)
Alter T1 (in Jahren)	10,81	0,55
Alter bei Start mit FR-3 (in Jahren)	11,07	0,51
Abstand zwischen T1 und Start mit FR-3 (in Monaten)	3,18	1,31
Tragedauer FR-3 (in Monaten)	11,24	3,67
Alter T2 (in Jahren)	12,01	0,55

PG3	Mittelwert (M)	Standardabweichung (SD)
Alter T1 (in Jahren)	12,48	0,62
Alter bei Start mit FR-3 (in Jahren)	12,72	0,60
Abstand zwischen T1 und Start mit FR-3 (in Monaten)	2,88	1,53
Tragedauer FR-3 (in Monaten)	10,04	1,80
Alter T2 (in Jahren)	13,55	0,65

Tabelle 1: Alter der Patienten zum Zeitpunkt T1, Start mit FR-3 und zum Zeitpunkt T2, Abstand zwischen T1 und Start mit FR-3, sowie Tragedauer des FR-3.

3.2.1 Behandlungsapparatur

Bei dem in der Praxis eingesetzten Funktionsregler handelte es sich um eine gering modifizierte Variante des klassischen Funktionsreglers nach Fränkel Typ 3 (FR-3). Dieser bestand wie auch der konventionelle FR-3 aus 2 lateralen Kunststoffschildern, den Oberlippenpelotten und einem eng anliegenden unteren Labialbogen, sowie Drahtauflagen auf den jeweils letzten Molaren im Ober- und Unterkiefer. Im Oberkiefer wiesen die Seitenschilder sowie die Lippenpelotten einen Abstand von 2 mm bis 3 mm zum Vestibulum auf, im Unterkiefer wurde der Kunststoff dicht anliegend gestaltet. Weitere Drahtelemente waren ein transpalatinaler Verbindungsbogen (Transpalatinalbogen) und ein Protrusionsbogen für die oberen Frontzähne. Um eine sagittale Anpassung der Pelotten zu ermöglichen, fand eine Modifikation statt: Beidseits der Seitenschilder wurde ein Segment mit Stellschraube integriert. Durch das Schrauben war eine individuelle Vergrößerung des Abstandes zwischen den Pelotten und der vestibulären Umschlagfalte möglich. Die Herstellung des FR-3 erfolgte konventionell auf Gipsmodellen, der Konstruktionsbiss erfolgte im Rückbiss bei möglichst geringer Bissperrung.



Abbildung 1: Modifizierter Funktionsregler nach Fränkel Typ 3

3.3 Methode

3.3.1 Fernröntgenseitenbild

Die Anfertigungen der Fernröntgenseitenbilder fanden im Rahmen der klinischen Routine statt. Sie wurden somit nicht speziell für die Studie durchgeführt. Die Aufnahmen erfolgten vor dem kieferorthopädischen Behandlungsbeginn (Zeitpunkt T1) und nach der Therapie mit dem FR-3

(Zeitpunkt T2). Zur Anwendung kam das digitale Röntgengerät „Vista Pano S Ceph“ der Firma Dür Dental (Dür Dental SE, Bietigheim-Bissingen), mit einem Fokus-Film-Abstand von 1,75 Meter. Der Objekt-Film-Abstand sollte möglichst gering gehalten werden und betrug 220 mm. Der Vergrößerungsfaktor betrug laut Herstellerangaben den Wert 1,14. Die Aufnahmespannung (Röhrenspannung) betrug abhängig von Alter und Körpergröße der Patienten zwischen 90 – 97 Kilovolt, die Aufnahmestromstärke (Anodenstrom) betrug 15 Milliampere und die Belichtungszeit belief sich auf 4100 Millisekunden. Die Einstellung des Kopfes erfolgte standardgemäß in der Norma lateralis. Als Bezugspunkte dienten der Porus acusticus externus und das Weichteilnasion, welche mittels Ohröhrchen und Nasenstütze fixiert wurden.

3.3.2 Fernröntgenseitenbildanalyse

Die Analyse der Fernröntgenseitenbilder erfolgte mittels der Software Ivoris Analyze (Computer konkret AG, DentalSoftwarePower, Falkenstein, Germany, Version 8.2.80.130). Insgesamt wurden 198 Fernröntgenseitenbilder untersucht (jeweils 74 Röntgenbilder aus PG1 und PG2 und 50 Röntgenbilder aus PG3). Für die vorliegende Studie wurde eine eigene Analyse über die Software Ivoris Analyze erstellt. Vor jeder Einzelauswertung erfolgte die Kalibrierung der Bild-Datei, um die Daten auf eine Vergrößerung von 0% zu korrigieren und eine exakte Streckenmessung in Millimeterangabe gewährleisten zu können. Die Fernröntgenseitenbildanalyse umfasste 23 für die Studie relevante Parameter, die in die statistische Analyse einbezogen wurden.

3.3.2.1 Referenzpunkte

Für die Messung, Konstruktion und Auswertung dieser Parameter wurden folgende Referenzpunkte verwendet beziehungsweise erstellt:

Skelettale Referenzpunkte:

Kürzel	Bezeichnung	Definition
A	A-Punkt	Posteriorster Punkt der anterioren Kontur des Oberkieferalveolarfortsatzes in der Mediansagittalebene
Ar	Artikulare	Konstruierter / röntgenologischer Punkt: Schnittpunkt des Unterrandes der hinteren Schädelbasis mit der dorsalen Kontur des Collum mandibulae

B	B-Punkt	Posteriorster Punkt der anterioren Kontur des Unterkieferalveolarfortsatzes in der Mediansagittalebene
Ct (Tga)	Corpus-Tangenten-Punkt	Dorsokaudalster Punkt des Unterkieferkörpers, Anlagepunkt einer Tangente von Menton an den horizontalen Ast der Mandibula nahe des Kieferwinkels
CT	Temporalere Kondylenpunkt	Übergang von der Konkavität der Fossa mandibulare in die Konvexität der Eminentia articularis
Gn	Gnathion	Anteriorster und inferiorster Punkt des knöchernen Kinns in der Mediansagittalebene
Go	Gonion	Schnittstelle der Corpus-Tangente mit der Ramus-Tangente
M	M-Punkt	Punkt nach Delaire/Enlow: Schnittpunkt der Sutura frontomaxillaris, Sutura frontonasalis und Sutura nasomaxillaris / vorderer Teil der frontomaxillären Verbindung [23,26]
Me	Menton	Kaudalster Punkt der Unterkiefersymphyse in der Mediansagittalebene
N	Nasion	Anteriorster Punkt der Sutura nasofrontalis in der Mediansagittalebene
Or	Orbitale	Kaudalster Punkt der knöchernen Orbita
P	Porion	Kranialster Punkt des knöchernen Foramen acusticum externum
Rt (Tgp)	Ramus-Tangenten-Punkt	Posteriorster Punkt des Ramus ascendens im Bereich des Kieferwinkels, Anlagepunkt einer Tangente von Artikulare an den aufsteigenden Ast der Mandibula nahe des Kieferwinkels
S	Sella	Konstruierter Mittelpunkt der Sella turcica in der Mediansagittalebene
S'	Tuberculum sellae	Spitze des Processus clinoideus medius in der Mediansagittalebene
Spa	Spina nasalis anterior	Anteriorster Punkt der knöchernen Spina nasalis in der Mediansagittalebene
Spp	Spina nasalis posterior	Posteriorster Punkt der knöchernen Spina nasalis in der Mediansagittalebene
Zy	Processus zygomaticus	Tiefster Punkt am Processus zygomaticus ossis maxillaris in der Mediansagittalebene

Tabelle 2: Skelettale Referenzpunkte im Fernröntgenseitenbild. Eingeteilt in Abkürzung, Beschreibung - und Definition des Punktes (von links nach rechts), alphabetische Auflistung.

Dentale Referenzpunkte:

Kürzel	Bezeichnung	Definition
ApiOK	Apikale OK1	Apikale Wurzelspitze des am weitesten labial stehenden mittleren Oberkieferfrontzahnes

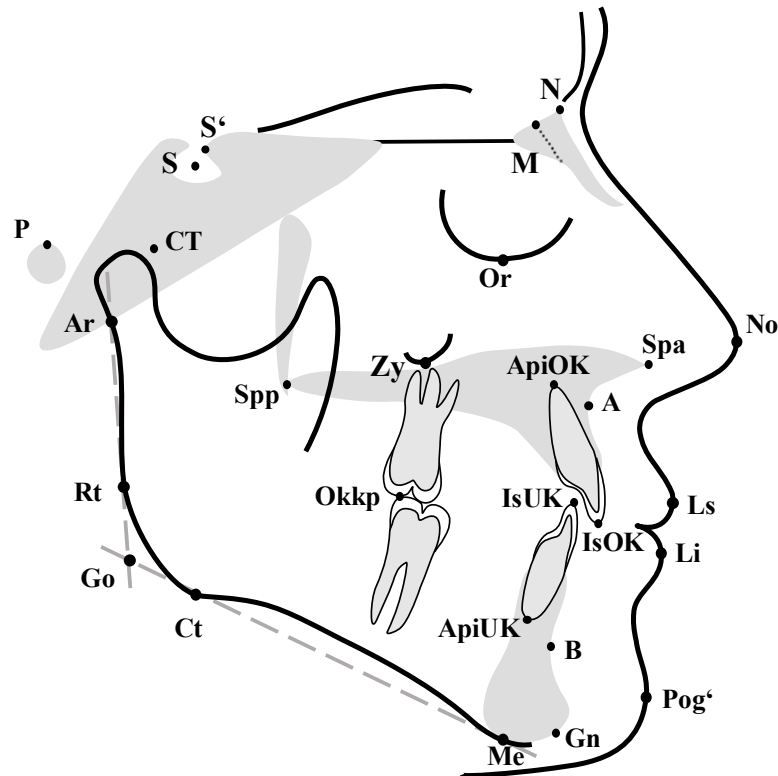
ApiUK	Apikale UK1	Apikale Wurzelspitze des am weitesten labial stehenden mittleren Unterkieferfrontzahnes
IsOK	Inzisale OK1	Inzisale Kante des am weitesten labial stehenden mittleren Oberkieferfrontzahnes
IsUK	Inzisale UK1	Inzisale Kante des am weitesten labial stehenden mittleren Unterkieferfrontzahnes.
Okkp	Okklusionspunkt posterior	Distaler Okklusionspunkt der ersten Molaren

Tabelle 3: Dentale Referenzpunkte im Fernröntgenseitenbild. Eingeteilt in Abkürzung, Beschreibung - und Definition des Punktes (von links nach rechts), alphabetische Auflistung.

Weichteil Referenzpunkte:

Kürzel	Bezeichnung	Definition
Li	Labrale inferius	Anteriorster Punkt der Unterlippe
Ls	Labrale superius	Anteriorster Punkt der Oberlippe
No	Nasale	Anteriorster Punkt der Nasenspitze
Pog‘	Weichteil-Pogonion	Anteriorster Punkt des Weichteilkinns

Tabelle 4: Weichteil-Referenzpunkte im Fernröntgenseitenbild. Eingeteilt in Abkürzung, Beschreibung - und Definition des Punktes (von links nach rechts), alphabetische Auflistung.



Referenzpunkte der Fernröntgenseitenanalyse

Abbildung 2: Skelettale-, dentale- und Weichteil-Referenzpunkte der Fernröntgenseitenanalyse.

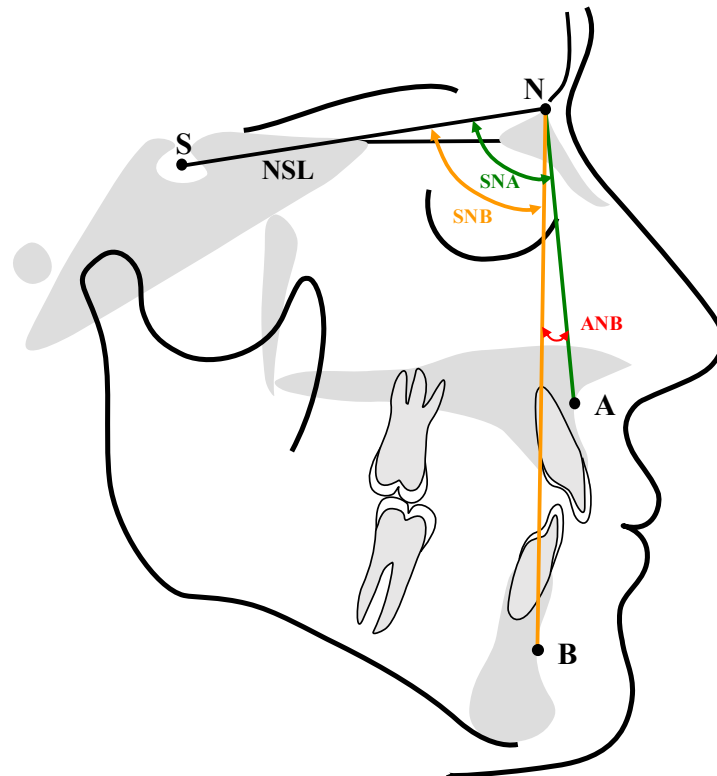
3.3.2.2 Winkel- und Streckenmessungen

Bei der Kephalometrie der Fernröntgenseitenbilder wurden folgende Winkel und Strecken gemessen:

Sagittale Strecken- und Winkelmessungen:

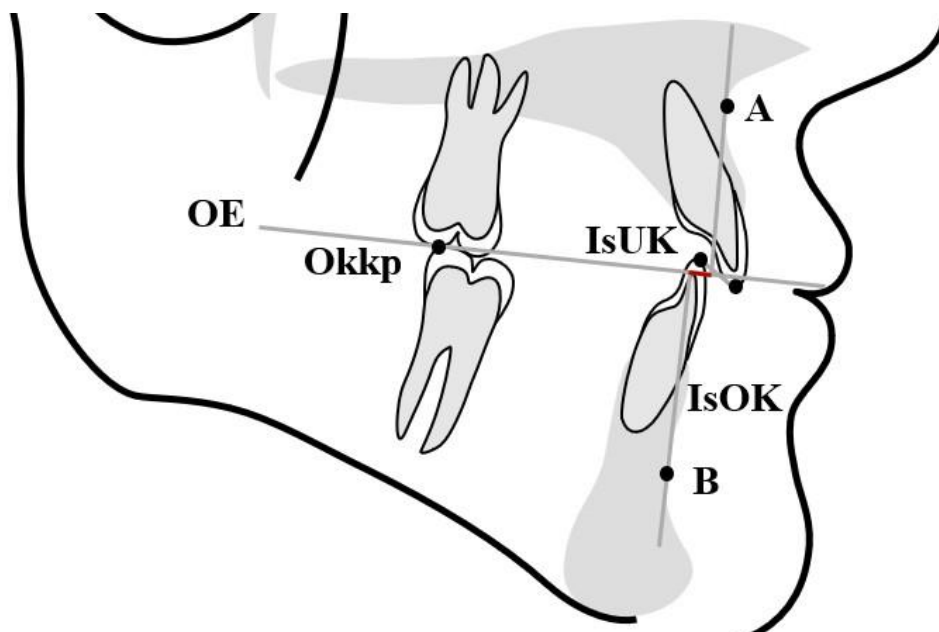
Winkel	Normwerte mit Referenzbereich	Definition
ANB-Winkel	$2^\circ \pm 2^\circ$ (Steiner)	Sagittale Relation des Oberkiefers zum Unterkiefer
SNA-Winkel	$82^\circ \pm 2^\circ$ (Steiner)	Sagittale Relation des Oberkiefers zur Schädelbasis
SNB-Winkel	$80^\circ \pm 2^\circ$ (Steiner)	Sagittale Relation des Unterkiefers zur Schädelbasis
Wits-Wert	0 mm $\pm$ 1 mm (Steiner)	Beschreibt die sagittale Lagebeziehung der Kiefer zueinander

Tabelle 5: Sagittale Strecken- und Winkelmessungen mit Normwerten inklusive Referenzbereich und Definition, alphabetische Auflistung.



Sagittale Winkelmessungen

Abbildung 3: Sagittale Winkelmessungen: ANB mittels rotem Pfeil dargestellt, SNA mittels grünem Pfeil dargestellt und SNB mittels orangenem Pfeil dargestellt. NSL = Nasion-Sella-Linie.



Wits-Wert

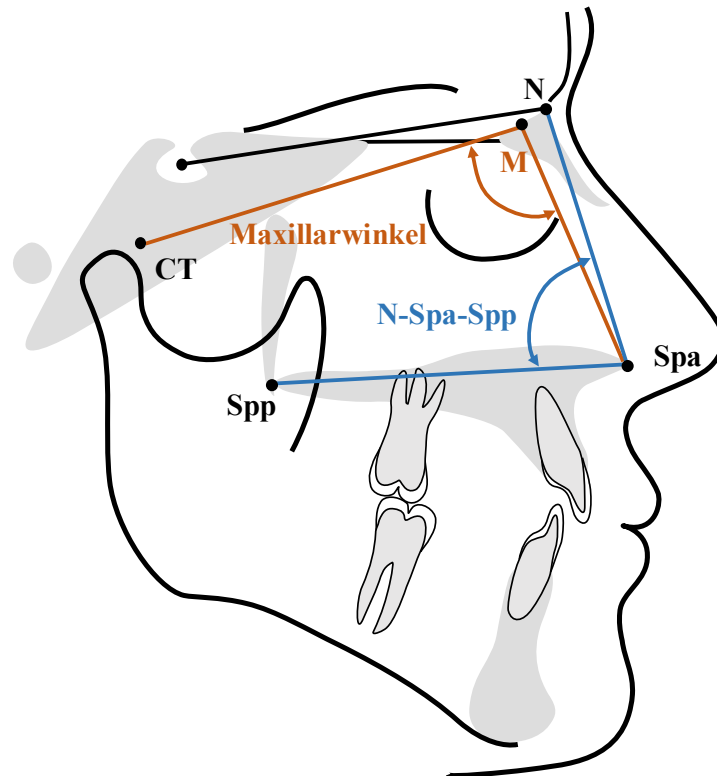
Abbildung 4: Darstellung der Wits-Analyse: Projektion des A- und B- Punktes auf die Okklusionsebene (OE: graue Linie), Darstellung der Linie zur Messung und Bestimmung des Wits-Wertes in Rot. Angaben erfolgen in Millimeter.

Die Winkel SNA und SNB geben Informationen über die sagittale Lagebeziehung des Ober- beziehungsweise Unterkiefers zur anterioren Schädelbasis. Ein vergrößerter Winkel weist hierbei auf eine relative Vorverlagerung des entsprechenden Kiefers, ein verkleinerter Winkel auf eine relative Rücklage des entsprechenden Kiefers hin. Die Differenz aus SNA und SNB ergibt den ANB-Wert, welcher Aufschluss über die Relation der Kiefer zueinander und somit über die skelettale Klasse gibt. Ein verkleinerter ANB-Wert weist auf eine skelettale Klasse III, ein vergrößerter ANB-Wert auf eine skelettale Klasse II hin [46]. Zur Bestimmung des Wits-Wertes werden Lote von den Punkten A und B auf die Okklusionsebene gezogen. Der Abstand zwischen den entstandenen Schnittpunkten zeigt anschließend den Wits-Wert an. Liegt der Schnittpunkt der Linie A – OE weiter anterior, so liegt ein positiver Wits-Wert vor. Liegt der Schnittpunkt der Linie B – OE weiter anterior, so ergibt sich ein negativer Wits-Wert. Bei negativen Werten über den Normwert hinaus spricht man von einer mesialen Basalrelation, oder auch von einer skelettalen Klasse III. Bei positiven Werten über den Normwert hinaus wird von einer distalen Basalrelation oder auch von einer skelettalen Klasse II, bei Werten innerhalb des Normbereichs wird von einer neutralen Basalrelation oder auch skelettalen Klasse I gesprochen.

Sagittal-skelettale Winkelmessungen zur Beurteilung des Maxillarwinkels in Anlehnung an Delaire und der Lageveränderung von Spina nasalis anterior:

Winkel	Normwerte mit Referenzbereich	Definition
Maxillarwinkel	Keine Normwerte vorhanden	Winkel zur Beurteilung der Maxillaposition gegenüber der kraniofazialen Basis in Anlehnung an Delaire [23,26]
N-Spa-Spp-Winkel	Keine Normwerte vorhanden	Relative sagittale Relation der Spina nasalis anterior

Tabelle 6: Sagittal-skelettale Winkelmessungen: Keine Normwerte vorhanden, da es sich um keine gängigen Winkelmessungen handelt, alphabetische Auflistung.



Sagittal-skelettale Winkelmessungen

Abbildung 5: Sagittal-skelettale Winkelmessungen: Maxillarwinkel mittels braunem Pfeil dargestellt, N-Spa-Spp-Winkel mittels blauem Pfeil dargestellt.

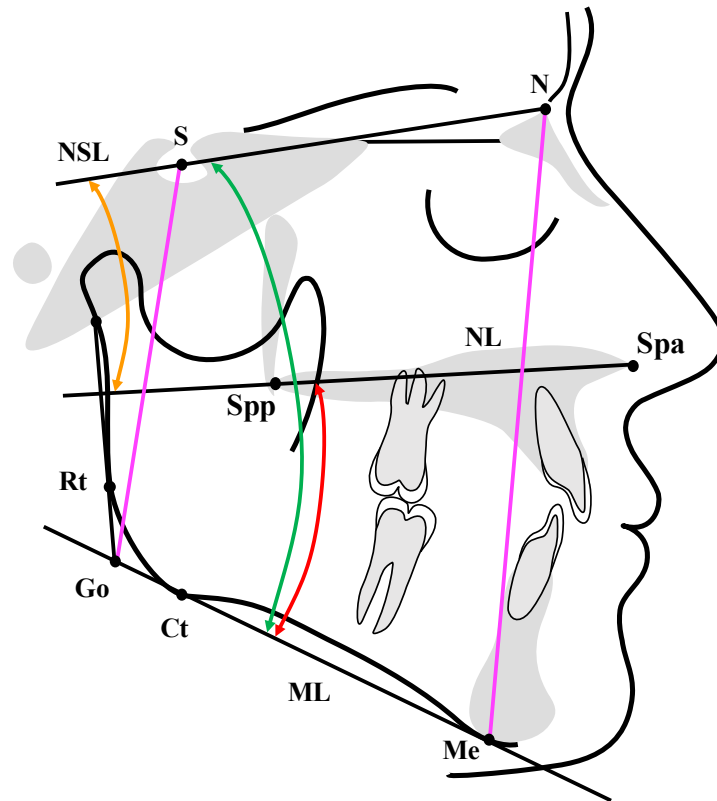
Der Maxillarwinkel wurde auf Grundlage von Delaires Analysen [23,26] zur Beurteilung der Maxillaposition gegenüber der kraniofazialen Basis und der Schwenkung des Oberkiefers konzipiert. Er wurde aus der kraniofazialen Basislinie nach Delaire (Linie, die durch die Punkte M und CT verläuft) [23,26] und der Verbindungslinie zwischen dem Punkt M (vorderer Teil der frontomaxillären Verbindung) und dem anteriorsten Punkt der palatinalen Basis nach Delaire (Spina nasalis anterior) [23,26] zusammengesetzt. Ein verkleinerter Winkel deutet hierbei auf eine maxilläre Retrognathie beziehungsweise posteriore Schwenkung des Oberkiefers (auch in Kombination mit einer mandibulären Prognathie), ein vergrößerter Winkel auf eine maxilläre Prognathie beziehungsweise anteriore Schwenkung des Oberkiefers hin [25]. Der Winkel N-Spa-Spp stellt eine Messmethode zur relativen Beurteilung der Lageveränderung des Punktes Spa dar. Eine Verkleinerung des Winkels zeigt hierbei eine anteriore und oder kaudale Verlagerung der Spina nasalis anterior in Relation zu Nasion auf.

