

Aus der Poliklinik für Kieferorthopädie  
der Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

„Non-Surgical Assisted Rapid Maxillary Expansion“ (N-SARME) – Untersuchung  
eines modifizierten Drehprotokolls zur erfolgreichen Gaumennahterweiterung beim  
Erwachsenen

Inauguraldissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades der  
Zahnmedizin  
der Universitätsmedizin  
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Vorgelegt von

Dr. med. Maximilian Franz Bleilöb  
aus Dortmund

Mainz, 2025

Wissenschaftlicher Vorstand: Univ.-Prof. Dr. Hansjörg Schild

Tag der Promotion: 17. Juni 2025

*für meine Eltern*

# Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	II
Tabellenverzeichnis.....	IV
1 Einleitung / Ziel der Dissertation.....	1
1.1 Einleitung.....	1
1.2 Ziel der Dissertation.....	1
2 Literaturdiskussion.....	2
2.1 Geschichtliche Entwicklung der GNE.....	2
2.2 Anatomie des Palatum durum.....	3
2.3 Postnatale Entwicklung der Sutura palatina mediana.....	3
2.4 Natur der Gaumennahterweiterung.....	5
2.5 Radiologische Verfahren zur Beurteilung der Sutura palatina mediana.....	6
3 Material und Methoden.....	10
3.1 Patientengut.....	10
3.2 Methode.....	11
3.2.1 Die Apparatur.....	11
3.2.2 Das Drehprotokoll.....	12
3.2.3 Modellanalyse.....	13
3.2.4 Bestimmung der transversalen Zahnbogen-Breite.....	14
3.2.5 Bestimmung der Angulation der ersten Molaren im Oberkiefer.....	17
3.2.6 Bestimmung der klinischen Kronenlänge.....	18
3.3 Statistische Methoden.....	19
3.3.1 Fehlerberechnung.....	19
4 Ergebnisse.....	20
4.1 Transversale Breite im Oberkiefer – Okklusale Messungen.....	20
4.2 Transversale Breite im Oberkiefer – Gingivale Messungen.....	22
4.3 Transversale Breite im Unterkiefer – Okklusale Messungen.....	22
4.4 Transversale Breite im Unterkiefer – Gingivale Messungen.....	24
4.5 Angulation der 1. Molaren im Oberkiefer.....	25
4.6 Attachmentverlust im Oberkiefer.....	26
4.7 Attachmentverlust im Unterkiefer.....	27
4.8 Fehlerberechnung.....	27
5 Diskussion.....	28
5.1 Die Therapie der transversal unterentwickelten Maxilla beim Erwachsenen.....	28
5.2 Therapiekonzepte für die Behandlung von Erwachsenen im Vergleich.....	31
5.3 Beurteilung unerwünschter Nebenwirkungen.....	36
5.4 Erfolg der konservativen, nicht-chirurgischen GNE beim Erwachsenen.....	38
6 Zusammenfassung.....	40

7 Literaturverzeichnis .....	42
8 Danksagung .....	50
9 Tabellarischer Lebenslauf .....	51

## Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
ALARA	Englisch: „As Low As Reasonably Achievable“
bzw.	beziehungsweise
CVM	Englisch: Cervical Vertebrae Maturation
D-MED	Dutch Maxillary Expansion Device
DVT	Digitale Volumetomographie
GNE	Gaumennahterweiterung
ICC	Intraklass-Korrelationskoeffizient
MARPE	Englisch: Miniscrew-assisted Palatal Expansion
N	Anzahl
MSDR	Englisch: Midpalatal Suture Density Ratio
RME	Englisch: Rapid Maxillary Expansion
s.	siehe
SARME	Englisch: Surgically-assisted Rapid Maxillary Expansion
SD	Standardabweichung

## Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1                      Porträt Emerson C. Angell
- Abbildung 2                      Ansicht des harten Gaumens von kaudal
- Abbildung 3                      Entwicklung der Sutura palatina mediana nach Melson in der Coronalebene
- a) schematische Darstellung der infantilen Phase
- b) histologisches Bild der infantilen Phase
- c) schematische Darstellung der juvenilen Phase
- d) histologisches Bild der juvenilen Phase
- e) schematische Darstellung der adoleszenten Phase
- f) histologisches Bild der adoleszenten Phase
- Abbildung 4                      Schematische Darstellung der in der DVT zu diagnostizierenden Stadien A bis E nach Angelieri et al.
- Abbildung 5                      Darstellung der verwendeten Gaumennahterweiterungsapparatur in situ
- Abbildung 6                      Darstellung der verwendeten Unterkiefer-Platte mit seitlichen Aufbissen in situ
- Abbildung 7                      Schematische Darstellung des angewendeten Drehprotokolls
- Abbildung 8                      Darstellung der gemessenen Referenzstrecken auf Höhe der Okklusionsfläche im Oberkiefer
- A + B: Bukkale Referenzpunkte
- C + D: Zentrale Referenzpunkte
- E + F: Palatinale Referenzpunkte
- Abbildung 9                      Darstellung der gemessenen Referenzstrecken auf Höhe der Okklusionsfläche im Unterkiefer
- A + B: Bukkale Referenzpunkte
- C + D: Zentrale Referenzpunkte
- E + F: Linguale Referenzpunkte

- Abbildung 10 Darstellung der gemessenen Referenzstrecken auf Höhe des Gingivalsaums  
A + B: Im Oberkiefer  
C + D: Im Unterkiefer
- Abbildung 11 Schematische Darstellung der Bestimmung der Angulation der ersten Molaren im Oberkiefer in der Frontalebene
- Abbildung 12 Darstellung der Bestimmung der klinischen Kronenlänge der Prämolaren und ersten Molaren im Ober- und Unterkiefer

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Zunahme der transversalen Breite (T1-T0) in Millimeter im Oberkiefer an den verschiedenen Referenzpunkten auf Höhe der Okklusalfäche
Tabelle 2	Zunahme der transversalen Breite (T1-T0) in Millimeter im Oberkiefer an den verschiedenen Referenzpunkten auf Höhe des Gingivalsaums
Tabelle 3	Zunahme der transversalen Breite (T1-T0) in Millimeter im Unterkiefer an den verschiedenen Referenzpunkten auf Höhe der Okklusalfäche
Tabelle 4	Zunahme der transversalen Breite (T1-T0) in Millimeter im Oberkiefer an den verschiedenen Referenzpunkten auf Höhe des Gingivalsaums
Tabelle 5	Angulation der 1. Molaren im Oberkiefer
Tabelle 6	Veränderung der klinischen Kronenlänge (T1-T0) der Ankerzähne im Oberkiefer
Tabelle 7	Veränderung der klinischen Kronenlänge (T1-T0) der Prämolaren und ersten Molaren im Unterkiefer

# **1 Einleitung / Ziel der Dissertation**

## **1.1 Einleitung**

Die forcierte Gaumennahterweiterung (GNE) stellt eine seit Jahrzehnten fest im kieferorthopädischen Praxisalltag verankerte und bewährte Behandlungsmethode zur Expansion der transversal unterentwickelten Maxilla dar [1-5]. Es wird grundlegend zwischen der rein konservativ durchgeführten „Rapid Maxillary Expansion“ (RME), die routinemäßig beim heranwachsenden Patienten angewendet wird, der kombiniert kieferorthopädisch-kieferchirurgisch durchgeführten „Surgically Assisted Rapid Maxillary Expansion“ (SARME), die das Verfahren der Wahl nach dem pubertären Wachstumshöhepunkt darstellt, als auch der rein skelettal getragenen „Miniscrew –Assisted Rapid Palatal Expansion“ (MARPE) und kombiniert zahn- und skelettal getragenen Hybridapparaturen in unterschiedlichen Ausführungen differenziert [1-7]. Die Entscheidung, welches Verfahren in einem vorliegenden Fall Anwendung findet und insbesondere, ob ohne oder mit kieferchirurgischer Unterstützung therapiert werden muss, wird meistens ausschließlich anhand des chronologischen Alters des/ der Patienten/-in getroffen, wobei die meisten Kieferorthopäden/-innen ab dem fortgeschrittenen Teenager- bzw. frühen Erwachsenen-Alter lediglich letzteres als erfolgsversprechend ansehen [2,8].

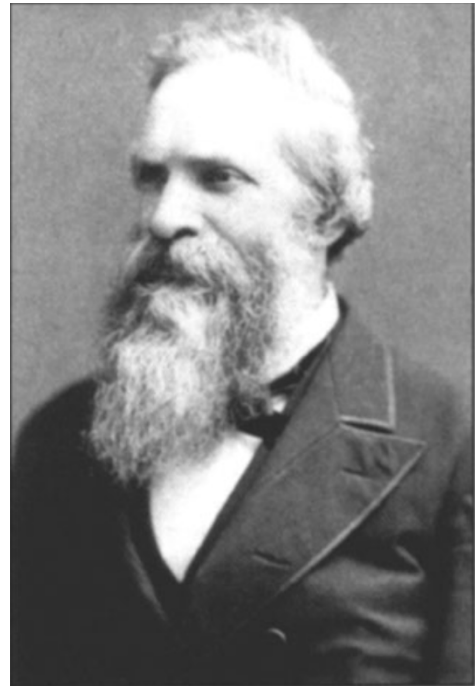
## **1.2 Ziel der Dissertation**

Ziel dieser Dissertation ist es, die klinischen Erfolge eines an der Poliklinik für Kieferorthopädie der Universitätsmedizin Mainz routinemäßig und erfolgreich eingesetzten Therapiekonzeptes zur Behandlung von erwachsenen Patienten/-innen mit transversaler Unterentwicklung des Oberkiefers zu untersuchen und evaluieren. Die Behandlung umfasst ein rein konservatives Vorgehen mit einer Gaumennahterweiterungsapparatur mit Hyrax®-Schraube, die anhand eines modifizierten Drehprotokolls aktiviert wird und auf einen kieferchirurgischen Eingriff in Intubationsnarkose, als auch eine skelettale Verankerung gänzlich verzichtet. Dies bietet sowohl für die Patienten/-innen, als auch die Behandler/-innen diverse Vorteile. Wir erhoffen uns mit dieser Evaluation unseren Therapieansatz verstärkt im kieferorthopädischen Praxisalltag etablieren zu können und somit weiteren Patienten/-innen eine wissenschaftlich fundierte und höchst moderne kieferorthopädische Therapie zukommen lassen zu können.

## 2 Literaturdiskussion

### 2.1 Geschichtliche Entwicklung der GNE

Ihren Ursprung fand die GNE im Jahr 1860 als Emerson C. Angell erstmalig die Möglichkeit der transversalen Erweiterung der Maxilla durch die Öffnung der Sutura palatina mediana beschrieb [2,9]. Er präsentierte den Fall eines vierzehnjährigen Mädchens mit Kreuzbiss, bei dem es ihm gelang ein so ausgeprägtes Auseinanderdriften der beiden Hemimaxillae zu erreichen, dass es am Ende der Behandlung zur Bildung eines Diastema mediale gekommen war [9,10]. Hierzu verwendete er eine Apparatur mit zwei gegenläufigen Dehnschrauben, die über zwei Wochen zweimal täglich aktivierten wurden [9]. Seine Erkenntnisse wurden in der Fachwelt kontrovers diskutiert: So sprachen seine Kritiker

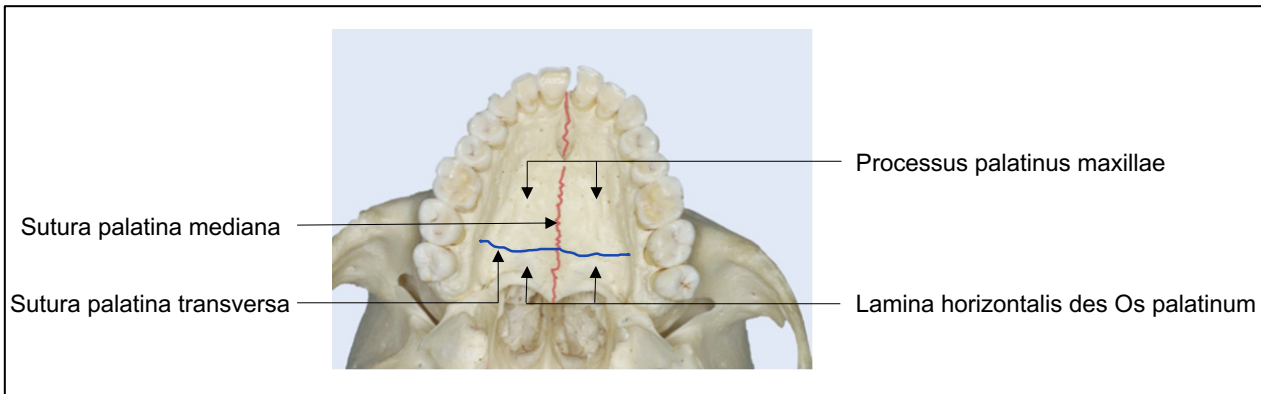


**Abbildung 1: Porträt Emerson C. Angell**

von schwerwiegenden Auswirkungen auf die umliegenden Hart- und Weichgewebe, was dazu führte, dass sich die GNE nicht durchsetzen konnte und in Vergessenheit gerat [5,10]. Erneute Aufmerksamkeit erhielt sie erst wieder um die hundert Jahre später durch Derichsweiler und Korkhaus: So konnte Derichsweiler nachweisen, dass es neben der Separation der beiden Hemimaxillae und der Bildung eines Diastema mediale zur Entstehung neuen Knochens im entstandenen Spalt gekommen war [10]. Außerdem bestätigte er eine posttherapeutisch verbesserte Nasenatmung [10]. Durch die kurz darauf von Andrew J. Haas durchgeführte Studie an zehn Patienten/-innen kam es schließlich zu einer routinemäßigen Anwendung des Verfahrens [10]. Hierbei verwendete Haas eine Apparatur, die zusätzlich über eine zweiteilige Basisplatte aus Kunststoff verfügte [10]. Er begründete seine Entscheidung damit, dass auf diese Weise, anstatt rein zahngetragen zu arbeiten, ein Großteil der generierten Kraft direkt auf den Alveolarfortsatz und den harten Gaumen wirken könne [10]. 1968 präsentierte Biedermann die Gaumennahterweiterungsapparatur mit Hyrax<sup>®</sup>-Schraube und bewarb sie aufgrund ihrer leichteren Reinigung im Rahmen der

täglichen Zahnpflege, sowie des reduzierten zahntechnischen Arbeitsaufwands zur Herstellung der Apparatur im Labor [11].

