

Aus der Poliklinik für Kieferorthopädie
Klinik der Ludwig-Maximilians-Universität München

Vorstand: Prof. Dr. Andrea Wichelhaus

Untersuchung der Passgenauigkeit von zylindrischen Körpern als Attachments für die Alignertherapie

Dissertation
zum Erwerb des Doktorgrades der Zahnmedizin
an der Medizinischen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von
Miroslava Stoyanova Yorgova
aus Chirpan, Bulgarien
2021

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
Der Universität München

Berichterstatterin: Prof. Dr. med. dent. Andrea Wichelhaus

Mitberichterstatter Prof. Dr. med. dent. Jan-Frederik GÜth

Mitbetreuung durch den
promovierten Mitarbeiter: Dr. rer. nat. Sebastian Stapfner

Dekan: Prof. Dr. med. dent. Reinhard Hickel

Tag der mündlichen Prüfung: 26.03.2021

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	V
1 Einleitung.....	1
2 Entwicklung der Alignertherapie	2
2.1 Biomechanik der Zahnbewegung.....	2
2.2 Historischer Überblick.....	3
2.3 Grundzüge der Alignertherapie sowie Herstellung und Verarbeitung von Alignern	3
2.4 Verwendung von Attachments bei der Alignertherapie	8
2.5 Problemstellung	11
2.6 Geplante Untersuchung.....	12
3 Versuchsaufbau und Methodik.....	13
3.1 Versuchsplanung und Messmethoden.....	13
3.2 Zusammenstellung der verwendeten Alignerfolien	15
3.3 Anfertigung der Beispielattachments	16
3.4 Herstellung der Aligner	18
3.5 Messmethodik.....	19
3.5.1 „a vertice“	20
3.5.2 Horizontale Vermessung eines Alignerschnittes	21
3.6 Statistische Datenanalyse	23
4 Ergebnisse.....	24
4.1 Passgenauigkeitsbestimmung "a vertice".....	24
4.1.1 Aligner mit Folienstärke 0,500 mm	25
4.1.2 Aligner mit Folienstärke 0,625 mm	28
4.1.3 Aligner mit Folienstärke 0,750 mm	30
4.2 Passgenauigkeitsbestimmung nach einem Schnitt.....	32
4.2.1 Aligner mit Folienstärke 0,500 mm	33
4.2.2 Aligner mit Folienstärke 0,625 mm	35
4.2.3 Aligner mit Folienstärke 0,750 mm	38
4.3 Passgenauigkeitsbestimmung durch horizontalen Schnitt mit Vertiefung im Gipsmodell	41
4.3.1 Aligner mit Folienstärke 0,500 mm	41
4.3.2 Aligner mit Folienstärke 0,625 mm	44
4.3.3 Aligner mit Folienstärke 0,750 mm	47
4.4 Auswertung der statistischen Datenanalyse	50
5 Diskussion	56
5.1 Methodenkritik.....	56
5.1.1 „a vertice“	56
5.1.2 Horizontale Vermessung eines Alignerschnittes	58
5.1.3 Direkter Vergleich.....	59
5.1.4 Weitere Einflüsse	61
5.2 Ergebnisdiskussion	63
5.2.1 „a vertice“	64
5.2.2 Horizontale Vermessung eines Alignerschnittes	67

5.2.3	Horizontale Vermessung eines Alignerschnitts mit Vertiefung im Gipsmodell.....	73
5.2.4	Vergleich der Ergebnisse aller verwendeten Methoden	76
5.3	Ergebnisdiskussion im Vergleich zur Literatur	77
6	Zusammenfassung	82
7	Literaturverzeichnis:.....	85
8	Anhang	89
9	Danksagung	90

Abkürzungsverzeichnis

A	Abstand
CT	Computertomographie
mm	Millimeter
Ø	Durchmesser
o.g.	oben genannt
SDR	Smart Dentin Replacement
V	Versuch
z. B.	zum Beispiel

1 Einleitung

Eine richtige Zahnstellung ist aus gesundheitlicher und ästhetischer Sicht wünschenswert. Diese minimiert das Risiko von Erkrankungen der Zähne und des Zahnfleisches, stabilisiert den Kauapparat, erleichtert die Funktion der Kiefergelenke, das Schlucken, das Atmen, sowie die richtige Artikulation und Aussprache. Es wird des Weiteren behauptet, dass ein Zusammenhang zwischen der Zahnfehlstellung und Plaqueansammlung auf der Zahnoberfläche vorhanden ist (Burden 2007). Außerdem wirken schöne Zähne positiv auf die gesamte Gesichtsharmonie und sind eine Voraussetzung für ein gesundes Selbstbewusstsein und ein offenes Lächeln und somit soziale Kontakte in der Gesellschaft. Ein Hinweis darauf sind fast eine halbe Million Twitterposts über Kundenzufriedenheit nach Korrekturen bei Zahnfehlstellungen, die in der Studie von D. Noll analysiert wurden (Noll et al. 2017).