Vertikale Winkel- und Streckenmessungen:

Winkel	Normwerte mit Referenzbereich	Definition
Gesichtshöhenverhältnis (Ratio)	63,5 % $\pm$ 1,5 % (Jarabak)	Verhältnis zwischen hinteren zur vorderen Gesichtshöhe
Kieferwinkel	128° $\pm$ 7° (Steiner)	Relation des Ramus mandibulae zum Corpus mandibulae
ML-NL-Winkel	23,5° $\pm$ 3° (Hasund)	Kieferbasenwinkel, Divergenz der Kieferbasen
ML-NSL-Winkel	32° $\pm$ 6° (Hasund)	Neigung der Mandibula in Relation zur anterioren Schädelbasis
NL-NSL-Winkel	8,5° $\pm$ 3° (Hasund)	Neigung der Maxilla in Relation zur anterioren Schädelbasis
Oberer Kieferwinkel (Go 1)	53° $\pm$ 2° (Jarabak)	Aufteilung des Kieferwinkels durch N-Go Linie und Teil des Ramus mandibulae
Unterer Kieferwinkel (Go 2)	73° $\pm$ 3° (Jarabak)	Aufteilung des Kieferwinkels durch N-Go Linie und Teil des Corpus mandibulae
Y-Achsen-Winkel	66° $\pm$ 2°	Verhältnis zwischen vorderer Schädelbasis zum Punkt Gn

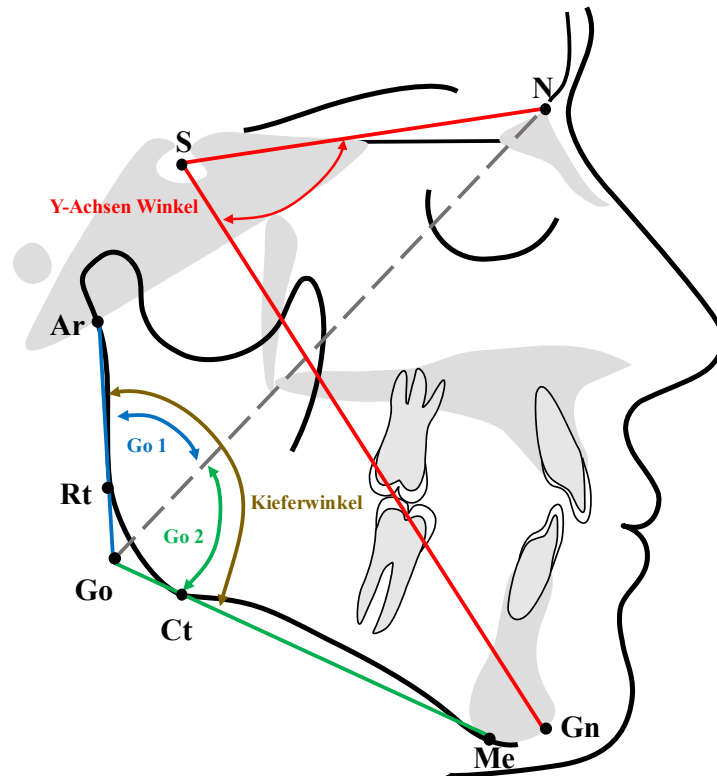
Tabelle 7: Vertikale Winkel- und Streckenmessungen mit Normwerten inklusive Referenzbereich und Definition, alphabetische Auflistung.

Die Parameter Kieferwinkel, ML-NL-Winkel, ML-NSL-Winkel und NL-NSL-Winkel weisen bei Vergrößerung auf ein vertikales oder clockwise, bei Verkleinerung auf ein horizontales oder counterclockwise Wachstumsmuster des Gesichtsschädels hin. Der Y-Achsen-Winkel bewertet zudem das ventro-kaudale Wachstum entlang der Strecke S-Gn und weist bei vergrößerten Werten ebenfalls auf ein vertikales und bei verkleinerten Werten auf ein horizontales Wachstumsmuster hin. Hinweis auf einen skelettalen Tiefbiss gibt der untere Kieferwinkel bei einem verkleinerten Wert; ein vergrößerter Wert deutet einen skelettal offenen Biss an. Nur die aufgelisteten Parameter Gesichtshöhenverhältnis und oberer Kieferwinkel zeigen bei Vergrößerung ein horizontales- und bei Verkleinerung der Werte ein vertikales Wachstumsmuster an. Bei posteriorer Rotation des Unterkiefers ist die hintere Gesichtshöhe (Strecke S zu Go) gegenüber der Vorderen (Strecke N zu Me) verkleinert, bei anteriorer oder counterclockwise Rotation des Unterkiefers ist die hintere gegenüber der vorderen Gesichtshöhe vergrößert, was zu einem Anstieg des Quotienten führt [46].



Vertikale Winkel- und Streckenmessungen

Abbildung 6: Vertikale Winkel- und Streckenmessungen: Gesichtshöhenverhältnis mittels pinker Pfeile dargestellt, ML-NL-Winkel mittels rotem Pfeil dargestellt, ML-NSL-Winkel mittels grünem Pfeil dargestellt und NL-NSL-Winkel mittels orangem Pfeil dargestellt. ML = Mandibularlinie, NL = Nasallinie, NSL = Nasion-Sella-Linie.



Vertikale Winkelmessungen

Abbildung 7: Vertikale Winkelmessungen: Kieferwinkel mittels braunem Pfeil dargestellt, Aufteilung des Kieferwinkels durch Linie N-Go (gestrichelte Linie) in oberen Kieferwinkel (Go 1) mittels blauem Pfeil dargestellt und unteren Kieferwinkel (Go 2) mittels grünem Pfeil dargestellt, Y-Achen-Winkel mittels rotem Pfeil dargestellt.

Weichteilmessungen und dentale Winkelmessungen:

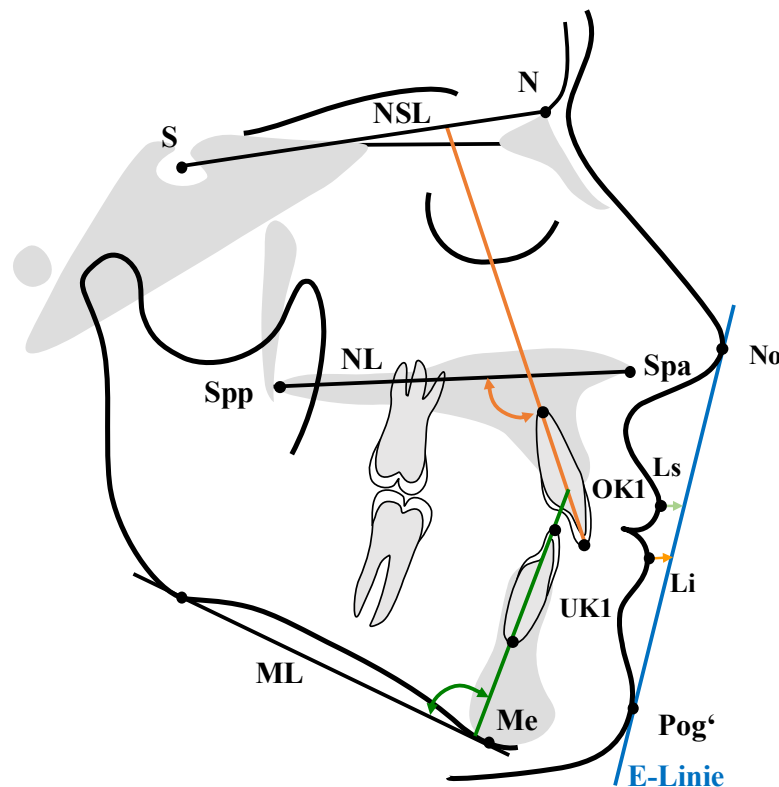
Winkel / Strecke	Normwerte mit Referenzbereich	Definition
Abstand Oberlippe zur E-Linie	$-4 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ (Ricketts)	Abstand des anteriorsten Punktes der Oberlippe zur E-Linie
Abstand Unterlippe zur E-Linie	$-2 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ (Ricketts)	Abstand des anteriorsten Punktes der Unterlippe zur E-Linie
OK1-NL	$107^\circ \pm 5^\circ$ (Steiner)	Beschreibt die Inklination der oberen Schneidezähne
UK1-ML	$93^\circ \pm 3^\circ$ (Steiner)	Beschreibt die Inklination der unteren Schneidezähne

Tabelle 8: Weichteilmessungen und dentale Winkelmessungen mit Normwerten inklusive Referenzbereich und Definition, alphabetische Auflistung.

Zur Beurteilung des Weichteilprofils wird der Abstand der Ober- beziehungsweise Unterlippe zur E-Linie nach Ricketts betrachtet. Bei verkleinerten Werten wird von einer retrusiven Lippenkonfiguration

oder einem konkaven Profil gesprochen, vergrößerte Werte weisen auf eine protrusive Lippenkonfiguration oder auf ein konvexes Profil hin.

Die Winkel OK1-NL und UK1-ML übermitteln Informationen über die Achsenstellung der oberen beziehungsweise unteren Inzisiven. Bei Zahlen oberhalb der Referenzwerte liegt eine Labialklippung beziehungsweise Proklination vor, bei Zahlen unterhalb des Referenzbereiches liegt eine Lingualklippung beziehungsweise ein Steilstand oder eine Retroinklination vor.



Weichteilmessungen und dentale Winkelmessungen

Abbildung 8: Weichteilmessungen und dentale Winkelmessungen: E-Linie dargestellt mittels blauer Linie, Abstand Oberlippe zur E-Linie mittels hellgrünem Pfeil dargestellt, Abstand Unterlippe zur E-Linie mittels hellorangetem Pfeil dargestellt. Darstellung des Winkels OK1-NL mittels orangenem Pfeil, Darstellung des Winkels UK1-ML mittels grünem Pfeil. ML = Mandibularlinie, NL = Nasallinie, NSL = Nasion-Sella-Linie.

3.3.2.3 Sagittal-skelettale Streckenmessungen des Oberkiefers

Die kephalometrische Analyse zur Beurteilung des Oberkieferwachstums orientierte sich an der Dissertation von Tschene über die sagittale Entwicklung des Oberkiefers aus dem Jahre 2005 [110]. Um reproduzierbare Streckenmessungen des Oberkiefers durchführen zu können, wurde die Frankfurter Horizontale als Referenzlinie verwendet. Diese verläuft horizontal zwischen den Punkten Porion (P)

und Orbitale (Or) und wird unter anderem in der Analyse nach Ricketts als kephalometrische Bezugslinie verwendet. Durch die entsprechenden Referenzpunkte wurde anschließend ein Lot auf die Frankfurter Horizontale (FH) gezogen, darauffolgend erfolgten die Streckenmessungen zwischen den Lotfußpunkten. Durch diese Herangehensweise konnten Messunsicherheiten, welche durch vertikale Dimensionsunterschiede zwischen den jeweiligen Punkten entstanden, reduziert werden.

Folgende Punkte wurden als Lotfußpunkte für die FRS-Analyse erstellt und aufgenommen:

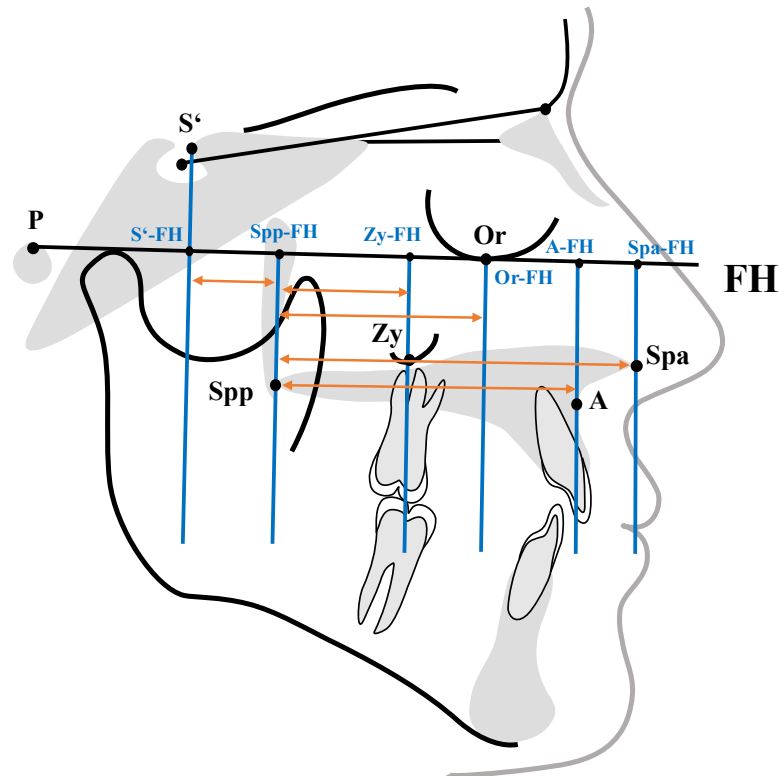
Bezeichnung	Definition
A-FH	Lotfußpunkt von Punkt A auf die Frankfurter Horizontale
Or-FH	Lotfußpunkt von Punkt Or auf die Frankfurter Horizontale
S'-FH	Lotfußpunkt von Punkt S' auf die Frankfurter Horizontale
Spa-FH	Lotfußpunkt von Punkt Spa auf die Frankfurter Horizontale
Spp-FH	Lotfußpunkt von Punkt Spp auf die Frankfurter Horizontale
Zy-FH	Lotfußpunkt von Punkt Zy auf die Frankfurter Horizontale

Tabelle 9: Auflistung der Lotfußpunkte in alphabetischer Reihenfolge.

Bei der FRS-Analyse wurden folgende Streckenmessungen zur Beurteilung des Oberkieferwachstums beziehungsweise des Wachstums des Os palatinum durchgeführt:

Strecke	Bezeichnung
Spp-FH – A-FH	Streckenmessung zwischen Spina nasalis posterior zum A-Punkt
Spp-FH – Or-FH	Streckenmessung zwischen Spina nasalis posterior zu Orbitale
Spp-FH – S'-FH	Streckenmessung zwischen Spina nasalis posterior zum Tuberculum sellae
Spp-FH – Spa-FH	Streckenmessung zwischen Spina nasalis posterior und Spina nasalis anterior
Spp-FH – Zy-FH	Streckenmessung zwischen Spina nasalis posterior und Processus zygomaticus

Tabelle 10: Sagittal-skelettale Streckenmessung des Oberkiefers, alphabetische Auflistung.



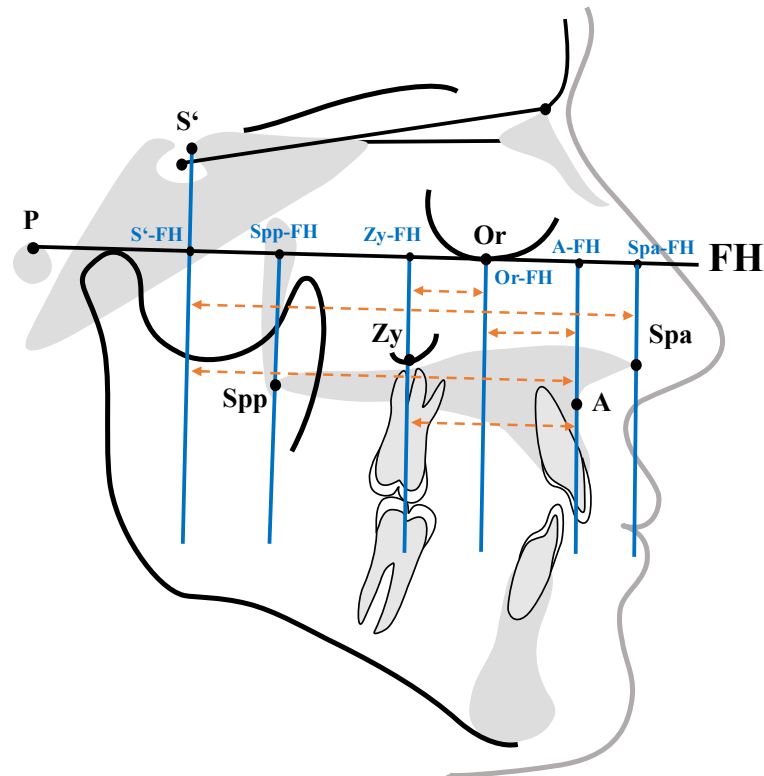
Sagittal-skelettale Streckenmessungen

Abbildung 9: Darstellung der Referenzpunkte: A, Or, S', Spa, Spp und Zy mit den jeweiligen Lotfußpunkten auf der Frankfurter Horizontale (FH). Streckenmessungen mit orangen Pfeilen dargestellt.

Des Weiteren wurden folgende Strecken mittels der Software Microsoft® Excel® für Microsoft 365 MSO (Version 2501, Microsoft Corporation Redmond, USA) errechnet:

Strecke	Bezeichnung
Or-FH – A-FH	Streckenmessung zwischen Orbitale und A-Punkt
S'-FH – A-FH	Streckenmessung zwischen Tuberculum sellae und A-Punkt
S'-FH – Spa-FH	Streckenmessung zwischen Tuberculum sellae und Spina nasalis anterior
Zy-FH – A-FH	Streckenmessung zwischen Processus zygomaticus und A-Punkt
Zy-FH – Or-FH	Streckenmessung zwischen Processus zygomaticus und Orbitale

Tabelle 11: Errechnete sagittal-skelettale Streckenmessungen des Oberkiefers, alphabetische Auflistung.



Sagittal-skelettale Streckenmessungen - errechnet

Abbildung 10: Darstellung der Referenzpunkte: A, Or, S', Spa, Spp und Zy mit den jeweiligen Lotfußpunkten auf der Frankfurter Horizontale (FH). Errechnete Strecken mittels orange gestrichelter Pfeile dargestellt.

Um eine bessere Übersicht beziehungsweise Überschaubarkeit zu behalten, wird in den kommenden Kapiteln der Bezug zur Frankfurter Horizontale bei den obig genannten Streckenmessungen (Tabelle 10 und 11) nicht jedes Mal explizit angeführt. Zum Beispiel wird bei der Streckenmessung zwischen den Punkten Spp-FH zu A-FH die Strecke zwischen Spina nasalis posterior zum A-Punkt oder auch die Bezeichnung Spp – A erwähnt.

3.3.3 Diagramme

Die graphische Darstellung ausgewählter Parameter erfolgte mit Hilfe der Tabellen-Kalkulationssoftware Microsoft® Excel® für Microsoft 365 MSO (Version 2501, Microsoft Corporation Redmond, USA). Die Visualisierung erfolgte hierbei mittels Balkendiagrammen und stellt die Differenz der jeweiligen Werte zwischen dem Zeitpunkt T2 und Zeitpunkt T1 dar. Zudem wurden die statistisch signifikanten Intergruppenvergleiche mittels Liniendiagrammen veranschaulicht. Dabei wurden die Messwerte zu den Zeitpunkten T1 und T2 abgebildet und die jeweils signifikant unterschiedlichen Gruppen einander gegenübergestellt. Es wurden stets die berechneten Mittelwerte

verwendet. In allen Darstellungen wurde PG1 hierbei die Farbe Grün, PG2 die Farbe Gelb- und PG3 die Farbe Orange zugeteilt. Nicht signifikante Veränderungen wurden ausgeblendet dargestellt.

3.3.4 Statistik

Die Erhebung der Daten wurde mittels der Tabellen-Kalkulationssoftware Microsoft® Excel® für Microsoft 365 MSO (Version 2501, Microsoft Corporation Redmond, USA) an einem Computer mit dem Betriebssystem Microsoft® Windows 11 (Microsoft Corporation Redmond, USA) durchgeführt. Anschließend wurden die Daten in die Statistiksoftware IBM® SPSS® Statistics (IBM US, New York, USA) für Windows® (Microsoft Corporation Redmond, USA) importiert und ausgewertet.

Die statistischen Analysen wurden sowohl für Intragruppenvergleiche als auch für Intergruppenvergleiche der Gruppen PG1, PG2 und PG3 durchgeführt. Die Prüfung auf Normalverteilung erfolgte visuell anhand von Q-Q-Diagrammen und anhand des Shapiro-Wilk-Tests. Intragruppenvergleiche zu den Zeitpunkten T1 und T2 wurden mittels verbundenem T-Test analysiert. Intergruppenvergleiche wurden mit Hilfe der einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) ermittelt, für die paarweisen Mittelwertvergleiche wurde zudem der Tukey post-hoc Test beziehungsweise Tukey-Kramer post-hoc Test durchgeführt, wenn es sich um ungleiche Gruppengrößen handelte. Zur Kontrolle der Varianzhomogenität wurde der Levene-Test angewendet, bei fehlender Varianzhomogenität kam die Welch-ANOVA und der Games-Howell-Test zur Anwendung. Für jede Variable wurden Mittelwert (M) und Standardabweichung (SD) aufgeführt. Das Signifikanzniveau wurde für die statistische Analyse auf 0,05 festgelegt. Für den Fall $p < 0,05$ war die Nullhypothese zu verwerfen und statistische Signifikanz anzunehmen. Das Signifikanzniveau definierte sich wie folgt:

$p \geq 0,05$ nicht signifikant

$p < 0,05$ signifikant

$p < 0,01$ hoch signifikant

$p < 0,001$ höchst signifikant.

3.3.5 Methodenfehler nach Dahlberg

Zur Bestimmung des Methodenfehlers nach Dahlberg [22] wurden nach einem Zeitraum von 3 Monaten 20 % der Fernröntgenseitenbilder willkürlich ausgewählt und einer Zweitmessung unterzogen. Die Berechnung des Methodenfehlers erfolgte für alle gemessenen Winkel sowie Strecken mittels folgender Formel:

$$MF = \sqrt{\frac{\sum d^2}{2n}}$$

MF = Methodenfehler

d = Differenz der Messwerte

n = Anzahl der Zweitmessungen

Der Methodenfehler nach Dahlberg soll die Validität der Messmethode ermitteln und Messfehler quantitativ erfassen, hierbei sollte der Wert MF möglichst < 1 sein. Für die Benutzung der obig genannten Formel wurden die Differenzen zwischen Erst- und Zweitmessung, sowie die Anzahl der Zweitmessungen benötigt. Die Ergebnisse des Methodenfehlers liegen in der vorliegenden Studie sowohl bei den Winkelmessungen als auch den Streckenmessungen unter dem Wert von 1. Im Folgenden wird der Methodenfehler für alle gemessenen Winkel und Strecken angegeben.