## 2.2 Anatomie des Palatum durum

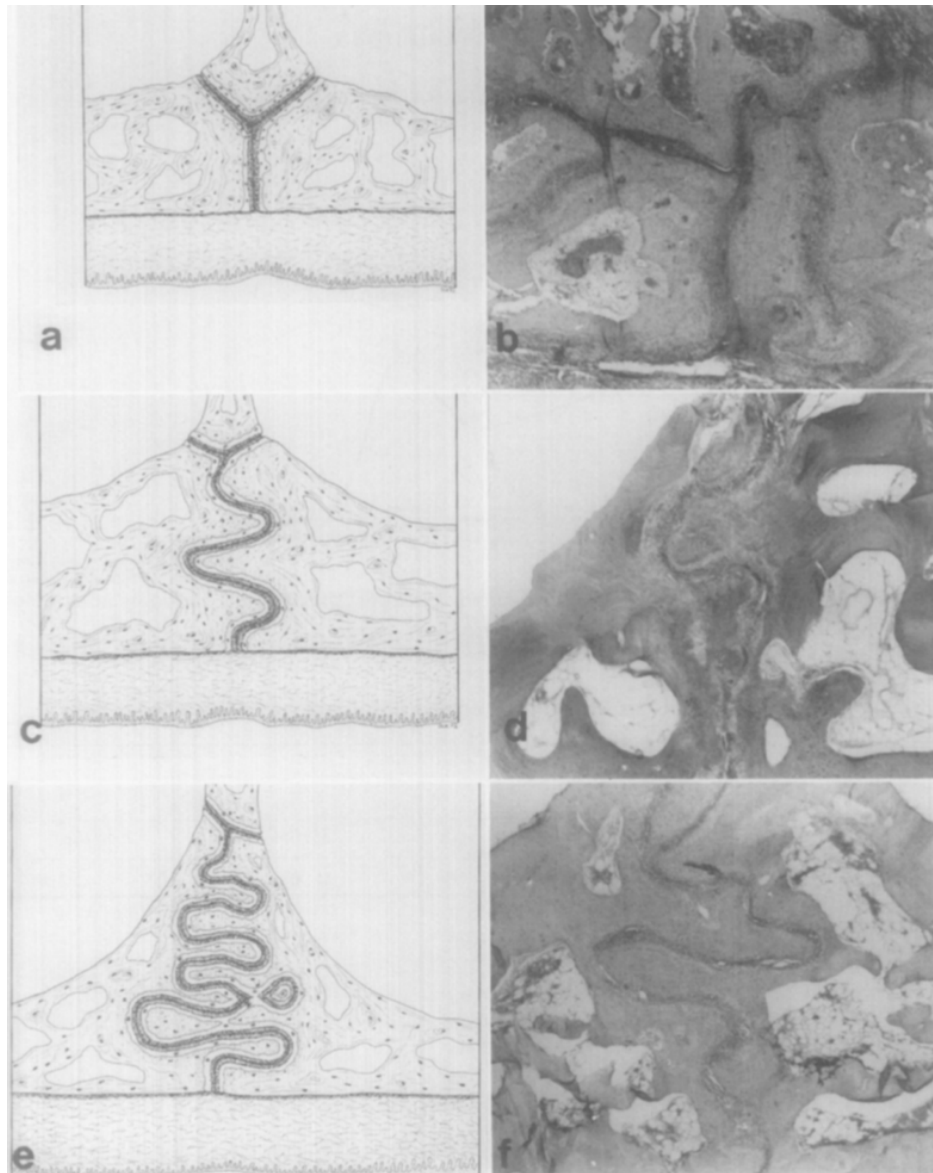


**Abbildung 2: Ansicht des harten Gaumens von kaudal [11]**

Der harte Gaumen setzt sich aus Anteilen der Maxilla und des Os palatinum zusammen, die jeweils paarig angelegt sind und ferner den Nasenboden, sowie einen Teil der lateralen Nasenwand bilden (s. Abb. 1.2) [11,12]. Der jeweilige Processus palatinus maxillae ist über die Sutura palatina transversa mit der dorsal an ihn grenzenden Lamina horizontalis des entsprechenden Gaumenbeins verbunden [11,12]. In sagittaler Richtung stehen die Knochen über die Sutura palatina mediana in Kontakt, die im anterioren Bereich vom Processus palatinus maxillae und in ihrem posterioren Anteil von der Lamina horizontalis des Os palatinum gebildet wird [11].

## 2.3 Postnatale Entwicklung der Sutura palatina mediana

Bereits 1975 führte Melsen eine histologische Untersuchung der postnatalen Entwicklung der Sutura palatina mediana durch und teilte sie anhand ihrer Morphologie in drei Stadien (s. Abb. 1.4) ein [13]: Während sich die Sutura in der infantilen Phase kurz, weit und Y-förmig (Coronalebene) präsentiert, weist sie im darauffolgenden juvenilen Stadium einen gewundenen Verlauf auf [13]. Im adoleszenten Stadium imponieren zahlreiche Interdigitationen, die dem Autor zufolge eine nicht chirurgisch unterstützte RME wenig erfolgsversprechend erscheinen lassen [13].



**Abbildung 3: Entwicklung der Sutura palatina mediana nach Melsen in der Coronalebene [13]:**

- a) schematische Darstellung der infantilen Phase**
- b) histologisches Bild der infantilen Phase**
- c) schematische Darstellung der juvenilen Phase**
- d) histologisches Bild der juvenilen Phase**
- e) schematische Darstellung der adoleszenten Phase**
- f) histologisches Bild der adoleszenten Phase**

Im Gegensatz zu den weiteren Suturen des Schädels, bei denen es zu einem kontinuierlichem Ossifikationsprozess kommt, der von den Suturenrändern ausgeht, bilden sich einzelne Knocheninseln aus azellulärem und irregulär kalzifiziertem Gewebe [14,15]. Die Knocheninseln liegen entweder innerhalb der Sutura oder

imponieren als kleine Knochenspiculae, die von den Suturenrändern ausgehen [14,15]. Generell breitet sich der Obliterationsprozess von posterior im Bereich der Ossa palatina nach anterior aus [16,17] und schreitet im oralwärts gerichteten Anteil schneller voran als im nasal gerichteten Bereich der Sutur [16]. Der Beginn und das Fortschreiten der Ossifikation unterliegen dabei großen interindividuellen und intrasuturalen Unterschieden [2,14,16-19].

## **2.4 Natur der Gaumennahterweiterung**

Die durch die GNE erzielte transversale Nachentwicklung des harten Gaumens setzt sich sowohl aus skelettalen, als auch dentoalveolären Anteilen zusammen, denen im Kindes-, Jugend- und Erwachsenenalter unterschiedliche Anteile an der insgesamt erreichten transversalen Erweiterung zugeschrieben werden [3,4,20-36]. Die skelettale Wirkung beruht dabei auf einer Öffnung bzw. Spaltung der Sutura palatina mediana, dem resultierenden Auseinanderdriften der beiden Hemimaxillae und einem anschließenden Remodelling mit Knochenablagerung im Bereich des entstandenen Spaltes [21,22,28]. Letzterer zeigt sich sowohl in der Coronal-, als auch in der Transversalebene typischerweise V- bzw. pyramidenförmig [12,25-28,34,37-40]. In der Coronalebene resultiert dies durch eine Rotation der beiden Maxillahälften um einen Drehpunkt im Bereich der Sutura frontonasalis bzw. Sutura frontomaxillaris, welcher sich mit steigendem Alter nach kaudal verlagert [20,27,31,34,40,41]. In der Transversalebene führt der größere Widerstand durch umliegende knöcherne Strukturen, wie den Jochbeinpfiler, im posterioren Bereich des harten Gaumens in der Mehrheit der Fälle zu einer weniger ausgeprägten Expansion der Sutur [25,27,34,42-45]. Das Verhältnis von anterior zu posterior liegt dabei je nach Quelle zwischen 3:2 und  $\geq 2:1$  [34,41]. Außerdem beschrieben da Silva Filho et al. eine Zunahme der Divergenz mit zunehmendem Ausmaß der transversalen Erweiterung des Oberkiefers [43]. Neben den gewünschten Effekten in der Sutura palatina mediana selbst, kommt es im Rahmen jeder GNE zu einer Lateralverschiebung des Alveolarfortsatzes inklusive der in ihm verankerten Dentition, sowie einer Bukkalkippung der Ankerzähne [21,22,28,32]. Ziel einer jeden GNE ist es einen möglichst hohen Effekt in der Sutura palatina mediana zu erreichen und die dentoalveoläre Komponente möglichst gering zu halten, um ein langfristig stabiles und vor allem rezidivfreies Ergebnis erzielen zu können [21,23,46]. Aufgrund der

pyramidenförmigen Öffnung der Sutura palatina mediana in der Coronalebene, als auch der zuvor beschriebenen dentoalveolären Effekte kommt es auf Höhe der Okklusionsebene zu einer größeren transversalen Erweiterung als im Bereich des Gaumendachs [34,47]. Krebs et al. sprechen von einer doppelt so großen Zunahme der Transversalen der Maxilla im Bereich des Zahnbogens im Vergleich zur skelettalen Basis [27,43]. Der Anteil der dentoalveolären Effekte der GNE steigt mit dem chronologischen Alter der Patienten/-innen zu Lasten der gewünschten skelettalen Effekte an [3,20].

Generell ist es sehr wichtig zu berücksichtigen, dass der größte Widerstand, der der GNE entgegenwirkt, wahrscheinlich nicht durch Kräfte innerhalb der Sutura palatina mediana selbst, sondern durch umliegende Strukturen gebildet wird [8,41]. Insbesondere das Os sphenoidale und Os zygomaticum, sowie die zygomaticomaxilläre, zygomaticotemporale und pterygomaxilläre Suturen scheinen hier eine entscheidende Rolle zu spielen [8,41,42,48-50]. Lee et al. konnten in ihrer 2014 veröffentlichten Studie jedoch zeigen, dass SARMEs, bei denen lediglich die Sutura palatina mediana separiert wurde, zu ebenso großen transversalen Erweiterungen wie SARMEs mit zusätzlicher Eröffnung der Sutura pterygopalatina oder Le Fort I Kortikotomie führen konnten [42]. Es müssen jedoch weitere Studien folgen, um herauszufinden, ob die circummaxillären Suturen bei nicht verknöchertem Sutura palatina mediana Widerstand signifikanten Ausmaßes ausüben oder nicht [8].

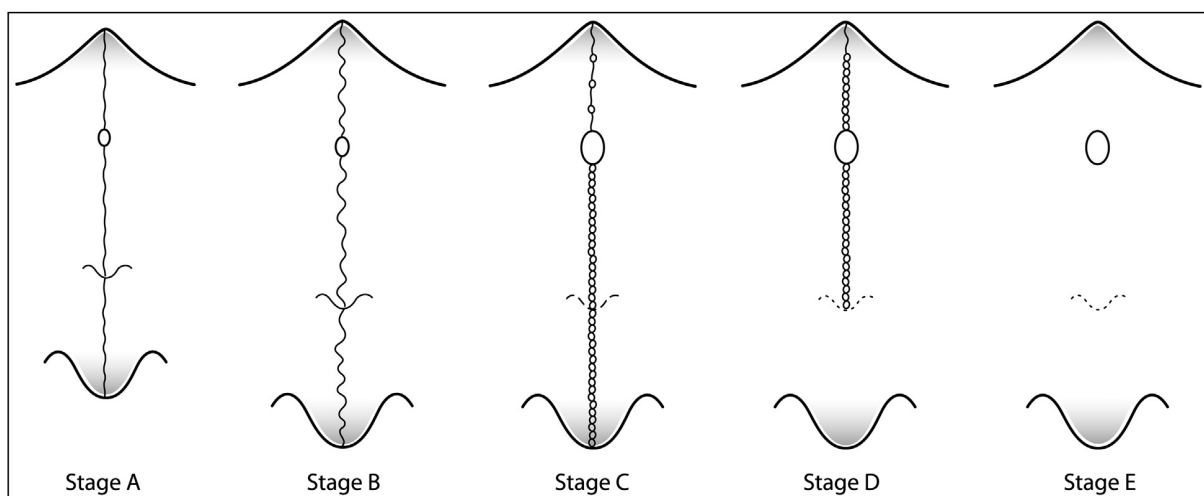
## **2.5 Radiologische Verfahren zur Beurteilung der Sutura palatina mediana**

Die während der Therapieplanung zu treffende Entscheidung zwischen rein konservativer und chirurgisch unterstützter Gaumennahterweiterung stellt die behandelnden Kieferorthopäden/-innen, insbesondere aufgrund der großen Variabilität des Obliterationsprozesses der Sutura palatina mediana in Bezug auf das chronologische Alter, regelmäßig vor eine große Herausforderung [8,14,18,19,29,51-54]: Einerseits sollte ein nicht zwingend für den Therapieerfolg erforderlicher, operativer Eingriff mit all seinen Risiken und Kosten möglichst vermieden werden, während andererseits auch das Versagen einer rein konservativen GNE bei bereits zu stark obliterateder Suturen zu umgehen ist [51,54].

Um diesen schwierigen und wichtigen Entscheidungsprozess zu erleichtern, werden in der Literatur diverse Vorgehensweisen zur prätherapeutischen Beurteilung der Erfolgsaussichten einer konservativen GNE diskutiert: Hierzu zählt unter anderem die altbekannte Oberkiefer-Aufbissaufnahme, die jedoch aufgrund ihrer lediglich zweidimensionalen Darstellung und damit einhergehenden Überlagerungen durch benachbarte Strukturen wie dem Vomer und der äußeren Nase insbesondere im posterioren Anteil der Sutur kritisiert wird [17,53]. Wehrbein und Yildizhan deklarierten das Verfahren als unzuverlässig, da es Ihnen zufolge in 50% der Fälle zu Fehlbeurteilungen der Sutur kommt [53]. Auch die Zuhilfenahme der früher häufig zur Bestimmung der skelettalen Reife verwendete Handwurzelaufnahme, sowie die Breite der Sutur erwiesen sich als nicht geeignet [18]. In ihrer 2001 publizierte Studie teilten Baccetti et al. ihre Kohorte anhand der „Cervical Vertebral Maturation-Methode“ (CVM) in zwei Gruppen ein und verglichen das Ausmaß der skelettalen Effekte im Rahmen der RME [20]. Diese erwiesen sich in den frühen Stadien vor dem pubertären Wachstumsschub (CVM 1 – 3) als signifikant größer als zu späteren Therapiezeitpunkten (CVM 4 – 6) [20]. Diese Einteilung in lediglich zwei Gruppen (vor und nach dem pubertären Wachstumsschub) wird jedoch kritisiert [54]. Andererseits wird die Tatsache, dass die benötigten Fernröntgenseitenbilder ohnehin routinemäßig im Rahmen jeder kieferorthopädischen Behandlungsplanung angefertigt werden, als Vorteil dieser Methode angesehen, da eine zusätzliche Strahlenbelastung der Patienten/-innen vermieden wird [35].

Die digitale Volumentomographie (DVT) bietet aufgrund ihres dreidimensionalen Charakters den Vorteil die Sutura palatina mediana in Gänze ohne störende Überlagerungen durch Nachbarstrukturen abbilden zu können [29,51,54]. Unter Anwendung der DVT präsentierten Angelieri et al. 2013 eine neue Einteilung des Obliterationsprozesses der Sutura palatina mediana in fünf charakteristische Stadien [51]: Während sich die Sutur im initialen Stadium A als gerade Linie hoher Röntgen-Dichte mit wenigen oder ohne Interdigitationen darstellt, nimmt sie im darauffolgenden Stadium B eine unregelmäßige, gewellte Form mit ebenfalls hoher Röntgen-Dichte an [51]. Hierbei können in Anteilen auch zwei entsprechende, parallel verlaufende wellenförmige Linien mit vereinzelt dazwischen liegenden Bereich geringer Röntgen-Dichte auftreten [51]. Sobald diese parallel verlaufenden Linien, sowohl im Bereich der Hemimaxillae, als auch der Ossa palatina durchgängig zu erkennen sind, ist Stadium C erreicht [51]. Das sich anschließende Stadium D ist durch

die abgeschlossene Ossifikation im Bereich der Ossa palatina charakterisiert [51]. Die Sutura ist somit in diesem Bereich in der DVT nicht mehr zu erkennen und der an sie angrenzende Knochen ist im Vergleich röntgendichter [51]. Im Bereich anterior der Sutura palatina transversa imponiert die Sutura palatina mediana hingegen weiterhin identisch zum vorherigen Stadium C [51]. Sobald der von posterior nach anterior fortschreitende Ossifikationsprozess den Anteil der Sutura, der die beiden Hemimaxillae miteinander verbindet, erreicht, ist das finale Stadium E der Klassifikation erreicht [51]. In Abbildung 4 sind die einzelnen, soeben beschriebenen Stadien bildlich dargestellt.



**Abbildung 4: Schematische Darstellung der in der DVT zu diagnostizierenden Stadien A bis E nach Angelieri et al. [51]**

Angelieri et al. zufolge erscheint eine konventionelle GNE in den Stadien A und B erfolgsversprechend [51]. Ab Stadium C sei hingegen mit einem höheren Anteil dentoalveolärer Veränderungen zu rechnen [51]. In den weiter fortgeschrittenen Stadien D und E sollte das Verfahren hingegen zugunsten der kombiniert kieferorthopädisch-kieferchirurgischen SARME verlassen werden [51]. Zwar könne es im Stadium D noch zu einer Spaltung der Hemimaxillae im anterioren Bereich des Gaumens kommen, im Molarenbereich bestehe aufgrund der bereits stattgefundenen Ossifikation der beiden Ossa palatina jedoch ein stark erhöhtes Risiko für unerwünschter Nebenwirkungen [51].

Insbesondere aufgrund der höheren Strahlenbelastung durch eine zusätzliche DVT-Aufnahme, als auch die Entstehung weiterer Kosten wurde die Vorhersagbarkeit der zuvor beschriebenen Stadien A bis E anhand der CVM-Methode untersucht, da

letztere lediglich auf die routinemäßig zur Verfügung stehenden Fernröntgenseitenbilder angewiesen ist [56]. Anhand ihrer Ergebnisse empfehlen die Autoren jedoch nach dem pubertären Wachstumsschub eine DVT durchzuführen, um zwischen RME und SARME bei der Therapieplanung entscheiden zu können [56].

