

Aus der
Universitätsklinik für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
Poliklinik für Kieferorthopädie

**Retrospektive kieferorthopädisch kephalometrische
Auswertung anonymisierter Patientendaten zur Beurteilung
der Veränderungen der skelettalen Parameter bei Patienten
unter Alignertherapie mit Funktionselementen**

**Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Zahnmedizin**

**der Medizinischen Fakultät
der Eberhard Karls Universität
zu Tübingen**

**vorgelegt von
Edelmann, Fabienne**

2026

Dekanin: Professorin Dr. S. Y. Brucker

1. Berichterstatter: Professor Dr. B. Koos

2. Berichterstatter: Privatdozent Dr. A. ElAyouti

Tag der Disputation: 19.10.2026

Meiner Mutter in Dankbarkeit

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	VI
Abbildungsverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	XI
1 Einleitung	1
1.1 Eugnathie und Dysgnathie	1
1.2 Skelettale und dentale Klasse II	3
1.3 Fernröntgenseitenaufnahme in der Kieferorthopädie	5
1.4 Funktionskieferorthopädie	7
1.4.1 Norwegisches System nach Andresen und Häupl	7
1.4.2 Aligner mit Funktionselementen	10
1.5 Ziel der Studie	12
2 Material und Methoden	14
2.1 Patienten	14
2.2 Studienaufbau	15
2.3 Planung der Aligner mit Funktionselementen	16
2.4 Kephalemtrische Analyse	20
2.4.1 Kephalemtrische Analyse	20
2.4.2 Kephalemtrische Referenzpunkte	20
2.4.3 Kephalemtrische Referenzlinien	23
2.4.4 Kephalemtrische Referenzwinkel	26
2.4.5 Kephalemtrische Referenzstrecken	29
2.4.6 Datenerhebung und Datenverarbeitung	31
2.4.7 Allgemeine Statistik	31
2.5 Ethikvotum	32
3 Ergebnisse	33
3.1 Patienten	33
3.2 Analyse der Fernröntgenseitenbilder	40
3.2.1 Sagittale Veränderungen	40

3.2.2	Vertikale Veränderungen	50
3.2.3	Dentale Veränderungen	57
3.2.4	Weichteilveränderungen	61
4	Diskussion.....	65
4.1	Patienten.....	65
4.2	Methodische Aspekte.....	68
4.3	Ergebnisse	69
4.3.1	Sagittale Aspekte	69
4.3.2	Vertikale Aspekte	72
4.3.3	Dentale Aspekte.....	74
4.3.4	Weichgewebige Aspekte.....	77
4.4	Schlussfolgerungen.....	79
5	Zusammenfassung	83
6	Literaturverzeichnis.....	85
7	Erklärung zum Eigenanteil.....	94
8	Veröffentlichung	95
9	Danksagung	96

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kephalometrische Referenzpunkte der FRS Analyse	20
Tabelle 2: Horizontale Referenzlinien	23
Tabelle 3: Vertikale Referenzlinien	24
Tabelle 4: Kephalometrische Hilfslinien	25
Tabelle 5: Patientenalter vor funktionskieferorthopädischer Therapie mittels Alignern mit Funktionselementen (T1) und nach funktionskieferorthopädischer Therapie mittels Alignern mit Funktionselementen (T2)	38
Tabelle 6: Darstellung des Mittelwertes (MW) und der Standardabweichung (SD) des Winkels SNA zum Zeitpunkt T1 und T2; Veränderungen des Winkels SNA (T2-T1)	41
Tabelle 7: Darstellung des Mittelwertes (MW) und der Standardabweichung (SD) des Winkels SNB zum Zeitpunkt T1 und T2; Veränderungen des Winkels SNA (T2-T1)	41
Tabelle 8: Darstellung des Mittelwertes (MW) und der Standardabweichung (SD) des Winkels ANB zum Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen des Winkels ANB (T2-T1)	42
Tabelle 9: Veränderung des ANB Winkels unterteilt nach männlichen (m) und weiblichen (w) Patienten	43
Tabelle 10: Veränderung des ANB Winkels unterteilt nach altersspezifischen Gruppen (Gruppe 1: $\leq 12,5$ Jahre, Gruppe 2: $> 12,5$ Jahre)	44
Tabelle 11: Darstellung des Mittelwertes (MW) und der Standardabweichung (SD) des Winkels SnPg zum Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen des Winkels SnPg (T2-T1).....	47
Tabelle 12: Darstellung der Anteile der verschiedenen skelettale Klassen (I, II, III) zu den Zeitpunkten T1 und T2	49
Tabelle 13: individualisierte skelettale Klassen (I, II, III) zum Zeitpunkt T1 und T2	49
Tabelle 14: Darstellung der Mediane und der Perzentile des Winkels NSBa zum Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen des Winkels NSBa (T2-T1)	51

Tabelle 15: Darstellung der Mediane und der Perzentile des Winkels GnGoAr zum Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen des Winkels GnGoAr (T2-T1)	51
Tabelle 16: Darstellung des Mittelwertes (MW) und der Standardabweichung (SD) des Winkels NL-NSL zum Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen des Winkels NL-NSL (T2-T1).....	52
Tabelle 17: Darstellung des Mittelwertes (MW) und der Standardabweichung (SD) des Winkels ML-NSL zum Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen des Winkels ML-NSL (T2-T1)	53
Tabelle 18: Darstellung des Mittelwertes (MW) und der Standardabweichung (SD) des Winkels ML-NL zum Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen des Winkels ML-NL (T2-T1).....	53
Tabelle 19: Darstellung der Mediane und der Perzentile der Strecke N-Sp' zum Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen der Strecke N-Sp' (T2-T1).....	54
Tabelle 20: Darstellung der Mediane und der Perzentile der Strecke Sp'-Gn zum Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen der Strecke Sp'-Gn (T2-T1)	55
Tabelle 21: Darstellung des Mittelwertes (MW) und der Standardabweichung (SD) des Index zum Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen des Index (T2-T1).....	55
Tabelle 22: prozentuale Anteile der Indizes (N, O, T) zu den Zeitpunkten T1 und T2	56
Tabelle 23: Darstellung des Mittelwertes (MW) und der Standardabweichung (SD) des Interinzisalwinkels zum Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen des Interinzisalwinkels (T2-T1)	58
Tabelle 24: Darstellung des Mittelwertes (MW) und der Standardabweichung (SD) des Winkels OK1-NA zum Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen des Winkels OK1-NA (T2-T1)	58
Tabelle 25: Darstellung des Mittelwertes (MW) und der Standardabweichung (SD) des Winkels UK1-NB zum Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen des Winkels UK1-NB (T2-T1)	59

Tabelle 26: Darstellung des Mittelwertes (MW) und der Standardabweichung (SD) der Strecke OK1-NA zum Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen der Strecke OK1-NA (T2-T1)	60
Tabelle 27: Darstellung des Mittelwertes (MW) und der Standardabweichung (SD) der Strecke UK1-NB zum Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen der Strecke UK1-NB (T2-T1)	60
Tabelle 28: Darstellung des Mittelwertes (MW) und der Standardabweichung (SD) der Strecke Pg-NB zum Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen der Strecke Pg-NB (T2-T1).....	61
Tabelle 29: Darstellung des Mittelwertes (MW) und der Standardabweichung (SD) des Holdaway Winkels Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen des Holdaway Winkels (T2-T1).....	62
Tabelle 30: Darstellung der Mediane und der Perzentile des Nasolabialwinkels zum Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen des Nasolabialwinkels (T2-T1)	62
Tabelle 31: Darstellung des Mittelwertes (MW) und der Standardabweichung (SD) des Nordervalwinkels Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen des Nordervalwinkels (T2-T1)	63

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung eines lateralen Fernröntgenseitenbildes	6
Abbildung 2: Aligner mit Funktionselementen in rechts- und linkslateraler Ansicht; hier konkret dargestellt Aligner des Herstellers Invisalign® mit optimierten Precision Wings	10
Abbildung 3: Aligner mit Funktionselementen in okklusaler Aufsicht (links: Oberkiefer, rechts: Unterkiefer), hier konkret dargestellt Aligner des Herstellers Invisalign® mit optimierten Precision Wings.....	10
Abbildung 4: Kreisdiagramm zur Darstellung der Geschlechterverteilung der Probanden (w = 44%; m = 56%)	14
Abbildung 5: Auszug aus der digitalen Planung der mandibulären Protrusion (MA) als Screenshot (Invisalign®, Align Technology Inc., Stand 09.06.2026)..	17
Abbildung 6: Optimierte precision Wings in der digitalen Planungssoftware (hier konkret dargestellt Aligner von Invisalign®, Align Technologc Inc., mit optimierten Precision Wings) Wings)	17
Abbildung 7: Darstellung der Kantenposition der Frontzähne (frontale Kopfbissstellung).....	18
Abbildung 8: Darstellung des Workflows	19
Abbildung 9: Visualisierung der kephalometrischen Referenzpunkte im FRS	22
Abbildung 10: Visualisierung der horizontalen Referenzlinien	23
Abbildung 11: Visualisierung der vertikale Referenzlinien	24
Abbildung 12: Visualisierung der kephalometrischen Hilfslinien	25
Abbildung 13: Boxplot zur Darstellung des Patientenalters zu Therapiebeginn (T1) (MW = 12,7 Jahre, SD = 1,8 Jahre)	33
Abbildung 14: Histogramm zur Darstellung der Häufigkeitsverteilung des Patientenalters zu Therapiebeginn (Zeitpunkt T1; in Jahren; MW = 12,7 Jahre, SD = 1,8, n = 43).....	34
Abbildung 15: Boxplot zur Darstellung der durchschnittliche Therapiedauer in Monaten (MW = 10,6 Monate, SD = 4,5 Monate).....	35
Abbildung 16: Boxplot zur Darstellung des Patientenalters zu Therapieende (T2) (MW = 13,6 Jahre, SD = 1,9 Jahre).....	36

Abbildung 17: Histogramm zur Darstellung der Häufigkeitsverteilung des Patientenalters zu Therapieende (Zeitpunkt T2; in Jahren; MW = 13,6 Jahre, SD = 1,9, n = 43).....	37
Abbildung 18: Histogramm zur Darstellung der Häufigkeitsverteilung des Alters der männlichen Probanden zu Therapiebeginn (T1; Alter in Jahren; MW = 12,7 Jahre, SD = 2,0 Jahre, n = 24)	39
Abbildung 19: Histogramm zur Darstellung der Häufigkeitsverteilung des Alters der weiblichen Probandinnen zu Therapiebeginn (T1; Alter in Jahren; MW = 12,7 Jahre, SD = 1,5 Jahre, n = 19)	40
Abbildung 20: Boxplot zur Darstellung der geschlechterspezifischen Veränderungen des ANB Winkels (m = männlich bei n= 24, w = weiblich bei n = 19)	43
Abbildung 21: Histogramm zur Darstellung der Verteilung der ANB Differenzen in der Altersgruppe $\leq 12,5$ Jahre (MW = $-2,2^\circ$, SD = $1,0^\circ$, n = 21)	45
Abbildung 22: Histogramm zur Darstellung der Verteilung der ANB Differenzen in der Altersgruppe $> 12,5$ Jahre (MW = $-2,3^\circ$, SD = $1,0^\circ$, n = 22)	46
Abbildung 23: Boxplot zur Darstellung der geschlechter- und altersspezifischen Veränderungen des ANB Winkels	47
Abbildung 24: Kreisdiagramm zur Darstellung der Anteile der skelettalen Klassen vor funktionskieferorthopädischer Therapie (Zeitpunkt T1).....	48
Abbildung 25: Kreisdiagramm zur Darstellung der Anteile der skelettalen Klassen nach funktionskieferorthopädischer Therapie (Zeitpunkt T2).....	48
Abbildung 26: Kreisdiagramm zur Darstellung der Verteilung der individualisierten skelettalen Klassen zum Zeitpunkt T1	49
Abbildung 27: Kreisdiagramm zur Darstellung der Verteilung der individualisierten skelettalen Klassen zum Zeitpunkt T2	50
Abbildung 28: Balkendiagramm zur Darstellung der Veränderung der Anteile der Indizes N, O und T zu den Zeitpunkten T1 und T2.....	57
Abbildung 29: eigene Darstellung der pubertären Wachstumskurven von Mädchen und Jungen. Die y-Achse stellt das Längenwachstum in cm pro Jahr dar, auf der x-Achse ist das Lebensalter in Jahren aufgetragen	65

Abkürzungsverzeichnis

Abb. Abbildung

bzw. beziehungsweise

ca. circa

et al. et alii (lat.) und andere

FKO Funktionskieferorthopädie

FRS Fernröntgenseitenaufnahme

gr. griechisch

m männlich

MA mandibular Advancement

mm Millimeter

MP mandibuläre Protrusion

MW Mittelwert

OK Oberkiefer

SD Standardabweichung

sog. sogenannt

UK Unterkiefer

w weiblich

1 Einleitung

1.1 Eugnathie und Dysgnathie

Die Eugnathie und Dysgnathie sind pathogenetische medizinische Termini zur Beschreibung der Kieferlagebeziehungen. Sie setzen sich aus dem altgriechischen Wort „gnathos“ (Kiefer) und den jeweils vorangestellten Präfixen „eu“ (gut) beziehungsweise „dys“ (schlecht) zusammen.

Die Eugnathie beschreibt die morphologische und funktionell harmonische Beziehung von Ober- und Unterkiefer zueinander. Als Dysgnathie werden alle angeborenen oder erworbenen Abweichungen von dieser regelrechten Form bezeichnet. Diese Abgrenzung bezieht sich sowohl auf die Kieferlage, als auch auf Abweichungen im Bereich der Okklusion (Schopf, 2008). Eine physiologische Okklusion ist nach Andrews definiert als eine ideale, funktionsfähige und gleichbleibende Zahnstellung, bei der die Molarenbeziehung, die Kronenangulation und -inklination, die Rotationsfreiheit von Einzelzähnen, stramme Zahnkontakte und eine physiologische Spee-Kurve beschrieben werden (Andrews, 1972).

Die Entstehung einer Dysgnathie ist multifaktoriell bedingt durch endogene und exogene Einflüsse. Genetische Faktoren, Umwelteinflüsse und Habits können untereinander synergisch oder abschwächend wirken und resultieren somit in einem patientenindividuellen Phänotypen (Mossey, 1999a). Damit kann eine Familienanamnese zwar Hinweise auf das genetische Risiko und Potential einer Dysgnathie geben, erlaubt aber keine exakte Vorhersage des Phänotyps (Stein et al., 1956). Eine genaue Differenzierung in genetische Faktoren und Umwelteinflüsse stellt sich als sehr schwierig dar. Setzt sich eine Dysgnathie aus mehr Umwelteinflüssen als hereditären Faktoren zusammen, so ist diese kieferorthopädisch tendenziell besser zu therapieren. Überwiegt hingegen die Heredität, so setzt die Progredienz der Anomalie der kieferorthopädischen Therapie und ihren Möglichkeiten Grenzen (Mossey, 1999b).

Angaben über die weltweite Prävalenz von Dysgnathien variieren in der Literatur stark und sind mit Werten von 56 % (Lombardo et al., 2020) bis hin zu 60 - 80 % (Schopf, 2008) beschrieben. Die Prävalenz in Europa liegt bei ca. 72 %, was nach Afrika (81 %) den zweithöchsten Wert darstellt (Lombardo et al., 2020). Bereits im Milchgebiss liegen bei 30-50 % der Kinder Dysgnathien vor (Rakosi, 1969). 30 % der Kinder zwischen vier und sechs Jahren weisen bereits skelettale Manifestationen ihrer Habits auf (Hinz et al., 1989). Auch Wichelhaus zeigte, dass ein Lutschhabit über das fünfte Lebensjahr hinaus zu einer skelettalen Manifestation führen kann (Sander & Wichelhaus, 1995). Werden exogene Faktor im Sinne von Habits aber bis zum Alter von vier bis fünf Jahren abgestellt, besteht eine realistische Chance auf eine physiologische weitere Kieferentwicklung (Schopf, 2008). Den größten Anteil der Dysgnathien in Europa machen Klasse II Anomalien aus. Bei ca. 32 % der Kinder im Wechselgebiss und ca. 23 % der Erwachsenen liegt eine Angle Klasse II Verzahnung vor (Alhammadi et al., 2018). Corruccini zeigte bereits 1984, dass die Häufigkeit von dentalen und skelettalen Klasse II Anomalien im letzten Jahrhundert deutlich angestiegen ist und führte dies auf eine moderne und industrialisierte Lebensweise zurück (Corruccini, 1984). In Deutschland zeigt eine longitudinale Querschnittsstudie von Kinzinger et al., dass die Klasse II Anomalie bei unter 18-Jährigen die häufigste Behandlungsindikation darstellt (Kinzinger et al., 2026).

Nicht alle klinischen Befunde, die von beschriebener eugnather Form abweichen, sind kieferorthopädisch behandlungsbedürftig. Kelsing beschreibt bereits 1945, dass sich eine Unterkiefrücklage bei Vorschulkindern in vielen Fällen auf natürliche Weise korrigieren wird, bei anderen ist die Beseitigung eines Habits für die weitere physiologische Entwicklung erforderlich, und wiederum andere benötigen eine funktionskieferorthopädische Therapie zur Korrektur einer Dysgnathie um eine physiologische Funktion des stomatognathen Systems zu ermöglichen (Kelsing, 1945). Brook und Shaw entwickelten 1989 einen Index zur Beurteilung der Behandlungsbedürftigkeit kieferorthopädischer Anomalien. Dieser besteht aus einer ästhetischen und einer morphologischen Komponente, die die Schwere der Anomalie und die Bedeutung in Bezug auf die Mundgesundheit beurteilt (Brook & Shaw, 1989). Weitere Indizes beurteilen die

Schwere einer vorliegenden Anomalie mithilfe der Größe der sagittalen Frontzahnstufe, der Molarenrelation und dem Vorliegen von Engständen und Kreuzbissen (Ingervall & Ronnerman, 1975; Richmond et al., 1992).

In Deutschland wurden im Jahr 2002 die sogenannten „Kieferorthopädischen Indikationsgruppen“ (KIG) eingeführt. Hierbei muss erwähnt werden, dass eine kieferorthopädische Indikationsgruppe nicht gleichgesetzt werden kann mit einer medizinischen Indikation zur kieferorthopädischen Behandlung. Die Indikationsgruppen stellen lediglich eine Orientierung zur morphologischen Einordnung der Anomalien dar und definieren darüber hinaus die Erstattungsfähigkeit kieferorthopädischer Behandlungen im Rahmen der gesetzlichen Krankenversicherung. Die Indikationsgruppe „D“ bezieht sich hierbei auf eine vergrößerte sagittale Frontzahnstufe. Kinzinger et al. untersuchten in einer mehrteiligen Querschnittsstudie über einen Zeitraum von 20 Jahren (2002-2021) die Häufigkeiten der verschiedenen behandlungsauslösenden Indikationen, wobei die Einstufung D4 mit einem vergrößerten Overjet von >6 mm, was in den meisten Fällen mit einer skelettale Klasse II Dysgnathie assoziiert ist, in allen Altersklassen die häufigste Behandlungsindikation darstellte (Kinzinger et al., 2025).

1.2 Skelettale und dentale Klasse II

Edward H. Angle führte 1899 die „Classification of Malocclusion“ für die systematische Klassifikation von sagittalen dentoalveolären Anomalien ein (Angle, 1899). Hierbei wird die Relation der Sechsjahrmolaren zueinander betrachtet. Angle unterscheidet drei verschiedene Klassen:

- Angle Klasse I
- Angle Klasse II
- Angle Klasse III

Bei der Angle Klasse I beißt der mesiobukkale Höcker des oberen Sechsjahrmolaren in die bukkale Querrissur des unteren Sechsjahrmolaren. Eine Angle Klasse II Verzahnung liegt dann vor, wenn der mesiobukkale Höcker des

oberen ersten Molaren mesial der bukkalen Querfissur des unteren ersten Molaren steht. Die Klasse II unterteilt Angle weiter in eine Angle Klasse II/1 und II/2. Bei der Angle Klasse II/1 stehen die Oberkiefer Frontzähne prokliniert, bei einer Angle Klasse II/2 retroinkliniert. Bei einer Angle Klasse III Verzahnung steht der mesiobukale Höcker des Oberkiefer Sechsjahrmolaren distal der bukkalen Querfissur des Unterkiefer Sechsjahrmolaren (Angle, 1899).

Diese dentoalveolären Einteilungen sind oft assoziiert mit den entsprechenden skelettalen Dysgnathien, können aber auch voneinander losgelöst auftreten. Die Unterteilung in die skelettalen Klassen I, II und III beschreibt die sagittale Relation der knöchernen Ober- und Unterkieferbasen zueinander. Die skelettale Klasse I beschreibt eine orthognathe Kieferbasenrelation von Ober- zu Unterkiefer. Die skelettale Klasse II beschreibt eine retrognathe Mandibula oder prognathe Maxilla. Die skelettale Klasse III ist definiert durch eine prognathe Mandibula oder retrognathe Maxilla, wobei bei allen skelettalen Klassen auch Mischformen auftreten können (Schopf, 2008).

Die skelettale Klasse II beschreibt die sagittale Dysgnathie von Maxilla zu Mandibula, wobei beide Kiefer hierfür ursächlich sein können. Liegt der Oberkiefer in Relation zu weit anterior, spricht man von einer maxillären Prognathie, liegt der Unterkiefer in Relation zu weit posterior, spricht man von einer mandibulären Retrognathie. Es können auch Mischformen im Sinne einer maxillären Prognathie und mandibulären Retrognathie auftreten.

Die Ätiologie einer skelettalen und dentalen Klasse II Anomalie ist multifaktoriell und patientenindividuell vielseitig und kann durch eine Interaktion endogener und exogener Faktoren entstehen (Hirani et al., 2025). Neben genetischen Einflüssen (George et al., 2021) spielen auch exogene Faktoren wie funktionelle Störungen, ein zu schmaler Oberkiefer und Habits wie Daumenlutschen eine große Rolle (Severino et al., 2025), wobei Padure et al. das Daumenlutschen als klaren Wachstumsanreiz für den Oberkiefer und Wachstumshemmung des Unterkiefers mit daraus resultierender Klasse II Dysgnathie beschreibt (Padure et al., 2012). Liegt bereits im Milchgebiss eine distale Postlaktalstufe vor, so entsteht daraus in 99 % der Fälle eine Angle Klasse II Verzahnung im Permanentgebiss (Bishara

et al., 1988). Während des Wachstums eines Kindes zum Erwachsenen kann es zu einer Abschwächung der skelettalen Klasse II kommen, die dentale Angle Klasse II persistiert jedoch in den meisten Fällen (Janson & Ingervall, 1982).

Die skelettale und dentale Klasse II Anomalie sind gekennzeichnet durch ein ästhetisch störendes Erscheinungsbild im Sinne eines fliehenden Kinns, einer aufgerollten und teilweise eingelagerten Unterlippe, eines Großnasenprofils oder einer Stupsnase, sowie funktionellen Einschränkungen und ein erhöhtes Risiko parodontaler Schädigungen (Geiger, 2001). Des Weiteren besteht ein erhöhtes Traumarisiko der Oberkiefer Schneidezähne (Borzabadi-Farahani et al., 2010). Arraj et al. beschreibt einen eindeutigen Zusammenhang zwischen einem vorliegenden vergrößerten Overjet und dem Auftreten von dentalen Frontzahntraumata, wobei ein vergrößerter Overjet von ≥ 3 mm in der frühen Wechselgebissphase bereits ein um ein vielfaches erhöhtes Risiko für ein Frontzahntrauma darstellt, in der zweiten Wechselgebissphase ein vergrößerter Overjet von über 5 mm (Arraj et al., 2019).

Rakosi beschrieb bereits 1966, dass eine frühe präventive kieferorthopädische Therapie im Milch- und frühen Wechselgebiss funktionell bedingte Fehlentwicklungen abmildern beziehungsweise verhindern kann. Grenzen und Limitationen sind hier aber vor allem bei hereditären skelettalen Klasse II Dysgnathien aufgrund der Progredienz der Anomalien gegeben (Rakosi, 1966).

1.3 Fernröntgenseitenaufnahme in der Kieferorthopädie

Bei der Fernröntgenseitenaufnahme in der Kieferorthopädie handelt es sich um eine zweidimensionale, laterale Röntgenaufnahme des Gesichtsschädels (**Abbildung 1**). Die erste seitliche Röntgenaufnahme des Schädels fertigte Pacini 1922 an (Perera, 1981). Den Grundstein für die Standardisierung der Fernröntgenseitenaufnahme für die kieferorthopädische Diagnostik mittels Kephalostat zur reproduzierbaren Kopfpositionierung legten Hofrath in Deutschland (Hofrath, 1931) und Broadbent in den USA (Broadbent, 1931) im Jahr 1931 zeitgleich unabhängig voneinander.

Die „Kephalometrie“ leitet sich von gr. kephale = Kopf und metron = Maß ab und beschäftigt sich mit der Vermessung der skelettalen und weichgewebigen Strukturen des Kopfes (Finlay, 1980).



Abbildung 1: Darstellung eines lateralen Fernröntgenseitenbildes

Abgebildet werden im Fernröntgenseitenbild neben dem Gesichtsschädel Anteile des Gehirnschädels, die Dentition des Ober- und Unterkiefers mitsamt der Alveolarfortsätze, die Kiefergelenke, die oberen Halswirbelkörper, sowie das Weichgewebsprofil. Des Weiteren kann ein erster Eindruck über die Zungenruhelage, die zweidimensionale Größe der Adenoide, die Belüftung der Stirn- und Kieferhöhlen, sowie der Ethmoidalzellen gewonnen werden.

Das Fernröntgenseitenbild stellt in der Kieferorthopädie eine essentielle, unverzichtbare diagnostische Grundlage dar (Moorrees, 1991). Ziel der Aufnahme und derer kephalometrischen Analyse ist es, Aussagen zur Morphologie des Gesichtsschädels, den sagittalen und vertikalen Relationen der Kieferbasen, den Frontzahnpositionen und -inklinationen, zum Weichgewebsprofil, sowie eine Prognose im Bezug auf das Gesichtsschädelwachstum treffen zu können. Mithilfe der gewonnenen Informationen kann, in Kombination mit der weiteren kieferorthopädischen

Diagnostik, eine fundierte Diagnosestellung zu eugnathen oder dysgnathen Kieferbasenverhältnissen, aber auch in Bezug auf die Differenzierung zwischen skelettalen und dentoalveolären Anomalien getroffen werden.

Eine genaue Diagnostik ermöglicht eine patientenindividuelle Therapieplanung, die mithilfe der kephalometrischen Analyse auch die prognostische Entwicklung des Gesichtsschädels berücksichtigt (Segner, 1989). So können die Möglichkeiten einer kieferorthopädischen Therapie, aber auch die Limitationen und Grenzen ausgelotet werden und rein kieferorthopädisch therapierbare Fälle von kombiniert kieferorthopädisch kieferchirurgisch notwendigen Vorgehensweisen abgegrenzt werden. Diese patientenindividuelle Diagnostik und Therapieplanung, unter Berücksichtigung fließender Normen, führt zu einem patientenspezifischen, individuellen und harmonischen Erscheinungsbild (Franchi et al., 1998).

1.4 Funktionskieferorthopädie

1.4.1 Norwegisches System nach Andresen und Häupl

Bis Anfang des 20. Jahrhunderts war Stand der Wissenschaft, dass die genetischen Faktoren einer skelettalen Dysgnathie so stark und muskuläre Muster unveränderbar seien, dass echte skelettale Veränderungen durch eine kieferorthopädische Therapie nur sehr schwer zu erreichen seien (Ricketts, 2000). Die Funktionskieferorthopädie wie wir sie heute kennen, entwickelte sich in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Andresen und Häupl erkannten, dass funktionelle Einflüsse einen entscheidenden Anreiz auf das Wachstum und die Entwicklung des stomatognathen Apparates darstellen (Andresen & Häupl, 1936).

Der Aktivator nach Andresen und Häupl stellte einen Meilenstein in der Geschichte der Funktionskieferorthopädie dar. Mittels eines Konstruktionsbisses wird der Unterkiefer durch den Aktivator in eine neue, nach anterior vorverlagerte Position gebracht. Der Aktivator nutzt passive Muskelkräfte und den Splinteffekt zur Etablierung einer neuen, therapeutisch veränderten Unterkieferposition

(Andresen & Häupl, 1936). Die Etablierung dieser neuen Unterkieferposition findet in zwei Etappen statt. In den ersten sechs Monaten findet eine muskuläre Anpassung statt und es etabliert sich ein neues neuromuskuläres Gleichgewicht. In dieser Phase konnte ein deutlich erhöhter Muskeltonus beim Tragen des funktionskieferorthopädischen Gerätes nachgewiesen werden (A. Schwarz, 1952). In der zweiten Phase von ca. sechs Monaten finden skelettale Anpassungsreaktionen statt (A. M. Schwarz, 1952). Der Kondylus bewegt sich aus der Fossa articularis nach anterior, wodurch es zu einer Stauchung des Musculus pterygoideus lateralis und infolge dessen zu einem geringeren Größenzuwachs dieses Muskels kommt (Petrovic et al., 1988). Fränkel relativiert die Rolle des Musculus pterygoideus lateralis als zentrales Element der Unterkieferverlagerung unter funktionskieferorthopädischer Therapie und schreibt vielmehr der gesamten orofazialen Muskulatur die tragende Rolle zu, ein neues orofaziales Gleichgewicht herzustellen (Fränkel & Fränkel, 1989).