Messung	Methodenfehler nach Dahlberg
<i>Sagittale Winkel- und Streckenmessungen</i>	
ANB-Winkel	0,20
SNA-Winkel	0,46
SNB-Winkel	0,37
Wits-Wert	0,31
<i>Sagittal-skelettale Winkelmessungen zur Beurteilung des Maxillarwinkels in Anlehnung an Delaire und der Lageveränderung von Spina nasalis anterior</i>	
Maxillarwinkel	0,82
N-Spa-Spp-Winkel	0,86
<i>Vertikale Winkel- und Streckenmessungen</i>	
Gesichtshöhenverhältnis (Ratio)	0,59
Kieferwinkel	0,99
ML-NL Winkel	0,78
ML-NSL Winkel	0,56
NL-NSL Winkel	0,76
Oberer Kieferwinkel (Go 1)	0,72
Unterer Kieferwinkel (Go 2)	0,43
Y-Achsen-Winkel	0,48
<i>Weichteilmessungen, Dentale Winkelmessungen</i>	
Abstand Oberlippe zur E-Linie	0,28
Abstand Unterlippe zur E-Linie	0,28
OK1-NL	0,93

UK1-ML	0,94
<i>Sagittal-skelettale Streckenmessungen des Oberkiefers</i>	
Spp-FH – A-FH	0,35
Spp-FH – Or-FH	0,81
Spp-FH – S'-FH	0,69
Spp-FH – Spa-FH	0,3
Spp-FH – Zy-FH	0,53

Tabelle 12: Methodenfehler nach Dahlberg.

4. Ergebnisse

4.1 Allgemein

Die Ergebnisse der jeweiligen Messungen werden anhand von Tabellen, Graphen sowie den dazugehörigen Texten wie folgt dargestellt: Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) der jeweiligen Parameter zum Zeitpunkt T1 und T2 und die Differenz der entsprechenden Parameter zwischen T1 und T2; bei jedem Parameter erfolgt die Darstellung der Ergebnisse sowie der p-Werte innerhalb der einzelnen Gruppen (Intragruppenvergleiche von PG1, PG2 und PG3, p intra) und die Darstellung der Ergebnisse sowie p-Werte zwischen den jeweiligen Gruppen (Intergruppenvergleiche, p inter). Signifikante Werte wurden in den Intragruppenvergleichen und Intergruppenvergleichen farblich rot dargestellt.

4.2 Sagittale Winkel- und Streckenmessungen

4.2.1 Ergebnisse innerhalb der Gruppen

In der Patientengruppe PG2 lässt sich eine hoch signifikante Zunahme des ANB-Winkels feststellen ($p = 0,001$). Eine hoch signifikante Vergrößerung des SNA-Winkels zeigt sich sowohl in PG1 ($p = 0,002$) als auch in PG2 ($p = 0,001$). Der SNB-Winkel hingegen weist in keiner der drei Gruppen eine signifikante Veränderung auf. Der Wits-Wert zeigt in PG1 und PG2 keine signifikanten Veränderungen. In PG1 ist lediglich eine Tendenz zur Vergrößerung des Wits-Wertes zu erkennen. In PG3 wird hingegen eine signifikante Abnahme des Wits-Wertes ($p = 0,014$), mit einem durchschnittlichen Rückgang von $-0,53 \text{ mm} \pm 1,00 \text{ mm}$ festgestellt.

Gruppe	Variable	T1 (M $\pm$ SD)	T2 (M $\pm$ SD)	T2-T1 (M $\pm$ SD)	p (intra)
PG1	ANB	$-0,25^\circ \pm 2,17^\circ$	$0,12^\circ \pm 2,39^\circ$	$0,37^\circ \pm 1,28^\circ$	0,088
	SNA	$76,68^\circ \pm 2,18^\circ$	$77,43^\circ \pm 2,28^\circ$	$0,75^\circ \pm 1,39^\circ$	0,002
	SNB	$76,92^\circ \pm 2,20^\circ$	$77,31^\circ \pm 2,15^\circ$	$0,38^\circ \pm 1,17^\circ$	0,053
	Wits-Wert	$-4,12 \text{ mm} \pm 2,53 \text{ mm}$	$-3,56 \text{ mm} \pm 2,97 \text{ mm}$	$0,56 \text{ mm} \pm 1,82 \text{ mm}$	0,069

PG2	ANB	$0,16^\circ \pm 2,27^\circ$	$0,71^\circ \pm 2,20^\circ$	$0,55^\circ \pm 0,89^\circ$	0,001
	SNA	$76,61^\circ \pm 2,97^\circ$	$77,36^\circ \pm 2,83^\circ$	$0,75^\circ \pm 1,29^\circ$	0,001
	SNB	$76,45^\circ \pm 2,80^\circ$	$76,65^\circ \pm 3,00^\circ$	$0,20^\circ \pm 1,26^\circ$	0,346
	Wits-Wert	$-3,13 \text{ mm} \pm 2,30 \text{ mm}$	$-2,89 \text{ mm} \pm 3,28 \text{ mm}$	$0,24 \text{ mm} \pm 1,84 \text{ mm}$	0,436
PG3	ANB	$0,83^\circ \pm 2,34^\circ$	$1,05^\circ \pm 2,80^\circ$	$0,22^\circ \pm 1,23^\circ$	0,378
	SNA	$76,89^\circ \pm 2,09^\circ$	$77,20^\circ \pm 2,47^\circ$	$0,31^\circ \pm 1,03^\circ$	0,144
	SNB	$76,06^\circ \pm 3,08^\circ$	$76,15^\circ \pm 3,39^\circ$	$0,08^\circ \pm 0,92^\circ$	0,650
	Wits-Wert	$-3,46 \text{ mm} \pm 2,63 \text{ mm}$	$-3,99 \text{ mm} \pm 2,81 \text{ mm}$	$-0,53 \text{ mm} \pm 1,00 \text{ mm}$	0,014

Tabelle 13: Darstellung der Winkel ANB, SNA, SNB, und des Wits-Wertes zum Zeitpunkt T1 und T2 sowie Differenz zwischen T2 und T1 für PG1, PG2 und PG3. M = Mittelwert, SD = Standardabweichung, p (intra) = Signifikanzbereich, (hoch) signifikante Veränderungen sind rot markiert.

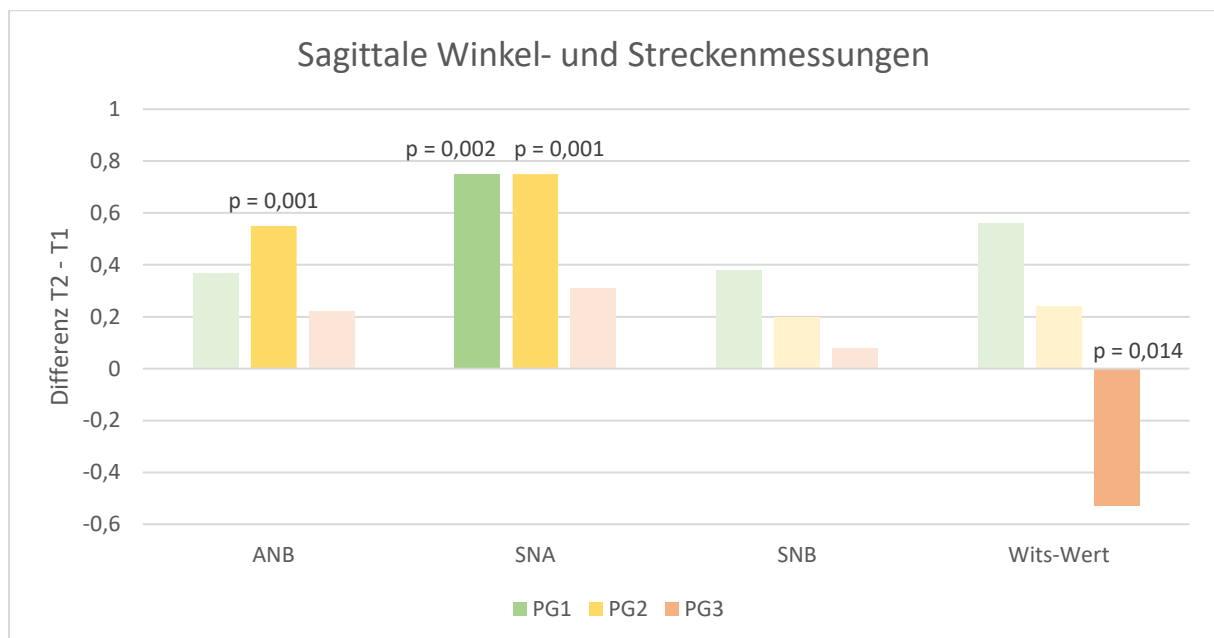


Abbildung 11: Graphische Darstellung der Mittelwerte der Differenz zwischen den Zeitpunkten T2 und T1. Darstellung der Winkelveränderung von ANB, SNA, SNB und der Änderung des Wits-Wertes der Gruppen PG1, PG2 und PG3. Statistisch signifikante Werte wurden mit den p-Werten dargestellt, nicht signifikante Veränderungen wurden ausgeblendet dargestellt.

4.2.2 Ergebnisse zwischen den Gruppen

Da die Voraussetzung der Varianzhomogenität für den Wits-Wert nicht erfüllt war, wurde für diesen Werte eine Welch-Anova sowie der Games-Howell-Post-hoc-Test durchgeführt. Die entsprechenden Werte sind zudem mittels Sonderzeichen „~“ gekennzeichnet.

Im Intergruppenvergleich ist zwischen PG1 und PG3 ein signifikanter Unterschied ($p = 0,010$) bei der Veränderung des Wits-Wertes zu erkennen, was sich in einem hoch signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen widerspiegelt, Welch-Test $F(2, 63,93) = 5,295$, $p = 0,007$. Bei den restlichen Intergruppenvergleichen zeigen sich keine signifikanten Unterschiede in den Größenveränderungen der Winkel ANB, SNA und SNB.

Intergruppenvergleich (p inter)				
Variable	PG1 vs. PG2	PG1 vs. PG3	PG2 vs. PG3	Gesamt
ANB	0,767	0,866	0,495	0,516
SNA	1,000	0,378	0,383	0,333
SNB	0,764	0,572	0,923	0,579
Wits-Wert	0,730~	0,010~	0,096~	0,007~

Tabelle 14: Intergruppenvergleich der Winkelveränderungen von ANB, SNA, SNB und der Änderung des Wits-Wertes. (Hoch) signifikante Werte sind rot markiert, Kennzeichnung mittels Welch-ANOVA berechneter Werte durch „~“.

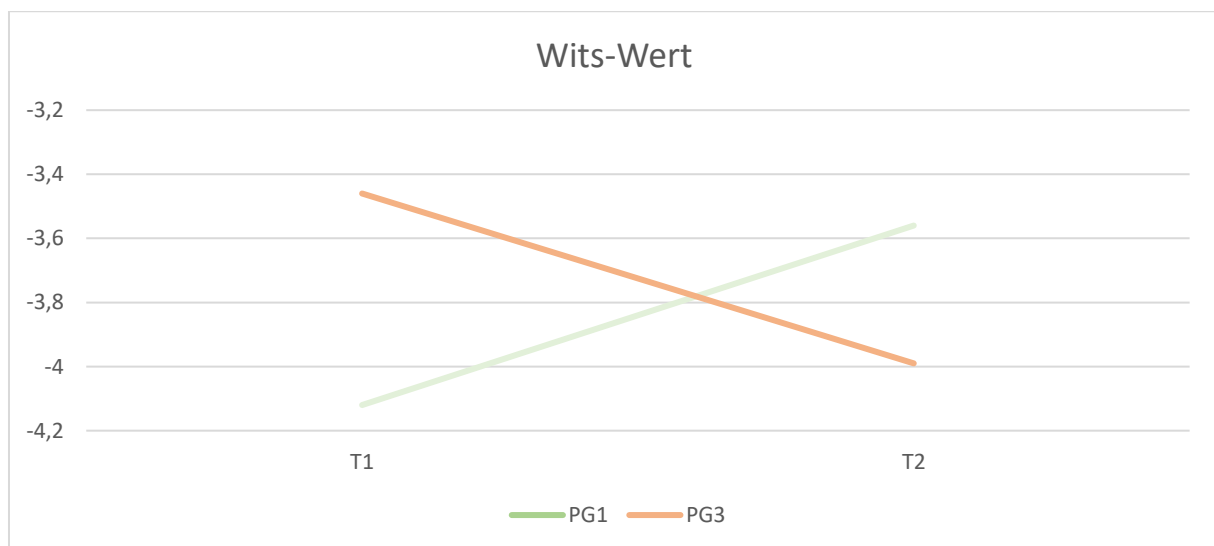


Abbildung 12: Intergruppenvergleich zwischen PG1 und PG3. Darstellung des Wits-Wertes zum Zeitpunkt T1 und T2. Statistisch nicht signifikante Veränderungen wurden ausgeblendet dargestellt.

4.3 Sagittal-skelettale Winkelmessungen zur Beurteilung des Maxillarwinkels in Anlehnung an Delaire und der Lageveränderung von Spina nasalis anterior

4.3.1 Ergebnisse innerhalb der Gruppen

Signifikante Veränderungen sind sowohl in PG1 als auch in PG3 zu beobachten. In PG1 nimmt der Maxillarwinkel signifikant zu ($p = 0,046$), während er in PG3 signifikant abnimmt ($p = 0,024$). Der Winkel N-Spa-Spp nimmt bei PG1 um einen hoch signifikanten Wert ($p = 0,001$) ab. In PG2 hingegen sind für beide Winkel keine signifikanten Veränderungen festzustellen.

Gruppe	Variable	T1 (M $\pm$ SD)	T2 (M $\pm$ SD)	T2-T1 (M $\pm$ SD)	p (intra)
PG1	Maxillarwinkel	83,25° $\pm$ 4,29°	84,46° $\pm$ 3,91°	1,21° $\pm$ 3,56°	0,046
	N-Spa-Spp	88,16° $\pm$ 3,08°	86,67° $\pm$ 3,40°	-1,49° $\pm$ 2,49°	0,001
PG2	Maxillarwinkel	85,52° $\pm$ 5,15°	85,68° $\pm$ 4,83°	0,16° $\pm$ 3,39°	0,776
	N-Spa-Spp	87,18° $\pm$ 3,66°	86,60° $\pm$ 3,69°	-0,58° $\pm$ 1,77°	0,053
PG3	Maxillarwinkel	86,46° $\pm$ 3,38°	85,09° $\pm$ 3,08°	-1,36° $\pm$ 2,82°	0,024
	N-Spa-Spp	84,42° $\pm$ 2,74°	84,59° $\pm$ 2,77°	0,17° $\pm$ 1,59°	0,594

Tabelle 15: Darstellung des Maxillarwinkels und N-Spa-Spp zum Zeitpunkt T1 und T2 sowie Differenz zwischen T2 und T1 für PG1, PG2 und PG3. M = Mittelwert, SD = Standardabweichung, p (intra) = Signifikanzbereich, (hoch) signifikante Veränderungen sind rot markiert.

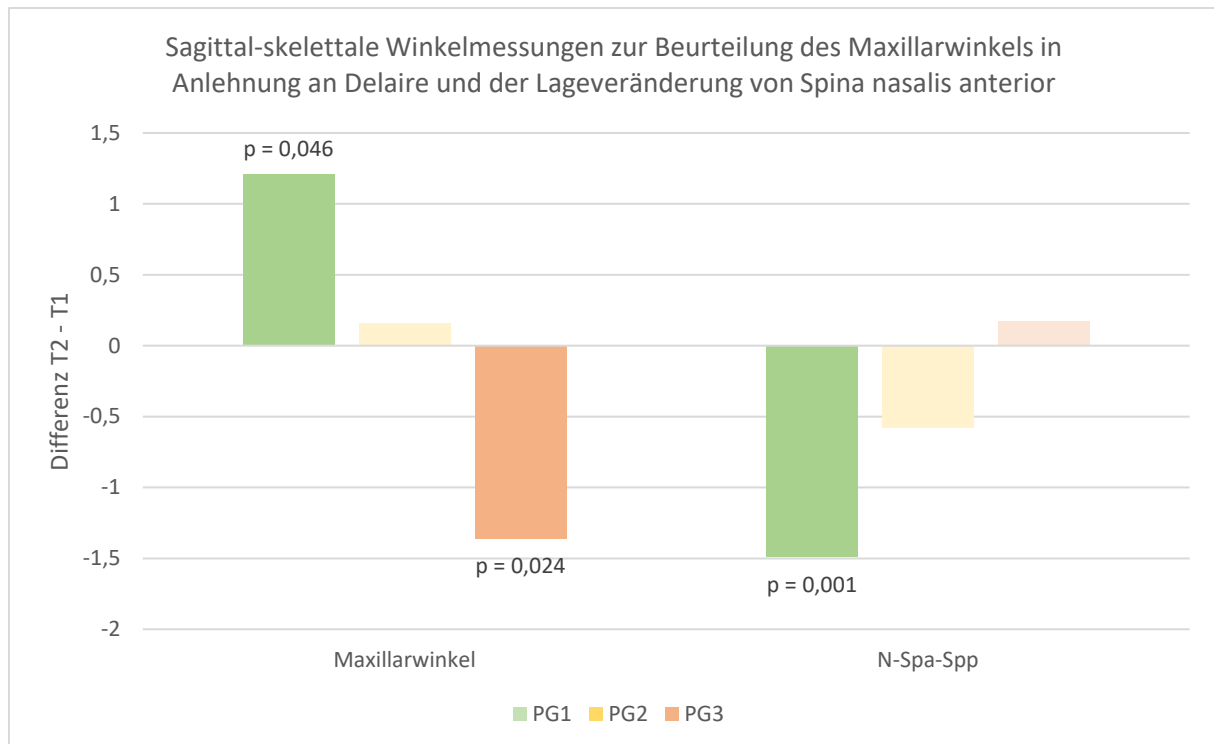


Abbildung 13: Graphische Darstellung der Mittelwerte der Differenz zwischen den Zeitpunkten T2 und T1. Darstellung der Winkelveränderung des Maxillarwinkels und von N-Spa-Spp der Gruppen PG1, PG2 und PG3. Statistisch signifikante Werte wurden mit den p-Werten dargestellt, statistisch nicht signifikante Veränderungen wurden ausgeblendet dargestellt.

4.3.2 Ergebnisse zwischen den Gruppen

Die Intergruppenvergleiche weisen zwischen der jüngsten Gruppe (PG1) und der ältesten Gruppe (PG3) einen signifikanten Unterschied in der Größenzunahme des Maxillarwinkels ($p=0,010$), sowie einen hoch signifikanten Unterschied in der Größenveränderung des Winkels N-Spa-Spp ($p=0,006$) auf.

Intergruppenvergleich (p inter)				
Variable	PG1 vs. PG2	PG1 vs. PG3	PG2 vs. PG3	Gesamt
Maxillarwinkel	0,365	0,010	0,185	0,014
N-Spa-Spp	0,139	0,006	0,328	0,008

Tabelle 16: Intergruppenvergleich der Winkelveränderungen des Maxillarwinkels und von N-Spa-Spp, (hoch) signifikante Werte sind rot markiert.

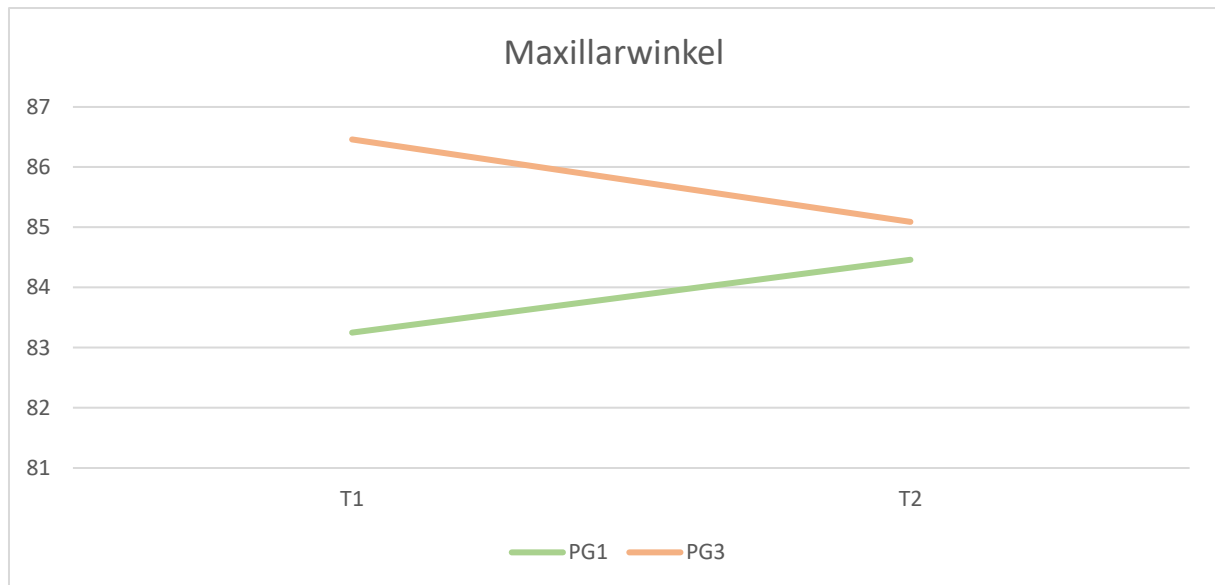


Abbildung 14: Intergruppenvergleich zwischen PG1 und PG3. Darstellung der Werte des Maxillarwinkels zum Zeitpunkt T1 und T2.

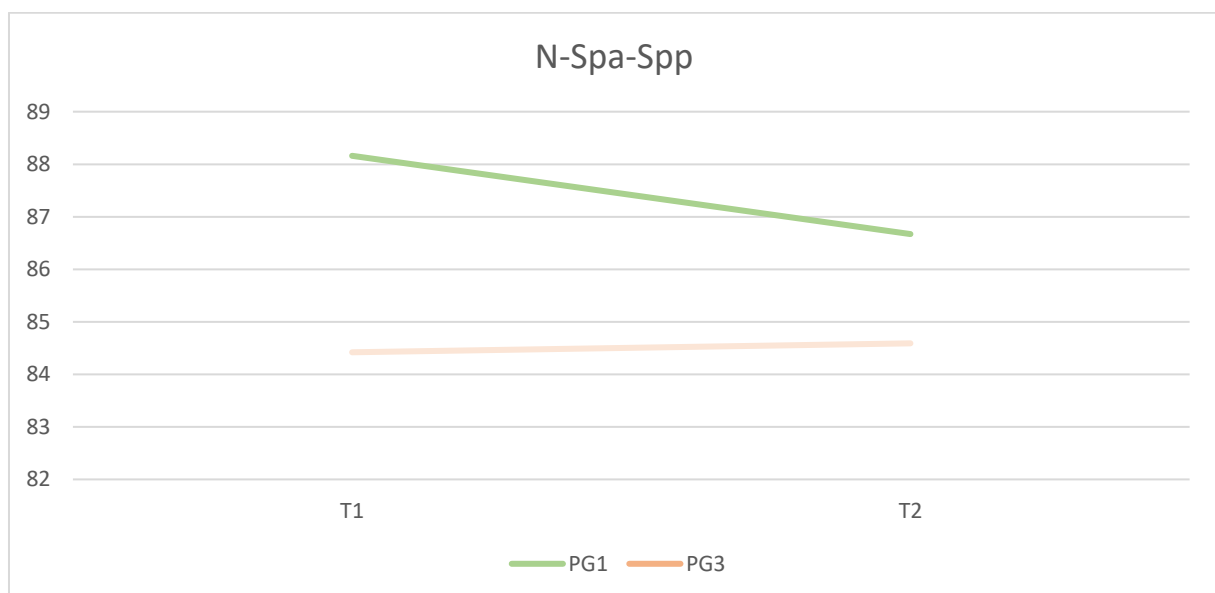


Abbildung 15: Intergruppenvergleich zwischen PG1 und PG3. Darstellung der Werte des Winkels N-Spa-Spp zum Zeitpunkt T1 und T2. Statistisch nicht signifikante Veränderungen wurden ausgeblendet dargestellt.