Das „Midpalatal Suture Density Ratio“ (MSDR) stellt einen weiteren Parameter zur Beurteilung der Reife der Sutur dar, welcher im Rahmen des Verknöcherungsprozesses kontinuierlich von „0“ bei noch fehlender Kalzifikation im juvenilen Stadium nach Melsen bis auf einen Wert von nahezu „1“ im adoleszenten Stadium ansteigt und ein genaues Abschätzen der zu erwartenden skelettalen Erweiterung im Rahmen der RME ermöglicht [13,54]. Letzteres erlaubt eine bessere Planung bzw. individuelle Anpassung der geplanten GNE, da beispielsweise bei Patienten/-innen mit einem geringer zu erwartendem skelettalen Anteil mehr Überkorrektur eingeplant werden könnte, um den Verlust an transversaler Breite durch die anschließende Aufrichtung bukkal gekippter Ankerzähne auszugleichen [54]. Jedoch sollte die geringe Standardisierung zwischen verschiedenen DVT-Geräten und die damit einhergehende, fehlende Angabe absoluter Richtwerte anhand der Hounsfield-Skala als großer Nachteil für die routinemäßige Anwendung im klinischen Alltag angesehen werden [52]. Hierzu müssen weitere Studien folgen, um solche Werte zu definieren und die Methode als objektiven, quantitativen, einfacheren und erfolgreicherem Parameter etablieren zu können [52].

Des Weiteren wird die Fraktalanalyse als eine mögliche, zukunftssträchtige Methode zur Therapieentscheidung zwischen RME und SARME diskutiert [57]. Für die Etablierung im klinischen Alltag müssten jedoch ebenfalls weitere Studien folgen, um das Verfahren zu standardisieren, sowie genaue Richt- bzw. Grenzwerte definieren zu können [57].

### 3 Material und Methoden

Bei dieser Pilotstudie handelt es sich um eine retrospektive Single-Center-Studie, die den Erfolg der rein konventionellen Gaumennahterweiterung beim Erwachsenen evaluiert. Alle Daten wurden in der Poliklinik für Kieferorthopädie der Universitätsmedizin Mainz von einem Untersucher gesammelt, anonymisiert und analysiert.

#### 3.1 Patientengut

Es wurden ausschließlich Patienten/-innen inkludiert, die an der Poliklinik für Kieferorthopädie der Universitätsmedizin Mainz behandelt wurden und folgende Einschlusskriterien erfüllen:

- Erwachsene Patienten/-innen im Alter von  $\geq 18$  Jahren
- Ausgeprägte Zahnbogen-Enge des Oberkiefers mit resultierendem uni- oder bilateralen seitlichen Kreuzbiss zu Beginn der Behandlung
- Vorhandensein qualitativ hochwertiger STL-Dateien vor Beginn und nach Abschluss der Behandlung

Ausgeschlossen wurden hingegen Patienten/-innen mit:

- erheblicher medizinischer Vorgeschichte, sowie Syndromen
- dentoalveolären Anomalien wie Lippen-Kiefer-Gaumenspalten
- vorheriger maxillomandibulärer Osteotomie
- Parodontalerkrankungen
- schlechter Compliance

## 3.2 Methode

### 3.2.1 Die Apparatur

Alle Patienten/-innen wurden mit einer klassischen, rein zahngetragenen Gaumennahterweiterungsapparatur mit Hyrax®-Schraube (Hyrax®/12/10, Dentaaurum, Ispringen, Germany), die an allen Prämolaren, als auch den beiden Sechsjahrmolaren im Oberkiefer zementiert wurde, behandelt (Abbildung 5). Außerdem erhielten alle Patienten/-innen eine individuell, in unserem zahntechnischen Labor, hergestellte Unterkiefer-Aufbissplatte (Abbildung 6) mit seitlichen Aufbissen zum Entkoppeln des Bisses. Letzteres dient dazu Behinderungen der transversalen Erweiterung des Oberkiefers durch die Okklusion zu vermeiden.



**Abbildung 5: Darstellung der verwendeten Gaumennahterweiterungsapparatur in situ**

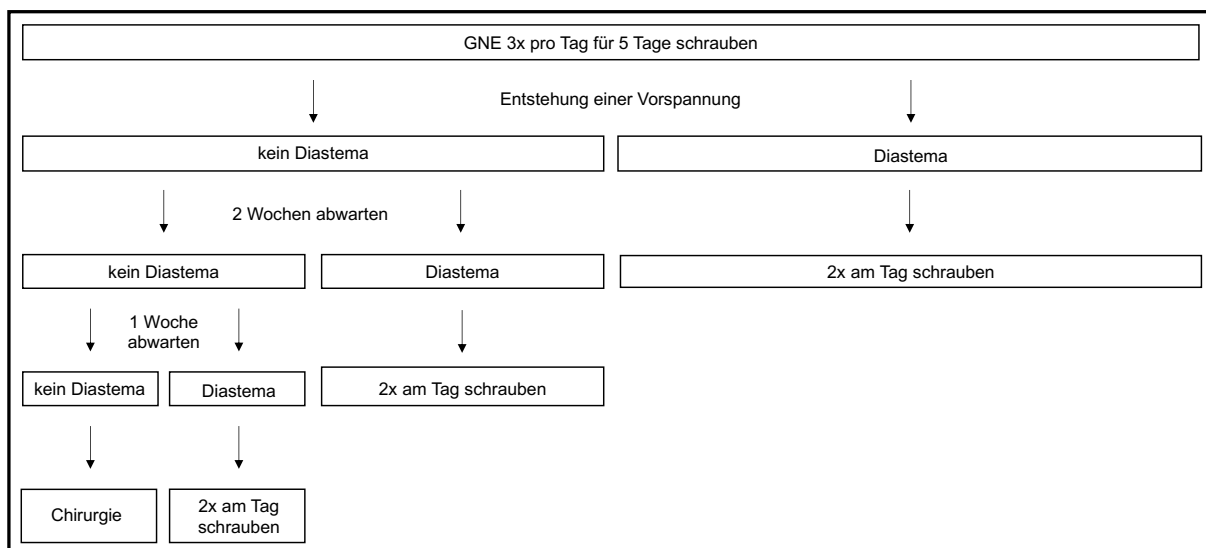


**Abbildung 6: Darstellung der verwendeten Unterkiefer-Platte mit seitlichen Aufbissen in situ**

### **3.2.2 Das Drehprotokoll**

Direkt nach dem Einsetzen der Apparatur wurde die Hyrax<sup>®</sup>-Schraube vom Behandler mit fünf Viertelumdrehungen, von denen jede einer Dehnung um 0,2 mm entspricht, aktiviert. Hierdurch soll eine hohe initiale Spannung innerhalb der Sutura palatina mediana erreicht werden. Nach kurzer Wartezeit wurde die Schraube um vier Viertelumdrehungen deaktiviert und die Patienten/-innen instruiert die weiteren Aktivierungen eigenständig Zuhause anhand des folgenden Drehprotokolls durchzuführen (Abbildung 7): Die ersten fünf Tage wurde die Apparatur dreimal täglich (morgens, mittags und abends) mit je einer Viertelumdrehung aktiviert. Nach Ablauf dieser Zeit folgte die erste Kontrolle in unserer Poliklinik, um zu kontrollieren, ob es bereits zur Bildung eines Diastema mediale gekommen war. Konnte letzteres diagnostiziert werden, wurden die jeweiligen Patienten/-innen angeleitet mit je zwei Aktivierungen pro Tag (morgens und abends) fortzufahren, bis die gewünschte transversale Breite erreicht wurde. Andernfalls wurde über eine Zeitspanne von 14 Tagen keine weitere Aktivierung durchgeführt und anschließend erneut nach der Bildung eines Distema mediale untersucht. Konnte nach Verstreichen dieses

Zeitraums die Bildung eines Diastema mediale diagnostiziert werden, wurde das zuvor beschriebenen Vorgehen mit zwei Aktivierungen pro Tag begonnen. Im Gegensatz dazu wurde die Hyrax<sup>®</sup>-Schraube für eine weitere Woche in ihrer Einstellung belassen, sollte es bis zu diesem Zeitpunkt noch nicht zur Bildung eines Diastemas gekommen sein. Konnte nach dieser erneuten Wartezeit weiterhin kein Diastema festgestellt werden, wurde das untersuchte, rein konservative Verfahren in dem jeweiligen Fall als erfolglos gewertet. Die Therapiepläne der betroffenen Patienten/-innen wurden zugunsten einer kombiniert kieferorthopädisch-kieferchirurgischen Therapie mit SARME geändert. Sollte sich hingegen ein Diastema mediale entwickelt haben, wurde mit zwei Aktivierungen pro Tag fortgefahren. Abbildung 8 stellt eine übersichtliche Darstellung des zuvor beschriebenen und von uns entwickelten Drehprotokolls dar.



**Abbildung 7: Schematische Darstellung des angewendeten Drehprotokolls**

### 3.2.3 Modellanalyse

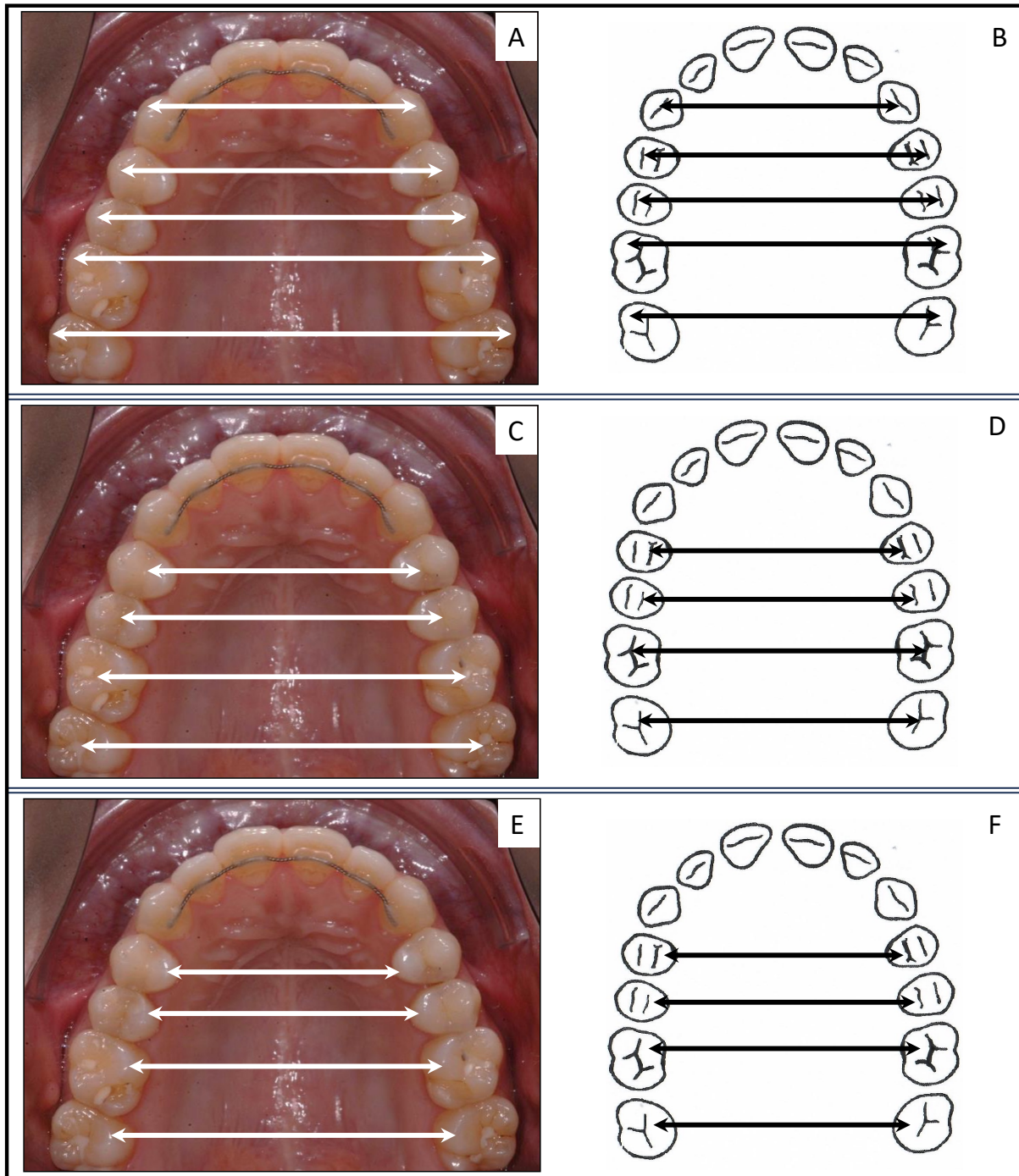
Von allen Studienteilnehmern/-innen wurden vor Beginn der Behandlung (T0), als auch nach Retention (T1) digitale 3D-Modelle anhand der zur Verfügung stehenden STL-Dateien erstellt. Diese wurden von einem Untersucher in OnyxCeph<sup>®</sup> (Image Instruments, Chemnitz, Germany) anhand von mehreren zuvor genau definierten Referenzpunkten und -strecken ausgewertet. Der Untersucher erhob und dokumentierte alle Messungen zweimal mit einem zeitlichen Abstand von vier Wochen auf 0,1 mm bzw. 0,1 ° genau. Jedem Patientenfall wurde eine individuelle Nummer

zugewiesen, um die generierten Daten in einer Tabelle in Microsoft Excel (Version 16.68, Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA) darzustellen. Alle Daten wurden digital auf einem passwortgeschützten Computer erfasst.

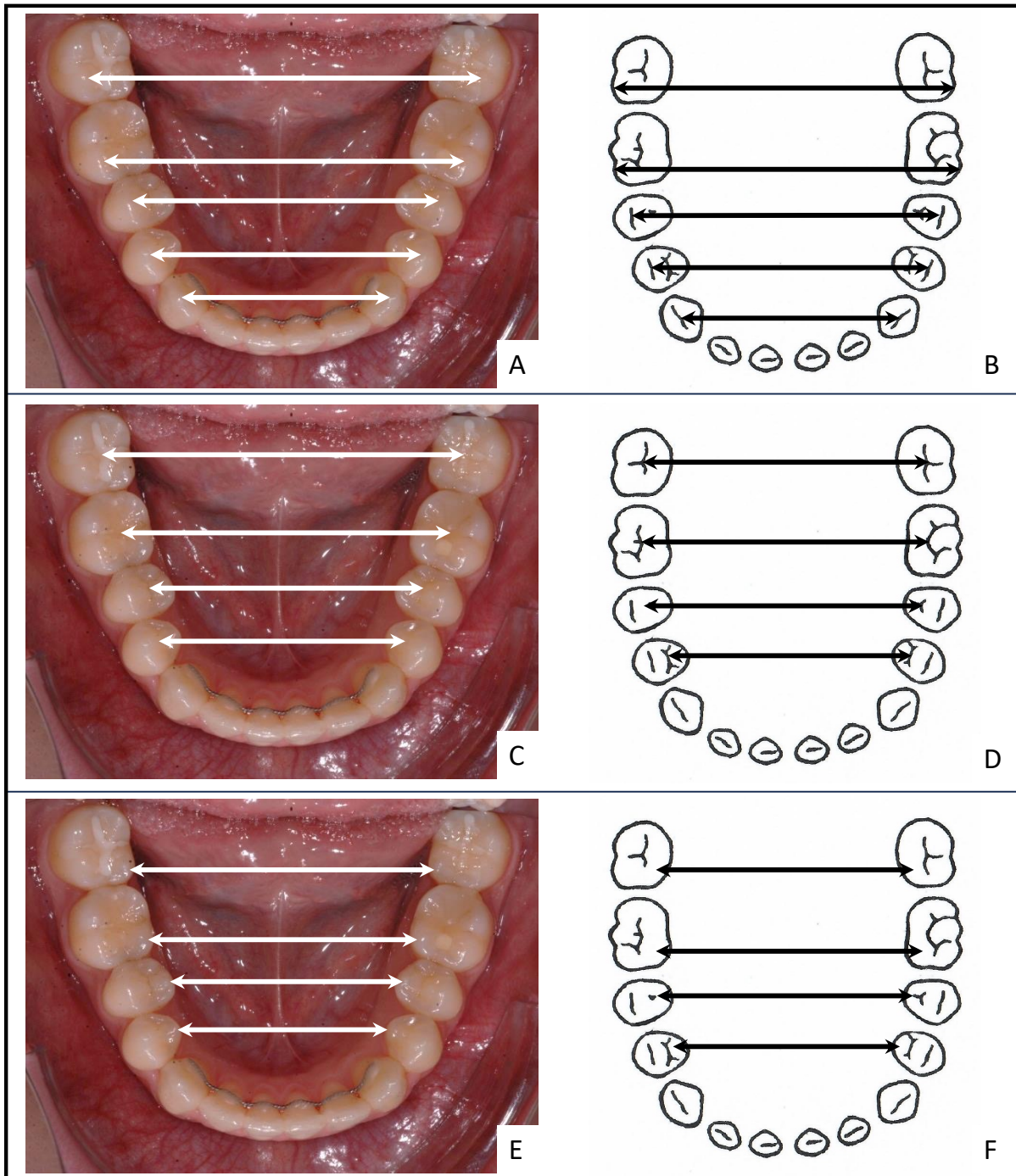
### **3.2.4 Bestimmung der transversalen Zahnbogen-Breite**