Die Einführung der festsitzenden Zahnspangen war eine Innovation, die von Edward H. Angle entwickelt und umgesetzt wurde (Angle 1899). Leider spielt die temporäre ästhetische Beeinträchtigung der Zahnspangen noch bei vielen Patienten eine große Rolle und sie fühlen sich unkomfortabel bei deren Anwendung. Es handelt sich dabei vor allem um Erwachsene und insbesondere um Personen, die sich häufiger in der Öffentlichkeit zeigen (Kuhlman et al. 2016). Studien liefern Beweise dafür, dass auch jugendliche Patienten mit zunehmendem Alter eine Präferenz für eine möglichst „unsichtbare“ und ästhetische Behandlung entwickeln (Walton et al. 2010). Durch die Entwicklung verschiedener Lingual- oder Keramikbracket-techniken konnte dieses Problem minimiert werden, trotzdem verweigern weiterhin viele Patienten auch diese Behandlungen wegen der Zungen- oder Lippen-/Wangeneinschränkung. Deswegen wird die Korrektur von Zahnfehlstellungen mit „unsichtbaren“ Behandlungsmethoden durch den Patienten bereitwilliger akzeptiert und so gewinnt deren Verwendung immer mehr an Popularität.

2 Entwicklung der Alignertherapie

Im folgenden Kapitel werden die Biomechanik des Zahnes und die historische Entstehung und Entwicklung der Aligner behandelt, sowie ein Überblick über die verwendeten Attachments mit deren Anforderungen und die daraus resultierende Problemstellung dargelegt.

2.1 Biomechanik der Zahnbewegung

Biomechanik ist ein Teilgebiet der Mechanik, das mit physikalischen Methoden versucht, biologische Zusammenhänge zu beschreiben. Grundlagen der Biomechanik starrer Körper (z.B. Zähne) basieren auf Begriffen wie Kraft, Drehmoment, Schwerpunkt und Widerstandszentrum. Ein starrer Körper wird in der Literatur als das physikalische Modell eines nicht verformbaren Körpers beschrieben. Hierbei sind Zähne ein Sonderfall, sie sind durch das Parodont (das funktionelle Verankerungssystem des Zahnes) im Knochen eingelagert und deswegen werden sie als gestützte starre Körper betrachtet (Sander et al. 2011).

Jeder Zahn kann generell drei Arten von Bewegungen ausführen: Translation, Kippung und Rotation, die sich jeweils in drei Ebenen verwirklichen lassen – „x“, „y“ und „z“ laut dem kartesischen Koordinatensystem und in 2 oder 3 Ebenen nach dem Tweed-Koordinatensystem.

Eine spezielle Art der Translation ist die Intrusion bzw. Extrusion. Sie stellt einen Teil der größten Herausforderungen bei der kontrollierten Zahnbewegung dar.

Im Knochen ist der Zahn durch den Zahnhalteapparat verankert. Dazu zählen Wurzelzement, Wurzelhaut, Alveolarfortsatz und Zahn. Mithilfe dieser Strukturen und der durch kieferorthopädische Geräte gezielt ausgeübten Kräfte wird die Bewegung des Zahnes im Alveolarknochen ermöglicht. Drei Phasen der Zahnbewegung werden unterschieden. Vom ersten bis dritten Tag erfolgen die Mechanismen der sogenannten initialen Dämpfung. Diese umfasst die 5%ige Streckung der Scharpey'sche Fasern und den hydrodynamischen Polstereffekt. Anschließend wird von der zweiten bis zehnten Woche die Blutzirkulation unterbrochen und die Zellen der entstandenen hyalinen Zone werden durch

angrenzende Zellen der Spongiosa indirekt resorbiert. Bei der dritten sogenannten Resorptionsphase wird die Blutzirkulation des Desmodonts dagegen nicht unterbrochen und die Zellaktivität bleibt erhalten. In den Kapillaren des Periodontalspaltes herrscht ein Partialdruck, der 20 - 26 g/cm² beträgt (Schwarz 1932). Über dieser Grenzwelle kommt es zu Ischämie des Periodontiums und zu einer Wurzelresorption. Außerdem existiert im Laufe der kieferorthopädischen Behandlung ein komplexer Zusammenhang zwischen den möglichen Zahnbewegungen und dem Alter und Geschlecht des/der Patienten/in (Chisari et al. 2014).