Zeitweise resultiert die Verlagerung der Mandibula und des Kondylus nach anterior in einer Vergrößerung des interkondylären Abstandes (Yildirim et al., 2014). Dieser wird durch das kondyläre Wachstum in dorsokranialer Richtung im kondylären Knorpel wieder adaptiert (A. B. Rabie et al., 2003). Gleichzeitig kommt es durch die Anteriorverlagerung des Unterkiefers zu einer Knochenneubildung im posterioren Bereich der Fossa articularis (Rabie et al., 2001), wodurch ein Replacement des Unterkiefers nach anteriokaudal erzielt wird. Es etabliert sich ein neues neuromuskuläres Muster der Unterkiefer Positionierung, welches auch ohne eingesetzten Aktivator habituell eingenommen wird (Enlow, 1979).

Während das kondyläre Wachstum durch eine funktionskieferorthopädische Therapie im Rahmen des genetisch vorhandenen Potentials angeregt werden kann, ist das Wachstum des knöchernen Pogonions und damit die Ausprägung der Kinnprominenz davon losgelöst, sodass das Remodelling des knöchernen Kinns unabhängig von der Therapieform erfolgt (Versyck & Rakosi, 1989).

Zentrale Voraussetzung für die funktionskieferorthopädische Therapie ist das Vorliegen eines ausreichenden Wachstumspotentials des Patienten im Rahmen

des pubertären Wachstumsschubes. Das Wachstum des Unterkiefers verläuft nicht linear, sondern weist einen pubertären Wachstumsschub mit pubertärem Wachstumsmaximum im Alter von ca. zwölf Jahren und anschließend rasch abfallender Wachstumskurve auf (Bjork & Helm, 1967).

Die gegebenen Wachstumsschübe eines Patienten definieren den optimalen Therapiezeitpunkt. Funktionskieferorthopädische Apparaturen können das Wachstum im Rahmen des genetischen Potentials stimulieren und ausnutzen, genaue Vorhersagen über das Ergebnis der funktionskieferorthopädischen Therapie sind aber von vielen Faktoren wie z.B. der Compliance des Patienten abhängig und sind schwierig zu treffen (Korkhaus, 1948; Korkhaus, 1960; Moorrees, 1991).

Findet die funktionskieferorthopädische Therapie im optimalen Therapiebereich des pubertären Wachstumsschubes statt, so sind unter der funktionskieferorthopädischen Therapie mittels Aktivator vor allem skelettale Effekte im Sinne einer Unterkieferverlagerung und wenig unerwünschte dentoalveoläre Nebenwirkungen nachweisbar (Baccaglione et al., 2020).

Die funktionskieferorthopädische Therapie ist geprägt von Behandlungsapparaturen, die den Unterkiefer mittels Konstruktionsbiss nach ventral verlagern. Neben dem Aktivator nach Andresen und Häupl stehen viele weitere herausnehmbare und festsitzende Behandlungsgeräte, wie der Bionator nach Balters, der Funktionsregler nach Fränkel, der Twin Block oder diverse Formen des Herbst Hybrids zur Verfügung. Jedes einzelne Behandlungsgerät weist spezifische Vor- und Nachteile auf. Die wünschenswerte Möglichkeit einer parallelen sagittalen Nachentwicklung des Unterkiefers und der zeitgleichen Korrektur von Einzelzahnfehlstellungen ermöglicht die Therapie mittels Alignern mit Funktionselementen.

1.4.2 Aligner mit Funktionselementen

Neben der klassischen Funktionskieferorthopädie mittels herausnehmbarer Geräte ermöglicht die moderne Kieferorthopädie bei Patienten im Wachstum die Therapie einer sagittalen Klasse II Dysgnathie mittels Alignern mit Funktionselementen zur mandibulären Protrusion und sagittalen Nachentwicklung des Unterkiefers (**Abbildung 2, Abbildung 3**).



Abbildung 2: Aligner mit Funktionselementen in rechts- und linkslateraler Ansicht; hier konkret dargestellt Aligner des Herstellers Invisalign® mit optimierten Precision Wings



Abbildung 3: Aligner mit Funktionselementen in okklusaler Aufsicht (links: Oberkiefer, rechts: Unterkiefer), hier konkret dargestellt Aligner des Herstellers Invisalign® mit optimierten Precision Wings

Bei den in Abbildung 2 und 3 dargestellten Funktionselemente zur mandibulären Vorverlagerung handelt es sich im konkreten Beispiel um die optimierten precision wings der Firma Invisalign® (Align Technology, Inc., San Jose, CA,

USA). Die lateralen Flügel zur mandibulären Protrusion wurden erstmals im Jahr 2017 eingeführt. Im Jahr 2022 wurden die precision wings vorgestellt, dabei handelt es sich weiterhin um laterale Flügel, die aber ein verbessertes, stabileres Design aufweisen. Platziert sind die Funktionselemente jeweils im Oberkiefer und Unterkiefer zwischen dem ersten Molaren und den Prämolaren. Bei Mundschluss rasten die unteren Funktionselemente vor den oberen ein, sodass der Unterkiefer gezielt nach anterior geführt wird (Lombardo et al., 2024). Die Kombination von Alignern und Funktionselementen ermöglicht die Korrektur von dentoalveolären Fehlstellungen und skelettalen Dysgnathien simultan bei heranwachsenden Patienten. Hierdurch soll eine verkürzte Behandlungsdauer erzielt werden (Lombardo et al., 2025).

Die kieferorthopädische Therapie mittels Alignern hat durch technische Fortschritte und Innovationen im Bereich der CAD/CAM Technologie in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen (Bichu et al., 2023). Sie kann eine ästhetische, komfortable Alternative zur herkömmlichen festsitzenden Therapie mittels Multibracket und Multiband Apparaturen darstellen (AlMogbel, 2023). Ursprünglich einlagige Kunststoffe wurden durch mehrschichtige Polyurethan- und Co-Polyester-Materialien ersetzt, die eine gleichmäßigere Kraftabgabe und bessere Elastizität versprechen und gleichzeitig den hohen ästhetischen Ansprüchen an das Material wie Farbstabilität und Transparenz, sowie der Biokompatibilität gerecht werden (Bichu et al., 2023). AlMogbel et al. zeigten 2023, dass die Alignertherapie milde bis moderate Fehlstellungen bei guter Patientencompliance mit einer Genauigkeit von bis zu 90 % korrigieren kann, während die Patienten im Vergleich zu einer Behandlung mittels Multibracket Apparatur von einer besseren Mundhygienefähigkeit bei geringeren Plaque Anlagerungen, einer besseren Lebensqualität und geringeren Komplikationsrisiken profitieren (AlMogbel et al., 2024). Des Weiteren machen Patienten im Laufe einer kieferorthopädischen Therapie mittels Alignern signifikant weniger Gebrauch von Analgetika als Patienten die mit einer klassischen Multiband-Multibracket Apparatur therapiert werden (White et al., 2017).

Die Verbesserung der Molarenrelation und Frontzahnbeziehung bei einer Alignertherapie mit zusätzlichen Funktionselementen zur mandibulären Protrusion wird durch eine Kombination aus skelettalen und dentalen Veränderungen erzielt, wobei die skelettalen Veränderungen überwiegen (Gurgel et al., 2023). Dentoalveoläre Nebenwirkungen treten im Sinne einer Retroinklination der oberen Frontzähne, einer Proklination der Unterkiefer Frontzähne, sowie durch eine Mesialisierung der Unterkiefer Molaren auf (Gurgel et al., 2023).

1.5 Ziel der Studie

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die skelettale Wirkung von Alignern mit Funktionselementen bei heranwachsenden Patienten mit einer skelettalen Klasse II Dysgnathie genauer zu untersuchen. Betrachtet werden die skelettalen sagittalen und vertikalen Veränderungen von Maxilla und Mandibula, sowie deren Kieferbasenrelation zueinander. Des Weiteren werden die dentoalveolären Frontzahnpositionen und -inklinationen analysiert, um eine Aussage zu deren Veränderungen und unerwünschten Nebenwirkungen treffen zu können. Die Weichteilkonfiguration wird im Hinblick auf eine Harmonisierung des weichgewebigen Profils betrachtet.

Durch die kephalometrische Analyse der Fernröntgenseitenbilder, je unmittelbar vor und nach der funktionskieferorthopädischen Therapie, kann eine genauere Aussage über die Effektivität von Alignern mit Funktionselementen zur Korrektur einer skelettalen Klasse II Dysgnathie und deren Vorhersagbarkeit im Bezug auf die skelettalen Parameter und den mandibulären Prognathiegrad, sowie unerwünschte dentoalveoläre Nebenwirkungen getroffen werden.

Hiervon leiten sich konkret folgende Fragestellungen ab:

- Liegt eine signifikante Veränderung der sagittalen kephalometrischen Parameter der Fernröntgenseitenbildanalyse vor?
- Liegt eine signifikante Veränderung der vertikalen kephalometrischen Parameter der Fernröntgenseitenbildanalyse vor?

- Liegt eine signifikante Veränderung der vertikalen dentalen Parameter der Fernröntgenseitenbildanalyse vor?
- Liegt eine signifikante Veränderung der weichgewebigen kephalometrischen Parameter der Fernröntgenseitenbildanalyse vor?
- Erreichen die sagittalen kephalometrischen Parameter der Fernröntgenseitenbildanalyse die orthognathen Normwerte?
- Sind Aligner mit Funktionselementen ein geeignetes funktionskieferorthopädisches Gerät zur Korrektur einer skelettalen Klasse II Dysgnathie?

2 Material und Methoden

2.1 Patienten

Die vorliegende retrospektiv durchgeführte Studie umfasste insgesamt 43 Patienten ($n = 43$), die sich in 19 weibliche ($n = 19$) und 24 männliche ($n = 24$) Probanden unterteilten (**Abbildung 4**). Die retrospektiv erhobenen Daten umfassten den Einschlusszeitraum von Januar 2025 bis Juni 2025.

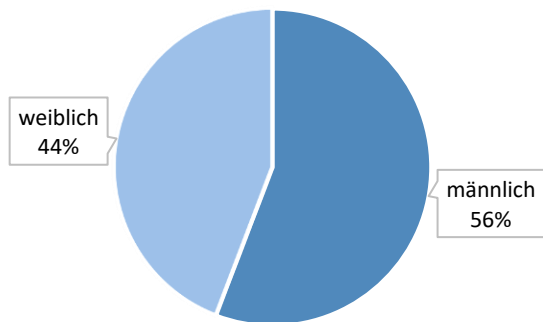


Abbildung 4: Kreisdiagramm zur Darstellung der Geschlechterverteilung der Probanden (w = 44 %; m = 56 %)

Die Patienten waren zu Beginn der funktionskieferorthopädischen Therapie mittels Alignern mit Funktionselementen im Durchschnitt 12,7 Jahre alt (MW = 12,7 Jahre, SD = 1,8 Jahre, $n = 43$).

Zu Beginn der retrospektiv angelegten Studie wurden Ein- und Ausschlusskriterien für die Probanden festgelegt.

Als Einschlusskriterien und somit Voraussetzungen zur Teilnahme für alle Probanden wurden folgende Faktoren definiert:

- eine vorliegende skelettale Klasse II Dysgnathie ($ANB > 4^\circ$)
- ein ausreichend vorhandenes Wachstumspotential (pubertäres Wachstumsmaximum noch nicht erreicht bzw. überschritten)
- eine ausreichend große sagittale Frontzahnstufe (≥ 2 mm), um eine sagittale Nachentwicklung der Mandibula zu ermöglichen

Als Ausschlusskriterien wurden folgende Kriterien definiert:

- eine unvollständige Dokumentation des Falles
- eine vorangegangene Behandlung mittels anderer funktionskieferorthopädischer Geräte
- Patienten mit syndromalen Erkrankungen
- Patienten mit ausgeprägten dentoalveolären Durchbruchstörungen
- ein fortgeschrittenes Patientenalter ohne ausreichend vorhandenes Wachstumspotential

2.2 Studienaufbau

Im Rahmen der vorliegenden retrospektiv durchgeführten Studie wurden die Fernröntgenseitenbilder von 43 Patienten (n = 43), die sich in der Poliklinik für Kieferorthopädie, Universitätsklinikum Tübingen, in funktionskieferorthopädischer Behandlung mittels Alignern mit Funktionselementen befanden, kephalometrisch ausgewertet und analysiert. Alle vorhandenen Fernröntgenseitenbilder und dreidimensionalen Scans wurden aus der klinischen Routine heraus angefertigt. Zur Beurteilung der Veränderungen der Parameter im Fernröntgenseitenbild unter funktionskieferorthopädischer Therapie wurden die zweidimensionalen Fernröntgenseitenbilder bei jedem Patienten aus der klinischen Routine heraus zu zwei verschiedenen Zeitpunkten (T1, T2) angefertigt:

- T1: Fernröntgenseitenbild unmittelbar vor Beginn der funktionskieferorthopädischen Therapie mittels Alignern mit Funktionselementen
- T2: Fernröntgenseitenbild nach ca. zwölf Monaten funktionskieferorthopädischer Therapie mittels Alignern mit Funktionselementen

Die Indikationsstellung zur Anfertigung der Fernröntgenseitenbilder erfolgte studienunabhängig aus der klinischen Routine heraus zur Beurteilung der sagittalen Lageverhältnisse der Kieferbasen vor Therapiebeginn (T1) und zur

Kontrolle des Therapieerfolges und Planung der weiteren Behandlungsschritte nach ca. 12 Monaten funktionskieferorthopädischer Therapie (T2).

Es wird angenommen, dass die Instruktion, die Aligner mit Funktionselementen täglich mindestens 22 Stunden zu tragen, von Patientenseite konsequent befolgt wurde.

2.3 Planung der Aligner mit Funktionselementen

Die Aligner mit Funktionselementen wurden digital mithilfe der Invisalign® ClinCheck® Pro 6.0 Software (Align Technology, Inc., San Jose, CA, USA) geplant. Hierfür erforderlich ist ein dreidimensionaler Scan der Zähne des Ober- und Unterkiefers mitsamt der Alveolarfortsätze, sowie zwei Bisssscans der linken und rechten Seite, die eine eindeutige Positionierung der Ober- und Unterkieferdentitionen zueinander ermöglichen. Des Weiteren muss ein aktuelles Fernröntgenseitenbild mitsamt kephalometrischer Diagnostik vorliegen (**Abbildung 8**). Die erforderlichen beschriebenen Patientenunterlagen wurden aus der klinischen Routine heraus angefertigt.

Für eine Planung der mandibulären Protrusion müssen entsprechend den Einschlusskriterien der Studie ein ausreichend vorhandenes Wachstumspotential vorliegen (Patient befindet sich im präpubertären Wachstumsschub und vor dem pubertären Wachstumsmaximum) und eine skelettale Klasse II Dysgnathie vorhanden sein. Des Weiteren müssen alle 6-Jahr-Molaren vollständig durchgebrochen sein und der initiale Overjet muss mindestens 2 mm betragen, sodass der Unterkiefer nach anterior bewegt werden kann.

Sollten die dentalen Parameter nicht erfüllt sein, kann eine sogenannte prä MA-Phase notwendig sein, um diese mittels Alignern ohne Funktionselemente vorab zu korrigieren. Bei einer vorliegenden Angle Klasse II/2 mit einem Overjet von <2 mm kann zum Beispiel die Proklination der Oberkiefer Inzisiven vorangestellt erfolgen, um eine ausreichend große sagittale Frontzahnstufe vor der mandibulären Vorverlagerung zu erzielen.

☒ Mandibulärer Protrusion (MA) (Die Verwendung der klinischen Präferenzen ist während der Stufen zur Vorwärtsbewegung der Mandibula eingeschränkt)

Die ersten bleibenden Molaren müssen zu Beginn der mandibulären Protrusion (MP) vorhanden sein, um optimale Wirksamkeit mit guter Aligner-Retention zu erreichen. Zudem müssen bei okklusalen Blöcken der untere erste Prämolare und die unteren und oberen zweiten Prämolaren vollständig durchgebrochen sein, oder die unteren ersten primären Molaren müssen stabil sein. Bei einem geringen Prozentsatz der Fälle können MP-Funktionen aufgrund einer Kombination mehrerer Faktoren, wie zum Beispiel Lücken zwischen Zahnbögen, Kronenhöhe usw., nicht gesetzt werden. [Weitere Informationen](#)

Funktion(en) der mandibulären Protrusion [Weitere Informationen](#)

☐ Okklusale Blöcke

☒ Optimierte Precision Wings

Setup-Position am Ende der MP-Phase [Weitere Informationen](#)

☒ Kantenposition

☐ Unterer Zahnbogen 1 mm über Kantenposition

☐ Unterer Zahnbogen 2 mm über Kantenposition

MA-Stufeneinteilung [Weitere Informationen](#)

☒ 2 mm Protrusion bis zur Setup-Position am Ende der MP-Phase (empfohlen)

☐ Einzelne Protrusion bis zur Setup-Position am Ende der MP-Phase (Hinweis: Bitte achten Sie auf den Patientenkomfort)

Asymmetrische Bewegung des unteren Zahnbogens [Weitere Informationen](#)

☒ Unteren Zahnbogen verschieben, um die Mittellinien (bis 2 mm) während der MA-Phase zu optimieren (Hinweis: Dies könnte eine leichte asymmetrische Protrusion der rechten und linken Seite schaffen)

☐ Verschieben Sie nicht den unteren Zahnbogen, um die Mittellinien während der MA-Phase zu optimieren

Precision Cuts für vertikale Elastics [Weitere Informationen](#)

☐ Ja ([Angabe in Precision-Cut-Benutzeroberfläche](#))

☒ Nein

Abbildung 5: Auszug aus der digitalen Planung der mandibulären Protrusion (MA) als Screenshot (Invisalign®, Align Technology Inc., Stand 09.06.2026) <https://vip.invisalign.com/v3/auth/rx/i20/comprehensive.action?formId=278987450&step=2&pageName=&rxQuestionName=&pref=&valid=true&discountPage=false&discountTermsConditions=false&noneStaffDiscount=true>

Wie in **Abbildung 5** dargestellt, kann in der Planungssoftware zwischen okklusalen Blöcken und optimierten Precision Wings gewählt werden. Bei allen in der Studie eingeschlossenen Patienten wurden die optimierten Precision Wings gewählt, die in **Abbildung 6** in blau dargestellt sind.

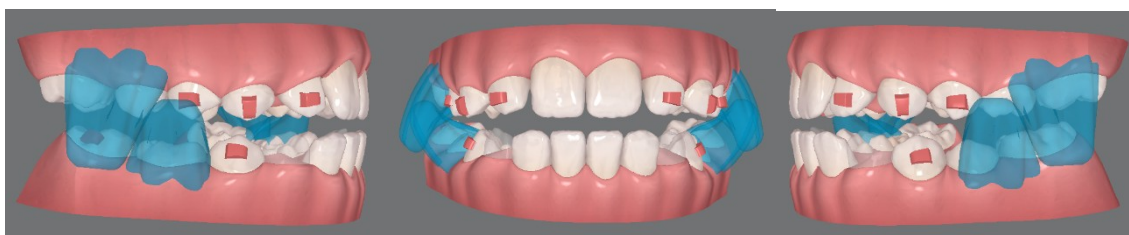


Abbildung 6: Optimierte precision Wings in der digitalen Planungssoftware (hier konkret dargestellt Aligner von Invisalign®, Align Technology Inc., mit optimierten Precision Wings)

Als Endposition wurde bei allen Patienten die Kantenposition angegeben, sodass eine Kopfbißstellung der Frontzähne zueinander zum Ende der mandibulären Protrusionsphase geplant wird, um eine leichte Überkompensation der sagittalen Vorverlagerung des Unterkiefers zu erzielen (**Abbildung 7**).

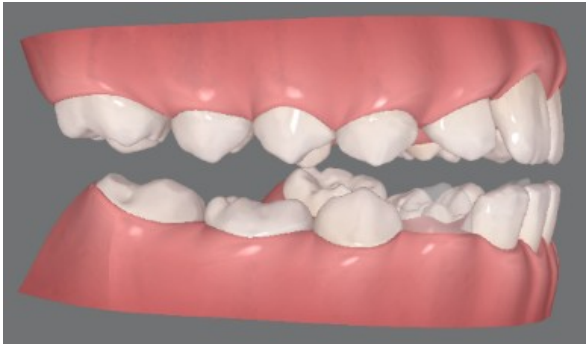


Abbildung 7: Darstellung der Kantenposition der Frontzähne (frontale Kopfbissstellung)

Die Stufeneinteilung wurde bei allen Patienten so festgelegt, dass die Mandibula schrittweise alle acht Wochen um 2 mm weiter nach anterior verlagert wurde, bis die Endposition der mandibulären Protrusionsphase im frontalen Kopfbiss erreicht war. Diese mandibuläre Protrusionsphase bestand immer mindestens aus 26 Alignerstufen, sodass sich die aktive Vorverlagerung des Unterkiefers über eine Dauer von mindestens 26 Wochen erstreckte. Parallel zur sagittalen mandibulären Vorverlagerung wurden Einzelzahnbewegungen im Sinne von dentoalveolären Korrekturen zur Zahnbogenausformung geplant.

Sofern zu Therapiebeginn eine mandibuläre Mittellinienverschiebung vorlag, konnte diese während der Protrusionsphase korrigiert werden, indem die mandibuläre Vorverlagerung asymmetrisch erfolgte, sodass ein Mittenausgleich erfolgte. Lag bei einem in der Studie inkludierten Patienten eine solche mandibuläre Mittellinienverschiebung vor, wurde eine asymmetrische Unterkiefer Vorverlagerung geplant.

Bei keinem der in der Studie untersuchten Patientenfälle wurden zusätzliche vertikale Elastics verordnet, da bei allen Patienten ein suffizienter Mund- und Lippenschluss vorlag.

Am Ende der aktiven Protrusionsphase wurde aus der klinischen Routine heraus eine Zwischendiagnostik im Sinne eines dreidimensionalen Scans der Zähne und eines Fernröntgenseitenbildes angefertigt. Die Auswertung der Unterlagen und die Planung der weiteren Therapie erfolgte während der Übergangsphase, in der keine weitere aktive Vorverlagerung des Unterkiefers mehr stattfand, sondern die

frontale Kantenposition über vier Wochen gehalten und stabilisiert wurde. In dieser Zeit konnten weitere Aligner geplant und ohne zeitliche Unterbrechung der Therapie eingegliedert werden, um das Risiko eines unerwünschten Rezidivs zu minimieren. Je nach Zwischendiagnostik handelte es sich hierbei um Aligner mit Funktionselementen zur weiteren Vorverlagerung des Unterkiefers, oder um Aligner ohne Funktionselemente, zur Retention des erreichten Ergebnisses mittels Klasse II Elastics und weiteren Korrektur dentoalveolärer Fehlstellungen, handeln (**Abbildung 8**).

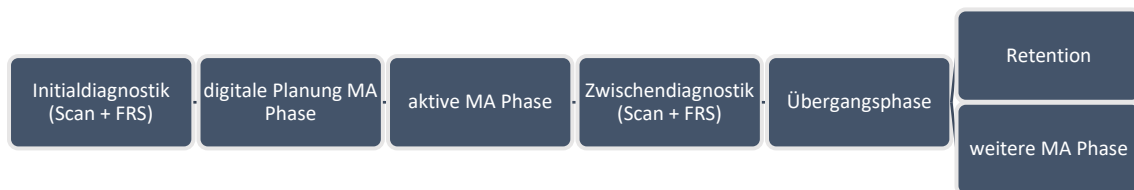


Abbildung 8: Darstellung des Workflows

Alle Patienten wurden angewiesen, die Aligner mindestens 22 Stunden täglich zu tragen und nur zum Zähneputzen, Essen und beim Verzehr von zucker- oder säurehaltigen Getränken herauszunehmen. Ein Wechsel der Aligner auf die nächste Alignerstufe erfolgte wöchentlich. Es wird davon ausgegangen, dass alle Patienten die vermittelten Vorgaben einhielten.

2.4 Kephalometrische Analyse

2.4.1 Kephalometrische Analyse

In der Literatur werden über 200 verschiedene kephalometrische Referenzpunkte und unzählige Analysen beschrieben, wobei sich viele Analysen in großen Teilen ähneln (Ruhland, 1969).

Die im Folgenden verwendete Analyse basiert auf der Bergen Analyse nach Hasund und Segner aus dem Jahr 1972, die besonderen Augenmerk auf die Individualität eines einzelnen Patienten legt, sodass unter Berücksichtigung individueller Gegebenheiten therapiert werden soll, auch abweichend von fest definierten Normwerten (Segner, 1989).

Alle Fernröntgenseitenbilder wurden durch mich persönlich ausgewertet und analysiert. Die Setzung der kephalometrischen Referenzpunkte erfolgte durch mich persönlich in der ivoris® analyze Software (Firma Computer konkret AG, Falkenstein, Deutschland). Durch die große klinische Routine kann eine sehr genaue Setzung der kephalometrischen Referenzpunkte angenommen werden. Zusätzlich erfolgte eine visuelle Kontrolle der gesetzten Referenzpunkte durch eine zweite, unabhängige, fachzahnärztliche Person.

2.4.2 Kephalometrische Referenzpunkte

In Tabelle 1 sind die kephalometrischen Referenzpunkte der hier verwendeten Fernröntgenseitenanalyse aufgeführt. Abbildung 9 visualisiert diese Punkte zum besseren Verständnis grafisch.

Tabelle 1: Kephalometrische Referenzpunkte der FRS Analyse

Referenzpunkt	Definition
Nasion (N)	Anteriorster Punkt der Sutura nasofrontalis
Sella (S)	Konstruierter Punkt durch Halbierung des größten ventrodorsalen Durchmessers der Sella turcica

Basion (Ba)	Posteriokaudalster Punkt des Clivus, anteriorster Punkt des Foramen magnum
Maxilla Apikalpunkt (A)	Dorsalster Punkt der anterioren Kontur des Oberkiefer Alveolarfortsatzes
Spina nasalis anterior (Sp)	Anteriorster Punkt der knöchernen Spina nasalis anterior
Pterygomaxillare (Pm)	Konstruierter Schnittpunkt der dorsalen Kontur des corpus maxillae bzw anteriore Begrenzung der Fossa pterygopalatina mit der Kontur des harten bzw. weichen Gaumens
Inzisivus superius (Is1 ₋)	Inzisalster Punkt des anteriorsten mittleren Inzisivus der Oberkieferdentition
Inzisivus superius apikale (Ap1 ₋)	Apikalster Punkt der Wurzel des anteriorsten mittleren Inzisivus der Oberkieferdentition
Articulare (Ar)	Konstruierter Schnittpunkt des Unterrandes der Schädelbasis mit der dorsalen Kontur des collum mandibulae
Pogonion (Pg)	Anteriorster Punkt des knöchernen Kinns
Gnathion (Gn)	Kaudalster Punkt der Unterkiefersymphyse
Mandibula Apikalpunkt (B)	Dorsalster Punkt der anterioren Kontur des Unterkiefer Alveolarfortsatzes
Inzisivus inferuis (Is1 ₋)	Inzisalster Punkt des anteriorsten mittleren Inzisivus der Unterkieferdentition
Inzisivus inferius apikale (Ap1 ₋)	Apikalster Punkt der Wurzel des anteriorsten mittleren Inzisivus der Unterkieferdentition
Spina Strich (Sp')	Schnittpunkt der Referenzlinien Nasion-Gnathion zu Spina-Pterygomaxillare
Gonion Tangentenpunkt (tgo)	Schnittpunkt des Mandibularplanums mit der Ramustangente
Weichteilpogonion (pg)	Anteriorster Punkt des weichgewebigen Kinns
Nasenspitze (En)	Ventralster Punkt der weichgewebigen Nasenspitze

Columella	Übergang des geraden Anteils der Columella in die
Tangentenpunkt (ctg)	Konvexität der Nasenspitze
Subnasale (sn)	Übergang des Nasensteges in die Oberlippe
Oberlippenpunkt (UL)	Anteriorster Punkt der Oberlippe
Unterlippenpunkt (LL)	Anteriorster Punkt der Unterlippe
Ramustangentenpunkt (Rt)	Tangentenpunkt durch Ar an der dorsalen Begrenzung des Ramus mandibulae
Corpustangentenpunkt (Ct)	Tangentenpunkt durch Gn an der kaudalen Begrenzung des Corpus mandibulae
vPOcP	Konstruierter anteriorer Punkt des Okklusalplanums, Halbierung der Strecke Is_1 Punkt/ Is ⁻ 1 Punkt
hPOcP	Konstruierter posteriorer Punkt des Okklusalplanums, distookklusaler Molarenkontaktpunkt

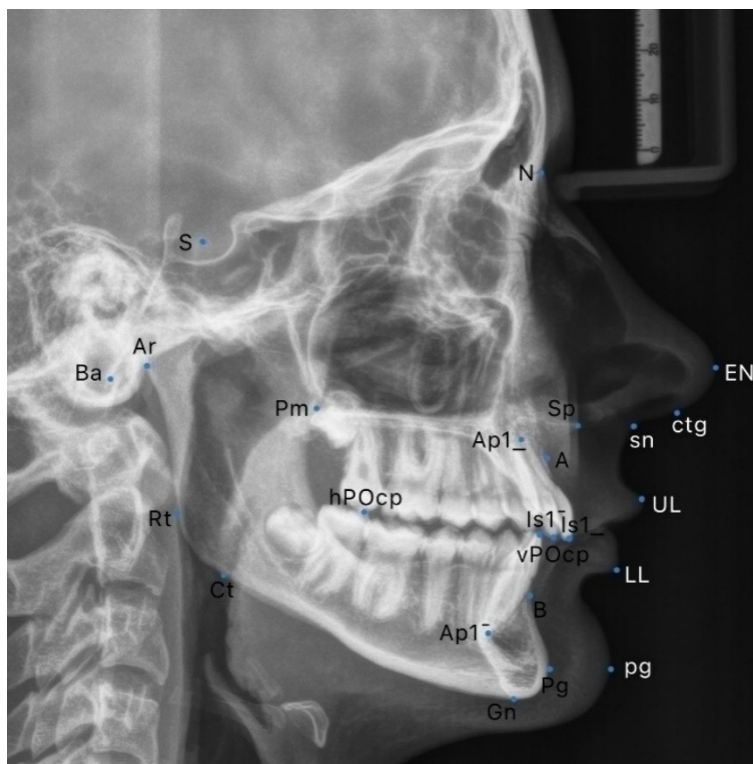


Abbildung 9: Visualisierung der kephalometrischen Referenzpunkte im FRS

2.4.3 Kephalometrische Referenzlinien

Tabelle 2 beschreibt die horizontalen Referenzlinien der im folgenden verwendeten kephalometrischen Analyse. **Abbildung 10** visualisiert diese Referenzlinien mit entsprechenden Referenzpunkten.