Die Breite des Oberkieferzahnbogens wurde im Bereich der Eckzähne, der ersten und zweiten Prämolaren, sowie der ersten und zweiten Molaren gemessen, um eine genaue Beurteilung der transversalen Erweiterung von anterior nach posterior ermöglichen zu können. Es wurde zwischen Messungen auf Höhe der Okklusionsfläche und des Gingivalsaums der jeweiligen Referenzzähne unterschieden, wobei erstgenannte in Anlehnung an die zuvor veröffentlichte Studie von Ghergu Jianu et al. gewählt wurden [58]: Demnach definierten wir an den ersten und zweiten Prämolaren jeweils drei Messpunkte, die neben dem tiefsten Punkt der Zentralfissur, die bukkalen und palatinalen Höckerspitzen umfassen. An den ersten und zweiten Molaren wählten wir entsprechend die mesiobukkalen und mesiopalatinalen Höckerspitzen sowie den Schnittpunkt der zentralen Längsfissur mit der bukkalen Querfissur als Referenzpunkte. Wie bereits in Veröffentlichungen von Handelman et al. angewandt, nutzten wir außerdem die Methode nach Howe et al., um zusätzlich die transversale Breite des Zahnbogens im Verlauf des Gingivalsaums an den Eckzähnen, ersten und zweiten Prämolaren, sowie den ersten Molaren zu ermitteln [3]: Hierbei wurde, mit Ausnahme der Sechsjahrmolaren, der Punkt der größten Konvexität des Gingivalsaumes als Referenzpunkt gewählt [3]. Im Fall der ersten Molaren nutzten wir hingegen den Schnittpunkt des Gingivalsaums mit der palatinalen bzw. lingualen Einziehung des jeweiligen Zahnes [3]. Die beschriebenen Referenzstrecken, die bei der digitalen Modellanalyse Anwendung fanden, sind zum besseren Verständnis, in den folgenden Abbildungen 8 (okklusale Referenzpunkte) und 10 (gingivale Referenzpunkte) anschaulich dargestellt und entsprechend mit Pfeilen markiert.

Neben den Oberkiefer-Messungen führten wir auch im Unterkiefer eine entsprechende Auswertung der prä- und posttherapeutischen Zahnbogen-Breite durch. Die hierbei gewählten Mess- und Referenzpunkte sind entsprechend derer im Oberkiefer gewählt und in den Abbildungen 9 (okklusale Referenzpunkte) und 10 (gingivale Referenzpunkte) dargestellt.



**Abbildung 8: Darstellung der gemessenen Referenzstrecken auf Höhe der Okklusionsfläche im Oberkiefer**  
**A + B: Bukkale Referenzpunkte**  
**C + D: Zentrale Referenzpunkte**  
**E + F: Palatinale Referenzpunkte**

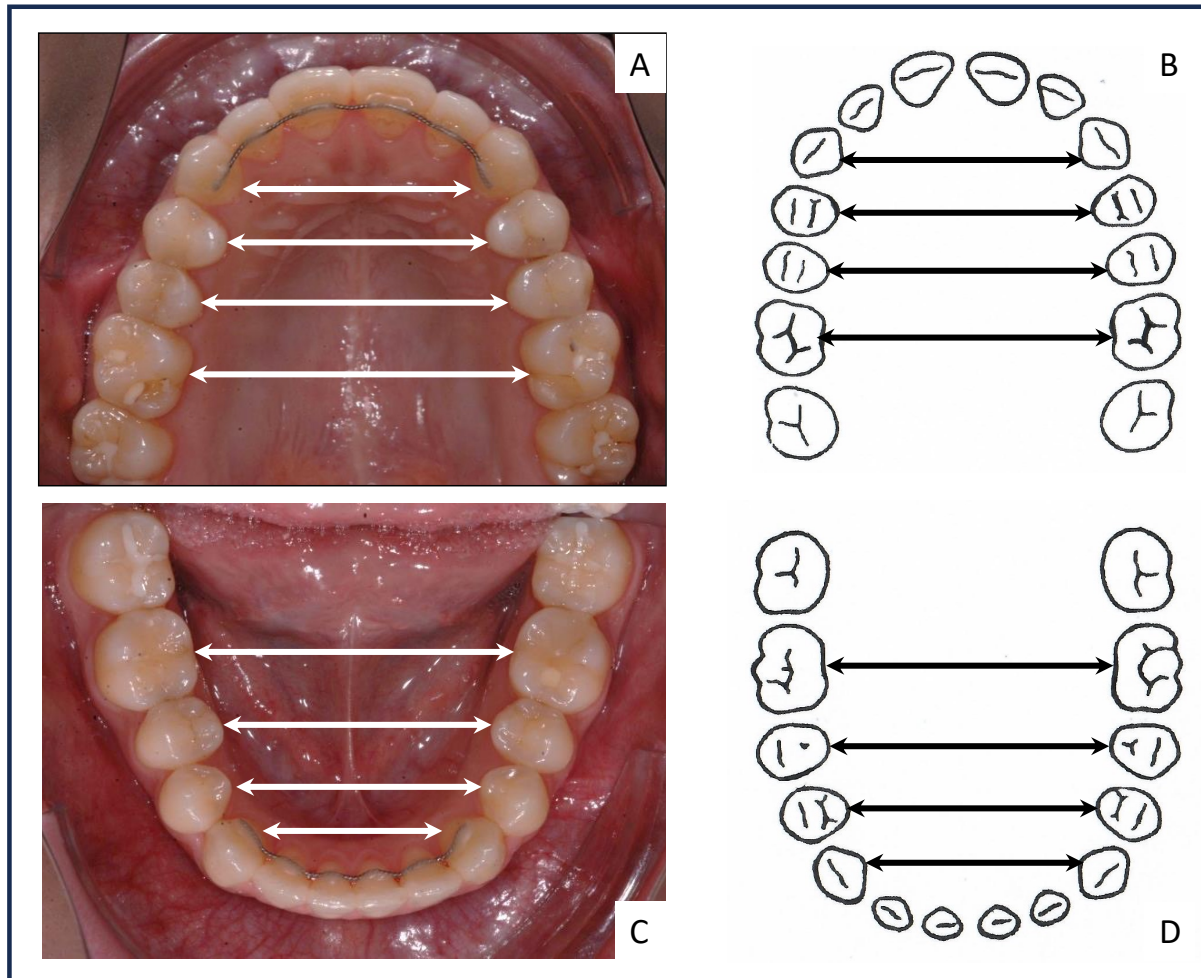


**Abbildung 9: Darstellung der gemessenen Referenzstrecken auf Höhe der Okklusionsfläche im Unterkiefer**

**A + B: Bukkale Referenzpunkte**

**C + D: Zentrale Referenzpunkte**

**E + F: Linguale Referenzpunkte**



**Abbildung 10: Darstellung der gemessenen Referenzstrecken auf Höhe des Gingivalsaums**

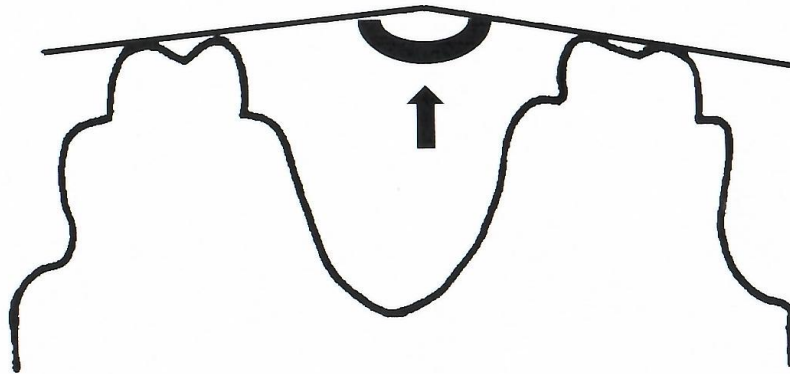
**A + B: Im Oberkiefer**

**C + D: Im Unterkiefer**

### 3.2.5 Bestimmung der Angulation der ersten Molaren im Oberkiefer

Um das Ausmaß der durch die Therapie resultierenden Bukkalkippung der Ankerzähne analysieren zu können, nutzten wir ein zuvor von Burst, als auch Burst und McNamara präsentiertes Verfahren, welches die Ermittlung der Angulation der Sechsjahrmolaren in der Frontalebene ermöglicht [3]. Hierfür werden sowohl im ersten, als auch im zweiten Quadranten Verbindungslinien durch die jeweiligen mesiobukkalen und mesiopalatalen Höckerspitzten der ersten Molaren gelegt [3]. Der Winkel, welcher durch die Verlängerung dieser beiden Verbindungslinien entsteht, beschreibt die bestehende Angulation der Molaren [3]. Im Gegensatz zu der Methode der zuvor genannten Autoren führten wir dies jedoch nicht analog, sondern ebenfalls

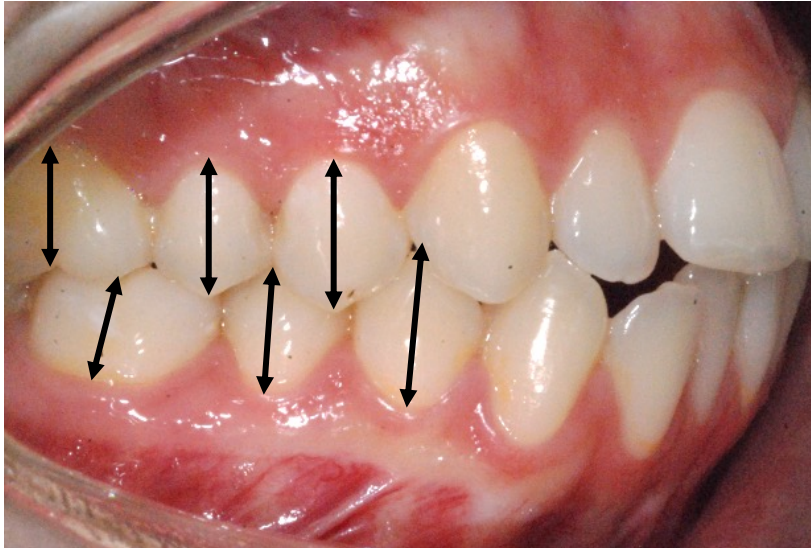
digital in der Software OnyxCeph® (Image Instruments, Chemnitz, Germany) durch. Abbildung 11 demonstriert das beschriebene Vorgehen.



**Abbildung 11: Schematische Darstellung der Bestimmung der Angulation der ersten Molaren im Oberkiefer in der Frontalebene**

### **3.2.6 Bestimmung der klinischen Kronenlänge**

Um einen möglichen Attachment-Verlust im Rahmen unserer Therapie beurteilen zu können, bedienen wir uns einem Verfahren, welches wir von Handelman et al. und Ghergu Jianu et al. übernahmen [3,58]: Hierbei wird der Attachment-Verlust „indirekt“ über die Vermessung der klinischen Kronenlänge der Ankerzähne zu Beginn, als auch nach Abschluss der Therapie ermittelt [3,58]. Im Fall der ersten und zweiten Prämolaren entspricht die klinische Kronenlänge der Strecke zwischen der bukkalen Höckerspitze und dem Punkt der größten Konvexität des Gingivalsaums [3,58]. Für die Ermittlung der klinischen Kronenlänge der ersten Molaren nutzten wir hingegen den Abstand des bukkalen Endes der bukkalen Querfissur zwischen dem mesio- und distobukkalen Höcker und dem direkt senkrecht darunter liegenden Punkt auf dem Gingivalsaum [3,58]. Die im Anschluss folgende Abbildung 12 zeigt die entsprechenden Referenzstrecken.



**Abbildung 12: Darstellung der Bestimmung der klinischen Kronenlänge der Prämolaren und ersten Molaren im Ober- und Unterkiefer**

### **3.3 Statistische Methoden**

Die gewonnenen Daten wurden in Microsoft Excel (Version 16.68, Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA) dokumentiert und anschließend mit IBM SPSS Statistics 23 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) statistisch ausgewertet. Für jede Variable wurde der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet. Ein gepaarter t-Test wurde durchgeführt, um die Mittelwerte von T0 und T1 zu vergleichen und um festzustellen, ob die Veränderungen signifikant waren oder nicht. Dabei wurde ein p-Wert  $p \leq 0,05$  als statistisch signifikant angesehen (Tab.2).

#### **3.3.1 Fehlerberechnung**

Alle Messungen wurden doppelt von einem Untersucher im Abstand von vier Wochen ausgewertet. Zur Beurteilung der eigenen Messungenaugkeiten wurde der Intraklassen-Korrelationskoeffizient (ICC) ermittelt.

## 4 Ergebnisse

Anhand der zuvor definierten Ein- und Ausschlusskriterien konnten wir insgesamt 17 Patientinnen und Patienten, mit einem Durchschnittsalter von  $32,9 \pm 11,48$  Jahren zu Beginn der Behandlung, in die endgültige Studienkohorte aufnehmen. Hiervon waren 52,9 % männlich ( $n = 9$ ) und 47,1 % weiblich ( $n = 8$ ). Sämtliche Studienteilnehmer/-innen waren kaukasisch. Bei insgesamt 13 (5 Männer und 8 Frauen) Patienten/-innen konnten wir die Bildung eines sichtbaren Diastema mediale zwischen den beiden oberen mittleren Schneidezähnen feststellen. Letzteres setzten wir, wie bereits zuvor beschrieben, mit dem Erfolg des zugrunde liegenden Therapiekonzeptes gleich, sodass eine Erfolgsquote von 76,47 % in unserer Kohorte imponierte.

### 4.1 Transversale Breite im Oberkiefer – Okklusale Messungen

Die okklusalen Messungen zeigten an den entsprechenden Messpunkten eine Zunahme des Oberkiefer-Zahnbogens in der Transversalen von  $+ 2,71 \pm 1,58$  mm (Eckzähne),  $+ 5,85 \pm 2,20$  mm bis  $+ 6,15 \pm 2,07$  mm (1. Prämolaren),  $+ 5,89 \pm 2,48$  mm bis  $+ 6,29 \pm 2,62$  mm (2. Prämolaren),  $+ 5,68 \pm 1,97$  mm bis  $+ 6,02 \pm 1,83$  mm (1. Molaren) und  $+ 1,87 \pm 4,88$  mm bis  $4,07 \pm 2,39$  mm (2. Molaren) zwischen den prä- und post-therapeutischen Werten. Mit Ausnahme einer Messung im Bereich der 2. Molaren erwiesen sich alle Werte als statistisch signifikant ( $p < 0,05$ ). Die folgende Tabelle 1 zeigt alle erzielten Veränderungen durch die Therapie im Detail.

**Tabelle 1: Zunahme der transversalen Breite (T1-T0) in Millimeter im Oberkiefer an den verschiedenen Referenzpunkten auf Höhe der Okklusalfäche**  
 \* statistisch nicht signifikant

	Referenzpunkt	T1-T0	SD	95 %- Konfidenzintervall der Differenz		N	P-Wert	
				Untere	Obere			
Oberkiefer – Okklusale Messungen	<b>Eckzahn</b>	Eckzahnspitze	2,71	1,58	1,75	3,66	12	< 0,001
	<b>1. Prämolaren</b>	Bukkale Höckerspitze	6,15	2,07	4,84	7,46	11	< 0,001
		Fissur	5,85	2,20	4,45	7,25	11	< 0,001
		Palatinale Höckerspitze	6,10	2,33	4,62	7,58	11	< 0,001
	<b>2. Prämolaren</b>	Bukkale Höckerspitze	6,29	2,62	4,63	7,96	11	< 0,001
		Fissur	5,89	2,48	4,32	7,47	11	< 0,001
		Palatinale Höckerspitze	6,20	2,61	4,54	7,86	11	< 0,001
	<b>1. Molar</b>	Mesiobukkale Höckerspitze	6,02	1,83	4,91	7,12	12	< 0,001
		Fissur	5,75	1,87	4,63	6,88	12	< 0,001
		Mesiopalatinale Höckerspitze	5,68	1,97	4,49	6,88	12	< 0,001
	<b>2. Molar</b>	Mesiobukkale Höckerspitze	3,62	2,48	2,04	5,19	11	< 0,001
		Fissur	1,87	4,88	- 1,23	4,98	11	0,105*
Mesiopalatinale Höckerspitze		4,07	2,39	2,56	5,59	11	< 0,001	

## 4.2 Transversale Breite im Oberkiefer – Gingivale Messungen

Zusätzlich zu den Messungen auf Höhe der Okklusionsfläche legten wir im Rahmen unserer digitalen Modellanalyse Referenzstrecke im Bereich des Gingivalsaums fest und analysierten die dort durch die Therapie erzielten Veränderungen. Hierbei erwiesen sich die Unterschiede in sämtlichen Fällen zwischen prä- und posttherapeutischen Befund als statistisch signifikant ( $p < 0,05$ ). Die jeweiligen Zunahmen betragen  $+ 2,58 \pm 1,26$  mm (Eckzähne),  $+ 5,01 \pm 2,28$  mm (1. Prämolaren),  $+ 5,03 \pm 2,01$  mm (2. Prämolaren), sowie  $+ 4,57 \pm 1,88$  mm (1. Molaren). Eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse ist in Tabelle 2 veranschaulicht.

