

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

**Retrospektive kieferorthopädisch dreidimensionale
Auswertung von anonymisierten Patientendaten zur
Beurteilung der Umsetzung von
Zahnbewegungen mittels Alignertherapie**

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

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

**vorgelegt von
Brendle, Antonia geb. Hoffmann**

2026

Dekanin: Professorin Dr. S. Y. Brucker

1. Berichterstatter: Professor Dr. B. Koos

2. Berichterstatter: Professor. Dr. Dr. B. Lethaus

Tag der Disputation: 05.10.2026

Für meine Familie &

meinen Verlobten

Inhalt

Abbildungsverzeichnis.....	VI
Tabellenverzeichnis.....	X
Abkürzungsverzeichnis	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Einführung.....	1
1.2 Historischer Überblick	7
1.3 Das Aligner System.....	9
1.4 Der dreidimensionale Scanner.....	11
1.5 Grundlagen und Biomechanik der kieferorthopädischen Zahnbewegungen	12
1.6 Fragestellung und Ziel.....	19
2 Material und Methoden	21
2.1 Untersuchungsmethode und -zeitraum	21
2.2 Auswahl der Patienten	23
2.3 Bewertung der Zahnbewegung mit dem iTero	23
2.4 Auswertung und statistische Analyse.....	28
2.5 Ethikvotum	30
3 Ergebnisse.....	31
3.1 Ergebnisse Oberkiefer	35
3.1.1 Ergebnisse Oberkiefer 1. Quadrant Seitenzahngebiet.....	37
3.1.2 Ergebnisse Oberkiefer Frontzahngebiet	40
3.1.3 Ergebnisse Oberkiefer 2. Quadrant Seitenzahngebiet.....	43
3.2 Ergebnisse Unterkiefer.....	47
3.2.1 Ergebnisse Unterkiefer 3. Quadrant Seitenzahngebiet	47

3.2.2	Ergebnisse Unterkiefer Frontzahnggebiet.....	49
3.2.3	Ergebnisse Unterkiefer 4. Quadrant Seitenzahnggebiet	51
4	Diskussion	59
4.1	Diskussion der Methode.....	59
4.2	Diskussion der Ergebnisse.....	62
4.3	Schlussfolgerung und klinische Konsequenzen	72
5	Zusammenfassung	74
6	Literaturverzeichnis.....	76
7	Erklärung zum Eigenanteil	82
8	Veröffentlichung.....	83
9	Danksagung.....	84

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Schematische Darstellung der Biomechanik der Zahnbewegung im Parodont. Darstellung der Zugseite mit entsprechendem Knochenanbau (links) durch Osteoblasten und der Stauchungsseite mit entsprechendem Knochenabbau (rechts) durch Osteoklasten.	14
Abbildung 2 Darstellung der unkontrollierten Kippung und ihrer Biomechanik. Hierbei liegt das Rotationszentrum außerhalb des Widerstandszentrums, wodurch es zu einer Kippung der Krone in Richtung der Kraft kommt und einer entgegengesetzten Bewegung der Zahnwurzel kommt.....	15
Abbildung 3 Darstellung der kontrollierten Kippung und ihrer Biomechanik. Hierbei liegt das Rotationszentrum fast am Apex, wodurch es zu einer Kippung der Krone in Richtung der Kraft kommt und einer nahezu fehlenden Auslenkung der Zahnwurzel.....	16
Abbildung 4 Darstellung der Translation und ihrer Biomechanik. Hierbei liegt das Rotationszentrum im Unendlichen, wodurch es zu keiner Kippung oder der Zahnwurzel kommt. Der Zahn bewegt sich körperlich.....	17
Abbildung 5 Darstellung des Torque und seiner Biomechanik. Hierbei liegt das Rotationszentrum im Bereich der Inzisalkante, wodurch es zu einer Kippung der Zahnwurzel entgegen der Kraft kommt..	18
Abbildung 6 Beispielhafte Darstellung eines ClinChecks und einer Behandlungssituation bei Invisalign (Align Technology). Darstellung einer Behandlungssequenz inklusive Darstellung der Sequenzierung (unten rechts) sowie der Tabelle der Zahnbewegungen (unten).	22
Abbildung 7 Beispielhafte Darstellung einer Fortschrittsbeurteilung im iTero Intraoralscanner von Align Technology. Dreidimensionaler Scan bei Aligner #21 und Überlagerung durch die KI mit der ClinCheck Planung im Oberkiefer. Darstellung der Zähne 12, 25, 26, 27 und von einzelnen Zahnbewegungen in grau und damit zu keiner Zahnbewegung erkannt durch die KI. Darstellung der Zähne 25 und 27 und von einzelnen Zahnbewegungen in Gelb und damit eine zu langsam erkannte Zahnbewegung. Darstellung der Zähne 23, 24 und von	

einzelnen Zahnbewegungen in grün und damit die erwartete Zahnbewegung erkannt durch die KI 24

Abbildung 8 Beispielhafte Darstellung einer Fortschrittsbeurteilung im iTero Intraoralscanner von Align Technology. Dreidimensionaler Scan bei Aligner #21 und Überlagerung durch die KI mit der ClinCheck Planung im Unterkiefer.

Darstellung des Zahnes 36 und von einer einzelnen Zahnbewegungen in Grau und damit zu keiner Zahnbewegung erkannt durch die KI. Darstellung der Zähne 42, 33, 34 und von einzelnen Zahnbewegungen in Grün und damit die erwartete Zahnbewegung erkannt durch die KI 25

Abbildung 9 Kriterien der Beurteilung der KI in der Fortschrittsbeurteilung durch den Intraoralscanner iTero von Align Technologie. Nach dem Abgleich der klinischen Situation mit der Alignerstufe aus dem ClinCheck erfolgt die farbliche und tabellarische Darstellung der Zahnbewegung entsprechend ihres Behandlungserfolges. Darstellung der translatorischen Zahnbewegungen in Grün, wenn die Zahnbewegungen entsprechend der Planung oder maximal zu 20 % abweichend verläuft. Darstellung der translatorischen Zahnbewegung in Gelb, wenn die Zahnbewegung eine verlangsamte Abweichung von 20-70 % aufzeigt. Darstellung der translatorischen Zahnbewegung in Grau, wenn die Zahnbewegungen keine Änderung oder unter 0,25 mm Veränderung aufzeigt. Darstellung der translatorischen Zahnbewegung in Lila, wenn die Zahnbewegung eine entgegengesetzte Zahnbewegung über 0,25 mm aufzeigt. 26

Abbildung 10 Kriterien der Beurteilung der KI in der Fortschrittsbeurteilung durch den Intraoralscanner iTero von Align Technologie. Nach dem Abgleich der klinischen Situation mit der Alignerstufe aus dem ClinCheck erfolgt die farbliche und tabellarische Darstellung der Zahnbewegung entsprechend ihres Behandlungserfolges. Darstellung der rotatorischen Zahnbewegungen in Grün, wenn die Zahnbewegungen entsprechend der Planung oder maximal zu 20 % abweichend verläuft. Darstellung der rotatorischen Zahnbewegung in Gelb, wenn die Zahnbewegung eine verlangsamte Abweichung von 20-70 % aufzeigt. Darstellung der rotatorischen Zahnbewegung in Grau, wenn die Zahnbewegungen keine Änderung oder unter 0,25° Veränderung aufzeigt.

Darstellung der rotatorischen Zahnbewegung in lila, wenn die Zahnbewegung eine entgegengesetzte Zahnbewegung von über 0,25° aufzeigt.....	27
Abbildung 11 Klinische Situation eines schlecht sitzenden Aligners an Zahn 13, 12 und 22. Die Zähne 13, 12 und 22 zeigen inzisal Luft im Aligner auf.	28
Abbildung 12 Darstellung im Kuchendiagramm der Patientenkohorte der 73 Patienten. Anteil der männlichen Patienten (blau) von 34,2 % also 25. Anteil der weiblichen Patienten (Pink) von 65,8 % also 48.....	31
Abbildung 13 Darstellung der Altersverteilung der 73 Patienten im Histogramm und Boxplot. Die Probanden waren zum Zeitpunkt der Untersuchung zwischen 8,6 und 55,8 Jahre alt, mit einem Durchschnittlichen Alter von 21,1 Jahre und einem Median von 16,8 Jahren.	32
Abbildung 14 Histogramm zur Verteilung innerhalb der Altersklassen von unter 14-jährigen bei einer Häufigkeit von 17, 14- bis 18-jährige bei einer Häufigkeit von 28, über 18-jährige bei einer Häufigkeit von 28.	32
Abbildung 15 Beispielhafte Darstellung einer Fortschrittsbeurteilung im iTero Intraoralscanner von Align Technology. Dreidimensionaler Scan bei Aligner #26 und Überlagerung durch die KI mit der ClinCheck Planung im Oberkiefer. Hier dargestellt eine sehr gute Umsetzung der Alignerbewegung	33
Abbildung 16 Beispielhafte Darstellung einer Fortschrittsbeurteilung im iTero Intraoralscanner von Align Technology. Dreidimensionaler Scan bei Aligner #26 und Überlagerung durch die KI mit der ClinCheck Planung im Unterkiefer. Hier dargestellt eine sehr gute Umsetzung der Alignerbewegung	34
Abbildung 17 Beispielhafte Darstellung einer Fortschrittsbeurteilung im iTero Intraoralscanner von Align Technology. Dreidimensionaler Scan bei Aligner #32 und Überlagerung durch die KI mit der ClinCheck Planung im Oberkiefer. Hier dargestellt eine mäßig gute Umsetzung der Alignerbewegung.	34
Abbildung 18 Beispielhafte Darstellung einer Fortschrittsbeurteilung im iTero Intraoralscanner von Align Technology. Dreidimensionaler Scan bei Aligner #32 und Überlagerung durch die KI mit der ClinCheck Planung im Unterkiefer. Hier dargestellt eine mäßig gute Umsetzung der Alignerbewegung	35
Abbildung 19 Darstellung der gesamten Ergebnisse und der Häufigkeit im Bezug des Gesamterfolg einer Therapie zum Geschlecht weiblich/männlich. .	53

Abbildung 20 Darstellung der gesamten Ergebnisse und der Häufigkeit im Bezug des Gesamterfolges einer Therapie zur Altersklasse bei Patienten und Patientinnen unter 14 Jahren, zwischen 14 und 18 Jahren und über 18 Jahren.	55
Abbildung 21 Darstellung der Untersuchung aller Zähne im Oberkiefer in Bezug auf den Therapieerfolg (ja) oder keinen Therapieerfolg (nein).	57
Abbildung 22 Darstellung der Untersuchung aller Zähne im Unterkiefer in Bezug auf den Therapieerfolg (ja) oder keinen Therapieerfolg (nein).	57
Abbildung 23 Beispielhafte Behandlung des Oberkiefers mit Alignern und ergänzendem Auxiliare – Mini-Implantate und ergänzender Mesialslider.....	65
Abbildung 24 Beispielhafte Behandlung des Unterkiefers mit Alignern und ergänzendem Auxiliare – Mini-Implantat und ergänzendem Powerhook, sowie ergänzendem Gummizug.	66
Abbildung 25 Beispielhafte Behandlung des Oberkiefers mit Alignern und ergänzendem Auxiliare – Mini-Implantate und ergänzende Mausefalle.	66
Abbildung 26 Beispielhafte Behandlung des Oberkiefers mit Alignern und ergänzendem Auxiliare – Powerhooks und Gummizüge.	67
Abbildung 27 Beispielhafte Behandlung des Unterkiefers mit Alignern und ergänzendem Auxiliare – Powerhooks und Gummizüge.	67

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Darstellung der Unterschiede von herausnehmbaren Apparaturen und Alignern in unterschiedlichen Aspekten.....	6
Tabelle 2 Darstellung der Verteilung innerhalb der Altersklassen und Wahrscheinlichkeit von unter 14-jährigen bei einer Häufigkeit von 17, 14- bis 18-jährige bei einer Häufigkeit von 28, über 18-jährige bei einer Häufigkeit von 28.	33
Tabelle 3 Tabellarische Darstellung der gesamten Untersuchung und den 366 therapierten Zähnen eingeteilt in seine jeweiligen Regionen mit der Beurteilung des Behandlungserfolges und des Misserfolges.	35
Tabelle 4 Tabellarische Darstellung des Behandlungsergebnisses im 1. Quadranten der Zähne 17-13. Hierbei wurde bewertet, ob der jeweilige Zahn einen Behandlungserfolg oder keinen Behandlungserfolg aufgezeigt hat, sowie die spezifische Kombination der einzelnen Zahnbewegungen und Erfolge vorliegen und damit ein Fall als Gesamterfolg zu werten ist oder nicht.	37
Tabelle 5 Tabellarische Darstellung des Behandlungsergebnisses im Oberkiefer Frontzahngebiet der Zähne 12-22. Hierbei wurde bewertet, ob der jeweilige Zahn einen Behandlungserfolg oder keinen Behandlungserfolg aufgezeigt hat, sowie die spezifische Kombination der einzelnen Zahnbewegungen und Erfolge vorliegen und damit ein Fall als Gesamterfolg zu werten ist oder nicht.	40
Tabelle 6 Tabellarische Darstellung des Behandlungsergebnisses im 2. Quadranten der Zähne 23-27. Hierbei wurde bewertet, ob der jeweilige Zahn einen Behandlungserfolg oder keinen Behandlungserfolg aufgezeigt hat, sowie die spezifische Kombination der einzelnen Zahnbewegungen und Erfolge vorliegen und damit ein Fall als Gesamterfolg zu werten ist oder nicht.	43
Tabelle 7 Aufschlüsselung der einzelnen Zahnbewegungen im 1. Quadranten in Translation bukkal/lingual, Translation mesial/distal, Extrusion/Intrusion, Angulation mesial/distal, Inklination bukkal/lingual, Rotation mesial/distal.	45

Tabelle 8 Aufschlüsselung der einzelnen Zahnbewegungen im 2. Quadranten in Translation bukkal/lingual, Translation mesial/ distal, Extrusion/Intrusion, Angulation mesial/distal, Inklination bukkal/lingual, Rotation mesial/distal.	45
Tabelle 9 Tabellarische Darstellung des Behandlungsergebnisses im 3. Quadranten der Zähne 37-33. Hierbei wurde bewertet, ob der jeweilige Zahn einen Behandlungserfolg oder keinen Behandlungserfolg aufgezeigt hat, sowie die spezifische Kombination der einzelnen Zahnbewegungen und Erfolge vorliegen und damit ein Fall als Gesamterfolg zu werten ist oder nicht.....	47
Tabelle 10 Tabellarische Darstellung des Behandlungsergebnisses Frontzahngebiet der Zähne 32-42. Hierbei wurde bewertet, ob der jeweilige Zahn einen Behandlungserfolg oder keinen Behandlungserfolg aufgezeigt hat, sowie die spezifische Kombination der einzelnen Zahnbewegungen und Erfolge vorliegen und damit ein Fall als Gesamterfolg zu werten ist oder nicht.....	49
Tabelle 11 Tabellarische Darstellung des Behandlungsergebnisses im 4. Quadranten der Zähne 47-43. Hierbei wurde bewertet, ob der jeweilige Zahn einen Behandlungserfolg oder keinen Behandlungserfolg aufgezeigt hat, sowie die spezifische Kombination der einzelnen Zahnbewegungen und Erfolge vorliegen und damit ein Fall als Gesamterfolg zu werten ist oder nicht.....	51
Tabelle 12 Darstellung in tabellarischer Form der gesamten Ergebnisse und der Häufigkeit im Bezug des Gesamterfolges einer Therapie zum Geschlecht weiblich/ männlich.	53
Tabelle 13 Durchführung des Likelihood Verhältnisses und Pearson.....	54
Tabelle 14 Durchführung des Fishers exakter Test.	54
Tabelle 15 Darstellung in tabellarischer Form der gesamten Ergebnisse und der Häufigkeit im Bezug des Gesamterfolges einer Therapie zur Altersklasse bei Patienten und Patientinnen unter 14 Jahren, zwischen 14 und 18 Jahren und über 18 Jahren.	55
Tabelle 16 Durchführung des Likelihood Verhältnisses und Pearson.....	56
Tabelle 17 Durchführung des Fishers exakter Test.	56
Tabelle 18 Darstellung in tabellarischer Form der Untersuchung aller Zähne im Oberkiefer in Bezug auf den Therapieerfolg (ja) oder keinen Therapieerfolg (nein).	57

Tabelle 19 Darstellung in tabellarischer Form der Untersuchung aller Zähne im Unterkiefer in Bezug auf den Therapieerfolg (ja) oder keinen Therapieerfolg (nein).	58
--	----

Abkürzungsverzeichnis

CAD Computer- Aided Design

CAM Computer- Aided Manufacturing

CR Case Refinement

KFO Kieferorthopädie

KI künstliche Intelligenz

OK Oberkiefer

Q Quadrant

UK Unterkiefer

1 Einleitung

1.1 Einführung

Die Kieferorthopädie ist ein fachzahnärztliches Teilgebiet der Zahnmedizin, das sich nicht nur mit der Diagnose und Behandlung von Zahn- und Kieferfehlstellungen, sondern auch mit der Prävention der funktionellen Rehabilitation und der Verbesserung des orofazialen Erscheinungsbildes befasst (Enzo, 2020). Die Kieferorthopädie dient damit als eine Schnittstellenfunktion zwischen Funktion und Ästhetik und beeinflusst sowohl die orale Gesundheit als auch die Lebensqualität der Patientinnen und Patienten. Ziel einer kieferorthopädischen Behandlung ist die Herstellung einer stabilen, funktionell belastbaren Normokklusion im Sinne der Okklusionskonzepte beschrieben durch Andrews (Andrews, 1972) und deren Integration in ein harmonisches, zum äußeren Erscheinungsbild passendes dentofaziales Bild (Dimberg et al., 2015). Unter einer Normokklusion ist nicht nur die ideale Normokklusion zu verstehen, sondern ein funktionelles Gleichgewicht der dentalen, skelettalen und muskulären Strukturen des stomatognathen Systems, das langfristig stabil bleibt und die physiologischen Funktionen des gesamten Systems unterstützt und fördert.

In diesem Zusammenhang bekommt das Zusammenspiel funktioneller und ästhetischer Ziele eine zentrale Bedeutung. Kauen, Schlucken, Atmen und Sprechen sind notwendige Funktionen, die in engem Zusammenspiel mit der Zahn- und Kieferstellung stehen und durch eine Fehlstellung sowohl die Effizienz und Belastbarkeit sowie Muster und Kompensationen beeinträchtigt sein können. Die Ästhetik umfasst dabei nicht nur die Zahnreihen selbst also in Form, Farbe und Stellung, sondern auch das Weichgewebsprofil, die Lippenhaltung und die Verhältnisse des unteren Gesichtsdrittels. Eine korrekte kieferorthopädische Therapieplanung erfordert daher, diese funktionellen Aspekte der Mastikation, der Artikulation und der nasalen und oralen Atmung in ein ausgewogenes Verhältnis zu den ästhetischen Anforderungen des stomatognathen Systems zu

setzen. Dieses Gleichgewicht kann nur durch eine gründliche Anamnese, Befunderhebung, Diagnostik und eine sorgfältige kieferorthopädische Auswertung der Ausgangssituation und eine darauf aufbauende, individualisierte Planung und Durchführung der Therapie erreicht werden.

Im Rahmen der kieferorthopädischen Diagnostik und Behandlungsplanung ist zunächst zwischen primär dentalen und primär skelettalen Fehlstellungen und Abweichungen zu unterscheiden, da sich daraus grundlegende unterschiedliche therapeutische Behandlungsmethoden ergeben. Dentale Problematiken betreffen vorwiegend die Fehlstellung einzelner Zähne oder ganzer Zahngruppen, während skelettale Problematiken auf Fehlrelationen der Kieferbasen zueinander oder eine Fehlrelation zum Gesichtsschädel und der Schädelbasis zurückzuführen sind. Epidemiologische Untersuchungen zeigen, dass bei einem erheblichen Teil der Weltbevölkerung Abweichungen im Sinne von Fehlstellungen der Zähne und Fehllagen der Kiefer vorliegen, die potenziell behandlungsbedürftig sind (Proffit et al., 1998). Diese hohe Prävalenz unterstreicht die Relevanz der Kieferorthopädie als Fachdisziplin im Gesamtkontext der Zahnmedizin und macht eine differenzierte Einteilung der Abweichungen und Fehlstellungen bzw. Fehllagen erforderlich.

Zur systematischen Beschreibung im Rahmen der kieferorthopädischen Diagnostik und Therapieplanung werden sowohl dentale als auch skelettale Abweichungen üblicherweise in drei Raumrichtungen analysiert. Hierzu gehören die Transversale, Vertikale und Sagittale (Paddenberg-Schubert et al., 2025). Transversale Abweichungen umfassen beispielsweise Kreuzbisse, Kopfbisse, Scherenbisse, Non-Okklusionen und Asymmetrien eines einzelnen oder von beiden Zahnbögen. Vertikale Abweichungen schließen offene Bisse, Tiefbisse und Hyperdivergenz, sowie Hypodivergenz der Kieferbasen ein. Sagittale Abweichungen umschreiben die Relation der Kiefer zueinander und werden klassischerweise nach der Angle Klasse I, II und III eingeteilt. Diese dreidimensionale Klassifikation ist nicht nur für die Diagnostik, sondern auch für die spätere Therapieplanung von zentraler Bedeutung, da sie Rückschlüsse auf die Ätiologie der Fehlstellung erlaubt.

Für die geplante Behandlung steht ein breites Spektrum an Apparaturen zur Verfügung, das von unterschiedlichen herausnehmbaren Geräten bis hin zu einfachen oder komplexen festsitzenden Apparaturen reicht. Herausnehmbare Apparaturen sind intraorale oder auch extraoral verankerte Geräte, die von den Patientinnen und Patienten eigenständig eingesetzt und wieder herausgenommen werden können, denn die empfohlene Tragedauer liegt je nach Behandler bei ca. vierzehn bis sechzehn Stunden am Tag (Kerr, 2001). Durch ihre lose Trageweise ohne direkte Befestigung an den Zähnen ermöglichen sie in der Regel eine bessere Durchführung der Mundhygiene, denn die Zahnflächen bleiben für die tägliche Reinigung vollständig zugänglich (Stephens, 1994). Dies ist insbesondere bei einer längeren Behandlungsdauer und bei Patientinnen und Patienten mit erhöhtem Karies- oder Parodontitisrisiko, sowie einer eher schlechten Mundhygiene von Vorteil.

Zu den am häufigsten verwendeten herausnehmbaren Apparaturen zählen die aktiven Platten, die vor allem zur Korrektur transversaler Abweichungen und leichten sagittalen Abweichungen eingesetzt werden (Bozorgnia et al., 2021). Durch integrierte Dehnschrauben, Distal-/ Mesialschraube, Klammern, Federn und andere aktive Elemente können einzelne Zähne oder ganze Zahngruppen bewegt, Zahnbögen transversal erweitert oder Engstände teilweise beseitigt werden. Eine weitere zentrale Gruppe der herausnehmbaren Apparaturen bilden die funktionskieferorthopädischen Apparaturen, deren Wirkprinzip primär auf einer Veränderung der Kieferlage zueinander und dem muskulären Gleichgewicht beruht. Sie werden vor allem für sagittale und vertikale Abweichungen und deren Korrektur eingesetzt (Liu et al., 2018). Klassische Vertreter sind die Funktionsregler nach Fränkel (Typ I, II und III) (Lubit, 1983), die Vorschub- und Rückschubdoppelplatte, der Aktivator und eine Vielzahl von Modifikationen dieser Apparaturen.

Funktionskieferorthopädische Geräte nutzen die Adaptationsfähigkeit des wachsenden kraniofazialen Systems der heranwachsenden Patientin und Patienten, indem sie die Kieferlage verändern und damit einen neuen funktionellen Reiz auf Muskulatur, Kiefergelenk und Wachstumszonen ausüben. Bei ausreichender Compliance und Trageweise können sie ausgeprägte

skelettale Veränderungen erzielen, während die unerwünschten dentalen Nebenwirkungen im Idealfall vergleichsweise gering gehalten werden, aber meist auch hier nicht ganz vermeidbar sind (Raza et al., 2023). Klinisch zeigt sich jedoch, dass die Wirksamkeit dieser Apparaturen in hohem Maße von der tatsächlichen Tragedauer und der Compliance, sowie der Instruktionen durch den behandelnden Kieferorthopäden abhängt. Dies stellt einen der wesentlichen limitierenden Faktoren bei herausnehmbaren Apparaturen dar (Al-Moghrabi et al., 2017; Nahajowski et al., 2022). Mehrere Untersuchungen zeigen, dass Patientinnen und Patienten dazu neigen, ihre Tragezeit oftmals zu überschätzen. Während subjektive Angaben häufig nahe an den zahnärztlichen Empfehlungen liegen, zeigen objektive Messmethoden durch zum Beispiel integrierte Temperatursensoren, dass die tatsächliche Tragedauer meist deutlich unter den vorgesehenen Zeiten liegt (Al-Moghrabi et al., 2017). Diese Diskrepanz kann zu einer reduzierten Behandlungsqualität, verlängerten Behandlungszeiten oder sogar zu ausbleibenden Therapieerfolgen führen. Vor diesem Hintergrund kommt der Aufklärung, Motivation und kontinuierlichen Kontrolle, sowie Remotivation der Patientinnen und Patienten eine große Bedeutung zu, wenn herausnehmbare Apparaturen zur Therapie eingesetzt werden.

Für komplexe Malokklusionen und umfangreiche dreidimensionale Zahnbewegungen, sowie Wurzelbewegungen gelten festsitzende Multibracketapparaturen bislang als der Goldstandard. Sie ermöglichen eine hochpräzise Kontrolle von komplexen Zahnbewegungen, also der Zahnkipfung, Translation, Rotation und Torque sind meist unabhängig von der aktiven Mitarbeit der Patientinnen und Patienten im Hinblick auf die Tragedauer und das Einsetzen der Apparatur. Dies macht sie insbesondere in Fällen mit Extraktionsindikation, asymmetrischen Zahnbögen oder stark ausgeprägten skelettalen Diskrepanzen zur bevorzugten Therapieoption.

Als moderne Ergänzung zum Behandlungsspektrum der herausnehmbaren Apparaturen haben sich in den letzten Jahren transparente Aligner ergänzend etabliert. Aligner sind dünne, individuell CAD/CAM-gefertigte Kunststoffschienen, die sequenziell getragen werden und definierte, kleine Zahnbewegungen pro Schiene ausführen und selbstständig ein- und ausgegliedert werden. Sie

vereinen Eigenschaften sowohl herausnehmbarer als auch festsitzender Behandlungssysteme. Einerseits sind sie vom Patienten herausnehmbar, was die Mundhygiene deutlich vereinfacht und die Nahrungsaufnahme nicht einschränkt, andererseits wirken sie, ähnlich wie festsitzende Apparaturen kontinuierlich, solange die angewiesene Tragezeit eingehalten wird.