Tabelle 2: Horizontale Referenzlinien

Abkürzung	Referenzlinie	Definition
NSL	Nasion-Sella-Linie	Anteriore Schädelbasis N-S
NL	Nasallinie/Spinaplanum	Referenzlinie OK Sp-Pm
ML	Mandibularlinie	Referenzlinie UK Gn-Ct
OE	Okklusalebene	Verbildungslinie vPOcP-hPOcP

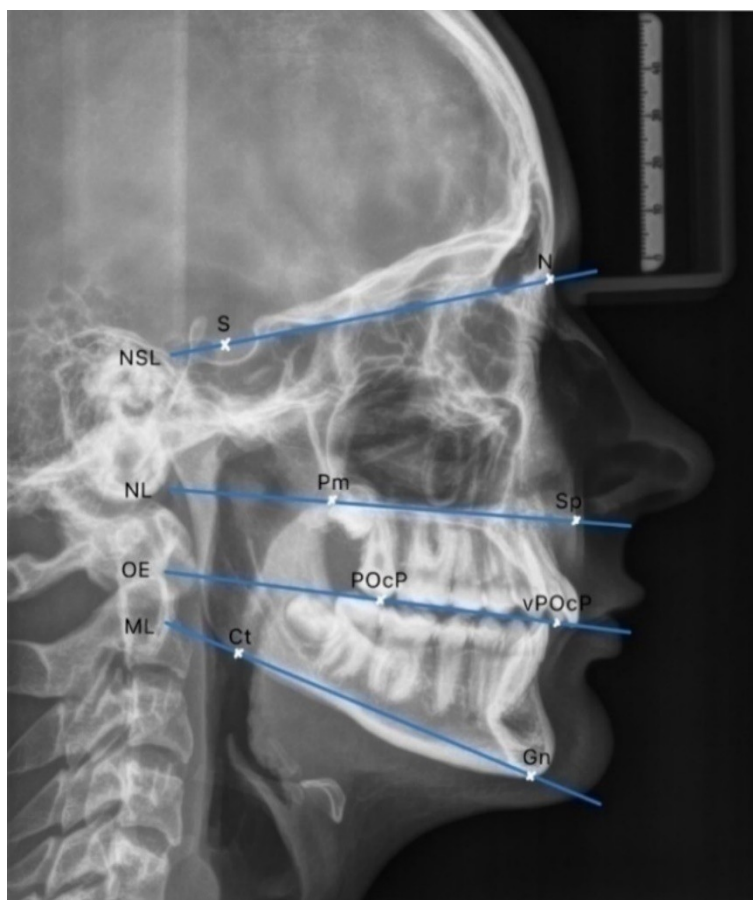


Abbildung 10: Visualisierung der horizontalen Referenzlinien

In Tabelle 3 sind die vertikalen Referenzlinien der kephalometrischen Analyse beschrieben. Die entsprechende grafische Visualisierung ist in Abbildung 11 dargestellt.

Tabelle 3: Vertikale Referenzlinien

Abkürzung	Referenzlinie	Definition
NA	NA-Linie	Sagittale Lage des OK N-A
NB	NB-Linie	Sagittale Lage des UK N-B
NPg	NPg-Linie	Sagittale Lage Kinn N-Pg



Abbildung 11: Visualisierung der vertikale Referenzlinien

In Tabelle 4 finden sich die zur kephalometrischen Analyse verwendeten Hilfslinien. Diese sind zusätzlich zum besseren Verständnis in **Abbildung 12** visualisiert.

Tabelle 4: Kephalmetrische Hilfslinien

Hilfslinie	Definition
Ramus Linie	Verbindungslinie Ar–tgo
Clivus Linie	Verbindungslinie S–Ba
OK Schneidezahnachse	Verbindungslinie Is1 ₋ -Ap1 ₋
UK Schneidezahnachse	Verbindungslinie Is1 ⁻ -Ap1 ⁻
Nasion Gnathion	Verbindungslinie N–Gn
Holdaway Linie	Verbindungslinie pg-UL
Columella Tangente	Verbindungslinie Sn–ctg
Oberlippen Tangente	Verbindungslinie Sn–UL

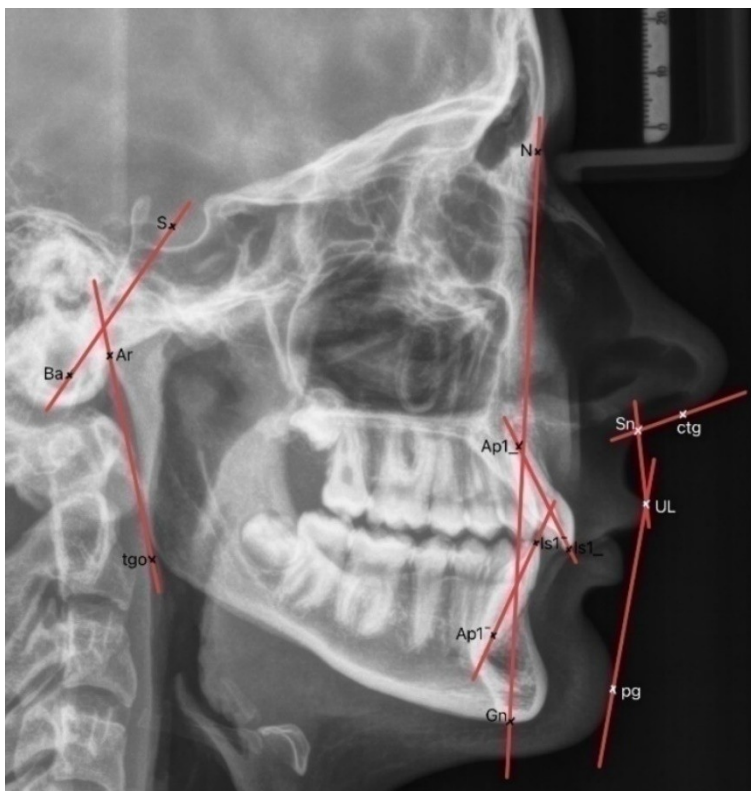


Abbildung 12: Visualisierung der kephalometrischen Hilfslinien

2.4.4 Kephalometrische Referenzwinkel

Sagittale Referenzwinkel

SNA Winkel

Der SNA Winkel beschreibt die sagittale Lage der Maxilla zur anterioren Schädelbasis (NSL). Der Normwert beträgt 82° mit einer Toleranz von $\pm 2^\circ$. Bei Abweichungen $< 80^\circ$ spricht man von einer retrognathen Maxilla, bei Werten $> 84^\circ$ von einer prognathen Maxilla.

SNB Winkel

Der SNB Winkel beschreibt die sagittale Lage der Mandibula zur anterioren Schädelbasis (NSL). Der Normwert beträgt 80° mit einer Toleranz von $\pm 2^\circ$. Bei abweichenden Werten $< 78^\circ$ liegt eine retrognathe Mandibula vor, bei Werten $> 82^\circ$ handelt es sich um eine prognathe Mandibula.

ANB Winkel

Der ANB Winkel beschreibt die sagittale Lagebeziehung von Maxilla und Mandibula zueinander. Er kann gemessen oder berechnet werden mittels der Formel $SNA - SNB = ANB$. Im orthognathen Gesicht beträgt der Normwert 2° mit einer Toleranz von $\pm 2^\circ$. Bei einem Winkel $< 0^\circ$ spricht man von einer skelettalen Klasse III, bei Winkeln $> 4^\circ$ von einer skelettalen Klasse II (WALKER & Kowalski, 1971). Nur unter Berücksichtigung der Winkel SNA und SNB kann eine Aussage darüber getroffen werden, welcher Kiefer ursächlich für eine vorliegende Dysgnathie ist.

Individualisierter ANB Winkel

Der individualisierte ANB Winkel wird mit der Formel $(-35,16 + 0,4(SNA) + 0,2(Sn-MeGo))$ berechnet. Er wird dann betrachtet, wenn er $> 1^\circ$ vom ANB Winkel abweicht (Panagiotidis & Witt, 1977). Wenn der gemessene ANB Winkel kleiner als der individualisierte ANB Winkel ist, handelt es sich um eine skelettale Klasse III, wenn der gemessene ANB Winkel größer als der individualisierte ANB Winkel ist, handelt es sich um eine skelettale Klasse II.

SNPg Winkel

Der SNPg Winkel beschreibt die sagittale Lage des Unterkiefers. Liegt eine ausgeprägte knöcherne Kinnprominenz vor, so ist die Differenz der Winkel SNPg und SNB groß. Der Normwert beträgt 81° mit einer Toleranz von $\pm 8^\circ$.

Vertikale Referenzwinkel

NSBa

NSBa beschreibt den Schädelbasiswinkel, genauer den Winkel zwischen Clivus und anteriorer Schädelbasis. Der Normwert beträgt 130° mit einer Streuung von $\pm 6^\circ$. Liegt ein vergrößerter Schädelbasiswinkel vor, so handelt es sich um einen retrognathen Profiltyp, ein verkleinerter Schädelbasiswinkel korreliert mit einem prognathen Profiltyp.

GnGoAr

Der Winkel GnGoAr beschreibt den Kieferwinkel, das heißt den Winkel zwischen Unterkiefer Ramus und Corpus mandibulae. Der Normwert beträgt 122° mit einer mittleren Abweichung von $\pm 10^\circ$. Die Wachstumsrichtung der Kondylen beeinflussen die Größe des Kieferwinkels. So findet sich bei einem vertikalen Wachstumsmuster ein vergrößerter Kieferwinkel, bei einem horizontalen Wachstumsmuster hingegen ist der Kieferwinkel verkleinert.

NL-NSL

Der Winkel NL-NSL beschreibt die Neigung der Maxilla zur vorderen Schädelbasis. Der Normwert beträgt $8^\circ \pm 2^\circ$. Bei einem vergrößerten NL-NSL Winkel liegt eine posteriore Rotation der Maxilla vor, bei einem verkleinerten NL-NSL Winkel liegt eine anteriore Rotation der Maxilla vor.

ML-NSL

Der Winkel ML-NSL beschreibt die Neigung der Mandibula zur vorderen Schädelbasis. Der Normwert beträgt 28° mit einer Toleranz von $\pm 2^\circ$. Ein vergrößerter ML-NSL Winkel beschreibt eine posteriore Rotation der Mandibula,

welche mit einem vertikalen Wachstumsmuster korreliert. Ein verkleinerter ML-NSL Winkel beschreibt eine anteriore Rotation der Mandibula, die mit einem horizontalen Wachstumsmuster korreliert.

ML-NL

Der Winkel ML-NL beschreibt die Neigung bzw. Divergenz von Maxilla und Mandibula zueinander und wird auch Interbasiswinkel genannt. Der Normwert beträgt 20° mit einer Toleranz von $\pm 3^\circ$. Ein vergrößerter Interbasiswinkel deutet auf ein divergierendes Wachstum der Kieferbasen und somit auf ein vertikales Wachstumsmuster hin, ein verkleinerter Interbasiswinkel hingegen beschreibt ein konvergierendes Wachstum der Kieferbasen zueinander und korreliert damit häufig mit einem horizontalen Wachstumstyp.

Dentoalveoläre Referenzwinkel

OK1-NA Winkel

Der OK1-NA Winkel beschreibt die Inklination der Oberkiefer Inzisiven in Bezug zur NA Linie. Der Normwert beträgt $21^\circ \pm 1^\circ$. Bei einem vergrößerten OK1-NA Winkel liegt eine Anteinklination der Oberkiefer Schneidezähne vor, bei einem verkleinerten OK1-NA Winkel liegt eine Retroinklination der Oberkiefer Schneidezähne vor.

UK1-NB Winkel

Der UK1-NB Winkel definiert die Inklination der Unterkiefer Inzisiven in Relation zur Linie NB. Der Normwert beträgt $24^\circ \pm 1^\circ$. Ein vergrößerter UK1-NB Winkel beschreibt eine Anteinklination der Unterkiefer Schneidezähne, ein verkleinerter UK1-NB Winkel beschreibt eine Retroinklination der Unterkiefer Schneidezähne.

Interinzisalwinkel

Der Interinzisalwinkel beschreibt die Relation der Ober- und Unterkieferinzisiven zueinander. Der Normwert beträgt $133^\circ \pm 5^\circ$. Ein verkleinerter Interinzisalwinkel gibt einen Hinweis auf proklinierte Frontzähne und wird mit einer geringeren

Stabilität des Behandlungsergebnisses in Verbindung gebracht. Ein vergrößerter Interinzisalwinkel beschreibt einen Steilstand der Frontzähne.

Weichteilwinkel

Holdaway Winkel

Der Holdaway Winkel oder auch H-Winkel ist definiert als der Winkel zwischen NB-Linie und der konstruierten Linie zwischen Weichteilpogonion und Oberlippenpunkt (Holdaway Linie). Mithilfe des Winkels wird eine Relation zwischen skelettalen und Weichgewebigen Parametern hergestellt. Der Normwert beträgt 8° mit einer Toleranz von $\pm 2,5^\circ$. Ein vergrößerter H-Winkel beschreibt ein fliehendes Kinn, ein verkleinerter H- Winkel einen flachen Profilverlauf. Starke Abweichungen in beide Richtungen werden als ästhetisch störend wahrgenommen.

Nasolabialwinkel

Der Nasolabialwinkel beschreibt den Winkel zwischen Oberlippen Tangente und Columella Tangente. Der Normwert beträgt $110^\circ \pm 18^\circ$. Starke Abweichungen in beide Richtungen werden im Profil als ästhetisch störend wahrgenommen.

2.4.5 Kephalometrische Referenzstrecken

Index

Der Index beschreibt die Relation von mittlerer zu unterer vorderer Gesichtshöhe. Die mittlere Gesichtshöhe ist definiert als die Strecke zwischen den kephalometrischen Punkten N und Sp'. Die untere Gesichtshöhe ist definiert als Strecke zwischen den Referenzpunkten Sp' und Gn. Die Indexzahl wird berechnet mithilfe der Formel $(N-Sp' / Sp'- Gn) * 100$ und wird in Prozent angegeben. Der Indexwerte sind wie folgt zu interpretieren:

- < 71 % Index O vergrößerte untere Gesichtshöhe; vertikales Wachstumsmuster
- 71 % – 89 % Index N neutrales Verhältnis der Gesichtshöhen; neutrales Wachstumsmuster
- > 89 % Index T verkleinerte untere Gesichtshöhe; horizontales Wachstumsmuster

OK1-NA Strecke

Die OK1-NA Strecke beschreibt den metrischen Abstand des Schneidekantenpunktes des Oberkiefer Inzisiven zur Strecke NA und definiert die Position der Oberkiefer Inzisiven auf dem Alveolarfortsatz. Der Normwert beträgt 4 mm $\pm$ 0,5 mm. Ein vergrößerter Wert entspricht einer Anteposition der Frontzähne, ein verringerter Wert entspricht einer Retroposition der Frontzähne und der Normwert beschreibt die Orthoposition der Frontzähne auf dem Alveolarfortsatz.

UK1-NB Strecke

Die UK1-NB Strecke beschreibt den metrischen Abstand der Schneidekante des Unterkiefer Inzisiven zur NB Strecke. Sie beschreibt die sagittale Position der Unterkiefer Frontzähne auf dem Alveolarfortsatz. Der Normwert beträgt 4 mm $\pm$ 0,5 mm. Eine vergrößerte UK1-NB Strecke beschreibt eine Anteposition der Frontzähne, eine verkleinerte Strecke beschreibe eine Retroposition der Frontzähne und ein Wert im Normbereich beschreibt die Orthoposition der Frontzähne.

Pg-NB Strecke

Die Pg-NB Strecke ist definiert als metrischer Abstand zwischen dem kephalometrischen Punkt Pg und der NB Strecke und beschreibt die Prominenz des hartgewebigen Kinns. Der Normwert beträgt 2 mm $\pm$ 1 mm. Ein vergrößerter Wert beschreibt ein prominentes knöchernes Kinn und eine Retroposition des zahntragenden Alveolarfortsatzes auf dem knöchernen Unterkieferkorpus. Ein verkleinerter Pg-NB Wert deutet auf eine geringe knöcherne Kinnprominenz hin.

2.4.6 Datenerhebung und Datenverarbeitung

Die erhobenen kephalometrischen Daten wurden anonymisiert und in einer Excel Tabelle (Microsoft® Excel 365, Microsoft® Corporation, Redmond, USA) zusammengetragen. Anschließend wurden sie mithilfe des Statistikprogramms SPSS (IBM® SPSS® Statistics, IBM Corporation, Armonk, New York, USA) statistisch ausgewertet und analysiert.

2.4.7 Allgemeine Statistik

Zur statistischen Auswertung und Analyse wurden die erhobenen kephalometrischen Daten zunächst in zwei Gruppen vor (T1) und nach (T2) funktionskieferorthopädischer Therapie unterteilt, um die Veränderungen der Parameter in der Fernröntgenseitenbildanalyse analysieren zu können:

- Gruppe 1 zum Zeitpunkt T1: vor funktionskieferorthopädischer Therapie mittels Alignern mit Funktionselementen
- Gruppe 2 zum Zeitpunkt T2: nach funktionskieferorthopädischer Therapie mittels Alignern mit Funktionselementen

Bei allen vorliegenden verbundenen Stichproben wurde zunächst ein Test auf Normalverteilung durchgeführt. Ob eine Normalverteilung vorlag oder nicht, wurde mittels visueller Kontrolle anhand eines Histogramms mit Gaus'scher Normalverteilungskurve, sowie mittels Schiefe und Kurtosis überprüft. Lag eine Normalverteilung vor, so wurde mittels t-Test einer Stichprobe die Signifikanz der Veränderung ermittelt. Lag keine Normalverteilung vor, so wurde die Signifikanz der Veränderung der verbundenen Stichproben mithilfe des Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtests ermittelt. Alle Ergebnisse wurden in Excel Tabellen erfasst und zusammengetragen.

In beiden beschriebenen Fällen wurde das Signifikanzniveau wie folgt unterteilt:

*** : höchst signifikant $p < 0,001$

** : hoch signifikant $p < 0,01$

* : signifikant $p < 0,05$

n.s. : nicht signifikant $p \geq 0,05$

Bei Vorliegen einer Normalverteilung wurde zusätzlich zur Signifikanz die Effektstärke des Mittelwertunterschiedes zwischen den Gruppen zum Zeitpunkt T1 und T2 mittels Cohen's d gemessen. Die Effektstärken wurden wie folgt unterteilt (Cohen, 1992):

$d < 0,20$ * sehr geringe Effektstärke

$d 0,20 - 0,50$ ** geringe Effektstärke

$d 0,50 - 0,80$ *** mittlere Effektstärke

$d > 0,80$ **** große Effektstärke

2.5 Ethikvotum

Die Ethik-Kommission der Medizinischen Fakultät der Eberhard-Karls-Universität Tübingen bewilligte den am 27.03.2025 gestellten Antrag zur Beurteilung ethischer und rechtlicher Fragen am 14.04.2025 unter der Projektnummer 204/2025BO2.

3 Ergebnisse

3.1 Patienten

Patientenalter

Das Patientenkollektiv besteht aus insgesamt 43 Patienten ($n = 43$), die sich in 19 weibliche (w; $n = 19$) und 24 männliche (m; $n = 24$) Patienten unterteilen. Das durchschnittliche Alter des gesamten Patientenkollektivs zu Behandlungsbeginn (T1) beträgt 12,7 Jahre (MW = 12,7 Jahre, SD = 1,8 Jahre, $n = 43$) (**Abbildung 13**).

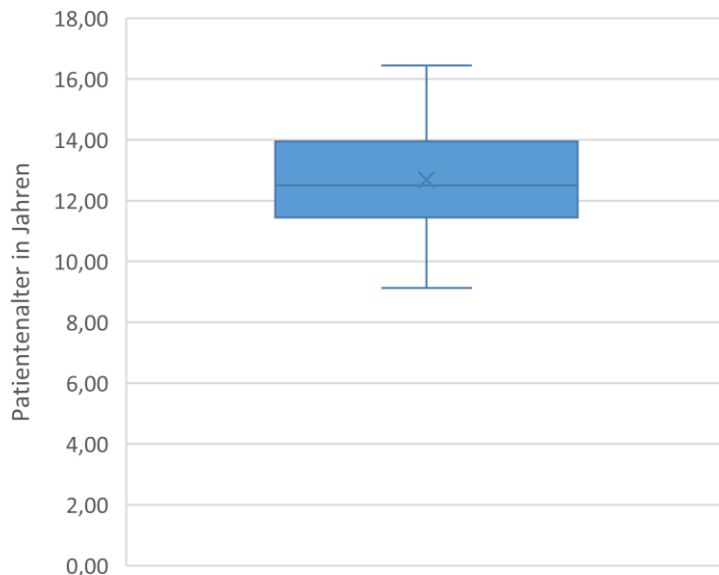


Abbildung 13: Boxplot zur Darstellung des Patientenalters zu Therapiebeginn (T1) (MW = 12,7 Jahre, SD = 1,8 Jahre)

Das Patientenalter zu Therapiebeginn (Zeitpunkt T1) bildet sich mit einem Mittelwert von 12,7 Jahren im Bereich des frühen Jugendalters und pubertären Wachstumsschubs ab. Der Boxplot (**Abbildung 13**) zeigt eine konzentrierte Verteilung mit einem Median von 12,5 Jahren und einem Interquartilsabstand von 11,5 bis 13,9 Jahren. Nur wenige Patienten sind zu Therapiebeginn jünger als 10 Jahre bzw. älter als 16 Jahre. Die Alterswerte reichen innerhalb der Whisker von minimal 9,1 bis maximal 16,4 Jahre. Es liegen keine Ausreißer vor.

Abbildung 14 stellt die Verteilung der Alterswerte der Patienten zu Therapiebeginn (Zeitpunkt T1) grafisch im Histogramm dar. Die Verteilung entspricht annähernd einer Normalverteilung mit leichter Rechtsschiefe. Es zeigt sich ein Mittelwert von 12,7 Jahren (MW = 12,7 Jahre, SD = 1,8 Jahre, n = 43). Die Altersspanne erstreckt sich von 9,1 Jahren bis maximal 16,4 Jahren, wobei etwa 70 % der Patienten im Bereich von 11,5 Jahren bis 13,9 Jahren liegen. Die relativ geringe Standardabweichung bildet eine homogene Altersverteilung ab und wirkt sich positiv auf die Vergleichbarkeit der Therapieeffekte innerhalb des Patientenkollektivs aus.

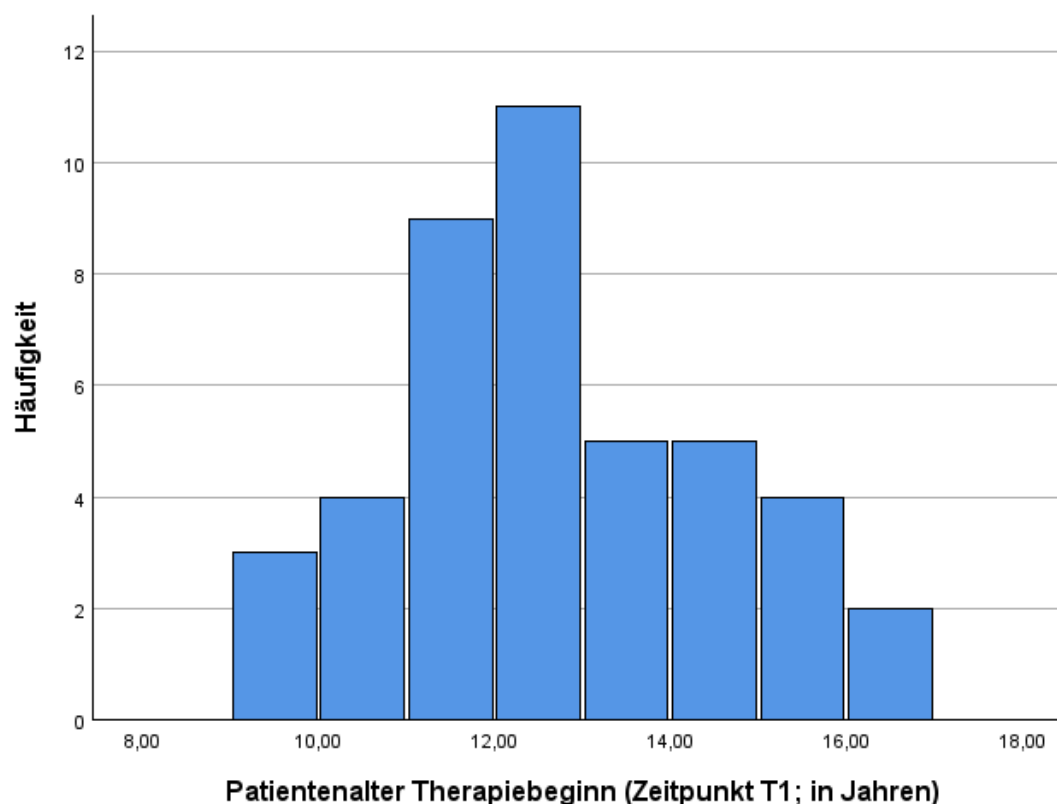


Abbildung 14: Histogramm zur Darstellung der Häufigkeitsverteilung des Patientenalters zu Therapiebeginn (Zeitpunkt T1; in Jahren; MW = 12,7 Jahre, SD = 1,8, n = 43)

Die durchschnittliche Therapiedauer beträgt in der vorliegenden Untersuchung 10,6 Monate bei einer Standardabweichung von 4,5 Monaten (**Abbildung 15**).

Die Boxplot Grafik zeigt eine überwiegend konzentrierte Verteilung der Behandlungsdauer mit einem Median von 9,4 Monaten und einem Interquartilsabstand von 7,4 bis 11,5 Monaten. Die Werte reichten insgesamt von 5,3 bis 17,6 Monaten innerhalb der Whisker, während einige längere Behandlungsdauern als Ausreißer mit einem Maximum von 24,9 Monaten dargestellt werden. Insgesamt liegt eine leicht rechtsschiefe Verteilung mit einzelnen Fällen von deutlich längerer Behandlungsdauer vor.

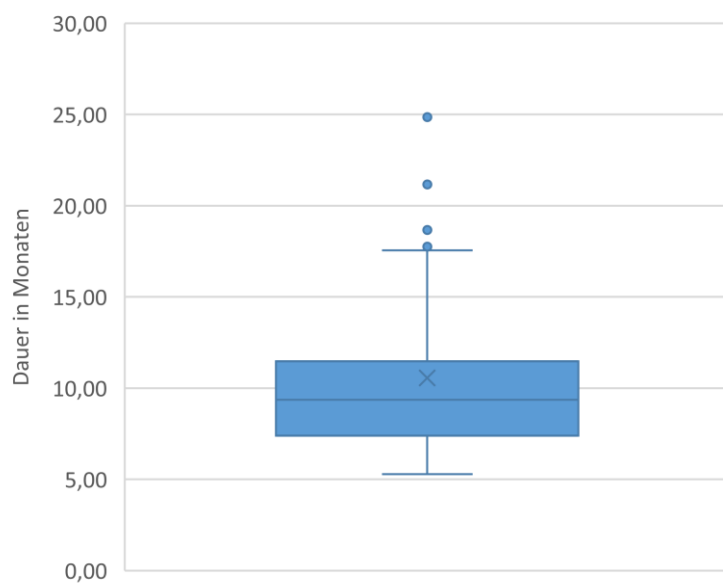


Abbildung 15: Boxplot zur Darstellung der durchschnittliche Therapiedauer in Monaten (MW = 10,6 Monate, SD = 4,5 Monate)

Das durchschnittliche Alter der Patienten nach funktionskieferorthopädischer Therapie (Zeitpunkt T2) beträgt im Durchschnitt 13,6 Jahre bei einer Standardabweichung von 1,9 Jahren (MW = 13,6 Jahre, SD = 1,9 Jahre, n = 43). Die Boxplot Grafik (**Abbildung 16**) zeigt eine konzentrierte Verteilung um einen Median von 13,2 Jahren. Der Median liegt mit 13,2 Jahren nahe am Mittelwert von 13,6 Jahren, was auf eine annähernd symmetrische Verteilung hindeutet (**Abbildung 17**). Der Interquartilsabstand liegt zwischen 12,3 und 15,0 Jahren. Die Werte innerhalb der Whisker reichen von 9,8 bis 17,7 Jahren. Es sind keine

Ausreißer erkennbar. Die Verteilung zeigt insgesamt eine moderate Streuung bei zentral gebündelten Werten.