4.4 Vertikale Winkel- und Streckenmessungen

4.4.1 Ergebnisse innerhalb der Gruppen

Signifikante Veränderungen bei den vertikal-skelettalen Messungen sind nur in PG2 ($p = 0,037$) und PG3 ($p = 0,011$) festzustellen. In PG2 ist dabei eine signifikante Zunahme des unteren Kieferwinkels von $0,89^\circ \pm 2,49^\circ$ und in PG3 eine signifikante Zunahme von $1,17^\circ \pm 2,11^\circ$ zu dokumentieren.

Gruppe	Variable	T1 (M $\pm$ SD)	T2 (M $\pm$ SD)	T2-T1 (M $\pm$ SD)	p (intra)
PG1	Gesichtshöhenverhältnis (Ratio)	62,91 % $\pm$ 3,97 %	63,37 % $\pm$ 4,41 %	0,46 % $\pm$ 2,25 %	0,217
	Kieferwinkel	125,77° $\pm$ 5,92°	126,15° $\pm$ 6,84°	0,38° $\pm$ 4,13°	0,584
	ML-NL-Winkel	26,59° $\pm$ 5,47°	26,66° $\pm$ 5,33°	0,07° $\pm$ 2,31°	0,860
	ML-NSL-Winkel	34,44° $\pm$ 4,88°	34,36° $\pm$ 5,06°	-0,08° $\pm$ 2,32°	0,844
	NL-NSL-Winkel	7,85° $\pm$ 2,84°	7,71° $\pm$ 2,78°	-0,14° $\pm$ 1,53°	0,595
	Oberer Kieferwinkel (Go 1)	53,40° $\pm$ 3,89°	53,13° $\pm$ 5,12°	-0,27° $\pm$ 2,72°	0,546
	Unterer Kieferwinkel (Go 2)	72,39° $\pm$ 4,37°	73,02° $\pm$ 4,25°	0,64° $\pm$ 2,22°	0,090
	Y-Achsen-Winkel	67,35° $\pm$ 2,75°	67,45° $\pm$ 2,85°	0,10° $\pm$ 1,16°	0,613
PG2	Gesichtshöhenverhältnis (Ratio)	64,57 % $\pm$ 5,11 %	64,04 % $\pm$ 5,30 %	-0,53 % $\pm$ 3,21 %	0,320
	Kieferwinkel	124,38° $\pm$ 7,13°	125,62° $\pm$ 7,05°	1,24° $\pm$ 4,62°	0,111
	ML-NL-Winkel	25,12° $\pm$ 6,99°	25,59° $\pm$ 7,11°	0,46° $\pm$ 3,25°	0,390
	ML-NSL-Winkel	33,22° $\pm$ 6,38°	33,93° $\pm$ 6,44°	0,71° $\pm$ 3,00°	0,159
	NL-NSL-Winkel	8,10° $\pm$ 2,87°	8,34° $\pm$ 3,31°	0,25° $\pm$ 1,55°	0,339

	Oberer Kieferwinkel (Go 1)	52,88° ± 4,42°	53,22° ± 4,32°	0,35° ± 2,91°	0,474
	Unterer Kieferwinkel (Go 2)	71,50° ± 5,50°	72,39° ± 5,72°	0,89° ± 2,49°	0,037
	Y-Achsen-Winkel	67,73° ± 3,91°	67,71° ± 4,11°	-0,02° ± 1,44°	0,919
PG3	Gesichtshöhenverhältnis (Ratio)	62,44 % ± 4,20 %	62,66 % ± 4,75 %	0,22 % ± 1,94 %	0,583
	Kieferwinkel	126,61° ± 7,73°	127,66° ± 6,31°	1,05° ± 3,26°	0,060
	ML-NL-Winkel	25,16° ± 6,15°	25,35° ± 6,39°	0,18° ± 2,12°	0,669
	ML-NSL-Winkel	35,77° ± 5,69°	36,08° ± 5,89°	0,31° ± 1,72°	0,374
	NL-NSL-Winkel	10,60° ± 3,15°	10,73° ± 2,81°	0,13° ± 1,64°	0,691
	Oberer Kieferwinkel (Go 1)	53,04° ± 5,79°	52,93° ± 5,24°	- 0,12° ± 2,12°	0,786
	Unterer Kieferwinkel (Go 2)	73,57° ± 4,83°	74,74° ± 4,39°	1,17° ± 2,11°	0,011
	Y-Achsen-Winkel	68,76° ± 3,92°	68,92° 4,06°	0,16° ± 1,07°	0,472

Tabelle 17: Darstellung des Gesichtshöhenverhältnisses, des Kieferwinkels, der Winkel ML-NL, ML-NSL, NL-NSL, des oberen und unteren Kieferwinkels und des Y-Achsen-Winkels zum Zeitpunkt T1 und T2 sowie Differenz zwischen T2 und T1 für PG1, PG2 und PG3. M = Mittelwert, SD = Standardabweichung, p (intra) = Signifikanzbereich, signifikante Veränderungen sind rot markiert.

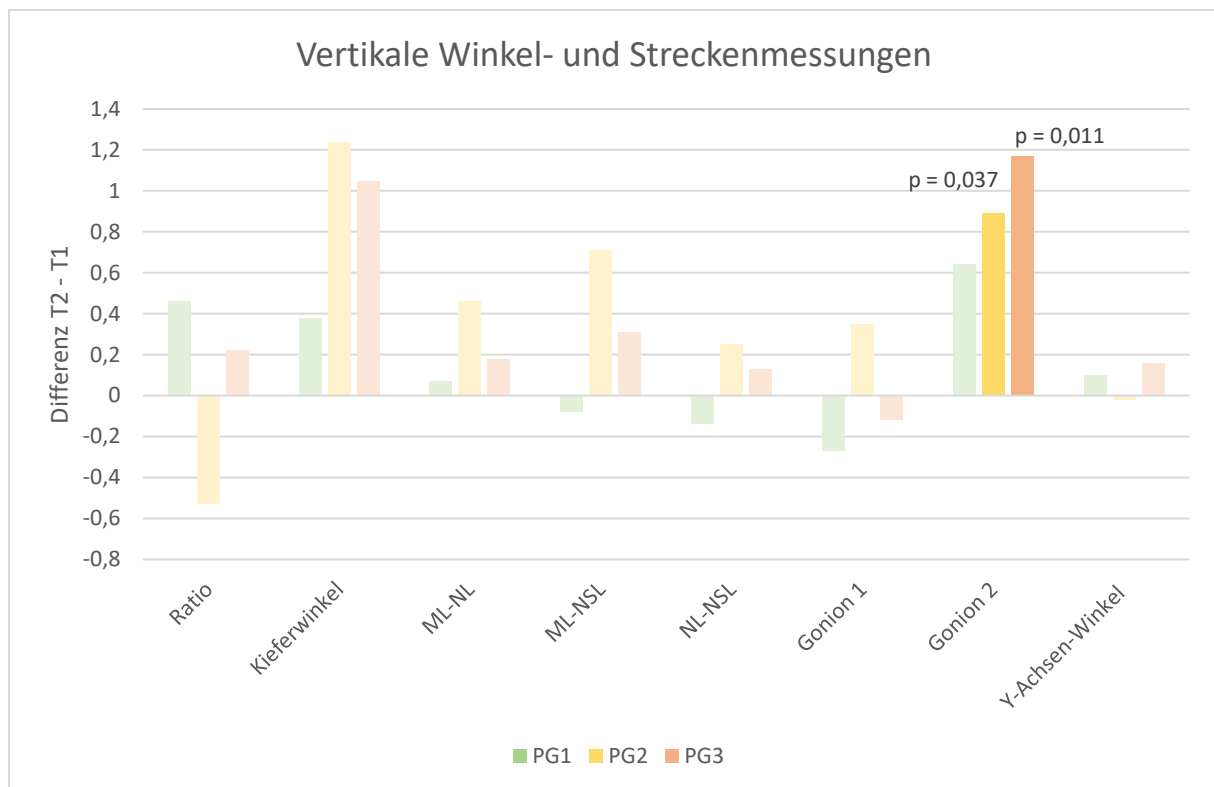


Abbildung 16: Graphische Darstellung der Mittelwerte der Differenz zwischen den Zeitpunkten T2 und T1. Darstellung der Veränderung des Gesichtshöhenverhältnisses (Ratio), der Winkelveränderung des Kieferwinkels, der Winkel ML-NL, ML-NSL, NL-NSL, des oberen und unteren Kieferwinkels und des Y-Achsen-Winkels der Gruppe PG1, PG2 und PG3. Statistisch signifikante Werte wurden mit den p-Werten dargestellt, statistisch nicht signifikante Veränderungen wurden ausgeblendet.

4.4.2 Ergebnisse zwischen den Gruppen

Die Intergruppenvergleiche zeigen bei den vertikal-skelettalen Messungen keine signifikanten Unterschiede in Größenzunahme oder Größenabnahme.

Intergruppenvergleich (p inter)				
Variable	PG1 vs. PG2	PG1 vs. PG3	PG2 vs. PG3	Gesamt
Gesichtshöhenverhältnis (Ratio)	0,227	0,927	0,506	0,237
Kieferwinkel	0,641	0,805	0,982	0,647
ML-NL-Winkel	0,798	0,984	0,913	0,807
ML-NSL-Winkel	0,365	0,818	0,811	0,399
NL-NSL-Winkel	0,549	0,787	0,957	0,567
Oberer Kieferwinkel (Go 1)	0,578	0,972	0,781	0,589

Unterer Kieferwinkel (Go 2)	0,886	0,641	0,881	0,665
Y-Achsen-Winkel	0,908	0,982	0,844	0,842

Tabelle 18: Intergruppenvergleich der Veränderung des Gesichtshöhenverhältnisses, der Winkelveränderungen des Kieferwinkels, der Winkel ML-NL, ML-NSL, NL-NSL, des oberen und unteren Kieferwinkels und des Y-Achsen-Winkels.

4.5 Weichteilmessungen und dentale Winkelmessungen

4.5.1 Ergebnisse innerhalb der Gruppen

Signifikante Veränderungen sind ausschließlich in PG3 bei den Weichteilmessungen zu verzeichnen. In dieser Gruppe nimmt der Abstand der Unterlippe zur E-Linie signifikant zu ($p = 0,011$).

Gruppe	Variable	T1 (M $\pm$ SD)	T2 (M $\pm$ SD)	T2-T1 (M $\pm$ SD)	p (intra)
PG1	Abstand Oberlippe zur E-Linie	-3,07 mm $\pm$ 2,08 mm	-3,21 mm $\pm$ 2,28 mm	-0,14 mm $\pm$ 1,42 mm	0,565
	Abstand Unterlippe zur E-Linie	-1,48 mm $\pm$ 1,88 mm	-1,66 mm $\pm$ 2,30 mm	-0,18 mm $\pm$ 1,32 mm	0,409
	OK1-NL	113,74° $\pm$ 8,29°	114,42° $\pm$ 6,89°	0,69° $\pm$ 5,95°	0,487
	UK1-ML	90,18° $\pm$ 6,93°	89,77 $\pm$ 7,25°	-0,41° $\pm$ 4,91°	0,614
PG2	Abstand Oberlippe zur E-Linie	-3,02 mm $\pm$ 1,77 mm	-3,42 mm $\pm$ 1,93 mm	-0,40 mm $\pm$ 1,51 mm	0,116
	Abstand Unterlippe zur E-Linie	-1,19 mm $\pm$ 2,17 mm	-1,72 mm $\pm$ 2,14 mm	-0,53 mm $\pm$ 1,60 mm	0,051
	OK1-NL	112,58° $\pm$ 5,09°	113,88° $\pm$ 5,54°	1,30° $\pm$ 4,48°	0,086
	UK1-ML	91,59° $\pm$ 7,94°	90,34° $\pm$ 8,08°	-1,25° $\pm$ 5,03°	0,138
PG3	Abstand Oberlippe zur E-Linie	-3,65 mm $\pm$ 2,22 mm	-4,14 mm $\pm$ 2,58 mm	-0,49 mm $\pm$ 1,88 mm	0,204
	Abstand Unterlippe zur E-Linie	-1,67 mm $\pm$ 2,15 mm	-2,41 mm $\pm$ 2,61 mm	-0,74 mm $\pm$ 1,34 mm	0,011

	OK1-NL	111,31° ± 8,80°	111,17° ± 8,51°	-0,14° ± 3,21°	0,834
	UK1-ML	88,26° ± 6,36°	89,03° ± 6,44°	0,76° ± 3,39°	0,270

Tabelle 19: Darstellung der Strecken: Abstand Oberlippe zur E-Linie und Unterlippe zur E-Linie, der Winkel OK1-NL und UK1-ML zum Zeitpunkt T1 und T2 sowie Differenz zwischen T2 und T1 für PG1, PG2 und PG3. M = Mittelwert, SD = Standardabweichung, p (intra) = Signifikanzbereich, signifikante Veränderungen sind rot markiert.

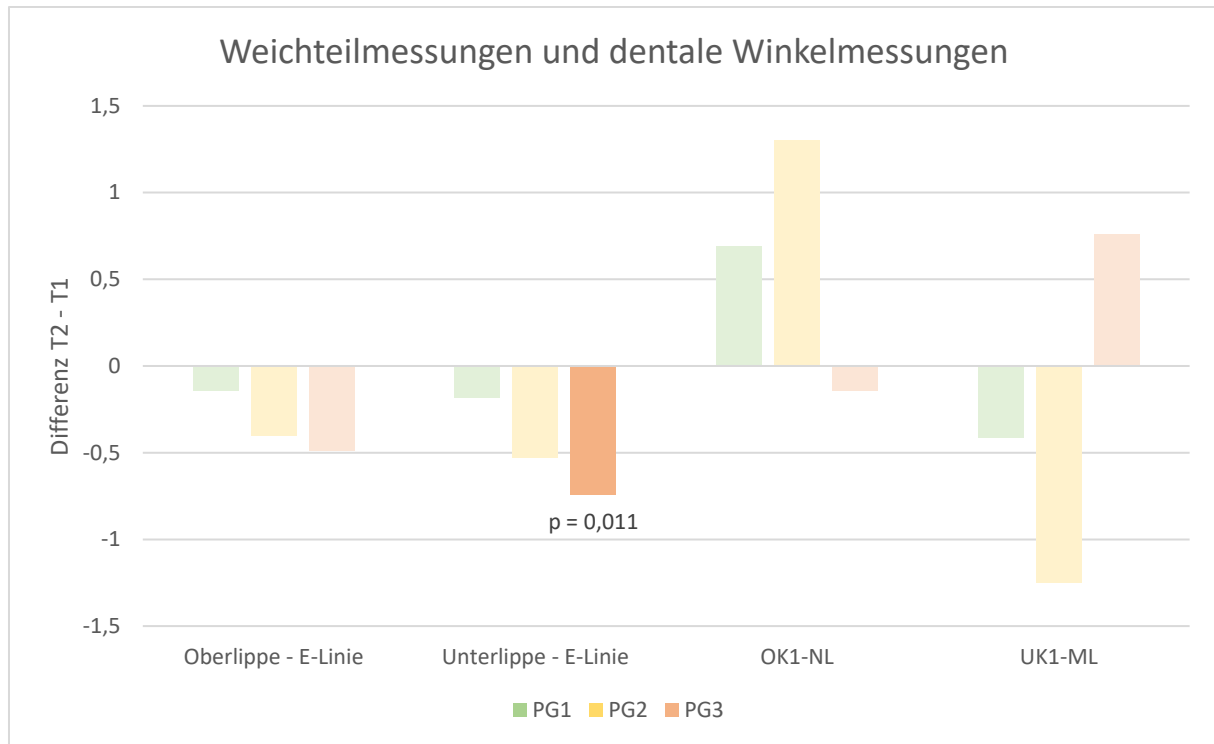


Abbildung 17: Graphische Darstellung der Mittelwerte der Differenz zwischen den Zeitpunkten T2 und T1. Darstellung der Streckenveränderung der Oberlippe zur E-Linie und der Unterlippe zur E-Linie, der Winkelveränderungen von OK1-NL und UK1-ML der Gruppen PG1, PG2 und PG3. Statistisch signifikante Werte wurden mit den p-Werten dargestellt, statistisch nicht signifikante Veränderungen wurden ausgeblendet dargestellt.

4.5.2 Ergebnisse zwischen den Gruppen

Da die Voraussetzung der Varianzhomogenität für den Winkel OK1-NL nicht erfüllt war, wurde für diese Werte eine Welch-Anova sowie der Games-Howell-Post-hoc-Test durchgeführt. Die entsprechenden Werte sind zudem mittels Sonderzeichen „~“ gekennzeichnet. Die Intergruppenvergleiche zeigen keine signifikanten Unterschiede in den Größenveränderungen der dentalen Winkelmessungen und der Weichteilmessungen.

Intergruppenvergleich (p inter)				
Variable	PG1 vs. PG2	PG1 vs. PG3	PG2 vs. PG3	Gesamt
Abstand Oberlippe zur E-Linie	0,752	0,659	0,972	0,640
Abstand Unterlippe zur E-Linie	0,550	0,288	0,833	0,296
OK1-NL	0,871~	0,763~	0,312~	0,343~
UK1-ML	0,714	0,590	0,216	0,246

Tabelle 20: Intergruppenvergleich der Strecken- bzw. Winkelveränderungen des Abstandes der Oberlippe zur E-Linie und der Unterlippe zur E-Linie, der Winkel OK1-NL und UK1-ML. Kennzeichnung mittels Welch-ANOVA berechneter Werte durch „~“.

4.6 Sagittal-skelettale Streckenmessungen des Oberkiefers

4.6.1 Ergebnisse innerhalb der Gruppen

Die Distanz zwischen der Strecke S'-FH – A-FH weist eine signifikante beziehungsweise hoch signifikante Zunahme in PG1 ($p = 0,045$), PG2 ($p = 0,001$) und PG3 ($p = 0,004$) auf. Die Zunahme in PG2 ist hierbei mit $1,36 \text{ mm} \pm 2,31 \text{ mm}$ am stärksten ausgeprägt. Die Distanz zwischen den Punkten S'-FH und Spa-FH nimmt nur in PG1 und PG2 eine höchst signifikante (PG1, $p < 0,001$) beziehungsweise hoch signifikante (PG2, $p = 0,001$) Größenzunahme an. PG3 weist hierbei keine signifikante Veränderung auf. Die Strecke Spp-FH – A-FH zeigt in allen drei Gruppen eine signifikante Zunahme: In den Gruppen PG1 und PG2 ist die Veränderung höchst signifikant ($p < 0,001$), während in PG3 eine signifikante Zunahme festzustellen ist ($p = 0,012$). Dabei ist die Zunahme in PG2 mit $2,30 \text{ mm} \pm 1,41 \text{ mm}$ am höchsten, gefolgt von PG1 mit $2,06 \text{ mm} \pm 1,45 \text{ mm}$. Eine höchst signifikante Zunahme ($p < 0,001$) der Strecke Spp-FH – Or-FH ist in den Gruppen PG1 und PG2 zu verzeichnen, während in PG3 keine signifikante Veränderung festgestellt wird. Die stärkste Größenzunahme zeigt sich hierbei in PG1 mit $2,21 \text{ mm} \pm 2,31 \text{ mm}$. Die Strecke Spp-FH – S'-FH nimmt in PG1 mit $-1,16 \text{ mm} \pm 2,39 \text{ mm}$ hoch signifikant ab ($p = 0,006$). Auch in PG2 ist eine signifikante Abnahme zu erkennen ($p = 0,034$), während in PG3 keine signifikante Veränderung der Strecke festgestellt wird. Die Strecken Spp-FH – Spa-FH und Spp-FH – Zy-FH weisen sowohl in PG1 als auch in PG2 eine höchst signifikante Zunahme auf ($p < 0,001$). Bei beiden Strecken ist in PG1 die größte Zunahme und in PG3 keine signifikante Veränderung zu sehen. Die Strecken Or-FH – A-FH, Zy-FH – A-FH und Zy-FH – Or-FH zeigen in allen drei Gruppen keine signifikante Veränderung auf.

Gruppe	Variable	T1 (M ± SD)	T2 (M ± SD)	T2-T1 (M ± SD)	p (intra)
PG1	Or-FH – A-FH	11,86 mm ± 3,17 mm	11,70 mm ± 2,57 mm	-0,15 mm ± 2,60 mm	0,720
	S'-FH – A-FH	56,47 mm ± 3,12 mm	57,37 mm ± 3,04 mm	0,90 mm ± 2,63 mm	0,045
	S'-FH – Spa-FH	62,25 mm ± 3,07 mm	64,05 mm ± 3,23 mm	1,80 mm ± 2,46 mm	< 0,001
	Spp-FH – A-FH	40,34 mm ± 2,69 mm	42,40 mm ± 2,54 mm	2,06 mm ± 1,45 mm	< 0,001
	Spp-FH – Or-FH	28,49 mm ± 3,04 mm	30,70 mm ± 3,38 mm	2,21 mm ± 2,31 mm	< 0,001
	Spp-FH – S'-FH	16,13 mm ± 2,36 mm	14,97 mm ± 2,68 mm	-1,16 mm ± 2,39 mm	0,006
	Spp-FH – Spa-FH	46,13 mm ± 2,90 mm	49,08 mm ± 2,58 mm	2,96 mm ± 1,43 mm	< 0,001
	Spp-FH – Zy-FH	20,56 mm ± 3,04 mm	22,91 mm ± 3,12 mm	2,34 mm ± 2,39 mm	< 0,001
	Zy-FH – A-FH	19,78 mm ± 3,05 mm	19,50 mm ± 3,36 mm	-0,28 mm ± 2,41 mm	0,478
	Zy-FH – Or-FH	7,92 mm ± 3,63 mm	7,79 mm ± 3,24 mm	-0,13 mm ± 2,14 mm	0,715
PG2	Or-FH – A-FH	11,73 mm ± 2,73 mm	12,04 mm ± 2,58 mm	0,31 mm ± 1,98 mm	0,347
	S'-FH – A-FH	58,17 mm ± 3,96 mm	59,53 mm ± 3,85 mm	1,36 mm ± 2,31 mm	0,001
	S'-FH – Spa-FH	64,96 mm ± 3,92 mm	66,16 mm ± 3,87 mm	1,20 mm ± 2,03 mm	0,001
	Spp-FH – A-FH	42,12 mm ± 2,65 mm	44,42 mm ± 2,82 mm	2,30 mm ± 1,41 mm	< 0,001
	Spp-FH – Or-FH	30,39 mm ± 2,77 mm	32,38 mm ± 3,02 mm	1,99 mm ± 2,32 mm	< 0,001
	Spp-FH – S'-FH	16,05 mm ± 2,66 mm	15,11 mm ± 3,24 mm	-0,94 mm ± 2,60 mm	0,034

	Spp-FH – Spa-FH	48,91 mm ± 3,01 mm	51,05 mm ± 3,09 mm	2,14 mm ± 1,63 mm	< 0,001
	Spp-FH – Zy-FH	19,87 mm ± 2,53 mm	21,96 mm ± 2,53 mm	2,09 mm ± 2,28 mm	< 0,001
	Zy-FH – A-FH	22,26 mm ± 3,18 mm	22,46 mm ± 2,98 mm	0,21 mm ± 2,22 mm	0,572
	Zy-FH – Or-FH	10,53 mm ± 2,87 mm	10,42 mm ± 3,00 mm	-0,10 mm ± 2,42 mm	0,798
PG3	Or-FH – A-FH	12,72 mm ± 1,96 mm	13,27 mm ± 2,37 mm	0,55 mm ± 2,04 mm	0,190
	S'-FH – A-FH	59,33 mm ± 3,05 mm	60,26 mm ± 3,38 mm	0,93 mm ± 1,45 mm	0,004
	S'-FH – Spa-FH	66,31 mm ± 3,67 mm	66,79 mm ± 3,81 mm	0,48 mm ± 0,36 mm	0,199
	Spp-FH – A-FH	44,37 mm ± 1,67 mm	44,85 mm ± 1,97 mm	0,48 mm ± 0,88 mm	0,012
	Spp-FH – Or-FH	31,66 mm ± 2,09 mm	31,58 mm ± 2,56 mm	-0,07 mm ± 1,98 mm	0,858
	Spp-FH – S'-FH	14,96 mm ± 2,79 mm	15,40 mm ± 3,27 mm	0,45 mm ± 1,55 mm	0,162
	Spp-FH – Spa-FH	51,36 mm ± 2,78 mm	51,38 mm ± 2,68 mm	0,03 mm ± 0,95 mm	0,884
	Spp-FH – Zy-FH	21,03 mm ± 2,58 mm	21,22 mm ± 2,71 mm	0,19 mm ± 1,94 mm	0,632
	Zy-FH – A-FH	23,34 mm ± 2,47 mm	23,63 mm ± 3,04 mm	0,29 mm ± 2,04 mm	0,481
	Zy-FH – Or-FH	10,62 mm ± 2,71 mm	10,36 mm ± 2,30 mm	-0,26 mm ± 2,02 mm	0,526

Tabelle 21: Darstellung der Strecken: Orbitale zum A-Punkt, Tuberculum sellae zum A-Punkt und zur Spina nasalis anterior, Spina nasalis posterior zum A-Punkt und zum Orbitale, Spina nasalis posterior zum Tuberculum sellae und zur Spina nasalis anterior, Spina nasalis posterior zum Processus zygomaticus, Processus zygomaticus zum A-Punkt und zum Orbitale zum Zeitpunkt T1 und T2 sowie Differenz zwischen T2 und T1 für PG1, PG2 und PG3. M = Mittelwert, SD = Standardabweichung, p (intra) = Signifikanzbereich, (hoch und höchst) signifikante Veränderungen sind rot markiert.