Aligner werden primär zur Korrektur moderater dentoalveolärer Fehlstellungen eingesetzt, etwa bei leichten bis moderaten Engständen, Lücken, Kippungen und Rotationen, sowie ausgewählten Extraktionsfällen mit überschaubarem Bewegungsumfang. In diesen Indikationsbereichen können sie hinsichtlich Behandlungsdauer, Patientenkomfort, Mundhygiene und Ästhetik Vorteile bieten. Gleichzeitig ist dabei zu beachten, dass komplexe Fälle mit sehr umfangreichen translatorischen Zahnbewegungen, ausgeprägten Rotationen, starken vertikalen Korrekturen oder großen Extraktionslücken auch heute noch nach der Literatur nach wie vor zuverlässiger mit festsitzenden Multibracketapparaturen behandelt werden (Borda et al., 2020). In solchen Fällen bietet die festsitzende Apparatur eine überlegene Kontrolle der Kräfte und eine höhere Vorhersagbarkeit des Behandlungsergebnisses und verringert dentale Nebenwirkungen.

Insgesamt muss festgehalten werden, dass die Auswahl der geeigneten Apparatur stets individuell und indikations- und patientenbezogen durch den Kieferorthopäden erfolgen muss. Sie basiert auf der Art und Schwere der dentalen Fehlstellung, dem skelettalen Wachstumsstatus, den funktionellen individuellen Anforderungen, der oralen Situation und Compliance, sowie den Erwartungen der Patientinnen und Patienten. Hierbei ist zu beachten, dass die Compliance in Abhängigkeit des Alters unterschiedliche Herausforderungen aufzeigt (Pattanaik et al., 2024) und in unterschiedlichen Altersklassen laut Literatur variieren kann (Aljabaa et al., 2015; Nattrass & Sandy, 1995). Herausnehmbare Apparaturen, einschließlich aktiver Platten, funktionskieferorthopädischer Geräte und Aligner, eröffnen ein sehr breites Spektrum präziser und ästhetisch ansprechender Behandlungsmöglichkeiten, sind aber in ihrer Effektivität eng an die konsequente Mitarbeit und Trageverhalten der Patientinnen und Patienten gekoppelt. Festsitzende Multibracketapparaturen bleiben insbesondere bei komplexen Malokklusionen

der Referenzstandard, an dem sich neue Behandlungskonzepte messen lassen müssen.

Tabelle 1 Darstellung der Unterschiede von herausnehmbaren Apparaturen und Alignern in unterschiedlichen Aspekten.

Aspekt	Klassische herausnehmbare Apparatur	Aligner
Hauptziel	Wachstumskontrolle (Klasse II und Klasse III, kippende Zahnbewegungen, Retention) (Madurantakam, 2016)	Dentale Korrektur leichter–moderater Malokklusionen (Borda et al., 2020)
Skelettale Effekte	Beim heranwachsenden Patienten meist moderat skelettale Wirkung und zusätzlich dentoalveolär (Raza et al., 2023)	Praktisch keine skelettale Modulation, eher rein dentoalveolär – mit Ausnahme MADs (Wings) (Li et al., 2024)
Bewegungs- präzision	Eingeschränkte körperliche Kontrolle, besonders bei komplexen Bewegungen (Koretsi et al., 2015)	Gute Einzelzahnbewegung, limitiert bei Torque, komplexen Extraktionsfällen (Translation) (Li et al., 2024)
Effizienz/ Dauer	Complianceabhängig, Behandlungszeit verlängert (Nahajowski et al., 2022)	Complianceabhängig, ähnlich, weniger Notfalltermine (Borda et al., 2020)

Aspekt	Klassische herausnehmbare Apparatur	Aligner
Hygiene/ Parodont	Gute Mundhygiene Möglichkeiten, aber Plaque-Nischen an Apparatur (Stephens, 1994)	Gute Hygienefähigkeit und geringere Entzündung als bei Brackets, regelmäßiger Austausch Aligner (Dipalma et al., 2025)
Komfort/ Ästhetik	Voluminös, beeinträchtigt Sprache und Ästhetik deutlich (Nahajowski et al., 2022)	Transparent, diskret, hohe Akzeptanz und Zufriedenheit (Baron, Les appareils orthodontiques invisibles et presque invisibles./2014)

1.2 Historischer Überblick

Die Entwicklung in der Kieferorthopädie im Bereich festsitzender Behandlungsapparaturen lässt sich bis in das 19. und frühe 20. Jahrhundert zurückverfolgen. In dieser anfänglichen Phase bestanden die verwendeten Apparaturen überwiegend aus Band- und Drahtkonstruktionen, mit deren Hilfe einzelne Zähne, kleinere oder auch größere Zahngruppen gezielt bewegt werden konnten. Eine entscheidende Veränderung für die Kieferorthopädie stellte das von Angle eingeführte Edgewise-System dar, hierbei wurden horizontale Bracketslots in Kombination mit rechteckigen Bögen eingesetzt und so wurde eine deutlich exaktere dreidimensionale Kontrolle der Zahn- und Wurzelbewegungen möglich (Boxum, 2025)

Auf der Basis dieses Edgewise-Systems wurden im weiteren Verlauf vorprogrammierte Multibracketapparaturen entwickelt. Edgewise integrierte in das Bracketdesign der Apparatur die für die jeweilige Zahnposition erforderlichen Werte für Tip, Torque und In-Out, sodass die optimale Zahnstellung weitgehend durch die vorgegebene Bracketgeometrie und eine konfektionierte Bogenform erreicht werden konnte. Dies hatte zur Folge, dass es zu einer Reduktion der Behandlungsdauer und zu einer Verbesserung der Behandlungsqualität führte, da die Therapie weniger von der individuellen Biegetechnik und Erfahrung des Kieferorthopäden abhängig war. Im Zuge dieses technischen Fortschritts wurden die konventionellen Brackets durch ein weiteres System ergänzt, selbstligierende beziehungsweise ligaturenfreie Systeme, bei denen Clips anstelle von Drahtligaturen oder elastischen Ligaturen zur Fixierung des Bogens im Bracket verwendet wurden (Willems & Carels, 2000). Randomisierte kontrollierte Studien und systematische Übersichtsarbeiten konnten jedoch darstellen, dass selbstligierende beziehungsweise ligaturenfreie Brackets hinsichtlich Behandlungsdauer und Ergebnisqualität keinen klaren Vorteil gegenüber dem konventionellen Edgewise-Multibracket-Systemen aufweisen (Johansson & Lundstrom, 2012).

Ergänzend zur funktionellen Weiterentwicklung und Ergänzung der Metallbrackets nahmen die ästhetischen Ansprüche von Patientinnen und Patienten kontinuierlich immer weiter zu. Dies führte zur Ergänzung des Systems durch Keramik- und Kunststoffbrackets, die eine unauffälligere Behandlung ermöglichten. Trotz dieser ästhetischen Verbesserungen und Anpassungen der Brackets blieben die grundlegenden Nachteile festsitzender Multibracketapparaturen weiterhin bestehen. Die Mundhygiene ist durch die Vielzahl an Nischen durch die Bracketgeometrie weiterhin erschwert, es kommt häufiger zu erhöhter Plaqueakkumulation, Demineralisationen und mechanische Irritationen von Gingiva und Wangenschleimhaut, sowie Notfalltermine sind weiterhin ein relevantes klinisches Problem (Giannini et al., 2025)

Die Entwicklung ergänzender transparenter Kunststoffschienensysteme knüpft an die Prinzipien schon lange im Behandlungsrepertoire existierende Retentionsschienen und Positioner an (Rinchuse & Rinchuse, 1997) und fand

ihren entscheidenden Durchbruch mit der Einführung des Invisalign-Systems durch die Firma Align Technology im Jahr 1998 (Weir, 2017). Dieses Konzept basiert auf industriell gefertigten, transparenten Kunststoffschienen, die mithilfe einer dreidimensionalen digitalen Planung mittels KI und Behandler erstellt werden. Die geplanten Zahnbewegungen werden dabei in eine Folge von sequenziellen Alignern übersetzt, diese Aligner werden nacheinander getragen und es werden jeweils kleine, definierte Positionsänderungen der Zähne bewirkt. Auf diese Weise lassen sich schrittweise unterschiedliche Zahnbewegungen realisieren, ohne auf klassische Brackets und Bögen und ihre Nachteile zurückgreifen zu müssen (AlMogbel, 2023).

1.3 Das Aligner System

Heute existieren auf dem Markt sehr viel verschiedene Alignersysteme (Tamer et al., 2019). Bei Alignersystemen handelt es sich um ein vollständig digital geplantes Behandlungskonzept, bei dem eine Serie transparenter Kunststoffschienen schrittweise durch eine Folge von sequenziell Zahnbewegungen realisiert. Grundlage der Systeme sind individuell gefertigte thermoplastische Schienen, die jeweils über einen festgelegten Zeitraum, in der klinischen Routine etwa eine Woche, getragen werden und so sequenziell die geplante Endposition der Zähne erzielen.

Die Planung erfolgt auf Grundlage eines dreidimensionalen intraoralen Scans oder gelegentlich digitalisierter Modelldaten. Moderne Aligner-Systeme erstellen daraus eine virtuelle Planung, einen sogenannten ClinCheck. In dieser digitalen Planung oder auch Simulation werden alle Zahn- und auch Wurzelbewegungen in einzelnen, aufeinanderfolgenden Bewegungsschritten visuell dargestellt. Auf diese Weise können sowohl einfache, moderate aber auch komplexe Bewegungen, einschließlich Intrusion, Extrusion, Rotation, Translation, Angulation, Inklination und in Maßen auch Torque in einer klar definierten Abfolge an Sequenzen geplant werden (Boyd, 2008).

Der erstellte dreidimensionale Scan wird in die Planungssoftware hochgeladen und mit den relevanten klinischen Informationen zur Ausgangssituation durch den Behandler ergänzt, sowie mit den diagnostischen Befunden verknüpft. Ergänzend werden die angestrebten Korrekturen in der Software der einzelnen Fehlstellungen festgelegt. Die initiale Planung der Zahnbewegungen erfolgt dabei automatisiert auf Grundlage algorithmischer bzw. KI-basierter Berechnungen und wird anschließend von einem Techniker des Planungsteams überarbeitet. Im nächsten Schritt wird die erstellte Planung vom behandelnden Kieferorthopäden kontrolliert und nimmt gegebenenfalls über integrierte Kommentarfunktionen und Bearbeitungswerkzeuge Änderungen vor und gibt Anweisungen zur Überarbeitung der Bewegungsschritte. Es folgt eine erneute Überarbeitung durch die KI und den Techniker, gefolgt von einer weiteren Kontrolle durch die Behandlerseite. Dieser Prozess wird so oft wiederholt, bis die Planung sowohl aus biomechanischer als auch aus klinischer Sicht von der Behandlerseite als plausibel und umsetzbar eingestuft wird.

Einige Entscheidungen liegen im Ermessen des Behandlers, hierzu zählt, ob bestimmte Bewegungen stärker sequenziert werden müssen, etwa durch eine größere Anzahl von Schienen oder ob zusätzliche Hilfsmittel erforderlich sind. Zu diesen Hilfsmitteln, auch Auxiliaries genannt, zählen unter anderem zusätzliche intermaxilläre oder intramaxilläre Gummizüge, die durch an den Zähnen befestigte Knöpfchen Buttons und im Aligner befindliche Cut-Outs integriert werden oder die temporäre Kombination mit partiell festsitzenden Apparaturen (Uribe et al., 2011). Durch diese verschiedenen kieferorthopädischen Elemente kann die Kraftübertragung optimiert, besser kontrolliert und insbesondere das Behandlungsergebnis bei komplexeren Bewegungen verbessert werden.

Zur weiteren Verbesserung der Kraftübertragung, Kraftkontrolle und Retention der Zähne können auf die Zähne Attachments ergänzt werden. Dabei handelt es sich um kleine, aus Komposit gefertigte Retentionselemente, die in definierter Form und Größe auf die Zahnoberfläche geklebt werden und sowohl als Retentionselemente als auch als gezielte Kraftangriffspunkte fungieren. Attachments unterstützen insbesondere biomechanisch komplexere Bewegungen, die mit rein flächiger Schienenauflage am Zahn schwer zu

kontrollieren sind. Hierzu gehören Bewegungen wie Rotationen, Extrusionen und der Wurzelorque. Durch geeignete Positionierung und Geometrie der Attachments kann die Kontrolle dieser Bewegungen und das Ergebnis deutlich verbessert werden (Karras et al., 2021; Yangin et al., 2025).

Im Verlauf der Weiterentwicklung hat beispielsweise Align Technology sogenannte „SmartForce“-Attachments dem System hinzugefügt, bei denen Geometrie und Oberflächenstruktur weiter für bestimmte Bewegungen optimiert wurden. Durch die gezielte Modifikation von Form, Neigung und Angriffsflächen dieser Attachments sollten die entstehenden Kraftsysteme präziser steuerbar und die Behandlungsergebnisse besser erreichbar werden. Ziel dieser Weiterentwicklungen ist es, die Diskrepanz zwischen geplanter und tatsächlich erreichter Zahnbewegung zu verringern und die Effizienz des Alignersystems insgesamt zu erhöhen und vermehrte Korrekturplanungen zu verringern (Muthuswamy Pandian et al., 2025).

1.4 Der dreidimensionale Scanner

Dreidimensionale Scanner dienen als hochpräzise dreidimensionale optische digitale Abformung intraoraler Strukturen in der restaurativen Zahnheilkunde, Implantologie und Kieferorthopädie.

Das Anwendungsspektrum der meisten dreidimensionalen Scanner umfasst die gesamte Bandbreite digitaler Zahnmedizin. Hierzu zählt dies prothetisch von der Abformung für Einzelkronen und Inlays/Onlays über mehrgliedrige Brücken bis hin zu vollbogenprothetischen Restaurationen und implantatgetragenen Suprastrukturen. In der Kieferorthopädie integriert sich das gesamte System oftmals nahtlos in den digitalen Invisalign Workflow, indem es die dreidimensionalen Scans direkt in die Aligner-Planung hochlädt und integriert und je nach Scannertyp eine separate intraorale Fotodokumentation obsolet macht. Darüber hinaus ermöglicht es präzise Verlaufskontrollen bei Abrasionen, Gingivarezessionen oder Plaqueakkumulation. Besonders in der

Patientenakquise für kieferorthopädische Behandlungen für eine Alignerbehandlung kann ein Scanner als visueller Kommunikator dienen, da er fotorealistische Simulationen potenzieller Behandlungsergebnisse generiert und visuell darstellt, Möglichkeiten offenbart und den Therapieverlauf objektiv beurteilt (Align Technology, 2025).

Heute existieren auf dem Markt viele unterschiedliche Scanner und digitale Systeme. Als Vertreter der neuesten Scanner-Generation stellt sich beispielsweise der iTero Lumina durch seine innovative Multi-Direct Capture-Technologie aus, die eine simultane Datenerfassung aus mehreren Blickwinkeln mit mehreren Kameras ermöglicht. Dadurch lassen sich auch anspruchsvolle anatomische Regionen, wie das Palatum, teilbezahnte oder auch unbezahnte Areale oder starke Engstände mit außergewöhnlicher Detailtreue und Reproduzierbarkeit abbilden (Align Technology, 2025).

1.5 Grundlagen und Biomechanik der kieferorthopädischen Zahnbewegungen

In der Kieferorthopädie beruht die Zahnbewegung auf einem genau abgestimmten Zusammenspiel aus mechanischer Einwirkung durch Kräfte und Momente der Biomechanik und der darauf folgenden biologischen Antwort des Parodontiums, insbesondere des Desmodonts und des Alveolarknochens (Asiry, 2018). Orthodontische Kräfte führen durch Apparaturen zunächst zu einer Verformung des Desmodonts und seiner Matrix. Diese Deformation verändert die lokale Mikrozirkulation im Desmodont, indem hierbei Gefäße komprimiert oder auch gedehnt werden je nach Druck- oder Zugseite und löst eine entzündungsähnliche Reaktion mit Freisetzung zahlreicher Entzündungsmediatoren wie z.B. Prostaglandine, Zytokine, Wachstumsfaktoren aus. In den Kompressionszonen des Ligaments kommt es zur Ansammlung und Aktivierung von Osteoklasten und damit zu lokaler Knochenresorption, während in den Zugzonen Osteoblasten aktiviert werden und neue Knochensubstanz

appositioniert wird. Durch dieses kontinuierliche Remodelling im Bereich des Desmodonts und Alveolarknochens auf Druck- und Zugseite verlagert sich der Zahn schrittweise innerhalb des Alveolarknochens und eine Bewegung wird klinisch sichtbar (Ubuzima et al., 2024).

Das Ausmaß der stattfindenden Gewebsreaktion hängt unmittelbar von der Charakteristik der applizierten Kräfte von der Apparatur ab. Neben der Kraftrichtung spielen insbesondere die Kontinuität (kontinuierliche vs. intermittierende Belastung), Dauer und Stärke eine zentrale Rolle in der Biomechanik. A.M. Schwarz formulierte bereits Mitte des 20. Jahrhunderts das Konzept der „optimalen Kraft“. Dies umschreibt das nur Kräfte innerhalb eines biologisch akzeptablen Kräftebereichs ermöglichen ein geordnetes Remodelling, ohne das Desmodont zu überlasten (Schwarz, 1949). Wird eine Kraft zu hoch dosiert, kommt es in den Kompressionszonen zu einer sehr ausgeprägten Gefäßkompression, bis hin zur Ischämie und zur Bildung hyalinisierter Areale im Desmodont. In diesen Bereichen wird die normale Zellaktivität vorübergehend unterbrochen, die Zahnbewegung kommt dadurch zum Stillstand und das Risiko unerwünschter Nebenwirkungen wie externen unerwünschten Wurzelresorptionen nimmt deutlich zu (Moga et al., 2023; Wu et al., 2018). Zu geringe Kräfte hingegen lösen keine ausreichende zelluläre Antwort aus, sodass die Zahnbewegung ineffizient oder klinisch nicht relevant bleibt.

Biomechanisch wird die Art der Zahnbewegung durch die Lage der resultierenden Kraftlinie in Relation zum Widerstandszentrum also dem center of resistance des Zahnes bestimmt. Das center of resistance ist der Punkt, in dem eine eingeleitete Kraft eine reine translative Bewegung ohne unerwünschte Rotation bewirken würde. Greift eine Kraft nicht in diesem Bereich des Widerstandszentrums an, entsteht zusätzlich ein Moment, das damit eine Rotationskomponente am Zahn erzeugt. Das Verhältnis von Kraft zu Moment, das sogenannte Kraft/Moment-Verhältnis bestimmt die Spannungsverteilung im Desmodont und entscheidet darüber, ob eine unkontrollierte oder kontrollierte Kippung, ein Torque oder eine nahezu reine Translation am Zahn bewirkt wird (Wang et al., 2025).

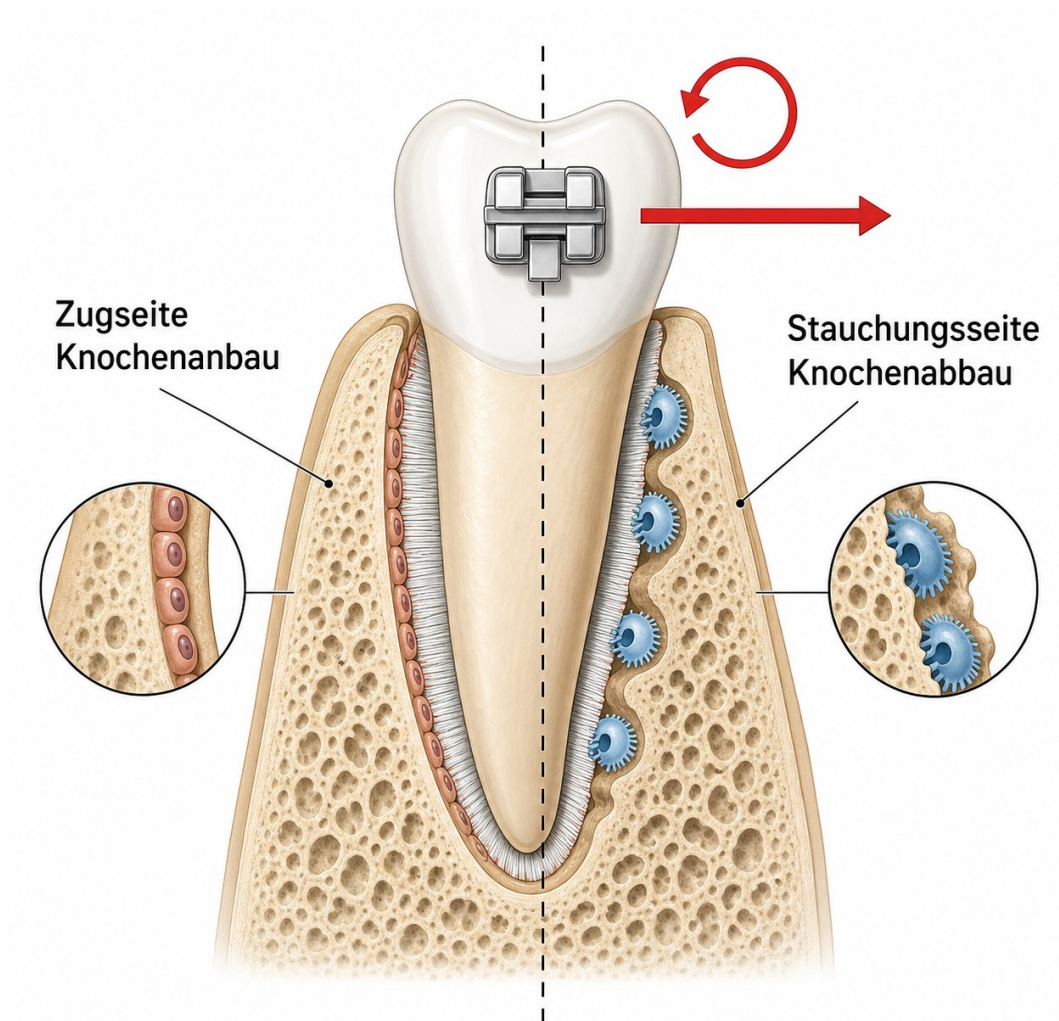


Abbildung 1 Schematische Darstellung der Biomechanik der Zahnbewegung im Parodont. Darstellung der Zugseite mit entsprechendem Knochenanbau (links) durch Osteoblasten und der Stauchungsseite mit entsprechendem Knochenabbau (rechts) durch Osteoklasten. Bild generiert mit Perplexity KI „Stelle mir schematisch die Zahnbewegung der Translation mit entsprechender Knochenanbau und Knochenabbau dar“.

Wird die Kraft jedoch außerhalb des Widerstandszentrums eingeleitet, verschiebt sich das Rotationszentrum in Richtung Zahnwurzel und es entsteht eine unkontrollierte Kippbewegung. In diesem Fall kommt es zu einer entgegengesetzten Bewegung von Zahnkrone und Zahnwurzel. Im Desmodont entstehen dadurch ausgeprägte Spannungsspitzen, zervikal auf der Druckseite und apikal auf der Zugseite. Bereits bei Kräften, die klinisch moderat erscheinen können, kann dies teilweise zu überhöhten Belastungen und damit zu einem erhöhten Risiko für Wurzelresorptionen führen (Moga et al., 2023).

Unkontrolliertes Kippen stellt sich daher biomechanisch ungünstiger dar, wenn eine schonende und vorhersehbare Bewegung angestrebt wird.

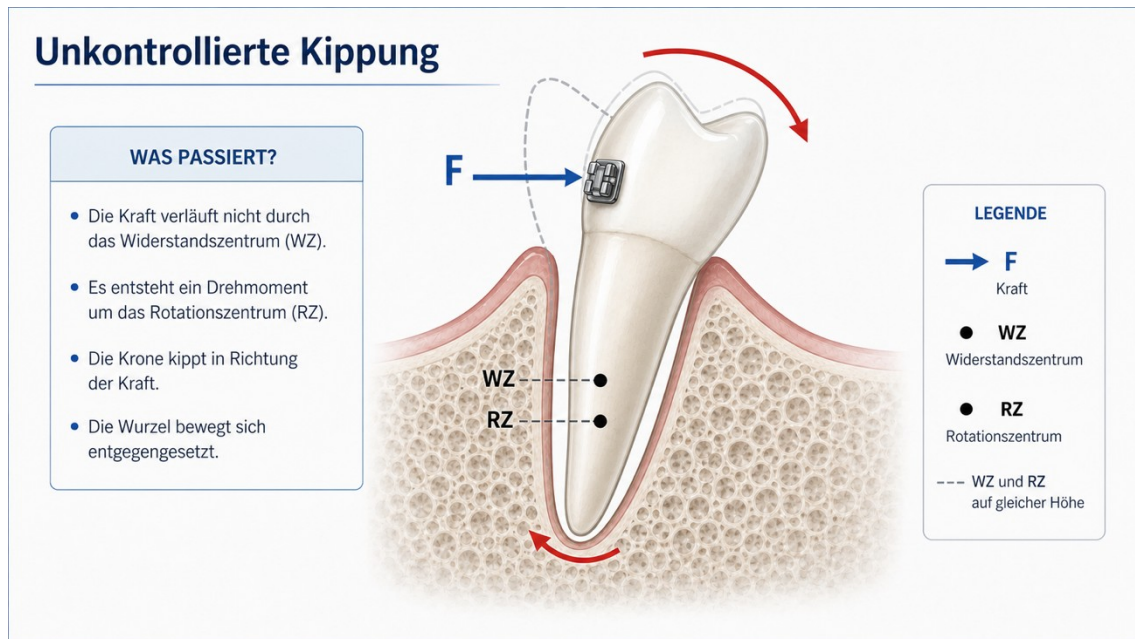


Abbildung 2 Darstellung der unkontrollierten Kippung und ihrer Biomechanik. Hierbei liegt das Rotationszentrum außerhalb des Widerstandszentrums, wodurch es zu einer Kippung der Krone in Richtung der Kraft kommt und einer entgegengesetzten Bewegung der Zahnwurzel kommt. Erstellt mit Perplexity AI „Stelle mir schematisch als Grafik die Biomechanik der Zahnbewegung während der unkontrollierten Kippung ergänzend mit Rotationszentrum und Widerstandszentrum dar“.

Beim kontrollierten Kippen wird der Krafteinleitung ein gezieltes Gegenmoment ergänzt, dies passiert etwa durch die entsprechende Biegeformen des Bogens oder zusätzliche ergänzte Torque-Elemente. Dadurch kommt es zur Verlagerung des Rotationszentrums nach apikal, sodass es zur fast vollständigen Begrenzung der Wurzelbewegung kommt und die Zahnkrone überwiegend der gewünschten Kraftrichtung folgt (Gholamalizadeh et al., 2021). Das Kraft/Moment-Verhältnis wird dabei so eingestellt, dass die Spannung im Desmodont gleichmäßiger verteilt ist und extreme Spannungsspitzen insbesondere im apikalen Bereich reduziert werden können und es seltener zu Wurzelresorptionen kommt (Moga et al., 2023). Klinisch erlaubt kontrolliertes Kippen eine gezieltere Einstellung der Kronenposition bei gleichzeitig verbessertem Schutz der Wurzel und des angrenzenden Alveolarknochens.