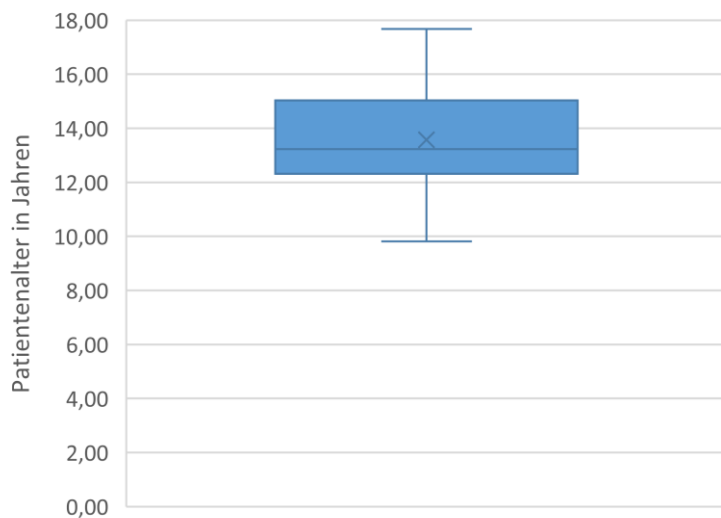


Abbildung 16: Boxplot zur Darstellung des Patientenalters zu Therapieende (T2) (MW = 13,6 Jahre, SD = 1,9 Jahre)

Abbildung 17 zeigt die Verteilung des Patientenalters zum Therapieende grafisch im Histogramm. Die Werte konzentrieren sich in den Bereich von 12,3 Jahren bis 15,0 Jahren, wobei der höchste Häufigkeitsgipfel um den Mittelwert von 13,6 Jahren (MW = 13,6 Jahre, SD = 1,9 Jahre) liegt. Einzelne Patienten finden sich im jüngeren und älteren Altersbereich von 9,8 Jahren bis maximal 17,7 Jahren, diese bilden jedoch die Ausnahme. Insgesamt zeigt sich ein annähernd unimodales und leicht rechtsschiefes Verteilungsmuster.

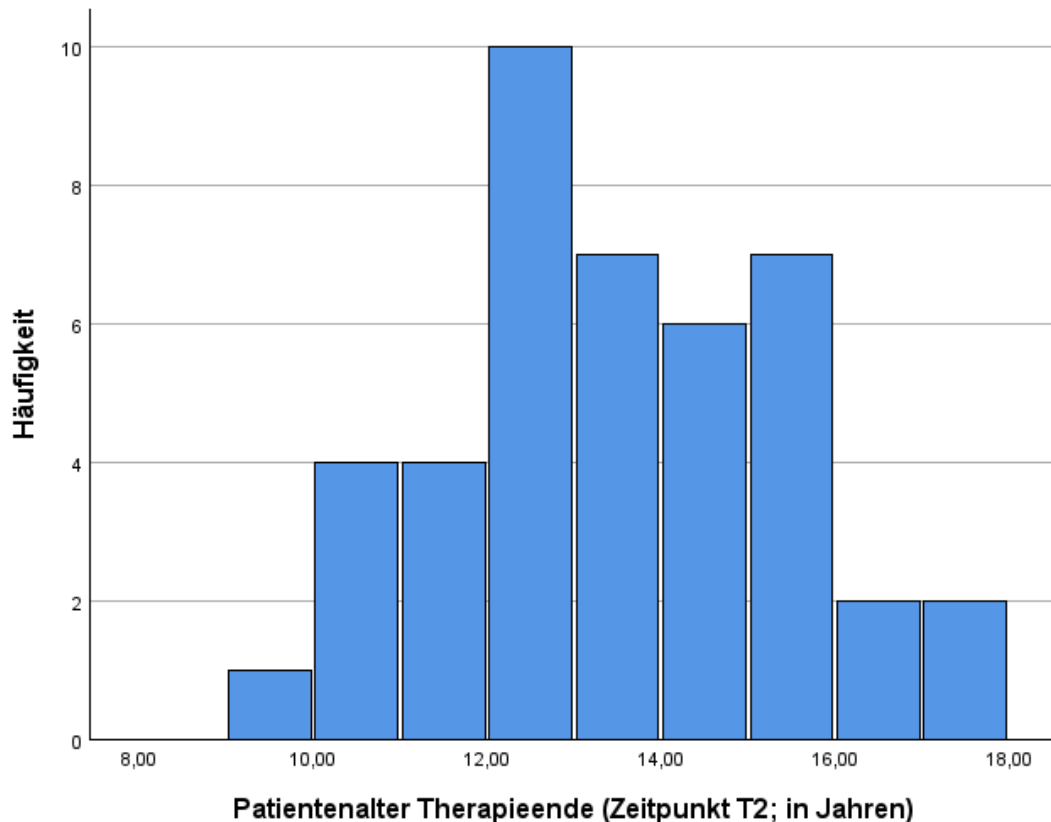


Abbildung 17: Histogramm zur Darstellung der Häufigkeitsverteilung des Patientenalters zu Therapieende (Zeitpunkt T2; in Jahren; MW = 13,6 Jahre, SD = 1,9, n = 43)

Geschlechterspezifische Altersverteilung

Die geschlechterspezifische Betrachtung in Tabelle 5 zeigt, dass das durchschnittliche Alter der männlichen Probanden zu Behandlungsbeginn (Zeitpunkt T1) mit einem gerundeten Wert von 12,7 Jahren (MW = 12,7 Jahre, SD = 2,0 Jahre, n = 24) statistisch nicht signifikant über dem Alter der weiblichen Probanden mit einem gerundeten Wert von 12,7 Jahren (MW = 12,7 Jahre, SD = 1,5 Jahre, n = 19) liegt (**Tabelle 5**). Zum Zeitpunkt T2 liegt das Alter der weiblichen Probandinnen mit durchschnittlich 13,7 Jahren und einer Standardabweichung von 1,6 Jahren statistisch nicht signifikant über dem Alter der männlichen Probanden mit durchschnittlich 13,5 Jahren bei einer Standardabweichung von 2,2 Jahren.

Tabelle 5: Patientenalter vor funktionskieferorthopädischer Therapie mittels Alignern mit Funktionselementen (T1) und nach funktionskieferorthopädischer Therapie mittels Alignern mit Funktionselementen (T2)

	N	T1 (MW $\pm$ SD in Jahren)	T2 (MW $\pm$ SD in Jahren)
gesamt	43	12,7 $\pm$ 1,8	13,6 $\pm$ 1,9
m	24	12,7 $\pm$ 2,0	13,5 $\pm$ 2,2
w	19	12,7 $\pm$ 1,5	13,7 $\pm$ 1,6
p Wert		0,897	0,777
Signifikanz		n.s.	n.s.

Das in **Abbildung 18** dargestellte Histogramm zur Darstellung der Häufigkeitsverteilung des Alters der männlichen Probanden ($n = 24$) zu Therapiebeginn (Zeitpunkt T1) zeigt den Mittelwert von 12,7 Jahren bei weitgehend symmetrischer Verteilung der Alterswerte. Die Perzentile zeigen, dass 25 % der männlichen Teilnehmer bei Therapiebeginn höchstens 10,9 Jahre alt sind. Der Median liegt bei 12,6 Jahren, sodass die Hälfte der Patienten jünger, die andere Hälfte der Patienten älter sind. 75 % der Patienten sind bei Behandlungsbeginn maximal 14,8 Jahre alt. Der Interquartilsabstand von 10,9 bis 14,8 Jahren umfasst die mittleren 50 % der Alterswerte. Es liegt eine moderate Streuung der Altersverteilung innerhalb der männlichen Stichprobe vor. Die geringe Differenz zwischen Mittelwert (12,7 Jahre) und Median (12,6 Jahre) deutet auf eine weitgehend symmetrische Verteilung der Alterswerte hin. Es ergeben sich aus den Perzentil Werten keine Hinweise auf eine ausgeprägte Schiefe oder starke Konzentration der Werte in einzelnen Altersbereichen.

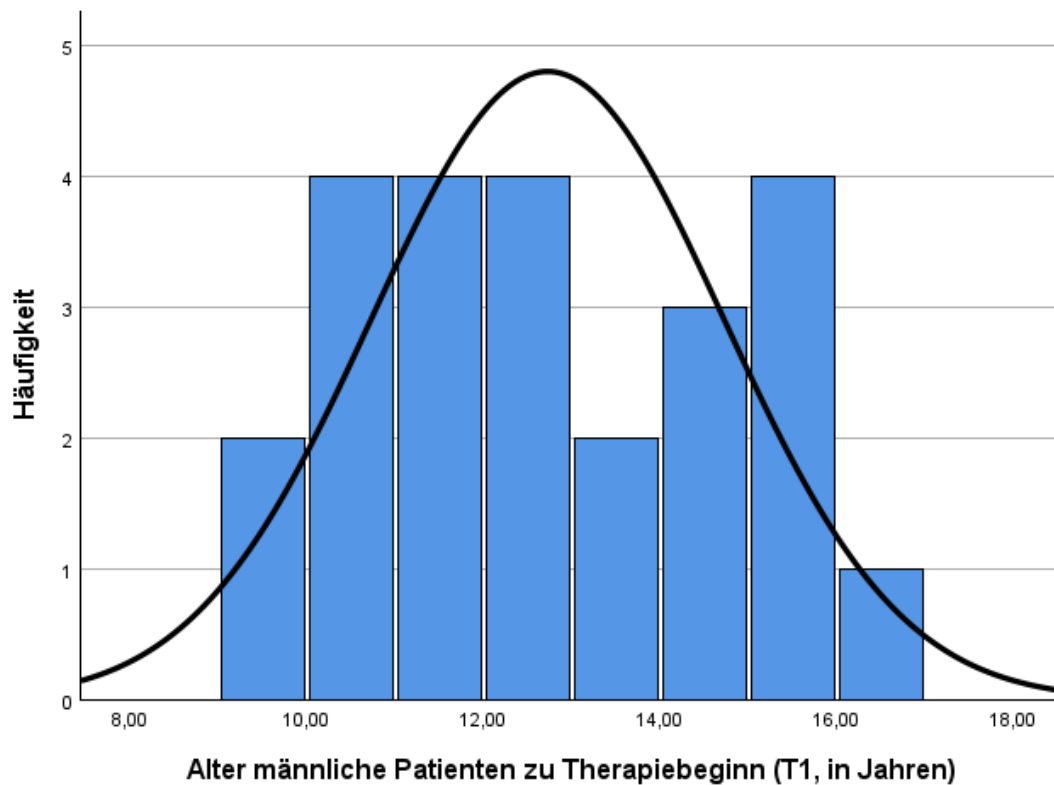


Abbildung 18: Histogramm zur Darstellung der Häufigkeitsverteilung des Alters der männlichen Probanden zu Therapiebeginn (T1; Alter in Jahren; MW = 12,7 Jahre, SD = 2,0 Jahre, n = 24)

Die Altersverteilung der weiblichen Probandinnen zu Therapiebeginn (Zeitpunkt T1) ist in Abbildung 19 dargestellt. Es zeigt sich eine annähernde Normalverteilung mit einem durchschnittlichen Alter von 12,7 Jahren (MW = 12,7 Jahre, SD = 1,5 Jahre, n = 19). Das Histogramm stellt einen Schwerpunkt im Altersbereich von 12 bis 13 Jahren dar, während deutlich niedrige bzw. höhere Alterswerte seltener vertreten sind. Die Quartilsanalyse zeigt ein 25. Perzentil von 11,7 Jahren, einen Median von 12,5 Jahren und ein 75. Perzentil von 13,5 Jahren. Somit liegen 50 % der Alterswerte in einem Interquartilsabstand von 1,8 Jahren. Es liegt eine geringe Streuung und eine homogene Verteilung innerhalb der weiblichen Stichprobe vor. Die geringe Abweichung von Mittelwert (12,7 Jahre) zu Median (12,5 Jahre) deutet auf keine ausgeprägte Schiefe oder

Ausreißer hin, sodass von einer symmetrischen Altersverteilung ausgegangen werden kann.

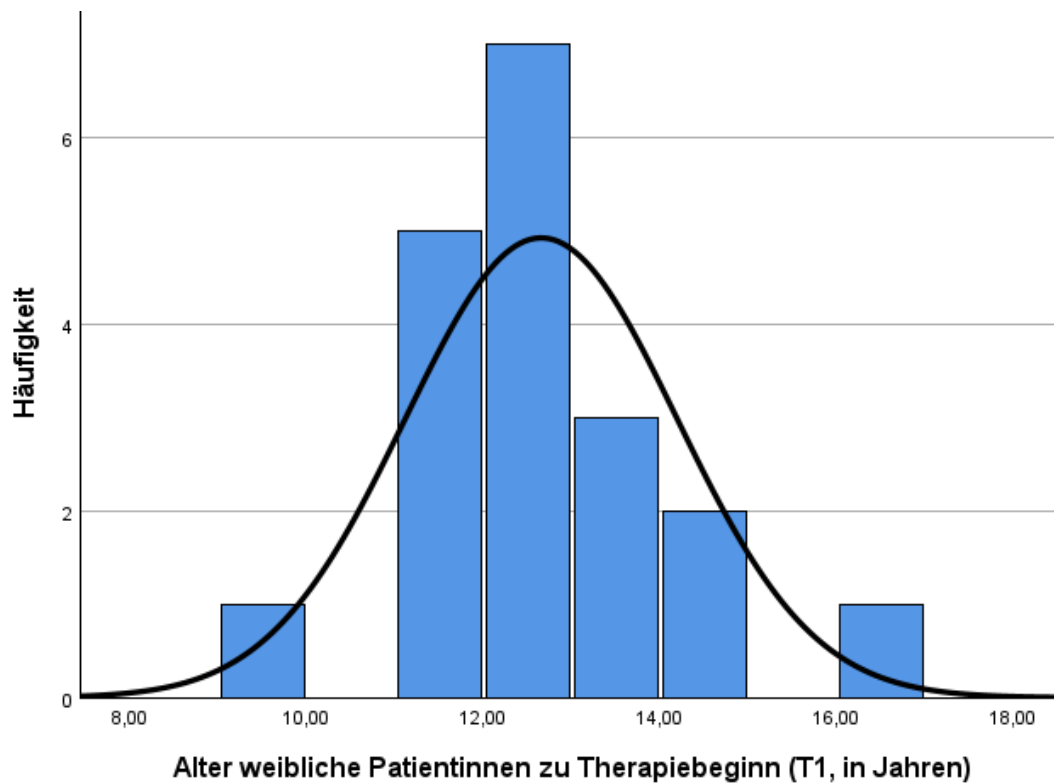


Abbildung 19: Histogramm zur Darstellung der Häufigkeitsverteilung des Alters der weiblichen Probandinnen zu Therapiebeginn (T1; Alter in Jahren; MW = 12,7 Jahre, SD = 1,5 Jahre, n = 19)

3.2 Analyse der Fernröntgenseitenbilder

3.2.1 Sagittale Veränderungen

SNA Winkel

Der SNA Winkel beträgt, wie in **Tabelle 6** dargestellt, bei den in dieser Studie ausgewerteten Probanden zum Zeitpunkt T1 vor funktionskieferorthopädischer Therapie durchschnittlich $81,2^\circ$ bei einer Standardabweichung von $3,7^\circ$. Nach funktionskieferorthopädischer Therapie zum Zeitpunkt T2 liegt der SNA Winkel im Durchschnitt bei $80,2^\circ$ bei einer Standardabweichung von $3,8^\circ$. Der Vergleich

der Messzeitpunkte T1 und T2 weist eine statistisch höchst signifikante Abnahme des SNA Winkels um $-1,0^\circ$ bei einer Standardabweichung von $1,2^\circ$ auf. Die Berechnung der Effektstärke nach Cohens d weist auf eine mittlere Effektstärke mit hoher klinischer Relevanz hin (Cohen's d = 0,768). Somit zeigen sich statistisch höchst signifikante Veränderungen der sagittalen Relation der Maxilla zur vorderen Schädelbasis.

Tabelle 6: Darstellung des Mittelwertes (MW) und der Standardabweichung (SD) des Winkels SNA zum Zeitpunkt T1 und T2; Veränderungen des Winkels SNA (T2-T1)

SNA	N	MW	SD	p-Wert	Signifikanz	Cohen's d	Effekt
T1	43	81,2	3,7				
T2	43	80,2	3,8				
T2-T1	43	-1,0	1,2	< 0,001	***	0,768	***

SNB Winkel

Der in **Tabelle 7** dargestellte SNB Winkel liegt zum Zeitpunkt T1 im Durchschnitt bei $75,9^\circ$ bei einer Standardabweichung von $3,5^\circ$, zum Zeitpunkt T2 bei $77,2^\circ$ bei einer Standardabweichung von $3,6^\circ$. Es zeigt sich eine höchst signifikante Veränderung im Sinne einer Vergrößerung des Winkels SNB um $1,3^\circ$ bei Standardabweichung $1,3^\circ$. Cohen's d zeigt mit 0,989 eine große Effektstärke mit hoher klinischer Relevanz. Somit liegt eine statistisch höchst signifikante Veränderung in der sagittalen Relation der Mandibula zur vorderen Schädelbasis vor.

Tabelle 7: Darstellung des Mittelwertes (MW) und der Standardabweichung (SD) des Winkels SNB zum Zeitpunkt T1 und T2; Veränderungen des Winkels SNA (T2-T1)

SNB	N	MW	SD	p-Wert	Signifikanz	Cohen's d	Effekt
T1	43	75,9	3,5				
T2	43	77,2	3,6				
T2-T1	43	1,3	1,3	< 0,001	***	0,989	****

ANB Winkel

Der in **Tabelle 8** dargestellte ANB Winkel liegt zum Zeitpunkt T1 vor Therapiebeginn der ANB Winkel im Durchschnitt bei $5,3^\circ \pm 1,2^\circ$ (MW = $5,3^\circ$, SD = $1,2^\circ$), was einer skelettalen Klasse II entspricht. Zum Zeitpunkt T2 zeigt sich ein ANB Winkel von $3,0^\circ$ (MW = $3,0^\circ$, SD = $1,4^\circ$). Die Verkleinerung des ANB Winkels um durchschnittlich $-2,3^\circ$ bei einer Standardabweichung von $1,0^\circ$ stellt sich als statistisch höchst signifikant dar. Cohen's d zeigt mit 2,340 eine große Effektstärke mit großer klinischer Relevanz. Somit zeigt sich eine statistisch höchst signifikante Veränderung der basalen sagittalen Verhältnisse von Maxilla und Mandibula zueinander.

Tabelle 8: Darstellung des Mittelwertes (MW) und der Standardabweichung (SD) des Winkels ANB zum Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen des Winkels ANB (T2-T1)

ANB	N	MW	SD	p-Wert	Signifikanz	Cohen's d	Effekt
T1	43	5,3	1,2				
T2	43	3,0	1,4				
T2-T1	43	-2,3	1,0	< 0,001	***	2,340	****

Die geschlechterspezifische Betrachtung der Veränderung des ANB Winkels zeigt keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen männlichen und weiblichen Patienten (**Tabelle 9**). Die männlichen Probanden weisen eine Reduktion des ANB Winkels von im Durchschnitt $-2,4^\circ$ auf (MW = $-2,4^\circ$, SD = $0,9^\circ$, n = 24), die weiblichen Probandinnen zeigen eine durchschnittliche Reduktion des ANB Winkels von $-2,0^\circ$ (MW = $-2,06^\circ$, SD = $1,1^\circ$, n = 19). Somit ist die durchschnittliche Veränderung des ANB Winkels im männlichen Patientenkollektiv geringfügig stärker als im weiblichen Patientenkollektiv, der Unterschied stellt sich jedoch als statistisch nicht signifikant dar.

Tabelle 9: Veränderung des ANB Winkels unterteilt nach männlichen (m) und weiblichen (w) Patienten

ANB	N	MW	SD	p-Wert	Signifikanz
T1-T2	43	-2,3	1,0		
m	24	-2,4	0,9		
w	19	-2,0	1,1	0,19	n.s.

Im Boxplot Diagramm (Abbildung 20) zeigt sich eine weitgehende Überlappung der Interquartilsabstände von männlichen und weiblichen Patienten in der Veränderung des ANB Winkels, sodass sich auch grafisch, weder in der Reduktion des ANB Winkels, noch in der Streuung der Werte, ein ausgeprägter Geschlechterunterschied erkennen lässt. Beide Gruppen weisen einzelne Ausreißer mit einer deutlich größeren Reduktion des ANB Winkels auf.

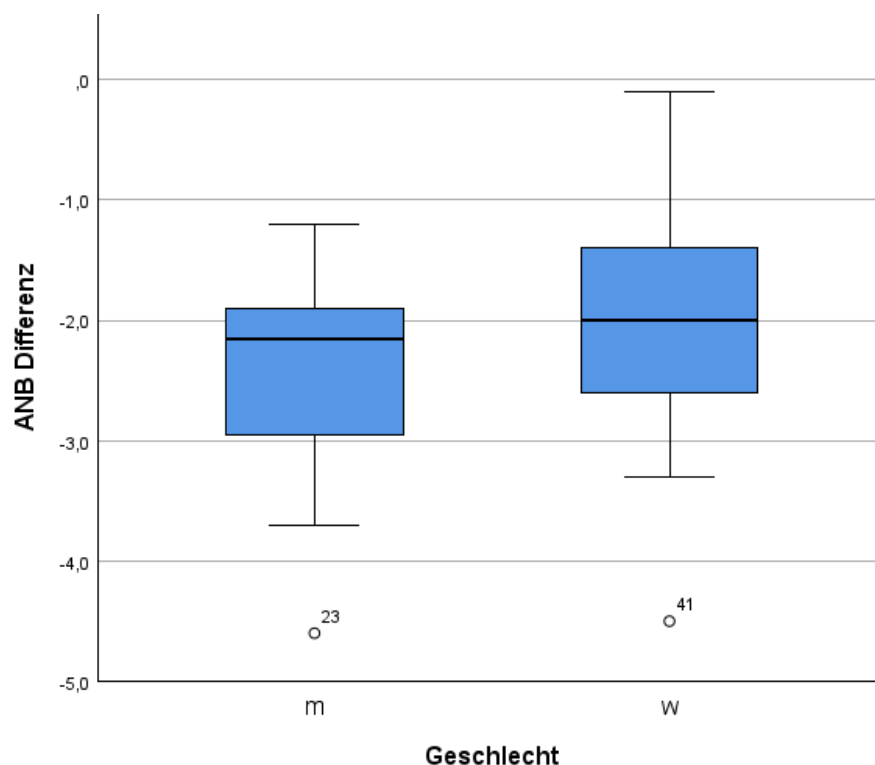


Abbildung 20: Boxplot zur Darstellung der geschlechterspezifischen Veränderungen des ANB Winkels (m = männlich bei n= 24, w = weiblich bei n = 19)

Zur genaueren Betrachtung der Veränderung des ANB Winkels in Abhängigkeit des Patientenalters wurden die Patienten in zwei Gruppen aufgeteilt. Die erste Gruppe besteht aus 21 Patienten, die zum Zeitpunkt T1 vor Therapiebeginn $\leq 12,5$ Jahre alt sind. Die zweite Gruppe besteht aus 22 Patienten, die zum Zeitpunkt T1 vor funktionskieferorthopädischer Therapie $> 12,5$ Jahre alt sind.

Tabelle 10 zeigt die statistischen Veränderungen des Winkels ANB in den jeweiligen Gruppen. Die Patientenkohorte, die zu Therapiebeginn $\leq 12,5$ Jahre alt ist, zeigt eine Verringerung des ANB Winkels um durchschnittlich $-2,2^\circ$ (MW = $-2,2^\circ$, SD = $1,0^\circ$, n = 21). Die Patientenkohorte, die zu Therapiebeginn $> 12,5$ Jahre alt ist, weist eine etwas größere Verringerung des ANB Winkels um durchschnittlich $-2,3^\circ$ auf (MW = $-2,3^\circ$, SD = $1,0^\circ$, n = 22). Die Differenz der Verringerung des ANB Winkels in den Gruppen stellt sich statistisch als nicht signifikant dar (p-Wert = 0,62).

Tabelle 10: Veränderung des ANB Winkels unterteilt nach altersspezifischen Gruppen (Gruppe 1: $\leq 12,5$ Jahre, Gruppe 2: $> 12,5$ Jahre)

ANB	N	MW	SD	p-Wert	Signifikanz
T2-T1	43	$-2,3^\circ$	$1,0^\circ$		
$\leq 12,5$	21	$-2,2^\circ$	$1,0^\circ$		
$> 12,5$	22	$-2,3^\circ$	$1,0^\circ$	0,62	n.s.

Abbildung 21 visualisiert die Verteilung der Veränderung des ANB Winkels in der Patientenkohorte mit frühem Therapiebeginn bei $\leq 12,5$ Jahren. Die Verteilung stellt sich als annähernd symmetrisch dar bei leichter Rechtsschiefe. Es sind keine ausgeprägten Ausreißer vorhanden. Der Mittelwert liegt bei $-2,2^\circ$ mit einer Standardabweichung von $1,0^\circ$ (MW = $-2,2^\circ$, SD = $1,0^\circ$, n = 21), sodass eine deutlich negative Verschiebung des ANB Winkels vorliegt. Die Werte gruppieren sich insgesamt in einem Bereich von $-4,1^\circ$ bis $-0,3^\circ$, wobei eine Bündelung entsprechend des Mittelwertes im Bereich von $-2,0^\circ$ vorliegt.

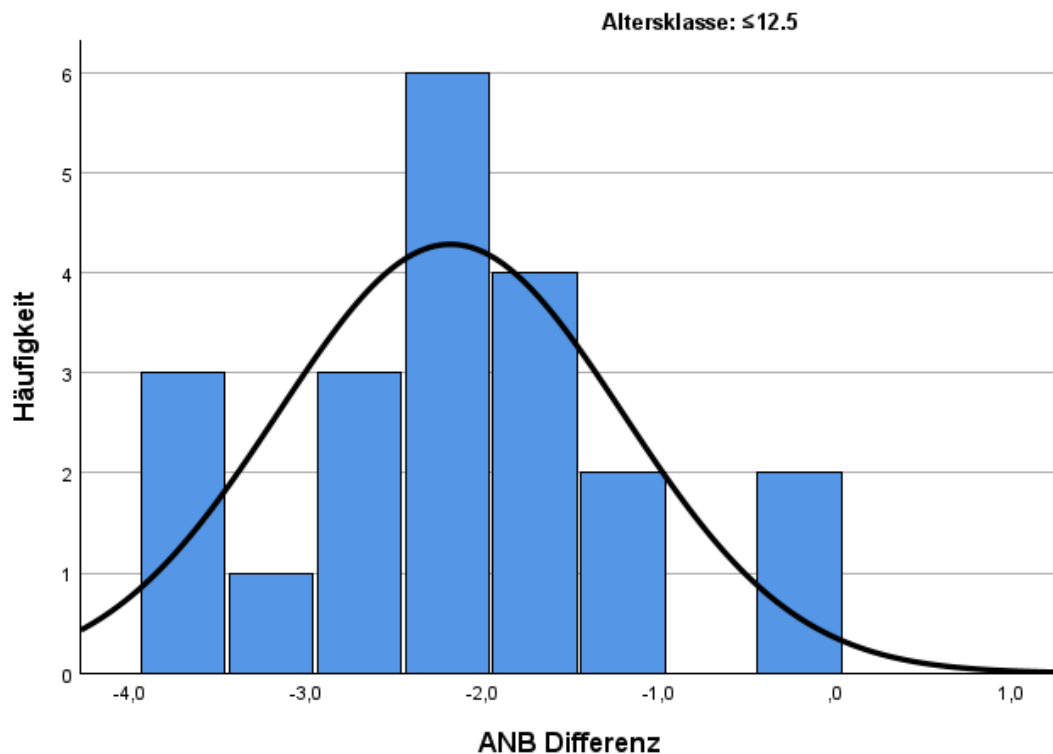


Abbildung 21: Histogramm zur Darstellung der Verteilung der ANB Differenzen in der Altersgruppe $\leq 12,5$ Jahre (MW = $-2,2^\circ$, SD = $1,0^\circ$, n = 21)

Abbildung 22 zeigt die Verteilung der ANB Differenz in der Altersgruppe $>12,5$ Jahre. Die ANB Differenz vom Zeitpunkt T1 zum Zeitpunkt T2 weist eine negative Verteilung auf, das heißt eine Verkleinerung des ANB Winkels um im Durchschnitt $-2,3^\circ$ auf bei einer Standardabweichung von $1,0^\circ$ (MW = $-2,3^\circ$, SD = $1,0^\circ$, N = 22). Die Verteilung zeigt eine Linksasymmetrie mit einer Schiefe von $-1,1$ bei einer erhöhten Kurtosis von $0,64$, was auf eine leicht zugespitzte, nicht vollständig symmetrische Verteilung hinweist. Insgesamt findet sich eine Häufung der Werte im Bereich von -2° , was eine klinisch relevante Größe darstellt. Es finden sich nur wenige stark abweichende Werte im stärker negativen Bereich mit deutlich größerer Verringerung des ANB Winkels.