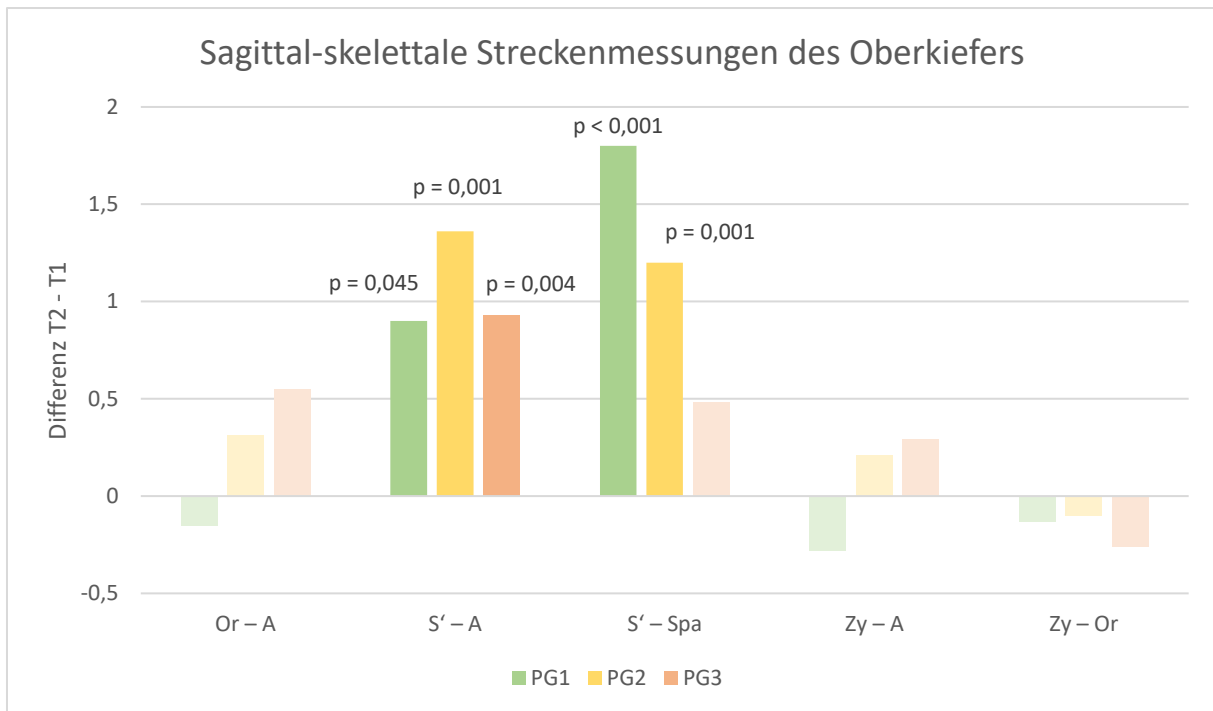


Abbildung 18: Graphische Darstellung der Mittelwerte der Differenz zwischen den Zeitpunkten T2 und T1. Darstellung der Streckenveränderung Orbitale zum A-Punkt, Tuberculum sellae zum A-Punkt und zur Spina nasalis anterior, Processus zygomaticus zum A-Punkt und zum Orbitale der Gruppen PG1, PG2 und PG3. Statistisch signifikante Werte wurden mit den p-Werten dargestellt, statistisch nicht signifikante Veränderungen wurden ausgeblendet dargestellt.

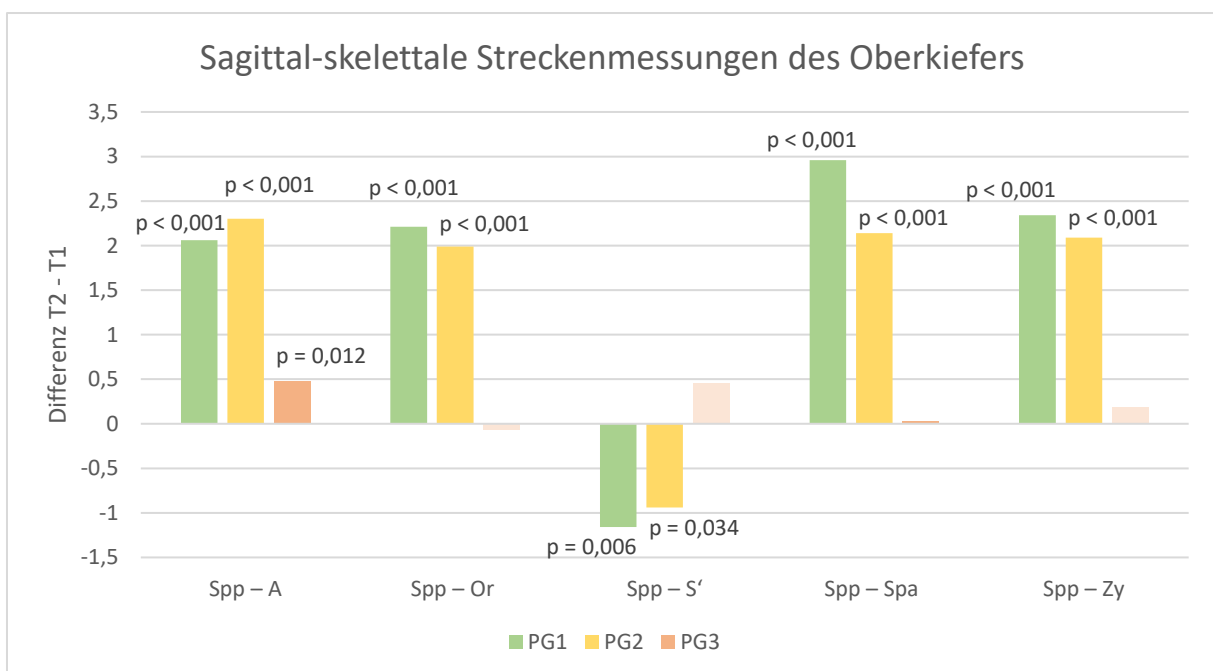


Abbildung 19: Graphische Darstellung der Mittelwerte der Differenz zwischen den Zeitpunkten T2 und T1. Darstellung der Streckenveränderung von Spina nasalis posterior zum A-Punkt, zum Orbitale, zum Tuberculum sellae, zur Spina nasalis anterior und zum Processus zygomaticus der Gruppen PG1, PG2 und PG3. Statistisch signifikante Werte wurden mit den p-Werten dargestellt, statistisch nicht signifikante Veränderungen wurden ausgeblendet dargestellt.

4.6.2 Ergebnisse zwischen den Gruppen

Da die Voraussetzung der Varianzhomogenität für die Strecken S'-FH – A-FH, Spp-FH – A-FH und Spp-FH – S'-FH nicht erfüllt waren, wurde für diese Werte eine Welch-Anova sowie der Games-Howell-Post-hoc-Test durchgeführt. Die entsprechenden Werte sind zudem mittels Sonderzeichen „~“ gekennzeichnet. Im Intergruppenvergleich ist ein höchst signifikanter Unterschied bei der Längenentwicklung der Strecke Spp-FH – A-FH zu verzeichnen, Welch-Test $F(2, 63,92) = 24,68$, $p < 0,001$. Hierbei liegt eine höchst signifikante Streckenzunahme ($p < 0,001$) bei PG1 im Vergleich zu PG3 und bei PG2 im Vergleich zu PG3 vor. Die Strecke Spp-FH – Or-FH weist in PG1 eine höchst signifikante ($p < 0,001$) Größenzunahme gegenüber PG3 auf und auch PG2 zeigt gegenüber PG3 eine hoch signifikante ($p = 0,002$) Längenveränderung an. Bei der Längenveränderung der Strecke Spp-FH – S'-FH ist ein hoch signifikanter Unterschied zwischen PG1 und PG3 ($p = 0,006$), sowie ein signifikanter Unterschied zwischen PG2 und PG3 ($p = 0,029$) zu verzeichnen, Welch-Test $F(2, 63,85) = 6,321$, $p = 0,003$. In PG1 nimmt die Länge der Strecke am stärksten ab, gefolgt von PG2, während in PG3 keine signifikante Längenänderung festgestellt werden kann. Die Längendifferenzen der Strecke Spp-FH – Spa-FH weisen im Vergleich von PG1 zu PG3 ($p < 0,001$) und PG2 zu PG3 ($p < 0,001$) höchst signifikante Unterschiede durch eine Vergrößerung der Strecke in PG1 und PG2 bei ausbleibender Längenveränderung in PG3 auf. Dies ist auch bei der Strecke Spp-FH – Zy-FH zu erkennen, wobei hier die Unterschiede als hoch signifikant zu vermerken sind (PG1 vs. PG3, $p = 0,001$ und PG2 vs. PG3, $p = 0,004$).

Intergruppenvergleich (p inter)				
Variable	PG1 vs. PG2	PG1 vs. PG3	PG2 vs. PG3	Gesamt
Or-FH – A-FH	0,648	0,448	0,910	0,448
S'-FH – A-FH	0,708~	0,998~	0,644~	0,627~
S'-FH – Spa-FH	0,456	0,051	0,401	0,064
Spp-FH – A-FH	0,755~	< 0,001~	< 0,001~	< 0,001~
Spp-FH – Or-FH	0,900	< 0,001	0,002	< 0,001
Spp-FH – S'-FH	0,925~	0,006~	0,029~	0,003~
Spp-FH – Spa-FH	0,037	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Spp-FH – Zy-FH	0,877	0,001	0,004	0,001
Zy-FH – A-FH	0,616	0,586	0,989	0,528
Zy-FH – Or-FH	0,998	0,972	0,960	0,960

Tabelle 22: Intergruppenvergleich der Strecken: Orbitale zum A-Punkt, Tuberculum sellae zum A-Punkt und zur Spina nasalis anterior, Spina nasalis posterior zum A-Punkt und zum Orbitale, Spina nasalis posterior zum Tuberculum sellae und zur Spina nasalis anterior, Spina nasalis posterior zum Processus zygomaticus, Processus zygomaticus zum A-Punkt und zum Orbitale. (Hoch und höchst) signifikante Werte sind rot markiert, Kennzeichnung mittels Welch-ANOVA berechneter Werte durch „~“.

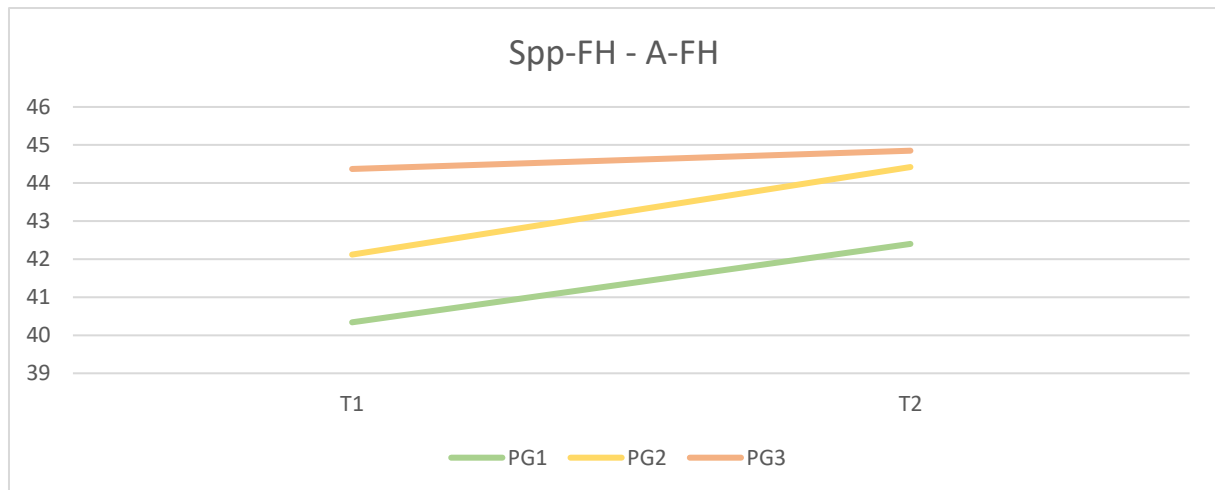


Abbildung 20: Intergruppenvergleich zwischen PG1, PG2 und PG3. Darstellung der Strecke Spp-FH – A-FH zum Zeitpunkt T1 und T2.

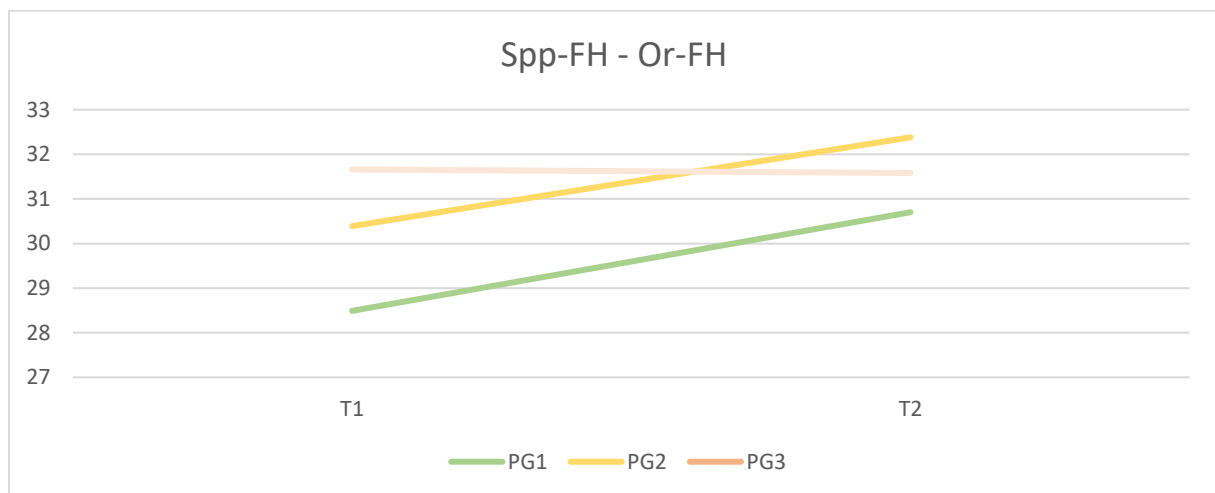


Abbildung 21: Intergruppenvergleich zwischen PG1, PG2 und PG3. Darstellung der Strecke Spp-FH – Or-FH zum Zeitpunkt T1 und T2. Statistisch nicht signifikante Veränderungen wurden ausgeblendet dargestellt.

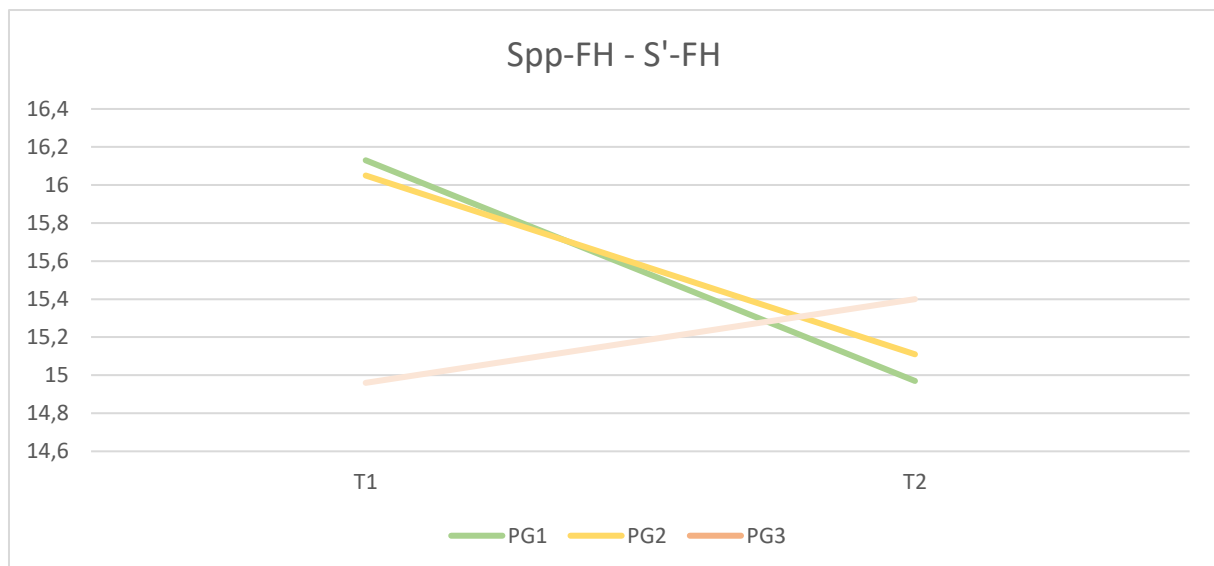


Abbildung 22: Intergruppenvergleich zwischen PG1, PG2 und PG3. Darstellung der Strecke Spp-FH – S'-FH zum Zeitpunkt T1 und T2. Statistisch nicht signifikante Veränderungen wurden ausgeblendet dargestellt.

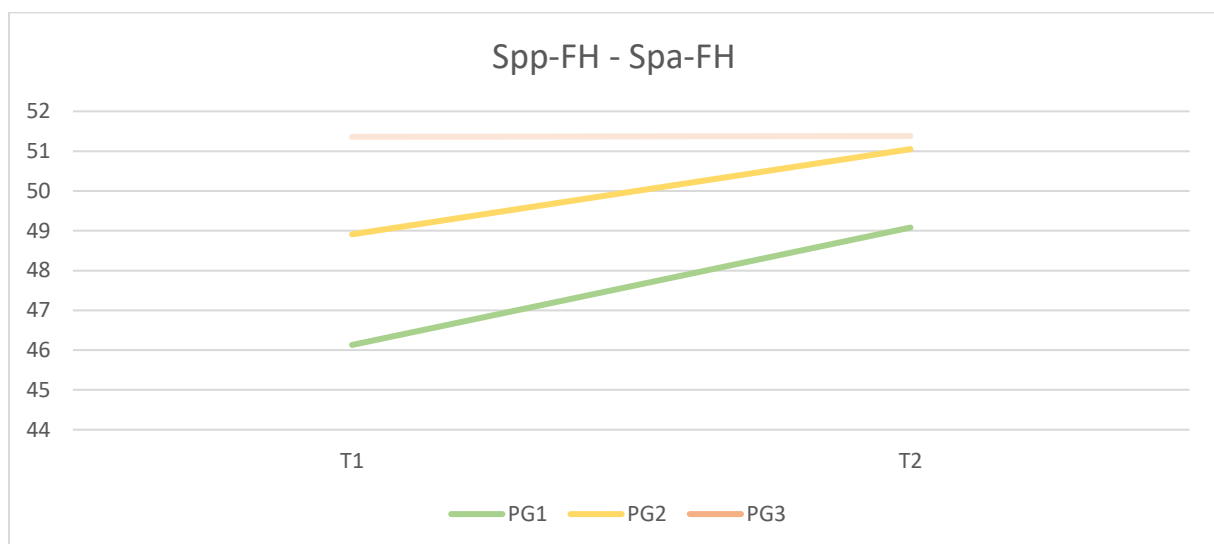


Abbildung 23: Intergruppenvergleich zwischen PG1, PG2 und PG3. Darstellung der Strecke Spp-FH – Spa-FH zum Zeitpunkt T1 und T2. Statistisch nicht signifikante Veränderungen wurden ausgeblendet dargestellt.

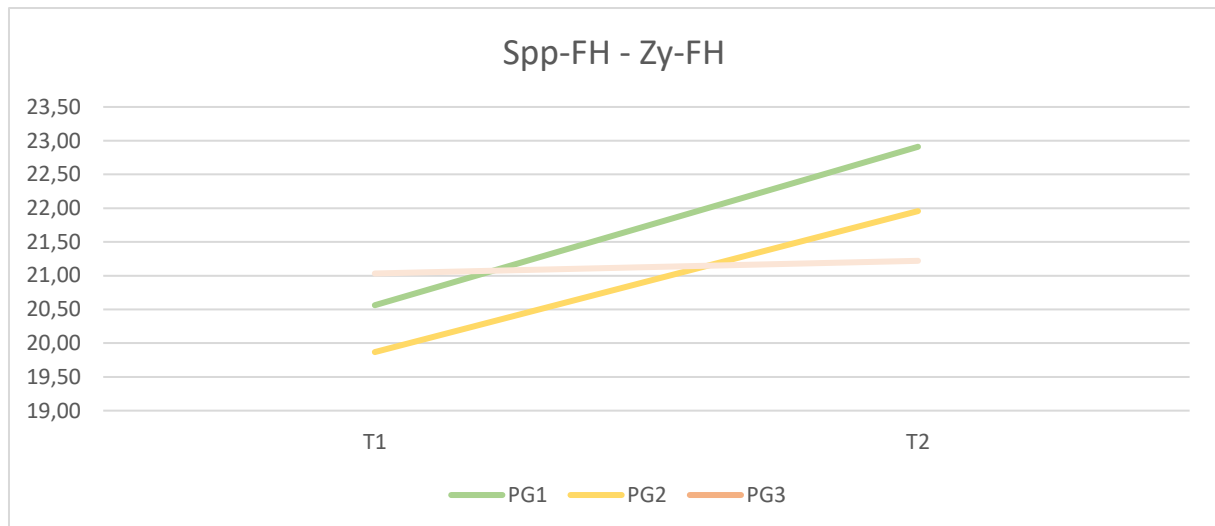


Abbildung 24: Intergruppenvergleich zwischen PG1, PG2 und PG3. Darstellung der Strecke Spp-FH – Zy-FH zum Zeitpunkt T1 und T2. Statistisch nicht signifikante Veränderungen wurden ausgeblendet dargestellt.