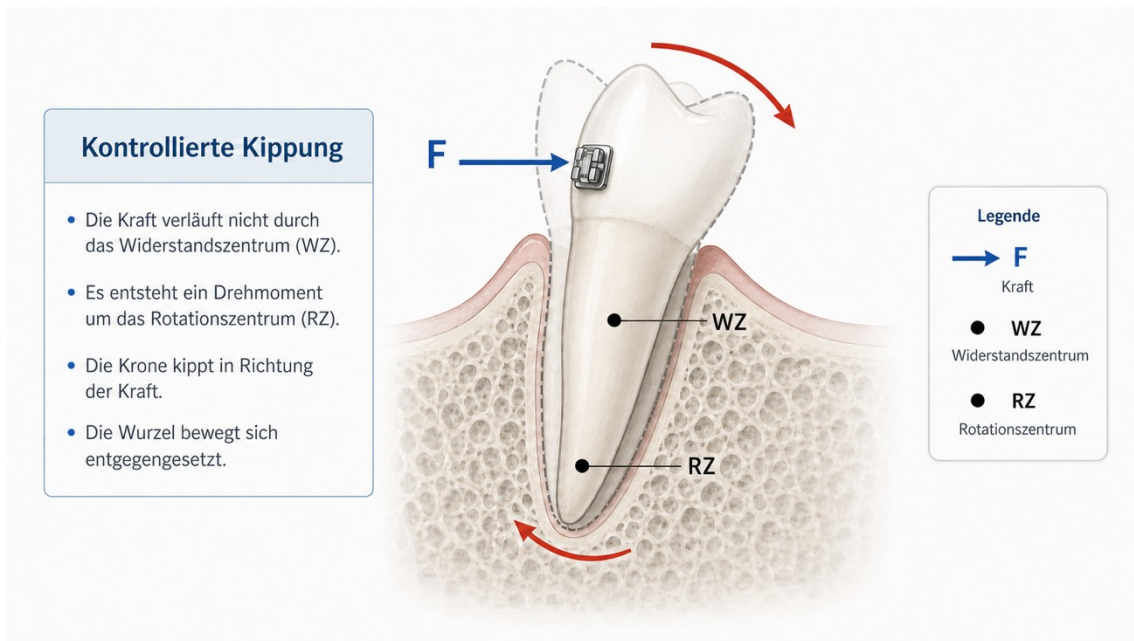


Abbildung 3 Darstellung der kontrollierten Kippung und ihrer Biomechanik. Hierbei liegt das Rotationszentrum fast am Apex, wodurch es zu einer Kippung der Krone in Richtung der Kraft kommt und einer nahezu fehlenden Auslenkung der Zahnwurzel. Erstellt mit Perplexity AI „Stelle mir schematisch als Grafik die Biomechanik der Zahnbewegung während der kontrollierten Kippung ergänzend mit Rotationszentrum und Widerstandszentrum dar“.

Die körperliche Bewegung eines Zahnes, also die Translation, beschreibt eine nahezu parallele Verschiebung von Zahnkrone und -wurzel ohne eine entstehende Rotationskomponente. Um dies zu erreichen, muss ein relativ hohes Kraft/Moment-Verhältnis aufgebaut werden. Theoretisch liegt das Rotationszentrum dabei verlagert im Unendlichen. Daraus resultiert eine möglichst gleichmäßige Belastung des gesamten Desmodonts, da hierbei keine ausgeprägten Rotationszentren mit stark erhöhten Spannungen auftreten. Diese Art der Bewegung stellt sich als biomechanisch anspruchsvoller dar, da sie eine präzise Kontrolle der Kraftvektoren und der Momentengrößen erfordert, um Nebenwirkungen der Bewegung zu vermeiden, ist aber gerade bei umfangreichen sagittalen Korrekturen oder bei der Wurzelparallelisierung im Lückenschluss therapeutisch besonders wertvoll.

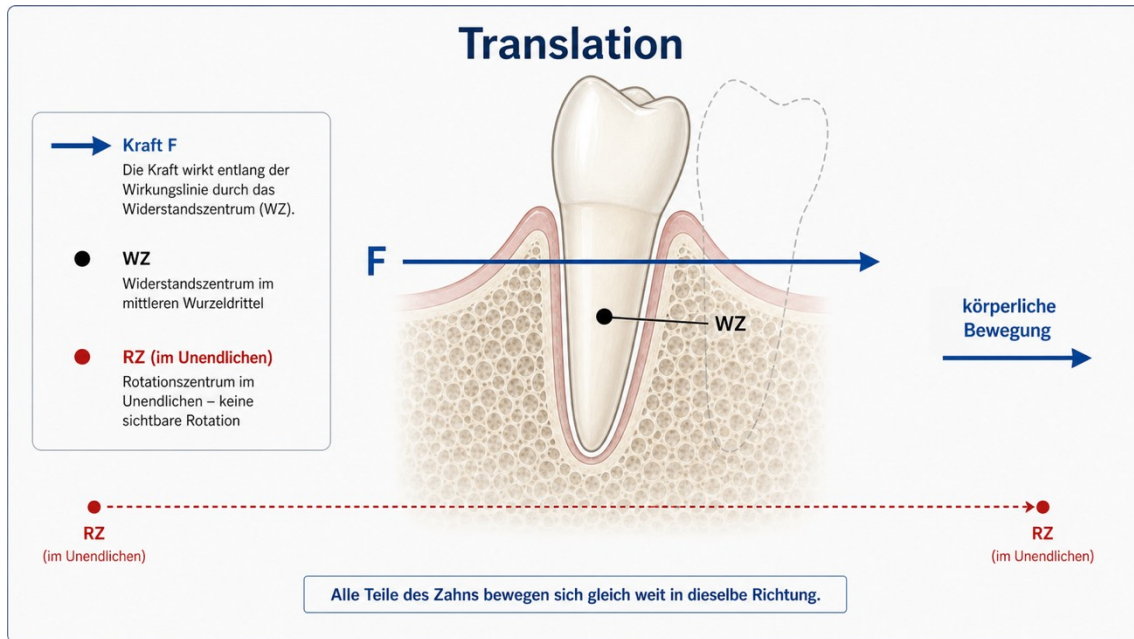


Abbildung 4 Darstellung der Translation und ihrer Biomechanik. Hierbei liegt das Rotationszentrum im Unendlichen, wodurch es zu keiner Kippung oder der Zahnwurzel kommt. Der Zahn bewegt sich körperlich. Erstellt mit Perplexity AI „Stelle mir schematisch als Grafik die Biomechanik der Zahnbewegung während der Translation ergänzend mit Rotationszentrum und Widerstandszentrum dar“.

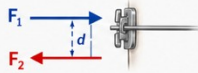
Das größte Kraft/Moment-Verhältnis wird beim Torque, also der kontrollierten Bewegung der Wurzelstellung bei minimaler Zahnkronenbewegung benötigt. Dabei wird das Rotationszentrum in die Region der Schneidekante beziehungsweise in die Zahnkrone verlagert, sodass die Rotation hauptsächlich im Wurzelbereich stattfindet. Ziel ist es, die Wurzeln in eine optimale Achsenrichtung im Alveolarknochen zu bringen, was insbesondere für die Stabilität, die parodontale Belastbarkeit und die Ästhetik der Wurzelstellung im Knochen von essenzieller Bedeutung ist. Aufgrund der hohen Anforderungen an Präzision und Kraftdosierung gilt Torque als eine der biomechanisch sensibelsten Bewegungsformen.

Torque

Drehmoment bewirkt nur Wurzelbewegung

Ursache: Drehmoment (M)

Ein Kräftepaar (F_1 und F_2) am Bracket erzeugt ein Moment (M) um das Rotationszentrum (RZ).



$$M = F \times d$$

M = Drehmoment (Moment)
 F_1, F_2 = Kräftepaar
 d = Kraftarm (Abstand)
 RZ = Rotationszentrum
 WZ = Widerstandszentrum



Wirkung: nur Wurzelbewegung

Durch das Drehmoment bleibt die Zahnkrone fixiert – nur die Wurzel bewegt sich.

Fazit: Torque (Drehmoment) bewirkt nur die Bewegung der Wurzel und der Wurzelspitze. Die Zahnkrone bleibt durch die Kronenfixierung stabil.

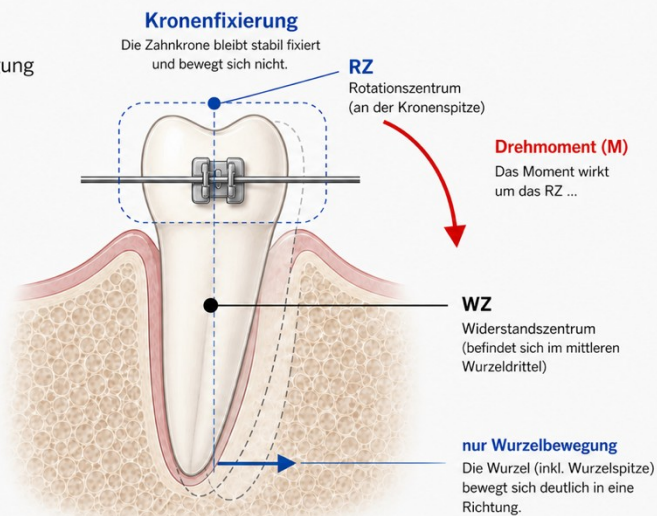


Abbildung 5 Darstellung des Torque und seiner Biomechanik. Hierbei liegt das Rotationszentrum im Bereich der Inzisalkante, wodurch es zu einer Kippung der Zahnwurzel entgegen der Kraft kommt.. Erstellt mit Perplexity AI „Stelle mir schematisch als Grafik die Biomechanik der Zahnbewegung während des Torque ergänzend mit Rotationszentrum und Widerstandszentrum dar“.

In der Aligner Biomechanik werden Zähne durch das thermoplastische Schienenmaterial und dessen elastische Rückstellkräfte bewegt. Im Unterschied zu festsitzenden Multibracketapparaturen, bei denen Kraft- und Momentenverläufe relativ klar durch das Verhältnis der Bracket- und Bogengeometrie definiert sind, ist das Kräftesystem bei Alignern weniger klar abgrenzbar, da die Auflageflächen zwischen Schiene und Zahn großflächig sind (Li et al., 2024). Eine aktuelle Übersichtsarbeit zeigt dabei deutlich, dass Aligner ohne zusätzliche Attachments vor allem Kipp- und Intrusionsbewegungen einfach umsetzen können, während die körperliche Translation, ausgeprägte Rotationen und Torque dabei deutlich schwieriger kontrollierbar und umsetzbar sind (Li et al., 2024). Für bestimmte vertikale Bewegungen und definierte Rotationen kann mit Alignern eine gute Kontrolle erreicht werden, wenn hierbei Attachments in die Planung mit einbezogen sind, wohingegen Translationsbewegungen im Vergleich zur Multibracketapparatur oftmals langsamer und weniger effizient verlaufen (Abel et al., 2025).

Die biomechanische Kontrolle lässt sich durch den Behandler verbessern, wenn zusätzliche Elemente wie Attachments, Power Ridges und weitere Auxiliaries (z.B. Gummizüge, Buttons) in der Planung berücksichtigt werden. Diese Strukturen verändern den Kraftangriff und die Umsetzung, schaffen definierte Kraftangriffspunkte und erhöhen gezielt das Kraft/Moment-Verhältnis dort, wo komplexere Bewegungen wie Rotation, Torque oder körperliche Verschiebungen gezielt umgesetzt werden sollen. Auf diese Weise können Aligner-Systeme, bei korrekter und präziser Planung, näher an die biomechanische Präzision festsitzender Multibracketapparaturen herangeführt werden, sie bleiben jedoch weiterhin in starkem Maße von der Planung des Behandlers und von der Compliance der Patientinnen und Patienten abhängig.

1.6 Fragestellung und Ziel

Die Untersuchung soll im Rahmen einer Auswertung von retrospektiv erhobenen anonymisierten Patientendaten stattfinden. Die durchgeführte Diagnostik und Therapie von am ZZMK kieferorthopädisch mittels Alignern an eigenen behandelten Patienten aufzuzeigen und die durch die Therapie erzielten dentalen Veränderungen zu analysieren. Dabei soll kontrolliert werden, wie gut die Simulationen des ClinChecks mit den tatsächlichen Zahnbewegungen in der klinischen Situation übereinstimmt und daher eine bessere Vorhersagbarkeit weiterer Planungen und Simulationen ermöglichen. Hierzu gibt es aktuell noch keine ausreichende Studienlage.

- Wie erfolgreich ist die Therapie mit Alignern?
- Ist der Aligner ein geeignetes Behandlungsgerät zur Erweiterung der Therapiemöglichkeiten in der Kieferorthopädie?
- Gibt es Zähne, die die Bewegungen im Aligner besser umsetzen als andere?
- Erfolgen die Zahnbewegungen mit Alignern im Ober- oder Unterkiefer besser?

- Gibt es Unterschiede in Bezug auf den Erfolg einer Alignerbehandlung bei verschiedenen Altersklassen?
- Gibt es Unterschiede in Bezug auf den Erfolg einer Alignerbehandlung bei weiblichen oder männlichen Patienten?
- Gibt es bestimmte Zahnbewegungen, die sich klinisch im Zuge einer Alignerbehandlung besser umsetzen als andere?

2 Material und Methoden

Die Untersuchung wurde im Rahmen einer Auswertung von retrospektiv erhobenen anonymisierten Patientendaten durchgeführt, die im Zeitraum vom 01/2025 bis 06/2025 erhoben wurden. Dabei wurden die Patienten aus der klinischen Routine heraus an der ZZMK am UKT kieferorthopädisch mittels Alignern von Invisalign behandelt. Hierbei soll überprüft werden, wie gut die Simulationen im ClinCheck mit der tatsächlichen Zahnbewegung übereinstimmt (Align Technology, 2025).

2.1 Untersuchungsmethode und -zeitraum

Im Rahmen der klinischen Routine wurde zu Beginn der kieferorthopädischen Behandlung bei zu versorgenden Patientinnen und Patienten im Rahmen der initialen Diagnostik beziehungsweise auch in der weiterführenden Therapieplanung ein digitaler intraoraler Situationsscan mit dem iTero-Intraoralscanner angefertigt. Dieser wurde automatisiert in die Invisalign Planungssoftware integriert und hochgeladen. Auf dieser Grundlage erfolgte anschließend die digitale Behandlungsplanung und die Erstellung eines ClinChecks durch eine KI und einen Techniker der Invisalign-Planungssoftware (Align Technology, 2025). Im ClinCheck wurden die geplanten Zahnbewegungen dreidimensional visuell dargestellt und je nach Anforderungen durch den Behandler zeitlich sequenziert abgebildet. Für jeden einzelnen Zahn wurden alle biomechanischen Bewegungen Translation, Angulation und Rotation gesondert geplant und in tabellarischer Form dokumentiert. Die Bewegungsumfänge wurden dabei in Millimetern und in Grad dargestellt. Da die einzelnen Bewegungsanteile biomechanisch nicht immer simultan und parallel ablaufen können, musste eine gezielte Sequenzierung eingeplant werden. Der Behandler konnte in der Kommentarfunktion der Software Anweisungen geben, welche

Einzelschritte pro Aligner-Stufe ausgeführt werden und welche Bewegungen zeitlich versetzt erfolgen sollten, auch diese Sequenzierung wurde im ClinCheck detailliert dargestellt.

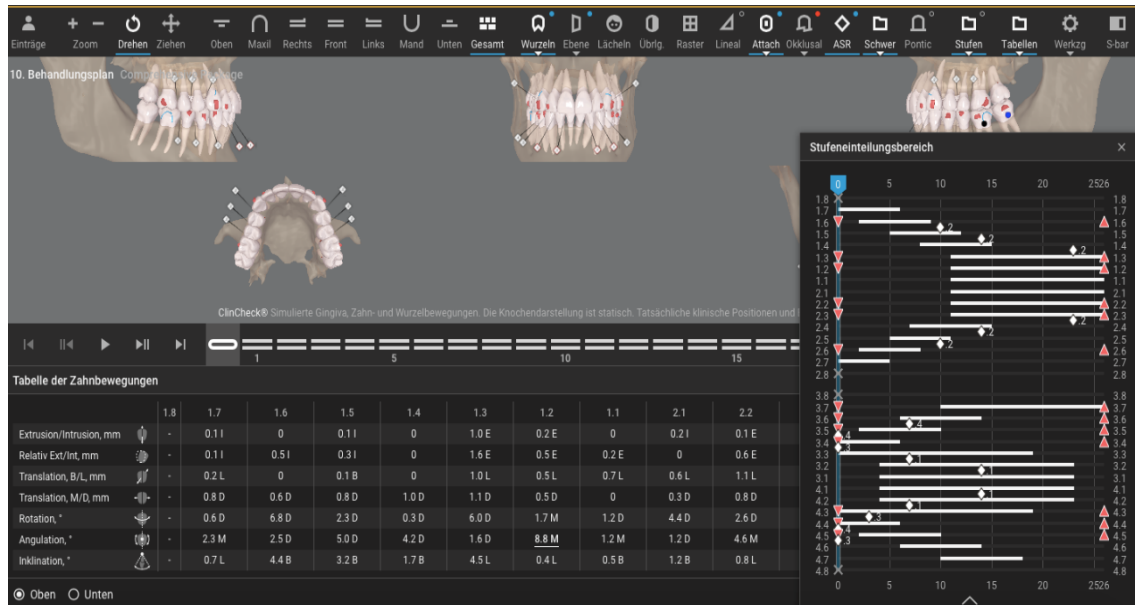


Abbildung 6 Beispielhafte Darstellung eines ClinChecks und einer Behandlungssituation bei Invisalign Align Technology). Darstellung einer Behandlungssequenz inklusive Darstellung der Sequenzierung (unten rechts) sowie der Tabelle der Zahnbewegungen (unten).
https://clincheck.invisalign.com/index.html?locale=de_DE&user=upek5vfk&ccModIntegrity=true&cclid=85849128&shareClinCheckPlan=true&ts=1779036333561 (Align Technology Stand Februar 2026)

Wurde eine Planung durch den Kieferorthopäden freigegeben, konnte die Planung freigegeben werden und nach der Herstellung wurden die Aligner sowie die vorgesehenen Attachments klinisch an der Patientin oder Patient eingesetzt. Die Patientin beziehungsweise der Patient erhielt mehrere Aligner-Schienen mit nach Hause, die eigenständig in einem Intervall von sieben Tagen gewechselt wurden. Mit jedem Schienenwechsel sollten sich die jeweils hinterlegten Zahnbewegungen schrittweise umsetzen. Begleitend fanden Kontrolltermine in individuell festgelegten Zeitabständen in Abhängigkeit der klinischen Notwendigkeit statt. Nach etwa sechs bis zehn Monaten wurde in der Regel ein Verlaufskontrollscan mit dem iTero angefertigt, anhand dessen eine digitale Fortschrittsbeurteilung durch die iTero Software erfolgte. Hierbei verglich die Software des Intraoralscanners die klinische Situation zum Zeitpunkt des jeweiligen Aligners mit der zu dem Zeitpunkt geplanten Situation im ClinCheck

und ermöglichte so eine objektive Bewertung des bisherigen Behandlungsergebnisses sowie gegebenenfalls eine Anpassung der weiteren Planung oder gab Hinweise auf das notwendige Ergänzen von Auxiliaries.

2.2 Auswahl der Patienten

Die Grundlage dieser Arbeit waren dreidimensional erstellte Scans von 73 Patienten und Patientinnen. Hierbei wurden von allen Patienten zu Beginn der Behandlung Situationsscans erstellt, sowie Scans im Verlauf der Behandlung. Hierbei wurde der Oberkiefer, der Unterkiefer und ihre Lage zueinander erfasst.

Bei der Auswahl der Patientenkohorte wurden Behandlungen mit einer ähnlichen Komplexität, Schwierigkeit und Sequenzierung der Behandlung ausgewählt, keine Lückenschlussplanungen sowie ausschließlich vollbezahnte Patienten ausgewählt.

Es kam zum Ausschluss der Patienten, wenn eine unvollständige Dokumentation oder Artefakte im Scan vorlagen, andere kieferorthopädische Behandlungsgeräte verwendet wurden, zu komplexe oder zu einfache Fälle vorlagen, oder Lippen-Kiefer-Gaumen-Spalten, sowie andere syndromale Erkrankungen vorlagen.

2.3 Bewertung der Zahnbewegung mit dem iTero

Nach dem Erstellen des Kontrollscans mit dem iTero Intraoralscanner folgte die Eingabe der jeweiligen Alignerstufe durch den Behandler oder die Behandlerin. Die Software des Scanners glich dann die vorliegende Situation mit der jeweiligen Alignerstufe in der ClinCheck Software ab. Hierbei wurden die Bewegungen wie in der Planung in Translation bukkal/ lingual, Translation mesial/ distal, Extrusion/ Intrusion, Angulation nach mesial/ distal, Inklination bukkal/ lingual und Rotation nach mesial/ distal unterteilt. Dabei zählten die translatorischen Bewegungen, sowie die Extrusion/Intrusion zu Translation und wurden in Millimeter

beschrieben und die Angulation, Inklination, und Rotation wurden in Grad beschrieben.

Je nach Übereinstimmung bzw. Abweichung der jeweiligen Situation wurde der Zahn und auch die tabellarische Darstellung farblich gekennzeichnet.

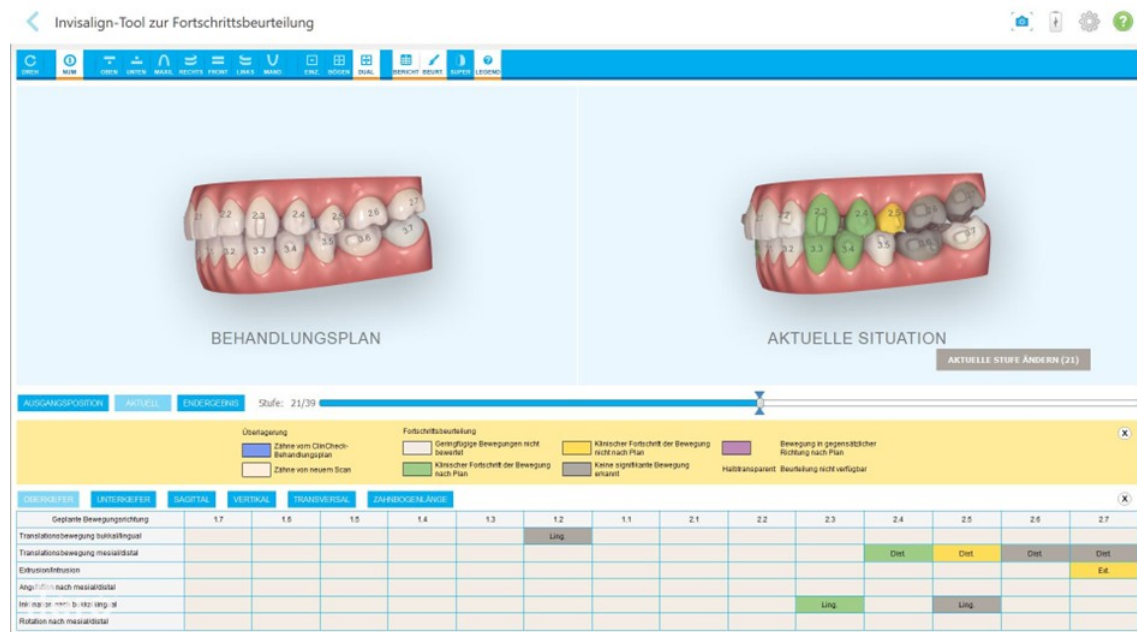


Abbildung 7 Beispielhafte Darstellung einer Fortschrittsbeurteilung im iTero Intraoralscanner von Align Technology. Dreidimensionaler Scan bei Aligner #21 und Überlagerung durch die KI mit der ClinCheck Planung im Oberkiefer. Darstellung der Zähne 12, 25, 26, 27 und von einzelnen Zahnbewegungen in Grau und damit zu keiner Zahnbewegung erkannt durch die KI. Darstellung der Zähne 25 und 27 und von einzelnen Zahnbewegungen in Gelb und damit eine zu langsam erkannte Zahnbewegung. Darstellung der Zähne 23, 24 und von einzelnen Zahnbewegungen in Grün und damit die erwartete Zahnbewegung erkannt durch die KI (Screenshot iTero).



Abbildung 8 Beispielhafte Darstellung einer Fortschrittsbeurteilung im iTero Intraoralscanner von Align Technology. Dreidimensionaler Scan bei Aligner #21 und Überlagerung durch die KI mit der ClinCheck Planung im Unterkiefer. Darstellung des Zahnes 36 und von einer einzelnen Zahnbewegungen in Grau und damit zu keiner Zahnbewegung erkannt durch die KI. Darstellung der Zähne 42, 33, 34 und von einzelnen Zahnbewegungen in Grün und damit die erwartete Zahnbewegung erkannt durch die KI (Screenshot iTero).

Wurde in der Planung ein Zahn gar nicht bewegt, erfolgte dessen Darstellung in Weiß und in der Tabelle erschien keine Info.

Erfolgte die Bewegung des Zahnes entsprechend oder bis zu $< 20\%$ abgewichen von seiner Planung in der ClinCheck Software, so wurde dieser Zahn sowohl in der Translation oder Rotation in Grün dargestellt. Kam es zu einer Abweichung von 20% bis 70% in der Translation und Rotation, so wurde der Zahn und die Bewegung Gelb dargestellt. Sollte es zu keiner signifikanten Abweichung der Bewegung von der ursprünglichen Position des Zahnes kommen, also bei einer Bewegung $\leq 0,25$ mm bzw. $2,5^\circ$ oder sogar zu einer entgegengesetzten Bewegung von $\geq -0,25$ mm bzw. $2,5^\circ$, so wurde der Zahn und die Bewegung in Grau dargestellt. Kam es wider Erwarten zu einer entgegengesetzten Bewegung $\leq 0,25$ mm bzw. $2,5^\circ$ wurde dieser in Lila dargestellt.