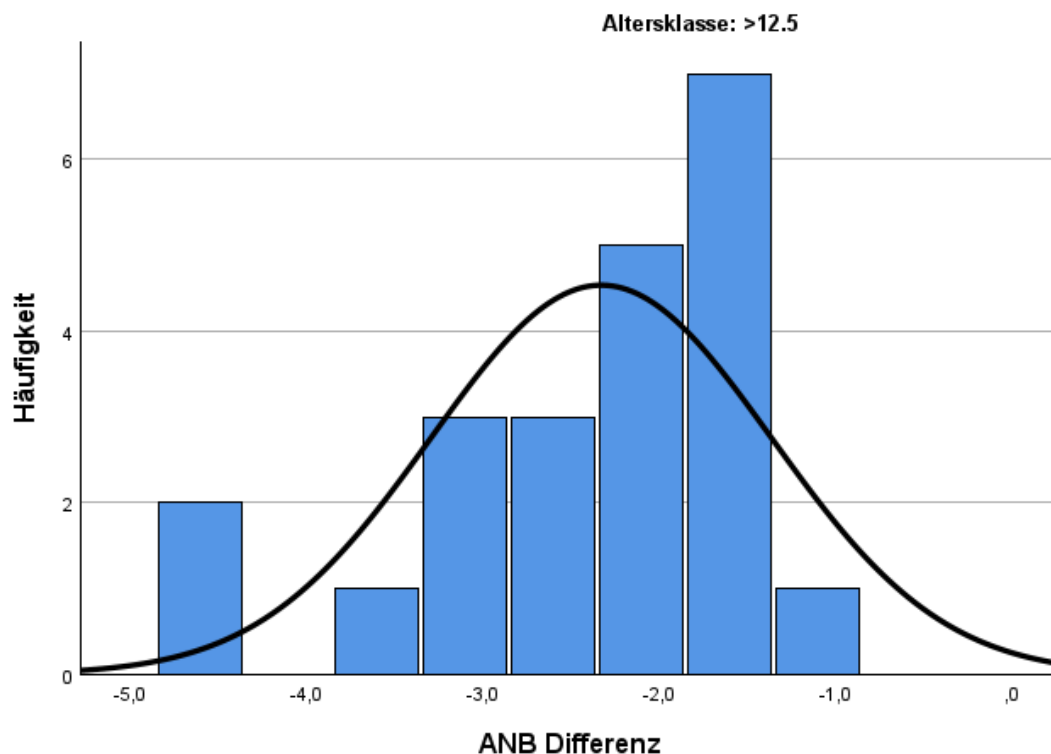


Abbildung 22: Histogramm zur Darstellung der Verteilung der ANB Differenzen in der Altersgruppe >12,5 Jahre (MW = -2,3°, SD = 1,0°, n = 22)

Die weitere Unterteilung der weiblichen und männlichen Probanden in Gruppen mit jeweils frühem Behandlungsbeginn ($\leq 12,5$ Jahre) und spätem Behandlungsbeginn ($> 12,5$ Jahre) ist in **Abbildung 23** dargestellt. Die weiblichen Stichproben weisen eine weitgehende Überlappung der Interquartilsabstände auf, wobei die Gruppe mit späterem Behandlungsbeginn ($> 12,5$ Jahre) eine breitere Streuung mit geringfügig stärkerer Reduktion des ANB Winkels aufweist. Auch die männlichen Probanden zeigen eine weitgehende Überlappung der Interquartilsabstände, die Verringerung des ANB Winkels ist jedoch bei frühem Behandlungsbeginn ($\leq 12,5$ Jahre) geringfügig stärker als bei spätem Behandlungsbeginn. Trotz geringer grafischer Unterschiede lassen sich statistisch keine signifikanten Unterschiede zwischen den männlichen und weiblichen Gruppen mit frühem ($\leq 12,5$ Jahre) oder spätem Behandlungsbeginn ($> 12,5$ Jahre) feststellen.

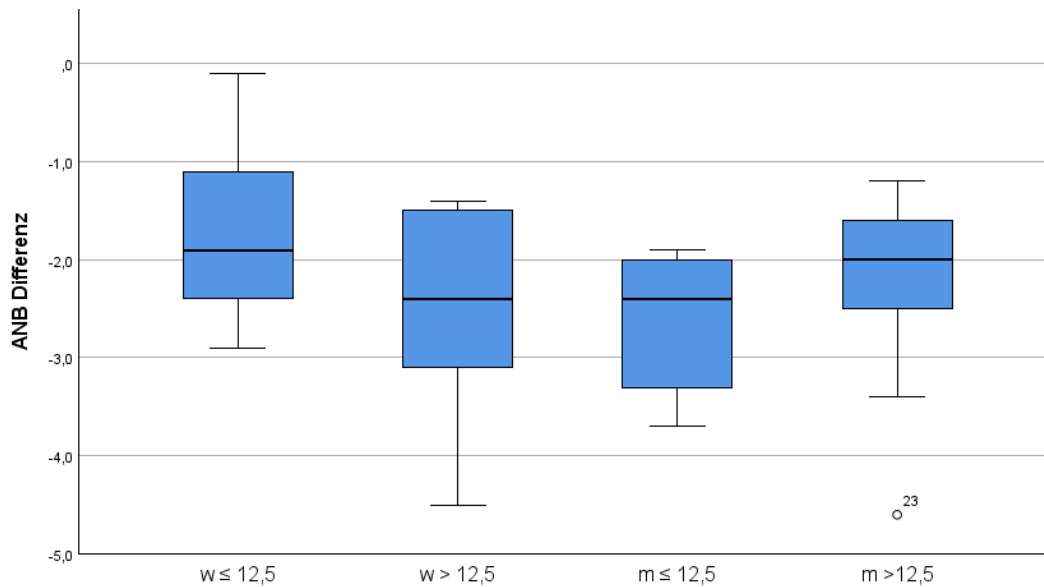


Abbildung 23: Boxplot zur Darstellung der geschlechter- und altersspezifischen Veränderungen des ANB Winkels

SnPg Winkel

Die statistischen Veränderungen des Winkels SnPg sind in **Tabelle 11** dargestellt. Zum Zeitpunkt T1 liegt der SnPg Winkel im Durchschnitt bei 77,2° bei einer Standardabweichung von 3,6°. Zum Zeitpunkt T2 zeigt sich ein SnPg Winkel von im Durchschnitt 77,9° bei einer Standardabweichung von 3,7°. Die Veränderung von 0,7° (MW = 0,7°, SD = 1,5°) stellt sich als statistisch signifikant dar. Cohen's d zeigt mit 0,461 eine geringe Effektstärke. Somit zeigt sich eine statistisch signifikante Veränderung in der sagittalen Relation des knöchernen Pogonions zur vorderen Schädelbasis.

Tabelle 11: Darstellung des Mittelwertes (MW) und der Standardabweichung (SD) des Winkels SnPg zum Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen des Winkels SnPg (T2-T1)

SnPg	N	MW	SD	p-Wert	Signifikanz	Cohen's d	Effekt
T1	43	77,2	3,6				
T2	43	77,9	3,7				
T2-T1	43	0,7	1,5	0,004	**	0,461	**

Skelettale Klassen

Zum Zeitpunkt T1, vor funktionskieferorthopädischer Therapie, liegt bei allen Patienten ($n = 43$), gemäß den Einschlusskriterien, eine skelettale Klasse II vor (**Abbildung 24, Tabelle 12**). Nach funktionskieferorthopädischer Therapie mittels Alignern mit Funktionselementen liegt zum Zeitpunkt T2 bei 76,7 % der Probanden ($n = 33$) eine skelettale Klasse I vor, bei 20,9 % ($n = 9$) persistiert eine skelettale Klasse II und bei 2,3 % der Patienten ($n = 1$) liegt eine skelettale Klasse III vor (**Abbildung 25, Tabelle 12**).

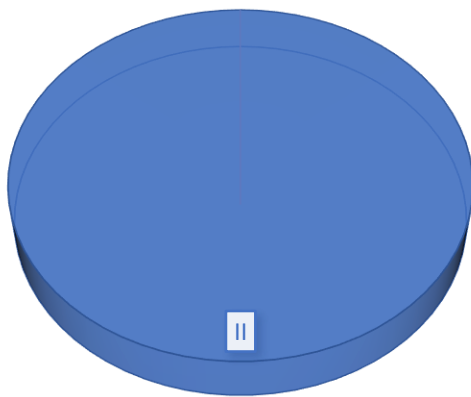


Abbildung 24: Kreisdiagramm zur Darstellung der Anteile der skelettalen Klassen vor funktionskieferorthopädischer Therapie (Zeitpunkt T1)

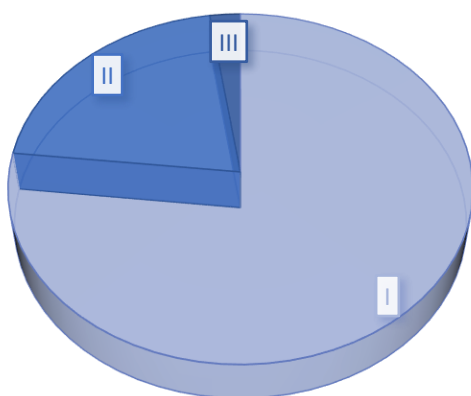


Abbildung 25: Kreisdiagramm zur Darstellung der Anteile der skelettalen Klassen nach funktionskieferorthopädischer Therapie (Zeitpunkt T2)

Tabelle 12: Darstellung der Anteile der verschiedenen skelettale Klassen (I, II, III) zu den Zeitpunkten T1 und T2

	N	I		II		III	
		N	%	N	%	N	%
T1	43			43	100		
T2	43	33	76,7	9	20,9	1	2,3

Individualisierte skelettale Klassen

Zum Zeitpunkt T1 vor funktionskieferorthopädischer Therapie, wie in **Tabelle 13** und **Abbildung 26** dargestellt, liegt bei 83,7 % der Patienten (n = 36) eine individualisierte skelettale Klasse II vor, bei 16,3 % der Patienten (n = 7) liegt bereits eine individualisierte skelettale Klasse I vor.

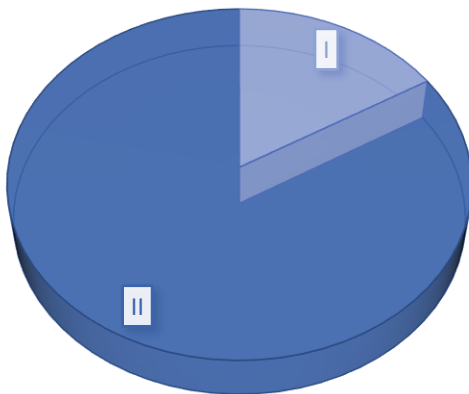


Abbildung 26: Kreisdiagramm zur Darstellung der Verteilung der individualisierten skelettalen Klassen zum Zeitpunkt T1

Tabelle 13: individualisierte skelettale Klassen (I, II, III) zum Zeitpunkt T1 und T2

	N	Indiv I		Indiv II		Indiv III	
		N	%	N	%	N	%
T1	43	7	16,3	36	83,7		
T2	43	33	76,7	5	11,6	5	11,6

In **Abbildung 27** ist die Verteilung der individualisierten Klassen zum Zeitpunkt T2 nach funktionskieferorthopädischer Therapie dargestellt. 76,7 % der Probanden (n = 33) weisen eine individualisierte skelettale Klasse I auf, bei 11,6 % persistiert eine individualisierte skelettale Klasse II, bei 11,6 % (n = 5) liegt eine individualisierte skelettale Klasse III (n = 5) (**Tabelle 13**).

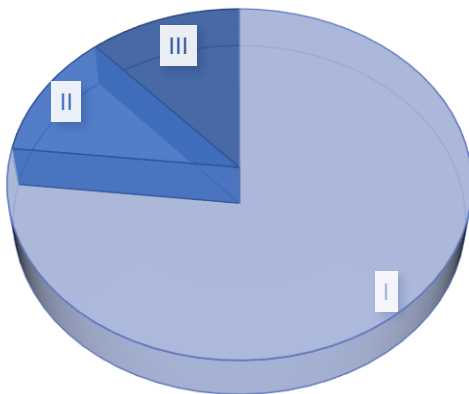


Abbildung 27: Kreisdiagramm zur Darstellung der Verteilung der individualisierten skelettalen Klassen zum Zeitpunkt T2

3.2.2 Vertikale Veränderungen

NSBa Winkel

In **Tabelle 14** sind die Veränderungen des Winkels NSBa von Zeitpunkt T1 zu T2 dargestellt. Zum Zeitpunkt T1 liegt bei den Probanden im Median ein NSBa Winkel von $132,7^\circ$ vor. Nach funktionskieferorthopädischer Therapie zum Zeitpunkt T2 liegt der Median des NSBa Winkels bei $132,1^\circ$. Die 25. Perzentile weichen mit $128,2^\circ$ (Zeitpunkt T1) und $128,5^\circ$ (Zeitpunkt T2) nur geringfügig voneinander ab. Die 75. Perzentile weisen mit $134,7^\circ$ (Zeitpunkt T1) und $135,3^\circ$ (Zeitpunkt T2) keine signifikante Veränderung auf. Die Veränderung von Zeitpunkt T1 zu T2 um $0,1^\circ$ stellt sich statistisch als nicht signifikant dar. Somit zeigt sich keine statistisch signifikante Veränderung des Schädelbasiswinkels.

Tabelle 14: Darstellung der Mediane und der Perzentile des Winkels NSBa zum Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen des Winkels NSBa (T2-T1)

NSBa	N	min	25 %	Median	75 %	max	p Wert	Signifikanz
T1	43	125,1	128,2	132,7	134,7	146,0		
T2	43	122,3	128,5	132,1	135,3	145,7		
T2-T1	43	-10,1	-0,6	0,1	1,30	5,8	0,574	n.s.

GnGoAr Winkel

Tabelle 15 zeigt die statistischen Veränderungen des Winkels GnGoAr zu den Zeitpunkten T1 und T2. Der Median des Winkels GnGoAr beträgt zum Zeitpunkt T1 120,8°. Zum Zeitpunkt T2 zeigt sich ein Median des GnGoAr Winkels von 119,1°. Die Veränderung im Median von Zeitpunkt T1 zu Zeitpunkt T2 um -0,9° entspricht einer statistisch signifikanten Veränderung. Die 25. Perzentile liegt zum Zeitpunkt T1 bei 116,4°, zum Zeitpunkt 116,6°. Die 75. Perzentile beträgt zum Zeitpunkt T1 126,9°, zum Zeitpunkt T2 beträgt sie 125,0°. Somit lässt sich sagen, dass sich der Kieferwinkel GnGoAr statistisch signifikant verkleinert und damit zu einer signifikanten Veränderung der vertikalen Relation beiträgt.

Tabelle 15: Darstellung der Mediane und der Perzentile des Winkels GnGoAr zum Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen des Winkels GnGoAr (T2-T1)

GnGoAr	N	min	25 %	Median	75 %	max	p Wert	Signifikanz
T1	43	104,7	116,4	120,8	126,9	141,4		
T2	43	104,6	116,1	119,1	125,0	138,8		
T2-T1	43	-12,7	-2,3	-0,9	1,2	4,7	0,047	*

NL-NSL Winkel

Tabelle 16 zeigt die Veränderungen des Winkels NL-NSL zu den Zeitpunkten T1 und T2. Zum Zeitpunkt T1 vor Therapiebeginn beträgt der Winkel NL-NSL im

Durchschnitt $8,7^{\circ}$ bei einer Standardabweichung von $3,7^{\circ}$. Nach funktionskieferorthopädischer Therapie liegt der NL-NSL Winkel im Durchschnitt bei $9,0^{\circ}$ bei einer Standardabweichung von $3,6^{\circ}$. Die Vergrößerung des Winkels NL-NSL von Zeitpunkt T1 zu Zeitpunkt T2 um $0,3^{\circ}$ (MW = $0,3^{\circ}$, SD = $1,5^{\circ}$) stellt keine statistisch signifikante Veränderung dar. Cohen's d zeigt mit 0,180 ebenfalls eine sehr geringe Effektstärke. Somit zeigt sich keine signifikante Veränderung der vertikalen basalen Verhältnisse in Bezug auf die Unterkieferbasis.

Tabelle 16: Darstellung des Mittelwertes (MW) und der Standardabweichung (SD) des Winkels NL-NSL zum Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen des Winkels NL-NSL (T2-T1)

NL-NSL	N	MW	SD	p-Wert	Signifikanz	Cohen's d	Effekt
T1	43	8,7	3,7				
T2	43	9,0	3,6				
T2-T1	43	0,3	1,5	0,245	n.s.	0,180	*

ML-NSL Winkel

Tabelle 17 stellt die kephalometrischen Veränderungen des Winkels ML-NSL dar. Der Winkel ML-NSL liegt vor Therapiebeginn zum Zeitpunkt T1 im Durchschnitt bei $31,1^{\circ}$ bei einer Standardabweichung von $5,6^{\circ}$. Nach funktionskieferorthopädischer Therapie zum Zeitpunkt T2 liegt der Winkel ML-NSL bei $31,3^{\circ}$ bei einer Standardabweichung von $5,8^{\circ}$. Die Veränderung von Zeitpunkt T1 zu Zeitpunkt T2 um $0,2^{\circ}$ (MW = $0,2^{\circ}$, SD = $2,0^{\circ}$) stellt sich als statistisch nicht signifikant dar. Cohen's d weist mit 0,067 auf eine sehr geringe Effektstärke hin. Somit zeigt sich keine statistisch signifikante Veränderung der vertikalen basalen Verhältnisse in Bezug auf das Oberkieferplanum.

Tabelle 17: Darstellung des Mittelwertes (MW) und der Standardabweichung (SD) des Winkels ML-NSL zum Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen des Winkels ML-NSL (T2-T1)

ML-NSL	N	MW	SD	p-Wert	Signifikanz	Cohen's d	Effekt
T1	43	31,1	5,6	0,662	n.s.	0,067	*
T2	43	31,3	5,8				
T2-T1	43	0,2	2,0				

ML-NL Winkel

Tabelle 18 stellt die Veränderungen des Winkels ML-NL statistisch dar. Der Winkel ML-NL liegt zum Zeitpunkt T1 vor Therapiebeginn im Durchschnitt bei 22,4° bei einer Standardabweichung von 5,6°. Zum Zeitpunkt T2 nach funktionskieferorthopädischer Therapie liegt der Winkel ML-NL bei 22,3° bei einer Standardabweichung von 5,3°. Von Beginn bis Ende der funktionskieferorthopädischen Therapie findet eine Verringerung des Winkels ML-NL um -0,1° statt (MW = -0,1°, SD = 1,9°), was einer statistisch nicht signifikanten Veränderung entspricht. Auch Cohen's d ergibt bei 0,061 eine sehr geringe Effektstärke mit geringer klinischer Relevanz. Somit zeigen sich keine statistisch signifikanten Veränderungen in der basalen vertikalen Relation der Ober- und Unterkieferbasen zueinander unter funktionskieferorthopädischer Therapie mittels Alignern mit Funktionselementen.

Tabelle 18: Darstellung des Mittelwertes (MW) und der Standardabweichung (SD) des Winkels ML-NL zum Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen des Winkels ML-NL (T2-T1)

ML-NL	N	MW	SD	p-Wert	Signifikanz	Cohen's d	Effekt
T1	43	22,4	5,6	0,691	n.s.	0,061	*
T2	43	22,3	5,3				
T2-T1	43	-0,1	1,9				

N-Sp´ Strecke

In **Tabelle 19** sind die kephalometrischen Werte zu den Zeitpunkten T1 und T2, sowie die Veränderung von T1 zu T2 dargestellt. Die Strecke N-Sp´ beträgt vor Therapiebeginn zum Zeitpunkt T1 im Median 48,4 mm. Nach funktionskieferorthopädischer Therapie zum Zeitpunkt T2 liegt die Strecke im Median bei 49,0 mm. Die Zunahme um im Median 0,6 mm entspricht einer statistisch höchst signifikanten Veränderung. Die 25. Perzentile vergrößert sich von 46,3 mm zum Zeitpunkt T1 um 6,5 mm auf 43,1 mm zum Zeitpunkt T2. Die 75. Perzentile vergrößert sich von 50,5 mm zum Zeitpunkt T1 auf 51,8 mm zum Zeitpunkt T2 um 1,9 mm. Somit zeigt sich eine statistisch höchst signifikante Veränderung in der vertikalen Relation im Sinne einer Vergrößerung der Strecke Nasion – Spina Strich.

Tabelle 19: Darstellung der Mediane und der Perzentile der Strecke N-Sp´ zum Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen der Strecke N-Sp´ (T2-T1)

N-Sp´	N	min	25 %	Median	75 %	max	p Wert	Signifikanz
T1	43	36,6	46,3	48,4	50,5	55,8		
T2	43	43,1	47,9	49,0	51,8	57,7		
T2-T1	43	6,5	1,6	0,6	1,3	1,9	<0,001	***

Sp´-Gn Strecke

Tabelle 20 zeigt die Werte der Strecke Sp´-Gn zum Zeitpunkt T1 und T2, sowie die Veränderungen (T2-T1). Die Strecke Sp´-Gn beträgt zum Zeitpunkt T1 vor funktionskieferorthopädischer Therapie im Median 55,9 mm. Zum Zeitpunkt T2 nach funktionskieferorthopädischer Therapie beträgt die Strecke im Median 58,8 mm. Die Vergrößerung um 2,9 mm stellt eine statistisch höchst signifikante Veränderung dar. Die 25. Perzentile vergrößert sich um 0,3 mm von 46,5 mm zum Zeitpunkt T1 auf 46,8 mm zum Zeitpunkt T2. Die 75. Perzentile vergrößert sich von 59,2 mm zum Zeitpunkt T1 auf 73,7 mm zum Zeitpunkt T2. Somit zeigt

sich eine statistisch höchst signifikante Veränderung der vertikalen Relation in Bezug auf die Strecke Spina Strich – Gnathion.

Tabelle 20: Darstellung der Mediane und der Perzentile der Strecke Sp'-Gn zum Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen der Strecke Sp'-Gn (T2-T1)

Sp'-Gn	N	min	25 %	Median	75 %	max	p Wert	Signifikanz
T1	43	46,5	53,7	55,9	59,2	71,3		
T2	43	46,8	55,0	58,8	63,4	73,7		
T2-T1	43	0,3	1,7	2,9	4,2	2,4	<0,001	***

Index

Tabelle 21 zeigt die Werte des Index zu den Zeitpunkten T1 und T2, sowie die Veränderungen von T1 nach T2 (T2-T1). Der Index liegt zum Zeitpunkt T1 bei Therapiebeginn im Durchschnitt bei 84,9 % bei einer Standardabweichung von 7,4 %. Nach funktionskieferorthopädischer Therapie zum Zeitpunkt T2 liegt der Index bei 83,2 % bei einer Standardabweichung von 7,8 %. Die Verringerung um -1,7 % (MW = -1,7 %, SD = 3,7 %) stellt eine statistisch hoch signifikante Veränderung dar. Cohen's d zeigt mit 0,448 eine geringe bis mittlere Effektstärke an. Somit zeigen sich statistisch signifikante Veränderungen in der Vertikalen im Sinne einer Vergrößerung der vorderen unteren Gesichtshöhe.

Tabelle 21: Darstellung des Mittelwertes (MW) und der Standardabweichung (SD) des Index zum Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen des Index (T2-T1)

Index	N	MW	SD	p-Wert	Signifikanz	Cohen's d	Effekt
T1	43	84,9	7,4				
T2	43	83,2	7,8				
T2-T1	43	-1,7	3,7	0,005	**	0,448	**

Tabelle 22 stellt die Indizes N, O und T in ihrer Häufigkeit zum Zeitpunkt T1 vor funktionskieferorthopädischer Therapie und zum Zeitpunkt T2 nach

funktionskieferorthopädischer Therapie dar. Zum Zeitpunkt T1 zeigen 67,4 % der Probanden einen Index N (n = 29), 4,7 % weisen einen Index O auf (n = 2) und in 27,9 % der Fälle liegt der Index T (n = 12) vor. Zum Zeitpunkt T2 vergrößert sich der Anteil der Probanden, die einen Index N aufweisen um 9,3 % auf 76,7 % (n = 33), der Anteil an Index O verändert sich mit 4,7 % (n = 2) nicht und das Auftreten des Index T verringert sich um 9,3 % auf 18,6 % (n = 8).

Tabelle 22: prozentuale Anteile der Indizes (N, O, T) zu den Zeitpunkten T1 und T2

	Index N			Index O		Index T	
	N	N	%	N	%	N	%
T1	43	29	67,4	2	4,7	12	27,9
T2	43	33	76,7	2	4,7	8	18,6

In Abbildung 28 wird im Balkendiagramm grafisch die Veränderungen der Indices zu den Zeitpunkten T1 und T2 verdeutlicht: Index N zeigt eine deutliche Zunahme (n = 29 zum Zeitpunkt T1, n = 33 zum Zeitpunkt T2), Index O stagniert von Zeitpunkt T1 zu T2 und zeigt keine Veränderung, während Index O eine deutliche Abnahme zeigt (n = 12 zum Zeitpunkt T1, n = 8 zum Zeitpunkt T2).

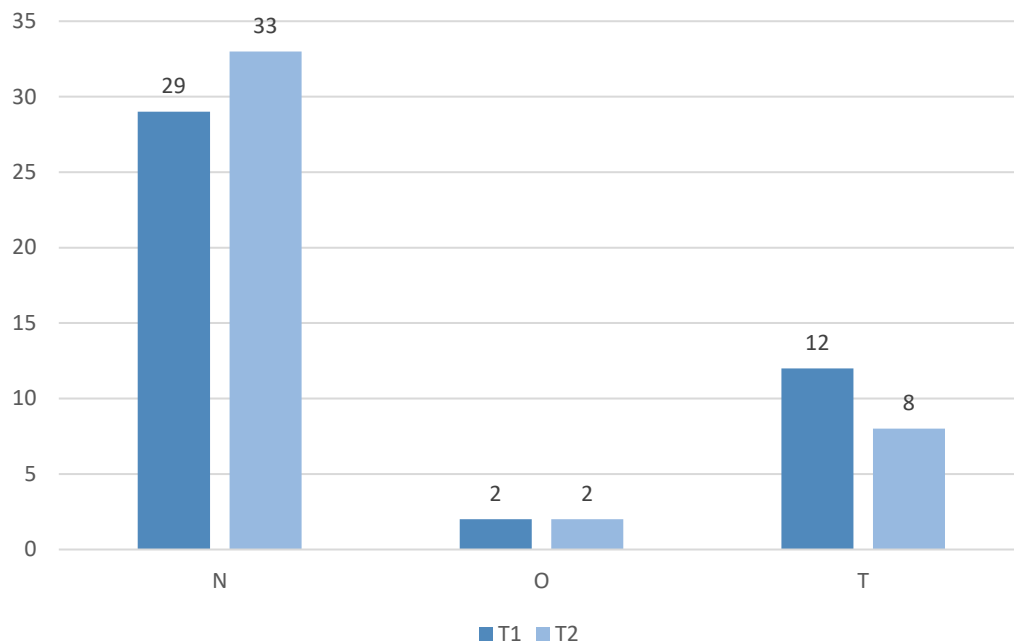


Abbildung 28: Balkendiagramm zur Darstellung der Veränderung der Anteile der Indizes N, O und T zu den Zeitpunkten T1 und T2

3.2.3 Dentale Veränderungen

Interinzisalwinkel

Tabelle 23 stellt die kephalometrischen Werte des Interinzisalwinkels zu den Zeitpunkten T1 und T2, sowie die Veränderung von T1 nach T2 dar. Der Interinzisalwinkel liegt zum Zeitpunkt T1 im Mittelwert bei $131,3^\circ$ bei einer Standardabweichung von $10,5^\circ$. Zum Zeitpunkt T2 nach funktionskieferorthopädischer Therapie beträgt der Interinzisalwinkel im Durchschnitt $133,6^\circ$ bei einer Standardabweichung von $6,2^\circ$. Die Vergrößerung des Winkels um durchschnittlich $2,3^\circ$ ($MW = 2,3^\circ$, $SD = 8,7^\circ$) stellt sich als statistisch nicht signifikant dar. Auch Cohen's d zeigt mit 0,261 eine geringe Effektstärke. Somit zeigen sich keine signifikanten dentalen Veränderungen in der kephalometrischen Analyse in Bezug auf den Interinzisalwinkel.

Tabelle 23: Darstellung des Mittelwertes (MW) und der Standardabweichung (SD) des Interinzisalwinkels zum Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen des Interinzisalwinkels (T2-T1)

Interinzisal	N	MW	SD	p-Wert	Signifikanz	Cohen's d	Effekt
T1	43	131,3	10,6				
T2	43	133,6	6,2				
T2-T1	43	2,3	8,7	0,094	n.s.	0,261	**

OK1-NA Winkel

Tabelle 24 fasst die kephalometrischen Werte des Winkels OK1-NA zu den Zeitpunkten T1 und T2 zusammen. Der OK1-NA Winkel liegt zu Therapiebeginn (T1) bei einem Mittelwert von 18,9° bei einer Standardabweichung von 7,3°. Nach funktionskieferorthopädischer Therapie zum Zeitpunkt T2 liegt der Mittelwert bei 18,4° bei einer Standardabweichung von 4,9°. Die durchschnittliche Verkleinerung des Winkels um -0,5° (MW = -0,5°, SD = 6,5°) stellt sich statistisch als nicht signifikant dar. Auch Cohen's d zeigt eine sehr geringe Effektstärke an bei 0,078. Somit zeigt sich keine signifikante dentoalveoläre Veränderung der Inklination der Oberkiefer Inzisiven unter funktionskieferorthopädischer Therapie mittels Alignern mit Funktionselementen.