**Tabelle 2: Zunahme der transversalen Breite (T1-T0) in Millimeter im Oberkiefer an den verschiedenen Referenzpunkten auf Höhe des Gingivalsaums**

	Zahn	T1-T0	SD	95 %- Konfidenzintervall der Differenz		N	P-Wert
				Untere	Obere		
				Oberkiefer Gingivale Messungen	<b>Eckzahn</b>		
<b>1. Prämolaren</b>	5,01	2,28	3,48	6,54	10	< 0,001	
<b>2. Prämolaren</b>	5,03	2,01	3,75	6,31	11	< 0,001	
<b>1. Molar</b>	4,57	1,88	3,31	5,83	10	< 0,001	

## 4.3 Transversale Breite im Unterkiefer – Okklusale Messungen

Im Rahmen des Vergleichs zwischen prä- und posttherapeutischer Zahnbogen-Breite konnten wir im Unterkiefer bis auf zwei Ausnahmen keine statistisch signifikanten Veränderungen anhand der Messungen auf Höhe der Okklusionsflächen feststellen. Die diskreten Unterschiede zwischen Befund zum Zeitpunkt T0 und T1 reichen hierbei von  $- 0,03 \pm 1,23$  mm und  $0,99 \pm 0,87$  mm. Sie sind in Tabelle 3 ausführlich beschrieben.

**Tabelle 3: Zunahme der transversalen Breite (T1-T0) in Millimeter im Unterkiefer an den verschiedenen Referenzpunkten auf Höhe der Okklusalfäche**  
 \* statistisch nicht signifikant

	Referenzpunkt	T1-T0	SD	95 %- Konfidenzintervall der Differenz		N	P-Wert	
				Untere	Obere			
Unterkiefer – Okklusale Messungen	<b>Eckzahn</b>	Eckzahnspitze	0,34	1,09	-0,32	1,00	12	0,284*
	<b>1. Prämolare</b>	Bukkale Höckerspitze	0,96	1,67	-0,10	2,02	11	0,072*
		Fissur	0,92	1,57	-0,08	1,91	11	0,067*
		Palatinale Höckerspitze	0,68	1,30	-0,15	1,50	11	0,099*
	<b>2. Prämolare</b>	Bukkale Höckerspitze	0,55	1,45	-0,43	1,52	10	0,240*
		Fissur	0,26	1,51	-0,75	1,28	10	0,575*
		Palatinale Höckerspitze	- 0,03	1,23	-0,85	0,80	10	0,943*
	<b>1. Molare</b>	Mesiobukkale Höckerspitze	0,60	0,73	0,16	1,04	12	0,012
		Fissur	0,32	0,82	-0,18	0,81	12	0,189*
		Mesiopalatinale Höckerspitze	0,35	0,89	-0,19	0,89	12	0,188*
	<b>2. Molare</b>	Mesiobukkale Höckerspitze	0,99	0,87	0,44	1,54	11	0,002
		Fissur	0,58	0,95	-0,03	1,18	11	0,061*
Mesiopalatinale Höckerspitze		0,48	0,80	-0,03	0,98	11	0,063*	

#### 4.4 Transversale Breite im Unterkiefer – Gingivale Messungen

Zusätzlich zu den okklusalen Messungen führten wir auch im Unterkiefer Messungen auf Höhe des Gingivalsaums durch. Hierbei konnten jedoch keine statistisch signifikanten Unterschiede ( $p < 0,05$ ) zwischen den Messzeitpunkten T0 und T1 detektiert werden. Während im Bereich der 1. Molaren eine Abnahme von  $-0,14 \pm 1,03$  mm festgestellt werden konnte, kam es im Bereich der weiteren Referenzstrecken zu Zunahmen um  $0,05 \pm 1,22$  mm (2. Prämolare),  $0,21 \pm 1,06$  mm (1. Prämolare), sowie  $0,30 \pm 1,14$  mm (Eckzahn). Tabelle 4 veranschaulicht die entsprechenden Ergebnisse unserer Analyse.

**Tabelle 4: Zunahme der transversalen Breite (T1-T0) in Millimeter im Oberkiefer an den verschiedenen Referenzpunkten auf Höhe des Gingivalsaums**

\* statistisch nicht signifikant

	Zahn	T1-T0	SD	95 %- Konfidenzintervall der Differenz		N	P-Wert
				Untere	Obere		
				<b>Unterkiefer Gingivale Messungen</b>	<b>Eckzahn</b>		
	<b>1. Prämolare</b>	0,21	1,06	-0,47	0,88	11	0,511*
	<b>2. Prämolare</b>	0,05	1,22	-0,76	0,87	10	0,885*
	<b>1. Molar</b>	-0,14	1,03	-0,76	0,48	12	0,636*

#### 4.5 Angulation der 1. Molaren im Oberkiefer

Neben der Beurteilung der erzielten transversalen Erweiterung des Oberkiefers an den diversen Messpunkten stellt die Analyse der Veränderung der Achsstellung der Sechsjahrmolaren im Oberkiefer im Verlauf der Therapie eine Kernaussage dieser Arbeit dar. Es zeigte sich eine Abnahme des Winkels um  $-8,89^\circ$  (Tabelle 5), was einer durchschnittlichen Bukalkippung der 1. Molaren um  $4,45^\circ$  pro Quadranten entspricht. Dies erweist sich als statistisch signifikant.

**Tabelle 5: Veränderung der Angulation der 1. Molaren (T1-T0) in Grad im Oberkiefer**

Zahn	T1-T0	SD	95 %- Konfidenzintervall der Differenz		N	P-Wert
			Untere	Obere		
<b>16/26</b>	-8,89	9,12	-14,41	-3,38	12	0,004

#### 4.6 Attachmentverlust im Oberkiefer

Mit Ausnahme der 1. Prämolaren, sowohl auf der rechten, als auch auf der linken Seite, zeigte sich keine statistisch signifikante Zunahme ( $p < 0,05$ ) der klinischen Kronenlänge. Sämtliche absoluten Werten (Tabelle 6) lassen lediglich einen geringen Attachmentverlust vermuten, dessen klinische Relevanz fraglich ist.

**Tabelle 6: Veränderung der klinischen Kronenlänge (T1-T0) der Ankerzähne in Millimeter im Oberkiefer**

\* statistisch nicht signifikant

	Zahn	T1-T0	SD	95 %- Konfidenzintervall der Differenz		N	P-Wert
				Untere	Obere		
Oberkiefer Attachment-Verlust	14	0,41	0,56	0,05	0,77	11	0,029
	15	0,08	0,45	-0,20	0,37	11	0,537*
	16	0,30	0,53	-0,02	0,62	12	0,065*
	24	0,39	0,50	0,08	0,71	11	0,019
	25	0,02	0,63	-0,37	0,42	11	0,893*
	26	0,12	0,42	-0,14	0,37	12	0,339*

#### 4.7 Attachmentverlust im Unterkiefer

Im Fall des Unterkiefers zeigte sich außer im Fall der Prämolaren im 4. Quadranten keine statistisch signifikante Zunahme der klinischen Kronenlänge (s. Tabelle 7).

**Tabelle 7: Veränderung der klinischen Kronenlänge (T1-T0) der Ankerzähne in Millimeter im Unterkiefer**

\* statistisch nicht signifikant

	Zahn	T1-T0	SD	95 %- Konfidenzintervall der Differenz		N	P-Wert
				Untere	Obere		
Unterkiefer Attachment-Verlust	34	0,09	0,29	-0,09	0,28	11	0,303*
	35	0,12	0,42	-0,17	0,40	10	0,377*
	36	0,11	0,50	-0,19	0,41	12	0,449*
	44	0,25	0,29	0,07	0,43	11	0,012
	45	0,28	0,26	0,11	0,45	10	0,004
	46	0,18	0,37	-0,04	0,41	12	0,098*

#### 4.8 Fehlerberechnung

Der Intraklassenkorrelationskoeffizient (ICC) für die Intra-Rater-Reliabilität für alle Messungen lag zwischen 0,953 und 1,000. Dies lässt auf eine exzellente Messzuverlässigkeit schließen.

## 5 Diskussion

### 5.1 Die Therapie der transversal unterentwickelten Maxilla beim Erwachsenen

Die klassische, konventionelle Gaumennahterweiterung stellt ein im Kindes- und frühen Jugendalter im kieferorthopädischen Praxisalltag fest etabliertes Verfahren zur erfolgreichen Therapie der transversal unterentwickelten Maxilla dar [5,31,41,47,51,55]. Im Gegensatz dazu ist die Anwendung beim Erwachsenen in der Fachwelt stark umstritten [3,4,32]. Trotz dieser Kontroverse findet sich in der derzeitigen Literatur jedoch wenig klinische Forschung, die den Erfolg der rein konservativen GNE bei diesem Patientenkontingent genauer untersucht, beschreibt und evaluiert [3,4,6,7,32,36,57]. Folglich wird das Verfahren im Erwachsenenalter von der großen Mehrheit der behandelnden Kieferorthopäden/-innen weiterhin als wenig erfolgsversprechend angesehen und zugunsten der chirurgisch unterstützten SARME oder der MARPE verlassen [1,2,6,7,8,19,32,42,43,45,48,58-61]. Dies verwundert insbesondere in einer Zeit, in der die Kieferorthopädie, ursprünglich als Domäne der Kinder- und Jugendzahnheilkunde angesehen, mehr und mehr Beliebtheit unter Erwachsenen erfährt und auch von diesen in Anspruch genommen wird [62].

In einer Ära von sich stetig weiterentwickelnden Therapiemethoden, wie zum Beispiel der Alignertherapie, und einer konstant steigenden Anspruchshaltung der Gesellschaft wächst der Bedarf an modernsten Therapiekonzepten, die möglichst effizient, minimal-invasiv, optisch unauffällig und kostengünstig sein sollten, laufend. Um dem hohen Standard einer fachzahnärztlichen Behandlung gerecht zu werden, sollten solche neuwertigen Therapien jedoch immer auf der Grundlage evidenzbasierter klinischer Untersuchungen und Studien fundieren. Chirurgische Eingriffe gehen mit einer Vielzahl verschiedenster Risiken einher, die nicht unterschätzt werden dürfen und bei der Planung jeder kombiniert kieferorthopädisch-kieferchirurgischen Therapie berücksichtigt werden müssen: Hierzu zählen unter anderem postoperative Schmerzen, Schwellungen und Blutungen, als auch Sinusinfektionen, die Devitalisierung gesunder Zähne, sowie parodontale Schäden [8,26,32,36,39,50,58,63,64]. Die postoperativ notwendige Regenerationszeit, welche zu Arbeitsausfall und einer zeitweisen Reduktion der Lebensqualität führt, als auch

resultierende höhere Therapiekosten sind weitere Faktoren, die in der heutigen Gesellschaft von besonderer Bedeutung sind und maßgeblich zur Entscheidung der Patienten/-innen für oder gegen eine Therapie beitragen [8,26,32,36,39,50,58,63,64]. Außerdem sollte berücksichtigt werden, dass viele Patienten/-innen chirurgische Maßnahmen aufgrund vielfältiger, individueller Gründe generell ablehnen [32]. Auch aus diesem letztgenannten Grund bedürfen vielversprechende, konservative Therapiekonzepte einer genaueren wissenschaftlichen Untersuchung und Etablierung im kieferorthopädischen Praxisalltag.

Heutzutage stellt das chronologische Alter, wie zuvor beschrieben, bei der überwiegenden Mehrheit der behandelnden Kieferorthopäden/-innen nach wie vor das ausschlaggebende Entscheidungskriterium im Entscheidungsprozess zwischen RME und SARME bei der kieferorthopädischen Therapieplanung dar [2,8]. Begründet wird dies durch die Annahme der mit dem Alter zunehmenden Ossifikation der Sutura palatina mediana und des damit ansteigenden mechanischen Widerstandes [1,2,18,19,53,60]. Neben der hohen Wahrscheinlichkeit eines Therapieversagens der konventionellen GNE mit steigendem Alter wird eine große Bandbreite an Komplikationen wie Gingiva- und Wurzelresorptionen, Kippungen und Lockerungen der Ankerzähne, eine Schwächung der bukkalen Knochenlamelle, Extrusionen, Bissöffnung und starken Schmerzen während der Behandlung befürchtet [1,2,5,24,26,32,36,42,48,49,50,58,59,60]. Des Weiteren wird von der Gefahr einer ungleichmäßigen Expansion des Zahnbogens, als auch Rezidiven unvorhersagbaren Ausmaßes berichtet [58]. Auf Grundlage der derzeit zur Verfügung stehenden Forschung und Literatur sollte das chronologische Alter als einziger und maßgeblicher Entscheidungsfaktor jedoch als unzureichend, wenn gar ungeeignet angesehen werden: So bestehen nachweislich nicht nur große Unterschiede im Rahmen des Ossifikationsprozesses der Sutura palatina mediana in Bezug auf Alter und Geschlecht, sondern außerdem große interindividuelle, aber auch intrasurale Unterschiede [2,8,13,14,16-19,50,52,56]. Hierbei scheint nicht nur der Beginn, sondern auch das Fortschreiten des Ossifikationsprozesses signifikant zu variieren [2,14,16-19]. Letzteres führt insbesondere zu einer Erschwernis des Entscheidungsprozesses [2,14,16-19]. Die traditionell angenommene Korrelation zwischen chronologischem Alter und Obliterationsfortschritt der Sutura palatina mediana konnte bereits in mehreren Studien widerlegt werden: So zeigten Wehrbein

und Yildizhan sehr geringe Ossifikationswerte in Patienten/-innen in ihren Dreißigern, bei denen lediglich 3 – 20 % der Sutur verknöchert vorlagen [13,52]. Korbmacher et al. konnten ebenfalls sowohl die fehlende Korrelation, als auch geringe Obliterationswerte in all ihren Patienten/-innen zwischen 14 bis 71 Jahren mittels 3D-Micro-CT bestätigen [18]. Auch Revelo und Fishman konnten nachweisen, dass die Sutura palatina mediana am Ende der Adoleszenz nicht vollständig verknöchert vorliegt [17]. Weiterhin existieren in der Literatur beschriebene Fälle, bei denen im Alter von 27 [16], 32 [16,52], 54 [19] und 71 [17] Jahren keine Anzeichen der Obliteration festgestellt werden konnten. Angelieri et al. kritisieren jedoch die Tatsache, dass teilweise die weit posterior liegenden Anteile der Sutur unbeurteilt blieben [14,16]. Insbesondere aufgrund der Tatsache, dass der Ossifikationsprozess von posterior nach anterior voranschreitet, lässt die Aussagekraft dieser Altersangaben hinterfragen [2,14,16,17].