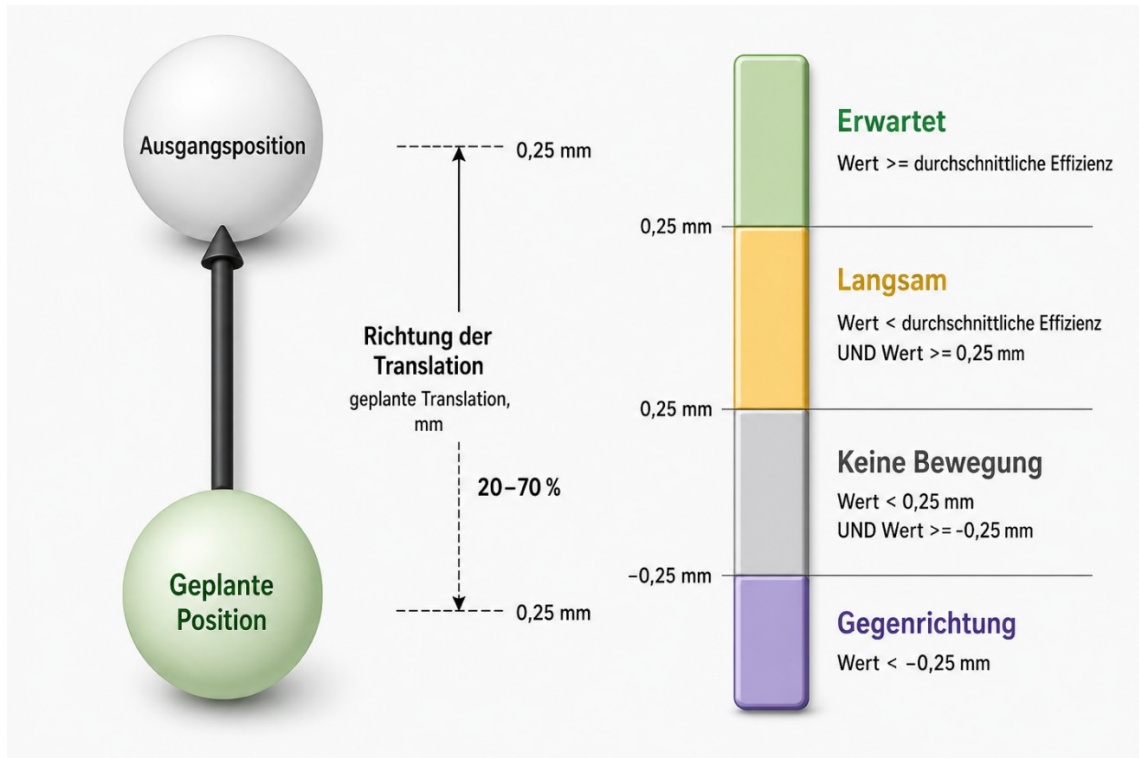


Abbildung 9 Kriterien der Beurteilung der KI in der Fortschrittsbeurteilung durch den Intraoralscanner iTero von Align Technologie. Nach dem Abgleich der klinischen Situation mit der Alignerstufe aus dem ClinCheck erfolgt die farbliche und tabellarische Darstellung der Zahnbewegung entsprechend ihres Behandlungserfolges. Darstellung der translatorischen Zahnbewegungen in Grün, wenn die Zahnbewegungen entsprechend der Planung oder maximal zu 20% abweichend verläuft. Darstellung der translatorischen Zahnbewegung in Gelb, wenn die Zahnbewegung eine verlangsamte Abweichung von 20-70% aufzeigt. Darstellung der translatorischen Zahnbewegung in Grau, wenn die Zahnbewegungen keine Änderung oder unter 0,25 mm Veränderung aufzeigt. Darstellung der translatorischen Zahnbewegung in Lila, wenn die Zahnbewegung eine entgegengesetzte Zahnbewegung über 0,25 mm aufzeigt. Bild mit KI Perplexity AI generiert „Bitte erstelle mir folgendes Bild von Align graphisch geändert dar?“

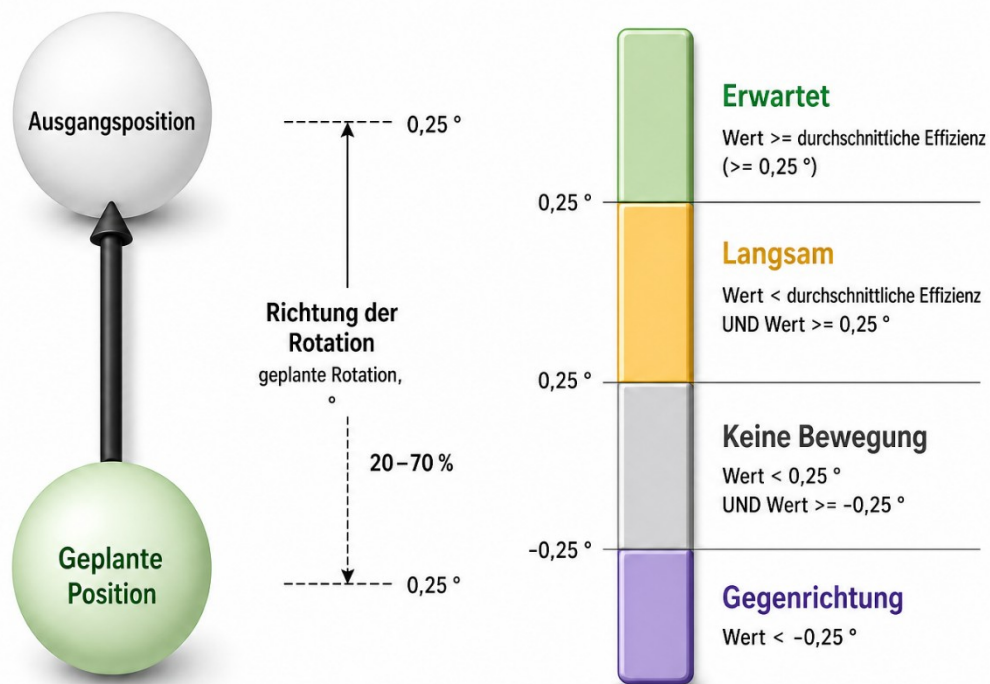


Abbildung 10 Kriterien der Beurteilung der KI in der Fortschrittsbeurteilung durch den Intraoralscanner iTero von Align Technologie. Nach dem Abgleich der klinischen Situation mit der Alignerstufe aus dem ClinCheck erfolgt die farbliche und tabellarische Darstellung der Zahnbewegung entsprechend ihres Behandlungserfolges. Darstellung der rotatorischen Zahnbewegungen in Grün, wenn die Zahnbewegungen entsprechend der Planung oder maximal zu 20% abweichend verläuft. Darstellung der rotatorischen Zahnbewegung in Gelb, wenn die Zahnbewegung eine verlangsamte Abweichung von 20-70% aufzeigt. Darstellung der rotatorischen Zahnbewegung in Grau, wenn die Zahnbewegungen keine Änderung oder unter $0,25^\circ$ Veränderung aufzeigt. Darstellung der rotatorischen Zahnbewegung in Lila, wenn die Zahnbewegung eine entgegengesetzte Zahnbewegung von über $0,25^\circ$ aufzeigt. Bild mit KI Perplexity AI generiert „Bitte erstelle mir folgendes Bild von Align graphisch geändert dar?“

Der Kontrollscan und dessen Fortschrittsbeurteilung gaben dem Behandler bereits im Verlauf der Behandlung einen Hinweis auf den Verlauf der Therapie. Hiermit konnte frühzeitig erkannt werden, ob eine Planung reevaluiert werden sollte oder ggf. Hilfsmittel wie Gummizüge in Kombination mit Knöpfchen oder Power Arms (Auxiliaries) ergänzt werden sollten. War die Abweichung zu groß oder entzog sich der Zahn einer Bewegung, sah man dies in der Darstellung in Grau bzw. Lila oder konnte sogar auf den ersten Blick klinisch bereits auffallen. Hierbei sah man oft verstärkt Luft oder Speichelbläschen zwischen Aligner und Zahn. Bei starken Bewegungsabweichungen stand der Aligner auch verstärkt vom Zahn ab, wenn auch das Attachment nicht mehr in die Aussparung in den

Aligner passte. Dabei war eine frühzeitige erneute Planung mit der ClinCheck Software indiziert, ein so genanntes Case Refinement.



Abbildung 11 Klinische Situation eines schlechtsitzenden Aligners an Zahn 13, 12 und 22. Die Zähne 13, 12 und 22 zeigen inzisal Luft im Aligner auf.

2.4 Auswertung und statistische Analyse

Die Auswertung zur Beurteilung der Umsetzbarkeit der Alignerbewegungen erfolgte in der oben beschriebenen Methode. Hierbei erfolgte die Überlagerung der unterschiedlichen Scans durch das von Invisalign auf dem iTero Intraoralscanner bereitgestellte Programm der Fortschrittsbeurteilung. Hierbei erfolgte die Überlagerung der aktuellen Situation durch Eingabe der aktuellen Alignerstufe durch den Behandler. Das Matching erfolgte durch die auf dem Intraoralscanner integrierte künstliche Intelligenz. Anschließend wurde der Fortschritt wie oben beschrieben farblich dargestellt.

Die Ergebnisse der Auswertungen wurden mit dem Statistik Programm Jump erfasst. Jeder Zahn wurde einzeln betrachtet und die Bewegungen Translation bukkal/lingual, Translation mesial/distal, Extrusion/Intrusion, Angulation nach mesial/distal, Inklination bukkal/lingual und Rotation nach mesial/distal erfasst, wenn diese in der Planung vorhergesehen waren. Ein Zahn wurde als erfolgreich therapiert eingestuft, wenn sich mehr als 50 % der Bewegungen nach Plan (Grün) oder nicht nach Plan (Gelb) dargestellt haben. Ist ein Zahn aufgrund der Sequenzierung in der Planung bis zum Kontrollscan noch nicht bewegt worden, so wurde dieser in weiß dargestellt. Dies stellte keine Abweichung dar.

In der Analyse der deskriptiven Statistik wurden die Einzelzähne je nach Regio in der Auswertung zu sechs verschiedenen Segmenten zusammengefasst. Die Segmente waren festgelegt auf folgende Zähne 17 bis 13 (1. Quadrant Seitenzähne, zwei Molaren, zwei Prämolaren und ein Canini), 12 bis 22 (Oberkiefer Frontzähne, zwei laterale und zwei zentrale Inzisivi), 23 bis 27 (2. Quadrant Seitenzähne, zwei Molaren, zwei Prämolaren und ein Canini), 37 bis 33 (3. Quadrant Seitenzähne, zwei Molaren, zwei Prämolaren und ein Canini), 32 bis 42 (Unterkiefer Frontzähne, zwei laterale und zwei zentrale Inzisivi) und 43 bis 47 (4. Quadrant Seitenzähne, zwei Molaren, zwei Prämolaren und ein Canini). Auch hier wurde ein Segment als erfolgreich therapiert eingestuft, wenn mehr als 50 % der Einzelzähne im Segment erfolgreich therapiert wurden.

Um die Umsetzbarkeit der Zahnbewegungen mittels Alignern zu überprüfen, sollte zunächst ein Test der Gesamt-Erfolgsquote gegen einen Referenzwert der klinisch relevante Mindestumsetzbarkeit durchgeführt werden. Bei 298 Erfolgen Zahnbewegungen von insgesamt 366 bewegten Zähnen im Zuge dieser Auswertung ergab sich ein Anteils-Test, der eine signifikant höhere Erfolgsrate als 70 % zeigte ($p < 0,001$), sodass die Nullhypothese einer nur mäßigen Umsetzbarkeit verworfen werden konnte. Das 95 %-Konfidenzintervall der Gesamt-Erfolgsquote lag näherungsweise im Bereich von etwa 77 % bis 85 %, womit die klinische Reproduzierbarkeit der Bewegungen statistisch abgesichert war.

2.5 Ethikvotum

Die Ethik-Kommission bewilligte am 14.04.2025 das Projekt „Retrospektive kieferorthopädisch dreidimensionale Auswertung von anonymisierten Patientendaten zur Beurteilung der Umsetzung von Zahnbewegungen mittels Alignertherapie unter der Projekt-Nummer 206/2025B02.

3 Ergebnisse

In der Untersuchung wurden insgesamt 73 Patienten mit jeweils zwei Intraoralscans, also mit 146 Intraoralscans mit dem Abstand von sechs bis neun Monaten eingeschlossen. Hiervon waren 48 (65,8 %) weibliche und 25 (34,2 %) männliche Probanden. Die Probanden waren zum Zeitpunkt der Untersuchung zwischen 8,6 und 55,8 Jahren alt mit einem durchschnittlichen Alter von 21,1 Jahren. Unterteilt man diese in drei Altersklassen teilen sich diese wie folgt auf. Die jüngste Altersgruppe sind unter 14-jährige mit 23,2 %, 14- bis 18-jährige mit 38,4 % und über 18- jährige auch mit 38,4 %.

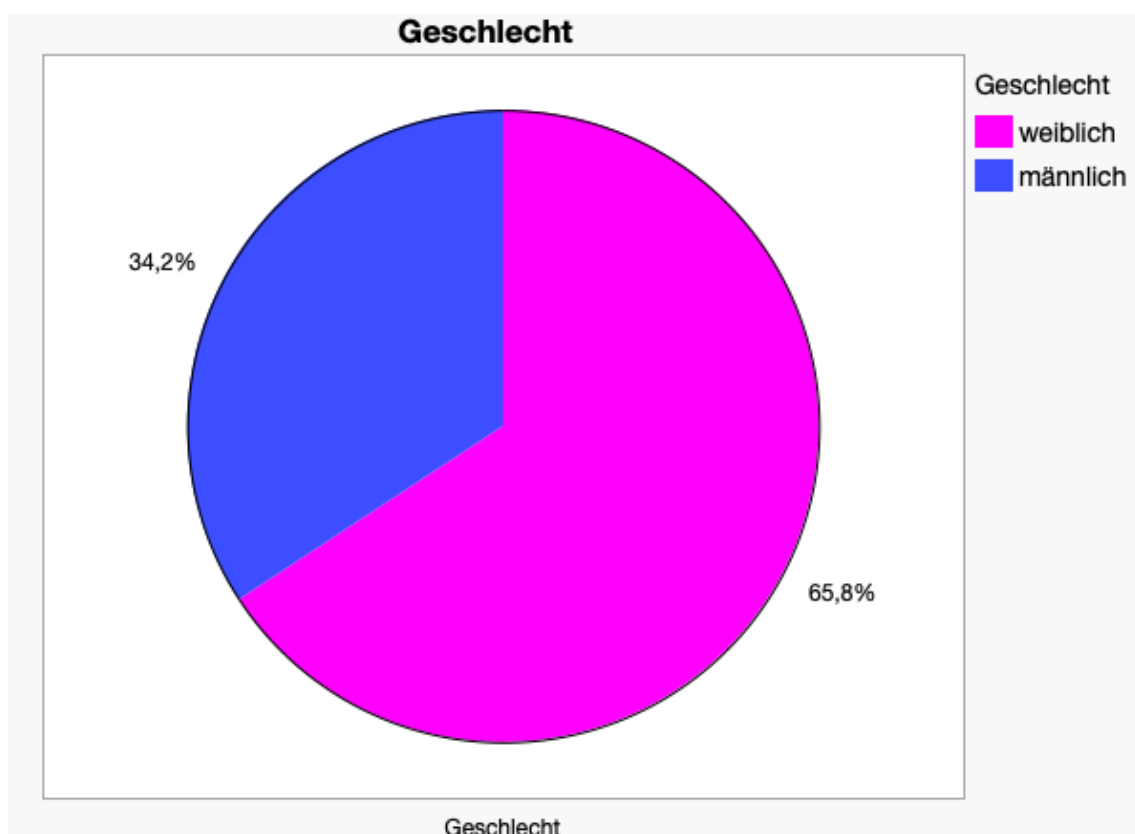


Abbildung 12 Darstellung im Kuchendiagramm der Patientenkohorte der 73 Patienten. Anteil der männlichen Patienten (blau) von 34,2 % also 25. Anteil der weiblichen Patienten (pink) von 65,8 % also 48.

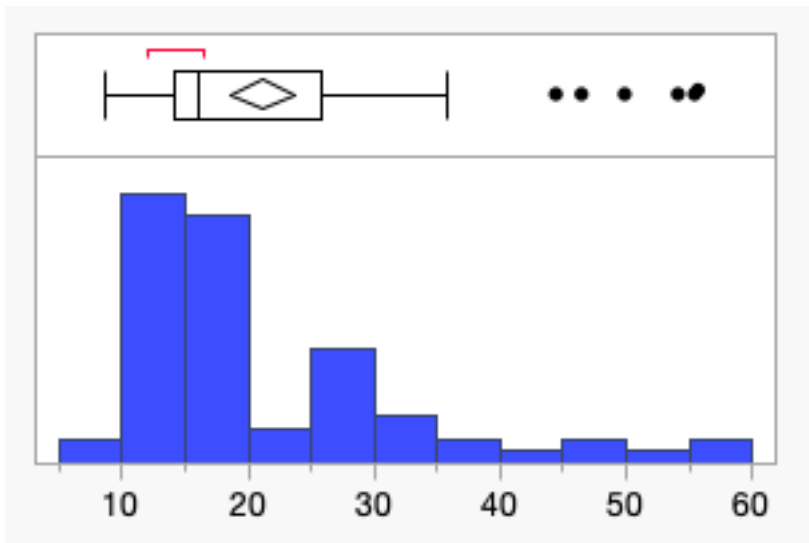


Abbildung 13 Darstellung der Altersverteilung der 73 Patienten im Histogramm und Boxplot. Die Probanden waren zum Zeitpunkt der Untersuchung zwischen 8,6 und 55,8 Jahre alt, mit einem Durchschnittlichen Alter von 21,1 Jahre und einem Median von 16,8 Jahren.

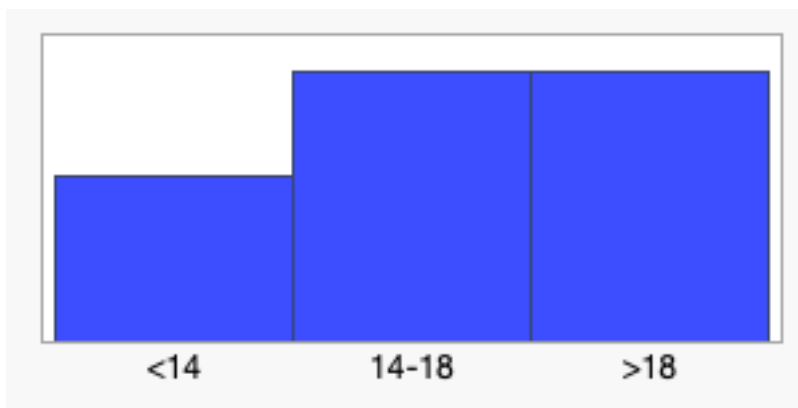


Abbildung 14 Histogramm zur Verteilung innerhalb der Altersklassen von unter 14-jährigen bei einer Häufigkeit von 17, 14- bis 18-jährige bei einer Häufigkeit von 28, über 18-jährige bei einer Häufigkeit von 28.

Tabelle 2 Darstellung der Verteilung innerhalb der Altersklassen und Wahrscheinlichkeit von unter 14-jährigen bei einer Häufigkeit von 17-, 14- bis 18-jährige bei einer Häufigkeit von 28, über 18-jährige bei einer Häufigkeit von 28.

Klasse	Häufigkeiten	Wahrsch.
<14	17	0,23288
14-18	28	0,38356
>18	28	0,38356
Summe	73	1,00000

Bei der Untersuchung und Kontrolle der einzelnen Patienten zeigten sich die unterschiedlichsten Ergebnisse. Davon waren die meisten Behandlungsergebnisse ausreichend erfolgreich. Aber es gab auch Resultate bei der die Behandlungszwischenergebnisse ein Case Refinement zur Folge hatten und die Zahnbewegungen teilweise zu stark von der Planung abweichen.

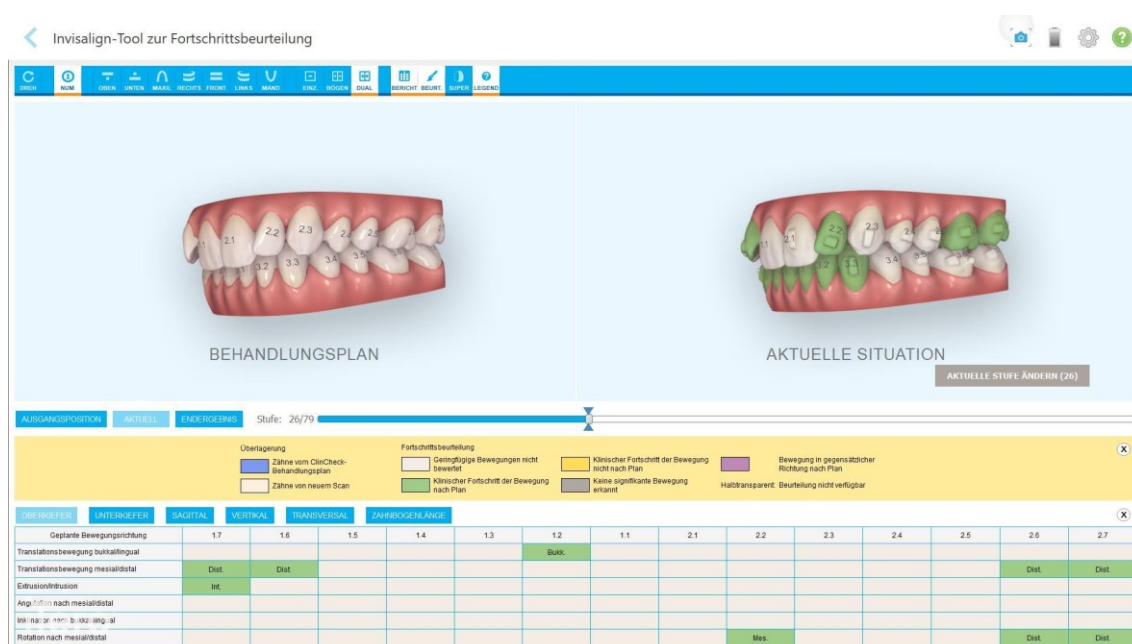


Abbildung 15 Beispielhafte Darstellung einer Fortschrittsbeurteilung im iTero Intraoralscanner von Align Technology. Dreidimensionaler Scan bei Aligner #26 und Überlagerung durch die KI mit der ClinCheck Planung im Oberkiefer. Hier dargestellt eine sehr gute Umsetzung der Alignerbewegung (Screenshot iTero).

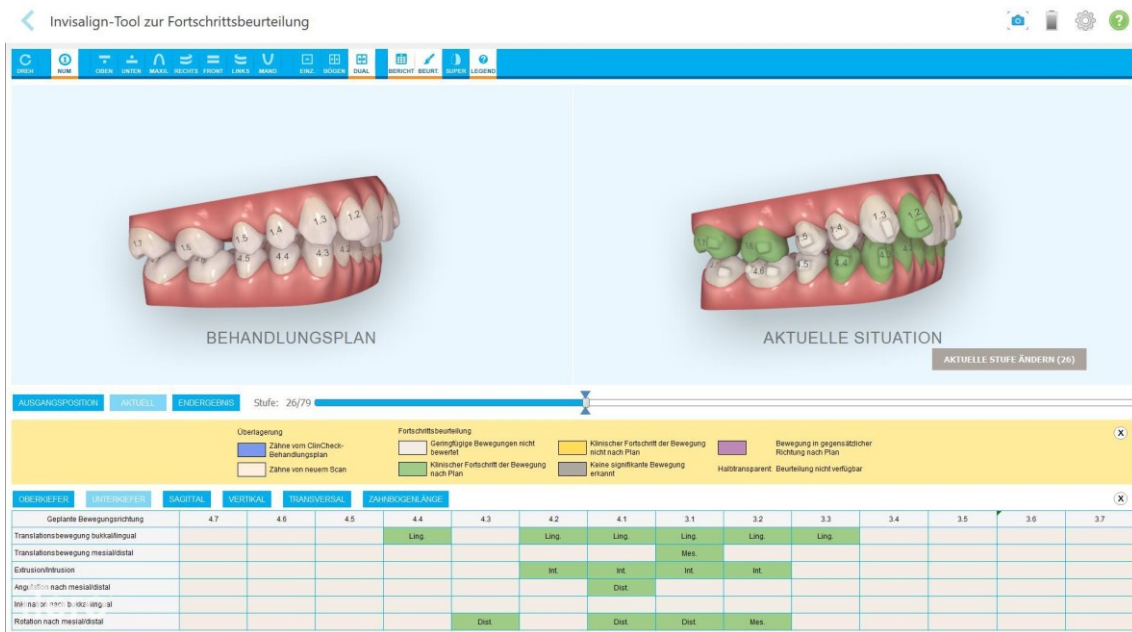


Abbildung 16 Beispielhafte Darstellung einer Fortschrittsbeurteilung im iTero Intraoralscanner von Align Technology. Dreidimensionaler Scan bei Aligner #26 und Überlagerung durch die KI mit der ClinCheck Planung im Unterkiefer. Hier dargestellt eine sehr gute Umsetzung der Alignerbewegung (Screenshot iTero).

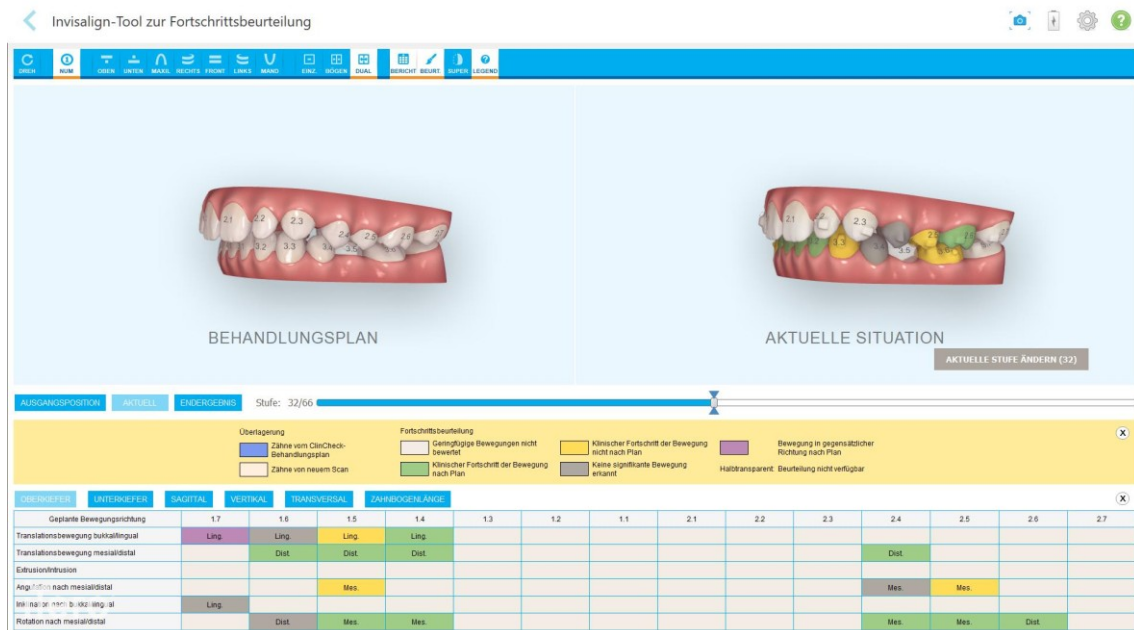


Abbildung 17 Beispielhafte Darstellung einer Fortschrittsbeurteilung im iTero Intraoralscanner von Align Technology. Dreidimensionaler Scan bei Aligner #32 und Überlagerung durch die KI mit der ClinCheck Planung im Oberkiefer. Hier dargestellt eine mäßig gute Umsetzung der Alignerbewegung (Screenshot iTero).



Abbildung 18 Beispielhafte Darstellung einer Fortschrittsbeurteilung im iTero Intraoralscanner von Align Technology. Dreidimensionaler Scan bei Aligner #32 und Überlagerung durch die KI mit der ClinCheck Planung im Unterkiefer. Hier dargestellt eine mäßig gute Umsetzung der Alignerbewegung (Screenshot iTero).