Tabelle 24: Darstellung des Mittelwertes (MW) und der Standardabweichung (SD) des Winkels OK1-NA zum Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen des Winkels OK1-NA (T2-T1)

OK1-NA	N	MW	SD	p-Wert	Signifikanz	Cohen's d	Effekt
T1	43	18,9	7,3				
T2	43	18,4	4,9				
T2-T1	43	-0,5	6,5	0,611	n.s.	0,078	*

UK1-NB Winkel

Tabelle 25 stellt die kephalometrischen Werte des Winkels UK1-NB zu den Zeitpunkten T1 und T2 dar. Der UK1-NB Winkel beträgt zum Zeitpunkt T1 durchschnittlich 24,6° bei einer Standardabweichung von 6,2°. Zum Zeitpunkt T2 zeigt sich ein durchschnittlicher Wert von 24,9° bei einer Standardabweichung von 5,1°. Die Vergrößerung des Winkels um 0,4° (MW = 0,4°, SD = 5,2°) ist statistisch nicht signifikant. Cohen's d weist mit 0,072 auf eine sehr geringer Effektstärke hin. Somit zeigt sich in der vorliegenden statistischen Analyse keine signifikante dentoalveoläre Veränderung der Inklination der Unterkiefer Inzisiven unter funktionskieferorthopädischer Therapie mittels Alignern mit Funktionselementen.

Tabelle 25: Darstellung des Mittelwertes (MW) und der Standardabweichung (SD) des Winkels UK1-NB zum Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen des Winkels UK1-NB (T2-T1)

UK1-NB	N	MW	SD	p-Wert	Signifikanz	Cohen's d	Effekt
T1	43	24,6	6,2				
T2	43	24,9	5,1				
T2-T1	43	0,4	5,2	0,640	n.s.	0,072	*

OK1-NA Strecke

In **Tabelle 26** sind die kephalometrischen Werte der Strecke OK1-NA zu den Zeitpunkten T1 und T2, sowie die Veränderung von T1 nach T2 dargestellt. Die OK1-NA Strecke zeigt vor Therapiebeginn zum Zeitpunkt T1 einen durchschnittlichen Wert von 2,2 mm bei einer Standardabweichung von 2,2 mm. Nach funktionskieferorthopädischer Therapie zum Zeitpunkt T2 zeigt sich ein Mittelwert von 3,0 mm bei einer Standardabweichung von 1,6 mm. Die Vergrößerung der Strecke um 0,8 mm (MW = 0,8 mm, SD = 1,7 mm) stellt sich statistisch hoch signifikant dar. Cohen's d zeigt mit 0,442 eine eher geringe

Effektstärke. Somit zeigt sich eine signifikante dentoalveoläre Veränderung im Sinne einer Protrusion der Oberkiefer Inzisiven.

Tabelle 26: Darstellung des Mittelwertes (MW) und der Standardabweichung (SD) der Strecke OK1-NA zum Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen der Strecke OK1-NA (T2-T1)

OK1-NA	N	MW	SD	p-Wert	Signifikanz	Cohen's d	Effekt
T1	43	2,2	2,2				
T2	43	3,0	1,6				
T2-T1	43	0,8	1,7	0,006	**	0,442	**

UK1-NB Strecke

Tabelle 27 fasst die kephalometrischen Werte der Strecke UK1-NB zu den Zeitpunkten T1, T2 und die Veränderung T2-T1 zusammen. Die durchschnittliche UK1-NB Strecke liegt zu Therapiebeginn (T1) bei 4,4 mm bei einer Standardabweichung von 2,1 mm. Nach funktionskieferorthopädischer Therapie zum Zeitpunkt T2 beträgt die Strecke 4,4 mm bei einer Standardabweichung von 1,8 mm. Die Verkleinerung der Strecke um durchschnittlich -0,1 mm bei einer Standardabweichung von 1,4 mm stellt sich statistisch nicht signifikant dar. Cohen's d zeigt mit 0,043 eine sehr geringe Effektstärke. Somit zeigt die statistische Analyse der Unterkiefer Frontzahnposition keine signifikante Veränderung unter funktionskieferorthopädischer Therapie mittels Alignern mit Funktionselementen.

Tabelle 27: Darstellung des Mittelwertes (MW) und der Standardabweichung (SD) der Strecke UK1-NB zum Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen der Strecke UK1-NB (T2-T1)

UK1-NB	N	MW	SD	p-Wert	Signifikanz	Cohen's d	Effekt
T1	43	4,4	2,1				
T2	43	4,4	1,8				
T2-T1	43	-0,1	1,4	0,391	n.s.	0,043	*

Pg-NB Strecke

Tabelle 28 stellt die kephalometrischen Werte der Strecke Pg-NB zu den Zeitpunkten T1, T2 und T2-T1 dar. Die Pg-NB Strecke liegt vor Therapiebeginn zum Zeitpunkt T1 im Durchschnitt bei 2,0 mm bei einer Standardabweichung von 1,8 mm. Nach Therapieende zum Zeitpunkt T2 beträgt die Pg-NB Strecke durchschnittlich 1,1 mm bei einer Standardabweichung von 1,9 mm. Die Verringerung der Strecke um durchschnittlich -0,9 mm (MW = -0,9 mm, SD = 0,9 mm) stellt sich als statistisch höchst signifikant dar. Cohen's d zeigt bei 1,036 eine große Effektstärke an. Somit zeigt sich eine signifikante sagittale Veränderung im Sinne einer Verringerung des Abstandes von Pogonion zur Strecke NB.

Tabelle 28: Darstellung des Mittelwertes (MW) und der Standardabweichung (SD) der Strecke Pg-NB zum Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen der Strecke Pg-NB (T2-T1)

Pg-NB	N	MW	SD	p-Wert	Signifikanz	Cohen's d	Effekt
T1	43	2,0	1,8				
T2	43	1,1	1,9				
T2-T1	43	-0,9	0,9	<0,001	***	1,036	****

3.2.4 Weichteilveränderungen

Holdaway Winkel

Tabelle 29 stellt die Werte des Holdaway Winkels zu den Zeitpunkten T1, T2 und T2-T1 dar. Der Holdaway Winkel liegt zum Zeitpunkt T1 im Durchschnitt bei 13,9° bei einer Standardabweichung von 4,5°, zum Zeitpunkt T2 liegt der Holdaway Winkel durchschnittlich bei 12,2° bei einer Standardabweichung von 4,7°. Die Verkleinerung des Winkels um durchschnittlich -1,8° (MW = -1,8°, SD = 2,9°) stellt eine statistisch höchst signifikante Veränderung dar. Cohens's d zeigt mit 0,596 eine mittlere Effektstärke. Somit zeigt sich eine signifikante Veränderung des weichgewebigen Profils im Sinne einer Profilabflachung.

Tabelle 29: Darstellung des Mittelwertes (MW) und der Standardabweichung (SD) des Holdaway Winkels Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen des Holdaway Winkels (T2-T1)

H Winkel	N	MW	SD	p-Wert	Signifikanz	Cohen's d	Effekt
T1	43	13,9	4,5				
T2	43	12,2	4,7				
T2-T1	43	-1,8	2,9	<0,001	***	0,596	***

Nasolabialwinkel

Tabelle 30 zeigt die kephalometrischen Werte des Nasolabialwinkels zu den Zeitpunkten T1, T2 und T2-T1. Der Median des Nasolabialwinkels beträgt zu Therapiebeginn zum Zeitpunkt T1 115,8°, nach funktionskieferorthopädischer Therapie zum Zeitpunkt T2 beträgt er 115,2°. Die Veränderung von -0,6° stellt sich als statistisch nicht signifikant dar. Somit zeigt sich keine signifikante weichgewebige Veränderung des Nasolabialwinkels.

Tabelle 30: Darstellung der Mediane und der Perzentile des Nasolabialwinkels zum Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen des Nasolabialwinkels (T2-T1)

Nasolabial	N	min	25 %	Median	75 %	max	p Wert	Signifikanz
T1	43	103,5	111,7	115,8	121,3	142,6		
T2	43	100,2	107,2	115,2	122,7	142,2		
T2-T1	43	-3,3	-4,5	-0,6	1,4	-0,4	0,708	n.s.

Norderval Winkel

Tabelle 31 fasst die Werte des Norderval Winkels zu den Zeitpunkten T1, T2 und T2-T1 zusammen. Der durchschnittliche Norderval Winkel liegt vor funktionskieferorthopädischer Therapie zum Zeitpunkt T1 bei 64,3° bei einer Standardabweichung von 5,6°. Nach funktionskieferorthopädischer Therapie zum Zeitpunkt T2 beträgt der Winkel durchschnittlich 66,4° bei einer

Standardabweichung von 5,5°. Die Vergrößerung des Norderval Winkels um durchschnittlich 2,1° (MW = 2,1°, SD = 3,6°) stellt eine statistisch höchst signifikante Veränderung dar. Cohen´s d zeigt mit 0,589 eine mittlere Effektstärke.

Tabelle 31: Darstellung des Mittelwertes (MW) und der Standardabweichung (SD) des Nordervalwinkels Zeitpunkt T1 und T2; Darstellung der Veränderungen des Nordervalwinkels (T2-T1)

Norderval	N	MW	SD	p-Wert	Signifikanz	Cohen´s d	Effekt
T1	43	64,3	5,6				
T2	43	66,4	5,5				
T2-T1	43	2,1	3,6	<0,001	***	0,580	***

Zusammenfassend lässt sich resümieren, dass statistisch signifikante Veränderungen vor allem im Bereich der sagittalen Parameter im Sinne einer Verkleinerung des SNA Winkels, einer Vergrößerung des SNB Winkels und SnPg Winkels, sowie der Verkleinerung des ANB Winkels auftreten. Die vorliegende kephalometrische und statistische Auswertung zeigt keinen Einfluss des Geschlechtes oder des Behandlungsbeginns auf die Veränderung der sagittalen skelettalen Parameter. Bei 76,7 % der Patienten lässt sich nach funktionskieferorthopädischer Therapie die angestrebte skelettale Klasse I feststellen.

Die Betrachtung der vertikalen skelettalen Parameter zeigt im Bereich des Index statistisch hoch signifikante Veränderungen. Der Anteil des Index N (neutrales Gesichtsschädelwachstum) vergrößert sich in der vorliegenden Analyse von 67,4 % auf 76,7 %. Der Anteil des Index T (horizontales Gesichtsschädelwachstum) verringert sich von 27,8 % auf 18,9 %.

Eine statistisch signifikante dentale Veränderung zeigt sich bei der OK1-NA Strecke, die sich um durchschnittlich 0,8 mm vergrößert. Die Inklinationen der Ober- und Unterkiefer Frontzähne zeigen keine statistisch signifikanten Veränderungen.

Die Betrachtung der weichgewebigen Parameter zeigt eine statistisch signifikante Verkleinerung des Holdaway Winkels im Sinne einer abflachenden Harmonisierung des weichgewebigen Profils mit einer Vorverlagerung des weichgewebigen Pogonions.

4 Diskussion

4.1 Patienten

Das menschliche Körperwachstum verläuft nicht linear, sondern ist durch Phasen von schnellerem und langsamerem Größenzuwachs gekennzeichnet. Das mandibuläre Wachstum folgt dem körperlichen Wachstum weitgehend. Der pubertäre Wachstumsschub, mit einem ausgeprägten körperlichen Größenzuwachs, ist zwischen dem 11. und 14. Lebensjahr zu verordnen, wobei hier zwischen Mädchen und Jungen unterschieden werden muss (Bjork & Helm, 1967). In **Abbildung 29** sind die Wachstumskurven während des pubertären Wachstumsschubes von Mädchen (rot) und Jungen (grün) dargestellt. Der Peak des pubertären Wachstumsspurts befindet sich bei Mädchen im Mittel zwischen dem 11. und 12. Lebensjahr, während Jungen den pubertären Wachstumspeak circa zwei Jahre später mit etwa 14 Jahren erreichen, wobei in beiden Fällen ein Spielraum von etwa 3-5 Jahren gegeben ist (Wichelhaus, 2017).

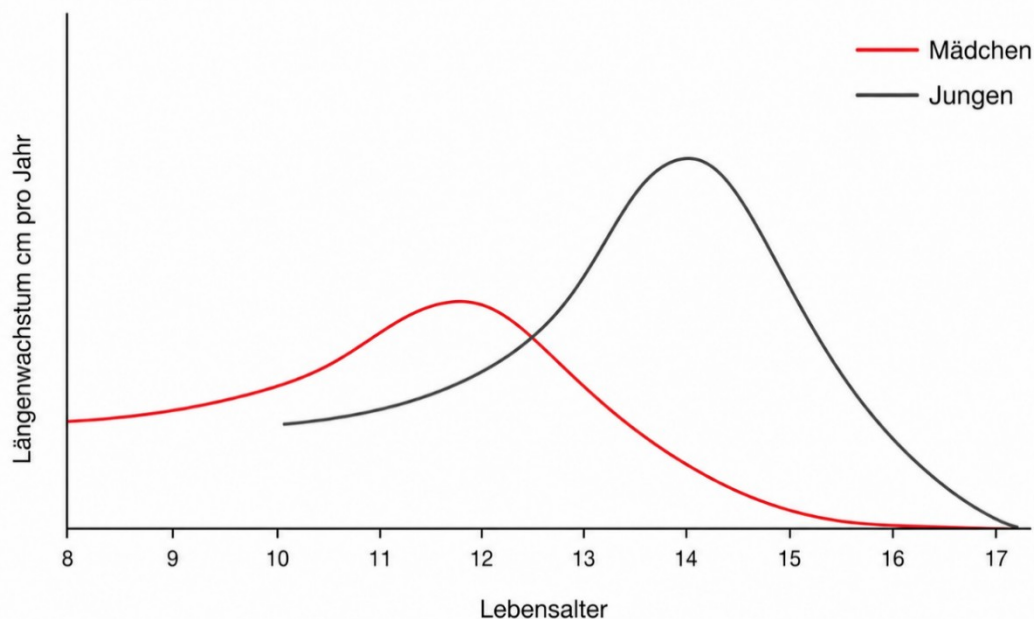


Abbildung 29: eigene Darstellung der pubertären Wachstumskurven von Mädchen und Jungen. Die y-Achse stellt das Längenwachstum in cm pro Jahr dar, auf der x-Achse ist das Lebensalter in Jahren aufgetragen

In der vorliegenden Studie beträgt das durchschnittliche Alter der weiblichen Studienpopulation zu Beginn der funktionskieferorthopädischen Therapie 12,7 Jahre (MW = 12,7 Jahre, SD = 1,5 Jahre, n = 19). Die männliche Studienpopulation weist zu Behandlungsbeginn im Durchschnitt ein Alter von 12,7 Jahren auf (MW = 12,7, SD = 2,0 Jahre, n = 24) und liegt damit geringfügig über dem Alter der weiblichen Patienten. Der Unterschied stellt sich jedoch als statistisch nicht signifikant dar. Somit ist das Alter der weiblichen Probandinnen zu Therapiebeginn während bzw. unmittelbar nach dem pubertären Wachstumsmaximum zu verordnen. Das Alter der männlichen Probanden liegt in der vorliegenden Studie zu Behandlungsbeginn etwa ein Jahr vor dem pubertären Wachstumsgipfel.

Ob funktionskieferorthopädische Geräte tatsächlich zusätzliches mandibuläres Wachstum erzeugen können, oder aber vorhandenes Wachstumspotential im Rahmen der genetischen Möglichkeiten stimulieren und ausschöpfen, wird nach wie vor kontrovers diskutiert (Mills, 1991). Pancherz schreibt bereits 1982, dass ein funktionskieferorthopädisches Gerät das kondyläre Wachstum anregt und somit zu einem verstärkten mandibulären Wachstum im Vergleich zu unbehandelten Patienten führt. Dies wird kephalometrisch durch eine Vergrößerung des SNB Winkels und eine Zunahme der Unterkieferlänge unterstrichen (Pancherz, 1982). Auch Lund beschreibt eine skelettale Verlagerung des Unterkiefers nach anterior im Vergleich zu nicht funktionskieferorthopädisch therapierten Patienten (Lund & Sandler, 1998). Eine andere Sichtweise auf die funktionskieferorthopädische Therapie mittels herausnehmbarer Apparaturen beschreibt vorrangig dentoalveoläre Kompensationsmechanismen, die zu einer Korrektur der skelettalen Klasse II Dysgnathie führen, eine echte skelettale Vorverlagerung des Unterkiefers erfolgt hingegen nur in sehr geringem Maße (Chadwick et al., 2001; Janson et al., 2003; Zymperdikas et al., 2016). Auf zellulärer Ebene zeigt Rabie et al. in seiner Studie, dass die Anteriorverlagerung des Unterkiefers mittels funktionskieferorthopädischer Geräte eine zelluläre Antwort im Kondylus und der Fossa glenoidalis auslöst. Die Anzahl der Mesenchymzellen steigt im Vergleich zu unbehandelten Kiefergelenken deutlich an, sodass ein erhöhtes

Umbaupotential mit Knochenzuwachs im posterioren Kondylusbereich besteht (A. Rabie et al., 2003). Ein aktuelles systematisches Review aus dem Jahr 2026 untersucht die Effizienz von herausnehmbaren und festsitzenden kieferorthopädischen Apparaturen zur Korrektur einer Klasse II Dysgnathie und kommt zu dem Schluss, dass der Twin Block mit einem durchschnittlichen Längenzuwachs des Unterkiefers um 6,1 mm am effektivsten ist (Venkatesan et al., 2026). Perinetti et al. postulieren, dass funktionskieferorthopädische Geräte eine skelettale Klasse II Dysgnathie zwar erfolgreich therapieren können in Bezug auf die Einstellung einer physiologischen Frontzahnbeziehung, der Einstellung einer Angle Klasse I Verzahnung und einer Harmonisierung des Gesichtsprofils, jedoch führen nicht skelettale Effekte alleine, sondern eine Kombination aus skelettaler Reaktion und dentoalveolärer Kompensation zum Ergebnis (Perinetti et al., 2015).

Laut Literatur sollte eine funktionskieferorthopädische Therapie zur Korrektur einer skelettalen Klasse II Dysgnathie unmittelbar vor oder während der Phase des pubertären Wachstumsmaximums erfolgen (Harzer, 2011; Wichelhaus, 2017). Hierdurch können unter Ausnutzung des Intervalls der größten Wachstumsintensität die besten skelettalen Effekte erzielt werden (Cozza et al., 2006). Auch Baccetti et al. empfiehlt den Therapiebeginn unmittelbar vor oder während des pubertären Wachstumsschubes (Baccetti et al., 2000). In einer aktuelleren Studie beschreibt er den Therapiebeginn während des Wachstumsmaximums allerdings als effektiver (Baccetti et al., 2009). Ravera et al. verordnet den optimalen Behandlungsbeginn in einer aktuellen Studie auf dem Peak des pubertären Wachstumsgipfels beziehungsweise unmittelbar nach dem stärksten Größenzuwachs als am effektivsten (Ravera et al., 2021), was auch Koukou et al. in seiner Studie aus dem Jahr 2022 bestätigt (Koukou et al., 2022).

In der vorliegenden Arbeit sind die Empfehlungen der aktuellen Literatur eingehalten, indem der Behandlungsbeginn der weiblichen Patientinnen im Mittel mit 12,7 Jahren auf, beziehungsweise unmittelbar nach dem Wachstumspeak liegt. Der Therapiebeginn der männlichen Patienten mit im Durchschnitt 12,7 Jahren lässt sich unmittelbar vor dem Wachstumsmaximum verordnen.

4.2 Methodische Aspekte

Alle Fernröntgenseitenbilder wurden durch mich computergestützt gepunktet und kephalometrisch ausgewertet. Das Risiko für Messfehler bei der Setzung der Referenzpunkte kann dadurch minimiert werden, indem nur eine Person die Fernröntgenseitenbilder auswertet, sodass eine hohe Reproduzierbarkeit und Konstanz gegeben sind. Die computergestützte Analyse ist in Bezug auf die Qualität und Genauigkeit mit der manuellen Auswertung gleichzusetzen (Sayinsu et al., 2007).

Klassische funktionskieferorthopädische Geräte werden in der Regel zwischen zehn und zwölf Stunden täglich getragen, wobei die tatsächliche Tragedauer davon abweichend sehr patientenindividuell sein kann. Aligner mit Funktionselementen werden 22 Stunden pro Tag getragen, das heißt sie werden lediglich zum Essen, beim Verzehr von zucker- oder säurehaltigen Getränken, sowie zum Zähneputzen herausgenommen. Die deutlich höhere Tragedauer von Alignern mit Funktionselementen im Vergleich zu herausnehmbaren funktionskieferorthopädischen Geräten führt zu signifikant besseren skelettalen Effekten in Bezug auf die Anteriorverlagerung des Unterkiefers. Dies zeigt sich auch in der vorliegenden Studie von Baheti et al., die durch ganztägiges Tragen eines Twin Blocks signifikant größere skelettale Effekte erzielen konnten, als bei der klassischen Tragedauer von etwa zehn bis zwölf Stunden täglich (Baheti et al., 2022).

Die anteriore Vorverlagerung des Unterkiefers erfolgt bei klassischen funktionskieferorthopädischen Geräten durch den Konstruktionsbiss in einem Schritt. Im Fall der Aligner mit Funktionselementen erfolgt die sagittale Vorverlagerung schrittweise. Im Abstand von jeweils acht Wochen wird der Unterkiefer um zwei Millimeter weiter nach anterior geführt. Diese Schritt für Schritt Vorverlagerung wird in der aktuellen Literatur als sehr effektiv beschrieben (Koukou et al., 2022). Aras et al. beschreibt in seiner Studie, dass die schrittweise Vorverlagerung statistisch signifikant bessere Ergebnisse in der Vergrößerung der Winkel SNB und der Verkleinerung des Winkels ANB erzielt (Aras et al., 2017).

4.3 Ergebnisse

4.3.1 Sagittale Aspekte

Der **SNA** Winkel beschreibt die sagittale Lagebeziehung der Maxilla zur vorderen Schädelbasis. In der vorliegenden Studie reduziert sich der SNA Winkel nach funktionskieferorthopädischer Therapie mittels Alignern mit Funktionselementen um $-1,0^\circ$ auf einen durchschnittlichen Wert von $80,2^\circ$ was nach Normwerten einer orthognathen Maxilla entspricht (Harzer, 1999). Die Verringerung des SNA Winkels liegt damit in dem in der Literatur beschriebenen Bereich. Während Caruso et al. lediglich eine Verringerung des SNA Winkels um durchschnittlich $-0,2^\circ$ beschreiben (Caruso et al., 2021), zeigt Glaset et al. eine Reduktion des ANB Winkels um $-0,6^\circ$ (Glaser et al., 2022), und Hosseini et al. sogar eine Reduktion um im Durchschnitt $-1,0^\circ$ (Hamid Reza Hosseini et al., 2024). Somit kann im Mittel von einer leichten Wachstumshemmung des Oberkiefers gesprochen werden, die sich statistisch signifikant zeigt, wobei von einer limitierten klinischen Signifikanz ausgegangen werden muss. Mencenas et al. konnten unter der Alignertherapie mit Funktionselementen keine statistisch signifikante Veränderung des SNA Winkels feststellen (Mecenas et al., 2025). Im Vergleich von Alignern mit Funktionselementen mit Alignern im Kombination mit Klasse II Elastics zeigt sich in der Gruppe der Elastics keine Reduktion des SNA Winkels (Patel et al., 2025). Auch im Vergleich von Alignern mit Funktionselementen mit einem Twin Block zeigt sich in der Gruppe des Twin Block keine signifikante Veränderung des SNA Winkels, während sich der SNA Winkels in der Gruppe der Aligner um durchschnittlich $-0,6^\circ$ reduziert (Kircelli et al., 2025).

Der **SNB** Winkel beschreibt in der Fernröntgenseitenanalyse die sagittale Lage der Mandibula in Relation zur vorderen Schädelbasis. In der vorliegenden Studie vergrößert sich der SNB Winkel statistisch signifikant um $+1,3^\circ$, sodass nach funktionskieferorthopädischer Therapie ein Mittelwert von $77,3^\circ$ erzielt wird. Dieser Wert entspricht nach Normwerten einer retrognathen Mandibula an der Grenze zu einer orthognathen Mandibula (Harzer, 1999). Es kann von einer skelettalen sagittalen Nachentwicklung der Mandibula gesprochen werden. In der

aktuellen Literatur werden ähnliche Werte beschrieben. Glaser et al. konnten in ihrer Studie eine Vergrößerung des SNB Winkels um durchschnittlich $+1,1^\circ$ nachweisen (Glaser et al., 2022). Al Subaie et al. zeigen eine ähnliche sagittale Nachentwicklung der Mandibula bei einer Vergrößerung des SNB Winkels um im Durchschnitt $+1,2^\circ$ (Al Subaie et al., 2024a). Kircelli et al. beschreibt einen etwas höheren Wert von $+1,9^\circ$ Vergrößerung des SNB Winkels unter Alignertherapie mit Funktionselementen (Kircelli et al., 2025). Von einem signifikant geringeren Zuwachs des SNB Winkels berichtet Mecnas et al. bei einer Zunahme des SNB Winkels von lediglich im Durchschnitt $+0,6^\circ$ (Mecnas et al., 2025). Einen deutlich größeren Effekt in der mandibulären Vorverlagerung beschreiben Caruso et al. bei einer Vergrößerung des SNB Winkels um $+4,4^\circ$ (Caruso et al., 2021). Es zeigt sich somit ein heterogenes Bild in der Literatur in Bezug auf die Vergrößerung des SNB Winkels, wobei sehr geringe und sehr große Veränderungen die Ausnahme bilden und sich das Mittelfeld zwischen einem Zuwachs von $+1,1^\circ$ bis $+1,3^\circ$ befindet.

Der **ANB** Winkel spiegelt die sagittale Relation von Ober- zu Unterkiefer zueinander wider. In vorliegender Studie verringert sich der ANB Winkel im Mittel um statistisch signifikante $-2,3^\circ$ auf $3,0^\circ$, was nach Normwerten einer skelettalen Klasse I entspricht. Die aktuelle Literatur beschreibt durchweg eine deutliche Verringerung des ANB Winkels. Die Werte reichen von $-0,8^\circ$ (Mecnas et al., 2025), $-1,3^\circ$ (Ravera et al., 2021), über $-1,5^\circ$ (Lombardo et al., 2024; Lombardo et al., 2025) bis hin zu $-1,7^\circ$ (Glaser et al., 2022) und $-1,9^\circ$ (Kircelli et al., 2025). Der Großteil der Studien stimmt überein, dass die Therapie mittels Alignern mit Funktionselementen den ANB Winkel signifikant verbessert und eine skelettale Klasse II Dysgnathie effektiv durch skelettale Anpassungsreaktionen korrigieren kann. Eine Meta Analyse aus dem Jahr 2014 beschreibt die Klasse II Korrektur als bestehend aus der Anregung des kondylären Wachstums, einer maxillären Wachstumshemmung, eines Remodellings der Fossa glenoidalis, sowie dentoalveolärer Kompensationsmechanismen. Im Mittel wird hier eine Reduktion des ANB Winkels um $-2,0^\circ$ beschrieben, während die stärksten 25 % sogar eine Reduktion des ANB Winkels um bis zu $-4,0^\circ$ aufweisen (Vaid et al., 2014). Im Vergleich von Alignern mit Funktionselementen mit einem Twin Block zeigt sich

in beiden Gruppen eine Verbesserung des ANB Winkels, sodass beide Therapien die skelettale Klasse II effektiv korrigieren können (Kircelli et al., 2025). Ghorbani et al. und Kookou et al. beschreiben die Therapie mittels Alignern mit mandibulären Protrusionselementen als valide Option bei milden bis moderaten Klasse II Dysgnathien (Ghorbani et al., 2025; Kookou et al., 2022). Huang et al. beschrieben in ihrem systematischen Review, dass Aligner mit Funktionselementen ähnliche skelettale Effekte in allen Dimensionen erzielen wie eine Herbst Apparatur, sowie vergleichbare skelettale orthopädische Effekte wie klassische funktionskieferorthopädische Apparaturen. In Bezug auf die Verkleinerung des Overjets liefern Aligner mit Funktionselementen sogar bessere Ergebnisse als die Therapie mittels Twin Block (Huang et al., 2026). Ein weiteres systematisches Review beschreibt, dass Aligner mit Funktionselementen zur mandibulären Protrusion effektiv den ANB Winkel reduzieren (Khalil et al., 2025). Gleichzeitig betonen aber alle Quellen die Notwendigkeit weiterer randomisierter Kontrollstudien, um die Ergebnisse zu sichern.

Hosseini et al. beschreiben ähnliche skelettale Effekte im Bezug auf die Korrektur einer skelettalen Klasse II Dysgnathie im Vergleich von einer Herbst Apparatur mit Alignern mit Funktionselementen. In beiden Gruppen konnte in der gleichen Zeitspanne eine Klasse I Molarenrelation und eine **skelettale Klasse I** erzielt werden (Hamid Reza Hosseini et al., 2024). In der durchgeführten Studie konnte bei 76,7 % der Patienten eine skelettale Klasse I nach Normwerten erzielt werden, sodass in mehr als zwei Dritteln der behandelten Fälle das Behandlungsziel erreicht wurde. In 2,3 % wurde sogar eine skelettale Klasse III erzielt, das heißt die skelettale Klasse II wurde über das physiologische Maß hinaus therapiert. Lediglich in 20,9 % der therapierten Fälle persistiert eine skelettale Klasse II. Dies kann auf eine eingeschränkte Compliance des Patienten in Bezug auf die Tragedauer, oder ein nicht ausreichendes Wachstumspotential zurückgeführt werden. Insgesamt kann die Therapie mittels Alignern mit Funktionselementen in der vorliegenden Studie zur Korrektur einer skelettalen Klasse II Therapie aber entsprechend der aktuellen Studienlage als effektiv angesehen werden (Ghorbani et al., 2025; Huang et al., 2026).