Im Gegensatz zum chronologischen Alter scheint der Obliterationsindex hingegen aussagekräftiger für den zu erwartenden Erfolg einer geplanten, konservativen GNE zu sein [16]. Dieser beschreibt den prozentualen Anteil der Obliteration der Sutura palatina mediana in Bezug auf ihre gesamte Länge in der Frontalebene [16]. Hier definierten Persson et al. eine kritische Grenze von 5% Obliteration bis zu der eine nicht-chirurgische Behandlung erfolgsversprechend möglich sei [16]; ein Wert, welcher wiederum in den meisten Fällen nicht vor dem 25. Lebensjahr erreicht werde [16]. Zwar könnten im Jugendalter bereits erste Verknöcherungen bestehen, wobei der Großteil der Ossifikation jedoch erst mit Beginn der dritten Lebensdekade stattfindet [16]. Wehrbein & Yildizhan [52], Knaup et al. [19] und Korbmacher et al. [18] bestätigen ebenfalls Obliterationsindices von unter 5% bei Patientinnen und Patienten über 18 Jahren [50]. Ebenso wiesen 15,6% der erwachsenen Probanden einer Studie von Angelieri et al. Stadien der Ossifikation, in denen eine konventionelle RME als erfolgsversprechend angesehen wird, auf und auch Kwak et al. fanden keine abgeschlossene Ossifikation der Sutur in ca. 42% einer Kohorte von Patienten/-innen im Alter zwischen 18,1 und 53,4 Jahren [5,50].

Diese bestätigte fehlende Korrelation zwischen chronologischem Alter und Ossifikationsfortschritt der Sutura palatina mediana in Kombination mit den zuvor aufgeführten Risiken einer jeden chirurgischen Intervention, als auch den Bedürfnissen von Patienten/-innen in der modernen Kieferorthopädie animierte uns die

rein zahngetragene, konservative GNE bei Erwachsenen mit transversal unterentwickelter Maxilla in unsere Therapiekonzepte zu integrieren und die Behandlungserfolge retrospektiv zu evaluieren.

## **5.2 Therapiekonzepte für die Behandlung von Erwachsenen im Vergleich**

Wie bereits zuvor beschrieben finden sich in der Literatur nur wenige Studien, welche die konventionelle GNE beim Erwachsenen untersuchen und evaluieren [3,4,6,7,32,36,57]. Im Vergleich zu dem von uns entwickelten Therapiekonzept bzw. Drehprokoll wird jedoch deutlich, dass mehrheitlich eine langsamere Aktivierung der Apparatur im Vergleich zum Jugendlichen gewählt wird [3,57]. Dies steht im direkten Gegensatz zu dem von uns entwickelten Therapieansatz, welcher auf die Ausübung initial stärkerer Kräfte abzielt, um somit einen potentiell größeren Widerstand innerhalb der Sutura palatina mediana überwinden und die Sutura noch erfolgreich und ausreichend spalten zu können. Dies unterscheidet uns von Autoren wie Ghergu Jianu et al., die in ihrer 2019 veröffentlichten Studie an Patienten im Alter zwischen 18 und 32 Jahren (Durchschnittsalter:  $22 \pm 4,25$  Jahre) keine skelettalen Effekte mehr erwarteten und diese auch nicht zu erzielen versuchten [57]. Auch sie verwendeten eine Gaumennahterweiterungs-Apparatur mit Hyrax<sup>®</sup>-Schraube, welche an den oberen ersten Prämolaren und ersten Molaren befestigt wurde [57]. Die Patienten/-innen wurden angewiesen die Apparatur jeden zweiten Tag mit einer Vierteldrehung (0,25 mm) zu aktivieren [57]. In Einklang mit unseren Ergebnissen wurde die geringste Zunahme der Transversalen im Bereich der intercaninen Distanz (+ 2,33 mm) erzielt, gefolgt von der am weitesten posterior liegenden Referenzstrecke zwischen den zweiten Molaren (+ 2,37 bis + 2,97 mm) [57]. In allen Fällen konnte der seitliche Kreuzbiss überstellt und somit die Malokklusion erfolgreich behoben werden [57]. Handelman et al. präsentierten eine weitere Kohorte mit 47 Patienten/-innen mit einem zu unserer Kohorte vergleichbaren Durchschnittsalter von  $29,9 \pm 8,0$  Jahren [3]. Im Gegensatz zu Ghergu Jianu et al. und unserer Studie wurde jedoch eine Haas-Apparatur verwendet, welche als kombiniert zahn-schleimhaut-getragene Apparatur über eine zusätzliche Kunststoff-Basis verfügt [3,57]. Letztere soll, den Autoren zufolge, zu einer Förderung der Bukkalbewegung des gesamten Alveolarfortsatzes führen und außerdem Kippungen der Ankerzähne, als auch der beiden Hemimaxillae entgegenwirken [3,65]. Diesen Vorteilen stehen jedoch unerwünschte

Nebenwirkungen wie Läsionen und Nekrosen der Gaumenschleimhaut durch den auf das Gewebe einwirkenden Druck der Kunststoff-Basis gegenüber [45]. Am Tag des Zementierens fanden zwei Aktivierungen statt, gefolgt von einer täglichen Aktivierung, bis die gewünschte und therapeutisch benötigte transversale Breite des Oberkiefer-Zahnbogens erreicht werden konnte [3]. Wenn auch forcierter als das zuvor beschriebene Drehprotokoll von Ghergu Jianu et al., stellt sich die Aktivierung erneut langsamer als in unserer Studie dar [3,57]. Trotz der zusätzlichen Kunststoff-Basis der verwendeten Haas-Apparatur konnte eine zu unserer Studie vergleichbare Zunahme der transversalen Oberkiefer-Breite erzielt werden, was deren Nutzen, insbesondere unter Berücksichtigung der zuvor beschriebenen Nachteile bzw. Risiken, hinterfragen lässt [3]. Aufgrund identischer Referenzstrecken auf Gingiva-Niveau konnten die Ergebnisse der beiden Studien hervorragend verglichen werden [3]. Bei solchen Vergleichen muss jedoch stets berücksichtigt werden, dass die Werte stark abhängig vom Ausmaß des transversalen Defizits der Maxilla zu Therapiebeginn und der dadurch resultierenden, notwendigen transversalen Erweiterung sind und nicht das erfolgreich zu erzielende Maximum des untersuchten Verfahrens darstellen. Zu der von uns angestrebten und in 76,47 % erzielten Bildung eines Diastema mediale zwischen den oberen mittleren Schneidezähnen kam es in der Studie von Handelman et al. hingegen kaum, was den Autoren zufolge aufgrund einer unterschiedlichen Natur der RME im Kindes- und Jungendalter zurückzuführen ist [3]. Um letzteres genauer zu untersuchen, führten die Autoren zusätzlich Konturzeichnungen durch, die es ihnen erlaubten die Zunahme der Transversalen im Bereich des Zahnfleischsaums, des mittleren Gaumens und des Gaumendachs zu beurteilen und die entsprechenden Werte mit einer Kohorte von Kindern (Durchschnittsalter =  $9,5 \pm 1,3$  Jahre) zu vergleichen [3]. Obwohl mit  $+ 5,1 \pm 2,9$  mm,  $+ 3,0 \pm 2,0$  mm und  $+ 0,9 \pm 1,3$  mm auf allen Leveln signifikante Zunahmen detektiert werden konnten, fiel die Expansion bei Kindern im Bereich des mittleren Gaumens und des Gaumendachs signifikant höher aus [3]. Laut Handelman et al. bestätigen diese Ergebnisse die unterschiedliche Natur der Gaumennahterweiterung bei Erwachsenen, wo nur ein geringer Anteil der Gesamtexpansion von 18 % im Bereich des Gaumendachs, d.h. der Sutura palatina mediana selbst, zu erwarten ist [3].

Insbesondere unter Berücksichtigung der bestätigten, geringen Obliterationswerte der Sutura palatina mediana erscheint es uns jedoch verwunderlich und gar

unverständlich, warum nicht auch bei erwachsenen Patienten/-innen versucht werden sollte, mehr skelettale Effekte in der Suture selbst zu erzielen. Ästhetisch ansprechendere, langfristig stabilere Resultate und ein für die Patienten/-innen schonenderes Therapieverfahren wären die Folge [21,23,45]. Nichtsdestotrotz waren es zu unserer Kenntnis, bis jetzt, lediglich da Silva Filho et al., die einen entsprechenden Ansatz untersuchten [36]. Wie Handelman et al. nutzten sie ebenfalls eine Haas-Apparatur, die 24 Stunden nach Einsetzen mit vier Viertelumdrehungen und anschließend täglich mit je zwei Viertelumdrehungen morgens und abends aktiviert wurde bis es zur Ausbildung eines Diastema mediale gekommen war [3,36]. In ihrer Kohorte von Patienten/-innen im Alter zwischen 18 und 32 Jahren konnte hierdurch in 81,5% der Fälle die zugrunde liegende Malokklusion erfolgreich behoben werden [36]. Die benötigte und erzielte Zunahme der Transversale auf Höhe der Okklusionsebene fiel mit jeweils + 1,46 mm (Eckzähne), + 3,60 mm (1. Prämolaren) und + 3,26 mm (1. Molaren) jedoch deutlich geringer als bei unserem Patientenkollektiv aus [36]. Somit lässt sich der Nutzen der Haas-Apparatur erneut hinterfragen: Die rein zahngetragene Gaumennahterweiterungsapparatur mit Hyrax®-Schraube erlaubt eine bessere und vor allem einfachere Mundhygiene und bietet weiterhin eine schnellere, als auch kostengünstigere Produktion im zahntechnischen Labor [11,31,43,45,65].

In den vergangenen Jahren erhielt die MARPE im Rahmen der nicht-chirurgischen Gaumennahterweiterung beim Erwachsenen mehr und mehr Aufmerksamkeit, da man sich hierdurch einen höheren skelettalen Anteil und folglich auch eine höhere Erfolgsquote der Expansion ohne übermäßige und klinisch relevante unerwünschte Nebenwirkungen erhofft [66]. In Studien wurden diesbezüglich bereits verschiedene Therapiekonzepte und Apparaturen-Designs vorgestellt und evaluiert [6,7,66]. Winsauer et al. präsentierten 2021 ein neuartiges zweiphasiges Aktivierungsprotokoll (FCPC), welches als eine Anpassung des altbekannten Alt-RAMEC-Protokolls anzusehen ist [6]: Nach einer 12-wöchigen Latenzzeit, im Anschluss an das Setzen von vier Minischrauben, folgte eine einwöchige Phase, in der die Patienten/-innen angewiesen wurden die Apparatur zweimal täglich zu aktivieren, was einer täglichen Expansion von 0,34 mm entspricht [6]. Anschließend an die Phase wurden die Patienten/-innen instruiert die Dehnschraube zweimal täglich mit 6 Drehungen zu deaktivieren und nach einer Latenzzeit von 15 min erneut mit der gleichen Anzahl an

Drehungen zu aktivieren [6]. An jedem 3. Tag wurde hierbei eine zusätzliche Aktivierung von 0,17 mm ergänzt, bis die gewünschte transversale Erweiterung erfolgreich erzielt werden konnte [6]. Hierbei sollte die applizierte Kraft 500 cN nie überschreiten [6]. Bei einem Patientenkollektiv von 33 Erwachsenen (Durchschnittsalter:  $29,1 \pm 10,2$  Jahre) erwies sich das Verfahren in 84,4 % der Fälle erfolgreich und resultierte in einer Zunahme der Zahnbogenbreite von + 5,4 mm bzw. + 2,5 mm im Bereich des vorderen bzw. hinteren Gaumens [6]. In einer weiteren Studie verglichen An et al., unter Anwendung eines identischen Drehprotokolls, die dentoskelettalen und Weichgewebsveränderungen einer kombiniert zahn- und knochengetragenen Hybrid-GNE mit denen einer rein zahngetragenen Apparatur, die sie in einer Kohorte von 42 Erwachsenen (Durchschnittsalter = 21,97 bzw. 21,54 Jahre) erzielten [7]. Während die Apparatur bei allen Patienten/-innen an den ersten Prämolaren und ersten Molaren befestigt wurde, kamen in der Hybrid-Gruppe zusätzlich vier Miniimplantate zum Einsatz [7]. Mit initial 0,4 mm Expansion pro Tag und einer im Verlauf folgenden Halbierung, sobald es zur Ausbildung eines Diastema mediale gekommen war, konnte in beiden Gruppen eine identische Zunahme der Transversalen um + 5,5 mm im Molarenbereich erreicht werden [7]. Dennoch konnte durch die Hybrid-GNE eine ausgeprägtere skelettale Expansion erzielt werden, weshalb die Autoren das Verfahren für Erwachsene, die mehr skelettale Effekte ohne signifikante Einflüsse auf die vertikale Dimension benötigen, empfehlen [7]. Es wurde jedoch auch darauf hingewiesen, dass noch mehr klinische Forschung nötig sei, um diesen Sachverhalt genauer evaluieren und bestätigen zu können [7]. Weiterhin präsentierten Kapetanović et al. mit dem Dutch Maxillary Expansion Device (D-MED) die erste individuell designte und 3D-gedruckte Apparatur, die im Rahmen der MARPE Anwendung fand [66]. Zur Verankerung dienen vier Minischrauben, sowie die beiden ersten Molaren [66]. Den Autoren zufolge ist die hohe Erfolgsrate von 94,1 % in ihrer Kohorte von 34 Patienten/-innen (Durchschnittsalter =  $27,0 \pm 9,4$  Jahren) insbesondere auf das individuelle Design der Apparatur, als auch die größere Schraubendicke von 2,0 mm zurückzuführen [66]. Im Vergleich zum Therapiekonzept von Winsauer et al. und An et al. ist es außerdem als vorteilhaft anzusehen, dass die Apparatur direkt nach dem Einsetzen aktiviert werden kann und keine Latenzzeit die Therapiedauer verlängert [6,7,66]. Die Expansion betrug hierbei  $6,56 \pm 1,70$  mm bzw.  $4,19 \pm 1,29$  mm im Molaren- und Prämolarenbereich und stellte sich somit ausgeprägter als bei anderen MARPE-Protokollen dar [6]. Während sich bei Winsauer

et al. die typische V-förmige Öffnung der Sutura palatina mediana in der Transversalebene zeigte, konnte diese weder von Kapetanović et al., noch im Rahmen der in unserer Studie durchgeführten okklusalen und gingivalen Messungen festgestellt werden [6,25,27,34,42-44,66]: Zwar imponierte zwischen den zweiten Molaren (unserer am weitesten posterior gelegenen Referenzstrecke) eine deutlich geringere Expansion als im Bereich zwischen den Prämolaren und ersten Molaren detektiert werden konnte, die geringste Zunahme zeigte sich jedoch im Fall der intercaninen Distanz, welche die am weitesten anterior gelegenen Referenzstrecke in unserer Studie darstellt. Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass Winsauer et al. deutlich weiter posterior gelegene Messungen zwischen den Foramina palatina majori durchführten, was uns aufgrund des Studiendesigns ohne zusätzliche Röntgenaufnahmen verwehrt blieb [6]. Unsere Daten decken sich dabei außerdem mit denen von Ghergu Jianu et al., Handelman et al. und Kapetanović et al. [3,58,66]. Des Weiteren sollte von den Messungen nicht direkt auf die Form der Öffnung der Sutura palatina mediana geschlossen werden [10,34,41,43]. Hierfür würde man, wie im Fall von Winsauer et al., DVT-Aufnahmen des Gaumens vor und nach der transversalen Erweiterung benötigen, um die Öffnung der Suture und das Auseinanderdriften der Hemimaxillae genau beschreiben und vermessen zu können [6]. Aufgrund des retrospektiven Studiendesigns, als auch des angewandten ALARA-Prinzips (Strahlenschutz, englisch: „As Low As Reasonably Achievable“) wurden jedoch keine zusätzlichen, für die Behandlung der Patienten/-innen nicht notwendigen, Röntgenaufnahmen durchgeführt [67]. Aus diesem Grund standen uns solche Aufnahmen zur Auswertung leider nicht zur Verfügung.

Wenngleich die MARPE ein sehr erfolgreiches und von Patienten/-innen sehr gut toleriertes Therapieverfahren zur Expansion der unterentwickelten Maxilla darstellt, muss jedoch auch berücksichtigt werden, dass jegliche Art skelettaler Verankerung eine deutlich invasivere Therapie im Vergleich zu unserem Behandlungskonzept darstellt, was wiederum multiple Risiken und auch zusätzlich Kosten mit sich bringt [6,7,66,68]. Viele Patienten/-innen wünschen ein rein konservatives Verfahren ohne jegliche Art der Chirurgie, unabhängig davon wie minimalinvasiv letztere sein mag [32]. Außerdem gibt es eine nicht zu vernachlässigende Anzahl an Angstpatienten/-innen, die Lokalanästhesie ablehnen, welche für den Eingriff nötig ist. Die in vielen MARPE-Protokollen notwendige Latenzphase nach dem Setzen der Minischrauben führt außerdem zu einer Verlängerung der Therapiezeit [6,7]. All dies lässt aufgrund

vergleichbarer Erfolgsraten zu unserem Therapieansatz den Nutzen der zusätzlichen skelettalen Verankerung hinterfragen [6,66].