3.1 Ergebnisse Oberkiefer

Tabelle 3 Tabellarische Darstellung der gesamten Untersuchung und den 366 therapierten Zähnen, eingeteilt in ihre jeweiligen Regionen mit der Beurteilung des Behandlungserfolges und des Misserfolges.

Ergebnisse Regio

Regio	Anzahl therapiert	Summe(Anzahl*Erfolg)	Erfolgsquote	Anzahl ohne Erfolg	Misserfolgsquote
1.Q	68	57	83,8%	11	16,2%
OK Front	42	34	81,0%	8	19,0%
2.Q	69	63	91,3%	6	8,7%
3.Q	67	50	74,6%	17	25,4%
UK Front	52	41	78,8%	11	21,2%
4.Q	68	53	77,9%	15	22,1%

Im Zuge dieser Untersuchung wurden insgesamt 366 therapierte Zähne mit einbezogen und analysiert. Dabei wurden die Zähne in unterschiedliche Regionen unterteilt und alle Ergebnisse zusammengefasst. Je nach Regio sind auch hier Abweichungen erkennbar und wurden im Folgenden genauer analysiert.

3.1.1 Ergebnisse Oberkiefer 1. Quadrant Seitenzahnggebiet

Tabelle 4 Tabellarische Darstellung des Behandlungsergebnisses im 1. Quadranten der Zähne 17-13. Hierbei wurde bewertet, ob der jeweilige Zahn einen Behandlungserfolg oder keinen Behandlungserfolg aufzeigt hat, sowie die spezifische Kombination der einzelnen Zahnbewegungen und deren Erfolge vorliegen und damit ein Fall als Gesamterfolg zu werten ist oder nicht.

	Anzahl Zeilen	17 therapiert	16 therapiert	15 therapiert	14 therapiert	13 therapiert	17-Te-oT	16-Te-oT	15-Te-oT	14-Te-oT	13-Te-oT	Erfolg 1.Q	Erfolg	Anzahl*Erfolg
1	5	nein	nein	nein	nein	nein	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	•	•
2	5	nein	nein	nein	nein	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	•	5
3	1	nein	nein	nein	nein	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	•	0
4	4	nein	nein	nein	nein	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	•	4
5	4	nein	nein	nein	ja	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	•	4
6	1	nein	nein	nein	ja	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	•	0
7	2	nein	nein	nein	ja	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	•	2
8	2	nein	nein	ja	ja	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	•	2
9	1	nein	ja	nein	ja	nein	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	•	1
10	1	nein	ja	ja	nein	nein	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	•	1
11	1	nein	ja	ja	nein	nein	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	•	0
12	7	nein	ja	ja	ja	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	•	7
13	1	ja	nein	nein	nein	nein	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	•	0
14	1	ja	nein	ja	ja	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	•	1
15	1	ja	nein	ja	ja	nein	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	•	0
16	2	ja	ja	nein	nein	nein	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	•	2
17	1	ja	ja	nein	nein	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	•	1
18	1	ja	nein	nein	ja	nein	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	•	1
19	1	ja	ja	nein	ja	nein	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	•	0
20	4	ja	ja	nein	ja	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	•	4
21	1	ja	ja	nein	ja	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	•	0
22	3	ja	ja	ja	nein	nein	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	•	3
23	2	ja	ja	ja	ja	nein	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	•	2
24	2	ja	ja	ja	ja	nein	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	•	2
25	2	ja	ja	ja	ja	nein	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	•	0
26	12	ja	ja	ja	ja	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	•	12
27	1	ja	ja	ja	ja	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	•	0
28	1	ja	ja	ja	ja	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	•	1
29	2	ja	ja	ja	ja	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	•	2
30	1	ja	ja	ja	ja	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	•	0

Für die Auswertung wurden im ersten Quadranten (Zähne 17–13) alle Patientenfälle und die Intraoralscans hinsichtlich der geplanten und tatsächlich erreichten Zahnbewegungen erfasst, hierbei wurden im ersten Quadranten insgesamt 68 Zähne einbezogen. Für jeden Zahn erfolgte ein Test auf Übereinstimmung der klinisch erzielten Zahnbewegung mit der zuvor in der Behandlungsplanung definierten Simulation der ClinCheck-Software, um die Umsetzbarkeit der geplanten Bewegungen zu beurteilen. In der Tabelle ist zunächst dokumentiert, welche Zähne in den jeweiligen Fällen überhaupt zum Zeitpunkt der Untersuchung mit Alignern therapiert wurden und wie viele Zähne der Untersuchung insgesamt in die Alignerplanung einbezogen waren. Zusätzlich wurde erfasst, wie häufig jede spezifische Kombination von erfolgten oder nicht-erfolgten Zahnbewegungen in den analysierten Patientenfällen vorkam. Darauf basierend zeigt sich, dass Behandlungen bei denen ein oder zwei Zähne bewegt werden seltener vorkamen als solche, in denen drei oder mehr Zähne desselben Quadranten gleichzeitig bewegt wurden. Mit zunehmender Anzahl einbezogener Zähne in die Planung steigt damit auch die Komplexität der geplanten Bewegungsmuster innerhalb des Quadranten.

Für jeden einzelnen Zahn wurde darüber hinaus vermerkt, ob die geplante Bewegung im Sinne der vorab definierten Planung im ClinCheck erreicht wurde und ist als Therapieerfolg oder ohne Therapieerfolg vermerkt. So lässt sich ablesen, dass gelegentlich ein nur teilweiser Therapieerfolg entsteht. Im ersten Quadranten finden sich in vielen Fällen sowohl Zähne mit vollständigem Therapieerfolg als auch Zähne ohne vollständige Umsetzung der geplanten Zahnbewegung. Auffällig ist, dass distale Molaren, die Zähne 17 und 16, seltener als Therapieerfolg bewertet wurden als die weiter mesial stehenden Zähne, insbesondere die Prämolaren und der Eckzahn, Zähne 15, 14 und 13 weisen häufiger eine vollständige Umsetzung der geplanten Zahnbewegung auf. Ein fehlender Therapieerfolg oder gemischter Therapieerfolg tritt vor allem in Fällen mit mehr als zwei gleichzeitig therapierten Zähnen auf.

Die Tabelle fasst den Behandlungserfolg in dem angegebenen Quadranten zusammen, indem sie angibt, ob im jeweiligen Fall aus Sicht der vordefinierten

Kriterien der gesamte Quadrant als Therapieerfolg im Gesamten erreicht wurde. Ergänzend quantifiziert eine der Variablen, wie viele der therapierten Zähne pro Patientenfall die Kriterien des Therapieerfolgs erfüllten. In Fällen mit geringerem Bewegungsumfang, in denen nur ein oder zwei Zähne, also mit eher einfachen Bewegungen in die Planung einbezogen waren, zeigt die gesamte Behandlung eher einen verbesserten gesamten Therapieerfolg. Demgegenüber zeigt sich in komplexeren Fällen mit vielen oder allen bewegten Zähnen auch, dass nur ein Teil der therapierten Zähne die geplanten Bewegungen vollständig erreicht haben. In diesen Fällen finden sich somit innerhalb desselben Quadranten vermehrt Kombinationen aus Zähnen mit und ohne Therapieerfolg.

Die Erfolgsquote der Seitenzähne im ersten Quadranten beträgt 83,8 % und zeigt, dass sich 57 der therapierten Zähne in Art und Ausmaß der Kriterien im Wesentlichen entsprechend der virtuellen Planung im ClinCheck bewegt haben. Bei 11 Zähnen (16,2 %) konnte hingegen eine Abweichung zwischen der tatsächlich erreichten Position und der simulierten Endposition des ClinCheck festgestellt werden, sodass die vorgesehenen Bewegungen in diesen Fällen nur teilweise oder nicht zufriedenstellend entsprechend der Kriterien umgesetzt wurden.

3.1.2 Ergebnisse Oberkiefer Frontzahngebiet

Tabelle 5 Tabellarische Darstellung des Behandlungsergebnisses im Oberkiefer Frontzahngebiet der Zähne 12-22. Hierbei wurde bewertet, ob der jeweilige Zahn einen Behandlungserfolg oder keinen Behandlungserfolg aufgezeigt hat, sowie die spezifische Kombination der einzelnen Zahnbewegungen und deren Erfolge vorliegen und damit ein Fall als Gesamterfolg zu werten ist oder nicht.

	Anzahl Zellen	12	11	21	22	12 Te-oT	11 Te-oT	21 Te-oT	22 Te-oT	Erfolg OK Front	Erfolg	Anzahl*Erfolg lg
1	31	nein	nein	nein	nein	•	•	•	•	•	•	•
2	3	nein	nein	nein	ja	•	•	•	• Therapieerfolg	Therapieerfolg	1	3
3	2	nein	nein	nein	ja	•	•	•	• ohne Therapi...	ohne Therapie...	0	0
4	1	nein	ja	nein	ja	• ohne Therapi...	• ohne Therapi...	•	• Therapieerfolg	ohne Therapie...	0	0
5	1	nein	ja	ja	nein	• Therapieerfolg	• Therapieerfolg	Therapieerfolg	• Therapieerfolg	Therapieerfolg	1	1
6	1	nein	ja	ja	ja	• Therapieerfolg	• Therapieerfolg	Therapieerfolg	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1	1
7	1	nein	ja	ja	ja	• Therapieerfolg	• Therapieerfolg	Therapieerfolg	ohne Therapi...	Therapieerfolg	1	1
8	2	ja	nein	nein	nein	Therapieerfolg	•	•	• Therapieerfolg	Therapieerfolg	1	2
9	1	ja	nein	nein	nein	ohne Therapi...	•	•	• ohne Therapie...	ohne Therapie...	0	0
10	2	ja	nein	nein	ja	Therapieerfolg	•	• Therapieerfolg	• Therapieerfolg	Therapieerfolg	1	2
11	1	ja	nein	nein	ja	Therapieerfolg	•	• ohne Therapi...	• ohne Therapi...	ohne Therapie...	0	0
12	1	ja	nein	ja	ja	Therapieerfolg	• Therapieerfolg	• Therapieerfolg	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1	1
13	1	ja	ja	nein	ja	ohne Therapi...	Therapieerfolg	• Therapieerfolg	• Therapieerfolg	Therapieerfolg	1	1
14	1	ja	ja	ja	nein	Therapieerfolg	• Therapieerfolg	• Therapieerfolg	• Therapieerfolg	Therapieerfolg	1	1
15	19	ja	ja	ja	ja	Therapieerfolg	Therapieerfolg	Therapieerfolg	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1	19
16	1	ja	ja	ja	ja	Therapieerfolg	Therapieerfolg	Therapieerfolg	ohne Therapi...	Therapieerfolg	1	1
17	1	ja	ja	ja	ja	ohne Therapi...	Therapieerfolg	Therapieerfolg	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1	1
18	1	ja	ja	ja	ja	ohne Therapi...	ohne Therapi...	Therapieerfolg	ohne Therapi...	ohne Therapie...	0	0
19	2	ja	ja	ja	ja	ohne Therapi...	ohne Therapi...	ohne Therapi...	ohne Therapi...	ohne Therapie...	0	0

Für die Auswertung der Oberkieferfrontzähne (Zähne 12-22) wurden alle Patientenfälle hinsichtlich der im ClinCheck geplanten und tatsächlich umgesetzten Zahnbewegungen erfasst, wobei hierbei insgesamt 42 Zähne einbezogen wurden. Für jeden Zahn erfolgte ein systematischer Abgleich gemäß den Kriterien der klinisch erzielten Zahnbewegung mit der zuvor in der digitalen Behandlungsplanung simulierten Endposition, um auch in diesem Bereich die Umsetzbarkeit der geplanten Bewegungen im Frontzahnbereich objektiv zu betrachten.

Die Analyse zeigt, dass auch hier Kombinationen bei denen ein oder zwei Zähne in einer Behandlung deutlich seltener vorkamen als solche, in denen drei oder alle Frontzähne gleichzeitig bewegt wurden. Hierbei ergibt sich ein gemischtes Ergebnis. Während in vielen Fällen einzelne Zähne die geplanten Bewegungen vollständig als Therapieerfolg umsetzten, blieben bei anderen eine relevante Abweichung von der Simulation bestehen und stellen sich als ohne Therapieerfolg dar. Besonders auffällig ist der Unterschied zwischen den einzeln betrachteten Zähnen bzw. Zahngruppen. Die lateral gelegenen Zähne 12 und 22 wurden eher seltener als Therapieerfolg bewertet als die zentralen Frontzähne 11 und 21. Dieser Befund tritt verstärkt in Fällen mit mehreren oder allen gleichzeitig therapierten Zähnen auf.

In Fällen mit geringem Bewegungsumfang, also wenig parallel bewegten Zähnen mit einfacheren Bewegungen, entsprach die Zahl der erfolgreich therapierten Zähne häufig der Gesamtzahl der in der Planung einbezogenen Zähne. Bei höherem Bewegungsumfang, also oftmals allen gleichzeitig bewegten Zähnen wurde jedoch nur ein Teil der geplanten Bewegungen vollständig erreicht, was innerhalb desselben Frontzahnsegments zu Kombinationen aus erfolgreichen und nicht erfolgreichen Zahnbewegungen führte.

Die Erfolgsquote der Frontzähne beträgt 81,0 %, was bedeutet, dass sich 34 der therapierten Zähne weitgehend entsprechend der virtuellen Planung und den erstellten Kriterien bewegt haben. Bei acht Zähnen (19,0 %) konnte hingegen

eine relevante Diskrepanz zwischen der tatsächlich erreichten Position und der simulierten Endposition des ClinCheck festgestellt werden, sodass die vorgesehenen Bewegungen in einigen Fällen nur eingeschränkt oder nicht zufriedenstellend umgesetzt wurden und damit die Behandlung als mäßiger Erfolg gilt.

3.1.3 Ergebnisse Oberkiefer 2. Quadrant Seitenzahngebiet

Tabelle 6 Tabellarische Darstellung des Behandlungsergebnisses im 2. Quadranten der Zähne 23-27. Hierbei wurde bewertet, ob der jeweilige Zahn einen Behandlungserfolg oder keinen Behandlungserfolg aufgezigt hat, sowie die spezifische Kombination der einzelnen Zahnbewegungen und deren Erfolge vorliegen und damit ein Fall als Gesamterfolg zu werten ist oder nicht.

	Anzahl Zeilen	23 therapiert	24 therapiert	25 therapiert	26 therapiert	27 therapiert	23 Te-oT	24 Te-oT	25 Te-oT	26 Te-oT	27 Te-oT	Erfolg 2.Q	Erfolg	Anzahl*Erfolg
1	4	nein	nein	nein	nein	nein	•	•	•	•	•	•	•	•
2	1	nein	nein	nein	nein	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
3	1	nein	nein	nein	ja	nein	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
4	2	nein	nein	nein	ja	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
5	1	nein	nein	ja	nein	nein	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
6	1	nein	nein	ja	ja	nein	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
7	4	nein	nein	ja	ja	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
8	1	nein	ja	nein	nein	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
9	1	nein	ja	nein	nein	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
10	1	nein	ja	nein	ja	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
11	1	nein	ja	nein	ja	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
12	2	nein	ja	ja	nein	nein	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
13	1	nein	ja	ja	ja	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
14	1	nein	ja	ja	ja	nein	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
15	4	nein	ja	ja	ja	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
16	2	ja	nein	nein	nein	nein	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
17	1	ja	nein	nein	nein	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
18	1	ja	nein	ja	nein	nein	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
19	1	ja	nein	ja	ja	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
20	4	ja	ja	nein	nein	nein	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
21	3	ja	ja	nein	ja	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
22	1	ja	ja	nein	ja	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
23	1	ja	ja	nein	ja	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
24	4	ja	ja	ja	nein	nein	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
25	1	ja	ja	ja	nein	nein	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
26	1	ja	ja	ja	ja	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
27	7	ja	ja	ja	ja	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
28	2	ja	ja	ja	ja	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
29	1	ja	ja	ja	ja	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
30	1	ja	ja	ja	ja	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
31	12	ja	ja	ja	ja	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
32	1	ja	ja	ja	ja	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
33	1	ja	ja	ja	ja	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
34	1	ja	ja	ja	ja	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
35	1	ja	ja	ja	ja	ja	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1

Für die Auswertung des zweiten Quadranten (Zähne 23-27) wurden alle Patientenfälle hinsichtlich der geplanten und tatsächlich erreichten Zahnbewegungen erfasst, wobei insgesamt 69 Zähne in die Auswertung einbezogen wurden. Auch hier erfolgte ein systematischer objektiver Abgleich der klinisch erzielten Zahnbewegung mit der zuvor in der digitalen Behandlungsplanung der ClinCheck-Software simulierten Endposition, um die Umsetzbarkeit der geplanten Zahnbewegungen zu bewerten.

Die Analyse zeigt, dass Kombinationen von Zahnbewegungen bei nur ein oder zwei Zähnen deutlich seltener vorkamen als solche, in denen drei oder mehr Zähne gleichzeitig bewegt wurden. Hierbei ergibt sich ein insgesamt eher positives Gesamtergebnis. Während in den meisten Fällen die geplanten Bewegungen vollständig umgesetzt wurden, also ein Therapieerfolg, blieben Abweichungen ohne Therapieerfolg auf einzelne Behandlungen und Zähne beschränkt. Besonders auffällig ist der Unterschied zwischen den einzelnen Zähnen. Die distalen Molaren, die Zähne 37 und 36 wurden seltener als Therapieerfolg bewertet als die mesial gelegenen Zähne, die Prämolaren und der Eckzahn 35, 34 und 33, denn sie weisen eine hohe Rate vollständiger Umsetzung und damit einen Therapieerfolg auf. Dieser Befund tritt auch in Fällen mit mehreren gleichzeitig therapierten Zähnen auf.

In Fällen mit geringerem Bewegungsumfang, also einzelnen bewegten Zähnen entsprach die Zahl der erfolgreich therapierten Zähne häufig der Gesamtzahl der in die Behandlung einbezogenen Zähne. Bei höherem Bewegungsumfang und vielen parallel bewegten Zähnen wurde zwar überwiegend ein hoher Anteil der Bewegungen erfolgreich therapiert und umgesetzt, doch in wenigen Fällen blieb ein Teil der Zähne hinter der Planung zurück, was zu gemischten Ergebnissen innerhalb des zweiten Quadranten führte.

Mit 63 erfolgreich bewegten Zähnen ergibt sich eine Erfolgsquote von 91,3 %, die damit den höchsten Wert aller untersuchten Regionen darstellt. Nur sechs Zähne (8,7 %) wichen in ihrer tatsächlichen Position von der digitalen ClinCheck Planung ab, was im Vergleich der unterschiedlichen Quadranten auf eine

besonders zuverlässige Umsetzung der geplanten Bewegungen in diesem Quadranten hinweist.

Tabelle 7 Aufschlüsselung der einzelnen Zahnbewegungen im 1. Quadranten in Translation bukkal/lingual, Translation mesial/distal, Extrusion/Intrusion, Angulation mesial/distal, Inklination bukkal/lingual, Rotation mesial/distal.

Trans b/l	90
Trans m/d	131
Ext/ Intr	88
Ang m/d	61
Inkl b/l	49
Rot m/d	104

Tabelle 8 Aufschlüsselung der einzelnen Zahnbewegungen im 2. Quadranten in Translation bukkal/lingual, Translation mesial/ distal, Extrusion/Intrusion, Angulation mesial/distal, Inklination bukkal/lingual, Rotation mesial/distal.

Trans b/l	83
Trans m/d	116
Ext/ Int.	64
Ang m/d	52
Inkl b/l	43
Rot m/d	85

Im ersten Quadranten wurden insgesamt 523 einzeln beurteilte Bewegungsdimensionen erfasst, wobei biomechanisch die etwas anspruchsvolleren Arten an Zahnbewegungen dominierten. Die Translationen m/d waren 131 Zähne (25,0 %), Rotationen m/d waren 104 Zähne (19,9 %) sowie Translationen b/l 90 Zähne (17,2 %) und Extrusion/Intrusion 88 Zähne (16,8 %) stellten zusammen über 79 % aller Bewegungen dar. Angulationen m/d 61 Zähne (11,7 %) und Inklinationen b/l 49 Zähne (9,4 %) waren weniger prominent und stellen die biomechanisch einfacheren Bewegungen dar. Die Translation, Rotation, Extrusion und Intrusion erfordern eine kontrollierte Verschiebung der

Wurzel im Alveolarknochen und stellen hohe Anforderungen an die Kraft-Moment-Verhältnisse sowie an die Präzision der Alignerplanung und somit ClinCheck Planung dar. Die Häufung komplexer Bewegungen, vor allem Translationen und Rotationen, kann die im ersten Quadranten beobachtete etwas niedrigere Erfolgsquote von 83,8 % erklären, da diese Arten von Zahnbewegungen biomechanisch schwieriger umsetzbar sind und häufiger zu Abweichungen zwischen Planung und klinischem Ergebnis führen.

Im zweiten Quadranten hingegen wurden 443 einzeln beurteilte Bewegungsdimensionen erfasst, wobei biomechanisch ebenfalls Translationen m/d 116 Zähne (26,2 %), Rotationen m/d 85 Zähne (19,2 %), Translationen b/l 83 Zähne (18,7 %) und Extrusion/Intrusion 64 Zähne (14,4 %) dominierten, jedoch mit etwas geringerer Gesamthäufigkeit als im Vergleich zum ersten Quadranten. Angulationen m/d 52 Zähne (11,7 %) und Inklinationen b/l 43 Zähne (9,7%) waren ebenfalls vorhanden, aber das Bewegungsprofil wirkte insgesamt weniger biomechanisch anspruchsvoll. Dieses Muster aus überwiegend kippenden und moderaten translatorischen Zahnbewegungen, die eine weniger präzise Wurzelkontrolle erfordern, spiegelt sich in der etwas höheren Erfolgsquote von 91,3 % wider, die den zweiten Quadranten erfolgreicher als den ersten Quadranten darstellen.

Zusammenfassend verdeutlichen die quantitativen Daten aus den Tabellen, dass die biomechanische Komplexität der geplanten Bewegungen, Rotation, Translation im Vergleich zu Kippung, Angulation, direkt mit der Erfolgsquote korreliert. Während der erste Quadrant durch häufigere und umfangreichere Bewegungen (Translation und Rotation) eine höhere Misserfolgsrate aufweist, profitiert der zweite Quadrant von einem etwas einfacheren Bewegungsprofil (Kippen und Angulation) und erzielt damit die besseren Ergebnisse.

3.2 Ergebnisse Unterkiefer

3.2.1 Ergebnisse Unterkiefer 3. Quadrant Seitenzahngebiet

Tabelle 9 Tabellarische Darstellung des Behandlungsergebnisses im 3. Quadranten der Zähne 37-33. Hierbei wurde bewertet, ob der jeweilige Zahn einen Behandlungserfolg oder keinen Behandlungserfolg aufzeigt hat, sowie die spezifische Kombination der einzelnen Zahnbewegungen und deren Erfolge vorliegen und damit ein Fall als Gesamterfolg zu werten ist oder nicht.

Anzahl Zellen	37 therapiert	36 therapiert	35 therapiert	34 therapiert	33 therapiert	37 Te-oT	36 Te-oT	35 Te-oT	34 Te-oT	33 Te-oT	Erfolg 3.0	Erfolg	Anzahl Erfolg
1	6 nein	nein	nein	nein	nein	•	•	•	•	•	Therapieerfolg	•	•
2	5 nein	nein	nein	nein	ja	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1	5
3	2 nein	nein	nein	ja	ja	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1	2
4	1 nein	nein	nein	ja	ja	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	0	1
5	1 nein	nein	ja	nein	nein	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	0	1
6	1 nein	nein	ja	nein	nein	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	0	0
7	1 nein	nein	ja	nein	ja	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1	1
8	1 nein	nein	ja	nein	nein	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1	1
9	5 nein	nein	ja	ja	ja	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1	5
10	2 nein	nein	ja	ja	ja	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1	2
11	1 nein	nein	ja	ja	ja	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	0	0
12	1 nein	ja	nein	nein	ja	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	0	0
13	1 nein	ja	nein	nein	ja	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	0	0
14	1 nein	ja	nein	ja	ja	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1	1
15	1 nein	ja	ja	ja	nein	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1	1
16	1 nein	ja	ja	ja	nein	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1	1
17	1 nein	ja	ja	ja	ja	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1	1
18	1 nein	ja	ja	ja	ja	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1	1
19	1 nein	ja	ja	ja	ja	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	0	0
20	1 nein	ja	ja	ja	ja	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	0	0
21	1 ja	nein	nein	nein	ja	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1	1
22	1 ja	nein	nein	ja	ja	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1	1
23	3 ja	nein	nein	ja	nein	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1	3
24	1 ja	nein	ja	ja	ja	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1	1
25	1 ja	nein	ja	ja	ja	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1	1
26	1 ja	ja	nein	nein	nein	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	0	0
27	1 ja	ja	nein	nein	ja	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	0	0
28	1 ja	ja	nein	ja	ja	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	0	0
29	1 ja	ja	nein	ja	ja	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1	1
30	1 ja	ja	nein	ja	ja	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1	1
31	1 ja	ja	nein	ja	ja	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	0	0
32	1 ja	ja	nein	ja	ja	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	0	0
33	2 ja	ja	ja	nein	nein	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1	2
34	1 ja	ja	ja	ja	nein	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1	1
35	5 ja	ja	ja	ja	nein	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1	5
36	1 ja	ja	ja	ja	nein	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	0	0
37	7 ja	ja	ja	ja	ja	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1	7
38	1 ja	ja	ja	ja	ja	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1	1
39	1 ja	ja	ja	ja	ja	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	0	0
40	1 ja	ja	ja	ja	ja	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1	1
41	1 ja	ja	ja	ja	ja	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	0	0
42	2 ja	ja	ja	ja	ja	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1	2
43	1 ja	ja	ja	ja	ja	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	0	0
44	1 ja	ja	ja	ja	ja	•	•	•	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	0	0

Für die Auswertung des dritten Quadranten (Zähne 37–33) wurden alle Patientenfälle hinsichtlich der geplanten und tatsächlich erreichten Bewegungen der Zähne erfasst, wobei insgesamt 67 Zähne in die Untersuchung einbezogen wurden. Auch hier erfolgte ein systematischer Abgleich der klinisch erzielten Zahnbewegung mit der zuvor in der digitalen Behandlungsplanung der ClinCheck-Software simulierten Endposition, um die Umsetzbarkeit der geplanten Bewegungen des ClinChecks objektiv zu bewerten.

Die Analyse zeigt, dass Kombinationen mit Bewegungen von ein oder zwei Zähnen in den Behandlungen deutlich seltener vorkamen als solche, in denen drei oder mehr Zähne gleichzeitig bewegt wurden. Hierbei ergibt sich ein gemischtes klinisches Ergebnis mit einer im Vergleich erhöhten Rate unvollständiger Umsetzungen. Während viele Zähne die geplanten Bewegungen vollständig als Therapieerfolg zählen, traten Abweichungen ohne gewünschten Therapieerfolg in diesem Quadranten auf. Besonders auffällig ist der Unterschied zwischen den einzelnen Zähnen. Die distalen Molaren, die Zähne 37 und 36 wurden seltener als Therapieerfolg bewertet als die mesial davon stehenden Zähne, die Prämolaren und der Eckzahn 35, 34 und 33 mit einer etwas höheren Erfolgsrate. Dieser Befund mit ausbleibendem Therapieerfolg tritt vor allem in Fällen mit mehreren oder allen gleichzeitig therapierten Zähnen und komplexeren Bewegungsanteilen auf.