4.3.2 Vertikale Aspekte

Während der physiologischen Gebissentwicklung finden vertikale Anpassungen im Sinne von physiologischen Bisshebungen statt. Durch die vertikale Entwicklung der Zähne in ihrem Durchbruch und die damit einhergehende vertikale Entwicklung des Alveolarfortsatzes kommt es zu einer Vergrößerung des interbasalen Abstandes. Die erste Bisshebung erfolgt mit dem Durchbruch der ersten Milchmolaren im Alter von etwa 14 bis 18 Monaten. Die zweite Bisshebung tritt mit Durchbruch der 6-Jahr-Molaren, dementsprechend im Alter von etwa sechs Jahren ein. Die dritte Bisshebung erfolgt mit dem Durchbruch des zweiten bleibenden Molaren, also im Alter von etwa elf bis zwölf Jahren (Harzer, 1999; Schopf, 1994). Demzufolge fällt die dritte physiologische Bisshebung in den in dieser Studie abgebildeten Altersbereich von im Mittel 12,7 Jahren bei Therapiebeginn.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen, dass die Therapie mittels Alignern mit Funktionselementen wenig signifikante Einflüsse auf die vertikale Dimension in der Fernröntgenseitenanalyse hat. Die **NL-NSL** sowie **ML-NSL** Winkel zeigen keine signifikanten Veränderungen, auch der **ML-NL** Winkel zeigt keine signifikanten Auffälligkeiten, sodass in vorliegender Studie keine signifikante Veränderung der vertikalen Kieferbasenrelation stattgefunden hat. Diese Ergebnisse korrespondieren mit den in der aktuellen Literatur beschriebenen Effekten, in der Glaser et al., Caruso et al. und auch Kircelli et al. von keinen signifikanten vertikalen Veränderungen im Verlauf der Alignertherapie mit funktionellen Elementen zur mandibulären Protrusion berichten (Caruso et al., 2021; Glaser et al., 2022; Kircelli et al., 2025). Ein aktuelles systematisches Review aus dem Jahr 2025 stützt die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit in Bezug auf die vertikalen Dimensionen und beschreibt, dass Aligner wenig bis keinen Einfluss auf die vertikale Entwicklung des Spina- und Mandibularplanums haben. Frontal offene Bisse können mittels Alignern zwar therapiert werden, jedoch beschränkt sich der Effekt auf eine Extrusion der Frontzähne, eine gezielte Intrusion der Seitenzähne und somit die Beeinflussung des Interbasenwinkels bleibt aus (Correa, E., et al. 2025). Die physiologische

Bisshebung mit Durchbruch der zweiten permanenten Molaren fällt statistisch gesehen zwar in den Altersbereich der in dieser Studie untersuchten Patienten, jedoch scheint sie keinen signifikanten Einfluss auf die vertikale Dimension der Kieferbasenneigungen zu haben.

Signifikante Veränderungen in der Vertikalen treten in vorliegender Studie im **Index** auf. Zu Behandlungsbeginn weisen 67,4 % der Probanden einen Index N auf, der eine harmonische Relation von oberer zu unterer anteriorer Gesichtshöhe beschreibt. Nach funktionskieferorthopädischer Therapie vergrößert sich der Anteil der Patienten mit Index N auf 76,7 %. Der Anteil von Index O bei vergrößerter unterer Gesichtshöhe bleibt unverändert bei 4,7 %. Der Anteil von Index T bei verkleinerter unterer Gesichtshöhe verringert sich von 27,9 % auf 18,6 %. Es findet also eine Anpassung der vertikalen Dimension in Bezug auf die Relation der oberen zur unteren Gesichtshöhe auf, und war im Sinne einer Harmonisierung und Bisshebung mit Vergrößerung des unteren Gesichtsdrittels. Dieses Ergebnis deckt sich mit den in der aktuellen Literatur beschriebenen Effekten. Wo et al. beschreiben eine sehr gute Kontrolle der unteren Gesichtshöhe bei einer Alignertherapie mit mandibulären Protrusionselementen (Wo et al., 2025). Auch Pithon et al. berichten in ihrem systematischen Review von den Vorteilen der Alignertherapie mit Funktionselementen in Bezug auf die Kontrolle und positive therapeutische Beeinflussung der vertikalen Dimension (Pithon et al., 2019). Lombardo et al. vergleicht in ihrer Studie die vertikalen Effekte von Alignern mit Funktionselementen mit Alignern in Kombination mit Klasse II Elastics zur Korrektur einer skelettalen Klasse II Dysgnathie. Die Alignertherapie mit Elementen zur mandibulären Protrusion zeigt hier eine deutlich bessere Kontrolle der vertikalen Dimension im Sinne einer gewünschten Bisshebung. Trotz der vertikalen Kraftkomponente mit extrusiven Effekten auf die Verankerungszähne bei Anwendung von Elastics, konnten die Aligner mit Elastics einen vorhandenen Tiefbiss weniger effektiv therapieren (Lombardo et al., 2025).

Obwohl in der aktuellen Literatur eine weitgehend deckungsgleiche Meinung in Bezug auf die gute vertikale Kontrolle von Alignern mit Funktionselementen herrscht (Hamid Reza Hosseini et al., 2024), gibt es auch kritische Stimmen. Hu

et al. geben zu bedenken, dass die Aussage, Aligner bieten eine bessere Kontrolle über die vertikale Dimension als andere funktionskieferorthopädische Geräte, kritisch gesehen werden muss, da die der Aussage zugrunde liegenden klinischen Studien kleine Stichproben und kurze Beobachtungszeiträume mit retrospektivem Design aufweisen (Hu & Li, 2024). Die Autoren fordern weitere kontrollierte Langzeitstudien, bevor eine klare Empfehlung zur Alignertherapie bei Patientenfällen mit vertikalem Wachstumsmuster und skelettaler Klasse II Dysgnathie ausgesprochen werden kann (Hu & Li, 2024).

Müller et al. beschreibt bereits 1976, dass die funktionskieferorthopädische Behandlung mit einem Aktivator bei Patienten mit horizontalem Wachstumsmuster bessere Ergebnisse in Bezug auf die Verkleinerung des ANB Winkels und die Bisshebung erzielt (Müller, 1976). In vorliegender Studie wurde dem Rechnung getragen, da das Patientenkollektiv mit insgesamt 95,3 % die Indices N und T, das heißt überwiegend ein horizontales bis neutrales Wachstumsmuster aufweist. Dadurch lässt sich die im Vergleich mit der aktuellen Studienlage große Verbesserung des ANB Winkels um $-2,3^\circ$ und die starke Verbesserung der Indices mit einer Harmonisierung des unteren Gesichtsdrittels erklären.

4.3.3 Dentale Aspekte

Die Literatur beschreibt im Zusammenhang mit funktionskieferorthopädischer Therapie bei Klasse II Dysgnathien dentoalveoläre unerwünschte Nebenwirkungen im Sinne einer Proklination der Unterkiefer Frontzähne (Watson, 1982). Diese Proklination ist bedingt durch die nach mesial gerichteten Kräfte auf die Dentition des Unterkiefers bei einer Unterkiefervorverlagerung, da ein Muskelzug nach dorsal während der Anpassungsphase bestehen bleibt. Bei fehlendem adäquatem Lippendruck als Gegenkraft kann das Ausmaß der Proklination der Unterkieferfrontzähne unter Umständen sehr ausgeprägt sein (Ehsani et al., 2015).

Hahn et al. beschreibt 2010, dass Aligner nicht in der Lage sind, die Inklination der Frontzähne in Ober- und Unterkiefer zu kontrollieren beziehungsweise effektiv zu therapieren, da das notwendige Kräftepaar nicht auf den Zahn aufgebracht werden kann. Zudem komme es häufig zu einem Abheben der Aligner mit entsprechenden Einbußen in der Übertragung der therapeutischen Kräfte (Hahn et al., 2010). Neuere Studien widersprechen dem und beschreiben die körperliche Fassung der Zähne mittels Alignern als positiven Aspekt in der Übertragung von Frontzahntorque und Kontrolle der Frontzahninklination. Simon et al. zeigt in ihrer Studie, dass die in der Literatur beschriebenen notwendigen Kräfte zur Übertragung von Frontzahntorque von Alignern aufgebracht und übertragen werden können, sodass Aligner effektiv therapeutischen Torque auf Frontzähne übertragen können (Simon et al., 2014).

In diesem Punkt werden Aligner mit Funktionselementen in der aktuellen Literatur als dem herkömmlichen funktionskieferorthopädischen Apparaturen überlegen beschrieben. Im Vergleich der dentoalveolären Nebenwirkungen unter funktionskieferorthopädischer Therapie konnte Ghorbani et al. eine deutlich geringere Proklination der Unterkiefer Frontzähne im Vergleich zur Therapie mit einem Twin Block nachweisen (Ghorbani et al., 2025). Somit kontrolliert der Aligner ein unerwünschtes unkontrolliertes Kippen der Frontzähne im Unterkiefer nach vestibulär deutlich besser. Er führt dies vor allem auf das körperlich umfassende Design der Aligner und die damit verbundene Verblockung der Frontzähne mit der gesamten Dentition des Unterkiefers zurück (Ghorbani et al., 2025).

In der vorliegenden Studie wird dem Rechnung getragen. Es konnten keine signifikanten Veränderungen in den Inklinationswerten der Oberkiefer und Unterkiefer Frontzähne festgestellt werden. Dementsprechend ist keine signifikante Veränderung des Interinzisalwinkels nachweisbar. Die aktuelle Studienlage stützt diese Ergebnisse, indem sie eine sehr gute Kontrolle der Inklination der Unterkiefer Frontzähne ohne das Auftreten einer unerwünschten Proklination unter Alignertherapie mit Funktionselementen beschreiben (Al Subaie et al., 2024b; Mecenas et al., 2025; Wu et al., 2023). Auch Studien, die kephalometrisch den Vergleich zwischen Alignern mit Funktionselementen zur

sagittalen Nachentwicklung des Unterkiefers und funktionskieferorthopädischen Klasse II Apparaturen ziehen, kommen zu dem Schluss, dass Aligner im Vergleich eine bessere Inklinationsstabilität der Frontzähne gewährleisten können, fordern aber gleichzeitig weitere randomisierte Kontrollstudien (Huang et al., 2026; Koukou et al., 2022; Ravera et al., 2021; Wu et al., 2023).

Einige Studien zeigen als unerwünschte Nebenwirkung der funktionskieferorthopädischen Therapie mittels Alignern eine Retroinklination der Oberkiefer Frontzähne (Caruso et al., 2021; Ravera et al., 2021). Diese kann bedingt sein durch die nach dorsal gerichtete Kraft, die während funktionskieferorthopädischer Therapie auf den Oberkiefer und seine Dentition wirkt. Durch die Verblockung der gesamten Dentition des Oberkiefers über den Aligner kann es zu einer unerwünschten Reklination der Frontzähne kommen. Im Vergleich dieses unerwünschten Effekts zwischen verschiedenen Behandlungsgeräten, konnte Caruso et al. bei der Therapie mittels Alignern den geringsten Effekt nachweisen. Die funktionskieferorthopädische Therapie mittels Twin Block erzeugte eine deutlich stärkere unerwünschte Retroinklination der Oberkiefer Frontzähne, als die Therapie mittels Alignern (Caruso et al., 2021). In der durchgeführten Studie konnte keine signifikante Reklination der Oberkiefer Frontzähne nachgewiesen werden. Die sagittale Position der Oberkiefer Frontzähne vergrößerte sich überraschend um durchschnittlich 0,8 mm, sodass eine geringe körperliche Protrusion der Oberkiefer Frontzähne nachweisbar ist. Dies ist wahrscheinlich durch die technische Möglichkeit bedingt, Einzelzahnbewegungen gezielt während der funktionskieferorthopädischen Therapie mittels Alignern zu planen. Somit können dentoalveoläre Nebenwirkungen nicht nur minimiert, sondern in manchen Fällen sogar gezielt Zahnbewegungen in entgegengesetzter Richtung geplant werden.

Im Vergleich von Alignern mit Funktionselementen mit einer klassischen festsitzenden Herbst Apparatur zeigt sich in beiden Patientengruppen eine effektive Korrektur der skelettalen Klasse II Dysgnathie, wobei in der Gruppe der Aligner weniger unerwünschte dentoalveoläre Nebenwirkungen im Sinne einer Proklination der Unterkiefer Frontzähne auftreten (H. R. Hosseini et al., 2024).

Patel et al. verglich 2025 Aligner mit Funktionselementen zur mandibulären Protrusion mit Alignern in Kombination mit Klasse II Elastics. In beiden Gruppen konnte zum Ende der Behandlung eine Angle Klasse I Verzahnung am Molaren erzielt werden, statistisch signifikanten skelettale Veränderungen im Sinne einer Verkleinerung des SNA und ANB Winkels traten jedoch nur in der Gruppe der mandibulären Protrusionselemente auf. In der Gruppe der Klasse II Elastics zeigte sich eine deutliche Proklination der Unterkiefer Frontzähne, sodass hier, im Gegensatz zur Therapie mit Funktionselementen, von einer dentoalveolären Kompensation der skelettalen Klasse II ausgegangen werden muss (Patel et al., 2025).

4.3.4 Weichgewebige Aspekte

In der vorliegenden Studie konnten signifikante Veränderungen des weichgewebigen Profils unter der Alignertherapie mit Funktionselementen nachgewiesen werden. Der Holdaway Winkel, welcher die Relation des weichgewebigen Profils zur skelettalen Basis abbildet, verkleinert sich statistisch signifikant um $-1,8^\circ$. Dadurch kommt es bei Patienten mit einer initialen skelettalen Klasse II Dysgnathie und nach hinten schiefer Profilverlauf zu einer Abflachung des weichgewebigen Gesichtsprofils. Diese Ergebnisse korrespondieren mit den in der Literatur beschriebenen weichteiligen Veränderungen. Lombardo et al. stellte im direkten Vergleich der Therapie mit Alignern mit Elementen zur mandibulären Protrusion und dem Twin Block fest, dass das weichgewebige Pogonion unter Alignertherapie weiter nach anterior verlagert wurde und somit eine stärkere Harmonisierung des Profils erzielt wurde (Lombardo et al., 2024). Auch Wo et al. stellen im Vergleich der Therapie mittels Alignern und Twin Block fest, dass die Alignertherapie zu einer stärkeren Verbesserung des Kinnprofils mit einer deutlicheren anterioren Nachentwicklung des knöchernen und weichgewebigen Kinns führt (Wo et al., 2025). Lombardo et al. stimmt in diesem Punkt überein und beschreibt in einer aktuellen Studie aus dem Jahr 2025 die ästhetisch wichtige Kinnvorverlagerung unter der Alignertherapie mit Funktionselementen, was zu einer Harmonisierung des

Gesichtsprofils führt. Die skelettale und weichgewebige Verlagerung des Pogonion nach anterior ist vor allem auch durch die skelettale Vorverlagerung des Unterkiefers bedingt (Lombardo et al., 2025).

4.4 Schlussfolgerungen

Auf Basis der kephalometrischen Analysen der vorliegenden Arbeit in Bezug auf die Effektivität von Alignern mit Funktionselementen zur Korrektur einer skelettalen Klasse II Dysgnathie, sowie der Analyse der kephalometrischen Veränderungen in der sagittalen, vertikalen, dentalen und weichgewebigen Dimension, können die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:

Die Eignung von Alignern als kieferorthopädisches Behandlungsgerät in Bezug auf die Effektivität im Vergleich zu festsitzenden Apparaturen im Sinne einer Multibracket-Multiband-Apparatur bleibt umstritten (Djeu et al., 2005; Galan-Lopez et al., 2019). Letztendlich ist neben der Wahl des Behandlungsgerätes die Erfahrung und klinische Expertise des Behandlers gefragt, um die Komplexität eines klinischen Falles richtig einzuschätzen, Fallstricke zu erkennen und dementsprechend ein geeignetes Behandlungsgerät zu wählen (Lagravère & Flores-Mir, 2005).

Die Korrektur einer skelettalen Klasse II Dysgnathie erfolgt nach den Ergebnissen der vorliegenden Studie primär durch eine skelettale Nachentwicklung der Mandibula, gefolgt von einer sagittalen Wachstumshemmung der Maxilla. Der ANB Winkel wird im Mittel um $-2,3^\circ$ verringert. Dieser Wert liegt etwas höher als die in der Literatur beschriebene Verringerung des ANB Winkels um bis zu $-1,7^\circ$ (Glaser et al., 2022; Kircelli et al., 2025; Lombardo et al., 2025).

Eine Metaanalyse aus dem Jahr 2024 fasst die Effekte von Alignern mit Funktionselementen als signifikante Reduktion des ANB Winkels, des Overjets und Overbites, sowie eine signifikante Verbesserung der Molarenrelation zusammen. Neben den positiven skelettalen Effekten treten aber auch unerwünschte dentoalveoläre Nebenwirkungen auf. Bei milden bis moderaten Klasse II Anomalien können die Aligner mit Funktionselementen laut Autoren eine Alternative zu klassischen funktionskieferorthopädischen Klasse II Geräten darstellen. Allerdings sind weitere Langzeitstudien zur Steigerung der Evidenzqualität notwendig (Cremonini et al., 2024). Ein großer Vorteil der Aligner mit Funktionselementen zur mandibulären Protrusion besteht in der effektiven

funktionskieferorthopädischen Therapie, die zeitgleich mit einer Zahnbogenausformung stattfinden kann, sodass die Therapiedauer verkürzt werden kann (Wu et al., 2023).

Obwohl in der vorliegenden retrospektiven Studie signifikante skelettale Veränderungen im Sinne einer Reduktion des SNA und ANB Winkels, einer Vergrößerung des SNB Winkels, sowie kaum dentoalveoläre Nebenwirkungen nachgewiesen werden konnten, zeigt die aktuelle Literatur, dass die Korrektur einer skelettalen Klasse II Dysgnathie mittels Alignern mit Funktionselementen zwar möglich ist, jedoch das Ergebnis aus einer Kombination von skelettalen Effekten und dentoalveolären Kompensationsmechanismen besteht (Ghorbani et al., 2025; Huang et al., 2026; Kircelli et al., 2025; Venkatesan et al., 2026).

Auch ein systematisches Review aus dem Jahr 2025 zeigt, dass Aligner mit Funktionselementen zur mandibulären Protrusion effektiv den ANB Winkel und Overjet reduzieren können, während sie im Gegensatz zu konventionellen funktionskieferorthopädischen Geräten die Inklination der Unterkiefer Inzisivi zuverlässiger kontrollieren können. Gleichzeitig führt die Therapie zu einer signifikanten Verbesserung des weichgewebigen Profils, während die Aligner im Bezug auf Ästhetik und Patientenkomfort klassischen funktionskieferorthopädischen Geräten überlegen sind (Iacobelli, R., et al., 2026; Khalil et al., 2025). Aufgrund der optischen Erscheinung von Alignern in einer Welt immer steigender ästhetischer Ansprüche und des gegebenen hohen Patientenkomforts, weisen mittels Alignern therapierte Patienten eine bessere Compliance auf und halten die angewiesenen Tragezeiten besser ein als Patienten mit herkömmlichen funktionskieferorthopädischen Apparaturen, was dementsprechend zu besseren Behandlungsergebnissen in kürzerer Zeit führt (Al-Moghrabi et al., 2017). Die verkürzte Behandlungsdauer ist auch bedingt durch die zeitgleiche Zahnbogenausformung und Korrektur von dentoalveolären Einzelzahnfehlstellungen parallel zu einer funktionskieferorthopädischen Therapie, was kein anderes funktionskieferorthopädisches Gerät in diesem Maße zu bieten vermag (Wu et al., 2023).

Ein hochaktuelles systematisches Review beschreibt Aligner mit Funktionselementen aufgrund ihrer effektiven skelettalen Wirkungsweise und kaum dentoalveolärer Nebenwirkungen zur Korrektur einer skelettalen Klasse II Dysgnathie als Alternative zu herkömmlichen funktionskieferorthopädischen Behandlungsapparaturen (Sohn, B. J., et al., 2026)

Basierend auf der vorliegenden Studienlage und den Ergebnissen dieser Arbeit lässt sich zusammenfassen, dass Aligner mit Funktionselementen eine skelettale Klasse II Dysgnathie in ähnlichem Maße wie herkömmliche funktionskieferorthopädische Geräte oder eine festsitzenden Herbst Apparatur korrigieren können. Beim jugendlichen Patienten mit ausreichend Wachstumspotential werden vergleichbare skelettale Effekte in allen Dimensionen erzielt. In Bezug auf die Inklination der Frontzähne weisen die Aligner aufgrund ihres körperlich fassenden Designs eine bessere Kontrolle des Frontzahntorques und der Frontzahninklination auf. Aufgrund der begrenzten Datenlage sind die Ergebnisse allerdings mit Vorsicht zu genießen und weitere Studien zur Verifizierung der Ergebnisse zwingend erforderlich (Huang et al., 2026; Sohn, B. J., et al., 2026).

Die durchgeführte retrospektive Studie weist gewisse Limitationen auf. So liegt keine unbehandelte Kontrollgruppe zum Vergleich der kephalometrischen Effekte mit unbehandelten Patienten vor. Durch die Etablierung des neuen Behandlungskonzeptes von Alignern mit Funktionselementen in der Poliklinik für Kieferorthopädie des Universitätsklinikums Tübingen ist die vorliegende Patientenkohorte verhältnismäßig relativ klein, sodass weitere Studien mit größeren Patientenkohorten sicherlich erforderlich sind, um die Ergebnisse zu evaluieren und fundieren. Des Weiteren kann durch das retrospektive Design eine potentielle Voreingenommenheit vorliegen. Als positiv im Studiendesign ist zu bewerten, dass alle Patienten in derselben Abteilung von einer begrenzten kleinen Gruppe von Kieferorthopäden behandelt wurden. Dadurch ist eine gewisse Reliabilität der Behandlungsabläufe und Anweisungen gegeben. Die Planung des Behandlungsstagings in der digitalen Planungssoftware erfolgt ausschließlich durch mich, sodass auch hier von einer gewissen Konstanz und Reliabilität ausgegangen werden kann.

Es sind weitere randomisierte, kontrollierte Langzeitstudien mit standardisierten Protokollen und Monitoring der Tragedauer der Aligner erforderlich, um die Ergebnisse dieser Studie zu evaluieren. Insbesondere Folgestudien im direkten Vergleich von verschiedenen funktionskieferorthopädischen Geräten mit Alignern mit Funktionselementen zur Beurteilung der Effektivität in Bezug auf die Korrektur einer skelettalen Klasse II Dysgnathie sind gefordert.

5 Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden retrospektiven, kephalometrischen Studie war es, die Veränderungen der skelettalen kephalometrischen Parameter in der Fernröntgenseitenbildanalyse durch Aligner mit Funktionselementen zu untersuchen, um Aligner mit Funktionselementen als funktionskieferorthopädische Behandlungsapparatur in Bezug auf ihre Effektivität zur Korrektur einer skelettalen Klasse II Dysgnathie beurteilen zu können.

In der aktuellen Fachliteratur wird die Korrektur einer Klasse II Dysgnathie mittels Alignern mit Funktionselementen durch skelettale Effekte aber auch durch dentale Kompensationsmechanismen im Sinne von unerwünschten dentoalveolären Veränderungen beschrieben.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die Fernröntgenseitenbilder von insgesamt 43 Patienten, die sich in der Poliklinik für Kieferorthopädie, Universitätsklinikum Tübingen, in funktionskieferorthopädischer Behandlung mittels Alignern mit Funktionselementen befanden, kephalometrisch ausgewertet und analysiert. Die Patienten befanden sich im Alter von 9,1 bis 16,4 Jahren. Die Fernröntgenseitenbilder wurden aus der klinischen Routine heraus vor Beginn der funktionskieferorthopädischen Therapie und nach circa zwölfmonatiger funktionskieferorthopädischer Therapie angefertigt, anschließend kephalometrisch ausgewertet und die Veränderungen von Zeitpunkt T1 (unmittelbar vor funktionskieferorthopädischer Therapie) zu Zeitpunkt T2 (nach funktionskieferorthopädischer Therapie) statistisch analysiert. Als Einschlusskriterien wurden eine vorhandene skelettale Klasse II Dysgnathie, ein ausreichend großer vorhandener Overjet der eine sagittale Vorverlagerung des Unterkiefers ermöglicht, sowie ein ausreichend vorhandenes Wachstumspotential definiert.

Die kephalometrischen Daten der insgesamt 43 Patienten wurden jeweils vor und nach funktionskieferorthopädischer Therapie mittels Alignern mit Funktionselementen erhoben, zusammengetragen und statistisch analysiert. Skelettale statistisch signifikante Veränderungen zeigten sich bei der

Verkleinerung des SNA Winkels um durchschnittlich $-1,0^\circ$ von $81,2^\circ$ auf $80,2^\circ$, der Vergrößerung des SNB Winkels um durchschnittlich $1,3^\circ$ von $75,9^\circ$ auf $77,2^\circ$, sowie der Verkleinerung des ANB Winkels um im Durchschnitt $-2,3^\circ$ von $5,3^\circ$ auf $3,0^\circ$. Die Inklinationen der Ober- und Unterkieferfrontzähne zeigten keine statistisch signifikanten Veränderungen.

In der vertikalen Dimension konnte der Anteil von Patienten mit Index T von 27,9 % auf 18,6 % reduziert werden. Der Anteil von Patienten mit Index N konnte um 9,3 % von 67,4 % auf einen Anteil von 76,7 % gesteigert werden.

Bei 76,7 % der therapierten Patienten lag nach einer durchschnittlichen Behandlungsdauer von 10,6 Monaten eine skelettale Klasse I vor, bei 20,9 % persistierte eine skelettale Klasse II und in 2,3 % der Fälle wurde eine skelettale Klasse III erzielt.

Die Therapie einer skelettalen Klasse II Dysgnathie mittels Alignern mit Funktionselementen zeigt in der vorliegenden Studie statistisch signifikante positive skelettale Effekte auf. Aligner mit Funktionselementen zur Korrektur einer skelettalen Klasse II Dysgnathie können somit, bei korrekter Anwendung, ein ausreichendes, den medizinischen Anforderungen entsprechendes Behandlungsgerät darstellen. Die funktionskieferorthopädische Therapie mittels Alignern mit Funktionselementen zur mandibulären Protrusion kann somit, bei strenger Indikationsstellung, das Spektrum der funktionskieferorthopädischen Geräte erweitern.

6 Literaturverzeichnis

- Al-Moghrabi, D., Salazar, F. C., Pandis, N., & Fleming, P. S. (2017). Compliance with removable orthodontic appliances and adjuncts: A systematic review and meta-analysis. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 152(1), 17–32. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2017.03.019>
- Al Subaie, H., Alturki, G., Alsulaimani, F., Ghoneim, S., & Baeshen, H. (2024a). Assessment of dental, skeletal, and soft tissue changes following mandibular advancement with Invisalign in skeletal Class II. *International Journal of General Medicine*, 17, 66–71. <https://doi.org/10.1016/j.sdentj.2023.09.005>
- Al Subaie, H., Alturki, G., Alsulaimani, F., Ghoneim, S., & Baeshen, H. (2024b). Assessment of dental, skeletal, and soft tissue changes following mandibular advancement with Invisalign in skeletal Class II. *Saudi Dent J*, 36(1), 66–71. <https://doi.org/10.1016/j.sdentj.2023.09.005>
- Alhammadi, M. S., Halboub, E., Fayed, M. S., Labib, A., & El-Saaidi, C. (2018). Global distribution of malocclusion traits: A systematic review. *Dental Press J Orthod*, 23(6), 40 e41–40 e10. <https://doi.org/10.1590/2177-6709.23.6.40.e1-10.onl>
- AlMogbel, A. (2023). Clear Aligner Therapy: Up to date review article. *J Orthod Sci*, 12, 37. https://doi.org/10.4103/jos.jos_30_23
- AlMogbel, A., Alshawy, E. S., & Alhusainy, A. (2024). Efficacy of clear aligner therapy over conventional fixed appliances in controlling orthodontic movement: A systematic review. *J Orthod Sci*, 13, 23. https://doi.org/10.4103/jos.jos_176_23
- Andresen, V., & Häupl, K. (1936). Funktions-Kieferorthopädie: die grundlagen des" norwegischen systems". (No Title).
- Andrews, L. F. (1972). The six keys to normal occlusion. *Am J Orthod*, 62(3), 296–309. [https://doi.org/10.1016/s0002-9416\(72\)90268-0](https://doi.org/10.1016/s0002-9416(72)90268-0)
- Angle, E. H. (1899). Classification of malocclusion.
- Aras, I., Pasaoglu, A., Olmez, S., Unal, I., Tuncer, A. V., & Aras, A. (2017). Comparison of stepwise vs single-step advancement with the Functional Mandibular Advancer in Class II division 1 treatment. *Angle Orthodontist*, 87(1), 82–87. <https://doi.org/10.2319/032416-241.1>
- Arraj, G. P., Rossi-Fedele, G., & Dogramaci, E. J. (2019). The association of overjet size and traumatic dental injuries-A systematic review and meta-analysis. *Dent Traumatol*, 35(4-5), 217–232. <https://doi.org/10.1111/edt.12481>
- Baccaglione, G., Rota, E., Ferrari, M., & Maddalone, M. (2020). Second Class Functional Treatment: Andreasen Activator vs Twin Block. *Int J Clin Pediatr Dent*, 13(2), 144–149. <https://doi.org/10.5005/jp-journals-10005-1725>
- Baccetti, T., Franchi, L., & Kim, L. H. (2009). Effect of timing on the outcomes of 1-phase nonextraction therapy of Class II malocclusion. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 136(4), 501–509.