### **5.3 Beurteilung unerwünschter Nebenwirkungen**

Das übermäßige und folglich klinisch relevante Kippen der Ankerzähne der Gaumennahterweiterungsapparatur nach bukkal ist eine häufige unerwünschte Nebenwirkung der missglückten GNE [1,2,5,26,42,48-50,58,59]. In den entsprechenden Fällen kommt es weder zu einer Spaltung der Sutura palatina mediana, noch zu einem Auseinanderdriften der beiden Hemimaxillae, wodurch wiederum die Ausbildung eines Diastema mediale zwischen den beiden oberen mittleren Schneidezähnen nicht zu detektieren ist [1,58]. Die Aussagekraft der Bildung eines sichtbaren Diastema mediale als Bestätigung der erfolgreichen Öffnung der Sutura palatina wurde bereits in multiplen, vorherigen Veröffentlichungen beschrieben, sodass wir letzteres ebenfalls im Rahmen der vorliegenden Pilotstudie als Erfolg der evaluierten Behandlungsmethode werteten [10,12,16,34,41,43]. Dies ist von besonderer Bedeutung, da wir, wie bereits zuvor erwähnt, unter Berücksichtigung des Strahlenschutzes und des altbekannten ALARA-Prinzips auf zusätzliche Röntgenaufnahmen verzichteten [67]. Hierbei ist es jedoch wichtig zu beachten, dass von der Größe des entstandenen Diastema mediale nicht direkt auf das genaue Ausmaß der Öffnung der Sutura geschlossen werden kann und sollte [10,34,41,43]. Im Allgemeinen entspricht das Diastema mediale in etwa der Hälfte der Schraubenöffnung und bildet sich in den meisten Fällen innerhalb von vier bis sechs Monaten eigenständig durch den Zug der transseptalen Fasern zurück [10,34,41,43]. Hierbei kommt es zunächst zu einer erneuten Annäherung der Zahnkronen, die von einer Mesialisierung der Zahnwurzeln gefolgt ist, sodass die Zähne wieder ihre ursprüngliche Inklination einnehmen [10,41]. Sollte bereits vor Beginn der Therapie ein Diastema vorliegen, wird dieses gehalten oder leicht reduziert [34,41]. Trotz wissenschaftlicher Evidenz ist uns jedoch bewusst, dass das Fehlen einer die skelettalen Effekte bestätigende posttherapeutische DVT-Aufnahme als Nachteil unseres Studiendesigns angesehen werden kann. Unter den 76,47 % von uns erfolgreich therapierten Patienten/-innen kam es im Schnitt zu einer statistisch signifikanten Bukkalkippung der Sechsjahrmolaren um 4,45 ° pro Quadranten. Dies ist vergleichbar mit den Ergebnissen von Handelman et al. (3,1 ° pro Quadranten) und

Kapetanović et al. (3,88 ° pro Quadranten) [3,66]. Obwohl in keinem Fall klinisch relevant, ist dennoch eine Überkorrektur zu empfehlen, um spätere Rezidive präventiv zu vermeiden [3]. Bei der Beurteilung dieser Daten muss jedoch auch berücksichtigt werden, dass bei jeder Gaumennahterweiterung sowohl skelettale, als auch dentoalveoläre Effekte zur gesamten Expansion beitragen und somit eine Bukkalkippung, die auch statistisch signifikant ist, zu erwarten ist [20-29,32]. Dieses Zusammenspiel von skelettalen und dentoalveolären Effekten führt auch dazu, dass die Expansion auf Höhe der Okklusionsebene größer als im Bereich des Gingivalsaums ausfällt [34,46]. Ein weiterer begünstigender Faktor ist die zuvor beschriebene V-Öffnung der Suture in der Frontalebene [12,25-28,34,37-39,40]. Nach Krebs et al. führen all diese Faktoren zu einer doppelt so großen Zunahme der Transversalen im Bereich der Okklusionsebene im Vergleich zur skelettalen Basis [27,42].

Neben der Bukkalkippung zählt der Attachmentverlust der Ankerzähne und die daraus resultierende Entstehung von Gingivarezessionen zu den am häufigsten genannten unerwünschten Nebenwirkungen der gescheiterten Öffnung der Sutura palatina mediana [1,2,26,48-50,59]. Um diesen Sachverhalt zuverlässig beurteilen und evaluieren zu können, nutzen wir eine „indirekte“ Methode, welche bereits zuvor Anwendung fand: Hierbei wird angenommen, dass die Entstehung von Gingivarezessionen gleichbedeutend mit einer Verlängerung der klinischen Kronenlänge ist und daher die Veränderung letzterer im Laufe der Behandlung eine verlässliche Auskunft über einen möglichen Attachmentverlust und dessen genaues Ausmaß gibt [3,57,66]. Mit Ausnahme der rechten und linken ersten Oberkiefermolaren zeigten sich bei unseren Patienten/-innen im Vergleich zwischen den prä- und posttherapeutischen Messungen im Oberkiefer keine statistisch signifikanten Vergrößerungen der klinischen Kronenlänge. Sämtliche absoluten Werte stellten sich lediglich marginal dar, was dessen klinische Relevanz hinterfragen lässt. Im Unterkiefer (Kontrollgruppe) zeigten sich an den rechten ersten und zweiten Prämolaren ebenfalls signifikante Zunahmen der klinischen Kronenlänge. Damit decken sich unsere Ergebnisse mit denen aus vorherigen Veröffentlichungen, die auch keinen statistisch signifikanten und/oder klinisch relevanten Attachmentverlust detektieren konnten [3,57,66]. Des Weiteren scheint es keine Korrelation zwischen dem Attachmentverlust und Patientenalter, der benötigten Expansion, sowie der

klinischen Kronenlänge zu Therapiebeginn zu geben [3]. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die angewendete Methode diversen Störfaktoren wie Attrition, Gingivahyperplasie und einer veränderten Taschentiefe unterliegt, was zu falschen Ergebnissen führen kann [3]. Im Rahmen eines retrospektiven Studiendesigns besteht jedoch keine alternative Möglichkeit den Attachmentverlust der Ankerzähne genauer und zuverlässiger zu evaluieren.

#### **5.4 Erfolg der konservativen, nicht-chirurgischen GNE beim Erwachsenen**

Obwohl das chronologische Alter nicht als alleiniges Entscheidungskriterium herangezogen werden sollte, versuchen mehrere Autoren Grenzen zu definieren, ab wann der Therapiewechsel von der rein konservativen RME zur SARME stattfinden sollte, um eine erfolgreiche transversale Erweiterung der Maxilla erreichen zu können [50,56]: Mommaerts empfiehlt ab einem Alter von 14 Jahren eine SARME durchzuführen, während Alpern und Yurosko die Grenze bei über 20 Jahren für Frauen und über 25 Jahren bei Männern setzen [69,70]. Weitere Angaben liegen bei 16, 20 und 25 Jahren ohne zwischen den Geschlechtern zu differenzieren [2,66]. Wenngleich sich im Rahmen der Behandlung junger Erwachsener, insbesondere im Alter von über 25 Jahren, Probleme im klinischen Alltag gezeigt werden konnten, bestätigen multiple, zuvor beschriebene Studien die hohen Erfolgsaussichten eines rein konservativen Verfahrens unter Voraussetzung entsprechender Anpassungen: Ausschlaggebend für den Erfolg scheint hierbei neben dem Design der verwendeten Apparatur insbesondere das zugrunde liegende Drehprotokoll zu sein [3,4,6,7,19,32,36,41,50,52,57]. In unserer Kohorte mit einem Durchschnittsalter von 32,9 Jahren konnte eine Erfolgsrate von 76,47 % erreicht werden. Letztere kann, unserer Meinung nach, weiter gesteigert werden, wenn noch gezielter auf eine vollständige Auflösung der Okklusion während der aktiven Phase der Behandlung geachtet wird, um die Expansion im Oberkiefer nicht zu behindern.

Die Ergebnisse der zugrunde liegenden Pilotstudie bestätigen das Potential des von uns entwickelten Therapiekonzeptes. Aufgrund der Zuverlässigkeit, als auch der diversen, zuvor ausführlich beschriebenen und diskutierten Vorteile sollte das

Verfahren im kieferorthopädischen Alltag bei der Behandlung von Erwachsenen mit transversal unterentwickelter Maxilla etabliert werden.

## 6 Zusammenfassung

Während die rein konservative Gaumennahterweiterung ohne chirurgische Unterstützung (RME) ein im Kindes- und Jugendalter seit langem im kieferorthopädischen Praxisalltag etabliertes Verfahren zur Therapie der transversal unterentwickelten Maxilla darstellt, ist die Anwendung bei Erwachsenen mehr als umstritten und wird mehrheitlich zugunsten der SARME und der MARPE verlassen [1,2,3,4,5,6,7,8,19,31,32,41,42,43,47,48,51,55,58-61,66]. Seinen Ursprung findet dieser Paradigmenwechsel in der Annahme einer zunehmenden Verknöcherung der Sutura palatina mediana mit chronologischem Alter [1,2,18,19,53,60]. Dieser Zusammenhang konnte jedoch im Rahmen mehrerer Studien widerlegt werden: Generell unterliegen sowohl der Beginn, als auch das Fortschreiten der Ossifikation der Sutura palatina mediana großen interindividuellen, aber auch intrasuralen Unterschieden in Bezug auf Alter und Geschlecht [2,8,13,14,16-19,50,52,56]. Diese individuellen Unterschiede erfordern eine differenzierte Herangehensweise bei der Therapieplanung, insbesondere unter Berücksichtigung der multiplen Risiken im Rahmen chirurgischer Eingriffe, aber auch der steigenden Nachfrage nach modernen und minimal-invasiven Therapiekonzepten im Erwachsenenalter [8,26,32,36,39,50,58,63,64]. Der Erfolg der konservativen GNE bei Erwachsenen konnte bereits in einigen wenigen klinischen Studien bestätigt werden [3,4,6,7,32,36,57,66]. Hierbei kommen verschiedene Konzepte mit und ohne zusätzliche knöcherne Verankerung zur Anwendung [3,4,6,7,32,36,57,66]. Die Wahl des Drehprotokolls zur Aktivierung der Apparatur scheint hierbei insbesondere zum Behandlungserfolg beizutragen. Unser Therapieansatz, der im Rahmen dieser Pilotstudie evaluiert wurde, unterscheidet sich wesentlich von vorherigen Herangehensweisen, indem er eine im Vergleich deutlich forciertere Aktivierung der Apparatur umfasst. In 76,47 % unserer Patienten/-innen mit einem Durchschnittsalter von 32,9 Jahren konnte im Rahmen der Therapie ein Diastema mediale erzielt werden, was die erfolgreiche Spaltung der Sutura palatina mediana und somit der beiden Hemimaxillae bestätigt – eine Erfolgsquote, welche bei noch konsequenter Auflösung der Okklusion weiter gesteigert werden kann [10,12,16, 34,41,43]. Der Einsatz der rein zahngetragene Gaumennahterweiterungsapparatur mit Hyrax<sup>®</sup>-Schraube erweist sich aufgrund diverser Vorteile wie der besseren Reinigbarkeit, sowie einer schnelleren und

kostengünstigeren Herstellung im zahntechnischen Labor bei vergleichbaren bis überlegenen Erfolgsraten als ebenfalls empfehlenswert [11,31,43,45,65].

Die Ergebnisse der vorliegenden Pilotstudie bestätigen das Potenzial dieses neuartigen Therapiekonzeptes zur Behandlung Erwachsener mit transversal unterentwickelter Maxilla und daraus resultierendem uni- oder bilateralen seitlichen Kreuzbiss, welches als vielversprechende Alternative zur SARME und MARPE im kieferorthopädischen Alltag mehr Berücksichtigung und Anwendung finden sollte.

## 7 Literaturverzeichnis

1. Altug Atac AT, Karasu HA, Aytac D. Surgically assisted rapid maxillary expansion compared with orthopedic rapid maxillary expansion. *Angle Orthod.* 2006 May;76(3):353-9. doi: 10.1043/0003-3219(2006)076[0353:SARMEC]2.0.CO;2. PMID: 16637711.
2. Angelieri F, Franchi L, Cevidanes LH, Bueno-Silva B, McNamara JA Jr. Prediction of rapid maxillary expansion by assessing the maturation of the midpalatal suture on cone beam CT. *Dental Press J Orthod.* 2016 Nov-Dec;21(6):115-125. doi: 10.1590/2177-6709.21.6.115-125.sar. PMID: 28125147; PMCID: PMC5278941.
3. Handelman CS, Wang L, BeGole EA, Haas AJ. Nonsurgical rapid maxillary expansion in adults: report on 47 cases using the Haas expander. *Angle Orthod.* 2000 Apr;70(2):129-44. doi: 10.1043/0003-3219(2000)070<0129:NRMEIA>2.0.CO;2. PMID: 10833001.
4. Handelman CS. Nonsurgical rapid maxillary alveolar expansion in adults: a clinical evaluation. *Angle Orthod.* 1997;67(4):291-305; discussion 306-8. doi: 10.1043/0003-3219(1997)067<0291:NRMAEI>2.3.CO;2. PMID: 9267578.
5. Korbmacher H, Huck L, Merkle T, Kahl-Nieke B. Clinical profile of rapid maxillary expansion--outcome of a national inquiry. *J Orofac Orthop.* 2005 Nov;66(6):455-68. English, German. doi: 10.1007/s00056-005-0440-5. PMID: 16331546.
6. Winsauer H, Walter A, Katsaros C, Ploder O. Success and complication rate of miniscrew assisted non-surgical palatal expansion in adults - a consecutive study using a novel force-controlled polycyclic activation protocol. *Head Face Med.* 2021 Dec 11;17(1):50. doi: 10.1186/s13005-021-00301-2. PMID: 34895287; PMCID: PMC8665552.
7. An JS, Seo BY, Ahn SJ. Comparison of dentoskeletal and soft tissue changes between tooth-borne and tooth-bone-borne hybrid nonsurgical rapid maxillary expansions in adults: a retrospective observational study. *BMC Oral Health.* 2021 Dec 18;21(1):658. doi: 10.1186/s12903-021-02008-x. PMID: 34922526; PMCID: PMC8684621.
8. Angelieri F, Franchi L, Cevidanes LHS, Gonçalves JR, Nieri M, Wolford LM, McNamara JA Jr. Cone beam computed tomography evaluation of midpalatal

- suture maturation in adults. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2017 Dec;46(12):1557-1561. doi: 10.1016/j.ijom.2017.06.021. Epub 2017 Jul 14. PMID: 28716474.
9. Timms DJ. The dawn of rapid maxillary expansion. *Angle Orthod.* 1999 Jun;69(3):247-50. doi: 10.1043/0003-3219(1999)069<0247:TDORME>2.3.CO;2. PMID: 10371430.
10. Haas AJ. Rapid Expansion Of The Maxillary Dental Arch And Nasal Cavity By Opening The Midpalatal Suture. *The Angle Orthodontics*, 1961. 31(2), 73-90
11. Sander C. 7 Gaumennahterweiterung. In: Sander FG, Zahn-Mund-Kiefer-Heilkunde: Kieferorthopädie. Thieme. 2011. p197-207
12. HAAS AJ. THE TREATMENT OF MAXILLARY DEFICIENCY BY OPENING THE MIDPALATAL SUTURE. *Angle Orthod.* 1965 Jul;35:200-17. doi: 10.1043/0003-3219(1965)035<0200:TTOMDB>2.0.CO;2. PMID: 14331020.
13. Melsen B. Palatal growth studied on human autopsy material. A histologic microradiographic study. *Am J Orthod.* 1975 Jul;68(1):42-54. doi: 10.1016/0002-9416(75)90158-x. PMID: 1056143.
14. Persson M, Magnusson BC, Thilander B. Sutural closure in rabbit and man: a morphological and histochemical study. *J Anat.* 1978 Feb;125(Pt 2):313-21. PMID: 624680; PMCID: PMC1235599.
15. Cohen MM Jr. Sutural biology and the correlates of craniosynostosis. *Am J Med Genet.* 1993 Oct 1;47(5):581-616. doi: 10.1002/ajmg.1320470507. PMID: 8266985.
16. Persson M, Thilander B. Palatal suture closure in man from 15 to 35 years of age. *Am J Orthod.* 1977 Jul;72(1):42-52. doi: 10.1016/0002-9416(77)90123-3. PMID: 267435.
17. Revelo B, Fishman LS. Maturational evaluation of ossification of the midpalatal suture. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1994 Mar;105(3):288-92. doi: 10.1016/S0889-5406(94)70123-7. PMID: 8135215.
18. Korbmacher H, Schilling A, Püschel K, Amling M, Kahl-Nieke B. Age-dependent three-dimensional microcomputed tomography analysis of the human midpalatal suture. *J Orofac Orthop.* 2007 Sep;68(5):364-76. doi: 10.1007/s00056-007-0729-7. PMID: 17882364.
19. Knaup B, Yildizhan F, Wehrbein H. Age-related changes in the midpalatal suture. A histomorphometric study. *J Orofac Orthop.* 2004 Nov;65(6):467-74. English, German. doi: 10.1007/s00056-004-0415-y. PMID: 15570405.