In Fällen mit geringerem Bewegungsumfang, also einzelnen bewegten Zähnen entsprach die Zahl der erfolgreich therapierten Zähne häufig der Gesamtzahl der in die Behandlung einbezogenen Zähne. Bei höherem Bewegungsumfang und vielen parallel bewegten Zähnen wurde jedoch nur ein Teil der geplanten Zahnbewegungen vollständig erreicht, dies führte innerhalb des dritten Quadranten zu deutlich gemischteren Erfolgsquoten der Behandlung.

Hier zeigte sich mit 50 erfolgreich bewegten Zähnen eine Erfolgsquote von 74,6 %, die im Vergleich zu den übrigen Regionen im Oberkiefer bisher am niedrigsten ausfällt. Bei 17 Zähnen (25,4 %) konnte die geplante Zahnbewegung nicht

vollständig umgesetzt werden, was auf eine erhöhte Schwierigkeit der Umsetzbarkeit von Zahnbewegungen im Unterkiefer schließen lässt.

3.2.2 Ergebnisse Unterkiefer Frontzahngebiet

Tabelle 10 Tabellarische Darstellung des Behandlungsergebnisses Frontzahngebiet der Zähne 32-42. Hierbei wurde bewertet, ob der jeweilige Zahn einen Behandlungserfolg oder keinen Behandlungserfolg aufzeigt hat, sowie die spezifische Kombination der einzelnen Zahnbewegungen und deren Erfolge vorliegen und damit ein Fall als Gesamterfolg zu werten ist oder nicht.

Anzahl Zeilen	32 therapiert	31 therapiert	41 therapiert	42 therapiert	32 Te-oT	31 Te-oT	41 Te-oT	42 Te-oT	Erfolg UK Front	Anzahl*Erfolg
1	21 nein	nein	nein	nein	•	•	•	•	•	•
2	1 nein	nein	nein	ja	•	•	•	•	Therapieerfolg	1
3	2 nein	nein	ja	ja	•	•	•	•	Therapieerfolg	1
4	1 nein	ja	nein	ja	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
5	2 nein	ja	ja	nein	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	•	Therapieerfolg	1
6	1 ja	nein	nein	nein	Therapieerfolg	•	•	•	Therapieerfolg	1
7	2 ja	nein	nein	ja	Therapieerfolg	•	•	•	Therapieerfolg	1
8	1 ja	nein	nein	ja	ohne Therapi...	•	•	•	ohne Therapi...	0
9	1 ja	nein	ja	ja	Therapieerfolg	•	Therapieerfolg	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
10	1 ja	ja	nein	ja	Therapieerfolg	Therapieerfolg	Therapieerfolg	•	Therapieerfolg	1
11	1 ja	ja	ja	nein	Therapieerfolg	Therapieerfolg	Therapieerfolg	•	Therapieerfolg	1
12	26 ja	ja	ja	ja	Therapieerfolg	Therapieerfolg	Therapieerfolg	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
13	2 ja	ja	ja	ja	Therapieerfolg	Therapieerfolg	Therapieerfolg	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
14	1 ja	ja	ja	ja	Therapieerfolg	ohne Therapi...	Therapieerfolg	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
15	1 ja	ja	ja	ja	Therapieerfolg	ohne Therapi...	Therapieerfolg	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
16	2 ja	ja	ja	ja	Therapieerfolg	ohne Therapi...	Therapieerfolg	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
17	1 ja	ja	ja	ja	Therapieerfolg	ohne Therapi...	Therapieerfolg	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
18	1 ja	ja	ja	ja	Therapieerfolg	Therapieerfolg	Therapieerfolg	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
19	2 ja	ja	ja	ja	Therapieerfolg	Therapieerfolg	Therapieerfolg	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1
20	3 ja	ja	ja	ja	Therapieerfolg	Therapieerfolg	Therapieerfolg	Therapieerfolg	Therapieerfolg	1

Für die Auswertung der Unterkieferfrontzähne (Zähne 32–42) wurden alle Patientenfälle hinsichtlich der geplanten und tatsächlich erreichten Zahnbewegungen erfasst, wobei insgesamt 52 Zähne in die Untersuchung des Frontzahnsegmentes einbezogen wurden. Wiederum wurde jede klinische Zahnbewegung mit der entsprechenden ClinCheck-Simulation verglichen, um die Umsetzbarkeit der geplanten Bewegungen objektiv zu bewerten.

Die Analyse zeigt, dass Kombinationen mit Zahnbewegungen von ein oder zwei Zähnen in der Behandlung deutlich seltener vorkamen als solche, in denen drei oder alle Frontzähne gleichzeitig bewegt wurden. Auch hierbei ergibt sich ein gemischtes Bild. Die Mehrzahl der Zähne konnte die geplanten Bewegungen vollständig umsetzen und zählten damit als ein Therapieerfolg, es blieben Abweichungen, also Behandlungen ohne Therapieerfolg in diesem Frontzahnsegment vermehrt bestehen. Besonders auffällig ist der Unterschied zwischen den einzelnen Zähnen. Die lateralen Inzisiven 32 und 42 wurden seltener als Therapieerfolg bewertet als die zentralen Inzisiven 31 und 41.

In Fällen mit geringerem Bewegungsumfang, also einzelnen bewegten Zähnen entsprach die Zahl der erfolgreich therapierten Zähne häufig der Gesamtzahl der in die Behandlung einbezogenen Zähne. Bei höherem Bewegungsumfang und vielen bis allen parallel bewegten Zähnen wurde jedoch nur ein Teil der geplanten Zahnbewegungen im Frontzahnsegment vollständig erreicht, dies führte innerhalb des Segments zu einer moderaten Rate gemischter Ergebnisse.

Die Erfolgsquote beträgt 78,8 %, sodass bei 41 Zähnen die geplanten Bewegungen weitestgehend umgesetzt werden konnten. Dagegen zeigten elf Zähne (21,2 %) eine Abweichung zwischen geplanter und erzielter Endposition, wodurch sich ein moderater Korrekturbedarf durch Case Refinements im Frontzahnsegment des Unterkiefers ergibt.

3.2.3 Ergebnisse Unterkiefer 4. Quadrant Seitenzahngebiet

Tabelle 11 Tabellarische Darstellung des Behandlungsergebnisses im 4. Quadranten der Zähne 47-43. Hierbei wurde bewertet, ob der jeweilige Zahn einen Behandlungserfolg oder keinen Behandlungserfolg aufgezeigt hat, sowie die spezifische Kombination der einzelnen Zahnbewegungen und deren Erfolge vorliegen und damit ein Fall als Gesamterfolg zu werten ist oder nicht.

[illegible]

Für die Auswertung des vierten Quadranten (Zähne 47–43) wurden alle Patientenfälle innerhalb der Untersuchung hinsichtlich der geplanten und tatsächlich erreichten Zahnbewegungen erfasst, wobei insgesamt 68 Seitenzähne einbezogen wurden. Für jeden dieser Zähne wurde die klinisch erzielte Zahnbewegung mit der zuvor in der digitalen Behandlungsplanung definierten Simulation der ClinCheck-Software verglichen, um die Umsetzbarkeit der geplanten Bewegungen objektiv zu beurteilen.

Die Untersuchung zeigt auch im vierten Quadranten, dass Kombinationen mit Bewegungen von ein oder zwei Zähnen in den Behandlungen deutlich seltener vorkamen als solche, in denen drei oder mehr Zähne gleichzeitig bewegt wurden. Hierbei ergibt sich ein gemischtes Bild der Ergebnisse mit einer moderaten Rate unvollständiger Umsetzungen oder aus ausbleibendem Therapieerfolg. Während viele Zähne die geplanten Bewegungen vollständig als Therapieerfolg darstellten blieben Abweichungen mit ausbleibendem Therapieerfolg in diesem Quadranten vermehrt bestehen. Besonders auffällig ist der Unterschied zwischen den einzelnen Zähnen. Die distalen Molaren 47 und 46 wurden seltener als Therapieerfolg bewertet als die davon mesial stehenden Zähne, die Prämolaren und der Eckzahn 45, 44 und 43, diese weisen eine etwas höhere Erfolgsrate in der Untersuchung auf. Dieser Befund mit ausbleibendem Therapieerfolg tritt vor allem in Fällen mit mehreren oder allen gleichzeitig therapierten Zähnen auf.

In Fällen mit geringerem Bewegungsumfang, also einzelnen bewegten Zähnen entsprach die Zahl der erfolgreich therapierten Zähne häufig der Gesamtzahl der in die Behandlung einbezogenen Zähne. Bei höherem Bewegungsumfang und vielen parallel bewegten Zähnen wurde jedoch nur ein Teil der geplanten Zahnbewegungen vollständig erreicht. Dies führte innerhalb des vierten Quadranten zu deutlich gemischteren Erfolgsquoten der Behandlung.

Die Erfolgsquote der Seitenzähne im vierten Quadranten beträgt 77,9 % und spiegelt wider, dass sich 53 der therapierten Zähne in Art und Ausmaß im Wesentlichen entsprechend der virtuellen Planung bewegt haben. Bei 15 Zähnen (22,1 %) wurde hingegen eine Abweichung zwischen der tatsächlich erreichten

Position und der simulierten Endposition im ClinCheck festgestellt, was auf eine erhöhte Schwierigkeit der Umsetzbarkeit von Zahnbewegungen im Unterkiefer schließen lässt.

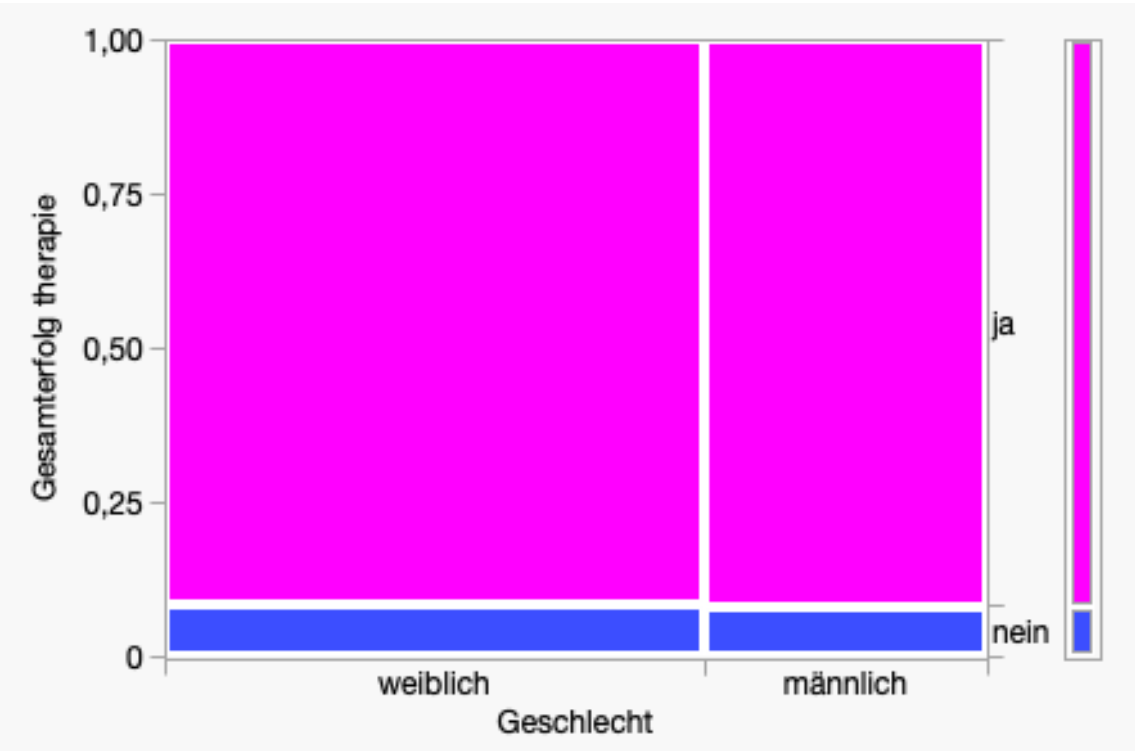


Abbildung 19 Darstellung der gesamten Ergebnisse und der Häufigkeit im Bezug auf den Gesamterfolg einer Therapie zum Geschlecht weiblich/männlich.

Tabelle 12 Darstellung in tabellarischer Form der gesamten Ergebnisse und der Häufigkeit im Bezug des Gesamterfolges einer Therapie zum Geschlecht weiblich/männlich.

Häufigkeiten	nein	ja	Summe
Gesamt %			
Spalte %			
Zeile %			
weiblich	4 5,48 66,67 8,33	44 60,27 65,67 91,67	48 65,75
männlich	2 2,74 33,33 8,00	23 31,51 34,33 92,00	25 34,25
Summe	6 8,22	67 91,78	73

Tabelle 13 Durchführung des Likelihood-Verhältnisses und Pearson.

Test	Chi ²	Wahrsch. > Chi ²
Likelihood-Verhältnis	0,002	0,9607
Pearson	0,002	0,9608

Tabelle 14 Durchführung des Fishers exakter Test.

Fishers exakter Test	Wahrsch. Alternative Hypothese
Links	0,6764 Wahrsch.
Rechts	0,6665 Wahrsch.
2-seitig	1,0000 Wahrsch.

Betrachtet man nun die gesamten Ergebnisse der Untersuchung und bezieht diese Therapieerfolge bzw. ohne Therapieerfolge auf die Behandlungen der Geschlechter zeigt sich kein geschlechterspezifischer Unterschied. Bei der Gesamtzahl der Behandlungen bei weiblichen Patientinnen liegen die Behandlungserfolge Gesamten bei einer Anzahl von 44 (91,7 %) und bei den männlichen Patienten bei 23 (92,0 %). Hiermit zeigt sich geschlechterspezifisch kein signifikanter Unterschied.

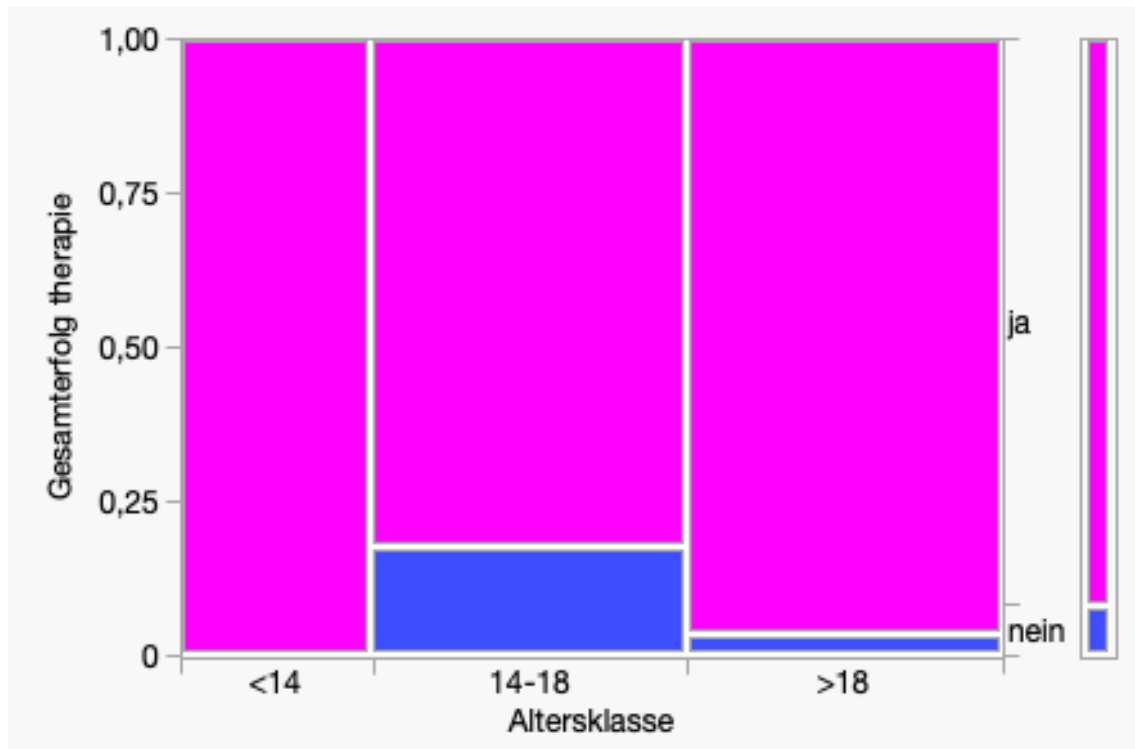


Abbildung 20 Darstellung der gesamten Ergebnisse und der Häufigkeit im Bezug des Gesamterfolges einer Therapie zur Altersklasse bei Patienten und Patientinnen unter 14 Jahren, zwischen 14 und 18 Jahren und über 18 Jahren.

Tabelle 15 Darstellung in tabellarischer Form der gesamten Ergebnisse und der Häufigkeit im Bezug des Gesamterfolges einer Therapie zur Altersklasse bei Patienten und Patientinnen unter 14 Jahren, zwischen 14 und 18 Jahren und über 18 Jahren.

Häufigkeiten	nein	ja	Summe
Gesamt %			
Spalte %			
Zeile %			
<14	0 0,00 0,00 0,00	17 23,29 25,37 100,00	17 23,29
14-18	5 6,85 83,33 17,86	23 31,51 34,33 82,14	28 38,36
>18	1 1,37 16,67 3,57	27 36,99 40,30 96,43	28 38,36
Summe	6 8,22	67 91,78	73

Tabelle 16 Durchführung des Likelihood Verhältnisses und Pearson.

Test	Chi ²	Wahrsch. > Chi ²
Likelihood-Verhältnis	6,573	0,0374*
Pearson	5,772	0,0558

Tabelle 17 Durchführung des Fishers exakter Test.

Kontingenztafel Wahrscheinlichkeit (P)	Zweiseitige Wahrsch. ≤ P
0,0162*	0,1062

Bei der Betrachtung der Untersuchungsergebnisse im Bezug zum Alter der Patienten und unterteilt diese in drei Gruppen und setzt diesen in Bezug auf den Gesamterfolg der Therapie mittels Alignern so erkennt man folgendes Bild. Es zeigt sich, dass in allen Altersgruppen der Anteil erfolgreicher Behandlungen mittels Alignern deutlich überwiegt. Die Altersgruppen sind hierbei unterteilt in unter 14-jährige, 14- bis 18-jährige und über 18-jährige. Hierbei zeigt sich vor allem in der Gruppe der 14- bis 18-jährigen relativ häufiger kein Gesamterfolg im Vergleich zu den Gruppen von unter 14 Jahren und über 18 Jahren. Dieses Ergebnis spiegelt sich auch in weiteren Auswertungen wider. In der inferenzstatistischen Auswertung zeigt sich das Likelihood-Ratio-Chi² liegt mit 5,77 oberhalb der Signifikanzgrenze. Bei der Durchführung des exakten Test nach Fisher spricht dieser für einen signifikanten Likelihood- Ratio-Chi². Dieser Test zeigt eine zweiseitig kumulative $\leq P = 0,1062$. Die Altersgruppe der 14- bis 18-jährigen hat im Vergleich häufiger einen ausbleibenden Erfolg der Behandlung als die jüngeren oder auch älteren beziehungsweise erwachsenen Patienten.

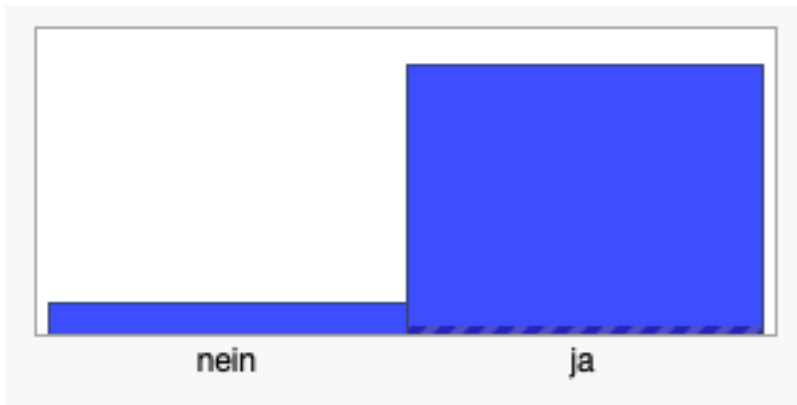


Abbildung 21 Darstellung der Untersuchung aller Zähne im Oberkiefer in Bezug auf den Therapieerfolg (ja) oder keinen Therapieerfolg (nein).

Tabelle 18 Darstellung in tabellarischer Form der Untersuchung aller Zähne im Oberkiefer in Bezug auf den Therapieerfolg (ja) oder keinen Therapieerfolg (nein).

Klasse	Häufigkeiten	Wahrsch.
nein	7	0,09589
ja	66	0,90411
Summe	73	1,00000

Betrachtet man nun die gesamten Ergebnisse der Untersuchung und bezieht diese Therapieerfolge bzw. ohne Therapieerfolge auf die Behandlungen des gesamten Oberkiefers, so zeigt sich hier eine erfolgreiche Behandlung bei 90,4 % der Patientinnen und Patienten.

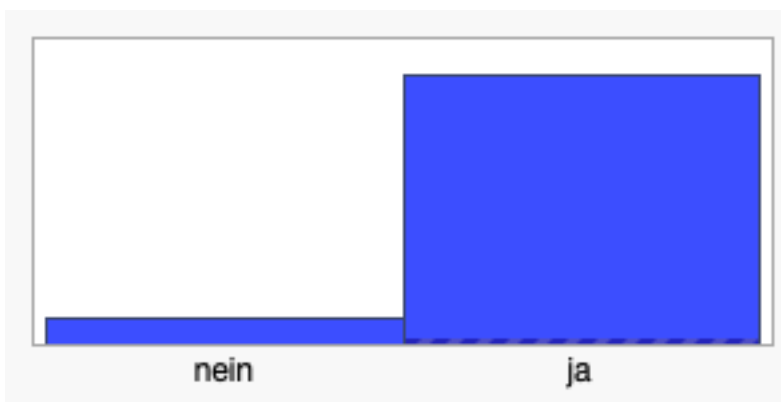


Abbildung 22 Darstellung der Untersuchung aller Zähne im Unterkiefer in Bezug auf den Therapieerfolg (ja) oder keinen Therapieerfolg (nein).

Tabelle 19 Darstellung in tabellarischer Form der Untersuchung aller Zähne im Unterkiefer in Bezug auf den Therapieerfolg (ja) oder keinen Therapieerfolg (nein).

Klasse	Häufigkeiten	Wahrsch.
nein	6	0,08219
ja	67	0,91781
Summe	73	1,00000

Betrachtet man nun die gesamten Ergebnisse der Untersuchung und bezieht diese Therapieerfolge bzw. ohne Therapieerfolge auf die Behandlungen des gesamten Unterkiefers, so zeigt sich hier eine erfolgreiche Behandlung bei 91,8 % der Patientinnen und Patienten.

Vergleicht man nun das Gesamtergebnis des Ober- und Unterkiefers zeigt sich auch hier kein signifikanter Unterschied des Ober- bzw. des Unterkiefers innerhalb der Zahnbewegungen bei Behandlungen mittels Alignern.

4 Diskussion

4.1 Diskussion der Methode

Die in dieser Untersuchung aus der klinischen Routine heraus verwendete Methodik zur Beurteilung der klinischen Umsetzung der Zahnbewegungen mittels Alignern mit der ClinCheck Software ist mit der iTero Fortschrittsbeurteilung eine grundsätzlich geeignete Methodik, die Zahnbewegungen zu erfassen. Die Methode erlaubt eine nachvollziehbare und standardisierte Gegenüberstellung von ClinCheck Planung und der tatsächlichen klinischen Situation beziehungsweise dem Ergebnis. Dies bildet eine nachvollziehbare Grundlage, um die Effektivität der Aligner und der Therapie nicht nur klinisch subjektiv, sondern auch anhand definierter Kriterien objektiv zu beurteilen. Durch die Beurteilung von verschiedenen Regionen oder auch der Kiefer einzeln betrachtet ergibt sich ein Überblick über einzelne Bereiche oder des Gesamterfolgs zwischen Ober- und Unterkiefer oder auch Front- und Seitenzahngebiete.

Bei genauerer Betrachtung und Analyse der Methode zeigen sich allerdings auch Schwachstellen. Die Methode zeigt ein dichotomes Bild und kann dabei die tatsächliche klinische Situation nur begrenzt widerspiegeln und darstellen. Ein Patientenfall kann grundsätzlich auch als erfolgreich gelten, wenn die Mehrzahl oder auch die dominierende Zahnbewegung erfüllt ist, obwohl andere Zähne oder dieselben Zähne relevante Abweichungen aufweisen. Hierbei ist die grundlegende Frage, welche Zahnbewegung die entscheidende Bewegung darstellt. Umgekehrt kann ein Patientenfall mit aus klinischer Sicht mäßigen Zahnbewegungen formal in die Kategorie kein Erfolg der Therapie fallen, wenn einzelne Zähne die Grenzwerte für „Bewegung hat nicht stattgefunden“ überschreiten. Daher ist die Methode grundsätzlich gut geeignet, um einen Überblick über die Behandlung und die Umsetzung der Zahnbewegungen bei der Behandlung mit Alignern zu erhalten, sie erfasst jedoch nur begrenzt die Qualität der spezifischen Einzelzahnbewegungen.

Vor diesem Hintergrund kann es sinnvoll sein, in weiteren Untersuchungen den Fokus stärker auf die einzelnen Zahnbewegung einzelner Zähne zu legen. Denn in der vorliegenden Untersuchung zeigt sich bereits beim Betrachten der Segmente, dass sie auch hier bereits Unterschiede in diesen aufzeigen. Bestimmte Zähne wie die Prämolaren und Eckzähne zeigen oftmals eine sehr gute Umsetzung der geplanten Zahnbewegung, hingegen bleiben die posterioren Molaren häufig hinter der Simulation zurück und erfüllen diese nur teilweise. Bei einer detaillierten Analyse auf Ebene von Einzelzahnbewegungen würden demgegenüber diese ermöglichen, systematische Muster zu identifizieren, etwa in welchen Regionen beziehungsweise an welchem Zahn sich welche Zahnbewegung besonders zuverlässig umgesetzt oder wo hingegen Limitationen der Aligner auftreten.

Ergänzend ist auch die Limitationen des Intraoralscanners und der Fortschrittsbeurteilung zu betrachten (Li et al., 2023). Laut Literatur findet man auch hier heutzutage immer noch Schwachstellen und Abweichungen in der Scangenaugigkeit (Christopoulou et al., 2022) (Buhl et al., 2025) und der Überlagerung mit der ClinCheck Software, sowie ergänzende unterschiedliche Scanprotokolle (Flugge et al., 2013) (Ender & Mehl, 2013) in Abhängigkeit des scannenden beziehungsweise der vorliegenden Situation und Herausforderungen. Daher zeigt sich auch hier, dass das Tool der Fortschrittsbeurteilung des iTero Intraoralscanners noch Fehler aufzeigt (Li et al., 2022), aber eine gute Unterstützung im klinischen Alltag darstellen kann, aber die Situation durch einen erfahrenen Kieferorthopäden mitbeurteilt und abgeschätzt werden sollte. Die Überprüfung der Genauigkeit der Fortschrittsbeurteilung sollte Bestand weiterer Untersuchung sein.