5. Diskussion

5.1 Patientengut, Methode und Vergleichbarkeit der Ergebnisse, mögliche Limitationen der Studie

Das Untersuchungsgut dieser Studie wurde in 3 Gruppen aufgeteilt und weist innerhalb dieser Gruppen eine hohe Homogenität auf. Alle Patienten wiesen zu Therapiebeginn eine skelettale Klasse-III-Anomalie auf und wurden ausschließlich mittels Funktionsregler nach Fränkel Typ 3 (FR-3) behandelt. Die Kooperation der Patienten wurde durch einen Tragezeitmessungsschip gesichert, sodass eine tägliche Mindesttragezeit von 11 Stunden - und damit eine verlässliche Vergleichbarkeit der Messergebnisse vorlag. Da vorherige Studien bereits darstellten konnten, dass bei der FR-3-Behandlung keine geschlechtsspezifischen Unterschiede aufgetreten waren [10], wurde auch in dieser Studie keine Aufteilung vorgenommen. Die vorliegende einheitliche Geschlechterverteilung innerhalb und zwischen den Gruppen (PG1: 18 männliche und 19 weibliche Patienten, PG2: 16 männliche und 21 weibliche Patienten, PG3: 13 männliche und 12 weibliche Patienten), sowie die Patientenzahl innerhalb der Gruppen (PG1: n = 37, PG2: n = 37, PG3: n = 25) gewährleistete ebenfalls eine gute Komparabilität zwischen PG1, PG2 und PG3. Einschränkung kann die Tragedauer des FR-3 zwischen den Gruppen PG1 (13,18 Monate $\pm$ 4,07 Monate), PG2 (11,24 Monate $\pm$ 3,67 Monate) und PG3 (10,04 Monate $\pm$ 1,79 Monate) diskutiert werden: Da in PG3 klinisch meist keine ausreichenden therapeutischen Effekte zu erkennen waren, erfolgte die Zwischendiagnostik und weitere therapeutische Maßnahmen früher als in PG1 und PG2, wodurch sich eine Differenz der Tragedauer insbesondere zwischen PG1 und PG3 ergab. Eine adäquate Vergleichbarkeit der Ergebnisse kann dennoch angenommen werden, da Fränkel in seinen Studien bereits nach einem Zeitraum von 7 Monaten positive therapeutische Effekte beobachten konnte [38]. Auch Liu und Yang [66], sowie McNamara und Hulse [73] konnten nach 12 Monaten bereits deutliche Veränderung der dentoalveolären und skelettalen Strukturen verzeichnen. Ausbleibende oder zu PG1 und PG2 abweichende Effekte aufgrund der kürzeren Tragedauer in PG3 sind daher als eher unwahrscheinlich anzunehmen.

Bei der FRS-Analyse kann von einer validen Reproduzierbarkeit der Messergebnisse ausgegangen werden, da zum einen der Methodenfehler nach Dahlberg einheitlich unter 1 lag, zum anderen ausschließlich digital erstellte Röntgenbilder von derselben Person kalibriert und ausgewertet wurden. Minimale Maßstabunterschiede in der digitalen Auswertung können zwar nicht vollständig ausgeschlossen werden, jedoch kann bei digitaler Auswertung von einem geringeren methodischen Fehler ausgegangen werden als bei manuell erfolgten FRS-Analysen [11].

Da die Messergebnisse dieser retrospektiven Studie sowohl therapeutisch induzierte Veränderungen als auch Effekte des natürlichen Wachstums beinhalten, handelt es sich um Summationseffekte. Um den

reinen Therapieeffekt der Behandlung zu ermitteln, müsste der Einfluss des natürlichen Wachstums herausgerechnet werden. In Hinsicht auf die Streckenmessungen ist eine solche Subtraktion jedoch aufgrund fehlender äquivalenter Vergleichsdaten nicht zu realisieren. Zwar wurde sich bei der kephalometrischen Streckenmessung an der Arbeit von Tschechne [110] orientiert, allerdings handelte es sich bei den Versuchsobjekten um mazerierte Schädel aus Indien und nicht, wie in dieser Studie, um Probanden einer kaukasischen Population. Zudem stimmen die durchgeführten Streckenmessungen nicht exakt mit denen von Tschechne überein: Anstelle des Referenzpunktes „Spina nasalis posterior“ wurde der Hinterrand der Maxilla verwendet und es fanden lediglich die weiteren nachstehenden Punkte Anwendung: A-Punkt, Orbitale, die Mitte des Porus acusticus externus sowie der Processus zygomaticus. Es ist darüber hinaus jedoch anzunehmen, dass das natürliche Wachstum innerhalb des erfolgten Behandlungszeitraumes im Vergleich zu den therapeutisch induzierten Effekten gering ausfällt. In Bezug auf die in dieser Studie erfolgten gängigen Winkel- und Streckenmessung ist ein eingeschränkter Vergleich mit vorherigen Studien möglich, auf die im Folgenden Bezug genommen wird. Zusätzlich zu dem SNA-Winkel wurde in dieser Studie der Maxillarwinkel verwendet, welcher in dieser spezifischen Form bisher nicht in der Literatur dokumentiert ist. Er wurde auf Grundlage von Delaires Methoden zur Analyse kraniofazialer Anomalien [23,26] erstellt, die auch den erstmals von Enlow [32] beschriebenen Punkt M beinhaltet. Er ist jedoch nahezu äquivalent zu dem von Delaire et al. [25] entwickelten Winkel CT-FM-ENA (Temporaler Kondylenpunkt - Fronomaxillärer Punkt - Spina nasalis anterior), welcher anstelle des Punktes M die Mitte der frontomaxillären Suture einschließt. Delaire et al. vertraten die Auffassung, dass dieser Winkel eine bessere Aussage über die Vorkippung des Oberkiefers zulässt, da der SNA-Winkel mitunter durch Variationen des Punktes S, sowie durch die Wanderungstendenz des Punktes A aufgrund dentoalveolärer Veränderungen beeinflusst wird [25]. Haynes und Chau [44] stellten fest, dass sowohl konventionelle FRS-Referenzpunkte als auch die von Delaire verwendeten Punkte eine hohe intraindividuelle Wiederholbarkeit aufwiesen und weder intra- noch interindividuell statistisch signifikante Unterschiede auftraten [44].

5.2 Ergebnisse der Studie und literarischer Vergleich

Die aktuelle Forschungslage liefert umfassende, jedoch oft heterogene Erkenntnisse zu den dentoalveolären und skelettalen Wirkungen des Funktionsreglers nach Fränkel Typ 3 (FR-3). Vermutungen oder Hypothesen über mögliche suturale Effekte wurden bislang noch nicht aufgestellt. In dieser Studie wurde neben den in der Literatur gängigen sagittalen und vertikalen Strukturmessungen auch sagittal-skelettale Streckenmessungen des Oberkiefers ausgewertet, die in dieser Form bislang nicht in der Fachliteratur dokumentiert sind. Trotz methodischer Unterschiede zu den bisherigen Studien – etwa hinsichtlich Tragedauer der Apparatur und Beobachtungszeitraum, erscheint ein vorsichtiger Vergleich mit diesen Befunden sowie der beobachteten Therapiewirkung dennoch gerechtfertigt.

Kalavritinos et al. [47] untersuchten in ihren Studien 14 Patienten, die den FR-3 für durchschnittlich $2,4 \pm 0,6$ Jahre für 14 – 16 Stunden pro Tag tragen sollten. Der Behandlungsstart lag bei $9,7 \pm 1,1$ Jahren. Es lag keine Kontrollgruppe vor, jedoch wurde der Vergleich zu einem unbehandelten Kontrollkollektiv aus einer anderen Studie gezogen. Robertson [95] beobachtete eine Gruppe von Kindern ab dem Alter von durchschnittlich 9,4 Jahren, die den FR-3 so viel wie möglich tragen sollten. Er schlussfolgerte, dass die hervorgerufenen Veränderungen vorwiegend dentoalveolären Ursprungs waren. Die Beobachtung endete mit durchschnittlich 11,4 Jahren, allerdings wurde in dieser Studie keine Probandenanzahl angegeben und es lag keine Vergleichsgruppe vor [95]. Baik et al. [10] untersuchten in ihrer Studie 30 Patienten mit einer milden- beziehungsweise Pseudo-Klasse-III-Anomalie. Der Behandlungsstart lag bei $8,0 \pm 1,2$ Jahren, der durchschnittliche Beobachtungszeitraum bei durchschnittlich $1,5 \pm 0,6$ Jahren, was am ehesten einen Vergleich zu der jüngsten Probandengruppe (PG1) der vorliegenden Studie erlaubt. Einschränkend ist zu erwähnen, dass Baik et al. die Untersuchungen an koreanischen Kindern durchgeführt hatten. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass die Therapie mittels FR-3 sowohl dentoalveoläre als auch skelettale Veränderungen hervorrufen kann, bei ausgeprägteren skelettalen Klasse-III-Fällen bestand die bevorzugte Therapie jedoch in der maxillären Protraktion mittels Gesichtsmaske und GNE. Diese Ansicht vertraten auch Wilhelm-Nold und Droschl [117], die insgesamt 30 Patienten in einem Zeitraum von durchschnittlich 6,5 Jahren beobachteten, die mittels Kinnkappe und FR-3 behandelt wurden. Sie teilten die Patienten in eine milde- (Gruppe 1) und ausgeprägte Progeniegruppe (Gruppe 2) ein und kamen zu dem Schluss, dass in Gruppe 1 eher skelettale Korrekturen möglich waren als in Gruppe 2, vor allem dann, wenn in der frühen Wechselgebissphase mit der Behandlung begonnen wurde. Bei einem späteren Behandlungsbeginn schienen die dentalen Kompensationsmechanismen die skelettalen Veränderungen deutlich zu überlagern [117].

Levin et al. [65] untersuchten 32 Patienten, die von Fränkel selber in Zwickau mit einem FR-3 behandelt wurden und verglichen sie mit einer Kontrollgruppe. Der Beobachtungszeitraum lag insgesamt bei durchschnittlich 9 Jahren und 2 Monaten und ermöglichte durch eine Zwischendiagnostik nach durchschnittlich 2 Jahren und 5 Monaten eine Differenzierung zwischen Kurzzeit- und Langzeit-Behandlungsergebnissen. Die Autoren kamen zu dem Schluss, dass die FR-3-Therapie bei guter Compliance signifikante Veränderungen des Oberkiefers sowie morphologische Anpassungen des Unterkiefers bewirken kann. Für die Beurteilung der Behandlungsergebnisse sei insbesondere eine langfristige Tragedauer von über fünf Jahren entscheidend [65]. Kerr et al. [51] kamen nach einem Beobachtungsintervall von im Schnitt 2,5 Jahren zu dem Ergebnis, dass der FR-3 keinen nennenswerten Einfluss auf die skelettalen Strukturen des Oberkiefers hatte und sich die beobachteten Veränderungen hauptsächlich durch dentale Umstrukturierungen erklären ließen. Der Behandlungsbeginn lag bei 10,5 Jahren, es wurden 30 Patienten mit 61 Kontrollprobanden verglichen, allerdings liegt keine Angabe zur Tragezeit des FR-3 vor [51]. Yang et al. [119] schlussfolgerten in ihrer Übersichtsarbeit, dass der FR-3 das mandibuläre Wachstum einschränken, jedoch keine Vorwärtsbewegung der Maxilla stimulieren kann.

5.2.1 Sagittale Winkel- und Streckenmessungen

Die hiesigen Messergebnisse stehen im Einklang zu den teils heterogenen Ergebnissen in vorherigen Studien. In Übereinstimmung mit Levin et al. [65] und Fränkel [39] kann eine skelettale Beeinflussung der Maxilla vermutet werden, allerdings nur für die beiden jüngeren Patientengruppen (PG1 und PG2). Hier war eine hoch signifikante Größenzunahme des SNA-Winkels und in PG2 zusätzlich des ANB-Winkels ersichtlich. Obwohl die Tragedauer von 2,5 Jahren länger als in dieser Studie war, konnten im Intragruppenvergleich ähnliche Ergebnisse erzielt werden: Der SNA-Winkel bei Levin et al. vergrößerte sich im Durchschnitt um $+ 0,70^\circ$, während in dieser Studie in PG1 und PG2 ein Anstieg von $+ 0,75^\circ$ zu beobachten war [65]. Auch wenn Falck und Zimmermann-Menzel [35] in einem Untersuchungszeitraum von durchschnittlich 8,2 Jahren keine signifikanten Veränderungen des SNA-Winkels im Vergleich zur Kontrollgruppe feststellen konnten, vermuten sie trotzdem eine Vorwärtsbewegung der Oberkieferbasis während der FR-3-Therapie aufgrund der signifikanten Zunahme der Oberkieferlänge. Ülgen und Firatli [111] und Baik et al. [10] stellten in ihren Intragruppenvergleichen zwar eine signifikante Vergrößerung des SNA-Winkels fest, konnten jedoch wie Kalavritinos et al. [47] in den Intergruppenvergleichen keine Veränderungen des SNA-Winkels feststellen, Übereinstimmungen mit deren Ergebnissen waren wie auch bei Kerr et al. [51] in der signifikanten Veränderung des ANB-Winkels zu finden.

Eine Wachstumsumlenkung des Unterkiefers im Sinne einer Verkleinerung des SNB-Winkels, welche auch weitere Autoren wie Baik et al. [10] vorfanden, konnte in der vorliegenden Studie nicht beobachtet werden. Auch bei Levin et al. [65] konnte keine signifikante Veränderung des SNB-Winkels aufgezeigt werden, Therapieeffekte spiegelten sich aber in der Vergrößerung des ANB-Winkels, sowie des Wits-Wertes wider, welche sich auch bei Studien von Baik et al. [10] signifikant verbessert hatten. Auch Biren und Erverdi [13] konnten keine Wirkung auf eine anterior gerichtete Veränderung des A-Punktes im Vergleich zur Kontrollgruppe feststellen [13], beobachteten aber eine wesentliche Verkleinerung des SNB-Winkels durch eine dorsokaudale Rotationsbewegung der Mandibula, welche oft in der Literatur beschrieben [67,73,87,111] und auch von Falck und Zimmermann-Menzel [35] aufgezeigt wurde.

Eine Hemmung des Unterkieferwachstum konnte wie auch in anderen Studien [65] bei den sagittalen Winkel- und Streckenmessungen nicht nachgewiesen werden. In PG3 ist zwar kein signifikanter Anstieg des SNB-Winkels ersichtlich, jedoch eine signifikante Verschlechterung des Wits-Wertes ($-0,53 \text{ mm} \pm 1,0 \text{ mm}$), welcher sich in PG1 hingegen tendenziell verbessert hatte und in PG2 relativ konstant blieb. Dies lässt sich mit der Hypothese von Köbel et al. [59] und Kerr et al. [51] vereinbaren, die eine Hemmung des Unterkieferwachstums als unwahrscheinlich erachten. Kerr et al. beobachtete während der FR-3-Therapie zudem eine signifikante Zunahme der totalen Mandibularlänge und der Korpuslänge (Go-Pog) [51]. Bei einem Behandlungsstart vor dem 12 Lebensjahr ist in dieser Studie jedoch zumindest keine Progredienz der Klasse-III-Anomalie zu erkennen und es konnte eine Normalisierung der Werte

erreicht werden. Dies steht im Einklang mit den Aussagen von Levin et al., die einen orthopädischen Einfluss auf das Oberkieferwachstum lediglich in frühen Jahren für möglich hielten [65].

5.2.2 Sagittal-skelettale Winkelmessungen zur Beurteilung des Maxillarwinkels in Anlehnung an Delaire und der Lageveränderung von Spina nasalis anterior

Delaire et al. [25] nahmen an, dass im Bereich der frontomaxillären Verbindung eine echte Gelenkverbindung besteht, die es dem Oberkiefer ermöglicht, sich auf unterschiedliche Weise zu positionieren und entsprechend zu wachsen. Bis zum Alter von sieben bis acht Jahren besteht eine klinisch nachweisbare Beweglichkeit in dieser Verbindung [25], was sich in einer entsprechenden orthopädischen Beeinflussbarkeit widerspiegelt. Diese nimmt im Wechselgebiss bereits ab und scheint sich nach dem 12. Lebensjahr zu minimieren [24,25]. Diese Aussage steht im Einklang mit den Beobachtungen zum Maxillarwinkel in dieser Studie. Eine Vergrößerung des Winkels zeigt in Anlehnung an Delaires CT-FM-ENA-Winkel eine nach anterior gerichtete Kippung und ein Vorgeiten des Oberkiefers beziehungsweise des nasomaxillären Komplexes auf [24]. In PG1 zeigte sich eine signifikante Vergrößerung, in PG3 dagegen eine signifikante Abnahme des Winkels. Wie von Delaire [27] beschrieben, ist während des Wachstums eine Mesiowanderung des Punktes FM erkennbar, was auch für Punkt M zutrifft [27]. Bei stagnierender Anteriorverlagerung der Spina nasalis anterior scheint dies in PG3 zu einer Verkleinerung des Maxillarwinkels zu führen. In PG1 übersteigt die anteriore Schwenkung des Oberkiefers beziehungsweise Anteriorverlagerung der Spina nasalis anterior die Mesialwanderung von Punkt M, während in PG2 zu vermuten ist, dass beide Bewegungen äquivalent verlaufen und somit keine signifikante Winkelveränderung erkennbar ist.

Eine signifikante Verkleinerung des Winkels N-Spa-Spp, wie es lediglich in PG1 zu beobachten ist deutet ebenfalls auf eine nach anterior und kaudal gerichtete Verschiebung der Spina nasalis anterior hin. Levin et al. [65] konnten ebenfalls ein translatorisches, posteroanterior verlaufendes Wachstumsmuster des Oberkiefers erkennen. Ein Vorwärts- und Abwärtskippen um die palatale Region des Oberkiefers wurde auch in vorherigen Studien zu Auswirkungen orthopädischer und kieferorthopädischer Kraftsysteme auf den Maxillarkomplex beobachtet [42,77,85].

5.2.3 Vertikale Winkel- und Streckenmessungen

Vertikale Strukturveränderungen konnten in dieser Studie lediglich am unteren Gonionwinkel festgestellt werden. Im Gegensatz zu anderen Studien [73,87], welche eine Verkleinerung des Winkels dokumentierten, war in PG2 und PG3 eine signifikante Zunahme zu beobachten. Die Verschiebung des

Punktes Menton nach posterior und kaudal, welche auch bei Kerr und Tenhave [52] und Kalavritinos et al. [47] beobachtet wurde, lässt auf eine Wachstumsumlenkung der Mandibula in vertikale Richtung schließen, welche unter anderem auch von Biren und Erverdi [13] und Ülgen und Firatli [111] beobachtet wurde. Auch Baik et al. [10] beobachteten eine nach posterior-inferior gerichtete Bewegung der Mandibula und konnten im Gegensatz zu den Ergebnissen dieser Studie einen signifikanten Anstieg des ML-NSL-Winkels um $0,8^\circ$ im Intra- und Intergruppenvergleich beobachten. Im Gegensatz dazu konnten Falck und Zimmermann-Menzel [35] während eines Beobachtungszeitraumes von durchschnittlich 8,2 Jahren eine signifikante Reduktion des ML-NSL-Winkels und zudem des NL-ML- und des Gonionwinkels dokumentieren. Lediglich der NL-NSL-Winkel zeigte im Vergleich zur Kontrollgruppe eine signifikante Vergrößerung von $1,41^\circ$ [35]. Es ist anzunehmen, dass das Ausbleiben vertikaler Therapieeffekte – mit Ausnahme der oben beschriebenen Veränderungen von Go2 – auf die im Vergleich zu anderen Studien relativ kurze Beobachtungsdauer zurückzuführen ist. Levin et al. [65] konnten in ihren Kurzzeit-Behandlungsergebnissen ebenfalls keine vertikalen Therapieeffekte nachweisen, erst nach einem Beobachtungszeitraum von über 6 Jahren konnte eine signifikante Reduktion des Unterkiefernebenenwinkels (Me/Go-FH) und des Gonionwinkels im Vergleich zur Kontrollgruppe aufgezeigt werden [65]. Bacetti et al. [7] konnten in ihren Untersuchungen zur maxillären Protraktion insbesondere ab dem späten Wechselgebiss eine dorsokaudale Rotationsbewegung des Unterkiefers nachweisen. Ein vergleichbares Muster lässt sich in der vorliegenden Studie ebenfalls andeutungsweise beobachten.

5.2.4 Weichteilmessungen und dentale Winkelmessungen

Kalavritinos et al. [47] registrierten in ihren Studien die prägnantesten Veränderungen bei den Weichteilmessungen: Es zeigte sich eine signifikante Zunahme der Gesichtskonvexität und der Prominenz der Nase, zudem war eine Normalisierung der Unterlippenposition, eine Zunahme der Oberlippendicke und Abnahme der Unterlippendicke zu verzeichnen [47]. Auch Kerr und Tenhave [50] und Kerr et al. [51] konnten eine Harmonisierung des Profils nach einer FR-3-Therapie aufweisen. Demgegenüber stehen die Ergebnisse dieser Studie, bei der sich lediglich in PG3 eine Vergrößerung des Abstands der Unterlippe zur E-Linie feststellen ließ. In PG1 und PG2 war keine signifikante Vergrößerung der Strecke zu erkennen. Da therapeutische Effekte einer Klasse-III-Behandlung bei jüngeren Patienten jedoch eher zu erwarten sind [7,8,27,93], lässt sich in PG3 eher auf einen Wachstumseffekt im Sinne einer Anteriorbewegung des Punktes „Nasale“ (anteriorster Punkt der Nasenspitze) und nicht auf einen therapeutischen Effekt schließen.