- Baccetti, T., Franchi, L., Toth, L. R., & McNamara Jr, J. A. (2000). Treatment timing for Twin-block therapy. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 118(2), 159–170.
- Baheti, N. R., Bhad, W. A., & Chavan, S. J. (2022). Correlation of twin-block appliance efficacy and wear duration as assessed with a compliance indicator. *J World Fed Orthod*, 11(2), 53–59. <https://doi.org/10.1016/j.ejwf.2021.11.003>
- Bichu, Y. M., Alwafi, A., Liu, X., Andrews, J., Ludwig, B., Bichu, A. Y., & Zou, B. (2023). Advances in orthodontic clear aligner materials. *Bioact Mater*, 22, 384–403. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2022.10.006>
- Bishara, S. E., Hoppens, B. J., Jakobsen, J. R., & Kohout, F. J. (1988). Changes in the molar relationship between the deciduous and permanent dentitions: a longitudinal study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 93(1), 19–28. [https://doi.org/10.1016/0889-5406\(88\)90189-8](https://doi.org/10.1016/0889-5406(88)90189-8)
- Bjork, A., & Helm, S. (1967). Prediction of the age of maximum puberal growth in body height. *Angle Orthod*, 37(2), 134–143. [https://doi.org/10.1043/0003-3219\(1967\)037<0134:POTAOM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1043/0003-3219(1967)037<0134:POTAOM>2.0.CO;2)
- Borzabadi-Farahani, A., Borzabadi-Farahani, A., & Eslamipour, F. (2010). An investigation into the association between facial profile and maxillary incisor trauma, a clinical non-radiographic study. *Dent Traumatol*, 26(5), 403–408. <https://doi.org/10.1111/j.1600-9657.2010.00920.x>
- Broadbent, B. H. (1931). A new x-ray technique and its application to orthodontia. *The angle orthodontist*, 1(2), 45–66.
- Brook, P. H., & Shaw, W. C. (1989). The development of an index of orthodontic treatment priority. *Eur J Orthod*, 11(3), 309–320. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.ejo.a035999>
- Caruso, S., Nota, A., Caruso, S., Severino, M., Gatto, R., Meuli, S., Mattei, A., & Tecco, S. (2021). Mandibular advancement with clear aligners in the treatment of skeletal Class II. A retrospective controlled study. *Eur J Paediatr Dent*, 22(1), 26–30. <https://doi.org/10.23804/ejpd.2021.22.01.05>
- Chadwick, S., Aird, J., Taylor, P., & Bearn, D. (2001). Functional regulator treatment of Class II division 1 malocclusions. *The European Journal of Orthodontics*, 23(5), 495–505.
- Cohen, J. (1992). A power primer. *Psychol Bull*, 112(1), 155–159. <https://doi.org/10.1037//0033-2909.112.1.155>
- Correa, E., et al. (2025). "Efficacy of Clear Aligner Therapy for the Treatment of Anterior Open Bite in Adults: A Systematic Review and Meta-Analysis." *Orthodontics & Craniofacial Research* 28(2): 261–270.
- Corruccini, R. S. (1984). An epidemiologic transition in dental occlusion in world populations. *Am J Orthod*, 86(5), 419–426. [https://doi.org/10.1016/s0002-9416\(84\)90035-6](https://doi.org/10.1016/s0002-9416(84)90035-6)
- Cozza, P., Baccetti, T., Franchi, L., De Toffol, L., & McNamara, J. A. (2006). Mandibular changes produced by functional appliances in Class II malocclusion: A systematic review. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 129(5). <https://doi.org/ARTN> 599.e1

- Cremonini, F., Pavan, F., Cervinara, F., Palone, M., & Lombardo, L. (2024). A new functional approach to Class II treatment with clear aligners in growing patients. *J Clin Orthod*, 58(4), 221–235.
- Djeu, G., Shelton, C., & Maganzini, A. (2005). Outcome assessment of invisalign and traditional orthodontic treatment compared with the American Board of Orthodontics objective grading system. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 128(3), 292–298. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2005.06.002>
- Ehsani, S., Nebbe, B., Normando, D., Lagravere, M. O., & Flores-Mir, C. (2015). Short-term treatment effects produced by the Twin-block appliance: a systematic review and meta-analysis. *European Journal of Orthodontics*, 37(2), 170–176.
- Enlow, D. H. (1979). Facial growth and development. *Int J Oral Myol*, 5(4), 7–10.
- Finlay, L. M. (1980). Craniometry and cephalometry: a history prior to the advent of radiography. *Angle Orthod*, 50(4), 312–321. [https://doi.org/10.1043/0003-3219\(1980\)050<0312:CACAHP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1043/0003-3219(1980)050<0312:CACAHP>2.0.CO;2)
- Franchi, L., Baccetti, T., & McNamara, J. A., Jr. (1998). Cephalometric floating norms for North American adults. *Angle Orthod*, 68(6), 497–502. [https://doi.org/10.1043/0003-3219\(1998\)068<0497:CFNFNA>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1043/0003-3219(1998)068<0497:CFNFNA>2.3.CO;2)
- Fränkel, R., & Fränkel, C. (1989). *Orofacial orthopedics with the function regulator*. Karger Medical and Scientific Publishers.
- Galan-Lopez, L., Barcia-Gonzalez, J., & Plasencia, E. (2019). A systematic review of the accuracy and efficiency of dental movements with Invisalign®. *Korean Journal of Orthodontics*, 49(3), 140–149. <https://doi.org/10.4041/kjod.2019.49.3.140>
- Geiger, A. M. (2001). Malocclusion as an etiologic factor in periodontal disease: a retrospective essay. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 120(2), 112–115. <https://doi.org/10.1067/mod.2001.114537>
- George, A. M., Felicita, A. S., Milling Tania, S. D., & Priyadharsini, J. V. (2021). Systematic review on the genetic factors associated with skeletal Class II malocclusion. *Indian J Dent Res*, 32(3), 399–406. https://doi.org/10.4103/ijdr.IJDR_59_20
- Ghorbani, M., Mousavi, S. A., Bardideh, E., Saeedi, P., Shahnaseri, S., Shafaei, H., & Akyalcin, S. (2025). The Effectiveness of Functional Clear Aligners for Class II Correction in Growing Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Orthodontics & Craniofacial Research*, 28(4), 577–592.
- Glaser, B. J., Tai, S. K., Blevins, R., & Daher, S. (2022). Prospective multicenter investigation of Invisalign treatment with the mandibular-advancement feature: An interim report. *Journal of Clinical Orthodontics: JCO*, 56(8), 458–463.
- Gurgel, M. L., de Oliveira Ruellas, A. C., Bianchi, J., McNamara, J. A., Jr., Tai, S., Franchi, L., Deleat-Besson, R., Le, C., Logan, C., Turkestani, N. A., Massaro, C., Del Castillo, A. A., Arruda, K. E. M., Benavides, E., Yatabe, M., & Cevidane, L. (2023). Clear aligner mandibular advancement in growing patients with Class II malocclusion. *AJO DO Clin Companion*, 3(2), 93–109. <https://doi.org/10.1016/j.xaor.2023.01.003>
- Hahn, W., Zapf, A., Dathe, H., Fialka-Fricke, J., Fricke-Zech, S., Gruber, R., Kubein-Meesenburg, D., & Sadat-Khonsari, R. (2010). Torquing an upper

- central incisor with aligners—acting forces and biomechanical principles. *The European Journal of Orthodontics*, 32(6), 607–613.
- Harzer, W. (1999). *Lehrbuch der Kieferorthopädie*. Deutscher Ärzteverlag.
- Harzer, W. (2011). *Kieferorthopädie*. Thieme Verlag.
- Hinz, R., Senkel, H., & Thouet, Z. M. (1989). [When is orthodontic treatment of deciduous teeth needed?]. *Zahnarztl Mitt*, 79(21), 2429–2430, 2432, 2434 passim. (Original work published Wann ist die kieferorthopadische Behandlung im Milchgebiss nötig?)
- Hirani, S., Hirani, T., Shah, A., Patel, S., Mehta, M., Patel, P., Kumar, S., & Haque, M. (2025). Morphogenetic Expression of Genes in Class II Division 2 Malocclusion: A Pedigree Study. *Cureus*, 17(5), e83647. <https://doi.org/10.7759/cureus.83647>
- Hofrath, H. (1931). Die bedeutung der röntgenfern-und abstandsaufnahme für die diagnostik der kieferanomalien. *Fortschritte der Orthodontik in Theorie und Praxis*, 1(2), 232–258.
- Hosseini, H. R., Ngan, P., Tai, S. K., Andrews II, L. J., & Xiang, J. (2024). A comparison of skeletal and dental changes in patients with a Class II relationship treated with clear aligner mandibular advancement and Herbst appliance followed by comprehensive orthodontic treatment. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 165(2), 205–219.
- Hosseini, H. R., Ngan, P., Tai, S. K., Andrews, L. J., 2nd, & Xiang, J. (2024). A comparison of skeletal and dental changes in patients with a Class II relationship treated with clear aligner mandibular advancement and Herbst appliance followed by comprehensive orthodontic treatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 165(2), 205–219. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2023.08.015>
- Hu, Y., & Li, H. (2024). Concerns about the conclusion that clear aligner mandibular advancement provides better vertical control in growing patients with Class II. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 166(4), 305–306. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2024.07.012>
- Huang, X. Q., Tao, Y., Huang, Z. M., Zhao, Z. H., & Cen, X. (2026). Comparative efficacy of clear aligner mandibular advancement versus traditional functional appliances for skeletal Class II malocclusion: a systematic review and meta-analysis. *BMC Oral Health*, 26(1). <https://doi.org/ARTN833>
- Iacobelli, R., et al. (2026). "Dietary changes in patients with clear aligners compared with fixed orthodontic appliances during the early stages of orthodontic treatment: A systematic review." *Korean Journal of Orthodontics* 56(2): 142–166.
- Ingervall, B., & Ronnerman, A. (1975). Index for need of orthodontic treatment. *Odontol Revy*, 26(1), 59–82.
- Janson, G. R., Toruno, J. L., Martins, D. R., Henriques, J. F., & de Freitas, M. R. (2003). Class II treatment effects of the Frankel appliance. *Eur J Orthod*, 25(3), 301–309. <https://doi.org/10.1093/ejo/25.3.301>
- Janson, T., & Ingervall, B. (1982). Relationship between lip strength and lip function in posture and chewing. *Eur J Orthod*, 4(1), 45–53. <https://doi.org/10.1093/ejo/4.1.45>

- Kesling, H. D. (1945). The philosophy of the tooth positioning appliance. *American Journal of Orthodontics and Oral Surgery*, 31(6), 297–304.
- Khalil, A. S., Alrehaili, R. S., Mahmoud, Z., Alrashidi, R., Alkhalaf, A., Abdelmaksoud, M., Linjawi, L., Alsahafi, R., Alghareeb, Z., Bujbarah, F., Shahir, N., & Assiry, A. A. (2025). Interceptive Treatment of Class II Malocclusion in Pediatric Patients Using Clear Aligner Mandibular Advancement: A Systematic Review Following PRISMA Guidelines. *Cureus*, 17(4), e82089. <https://doi.org/10.7759/cureus.82089>
- Kinzing, G. S. M., Hourfar, J., & Lisson, J. A. (2025). Prevalence of malocclusions requiring treatment according to the KIG classification : A multipart cross-sectional study over a 20-year period in the district of Viersen/North Rhine. *J Orofac Orthop*, 86(6), 374–391. <https://doi.org/10.1007/s00056-024-00518-1> (Original work published Pravalenz behandlungsbedürftiger Zahnfehlstellungen nach der KIG-Klassifikation : Eine mehrteilige Querschnittsstudie über einen Zeitraum von 20 Jahren im Kreis Viersen/Nordrhein.)
- Kinzing, G. S. M., Hourfar, J., Maletic, A., & Lisson, J. A. (2026). Age-dependent prevalence of malocclusions requiring treatment according to the KIG classification : A multipart cross-sectional study over a 10-year period from the district of Viersen/North Rhine. *J Orofac Orthop*, 87(1), 55–73. <https://doi.org/10.1007/s00056-024-00550-1> (Original work published Altersabhängige Pravalenz von nach KIG-Klassifikation behandlungsbedürftigen Malokklusionen : Eine mehrteilige Querschnittsstudie über einen Zeitraum von 10 Jahren aus dem Kammerbezirk Viersen/Nordrhein.)
- Kircelli, B. H., Tek, F. B., Çetinkaya-Tokmak, E., & Çobanoglu, G. (2025). Comparative Effects of Mandibular Advancement With Invisalign Enhanced Precision Wings and Twin Block Appliance on Dentofacial Structures. *Orthodontics & Craniofacial Research*. <https://doi.org/10.1111/ocr.70058>
- Korkhaus, G. (1948). Erfahrungen mit der Funktionskieferorthopädie. *Dtsch. zahnärztl. Z.*, 3, 466–466.
- Korkhaus, G. (1960). Present orthodontic thought in Germany: Experiences with the Norwegian method of functional orthopedics in the treatment of distocclusion. *American Journal of Orthodontics*, 46(4), 270–287.
- Koukou, M., Damanakis, G., & Tsolakis, A. I. (2022). Orthodontic Management of Skeletal Class II Malocclusion with the Invisalign Mandibular Advancement Feature Appliance: A Case Report and Review of the Literature. *Case Reports in Dentistry*, 2022. <https://doi.org/Artin 7095467>
- Lagravère, M. O., & Flores-Mir, C. (2005). The treatment effects of invisalign orthodontic aligners - A systematic review. *Journal of the American Dental Association*, 136(12), 1724–1729. <https://doi.org/DOI 10.14219/jada.archive.2005.0117>
- Lombardo, E. C., Lione, R., Franchi, L., Gaffuri, F., Maspero, C., Cozza, P., & Pavoni, C. (2024). Dentoskeletal effects of clear aligner vs twin block-a short-term study of functional appliances. *J Orofac Orthop*, 85(5), 317–326. <https://doi.org/10.1007/s00056-022-00443-1> (Original work

- published Dentoskelettale Auswirkungen von Clear Aligner vs. Twin Block - eine Kurzzeitstudie zu funktionellen Apparaturen.)
- Lombardo, E. C., Lione, R., Franchi, L., Gaffuri, F., Maspero, C., Cozza, P., & Pavoni, C. (2024). Dentoskeletal effects of clear aligner vs twin block—a short-term study of functional appliances. *Journal of Orofacial Orthopedics/Fortschritte der Kieferorthopädie*, 85(5), 317–326.
- Lombardo, E. C., Lugli, L., Lione, R., Bollero, P., Cozza, P., & Pavoni, C. (2025). Orthodontic Management of Class II Malocclusion with Clear Aligners: Mandibular Advancement vs. Class II Elastics. *Children-Basel*, 12(5). <https://doi.org/ARTN> 562
- Lombardo, G., Vena, F., Negri, P., Pagano, S., Barilotti, C., Paglia, L., Colombo, S., Orso, M., & Cianetti, S. (2020). Worldwide prevalence of malocclusion in the different stages of dentition: A systematic review and meta-analysis. *Eur J Paediatr Dent*, 21(2), 115–122. <https://doi.org/10.23804/ejpd.2020.21.02.05>
- Lund, D. L., & Sandler, P. J. (1998). The effects of Twin Blocks: A prospective controlled study. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 113(1), 104–110. <https://doi.org/Doi> 10.1016/S0889-5406(98)70282-3
- Mecenas, P., Bastos, R. T. D. M., Fagundes, N. C. F., & Normando, D. (2025). Precision wings treating skeletal class II in growing patients: a systematic review and meta-analysis. *Progress in Orthodontics*, 26(1). <https://doi.org/ARTN> 16
- Mills, J. (1991). The effect of functional appliances on the skeletal pattern. *British Journal of Orthodontics*, 18(4), 267–275.
- Moorrees, C. F. (1991). Growth and development in orthodontics. *Curr Opin Dent*, 1(5), 609–621.
- Mossey, P. A. (1999a). The heritability of malocclusion: Part 1--Genetics, principles and terminology. *Br J Orthod*, 26(2), 103–113. <https://doi.org/10.1093/ortho/26.2.103>
- Mossey, P. A. (1999b). The heritability of malocclusion: part 2. The influence of genetics in malocclusion. *Br J Orthod*, 26(3), 195–203. <https://doi.org/10.1093/ortho/26.3.195>
- Müller, H.-J. (1976). Der ANB-Winkel bei der Behandlung des Distalbisses mit dem Aktivator. *Fortschritte der Kieferorthopädie*, 37(3), 263–271. <https://doi.org/10.1007/BF02168671>
- Padure, H., Negru, A. R., & Stanciu, D. (2012). The class II/1 anomaly of hereditary etiology vs. thumb-sucking etiology. *J Med Life*, 5(2), 239–241.
- Panagiotidis, G., & Witt, E. (1977). Der individualisierte ANB-Winkel. *Fortschritte der Kieferorthopädie*, 38, 408–416.
- Pancherz, H. (1982). The mechanism of Class II correction in Herbst appliance treatment: a cephalometric investigation. *American Journal of Orthodontics*, 82(2), 104–113.
- Patel, E., Moon, S., Suh, H., Chen, J., Tai, S. K., & Oh, H. (2025). Clear aligners for Class II correction in growing patients: elastics vs mandibular advancement. *Angle Orthod*. <https://doi.org/10.2319/032825-251.1>

- Perera, P. S. (1981). Orienting dental casts to cephalometric radiographs. *Angle Orthod*, 51(3), 246–251. [https://doi.org/10.1043/0003-3219\(1981\)051<0246:ODCTCR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1043/0003-3219(1981)051<0246:ODCTCR>2.0.CO;2)
- Perinetti, G., Primožič, J., Furlani, G., Franchi, L., & Contardo, L. (2015). Treatment effects of fixed functional appliances alone or in combination with multibracket appliances: a systematic review and meta-analysis. *The angle orthodontist*, 85(3), 480–492.
- Petrovic, A., Stutzmann, J., Lavergne, J., & Shaye, R. (1988). Is it possible to modulate the growth of the human mandible with a functional appliance? *Bilt Udruz Ortodonata Jugosl*, 21(1), 15–20.
- Pithon, M. M., Baião, F. C. S., Sant' Anna, L. I. D. d. A., Paranhos, L. R., & Cople Maia, L. (2019). Assessment of the effectiveness of invisible aligners compared with conventional appliance in aesthetic and functional orthodontic treatment: A systematic review. *Journal of investigative and clinical dentistry*, 10(4), e12455.
- Rabie, A., Wong, L., & Tsai, M. (2003). Replicating mesenchymal cells in the condyle and the glenoid fossa during mandibular forward positioning. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 123(1), 49–57.
- Rabie, A. B., She, T. T., & Hagg, U. (2003). Functional appliance therapy accelerates and enhances condylar growth. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 123(1), 40–48. <https://doi.org/10.1067/mod.2003.45>
- Rabie, A. B., Zhao, Z., Shen, G., Hagg, E. U., Dr, O., & Robinson, W. (2001). Osteogenesis in the glenoid fossa in response to mandibular advancement. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 119(4), 390–400. <https://doi.org/10.1067/mod.2001.112875>
- Rakosi, T. (1966). [Possibilities and limitation of preventive orthodontics in the deciduous dentition]. *Dtsch Zahnarztl Z*, 21(7), 847–853. (Original work published *Möglichkeiten und Grenzen der kieferorthopädischen Praevention im Milchgebiss*.)
- Rakosi, T. (1969). [Prevention of malocclusions and preventive orthodontics]. *SSO Schweiz Monatsschr Zahnheilkd*, 79(10), 1169–1188. (Original work published *Prävention der Gebissanomalien und präventive Kieferorthopädie*.)
- Ravera, S., Castroflorio, T., Galati, F., Cugliari, G., Garino, F., Deregibus, A., & Quinzi, V. (2021). Short term dentoskeletal effects of mandibular advancement clear aligners in Class II growing patients. A prospective controlled study according to STROBE Guidelines. *European Journal of Paediatric Dentistry*, 119–124.
- Richmond, S., Shaw, W. C., O'Brien, K. D., Buchanan, I. B., Jones, R., Stephens, C. D., Roberts, C. T., & Andrews, M. (1992). The development of the PAR Index (Peer Assessment Rating): reliability and validity. *Eur J Orthod*, 14(2), 125–139. <https://doi.org/10.1093/ejo/14.2.125>
- Ricketts, R. M. (2000). A statement regarding early treatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 117(5), 556–558. [https://doi.org/10.1016/s0889-5406\(00\)70198-3](https://doi.org/10.1016/s0889-5406(00)70198-3)
- Ruhland, A. (1969). Die Variationsbreite von Fernröntgen-Durchzeichnungen. *Fortschritte der Kieferorthopädie*, 30(1), 67–71.

- Sander, F. G., & Wichelhaus, A. (1995). [Skeletal and dental changes during the use of the bite-jumping plate. A cephalometric comparison with an untreated Class-II group]. *Fortschr Kieferorthop*, 56(3), 127–139. <https://doi.org/10.1007/BF02276629> (Original work published Skelettale und dentale Veränderungen bei der Anwendung der Vorschubdoppelplatte. Ein kephalometrischer Vergleich zu einer unbehandelten Klasse-II-Gruppe.)
- Sayinsu, K., Isik, F., Trakyalı, G., & Arun, T. (2007). An evaluation of the errors in cephalometric measurements on scanned cephalometric images and conventional tracings. *European Journal of Orthodontics*, 29(1), 105–108. <https://doi.org/10.1093/ejo/cjl065>
- Schopf, P. (1994). *Curriculum kieferorthopädie* (Vol. 2). Quintessenz.
- Schopf, P. (2008). *Curriculum orthodontics*. Berlin, Germany: Quintessenz.
- Schwarz, A. (1952). Über die natürlichen Reizquellen beim kieferorthopädischen Gewebsumbau. *Fortschritte der Kieferorthopädie*, 13(1), 15–23.
- Schwarz, A. M. (1952). Die wirkungsweise des aktivators. *Fortschritte der Kieferorthopädie*, 13(3), 117–138.
- Segner, D. (1989). Floating norms as a means to describe individual skeletal patterns. *Eur J Orthod*, 11(3), 214–220. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.ejo.a035988>
- Severino, M., Mattei, A., Vena, F., Viarchi, A., Truppa, C. T., Lombardo, G., Carullo, R., Cialfi, D., Bertini, L., & Cianetti, S. (2025). Associations between oral habits and specific malocclusion traits in children: a retrospective cross-sectional study in Italy. *BMC Oral Health*, 25(1), 1534. <https://doi.org/10.1186/s12903-025-06892-5>
- Simon, M., Keilig, L., Schwarze, J., Jung, B. A., & Bourauel, C. (2014). Forces and moments generated by removable thermoplastic aligners: incisor torque, premolar derotation, and molar distalization. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 145(6), 728–736.
- Sohn, B. J., et al. (2026). "Efficacy of clear functional orthodontic appliances versus traditional functional appliances in the treatment of Class II malocclusion: A systematic review and meta-analysis." *Korean Journal of Orthodontics* 56(2): 167–180.
- Stein, K. F., Kelley, T. J., & Wood, E. (1956). Influence of heredity in the etiology of malocclusion. *American Journal of Orthodontics*, 42(2), 125–141.
- Vaid, N. R., Doshi, V. M., & Vandekar, M. J. (2014). Class II treatment with functional appliances: a meta-analysis of short-term treatment effects. *Seminars in Orthodontics*,
- Venkatesan, K., Kailasam, V., Padmanabhan, S., & Vaid, N. (2026). Coefficient of efficiency and effectiveness of functional appliances in class II malocclusion treatment : A systematic review. *J Orofac Orthop*, 87(3), 306–333. <https://doi.org/10.1007/s00056-025-00585-y> (Original work published Effizienzkoeffizient und Effektivität von funktionellen Apparaturen bei der Behandlung von Klasse-II-Fehlstellungen : Eine systematischer Review.)
- Versyck, B., & Rakosi, T. (1989). [The mandibular action of individual treatment remedies depending on facial morphology]. *Fortschr Kieferorthop*, 50(6), 518–529. <https://doi.org/10.1007/BF02163154> (Original work published

- Mandibulare Wirkungsweise einzelner Behandlungsmittel in Abhängigkeit von der Gesichtsmorphologie.)
- WALKER, G. F., & Kowalski, C. J. (1971). The distribution of the ANB angle in "normal" individuals. *The angle orthodontist*, 41(4), 332–335.
- Watson, W. G. (1982). Clinical Alteration of the Growing Face - the Michigan-Symposium through the Eyes of the Editor .1. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 82(4), 343–346. [https://doi.org/Doi.10.1016/0002-9416\(82\)90468-7](https://doi.org/Doi.10.1016/0002-9416(82)90468-7)
- White, D. W., Julien, K. C., Jacob, H., Campbell, P. M., & Buschang, P. H. (2017). Discomfort associated with Invisalign and traditional brackets: A randomized, prospective trial. *Angle Orthod*, 87(6), 801–808. <https://doi.org/10.2319/091416-687.1>
- Wichelhaus, A. (2017). *Farbatlant der Zahnmedizin: Kieferorthopädie-Therapie*. Thieme.
- Wo, P. K., Mei, L., & Tan, L. J. (2025). Comparative effects of clear aligner mandibular advancement and twin block appliances in Class II malocclusion. *Journal of Clinical Pediatric Dentistry*, 49(5), 87–97. <https://doi.org/10.22514/jocpd.2025.103>
- Wu, Y., Yu, Q., Xia, Y., Wang, B., Chen, S., Gu, K., Zhang, B., & Zhu, M. (2023). Does mandibular advancement with clear aligners have the same skeletal and dentoalveolar effects as traditional functional appliances? *BMC Oral Health*, 23(1), 65.
- Yildirim, E., Karacay, S., & Erkan, M. (2014). Condylar response to functional therapy with Twin-Block as shown by cone-beam computed tomography. *Angle Orthod*, 84(6), 1018–1025. <https://doi.org/10.2319/112713-869.1>
- Zymperdikas, V. F., Koretsi, V., Papageorgiou, S. N., & Papadopoulos, M. A. (2016). Treatment effects of fixed functional appliances in patients with Class II malocclusion: a systematic review and meta-analysis. *European Journal of Orthodontics*, 38(2), 113–126.

7 Erklärung zum Eigenanteil

Die vorliegende Arbeit wurde in der Poliklinik für Kieferorthopädie, Universitätsklinik für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde, Universitätsklinikum Tübingen, unter Betreuung von Prof. Dr. Bernd Koos durchgeführt.

Die Konzeption der Studie erfolgte durch mich, in Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Bernd Koos, Ärztlicher Direktor der Poliklinik für Kieferorthopädie, Universitätsklinikum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde, Universitätsklinikum Tübingen.

Die gesamte Datenerhebung, sowie Datenverarbeitung und -analyse wurden von mir eigenständig durchgeführt.

Die statistische Auswertung der erhobenen Daten erfolgte, nach Beratung durch Dr. Gunnar Blumenstock (stellvertretende Institutsleitung, Institut für Klinische Epidemiologie und angewandte Biometrie, Universitätsklinikum Tübingen), eigenständig durch mich.

Bei der Anfertigung der vorliegenden Dissertationsschrift wurde das KI Programm Perplexity AI ausschließlich zur Überprüfung von Rechtschreibung und Grammatik, sowie zur sprachlichen Optimierung genutzt.

Ich versichere, das Manuskript selbständig verfasst zu haben und keine weiteren als die von mir angegebenen Quellen verwendet zu haben.

Tübingen, den 12.06.2026

8 Veröffentlichung

Analyse der skelettalen Veränderungen bei Patienten unter Alignertherapie mit Funktionselementen – eine retrospektive kephalometrische Auswertung

Autor: F. Edelmann, A. Hoffmann, G. Blumenstock, B. Koos

Veröffentlicht als Posterpräsentation im Rahmen der 54. Jahrestagung der österreichischen Gesellschaft für Kieferorthopädie 2026 (ÖGKFO)

9 Danksagung

Ich danke Herrn Prof. Dr. Bernd Koos, Ärztlicher Direktor der Poliklinik für Kieferorthopädie der Universitätsklinik für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde des Universitätsklinikums Tübingen, für die Ermöglichung dieser Dissertation, die Überlassung des Themas, die konstruktive Kritik und die wertvollen Ratschläge während der Erstellung dieser Arbeit herzlich. Ganz besonders möchte ich mich aber für das angenehme Arbeitsumfeld und die stets vertrauensvolle und motivierende Zusammenarbeit bedanken.

Herrn Dr. Gunnar Blumenstock, Stellvertretender Institutsleiter und Lehrbeauftragter des Instituts für Klinische Epidemiologie und angewandte Biometrie des Universitätsklinikums Tübingen, danke ich herzlich für die freundliche Beratung und Unterstützung in allen statistischen Fragen.

Mein größter Dank gilt meiner Familie: Meiner Mutter Sigrid für die stetige Unterstützung in allen Lebensphasen und die Vermittlung einer Werte- und Arbeitsmoral, ohne die weder mein Studium, mein Fachzahnarzt, noch diese Dissertation möglich gewesen wäre. Meiner Schwester Malinda für die immer positive Einstellung, den stets motivierenden Zuspruch, sowie Hilfe in technischen Fragen. Meinem Partner Moritz für sein immer vorhandenes Verständnis, seine unendliche Geduld und emotionale Unterstützung.