Ein weiterer zentraler Aspekt betrifft das Ausmaß der geplanten Zahnbewegung. In der aktuellen Untersuchung werden alle Zahnbewegungen, unabhängig ob Bewegung von 0,5 mm oder 5 mm beziehungsweise 5° oder 50° stattgefunden haben gleichermaßen bewertet und fließt nicht explizit in die Auswertung als Gewichtung mit ein. Bereits in der Literatur zeigt sich, dass mit zunehmender Größe der Zahnbewegung die biomechanischen Anforderungen steigen und Limitationen schneller erreicht werden können. In der Methodik wäre es für

nachfolgende Untersuchungen sinnvoll das Bewegungsausmaß zu erfassen und in Kategorien in die Bewertung mit einfließen zu lassen. Innerhalb dieser Kategorien könnten diese in Erfolgsraten eingeteilt werden und berechnet werden. Ergänzend zum Ausmaß der geplanten Zahnbewegungen sollte auch die Bewegungsart ergänzt werden. In der vorliegenden Untersuchung fließt jede Zahnbewegung unabhängig der Komplexität gleichermaßen in die Statistik mit ein. Damit wird hier vorliegend eine geringfügige Angulationskorrektur gleichermaßen eingestuft wie große Translations- sowie die grundsätzlich schwierigeren Torquebewegungen. Eine Weiterentwicklung der Methode könnte ergänzend ein Kriterium hinzugefügt werden und die biomechanische Komplexität zu klassifizieren und entweder einzeln zu betrachten oder mit einem Gewichtungsfaktor zu versehen. Damit würde dies eine Einordnung ermöglichen um Schwellenwerte zu definieren, ab denen bestimmte Bewegungen mit Alignern zuverlässiger vorhersagbar sind.

Nicht zuletzt ist bei der Untersuchung zu beachten, dass die Beurteilung der Umsetzbarkeit der Zahnbewegungen mittels Alignern immer im Zusammenhang der initialen Planung im ClinCheck erfolgen muss. Diese ClinCheck Simulation bildet ein idealisiertes Ziel einer Behandlungsergebnisses, das von der Erfahrung des Kieferorthopäden, den Attachments, Auxiliaries, den Zahnbewegungen und der gewünschten Sequenzierung der Zahnbewegungen abhängt. Unterschiede in der Planung des ClinChecks, ambitionierte Behandlungen oder konservative Zahnbewegungen oder den Erfahrungen des Kieferorthopäden können somit die Erfolgsrate beeinflussen. Eine Standardisierung der Alignerschritte, Attachments, definierte maximale Bewegungsumfänge könnten eine bessere Vergleichbarkeit der Fälle schaffen und somit die Interpretation der Umsetzbarkeit weiter objektivieren.

Zusammenfassend lässt sich zur Methode dieser Untersuchung festhalten, dass die in der vorliegenden Arbeit gewählten Methoden eine gut nachvollziehbare Grundlage zur Beurteilung der Zahnbewegungen mittels Alignern bietet und eine geeignete Analyse darstellt, Unterschiede der einzelnen Segmente der Kiefer herauszuarbeiten. Um jedoch die expliziten biomechanischen Grenzen der Aligner im Detail abzubilden, erscheint es sinnvoll in weiteren Untersuchungen

die Methode weiterzuentwickeln und zu konkretisieren. Dabei sind verschiedene weitere Aspekte zu kategorisieren. Die Bewertung eines Behandlungserfolges sollte auf einzelne Zähne betrachtet werden und das Ausmaß sowie die Art der Zahnbewegungen sollten unterteilt oder gewichtet werden, um die Aussagekraft der Arbeit weiter zu erhöhen. Eine solche weiterentwickelte Methodik würde es ermöglichen, nicht nur zu zeigen, wie wirksam Aligner grundsätzlich sein können, sondern präzise herauszuarbeiten unter welchen Bedingungen sie ihre maximale Effizienz entfalten und dahingegen wo ihre biomechanischen Grenzen liegen.

4.2 Diskussion der Ergebnisse

Die kieferorthopädische Behandlung hat sich im Bereich der Alignertherapie von einer primär ästhetisch motivierten Behandlungsalternative zu der Multibracket Apparatur zu einer teilweise vollständig eigenständigen, wissenschaftlich und durch Studien gut untersuchten Therapieoption entwickelt. In Abhängigkeit einer korrekten kieferorthopädischen Diagnostik und der daraus resultierenden korrekten Indikationsstellung können Aligner heute bei einigen Patienten als eines der Behandlungsgeräte der Wahl gelten. Dies wird durch zahlreiche Studien mittlerweile gestützt so wie man auch in den einzelnen Tabellen der einzelnen Seitenzahnsegmente egal ob Ober- oder Unterkiefer in dieser Arbeit auch zeigen, dass Aligner bei leichten, moderaten oder teilweise beginnenden komplexen Malokklusionen bei korrekter Planung, insbesondere im Frontzahn-, Eckzahn- und Prämolarengebiet, klinisch vergleichbare Ergebnisse wie die konventionell festsitzende Multibracket Apparatur erreichen können (Ali & Miethke, 2012). Diese Ergebnisse können wie hier einsehbar durch eine 50 % Sequenzierung im Prämolaren- und Eckzahngebiet gut erreicht werden. Entscheidend bei der Behandlung ist jedoch, dass diese Ergebnisse an gewisse Rahmenbedingungen gebunden sind. Die Komplexität eines Behandlungsfalles beziehungsweise der zu erreichenden Zahnbewegung muss auf biomechanische Grenzen beurteilt werden (Li et al., 2024).

Ein wesentlicher und teilweise auch ausschlaggebender Vorteil der Alignertherapie liegt in der Möglichkeit einer optimalen Mundhygiene und der daraus resultierenden parodontalen Stabilität und Gesundheit (Rossini et al., 2015). Durch die Möglichkeit der Herausnahme der Aligner und fehlende Schmutznischen durch unter sich gehende Bereiche entsprechend der Multibracket Apparatur bleiben weitestgehend alle Zahnflächen für die häusliche und professionelle Reinigung zugänglich und das Risiko für White Spot Läsionen kann verringert werden (Hussain et al., 2025). Anders als bei der Multibracket Apparatur bilden sich hier kaum Retentionsnischen für Plaque und Biofilm, da auch bei Ergänzung von Attachments diese deutlich einfacher händelbar in der häuslichen Zahnpflege sind (Giannini et al., 2025; Oikonomou et al., 2021). Klinischen Studien und systematische Reviews (Rusu et al., 2026) konnten auch aufzeigen, dass Patientinnen und Patienten unter einer Therapie mittels Alignern im Mittel niedrigere Plaque- und Gingivitisindizes, verminderte Sulkussondierungstiefen und auch stabilere parodontale Situationen aufweisen als die konventionell festsitzend behandelten Patientinnen und Patienten (Dipalma et al., 2025) (Sen et al., 2025). Besonders bei Patientinnen und Patienten mit einer bereits bekannten oder bestehenden Parodontitis oder einem generell reduziertem parodontalen Halteapparat wird die Alignertherapie zunehmend als bevorzugtes Behandlungskonzept in Betracht gezogen, da sie die biomechanische Belastung des Parodonts minimieren können und gleichzeitig durch geringere Kräfte oder stärker segmentierte Bewegungen diese besser gesteuert und übertragen werden (Simon et al., 2014). Jedoch muss bei Patientinnen und Patienten mit einem bereits reduzierten Parodontalstatus, dünnen bukkalen Knochenlamellen oder ausgeprägtem Knochenrückgang die Planung genaustens risikoadaptiert geplant werden. Bei diesen Situationen ergibt sich eine oftmals veränderte Biomechanik durch ein verändertes Kraft-Moment-Verhältnis. Die Folgen bei einer ungenauen Planung im ClinCheck können unkontrollierte Zahnbewegungen und schlimmstenfalls der Zahnverlust das Resultat darstellen. Der Vorteil der Aligner ist allerdings, dass die Bewegungen und Kräfte der Zahnbewegungen vorab sehr fein dosiert und gesteuert werden können (Simon et al., 2014) und bei Bedarf frühzeitig

umgeplant werden können, daher werden engmaschige Kontrollen durch den Kieferorthopäde empfohlen. Insgesamt zeigt sich daher in der Literatur, dass bei suffizienter Planung und auch Behandlung mit Alignern sich das Ganze positiv auf Mikrobiom auswirken kann (Rusu et al., 2026). Dies sollte Bestand weiterer Untersuchungen sein.

Bezugnehmend auf die Biomechanik wird aber auch deutlich, dass der Behandlungserfolg maßgeblich von der richtigen Indikationsstellung, sowie der korrekten Planung abhängt. Biomechanische Analysen, Studien und auch diese Arbeit beziehungsweise die Ergebnisse haben gezeigt, dass Aligner bestimmte Zahnbewegungen etwas verschlechtert umsetzen oder diese Bewegungen unkontrollierbarer sind als andere. Hierzu gehören vor allem großwinkelige Rotationen (Benedetti et al., 2025), umfangreiche translatorische Bewegungen, bedingt Intrusionen und ausgeprägte Korrekturen von Torque (Papageorgiou et al., 2024). Diese stellen für Alignersysteme grundsätzlich Grenzen dar, denn diese Bewegungen fordern kontrollierte Wurzelbewegungen im Alveolarknochen und damit eine hohe Anforderung an das Kraft-Moment-Verhältnis und die dazugehörige Verankerung stellen. Dies zeigen auch die vorliegenden Daten, bei denen im Seitenzahngebiet zu den posterioren Molaren bei einer sehr großen Wurzeloberfläche eine abnehmende Erfolgsquote sichtbar ist und auch dies die Komplexität dieser Zahnbewegungen aufgezeigt wird (Li et al., 2024). Auch sind bei Aligner Behandlungen große Wurzelbewegungen röntgenologisch in regelmäßigen Abständen zu kontrollieren, da auch hier die Möglichkeit von Wurzelresorptionen an sowohl gesunden als auch Wurzelkanal behandelten Zähnen besteht (Katanaki et al., 2025). Die Spannweite der Erfolgsquoten der vorliegenden Arbeit von 74,6 % bis zu 91,3 % zeigt, dass die Umsetzbarkeit zwar insgesamt gut ist, jedoch ergänzend auch deutliche Schwankungen des jeweiligen Ober- oder auch Unterkiefers unterliegt. Der Oberkiefer zeigt Erfolgsquoten von 81,0 % – 91,3 % und der Unterkiefer etwas verschlechterte Ergebnisse 74,6 % – 78,8 %, welche zwar noch nicht statistisch signifikant sind, aber Abweichungen aufzeigen. Für die klinische Planung bedeutet dies, dass bei Bewegungen in den Regionen mit geringerer Erfolgsquote, also die posterioren Molaren oder auch vermehrt der Unterkiefer, entweder noch weiter verstärkte

Sequenzierungen von 70-100 %, kleine Zahnbewegungen pro Alignerstufe, zusätzliche, größere oder alternative Attachments oder ergänzende Maßnahmen eingeplant oder später im Verlauf der Behandlung ergänzt werden sollten, um die tatsächliche Umsetzung der Zahnbewegungen an die Oberkieferwerte anzunähern und die Planungen vorhersagbarer und effizienter zu gestalten. Dazu gehören auch Auxiliaries wie Gummizüge die Inter- oder Intramaxillär verankert werden. Diese können Intermaxillär zur Verankerung genutzt werden, um moderate Mesialisations- oder Distalisationsbewegungen zu unterstützen und dabei als verankernde Kraft zu wirken. Zusätzlich können diese Intramaxillär verwendet werden, um beispielsweise eine moderate Extrusionen zu beschleunigen oder bei einer Derotationsbewegung zu unterstützen. Bei sehr großen Bewegungen ist es sinnvoll zusätzliche Hilfsmittel wie eine intraossäre Verankerung mittels MiniPins in die Planung zu integrieren, um die Umsetzung bei schwierigen und großen Bewegungen zu unterstützen und ein frühzeitiges Case Refinement hinauszuzögern.



Abbildung 23 Beispielhafte Behandlung des Oberkiefers mit Alignern und ergänzendem Auxiliare – Mini-Implantate und ergänzender Mesialslider.

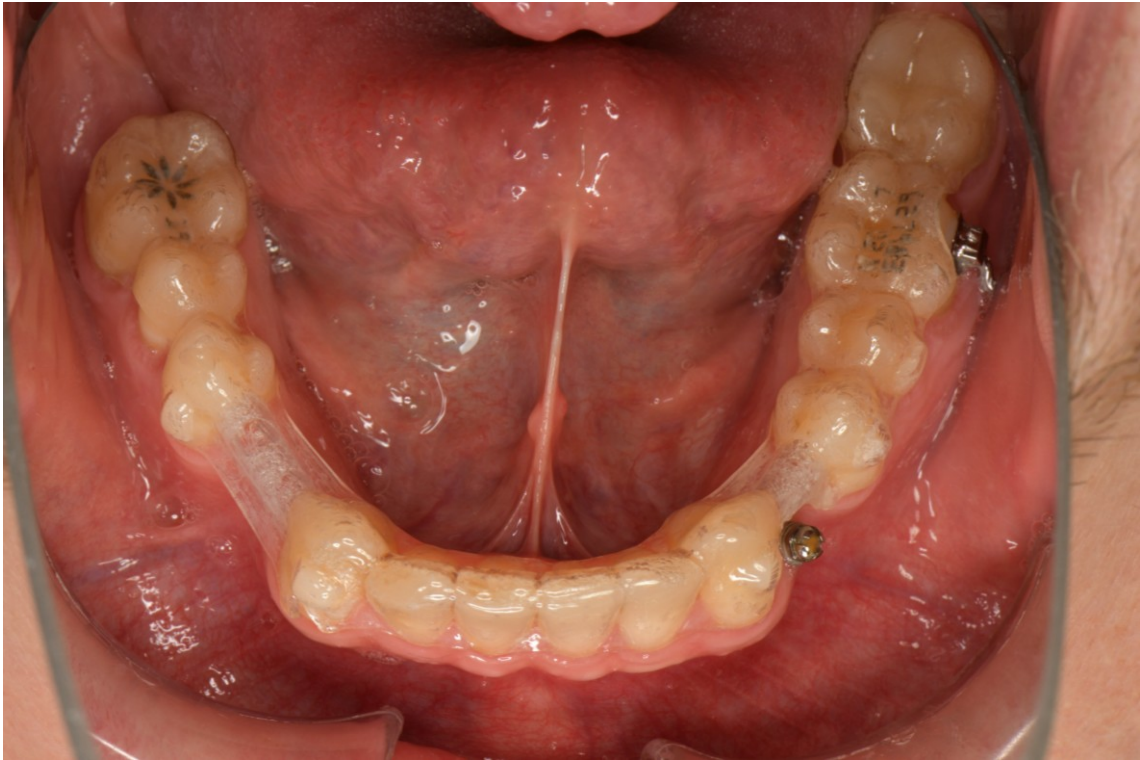


Abbildung 24 Beispielhafte Behandlung des Unterkiefers mit Alignern und ergänzendem Auxiliare - Mini Implantat und ergänzendem Powerhook, sowie ergänzendem Gummizug (im Bild nicht dargestellt).



Abbildung 25 Beispielhafte Behandlung des Oberkiefers mit Alignern und ergänzendem Auxiliare - Mini Implantate und ergänzende Mausefalle.



Abbildung 26 Beispielhafte Behandlung des Oberkiefers mit Alignern und ergänzendem Auxiliare – Powerhooks und Gummizüge.



Abbildung 27 Beispielhafte Behandlung des Unterkiefers mit Alignern und ergänzendem Auxiliare – Powerhooks und Gummizüge.

Aus dieser Betrachtung der Ergebnisse lässt sich daher herleiten, dass der behandelnde Kieferorthopäde die biomechanischen Grenzen der Aligner bereits vorab kennen und in die Behandlung mit einbeziehen muss, sowie zu Beginn oder im Verlauf der Behandlung jederzeit reagieren muss. Dies betrifft sowohl die Auswahl des richtigen Behandlungsgerätes, als auch in Verbindung mit geeigneten Hilfsmitteln und die genaue Planung bereits im ClinCheck. Denn die ClinCheck Software ist nicht darauf ausgelegt, dem Kieferorthopäden Grenzen einer Behandlung aufzuzeigen. Hierzu gehört ausreichendes Vorwissen und Erfahrung, denn es besteht ansonsten das Risiko, dass die Zahnbewegungen sich unvollständig oder gar nicht umsetzen, die Notwendigkeit von vielen Case Refinements auftritt, die Behandlungsdauer und auch die Behandlungskosten sich drastisch erhöhen und gegeben falls die Compliance oder das Vertrauen des Patienten nachlässt, wenn dieser wenig klinischen Fortschritt wahrnimmt.

Bezugnehmend auf die unterschiedlichen Ergebnisse zur Umsetzbarkeit von Zahnbewegungen im Ober- und Unterkiefer sind die strukturellen Unterschiede der Maxilla und Mandibula entscheidend (d'Oliveira et al., 2025; Park et al., 2008). Zunächst unterscheiden sich die Maxilla und die Mandibula grundlegend in Knochendichte und Verhältnis von Kortikalis und Spongiosa. Grundsätzlich weist die Maxilla insgesamt eine im Verhältnis dünne kortikale Knochenlamelle auf, sowie einen hohen Anteil trabekulärer Spongiosa. Im posterioren Anteil der Maxilla insbesondere im Bereich der posterioren Molaren und Tuberositas ist der Alveolarknochen grobtrabekulär organisiert und die Kortikalis nur minimal vorhanden. Dem entgegengesetzt ist die Mandibula durch eine deutlich ausgeprägtere und auch dichtere Kortikalis charakterisiert, vor allem im Bereich der Prämolaren und Molaren (Park et al., 2014). Dabei findet sich hier ein höherer Anteil an kompaktem Knochen insbesondere bukkal und lingual der posterioren Mandibula. Innerhalb beider Kiefer zeigt sich jedoch ein gradientenartiger Aufbau des Knochens, denn von anterior nach posterior, sowie von der alveolären zur basalen Region nehmen Kortikalisdicke und Knochendichte jeweils zu. Damit stellt die posteriore basale Mandibula den härtesten Anteil des stomatognathen Systems dar (Kau & Cruz Wilma, 2024) und entscheidend für die Zahnbewegung und die etwas verminderte Erfolgsquote von 74,6 % bis 78,8 %.

Genau diese strukturellen Unterschiede haben also direkte Konsequenzen für die Umsetzbarkeit der orthodontischen Zahnbewegungen (Porto et al., 2020). In überwiegend spongiös dominierten Arealen, wie den meisten Anteilen der Maxilla verteilt sich somit die eingeleitete Spannung durch die orthodontischen Apparaturen stärker auf die trabekulären Strukturen. Die erforderlichen Remodellierungsprozesse, also die auf der Druckseite durch Osteoklasten aktivierte Resorption, sowie die auf der Zugseite durch Osteoblasten aktivierte Apposition, zur Umsetzung der Zahnbewegung laufen in der Maxilla daher etwas schneller ab. Klinisch zeigt sich dieses in den erfolgreicherer Ergebnissen mit dem Oberkiefer und damit einer verbesserten Umsetzung der Zahnbewegungen von 81,0 % bis zu 91,3 %. Das bedeutet für den klinischen Alltag, dass Distalisationen, Lückenöffnung oder Lückenschluss und moderate vertikale Zahnbewegungen mit vergleichbar geringeren Kräften und in etwas verkürzten Alignersritten stattfinden können als im Vergleich in der Mandibula. Dem entgegengesetzt ist die Kehrseite dieser vereinfachten Zahnbewegung allerdings auch die geringere Verankerung. Bei gleichen Kraftsystemen liefern die maxillären Molaren weniger Widerstand als mandibuläre Molaren, bedeutet dass bei unzureichender Verankerung die schlechter verankerten maxillären Molaren selbst in Bewegung geraten, welches zu unerwünschte Nebenwirkung führen kann. Zudem besteht in der spongiösen Maxilla ein erhöhtes Risiko für, bei zu stark nach bukkal gerichteten Kräften, das Entstehen von kortikale Dehiszenzen, Fenestration des Knochens und parodontale Kompromittierungen.

In der Mandibula verhält es sich gewissermaßen umgekehrt. Die dichtere und auch dickere Kortikalis sorgt für die Aufnahme der aufgebrachten orthodontischen Kräfte in die kompakte Knochenhülle. Daher konzentriert sich die Spannung und die Mandibula bietet eine deutlich höhere Resistenz gegen Bewegungen, daher gelten posteriore mandibuläre Molaren als stark verankert. Diese lassen sich unter entsprechenden Kraftverhältnissen weit weniger im Knochen bewegen als ihre Antagonisten. Klinisch resultiert daraus eine höhere Anforderung an saggitale und vertikale Korrekturen vor allem bei der Distalisation oder Mesialisation und zeigt sich auch in den vorliegenden Ergebnissen von 74,6 % bis zu 78,8 %. Hierbei sind eine sorgfältige biomechanische Planung

erforderlich, da sich das Risiko für kortikale Belastungen erhöht und es zu ungünstigen Kraft-Moment-Verhältnissen kommen kann, welche zu Kraftspitzen und damit zu Wurzelresorptionen, Mikrotraumata oder zur Ausbildung von Dehiszenzen führen kann.

Bei der Betrachtung des Frontzahngebietes der Maxilla und Mandibula zeigen sich auch hier strukturelle Unterschiede (Hassan & Al-Radha, 2023). Im anterioren Segment des Oberkiefers zeigt sich eine sehr dünne vestibuläre Kortikalis. Im Unterkiefer zeigt sich vestibulär auch eine eher verdünnte Kortikalis, während jedoch auf der lingualen Seite die Kortikalis deutlich verstärkter sein kann (Holmes et al., 2015). Dieser strukturelle Aufbau des Knochens bedingt, dass die vestibuläre Proklination der Frontzähne vor allem bei der Engstandsauflösung besonders kritisch zu betrachten ist und viele Risiken mit sich bringt. Bereits kleinere Zahnbewegungen können dazu führen, dass sich die Zahnwurzeln der Inzisiven die bukkale Knochenlamelle perforieren können. Daher kann es empfehlenswert sein, dass bei geeigneter rechtfertigender Indikation eine dreidimensionale Volumentomographie ein sinnvolles ergänzendes Mittel zur besseren und genaueren Therapiefindung sein kann.

Diese umschriebenen Unterschiede der Maxilla und Mandibula sind bereits für die Erstellung der Planung im ClinCheck zu beachten. Denn im posterioren Unterkiefer, also Bereichen mit hoher Knochendichte und dicker Kortikalis, sind bereits zu Beginn Auxiliaries und Verankerungen ergänzend zu planen. Die in dieser Untersuchung durchgeführten Behandlungen waren bei der entsprechenden Sequenzierung von 50 % erfolgreich. Bei komplexeren Behandlungen sollte laut Literatur Änderungen in der Planung und der Durchführung in Betracht gezogen werden, dazu gehören wie oben bereits umschrieben MiniPins, Teilbögen, ergänzende Apparaturen, Knöpfchen, Inter- oder Intramaxilläre Gummizüge, sowie die Anpassung der Sequenzierung oder verkleinerte Alignerschritte. Dies sollte Bestand weiterer Untersuchungen sein.

In den Ergebnissen zeigt sich auch, dass Patientinnen und Patienten unter 14 Jahren, sowie über 18 Jahren eine sehr hohe Gesamterfolgsrate erzielen, wo hingegen die Gruppe der 14- bis 18-jährigen einen etwas geringeren Anteil an

Gesamterfolgsrate erzielen. Bei den Patientinnen und Patienten unter 14 Jahren spiegelt sich in den Ergebnissen das hohe Wachstumspotenzial und die verringerte Knochendichte, welche eine gute Zahnbewegung begünstigen und andererseits von der in der Altersgruppe typischerweise starken elterlichen Kontrolle. In bereits existierenden Studien zu Alignern im jugendlichen Alter wird umschrieben, dass jüngere Patientinnen und Patienten durch Eltern positiv beeinflusste Tragecompliance, sowie Mundhygiene aufweisen (Sauer et al., 2023). Ergänzend gibt es ähnliche Arbeiten bei der Multibracket-Apparatur, die aufgrund der aktiven Wachstumsphase schneller auf orthodontische Kräfte reagieren und so effizientere Zahnbewegungen ermöglichen (Borda et al., 2020). In der Gruppe der 14- bis 18-jährigen finden sich allerdings Studien mit einer vergleichsweise schwierigeren Compliance (Barbosa et al., 2018). Dabei zeigen die Untersuchungen, dass insbesondere Teenager häufiger Instruktionen durch den Kieferorthopäden im Bezug zu Tragezeiten, Mundhygiene oder Einsatz von Gummizügen mäßig umsetzen. Es wird beschrieben, dass Freizeitaktivitäten, Schulstress und Urteil anderer dazu führen, dass die Aligner vermehrt herausgenommen werden. Diese verminderten Tragezeiten wirken sich auf die Krafteinwirkung und das Behandlungsergebnis aus. Daher lässt sich erklären, warum trotz strukturell guten biologischen Voraussetzungen also einem optimalen Wachstumspotenzial und einer mäßigen Knochendichte die Erfolgsquote im Vergleich zu den anderen Altersgruppen reduziert ist. Patientinnen und Patienten im Erwachsenenalter zeigen laut Studien eine bessere Compliance und eine durchschnittlich höhere Tragezeit (Pattanaik et al., 2024). Ergänzend ist bei Erwachsenen oftmals ein aktiver Behandlungswunsch, sowie eine Verbesserung der Zahnfehlstellung gewünscht. Hinzukommt das die Behandlung oftmals selbst finanziert ist und daher die Tragezeit oft besser eingehalten wird und daher Behandlungsergebnisse besser erzielt werden können. Auch wenn der Knochenstoffwechsel im Erwachsenenalter verringert ist, können insgesamt aber sehr gute Behandlungsergebnisse erzielt werden.

4.3 Schlussfolgerung und klinische Konsequenzen

Als klinische Konsequenz lässt sich aus der vorliegenden Arbeit und den Ergebnissen für den klinischen Alltag diverse relevante Punkte ableiten.

Aligner sind bei der korrekten Diagnostik, Planung und korrekten Indikationsstellung ein sehr gut geeignetes Behandlungsgerät, insbesondere bei einfachen oder moderaten Fehlstellungen, begrenzten Bewegungsumfängen, hoher Hygienefähigkeit, parodontalen Schwierigkeiten und ästhetischen Ansprüchen.

Eine weiterhin fortführbare optimale Mundhygiene und stabilere parodontale Verhältnisse und die Mundgesundheit zählen zu den wesentlichen Stärken der Alignersysteme und lassen sich durch Studien belegen (Rossini et al., 2015; Sen et al., 2025).