Robertson [95] und Kerr und Tenhave [52] schlossen nach ihren Untersuchungen zum FR-3, dass die Therapieeffekte überwiegend dentoalveolären Ursprungs waren und die posttherapeutische Verbesserung der Schneidezahnstellung in erster Linie auf eine Reklination der unteren Front

zurückzuführen war [95]. Mühlberg et al. [83] beobachteten nach FR-3-Therapie eine geringe Zahnkipfung und Kalavritinos et al. [47] vermuteten ebenfalls dentoalveoläre Effekte aufgrund der signifikanten Verbesserung des overjets im Vergleich zur Kontrollgruppe, eine Veränderung der Frontzahninklination konnte jedoch nicht nachgewiesen werden [47]. Levin et al. [65] konnten ebenfalls keine signifikanten Inklinationsänderungen der Front erkennen und verwiesen dabei auf die richtige Herstellung der Apparatur: Der untere Labialbogen des FR-3 muss eng an den Labialflächen der Schneide- und Eckzähne auf Papillenhöhe anliegen. Die tiefe Position verhindert ein linguales Kippen der Zähne und soll das anteriore Unterkieferwachstum hemmen [65]. Nach der FR-3-Therapie zeigte sich zudem eine geringere Kompensation der oberen Frontzähne im Vergleich zur Kontrollgruppe [65]. Entsprechend dazu sind in dieser Studie keine signifikanten Veränderungen in der Frontzahninklination zu erkennen. Auch eine Verstärkung der dentoalveolären Kompensationsmechanismen, wie es häufig in vorherigen Studien beschrieben wurde [10,51,73,111], konnte nicht nachgewiesen werden.

5.2.5 Sagittal-skelettale Streckenmessungen des Oberkiefers

Eine anteriore Verlagerung des A-Punktes konnte in allen Patientengruppen beobachtet werden. Dies zeigt sich in den (hoch/höchst) signifikanten Zunahmen sowohl der Strecke $S' - A$ als auch der Strecke $Spp - A$ (PG1: $p = 0,045/ p < 0,001$, PG2: $p = 0,001/ p < 0,001$ und PG3: $p = 0,004/ p = 0,012$). Die Zunahme in PG2 war hierbei mit $1,36 \text{ mm} \pm 2,31 \text{ mm}$ ($S' - A$) und $2,30 \text{ mm} \pm 1,41 \text{ mm}$ ($Spp - A$) am höchsten, gefolgt von PG1 und PG3. Auch die deutlichste Zunahme des SNA-Winkels in PG2 weist darauf hin, dass die anteriore Lageveränderung des Punktes A in dieser Gruppe am stärksten ausgeprägt zu sein scheint. Auch Baik et al. [10] konnten in ihren Untersuchungen eine signifikante Streckenzunahme zwischen einer von ihnen konstruierten Y-Achse durch den Punkt Sella und dem A-Punkt aufweisen. Die mit FR-3 behandelte Gruppe (Alter bei Behandlungsbeginn: $8,0 \text{ Jahre} \pm 1,2 \text{ Jahre}$) wies dabei einen durchschnittlichen Anstieg von $1,3 \text{ mm} \pm 1,0 \text{ mm}$ auf, die Kontrollgruppe (Alter bei Beobachtungsbeginn: $8,2 \text{ Jahre} \pm 1,1 \text{ Jahre}$) einen Anstieg von $0,9 \text{ mm} \pm 2,1 \text{ mm}$. Die Intergruppenvergleiche wiesen jedoch keine Signifikanzen auf. Falck und Zimmermann-Menzel [35] konnten in einem Beobachtungszeitraum von 8,2 Jahren in den Intra- sowie Intergruppenvergleichen signifikante Unterschiede in der Strecke $PNS - A$ feststellen: Die behandelte Gruppe wies eine Verlängerung von durchschnittlich $4,40 \text{ mm} \pm 2,09 \text{ mm}$ auf, während die Kontrollgruppe eine Verlängerung von durchschnittlich $2,93 \text{ mm} \pm 1,76 \text{ mm}$ aufwies.

Die Strecken $Or - A$ und $Zy - A$ zeigten in keiner der 3 Gruppen signifikante Unterschiede im Inter- oder Intragruppenvergleich auf. Dies steht in Übereinstimmung zu den Ergebnissen von Tschechne [110], der in seiner Studie zur sagittalen Entwicklung des Oberkiefers im Alter von 7 bis 10 Jahren eine durchschnittliche Verkleinerung der Strecke $Zy - A$ von $0,4 \text{ mm}$ feststellen konnte und anschließend einen moderaten Anstieg verzeichnete. Im Alter von 7 bis 12 Jahren war insgesamt eine mittlere

Längenzunahme von 0,3 mm pro Jahr zu erkennen, anschließend stagnierte die Länge. Bei der Strecke Or – A konnte Tschechne in dieser Altersgruppe einen flachen, moderaten Anstieg verzeichnen. Die durchschnittliche Gesamtverlängerung zwischen 7 und 15 Jahren betrug 2,1 mm, was einer jährlichen Längenzunahme von 0,26 mm entsprach [110]. Zudem konnten Enlow und Hans [33] darlegen, dass sich der Infraorbitalrand in Verbindung mit dem suturalen Knochenwachstum in eine antero-kraniale Richtung ausdehnt [33] und sich somit auf Punkt A zubewegt, was das Ausbleiben einer signifikanten Längenveränderung erklären könnte. Die Annahme, dass die obig genannten Streckenverlängerungen auf eine Verschiebung des nasomaxillären Komplexes und nicht auf eine Knochenapposition am Punkt A zurückzuführen sind, kann dennoch nicht ausgeschlossen werden und würde die Ansicht von Baik et al. [10] unterstützen.

Die Strecke Zy – Or wies in keiner der Gruppen eine signifikante Veränderung auf und auch Tschechne [110] beobachtete einen sehr flachen Wachstumsverlauf. Vom 6. bis zum 13. Lebensjahr war eine Längenveränderung von - 0,1 mm zu erkennen. Weitere Wachstumsstudien konnten belegen, dass das Wachstum des Jochbeins mit den Wachstumsbewegungen der Orbita abgestimmt ist, sodass sich beide Segmente äquivalent zueinander verlagern [31,33].

Signifikantes Wachstum des Spinaplanums konnte nur in PG1 und PG2 nachgewiesen werden, wobei in der jüngsten Patientengruppe das größte Wachstum und in PG3 eine Stagnation der Verlängerung zu erkennen war. Die Distanz zwischen den Punkten S' – Spa und Spp – Spa nahm nur in PG1 und PG2 eine hoch und höchst signifikante (PG1: $p < 0,001$ / $p < 0,001$, PG2: $p = 0,001$ / $p < 0,001$) Größenzunahme an. Auch Baik et al. [10] konnten in ihren Intragruppenvergleichen eine signifikante Verlängerung von durchschnittlich $1,4 \text{ mm} \pm 1,2 \text{ mm}$ zwischen obig erwähnter Y-Achse und der Spina nasalis anterior darstellen. Obwohl deren Intergruppenvergleiche keine Signifikanzen aufwiesen, lag die Verlängerung in der Kontrollgruppe mit $1,0 \text{ mm} \pm 1,1 \text{ mm}$ deutlich unter den in dieser Studie ermittelten Werten für die Strecke S'–Spa (PG1: $1,80 \text{ mm} \pm 2,46 \text{ mm}$, PG2: $1,20 \text{ mm} \pm 2,03 \text{ mm}$). Ülgen und Firatli [111] konnten in den Intragruppenvergleichen einer mit FR-3 behandelten Patientengruppe (durchschnittliches Alter bei Behandlungsstart: $9,5 \text{ Jahre} \pm 1,3 \text{ Jahre}$, Behandlungszeit: $1,9 \text{ Jahre} \pm 0,3 \text{ Jahre}$) ebenfalls eine signifikante Verlängerung des Spinaplanums von $1,4 \text{ mm} \pm 1,3 \text{ mm}$ aufzeigen, zudem zeigte die Kontrollgruppe mit einer Verlängerung von $1,2 \text{ mm} \pm 1,2 \text{ mm}$ geringere Werte, als in dieser Studie zu beobachten waren (PG1: $2,96 \text{ mm} \pm 1,43 \text{ mm}$, PG2: $2,14 \text{ mm} \pm 1,63 \text{ mm}$).

Tschechne [110] stellte fest, dass ab dem 6. Lebensjahr die Verlängerung der Maxilla überwiegend am Hinterrand erfolgte. Das Hauptwachstum fand in seinen Messungen zwischen dem Hinterrand der Maxilla und dem Os zygomaticum statt. Wie bereits von Melsen [76] postuliert, nahm auch er an, dass die Verlängerung vor allem im Bereich der Sutura palatina transversa stattfand [110]. Auch in dieser Studie ist eine deutliche posteriore Längenzunahme der Maxilla zu beobachten: In PG1 und PG2 sind höchst signifikante Streckenzunahme zwischen den Punkten Spp – Or und Spp – Zy zu verzeichnen. Ein altersabhängiger Effekt ist erneut zu vermuten, da die Größenzunahme von PG1 über PG2 abnimmt und in PG3 keine signifikante Veränderung mehr vorzuweisen ist. In Übereinstimmung mit Enlow und

Hans [33], welche beobachteten, dass sich der Oberkiefer in dem Maße verlängerte, in dem sich der Punkt PTM (pterygomaxilläre Fissur) nach hinten verschob, konnte in PG1 und PG2 ebenfalls eine Verkleinerung der Strecke Spp – S', also eine posteriore Verschiebung des Punktes „Spp“ beobachtet werden. Im Gegensatz zu Björk [15,16], der das Längenwachstum als eine Kombination aus suturalem Wachstum in Richtung des Gaumens, begleitet von periostaler Apposition am Tuber maxillae beschrieb, ging Enlow [33] jedoch primär vom Wachstum im Bereich des Tuber maxillae aus.

Aufgrund der obig genannten Ergebnisse und literarischen Vergleiche kann eine Beeinflussung des nasomaxillären Komplexes und speziell des Spinaplanums durch die Behandlung mittels FR-3 vermutet werden. Zudem ist wie bereits in Kapitel 5.2.2 erläutert, eine ventrokaudale Rotationsbewegung der Spina nasalis anterior zu vermuten, gleichzeitig findet in den beiden jüngeren Patientengruppen eine nach posterior gerichtete Bewegung der Spina nasalis posterior statt, welche durch die Verkleinerung der Strecke Spp – S' ersichtlich wird. In dieser Studie ließ sich keine gleichgerichtete Verschieberichtung der Punkte Spa und Spp nachweisen, was auf ein unterschiedliches Wachstumsverhalten im anterioren und posterioren Bereich des Gaumens hindeutet. Bereits frühere Studien konnten darstellen, dass der harte Gaumen dem Displacement der Maxilla nicht vollständig folgt und sich dieser Verschiebung durch suturales Wachstum und Remodellierung anpasst [16,17,78]. Nachstehend erfolgt eine differenzierte Betrachtung der Wachstumsprozesse der maxillären und palatinalen Strukturen.

5.2.5.1 Morphologische Veränderung der Gaumen- und Oberkieferlänge und der palatinalen und maxillären Suturen

Zahlreiche Studien konnten die Suturen des Schädels eindeutig als funktionelle Wachstumszentren des kraniofazialen Skeletts identifizieren [33,76,78]. Während Enlow und Bang [31] sowie Delaire et al. [24] das Größenwachstum der Maxilla und die Erweiterung des Zahnbogens hauptsächlich einem appositionellen Wachstum an den posterioren Flächen und den Tubera der Maxilla zuschrieben, untersuchte Melsen [76] vor allem das Wachstum an den transversalen und medianen Gaumennähten. Die Studien veranschaulichten, dass das Längenwachstum des harten Gaumens bis zum Alter von 13 bis 15 Jahren auf das Wachstum in der Sutura palatina transversa sowie auf Apposition am hinteren Rand des Gaumens zurückzuführen war. Die Ergebnisse deuteten außerdem darauf hin, dass die transversale Naht als Übergangszone zwischen den unterschiedlichen Wachstumsmustern des maxillären und palatinalen Anteils des Gaumens fungiert [76,79]. Auch die Ergebnisse der vorliegenden Studie lassen auf ein unterschiedliches Wachstumsverhalten zwischen dem maxillären und dem palatinalen Anteil des Gaumens schließen, welches sich durch eine posteriore Verschiebung der Spina nasalis posterior und eine antero-kaudale Verschiebung der Spina nasalis anterior auszeichnet. Melsen [76] beobachtete zudem eine morphologische Veränderung der Sutura palatina transversa im Laufe des

postnatalen Wachstums: Bei der Geburt stellte sich diese breit und leicht gewunden dar und entwickelte sich bis etwa zum 10. Lebensjahr zu einer typischen squamösen Suture mit beginnender Verzahnung. Der palatinale Anteil überlagerte dabei den maxillären. Nach dem 13. Lebensjahr war eine Verengung zwischen den beiden Bindegewebsschichten der Gaumensegmenten zu erkennen und die Suture verkürzte sich [76,78]. Äquivalent dazu wurde in dieser Studie eine altersabhängige Längenentwicklung des Spinaplanums ersichtlich: Bei Therapiebeginn vor dem 12. - und insbesondere vor dem 10. Lebensjahr konnte eine signifikante Längenzunahme beobachtet werden. Ab dem 9. Lebensjahr wurde in Studien eine altersabhängige Zunahme der Suturendichte, beginnend im palatinalen Bereich, beobachtet. Zudem zeigte sich ein Zusammenhang zwischen der Verknöcherung des Os palatinum und dem Längenwachstum der Maxilla [99]. Im Verlauf der maxillären Entwicklung veränderte die Sutura palatina mediana ebenfalls ihre Form: zunächst war sie breit und Y-förmig, anschließend wellenförmig und zeigte im Jugendalter einen gewundenen Verlauf mit zunehmender Verzahnung [76]. Auch Knaup et al. [58] und Persson und Thilander [88] beobachteten in ihren Studien, dass mit dem allgemeinen Fortschreiten der Verknöcherung im Alter die Ossifikationen bei jüngeren Altersgruppen am häufigsten im posterioren Abschnitt der intermaxillären Suture begann. Posterior und in der Vertikalen oral zeigte sich mehr Obliteration als anterior und nasal [88]. In den frühen Stadien des suturalen Verschlusses war zu erkennen, dass knöcherne Spiculae, die die Naht durchquerten, häufig physiologisch gebrochen wurden oder die Naht durch osteoklastische Resorption wieder geöffnet wurde. Dies ließ vermuten, dass funktionelle Kräfte den Nahtverschluss in den frühen Stadien beeinflussen kann [88]. Mit zunehmendem Alter vergrößert das Os palatinum seine Kontaktflächen zu den benachbarten Knochen – dem Oberkiefer und dem Processus pterygoideus. Dabei zeigte sich in Versuchen von Melsen und Melsen jedoch eine deutliche Variabilität zwischen Individuen innerhalb desselben Entwicklungsstadiums [78]. Auch weitere Studien konnten eine Wechselwirkung zwischen funktionellen Kräften und der Morphologie der Suturen nachweisen [53,80,81]. Suturen, die einer reduzierten funktionellen Belastung ausgesetzt waren, wiesen mehr Synostosen auf und fusionierten schneller, was auf einer verminderten Spannung in den regulierend wirkenden Periostmembranen zurückzuführen war [5,49,54,81,96]. Weitere Tierversuche konnten nachweisen, dass das Wachstum der Sutura palatina mediana in mit FR-3 und mittels Bukkalschildern behandelten Gruppen signifikant größer ausfiel und ließen die Schlussfolgerung zu, dass die vestibulären Schilder eine Erweiterung des Oberkieferbogens sowie eine verstärkte Aktivität der palatinalen Suturen bewirkten [48,108]. Da in PG3 die Therapie mit durchschnittlich 12,72 Jahren begonnen wurde ist bereits mit einer fortgeschrittenen Verzahnung der palatinalen und maxillären Suturen zu rechnen, was eine suturale Beeinflussung durch den FR-3 deutlich herabsetzen – und die Stagnation der Längenentwicklung des Spinaplanums erklären könnte.

Obwohl das Wachstum der Maxilla im 8. Lebensjahr zu 95% abgeschlossen ist [61,69], wird suturales Wachstum in der Literatur bis zum 15. Lebensjahr beschrieben [63,76,88], ein Abschluss dessen bis zum 17. Lebensjahr [15,79]. Während der aktiven Wachstumsphase kann die gezielte Anwendung kontrollierter mechanischer Kräfte das kraniofaziale Wachstum beeinflussen, indem sie remodellierende

Veränderungen in den suturalen Verbindungen hervorruft [64,88,109]. Die Altersgrenze für eine suturale Beeinflussung im Rahmen einer konventionellen Gaumennahterweiterung, welche bereits in Kapitel 2.3 erläutert wurde, wird in der Literatur teils kontrovers diskutiert, insbesondere im Hinblick auf die langfristige Stabilität der Behandlungsergebnisse. Einigkeit besteht weitgehend darüber, dass bis zum Alter von etwa 10 Jahren eine effektive skelettale Beeinflussung mit minimalen dentalen Nebenwirkungen erzielt werden kann [56,84,90,91,93]. Weitere Studien stellten jedoch zur Diskussion, dass das Alter nicht notwendigerweise mit dem Reifegrad der Suturen korreliert und vor allem der Verknöcherungsindex der Sutura palatina mediana nicht als Hauptfaktor für die erhöhte transversale Resistenz bei der GNE angesehen werden kann [3,21,58,61,105].

Wie bereits in Kapitel 2.3 aufgeführt, konnten Kinzinger et al. darstellen, dass die maxilläre Erweiterung nach GNE bei Kindern altersabhängig verläuft [56]. Bis zum 10. Lebensjahr war posterior eine größere Breitenzunahme als anterior zu verzeichnen, während ältere Patienten eine umgekehrte Breitenzunahme aufwiesen. Neben einer altersabhängigen Zunahme der Rigidität der pterygopalatomaxillären Suturen schienen vor allem morphologische Veränderungen der Sutura palatina transversa im Verlauf des Wachstums für das Therapieergebnis verantwortlich zu sein. Diese stellte sich bei Patienten bis zum 12. Lebensjahr in DVT-Aufnahmen in der Transversalebene durchgehend geöffnet dar, bei Patienten über 12 Jahren war keine durchgehende Darstellung der Suturen möglich [56]. Zusätzlich konnten unterschiedlichen Gaumenlängenveränderungen bei maxillärer Protraktion vor und nach dem 12. Lebensjahr aufgezeigt werden [57]. Insgesamt war in der jüngeren Patientengruppe mehr Längenzunahme zu erkennen, was in Einklang mit den Ergebnissen der vorliegenden Studie steht. Zudem konnten Kinzinger et al. in den Gruppenvergleich bei Patienten unter 12 Jahren insbesondere im posterioren Bereich signifikant höhere Zunahmen der Gaumenlänge beobachten, anterior stellten sich keine Unterschiede in den Intergruppenvergleichen dar [57]. Zurückzuführen waren diese Unterschiede auf die altersabhängige Morphologie der pterygopalatomaxillären Suturen und Sutura palatina transversa. Äquivalent dazu konnten Kalavritinos et al. [47] und McDougall et al. [72] bei mit dem Funktionsregler behandelten Patienten beobachten, dass die Erweiterung des Oberkieferzahnbogens deutlich ausgeprägter ausfiel als in der Kontrollgruppe. Die größten Expansionswerte konnten McDougall et al. hierbei posterior, im Prämolaren- und Molarenbereich verzeichnet werden, während anterior geringere Werte dokumentiert wurden [72]. Dies könnte insbesondere darauf hindeuten, dass der Funktionsregler – in Abhängigkeit vom Reifegrad der palatinalen und maxillären Suturen – im posterioren Gaumenbereich durch die Beeinflussung der Sutura palatina transversa eine größere Expansion ermöglicht als anterior.

5.3 Rückschlüsse der Studie

Im Rahmen dieser Studie konnten neben den bereits bekannten dentoalveolären und skelettalen Effekten auch ausführliche Erkenntnisse zu den morphologischen Längenveränderungen des Oberkiefers während der FR-3-Therapie erarbeitet werden.

Die differenzialtherapeutischen Ergebnisse stellten sich dabei in Abhängigkeit vom Patientenalter in den 3 Gruppen unterschiedlich dar. Skelettale Auswirkungen auf die Maxilla waren vor allem bei einem Behandlungsstart vor dem 12. - und insbesondere vor dem 10. Lebensjahr zu erkennen. Wie auch in PG1 konnte in PG2 sowohl eine hoch signifikante Größenzunahme des SNA-Winkels als auch eine höchst signifikante Zunahme der Oberkieferlänge beobachtet werden. Zudem war in der jüngsten Patientengruppe eine signifikante Vergrößerung des Maxillarwinkels sowie eine anteriore und leicht kaudale Bewegung der Spina nasalis anterior zu beobachten. Bei einem Behandlungsstart ab dem 12. Lebensjahr konnte kein relevanter therapeutischer Effekt auf die Maxilla nachgewiesen werden, was in Übereinstimmung zu anderen Autoren steht, die den therapeutischen Einfluss auf die Maxilla ab dem 12. – 13. Lebensjahr als deutlich herabgesetzt ansehen [27]. Im Gegensatz zu vorherigen Studien zeigte sich der Haupteffekt des FR-3 weder im Unterkiefer noch in einer Inklinationsänderung der oberen und unteren Frontzähne. Die Ergebnisse lassen eher die These zu, dass sich die prägnantesten Effekte auf den nasomaxillären Komplex beziehen und sich diese nach dem 10. Lebensjahr langsam reduzieren, während eine geringe Wachstumsumlenkung des Unterkiefers in die Vertikale beginnt. Ein Therapiestart vor dem 10. Lebensjahr scheint daher besonders effektiv.

Die Ergebnisse konnten zudem darstellen, dass die Verlängerung der Maxilla entlang des Spinaplanums stattfindet. Da in bisherigen Studien kein appositionelles Wachstum an der Spina nasalis anterior oder posterior beobachtet werden konnte [15] lässt der Befund die Vermutung zu, dass die Verlängerung hauptsächlich durch suturales Wachstum insbesondere an der Sutura palatina transversa erfolgen könnte. Weitere Studien, die eine adäquate Vergleichsgruppe miteinbeziehen, scheinen in dieser Hinsicht sinnvoll, um zu untersuchen, wie ausgeprägt der Einfluss des FR-3 auf diese Längenentwicklung ausfällt.

Wie bereits in Kapitel 5.2.5.1 beschrieben, kann ab dem 10. Lebensjahr mit einer beginnenden Verzahnung insbesondere der Sutura palatina transversa gerechnet werden, was mit einer Wachstumsabnahme korreliert. Obwohl das durchschnittliche Alter bei Behandlungsstart in PG1 (8,42 Jahre) und PG2 (11,07 Jahre) 2,65 Jahre auseinander lag, war die Längenentwicklung des Spinaplanums relativ äquivalent (PG1: 2,96 mm $\pm$ 1,43 mm, PG2: 2,14 mm $\pm$ 1,63 mm) während in PG3 kein Wachstum mehr zu verzeichnen war. Dies lässt die Überlegung zu, ob der FR-3, abhängig vom Patientenalter, durch die Reduktion des Gewebedrucks sowie die erhöhte Zugapplikation auf den Oberkiefer die maxillären und palatinalen Suturen beeinflussen - und möglicherweise auch die suturale Interdigitation verlangsamen kann. Ein Beweis ist jedoch nur durch weiterführende prospektiv angelegte

Studien mit zusätzlicher DVT-Kontrolle möglich. Zu hinterfragen ist außerdem, ob die Zugwirkung des FR-3 für eine suturale Beeinflussung ausreicht.