20. Baccetti T, Franchi L, Cameron CG, McNamara JA Jr. Treatment timing for rapid maxillary expansion. *Angle Orthod.* 2001 Oct;71(5):343-50. doi: 10.1043/0003-3219(2001)071<0343:TFRME>2.0.CO;2. PMID: 11605867.
21. Baydas B, Yavuz I, Uslu H, Dagsuyu IM, Ceylan I. Nonsurgical rapid maxillary expansion effects on craniofacial structures in young adult females. A bone scintigraphy study. *Angle Orthod.* 2006 Sep;76(5):759-67. doi: 10.1043/0003-3219(2006)076[0759:NRMEEO]2.0.CO;2. PMID: 17029507.
22. Gunyuz Toklu M, Germec-Cakan D, Tozlu M. Periodontal, dentoalveolar, and skeletal effects of tooth-borne and tooth-bone-borne expansion appliances. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2015 Jul;148(1):97-109. doi: 10.1016/j.ajodo.2015.02.022. PMID: 26124033.
23. Gurel HG, Memili B, Erkan M, Sukurica Y. Long-term effects of rapid maxillary expansion followed by fixed appliances. *Angle Orthod.* 2010 Jan;80(1):5-9. doi: 10.2319/011209-22.1. PMID: 19852633; PMCID: PMC8978752.
24. Kurt G, Altuğ AT, Türker G, Kiliç B, Kiliç E, Alkan A. Effects of Surgical and Nonsurgical Rapid Maxillary Expansion on Palatal Structures. *J Craniofac Surg.* 2017 May;28(3):775-780. doi: 10.1097/SCS.0000000000003468. PMID: 28468164.
25. Lin L, Ahn HW, Kim SJ, Moon SC, Kim SH, Nelson G. Tooth-borne vs bone-borne rapid maxillary expanders in late adolescence. *Angle Orthod.* 2015 Mar;85(2):253-62. doi: 10.2319/030514-156.1. Epub 2014 Dec 9. PMID: 25490552; PMCID: PMC8631879.
26. Park JJ, Park YC, Lee KJ, Cha JY, Tahk JH, Choi YJ. Skeletal and dentoalveolar changes after miniscrew-assisted rapid palatal expansion in young adults: A cone-beam computed tomography study. *Korean J Orthod.* 2017 Mar;47(2):77-86. doi: 10.4041/kjod.2017.47.2.77. Epub 2017 Jan 25. PMID: 28337417; PMCID: PMC5359634.
27. Krebs, Aage. (2009). Expansion of the Midpalatal Suture, Studied by Means of Metallic Implants. *Acta Odontologica Scandinavica.* 17. 491-501. 10.3109/00016355908993936.
28. Kartalian A, Gohl E, Adamian M, Enciso R. Cone-beam computerized tomography evaluation of the maxillary dentoskeletal complex after rapid palatal expansion. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2010 Oct;138(4):486-492. doi: 10.1016/j.ajodo.2008.10.025. PMID: 20889055.

29. Liu S, Xu T, Zou W. Effects of rapid maxillary expansion on the midpalatal suture: a systematic review. *Eur J Orthod*. 2015 Dec;37(6):651-5. doi: 10.1093/ejo/cju100. Epub 2015 Feb 19. PMID: 25700989.
30. Brunetto DP, Sant'Anna EF, Machado AW, Moon W. Non-surgical treatment of transverse deficiency in adults using Microimplant-assisted Rapid Palatal Expansion (MARPE). *Dental Press J Orthod*. 2017 Feb;22(1):110-125. doi: 10.1590/2177-6709.22.1.110-125.sar. PMID: 28444019; PMCID: PMC5398849.
31. Chrcanovic BR, Custódio AL. Orthodontic or surgically assisted rapid maxillary expansion. *Oral Maxillofac Surg*. 2009 Sep;13(3):123-37. doi: 10.1007/s10006-009-0161-9. PMID: 19590910.
32. Handelman C. Palatal expansion in adults: the nonsurgical approach. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2011 Oct;140(4):462, 464, 466 passim. doi: 10.1016/j.ajodo.2011.07.002. PMID: 21967931.
33. Laudemann K, Petruchin O, Nafzger M, Ballon A, Kopp S, Sader RA, Landes CA. Long-term 3D cast model study: bone-borne vs. tooth-borne surgically assisted rapid maxillary expansion due to secondary variables. *Oral Maxillofac Surg*. 2010 Jun;14(2):105-14. doi: 10.1007/s10006-009-0194-0. PMID: 20108107.
34. Wertz RA. Skeletal and dental changes accompanying rapid midpalatal suture opening. *Am J Orthod*. 1970 Jul;58(1):41-66. doi: 10.1016/0002-9416(70)90127-2. PMID: 5269181.
35. Baccetti T, Franchi L, McNamara Jr, JA. The Cervical Vertebral Maturation (CVM) Method for the Assessment of Optimal Treatment Timing in Dentofacial Orthopedics. *Semin Orthod*. 2005 Sep;11(3):119-129.
36. da Silva Filho OG, Lara TS, de Almeida AM, da Silav HC. Evaluation of the midpalatal suture during rapid palatal expansion in children: a CT study. *J Clin Pediatr Dent*. 2005 Spring;29(3):231-8. doi: 10.17796/jcpd.29.3.kvu17822u2056508. PMID: 15926440.
37. Choi SH, Shi KK, Cha JY, Park YC, Lee KJ. Nonsurgical miniscrew-assisted rapid maxillary expansion results in acceptable stability in young adults. *Angle Orthod*. 2016 Sep;86(5):713-20. doi: 10.2319/101415-689.1. Epub 2016 Mar 3. PMID: 26938955; PMCID: PMC8600851.

38. Chung CH, Font B. Skeletal and dental changes in the sagittal, vertical, and transverse dimensions after rapid palatal expansion. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2004 Nov;126(5):569-75. doi: 10.1016/j.ajodo.2003.10.035. PMID: 15520689.
39. Gungor AY, Türkkahraman H, Baykul T, Alkis H. Comparison of the effects of rapid maxillary expansion and surgically assisted rapid maxillary expansion in the sagittal, vertical, and transverse planes. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal.* 2012 Mar 1;17(2):e311-9. doi: 10.4317/medoral.17389. PMID: 22143686; PMCID: PMC3448316.
40. Haas AJ. Palatal expansion: just the beginning of dentofacial orthopedics. *Am J Orthod.* 1970 Mar;57(3):219-55. doi: 10.1016/0002-9416(70)90241-1. PMID: 5263785.
41. Bishara SE, Staley RN. Maxillary expansion: clinical implications. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1987 Jan;91(1):3-14. doi: 10.1016/0889-5406(87)90202-2. PMID: 3541577.
42. Lee SC, Park JH, Bayome M, Kim KB, Araujo EA, Kook YA. Effect of bone-borne rapid maxillary expanders with and without surgical assistance on the craniofacial structures using finite element analysis. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2014 May;145(5):638-48. doi: 10.1016/j.ajodo.2013.12.029. PMID: 24785928.
43. Davidovitch M, Efstathiou S, Sarne O, Vardimon AD. Skeletal and dental response to rapid maxillary expansion with 2- versus 4-band appliances. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2005 Apr;127(4):483-92. doi: 10.1016/j.ajodo.2004.01.021. PMID: 15821693.
44. Inoue N, Oyama K, Ishiguro K, Azuma M, Ozaki T. Radiographic observation of rapid expansion of human maxilla. *Bull Tokyo Med Dent Univ.* 1970 Sep;17(3):249-61. PMID: 5273199.
45. Hino CT, Pereira MD, Sobral CS, Kreniski TM, Ferreira LM. Transverse effects of surgically assisted rapid maxillary expansion: a comparative study using Haas and Hyrax. *J Craniofac Surg.* 2008 May;19(3):718-25. doi: 10.1097/SCS.0b013e31816aaa91. PMID: 18520389.
46. Isaacson RJ, Ingram AH. Forces produced by rapid maxillary expansion, II. Forces present during treatment. *Angle Orthod.* 1964;34:261-270.

47. Işeri H, Ozsoy S. Semirapid maxillary expansion--a study of long-term transverse effects in older adolescents and adults. *Angle Orthod.* 2004 Feb;74(1):71-8. doi: 10.1043/0003-3219(2004)074<0071:SMESOL>2.0.CO;2. PMID: 15038493.
48. Schimming R, Feller KU, Herzmann K, Eckelt U. Surgical and orthodontic rapid palatal expansion in adults using Glassman's technique: retrospective study. *Br J Oral Maxillofac Surg.* 2000 Feb;38(1):66-9. doi: 10.1054/bjom.1999.0274. PMID: 10783452.
49. Strömberg C, Holm J. Surgically assisted, rapid maxillary expansion in adults. A retrospective long-term follow-up study. *J Craniomaxillofac Surg.* 1995 Aug;23(4):222-7. doi: 10.1016/s1010-5182(05)80211-2. PMID: 7560107.
50. Angelieri F, Cevidanes LH, Franchi L, Gonçalves JR, Benavides E, McNamara JA Jr. Midpalatal suture maturation: classification method for individual assessment before rapid maxillary expansion. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2013 Nov;144(5):759-69. doi: 10.1016/j.ajodo.2013.04.022. PMID: 24182592; PMCID: PMC4185298.
51. Abo Samra D, Hadad R. Midpalatal suture: evaluation of the morphological maturation stages via bone density. *Prog Orthod.* 2018 Aug 13;19(1):29. doi: 10.1186/s40510-018-0232-2. PMID: 30101400; PMCID: PMC6087705.
52. Wehrbein H, Yildizhan F. The mid-palatal suture in young adults. A radiological-histological investigation. *Eur J Orthod.* 2001 Apr;23(2):105-14. doi: 10.1093/ejo/23.2.105. PMID: 11398548.
53. Grünheid T, Larson CE, Larson BE. Midpalatal suture density ratio: A novel predictor of skeletal response to rapid maxillary expansion. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2017 Feb;151(2):267-276. doi: 10.1016/j.ajodo.2016.06.043. PMID: 28153155.
54. McNamara JA Jr, Franchi L. The cervical vertebral maturation method: A user's guide. *Angle Orthod.* 2018 Mar;88(2):133-143. doi: 10.2319/111517-787.1. Epub 2018 Jan 16. PMID: 29337631; PMCID: PMC8312535.
55. Angelieri F, Franchi L, Cevidanes LH, McNamara JA Jr. Diagnostic performance of skeletal maturity for the assessment of midpalatal suture maturation. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2015 Dec;148(6):1010-6. doi: 10.1016/j.ajodo.2015.06.016. PMID: 26672707.

56. Kwak KH, Kim SS, Kim YI, Kim YD. Quantitative evaluation of midpalatal suture maturation via fractal analysis. *Korean J Orthod.* 2016 Sep;46(5):323-30. doi: 10.4041/kjod.2016.46.5.323. Epub 2016 Sep 19. PMID: 27668195; PMCID: PMC5033771.
57. Ghergu Jianu A, Chaqués-Asensi J, Llamas Carreras JM, Perillo L. Nonsurgical maxillary expansion in adults: report on clinical cases using the Hyrax expander. *Minerva Stomatol.* 2019 Apr;68(2):95-103. doi: 10.23736/S0026-4970.19.04178-5. PMID: 30854840.
58. Contar CM, Muller PR, Brunetto AR, Machado MA, Rappoport A. Surgical treatment of maxillary transverse deficiency: retrospective study of 14 patients. *J Maxillofac Oral Surg.* 2009 Sep;8(3):249-53. doi: 10.1007/s12663-009-0061-4. Epub 2009 Nov 21. PMID: 23139519; PMCID: PMC3454243.
59. Gerlach KL, Zahl C. Transversal palatal expansion using a palatal distractor. *J Orofac Orthop.* 2003 Nov;64(6):443-9. English, German. doi: 10.1007/s00056-003-0241-7. PMID: 14628136.
60. Harzer W, Schneider M, Gedrange T. Rapid maxillary expansion with palatal anchorage of the hyrax expansion screw--pilot study with case presentation. *J Orofac Orthop.* 2004 Sep;65(5):419-24. English, German. doi: 10.1007/s00056-004-0346-7. PMID: 15378196.
61. Sokucu O, Kosger HH, Bicakci AA, Babacan H. Stability in dental changes in RME and SARME: a 2-year follow-up. *Angle Orthod.* 2009 Mar;79(2):207-13. doi: 10.2319/031808-155.1. PMID: 19216605.
62. Willershausen I, Erbe C, Al-Maawi S, Orlowska A, Wehrbein H, Ghanaati S. Development of a novel histological and histomorphometric evaluation protocol for a standardized description of the mid-palatal suture - An ex vivo study. *J Anat.* 2019 Jul;235(1):180-188. doi: 10.1111/joa.12985. Epub 2019 Apr 4. PMID: 30945289; PMCID: PMC6580068.
63. Stuart DA, Wiltshire WA. Rapid palatal expansion in the young adult: time for a paradigm shift? *J Can Dent Assoc.* 2003 Jun;69(6):374-7. PMID: 12787474.
64. Northway WM, Meade JB Jr. Surgically assisted rapid maxillary expansion: a comparison of technique, response, and stability. *Angle Orthod.* 1997;67(4):309-20. doi: 10.1043/0003-3219(1997)067<0309:SARMEA>2.3.CO;2. PMID: 9267580.

65. Pereira MD, Koga AF, Prado GPR, Ferreira LM. Complications From Surgically Assisted Rapid Maxillary Expansion With HAAS and HYRAX Expanders. *J Craniofac Surg*. 2018 Mar;29(2):275-278. doi: 10.1097/SCS.0000000000004079. PMID: 29077680.
66. Kapetanović A, Odrosslij BMMJ, Baan F, Bergé SJ, Noverraz RRM, Schols JGJH, Xi T. Efficacy of Miniscrew-Assisted Rapid Palatal Expansion (MARPE) in late adolescents and adults with the Dutch Maxillary Expansion Device: a prospective clinical cohort study. *Clin Oral Investig*. 2022 Oct;26(10):6253-6263. doi: 10.1007/s00784-022-04577-9. Epub 2022 Jun 22. PMID: 35731323; PMCID: PMC9525423.
67. <https://www.bfs.de/SharedDocs/FAQs/BfS/DE/ion/ion/alara.html> [Internet]. Bundesamt für Strahlenschutz.
68. Kapetanović A, Noverraz RRM, Listl S, Bergé SJ, Xi T, Schols JGJH. What is the Oral Health-related Quality of Life following Miniscrew-Assisted Rapid Palatal Expansion (MARPE)? A prospective clinical cohort study. *BMC Oral Health*. 2022 Sep 22;22(1):423. doi: 10.1186/s12903-022-02444-3. PMID: 36138473; PMCID: PMC9502924.
69. Mommaerts MY. Transpalatal distraction as a method of maxillary expansion. *Br J Oral Maxillofac Surg*. 1999 Aug;37(4):268-72. doi: 10.1054/bjom.1999.0127. PMID: 10475647.
70. Alpern MC, Yurosko JJ. Rapid palatal expansion in adults with and without surgery. *Angle Orthod*. 1987 Jul;57(3):245-63. doi: 10.1043/0003-3219(1987)057<0245:RPEIA>2.0.CO;2. PMID: 3310747.

## **8 Danksagung**

An erster Stelle möchte ich mich sehr herzlich bei meiner Doktormutter, Frau \_\_\_\_\_, für die Bereitstellung des Themas und die permanente projektbezogene, als auch berufliche Unterstützung bedanken.

Ein besonderer Dank gehört auch meinen Eltern, die mich stets bei all meinen Vorhaben und insbesondere während der Anfertigung dieser Arbeit liebevoll und vielseitig unterstützt haben.

Nicht zuletzt gilt mein Dank allen Freunden, Verwandten und Kollegen, die mich beim Verfassen dieser Arbeit unterstützt haben.

## **9 Tabellarischer Lebenslauf**