Die Umsetzbarkeit der Zahnbewegungen mittels Alignern sind klinisch relevant erfolgsversprechend, solange die im ClinCheck geplanten Zahnbewegungen im Bereich moderater und nicht zu komplexen Zahnfehlstellungen liegen. Die Erfolgsquoten dieser Arbeit belegen dies mit teilweise über 90 % Behandlungserfolg. Hierbei ist ergänzend auf die spezifischen Anforderungen der einzelnen Kiefer oder Zahngruppen zu achten. Hierbei sollte ein besonderes Augenmerk auf die Umsetzung der Zahnbewegungen im Unterkiefer, sowie des Oberkieferfrontzahnsegmentes gelegt werden und frühzeitig gesonderte Maßnahmen wie eine stärkere Sequenzierung geplant oder Auxiliaries ergänzt werden.

Um diesen Behandlungserfolg klinisch umsetzen zu können, muss der behandelnde Kieferorthopäde die biomechanischen Grenzen kennen und berücksichtigen. Komplexe Zahnbewegungen bei großen Extraktionssituationen, große Rotationen, ausgedehnte Translationsstrecken und umfassende Intrusions- oder Torque-Korrekturen sind mit Alignern allein nur eingeschränkt vorhersehbar und umsetzbar.

Die Sequenzierung in der ClinCheck Planung muss an die Fallkomplexität mit mindestens 50 % Sequenzierung und an die Compliance des Patienten auch in Bezug zum Alter angepasst werden. Kleine Alignerschritte und zeitliche Entkopplung komplexer Bewegungen sind entscheidend für den Erfolg einer Behandlung.

Ergänzend gehören Auxiliaries zum klinischen Alltag und sind bei komplexen Fällen immer Teil der Behandlung. Hierzu gehören MiniPins, Mesial-/ Distalslider, Teilbögen, Intrusionsmechaniken (Mausefalle) und Gummizüge in jeder Variation und Verankerung. Diese können die Alignermechanik gezielt ergänzen und deren Grenzen erweitern.

In der Gesamtheit kann der Aligner nicht als Ersatz, sondern als Erweiterung des kieferorthopädischen Spektrums der Apparaturen bewertet werden. Seine volle Stärke entfaltet der Aligner, wenn er innerhalb seiner biomechanischen Möglichkeiten und Grenzen korrekt eingesetzt, durch geeignete Auxiliaries unterstützt und in eine auf den individuellen Fall zugeschnittene, evidenzbasierte Planung eingebettet wird.

5 Zusammenfassung

Die retrospektiv erhobene Untersuchung von Patientendaten aus der klinischen Routine heraus hatte zum Ziel, die Beurteilung von dreidimensional geplanten Zahnbewegungen im klinischen Verlauf nach etwa sechs bis neun Monaten mittels Fortschrittsbeurteilung im Intraoralscanner iTero zu beurteilen, dentale Veränderungen zu analysieren und dessen Vorhersehbarkeit zu beurteilen und vorhersagbarer zu planen. In der Fachliteratur gelten heute noch komplexe Zahnbewegungen mittels Alignern als schwer umsetzbar beziehungsweise hier die Multibracket-Apparatur weiterhin als Gold Standard.

In die Studie wurden Patienten einbezogen, die mittels Alignern in der Poliklinik für Kieferorthopädie am Universitätsklinikum Tübingen behandelt wurden und bei denen aus der klinischen Routine heraus regelmäßige Intraoralscans mittels iTero Intraoralscanner angefertigt wurden.

Bei den vorliegenden Patienten wurde im Rahmen der klinischen Routine zu Beginn der Behandlung ein dreidimensionaler Scan angefertigt. Anschließend erfolgte die Behandlungsplanung mittels Planungssoftware dem so genannten ClinCheck (Invisalign, Align Technology). Hierbei wurde die Veränderung und Planung in der Zahnstellung dargestellt. Nach einer Tragedauer von ca. sechs bis neun Monaten wurde mittels iTero Intraoralscanner eine Fortschrittsbeurteilung angefertigt. Bei dieser Beurteilung wird die klinische Situation mit der Simulation aus dem ClinCheck abgeglichen und Abweichungen beziehungsweise Übereinstimmungen mittels KI ausgewertet und dargestellt, sowie im Anschluss deskriptiv analysiert.

In der Untersuchung konnten 73 Patienten mit jeweils zwei Intraoralscans mit dem Abstand von sechs bis neun Monaten eingeschlossen werden. Die Probanden waren zwischen 8,6 und 55,8 Jahren und im Median 16,8 Jahren. Im Zuge dieser Erhebung konnten 366 therapierte Zähne mit einbezogen und analysiert werden. Dabei wurden diese in unterschiedliche Regionen (Seitenzahnggebiet OK rechts, OK Front, Seitenzahnggebiet OK links, Seitenzahnggebiet UK links, UK Front, Seitenzahnggebiet UK rechts) aufgeteilt. Die

Bewegungsanalyse zeigte klinisch ausreichend Veränderungen. Dabei lagen die Erfolgsquoten je nach Regio zwischen 74,6 % und 91,3 %, mit im Vergleich etwas schlechteren Ergebnissen des Unterkiefers im Vergleich zum Oberkiefer. Die Zahnbewegungen zeigten sich bei gleichzeitigen Bewegungen von ein bis zwei Zähnen also lokalisierten Einzelzahnbewegungen erfolgreicher als bei Zahnbewegungen mit vielen gleichzeitig bewegten beziehungsweise Gruppenbewegungen.

Aufgrund der unterschiedlichen Beschaffenheit der Knochenstrukturen im Ober- und Unterkiefer, lassen sich die unterschiedlichen Ergebnisse aus der deskriptiven Analyse begründen. Im Oberkiefer liegt die Erfolgsquote etwas höher. Hier liegt viel spongiöser Knochen aus feinen Trabekeln vor, in dem kieferorthopädische Bewegungen leichter umsetzbar sind. Im Unterkiefer hingegen liegt deutlich mehr Kompakta, mit hoher Festigkeit vor. Dieses macht die Zahnbewegungen im Unterkiefer etwas schwieriger.

Es zeigen sich in der Untersuchung eindeutige Limitationen der Aligner bei komplexen Zahnbewegungen. Gerade bei Behandlungen mit Alignern bestehen grundsätzlich Grenzen in der Biomechanik und für den klinischen Alltag ist es wichtig diese Grenzen zu kennen und zu beachten, sobald der Aligner das gewählte Behandlungsgerät darstellt.

6 Literaturverzeichnis

- Abel, J., Ranjitha, G., Lingesh Kumar, N., Balikai, M. F., Singh, A., & Jayavarma, A. (2025). In vitro Analysis of Tooth Movement Using Clear Aligners versus Traditional Brackets. *J Pharm Bioallied Sci*, 17(Suppl 1), S507–S509. https://doi.org/10.4103/jpbs.jpbs_464_25
- 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. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 152(1), 17–32. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2017.03.019>
- Ali, S. A., & Miethke, H. R. (2012). Invisalign, an innovative invisible orthodontic appliance to correct malocclusions: advantages and limitations. *Dent Update*, 39(4), 254–256, 258–260. <https://doi.org/10.12968/denu.2012.39.4.254>
- Align Technology, A. (2025). *iTero Intraoral Scanner*. <https://itero.com/en-eu/our-solutions/itero-lumina>
- Aljabaa, A., McDonald, F., & Newton, J. T. (2015). A systematic review of randomized controlled trials of interventions to improve adherence among orthodontic patients aged 12 to 18. *Angle Orthod*, 85(2), 305–313. <https://doi.org/10.2319/031214-184.1>
- 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
- 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)
- Asiry, M. A. (2018). Biological aspects of orthodontic tooth movement: A review of literature. *Saudi J Biol Sci*, 25(6), 1027–1032. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2018.03.008>
- Barbosa, I. V., Ladewig, V. M., Almeida-Pedrin, R. R., Cardoso, M. A., Santiago Junior, J. F., & Conti, A. (2018). The association between patient's compliance and age with the bonding failure of orthodontic brackets: a cross-sectional study. *Prog Orthod*, 19(1), 11. <https://doi.org/10.1186/s40510-018-0209-1>
- Baron, P. (2014). [Invisible and almost invisible orthodontic appliances]. *Orthod Fr*, 85(1), 59–91. <https://doi.org/10.1051/orthodfr/2014004> (Original work published Les appareils orthodontiques invisibles et presque invisibles.)
- Benedetti, G., Sicca, N., Lopponi, G., Dettori, C., Verdecchia, A., & Spinass, E. (2025). Evaluating the Clinical Success of Clear Aligners for Rotational Tooth Movements in Adult Patients: A Systematic Review. *Dent J (Basel)*, 13(10). <https://doi.org/10.3390/dj13100440>
- Borda, A. F., Garfinkle, J. S., Covell, D. A., Wang, M., Doyle, L., & Sedgley, C. M. (2020). Outcome assessment of orthodontic clear aligner vs fixed appliance treatment in a teenage population with mild malocclusions. *Angle Orthod*, 90(4), 485–490. <https://doi.org/10.2319/122919-844.1>
- Boxum, S. C. (2025). [History. The development of fixed appliances in orthodontics]. *Ned Tijdschr Tandheelkd*, 132(12), 590–594. <https://doi.org/10.5177/ntvt.2025.12.25005>

- Boyd, R. L. (2008). Esthetic orthodontic treatment using the invisalign appliance for moderate to complex malocclusions. *J Dent Educ*, 72(8), 948–967.
- Bozorgnia, Y., Mafinezhad, S., Pilehvar, P., & Salari, S. (2021). Introducing a Removable Orthodontic Appliance and Its Effects on Dental Arch Dimensions. *Int J Clin Pediatr Dent*, 14(Suppl 1), S39–S43. <https://doi.org/10.5005/jp-journals-10005-2023>
- Buhl, J., Ender, A., & Mehl, A. (2025). Accuracy of current intraoral scanning systems for full-arch impressions: An in vitro study. *J Dent*, 161, 105984. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2025.105984>
- Christopoulou, I., Kaklamanos, E. G., Makrygiannakis, M. A., Bitsanis, I., Perlea, P., & Tsolakis, A. I. (2022). Intraoral Scanners in Orthodontics: A Critical Review. *Int J Environ Res Public Health*, 19(3). <https://doi.org/10.3390/ijerph19031407>
- d'Oliveira, N. G., Monill-Gonzalez, A., Valle-Canada, P., Albaladejo, A., & Curto, A. (2025). Is there really a relationship between maxillary and mandibular incisor inclination and the amount of surrounding cortical alveolar bone? a systematic review. *BMC Oral Health*, 25(1), 1397. <https://doi.org/10.1186/s12903-025-06751-3>
- Dimberg, L., Arnrup, K., & Bondemark, L. (2015). The impact of malocclusion on the quality of life among children and adolescents: a systematic review of quantitative studies. *Eur J Orthod*, 37(3), 238–247. <https://doi.org/10.1093/ejo/cju046>
- Dipalma, G., Inchingolo, A. D., Fiore, A., Balestriere, L., Nardelli, P., Casamassima, L., Di Venere, D., Palermo, A., Inchingolo, F., & Inchingolo, A. M. (2025). The Differential Impact of Clear Aligners and Fixed Orthodontic Appliances on Periodontal Health: A Systematic Review. *Children (Basel)*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/children12020138>
- Ender, A., & Mehl, A. (2013). Influence of scanning strategies on the accuracy of digital intraoral scanning systems. *Int J Comput Dent*, 16(1), 11–21.
- Enzo, B. (2020). Malocclusion in orthodontics and oral health: Adopted by the General Assembly: September 2019, San Francisco, United States of America. *Int Dent J*, 70(1), 11–12. <https://doi.org/10.1111/idj.12554>
- Flugge, T. V., Schlager, S., Nelson, K., Nahles, S., & Metzger, M. C. (2013). Precision of intraoral digital dental impressions with iTero and extraoral digitization with the iTero and a model scanner. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 144(3), 471–478. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2013.04.017>
- Gholamalizadeh, T., Darkner, S., Sondergaard, P. L., & Erleben, K. (2021). A multi-patient analysis of the center of rotation trajectories using finite element models of the human mandible. *PLoS One*, 16(11), e0259794. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0259794>
- Giannini, L., Galbiati, G., Tartaglia, F. C., Grecolini, M. E., Maspero, C., & Biagi, R. (2025). Orthodontic Treatment with Fixed Appliances Versus Aligners: An Experimental Study of Periodontal Aspects. *Dent J (Basel)*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/dj13020070>
- Hassan, N. A., & Al-Radha, A. S. D. (2023). CBCT Evaluation of Quality and Quantity of Bones for Immediate Implant Treatment Planning in Central

- Incisor Area in relation to Arch Form. *ScientificWorldJournal*, 2023, 8863318. <https://doi.org/10.1155/2023/8863318>
- Holmes, P. B., Wolf, B. J., & Zhou, J. (2015). A CBCT atlas of buccal cortical bone thickness in interradicular spaces. *Angle Orthod*, 85(6), 911–919. <https://doi.org/10.2319/082214-593.1>
- Hussain, U., Wahab, A., Kamran, M. A., Alnaze, A. A., Almoammar, S., Alshahrani, S. S. M., Niazi, F. H., Alam, S., Arif, N., Campobasso, A., & Pandis, N. (2025). Prevalence, Incidence and Risk Factors of White Spot Lesions Associated With Orthodontic Treatment - A Systematic Review and Meta-Analysis. *Orthod Craniofac Res*, 28(2), 379–399. <https://doi.org/10.1111/ocr.12888>
- Johansson, K., & Lundstrom, F. (2012). Orthodontic treatment efficiency with self-ligating and conventional edgewise twin brackets: a prospective randomized clinical trial. *Angle Orthod*, 82(5), 929–934. <https://doi.org/10.2319/101911-653.1>
- Karras, T., Singh, M., Karkazis, E., Liu, D., Nimeri, G., & Ahuja, B. (2021). Efficacy of Invisalign attachments: A retrospective study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 160(2), 250–258. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2020.04.028>
- Katanaki, N., Pouliezou, I., Kerezoudis, N. P., & Sifakakis, I. (2025). The Effect of Clear Aligners on Root Length in Endodontically Treated Teeth: A Systematic Review of Split-Mouth Studies. *Healthcare (Basel)*, 13(18). <https://doi.org/10.3390/healthcare13182311>
- Kau, C. H., & Cruz Wilma, D. A. (2024). 3D Analysis of Tooth Movement Using 3D Technology. *Curr Osteoporos Rep*, 22(6), 536–543. <https://doi.org/10.1007/s11914-020-00625-z>
- Kerr, W. J. (2001). The rise and fall of the removable orthodontic appliance. *Dent Hist*(38), 3–12.
- Koretsi, V., Zymperdikas, V. F., Papageorgiou, S. N., & Papadopoulos, M. A. (2015). Treatment effects of removable functional appliances in patients with Class II malocclusion: a systematic review and meta-analysis. *Eur J Orthod*, 37(4), 418–434. <https://doi.org/10.1093/ejo/cju071>
- Li, B., Xu, Y., Shi, R., Hu, Y., Liu, S., & Gu, Z. (2022). Accuracy of progress assessment with clear aligners. *Hua Xi Kou Qiang Yi Xue Za Zhi*, 40(6), 698–703. <https://doi.org/10.7518/hxkq.2022.06.011>
- Li, B., Xu, Y. M., Shi, R. Y., Hu, Y. R., Liu, S. Y., & Gu, Z. X. (2023). A retrospective study of the accuracy of Invisalign Progress Assessment with clear aligners. *Sci Rep*, 13(1), 9000. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36085-5>
- Li, J., Si, J., Xue, C., & Xu, H. (2024). Seeking orderliness out of the orderless movements: an up-to-date review of the biomechanics in clear aligners. *Prog Orthod*, 25(1), 44. <https://doi.org/10.1186/s40510-024-00543-1>
- Liu, Q., Huang, X. Q., Jiang, D., Chi, H. J., Wang, L. J., Sun, W. T., & Liu, J. (2018). [Orthodontic intrusion of the first and second mandibular molars with a vacuum-formed removable appliance: a case report]. *Hua Xi Kou Qiang Yi Xue Za Zhi*, 36(2), 226–228. <https://doi.org/10.7518/hxkq.2018.02.021>

- Lubit, E. C. (1983). Functional orthodontic therapy with the Frankel appliance. *J Pedod*, 7(4), 257–275.
- Madurantakam, P. (2016). Removable functional appliances effective in patients with Class II malocclusions. *Evid Based Dent*, 17(1), 27–28. <https://doi.org/10.1038/sj.ebd.6401156>
- Moga, R. A., Olteanu, C. D., Botez, M. D., Buru, S. M., & Delean, A. G. (2023). Effects of Increasing the Orthodontic Forces over Cortical and Trabecular Bone during Periodontal Breakdown-A Finite Elements Analysis. *Medicina (Kaunas)*, 59(11). <https://doi.org/10.3390/medicina59111964>
- Muthuswamy Pandian, S., Subramanian, A. K., & Vaid, N. (2025). Comparison of efficacy and accuracy of tooth movements in optimized and conventional attachments of clear aligners - A systematic review and meta-analysis. *J Oral Biol Craniofac Res*, 15(5), 1123–1133. <https://doi.org/10.1016/j.jobcr.2025.07.019>
- Nahajowski, M., Lis, J., & Sarul, M. (2022). Orthodontic Compliance Assessment: A Systematic Review. *Int Dent J*, 72(5), 597–606. <https://doi.org/10.1016/j.identj.2022.07.004>
- Nattrass, C., & Sandy, J. R. (1995). Adult orthodontics--a review. *Br J Orthod*, 22(4), 331–337. <https://doi.org/10.1179/bjo.22.4.331>
- Oikonomou, E., Foros, P., Tagkli, A., Rahiotis, C., Eliades, T., & Koletsi, D. (2021). Impact of Aligners and Fixed Appliances on Oral Health during Orthodontic Treatment: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Oral Health Prev Dent*, 19, 659–672. <https://doi.org/10.3290/j.ohpd.b2403661>
- Paddenbergschubert, E., Midlej, K., Krohn, S., Kuchler, E., Watted, N., Proff, P., & Iraqi, F. A. (2025). Automated classification of skeletal malocclusion in German orthodontic patients. *Clin Oral Investig*, 29(8), 396. <https://doi.org/10.1007/s00784-025-06485-0>
- Papageorgiou, S. N., Giannakopoulou, T., Eliades, T., & Vandevska-Radunovic, V. (2024). Occlusal outcome of orthodontic treatment: a systematic review with meta-analyses of randomized trials. *Eur J Orthod*, 46(6). <https://doi.org/10.1093/ejo/cjae060>
- Park, H. S., Lee, Y. J., Jeong, S. H., & Kwon, T. G. (2008). Density of the alveolar and basal bones of the maxilla and the mandible. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 133(1), 30–37. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2006.01.044>
- Park, J. B., Lee, J. E., Kim, K., Yoo, J. T., Kim, Y., Kook, Y. A., & Ko, Y. (2014). The thickness of alveolar bone at the mandibular canine and premolar teeth in normal occlusion. *J Craniofac Surg*, 25(3), 1115–1119. <https://doi.org/10.1097/SCS.0000000000000767>
- Pattanaik, S., Veeraraghavan, V. P., Dasari, A. K., Patil, S. R., Alzahrani, S. G., & Fareed, M. (2024). Orthodontic treatment in adults: Challenges, outcomes, and factors affecting compliance and satisfaction. *J Orthod Sci*, 13, 14. https://doi.org/10.4103/jos.jos_186_23
- Porto, O. C. L., Silva, B. S. F., Silva, J. A., Estrela, C. R. A., Alencar, A. H. G., Bueno, M. D. R., & Estrela, C. (2020). CBCT assessment of bone thickness in maxillary and mandibular teeth: an anatomic study. *J Appl Oral Sci*, 28, e20190148. <https://doi.org/10.1590/1678-7757-2019-0148>

- Proffit, W. R., Fields, H. W., Jr., & Moray, L. J. (1998). Prevalence of malocclusion and orthodontic treatment need in the United States: estimates from the NHANES III survey. *Int J Adult Orthodon Orthognath Surg*, 13(2), 97–106.
- Raza, M., Sharma, P., Jain, S., & Kumar, P. (2023). Orthodontic management of a growing skeletal class II case with functional appliance and atypical extractions: A case report. *J Orthod Sci*, 12, 84.
https://doi.org/10.4103/jos.jos_151_21
- Rinchuse, D. J., & Rinchuse, D. J. (1997). Active tooth movement with Essix-based appliances. *J Clin Orthod*, 31(2), 109–112.
- Rossini, G., Parrini, S., Castorflorio, T., Deregibus, A., & Debernardi, C. L. (2015). Periodontal health during clear aligners treatment: a systematic review. *Eur J Orthod*, 37(5), 539–543. <https://doi.org/10.1093/ejo/cju083>
- Rusu, E. P., Lazar, A. P., Erhan, B. L., Bud, E., Pacurar, M., & Lazar, L. (2026). Clear Aligner Therapy and Marginal Edge Design: Clinical and Laboratory Evidence on Periodontal and Biological Outcomes-A Scoping Review. *Dent J (Basel)*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/dj14030130>
- Sauer, M. K., Drechsler, T., Peron, P. F., Schmidtman, I., Ohlendorf, D., Wehrbein, H., & Erbe, C. (2023). Aligner therapy in adolescents: first-year results on the impact of therapy on oral health-related quality of life and oral hygiene. *Clin Oral Investig*, 27(1), 369–375.
<https://doi.org/10.1007/s00784-022-04741-1>
- Schwarz, A. M. (1949). [The biological basis for achieving the treatment goal and long-term success in orthodontics]. *Z Stomatol (1921)*, 46(3), 120–128.
- Sen, S., Wani, M. A., Kour, J., Siddiqui, S., Chatterjee, S., Devi, A., & Gupta, S. (2025). Comparative Evaluation of Periodontal Pathogen Load and Health in Patients Treated With Fixed Orthodontic Appliances Versus Clear Aligners: A Prospective Clinical Study. *Cureus*, 17(9), e93016.
<https://doi.org/10.7759/cureus.93016>
- 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. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 145(6), 728–736.
<https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2014.03.015>
- Stephens, C. D. (1994). PAR Index to assess the effectiveness of removable orthodontic appliance treatment. *Br J Orthod*, 21(3), 313.
<https://doi.org/10.1179/bjo.21.3.313>
- Tamer, I., Oztas, E., & Marsan, G. (2019). Orthodontic Treatment with Clear Aligners and The Scientific Reality Behind Their Marketing: A Literature Review. *Turk J Orthod*, 32(4), 241–246.
<https://doi.org/10.5152/TurkJOrthod.2019.18083>
- Ubuzima, P., Nshimiyimana, E., Mukeshimana, C., Mazimpaka, P., Mugabo, E., Mbyayingabo, D., Mohamed, A. S., & Habumugisha, J. (2024). Exploring biological mechanisms in orthodontic tooth movement: Bridging the gap between basic research experiments and clinical applications - A comprehensive review. *Ann Anat*, 255, 152286.
<https://doi.org/10.1016/j.aanat.2024.152286>

- Uribe, F., Cutrera, A., & Nanda, R. (2011). A segmented appliance for space closure followed by Invisalign and fixed appliances. *Orthodontics (Chic.)*, 12(4), 386–395.
- Wang, X., Xue, J., Wang, X., & Fan, M. (2025). Biomechanical effects of orthodontic tooth movement on edentulous alveolar bone: a finite element analysis. *Front Bioeng Biotechnol*, 13, 1625027. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2025.1625027>
- Weir, T. (2017). Clear aligners in orthodontic treatment. *Aust Dent J*, 62 Suppl 1, 58–62. <https://doi.org/10.1111/adj.12480>
- Willems, G., & Carels, C. E. (2000). [Developments in fixed orthodontic appliances]. *Ned Tijdschr Tandheelkd*, 107(4), 155–159.
- Wu, J. L., Liu, Y. F., Peng, W., Dong, H. Y., & Zhang, J. X. (2018). A biomechanical case study on the optimal orthodontic force on the maxillary canine tooth based on finite element analysis. *J Zhejiang Univ Sci B*, 19(7), 535–546. <https://doi.org/10.1631/jzus.B1700195>
- Yangin, A., Camci, H., & Soybelli, M. (2025). Clear Aligner Attachments: A Comprehensive Review. *Turk J Orthod*, 38(3), 177–189. <https://doi.org/10.4274/TurkJOrthod.2025.2025.7>

7 Erklärung zum Eigenanteil

Die Arbeit wurde am Universitätsklinikum Tübingen, Poliklinik für Kieferorthopädie unter Betreuung von Prof. Dr. Bernd Koos durchgeführt.

Die Konzeption der Studie erfolgte durch mich, Antonia Hoffmann.

Sämtliche Datenerhebungen wurden von mir eigenständig durchgeführt.

Die statistische Auswertung erfolgte eigenständig und nach zusätzlicher Beratung durch das Institut für Biometrie nach Anleitung durch Dr. Gunnar Blumenstock.

Bei der Erstellung dieser Arbeit wurden generative KI-Tools wie ChatGPT und Perplexity AI unterstützend angewandt. Diese dienten zur sprachlichen Überarbeitung, Grammatik und dem Generieren von Bildern. Die wissenschaftliche Planung, Datenerhebung, Analysen, Interpretation und Ausarbeitung erfolgten ausschließlich durch mich Antonia Hoffmann.

Ich versichere, das Manuskript selbstständig nach Anleitung durch Prof. Dr. Bernd Koos verfasst zu haben und keine weiteren als die von mir angegebenen Quellen verwendet zu haben.

Tübingen, den 12.06.2026

8 Veröffentlichung

Beurteilung der Umsetzung von Zahnbewegungen mittels Alignertherapie – eine retrospektive dreidimensionale Auswertung

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

Veröffentlicht und als Posterpräsentation vorgestellt sowie mit dem 3.

Posterpreis ausgezeichnet im Rahmen der Jahrestagung der Österreichischen
Gesellschaft für Kieferorthopädie 2026 (ÖGKFO)

9 Danksagung

Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer, Herrn Prof. Dr. Bernd Koos, der mich mit seiner fachlichen Expertise, seinem wertvollen Rat und seiner kontinuierlichen Unterstützung während des gesamten Promotionsvorhabens begleitet hat. Seine Anregungen und seine Bereitschaft zur Diskussion haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Ebenso danke ich meinem Statistiker Dr. Gunnar Blumenstock, der mir mit seiner kompetenten Unterstützung bei der statistischen Auswertung, seiner Geduld bei Rückfragen und seinen hilfreichen Hinweisen maßgeblich zur Seite gestanden hat.

Ganz herzlich danken möchte ich meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, die mich über viele Jahre mit großem Vertrauen, Geduld und uneingeschränkter Unterstützung begleitet haben. Ohne ihren Rückhalt wäre dieser Weg nicht möglich gewesen.

Ein besonderer Dank gilt auch meinem Verlobten, der mir während der gesamten Promotionszeit stets zur Seite gestanden, mich ermutigt und in schwierigen Phasen Kraft gegeben hat. Seine Unterstützung und sein Verständnis haben mir sehr viel bedeutet.