6. Literatur- und Abkürzungsverzeichnis

6.1 Literaturverzeichnis

1. Abo Samra D, Hadad R (2018) Midpalatal suture: evaluation of the morphological maturation stages via bone density. *Prog Orthod* 19:29
2. Acar YB, Motro M, Erverdi AN (2015) Hounsfield Units: A new indicator showing maxillary resistance in rapid maxillary expansion cases? *Angle Orthod* 85:109–116
3. Al-Gumaei WS, Long H, Al-Attab R, Elayah SA, Alhammadi MS, Almagrabi I, Al-Rokhami RK, Lai W, Zheng Y (2023) Comparison of three-dimensional maxillary growth across sphenoccipital synchondrosis maturation stages. *BMC Oral Health* 23:100
4. Alhammadi MS, Halboub E, Fayed MS, Labib A, El-Saaidi C (2018) Global distribution of malocclusion traits: A systematic review. *Dental Press J Orthod* 23:40.e1-40.e10
5. Babler WJ, Persing JA (1982) Experimental alteration of cranial suture growth: effects on the neurocranium, basicranium, and midface. *Prog Clin Biol Res* 101:333–345
6. Baccetti T, McGill JS, Franchi L, McNamara JA, Tollaro I (1998) Skeletal effects of early treatment of Class III malocclusion with maxillary expansion and face-mask therapy. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 113:333–343
7. Baccetti T, Franchi L, McNamara JAJ (2000) Treatment and posttreatment craniofacial changes after rapid maxillary expansion and facemask therapy. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 118:404–413
8. Baccetti T, Franchi L, Cameron CG, McNamara JA (2001) Treatment timing for rapid maxillary expansion. *Angle Orthod* 71:343–350
9. Baccetti T, Franchi L, McNamara JA (2005) The Cervical Vertebral Maturation (CVM) Method for the Assessment of Optimal Treatment Timing in Dentofacial Orthopedics. *Semin Orthod* 11:119–129
10. Baik HS, Jee SH, Lee KJ, Oh TK (2004) Treatment effects of Fränkel functional regulator III in children with class III malocclusions. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 125:294–301

11. Beckmann G, Wingberg J, Hasund A (1983) Computerunterstützte Kephalmetrie in der Bergen-Technik. Fortschritte der Kieferorthopädie 44:359–369
12. Bimler HP (1979) Progeniebehandlung mit Gebißformen. Fortschritte der Kieferorthopädie 40:485–493
13. Biren S, Erverdi N (1993) Cephalometric evaluation of maxillary retrognathism cases treated with FR-3 appliance. J Marmara Univ Dent Fac 1:354–360
14. Bishara SE, Staley RN (1987) Maxillary expansion: clinical implications. Am J Orthod Dentofacial Orthop 91:3–14
15. Björk A (1966) Sutural growth of the upper face studied by the implant method. Acta Odontol Scand 24:109–127
16. Björk A (1968) The use of metallic implants in the study of facial growth in children: method and application. Am J Phys Anthropol 29:243–254
17. Björk A, Skieller V (1972) Facial development and tooth eruption. An implant study at the age of puberty. Am J Orthod 62:339–383
18. Carvalho PHA, Moura LB, Trento GS, Holzinger D, Gabrielli M a. C, Gabrielli MFR, Pereira Filho VA (2020) Surgically assisted rapid maxillary expansion: a systematic review of complications. Int J Oral Maxillofac Surg 49:325–332
19. Chaconas SJ, Caputo AA (1982) Observation of orthopedic force distribution produced by maxillary orthodontic appliances. Am J Orthod 82:492–501
20. Chen H, Lin L, Chen J, Huang F (2024) Prevalence of Malocclusion Traits in Primary Dentition, 2010–2024: A Systematic Review. Healthcare 12:1321
21. Cohen MM (1993) Sutural biology and the correlates of craniosynostosis. Am J Med Genet 47:581–616
22. Dahlberg G (ed) (1948) Statistical Methods for Medical and Biological Students. G. Allen & Unwin Limited
23. Delaire J (1972) Base du crâne et morphologie maxillare. Fortschritte der Kieferorthopädie 33:375–386

24. Delaire J, Verdon P, Kénési FM-C (1973) Extraorale Zugkräfte mit Stirn-Kinn-Abstützung zur Behandlung der Oberkieferdeformierungen als Folge von Lippen-Kiefer-Gaumenspalten. Fortschritte der Kieferorthopädie 34:225–237
25. Delaire J, Verdon P, Flour J (1976) Ziele und Ergebnisse extraoraler Züge in postero-anteriorer Richtung in Anwendung einer orthopädischen Maske bei der Behandlung von Fällen der Klasse III. Fortschritte der Kieferorthopädie 37:247–262
26. Delaire J, Schendel SA, Tulasne J-F (1981) An architectural and structural craniofacial analysis: A new lateral cephalometric analysis. Oral Surg Oral Med Oral Pathol 52:226–238
27. Delaire J (1997) Maxillary development revisited: relevance to the orthopaedic treatment of Class III malocclusions. Eur J Orthod 19:289–311
28. Deutsche Gesellschaft für Kieferorthopädie e.V. (DGKFO), Lux CJ, Kirschneck C, Proff P (2021) Ideale Behandlungszeitpunkte kieferorthopädischer Anomalien: S3-Leitlinie (AWMF-Registernummer 083-038). AWMF, Berlin
29. Diedrich P (ed) (2000) Kieferorthopädie II. 4. edition. Urban & Fischer Verlag, München, Jena
30. Ellis E, McNamara JA (1984) Components of adult class III malocclusion. J Oral Maxillofac Surg 42:295–305
31. Enlow DH, Bang S (1965) Growth and remodeling of the human maxilla. Am J Orthod 51:446–464
32. Enlow DH, Moyers RE, Hunter WS, McNamara JAJ (1969) A procedure for the analysis of intrinsic facial form and growth An equivalent-balance concept. Am J Orthod 56:6–23
33. Enlow DH, Hans MG (eds) (2008) Essentials of facial growth. 2nd edition. Distributed by Needham Press, Ann Arbor, MI
34. Falck F, Fränkel R (1973) Die labiale Alveolenwand unter dem Einfluß des durchbrechenden Schneidezahns. Fortschritte der Kieferorthopädie 34:37–63
35. Falck F, Zimmermann-Menzel K (2008) Cephalometric changes in the treatment of class III using the Fränkel appliance. J Orofac Orthop 69:99–109
36. Foersch M, Jacobs C, Wriedt S, Hechtner M, Wehrbein H (2015) Effectiveness of maxillary protraction using facemask with or without maxillary expansion: a systematic review and meta-analysis. Clin Oral Invest 19:1181–1192

37. Fränkel C, Fränkel R (eds) (1992) *Der Funktionsregler in der orofazialen Orthopädie*. Hüthig, Heidelberg
38. Fränkel R (1963) Die Funktionsregler und das Prinzip der Enthemmung. *Fortschritte der Kieferorthopädie* 24:440–456
39. Fränkel R (1970) Maxillary retrusion in Class 3 and treatment with the function corrector 3. Rep Congr Eur Orthod Soc 249–259
40. Fränkel R (ed) (1984) *Technik und Handhabung der Funktionsregler*. 3. edition. S. Karger AG, Basel (Schweiz)
41. Fränkel R, Fränkel C (2001) Die klinische Bedeutung des Roux'schen Konzepts in der orofazialen Orthopädie. *J Orofac Orthop* 62:1–21
42. Haas AJ (1980) Long-term posttreatment evaluation of rapid palatal expansion. *Angle Orthod* 50:189–217
43. Hardy DK, Cubas YP, Orellana MF (2012) Prevalence of angle class III malocclusion: A systematic review and meta-analysis. *Open J Epidemiol* 2:75–82
44. Haynes S, Chau MNY (1993) Inter- and intra-observer identification of landmarks used in the Delaire analysis. *Eur J Orthod* 15:79–84
45. Jacobson A, Evans WG, Preston CB, Sadowsky PL (1974) Mandibular prognathism. *Am J Orthod* 66:140–171
46. Kahl-Nieke B (ed) (2010) *Einführung in die Kieferorthopädie*. 3. edition. Deutscher Zahnärzte Verlag, Köln
47. Kalavritinos M, Papadopoulos MA, Nasiopoulos A (2005) Dental arch and cephalometric changes following treatment for class III malocclusion by means of the function regulator (FR-3) appliance. *J Orofac Orthop* 66:135–147
48. Kalogirou K, Ahlgren J, Klinge B (1996) Effects of buccal shields on the maxillary dentoalveolar structures and the midpalatal suture—histologic and biometric studies in rabbits. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 109:521–530
49. Katsaros C, Zissis A, Bresin A, Kiliaridis S (2006) Functional influence on sutural bone apposition in the growing rat. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 129:352–357

50. Kerr WJ, Ten Have TR (1987) Changes in soft tissue profile during the treatment of Class III malocclusion. *Br J Orthod* 14:243–249
51. Kerr WJ, TenHave TR, McNamara JA (1989) A comparison of skeletal and dental changes produced by function regulators (FR-2 and FR-3). *Eur J Orthod* 11:235–242
52. Kerr WJS, Tenhave TR (1988) A comparison of three appliance systems in the treatment of Class III malocclusion. *Eur J Orthod* 10:203–214
53. Kiliaridis S, Engström C, Thilander B (1985) The relationship between masticatory function and craniofacial morphology: I. A cephalometric longitudinal analysis in the growing rat fed a soft diet. *European Journal of Orthodontics* 7:273–283
54. Kiliaridis S (1995) Masticatory muscle influence on craniofacial growth. *Acta Odontol Scand* 53:196–202
55. Kim J-H, Viana MAG, Graber TM, Omerza FF, BeGole EA (1999) The effectiveness of protraction face mask therapy: A meta-analysis. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 115:675–685
56. Kinzinger GSM, Hourfar J, Buschhoff C, Heller F, Korbmacher-Steiner HM, Lisson JA (2022) Age-dependent interactions of maxillary sutures during RME and their effects on palatal morphology. *J Orofac Orthop* 83:412–431
57. Kinzinger GSM, Hourfar J, Sommer JN, Lisson JA (2025) Age-dependent effects of Delaire facemask therapy for class III malocclusion: Impact on maxillary sutures and palatal morphology. *J Orofac Orthop* 86:197–215
58. Knaup B, Yildizhan F, Wehrbein H (2004) Age-related changes in the midpalatal suture. *J Orofac Orthop* 65:467–474
59. Köbel C, Fränkel C, Lux CJ (2012) Der Funktionsregler nach Fränkel Typ FR-3 Teil I: Grundlagen und klinisches Management. *Kieferorthopädie* 2012 26:33–43
60. Köbel C (2020) Der Funktionsregler nach Fränkel. *Informationen aus Orthodontie & Kieferorthopädie* 52:275–288
61. Korbmacher H, Schilling A, Püschel K, Amling M, Kahl-Nieke B (2007) Age-dependent three-dimensional microcomputed tomography analysis of the human midpalatal suture. *J Orofac Orthop* 68:364–376
62. Korkhaus G (ed) (1932) *Moderne orthodontische Therapie*. 2. edition. Hermann Meusser, Berlin

63. Korn EL, Baumrind S (1990) Transverse development of the human jaws between the ages of 8.5 and 15.5 years, studied longitudinally with use of implants. *J Dent Res* 69:1298–1306
64. Krebs A (1964) Midpalatal suture expansion studies by the implant method over a seven-year period. *Rep Congr Eur Orthod Soc* 40:131–142
65. Levin AS, McNamara JA, Franchi L, Baccetti T, Fränkel C (2008) Short-term and long-term treatment outcomes with the FR-3 appliance of Fränkel. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 134:513–524
66. Liu Y, Yang K (2021) Three-dimensional changes in the upper airway and craniomaxillofacial morphology of patients with Angle Class III malocclusion treated with a Frankel III appliance. *BMC Oral Health* 21:634
67. Loh MK, Kerr WJ (1985) The Function Regulator III: effects and indications for use. *Br J Orthod* 12:153–157
68. Lombardo G, Vena F, Negri P, Pagano S, Barilotti C, Paglia L, Colombo S, Orso M, Cianetti S (2020) Worldwide prevalence of malocclusion in the different stages of dentition: A systematic review and meta-analysis. *Eur J Paediatr Dent* 21:115–122
69. Lux CJ, Conradt C, Burden D, Komposch G (2004) Transverse development of the craniofacial skeleton and dentition between 7 and 15 years of age—a longitudinal postero-anterior cephalometric study. *Eur J Orthod* 26:31–42
70. Lux CJ, Dücker B, Pritsch M, Komposch G, Niekusch U (2009) Occlusal status and prevalence of occlusal malocclusion traits among 9-year-old schoolchildren. *Eur J Orthod* 31:294–299
71. McDonald RE, Avery DR (eds) (1983) *Dentistry for the child and adolescent*. 4th edition. Mosby, St. Louis
72. McDougall PD, McNamara JA, Dierkes JM (1982) Arch width development in Class II patients treated with the Fränkel appliance. *Am J Orthod* 82:10–22
73. McNamara JA, Hugu SA (1985) The functional regulator (FR-3) of Fränkel. *Am J Orthod* 88:409–424
74. McNamara JA (2002) Rolf Fränkel, 1908-2001. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 121:238–239
75. McNamara, James (1982) JCO Interviews Dr. James McNamara, Jr., on the Frankel Appliance, Part 1: Biological Basis and Appliance Design. *J Clin Orthod* 16:320–337

76. Melsen B (1975) Palatal growth studied on human autopsy material. *Am J Orthod* 68:42–54
77. Melsen B (1978) Effects of cervical anchorage during and after treatment: An implant study. *Am J Orthod* 73:526–540
78. Melsen B, Melsen F (1982) The postnatal development of the palatomaxillary region studied on human autopsy material. *Am J Orthod* 82:329–342
79. Melsen B, Ousterhout DK (1987) Anatomy and Development of the Pterygopalatomaxillary Regions, Studied in Relation of the Le Fort Osteotomies. *Ann Plast Surg* 19:16–28
80. Moss ML (1957) Experimental alteration of sutural area morphology. *Anat Rec* 127:569–589
81. Moss ML (1960) Inhibition and Stimulation of Sutural Fusion in the Rat Calvaria. *Anat Rec* 136:457–467
82. Moss ML, Salentijn L (1969) The primary role of functional matrices in facial growth. *American Journal of Orthodontics* 55:566–577
83. Mühlberg G, Schröter U, Zill G (1968) Biologisch-statistische Untersuchungen über den Einfluß der Funktionsregler nach Fränkel auf die Kieferbasisentwicklung und Zahnkipfung. *Fortschritte der Kieferorthopädie* 29:393–405
84. Mutinelli S, Manfredi M, Guiducci A, Denotti G, Cozzani M (2015) Anchorage onto deciduous teeth: effectiveness of early rapid maxillary expansion in increasing dental arch dimension and improving anterior crowding. *Prog Orthod* 16:22
85. Nanda R (1980) Biomechanical and clinical considerations of a modified protraction headgear. *Am J Orthod* 78:125–139
86. Oktay H (2011) Effects of the functional regulator III on transversal changes: a postero-anterior cephalometric and model study. *Eur J Orthod* 33:727–731
87. Pangrazio-Kulbersh V, Berger J, Kersten G (1998) Effects of protraction mechanics on the midface. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 114:484–491
88. Persson M, Thilander B (1977) Palatal suture closure in man from 15 to 35 years of age. *Am J Orthod* 72:42–52
89. Pithon MM, Santos N de L, dos Santos CRB, Baião FCS, Pinheiro MCR, Matos M, Souza IA, de Paula RP (2016) Is alternate rapid maxillary expansion and constriction an effective protocol

- in the treatment of Class III malocclusion? A systematic review. *Dental Press J Orthod* 21:34–42
90. Primožič J, Perinetti G, Richmond S, Ovsenik M (2012) Three-dimensional longitudinal evaluation of palatal vault changes in growing subjects. *Angle Orthod* 82:632–636
 91. Primožič J, Richmond S, Kau CH, Zhurov A, Ovsenik M (2013) Three-dimensional evaluation of early crossbite correction: a longitudinal study. *Eur J Orthod* 35:7–13
 92. Priyadarshini J, Mahesh CM, Chandrashekar BS, Sundara A, Arun AV, Reddy VP (2017) Stress and displacement patterns in the craniofacial skeleton with rapid maxillary expansion—a finite element method study. *Prog Orthod* 18:17
 93. Proffit WR, Fields HW, Larson BE, Sarver DM (eds) (2018) *Contemporary orthodontics*. 6th edition. Elsevier, Philadelphia
 94. Reichenbach E (1956) Zur Morphologie und Klassifizierung der Progenie. *Dtsch Stomat* 6:130–130
 95. Robertson NRE (1983) An examination of treatment changes in children treated with the function regulator of Fränkel. *Am J Orthod* 83:299–310
 96. Roşkjaer M (1977) *Sutures and periosteum of growing intramembranous bone*. Katholieke Universiteit te Nijmegen
 97. Roth R, Bimler HP (1979) Kriterien am Fernröntgenbild für die Differentialdiagnose des progenen Formenkreises. *Fortschritte der Kieferorthopädie* 40:186–196
 98. Sanborn RT (1955) Differences between the facial skeletal patterns of Class III malocclusion and normal occlusion. *Angle Orthod* 25:208–222
 99. Savoldi F, Wong KK, Yeung AWK, Tsoi JKH, Gu M, Bornstein MM (2022) Midpalatal suture maturation staging using cone beam computed tomography in patients aged between 9 to 21 years. *Sci Rep* 12:4318
 100. Sayar G, Kılınç DD (2019) Rapid maxillary expansion outcomes according to midpalatal suture maturation levels. *Prog Orthod* 20:27
 101. Schopf P (ed) (2000) *Curriculum Kieferorthopädie II*. 3. edition. Quintessenz Verlags-GmbH, Berlin

102. Schopf P (ed) (2000) Curriculum Kieferorthopädie I. 3. edition. Quintessenz Verlags-GmbH, Berlin
103. Schulze C, Wiese W (1965) Zur Vererbung der Progenie. Fortschritte der Kieferorthopädie 26:213–229
104. Schulze C (1979) Zur Ätiologie der Progenie. Fortschritte der Kieferorthopädie 40:87–104
105. Shayani A, Merino-Gerlach MA, Garay-Carrasco IA, Navarro-Cáceres PE, Sandoval-Vidal HP (2023) Midpalatal Suture Maturation Stage in 10- to 25-Year-Olds Using Cone-Beam Computed Tomography—A Cross-Sectional Study. Diagnostics (Basel) 13:1449
106. Sokucu O, Kosger HH, Bicakci AA, Babacan H (2009) Stability in dental changes in RME and SARME: a 2-year follow-up. Angle Orthod 79:207–213
107. Staudt CB, Kiliaridis S (2009) Different skeletal types underlying Class III malocclusion in a random population. Am J Orthod Dentofacial Orthop 136:715–721
108. Stutzmann J, Petrovic A, Graber T (1983) Effects of the Frankel lateral vestibular shields on the widening of the upper jaw. An experimental investigation in the rat. Stomatol DDR 33:753–766
109. Thors O (1964) Compression of facial sutures by external pressure (Milwaukee-brace) demonstrated by the implant method. Rep Congr Eur Orthod Soc 40:221–232
110. Tschechne S (2005) Die sagittale Entwicklung des Oberkiefers. Philipps-Universität Marburg, Marburg an der Lahn
111. Ülgen M, Firatli S (1994) The effects of the Fränkel's function regulator on the Class III malocclusion. Am J Orthod Dentofacial Orthop 105:561–567
112. Vadiakas G, Viazis AD (1992) Anterior crossbite correction in the early deciduous dentition. Am J Orthod Dentofacial Orthop 102:160–162
113. Valentine F, Howitt JW (1970) Implications of early anterior crossbite correction. ASDC J Dent Child 37:420–427
114. Vaughn GA, Mason B, Moon H-B, Turley PK (2005) The effects of maxillary protraction therapy with or without rapid palatal expansion: A prospective, randomized clinical trial. Am J Orthod Dentofacial Orthop 128:299–309
115. Visser H, Rödiger T, Hermann KP (2001) Dose reduction by direct-digital cephalometric radiography. Angle Orthod 71:159–163

116. Wichelhaus, Andrea, Wolf, Herbert F., Eichenberg, Tena (eds) (2017) Kieferorthopädie - Therapie Band 1. 2. edition. Georg Thieme Verlag KG, Stuttgart
117. Wilhelm-Nold I, Droschl H (1990) Die Frühbehandlung der Progenie im Milchgebiß im Vergleich zur Behandlung im Wechselgebiß. Fortschritte der Kieferorthopädie 51:165–179
118. Williams S, Aarhus CEA (1986) The morphology of the potential Class III skeletal pattern in the growing child. Am J Orthod 89:302–311
119. Yang X, Li C, Bai D, Su N, Chen T, Xu Y, Han X (2014) Treatment effectiveness of Fränkel function regulator on the Class III malocclusion: A systematic review and meta-analysis. Am J Orthod Dentofacial Orthop 146:143–154
120. Zeng W, Yan S, Yi Y, Chen H, Sun T, Zhang Y, Zhang J (2023) Long-term efficacy and stability of miniscrew-assisted rapid palatal expansion in mid to late adolescents and adults: a systematic review and meta-analysis. BMC Oral Health 23:829

6.2 Abkürzungsverzeichnis

Alt-RAMEC = Alternating Rapid Maxillary Expansion and Constriction

DVT = Digitale Volumentomographie

E-Linie = Esthetic-line (Ästhetik-Linie)

FR-3 = Funktionsreglers nach Fränkel Typ FR-3 / Funktionsregler Typ 3

FRS = Fernröntgenseitenbild

GNE = Gaumennahterweiterung

LKG-Spalte = Lippen-Kiefer-Gaumen-Spalte

M = Mittelwert

MARPE = Miniscrew Assisted Rapid Palatal Expansion

p = p-Wert

PG1 = Patientengruppe 1

PG2 = Patientengruppe 2

PG3 = Patientengruppe 3

PNS = Spina nasalis posterior, wird auch SPP abgekürzt

SARPE = Surgically Assisted Rapid Palatal Expansion

SD = Standardabweichung

7. Publikation / Danksagung

7.1 Publikation

Zwei wissenschaftliche Publikationen, die auf den Ergebnissen dieser Studie basieren, sind in Vorbereitung.

7.2 Danksagung

Herrn Professor Dr. Jörg Lisson danke ich für die Möglichkeit, in der Klinik für Kieferorthopädie zu promovieren.

In besonderem Maße danke ich Herrn Professor Dr. Gero Kinzinger für die herausragende Betreuung, die konstruktive Kritik und die wertvolle fachliche Unterstützung.

Darüber hinaus gilt mein Dank Frau Dr. Linda Frye aus der kieferorthopädischen Fachzahnarztpraxis K3, Hauptstr. 101-105 in 45219 Essen für die Bereitstellung der diagnostischen Unterlagen und die fortwährende Unterstützung in meinem beruflichen Werdegang.

Für die freundliche und hilfreiche Beratung in statistischen Fragen danke ich Herrn Priv.- Doz. Dr. Jan Hourfar.

Außerdem danke ich meinen Eltern, meinem Geschwisterkind und meinem Partner von Herzen für ihre liebevolle Unterstützung und Motivation, die mir stets Kraft und Halt geben.

8. Lebenslauf

Aus datenschutzrechtlichen Gründen wird der Lebenslauf in der elektronischen Fassung der Dissertation nicht veröffentlicht.