2.2 Historischer Überblick

Eine der ersten wissenschaftlichen Publikationen, die eine Therapie mit elastischen Geräten ohne Brackets, Drähte und Bänder beschreibt, stammt von H. D. Kesling aus dem Jahr 1945. Er konstruierte einen Prototypen vom heutigen Aligner (den sogenannten "Positioner"), mit dem man Zahnfehlstellungen wie Bogenformkorrektur, kleine Derotationen und Kippungen verwirklichen konnte (Kesling 1945). Dieses Verfahren wurde in den folgenden Jahren untersucht und immer wieder diskutiert (Cottingham 1969; Ponitz 1971; Sheridan et al. 1993), aber nie richtig verbreitet. Die Einführung eines solchen klinischen Produkts, das allerdings weltweit erfolgreich wurde, wurde 1999 mit Invisalign® durch die Firma Align Technology, Inc in Santa Clara, Kalifornien, USA realisiert (Joffe 2003). In Deutschland wurde dieses Verfahren 2001 eingeführt (Göz 2010; Lau und Wey 2004).

2.3 Grundzüge der Alignertherapie sowie Herstellung und Verarbeitung von Alignern

Aligner sind herausnehmbare transparente Polyurethanschienen, die in ihrer Primärform zur Korrektur von Malokklusion und Lückenschluss durch gezielte Bewegung der Zähne in eine gewünschte Position entwickelt wurden (Pravindevaprasad und Therese 2013). Dabei werden sequentiell immer wieder neue Schienen angefertigt, die schrittweise kleine geometrische Veränderungen

aufweisen. Sie können erfolgreich bei Patienten angewandt werden, die dentale Zahnfehlstellungen aufweisen (Hennessy et al. 2016). Dazu zählt die Distalisierung von Molaren, die Rotation von Inzisiven (Hahn et al. 2010a), bis hin zur Korrektur eines offenen Bisses (Guarneri et al. 2013). In der Literatur werden erfolgreiche Behandlungen bei einer leichten skelettalen Malokklusion der Klasse III (Yezdani 2014), bei einer skelettalen Malokklusion der Klasse III in Kombination mit lateralem Kreuzbiss (Pagani et al. 2016) oder bei einer kombinierten piezochirurgischen und kieferorthopädischen Behandlung (Cassetta et al. 2016a; Cassetta et al. 2016b) beschrieben. Der Hauptvorteil der Kortikotomie in Kombination mit Alignern besteht in einer erheblichen Verkürzung der Behandlungszeit, erzeugt durch ein operatives Erweichen des Knochens.

Des Weiteren können Clear Aligner in Kombination mit Miniimplantaten erfolgreich nach ästhetischen Zahnextraktionen angewandt werden. In dem von Choi beschriebenen klinischen Fall handelt es sich um Extraktion der ersten Prämolaren und Lückenschluss innerhalb von 14 Monaten (Choi et al. 2009).

Die in der Alignertherapie vorgesehene Zahnbewegung soll sich letztlich durch die per Alignerform statisch aufgebrachte Kraft einstellen. Dabei werden als Ankerpunkte jeweils zum Aufbringen dieser für die Zahnbewegung notwendigen Kraft bevorzugt Zähne verwendet, die eine höhere Pfeilerwertigkeit besitzen. Durch die Diskrepanz zwischen momentaner Ist-Ausrichtung der Zähne und gewünschter Soll-Ausrichtung in Zusammenhang mit der Steifigkeit der Schiene und ihrer präzisen Form ergibt sich eine Kraft, die auf die fehlgestellten Zähne wirkt und sich an den oben erwähnten Ankerpunkten abstützt. Infolgedessen wird die Behandlung mit Aligner-Schienen hauptsächlich für Korrekturen gekippter Zähne im Frontzahnbereich angewandt (Jae und Tae 2009). Laut einer Vergleichsstudie von Grünheid, in dem der Einfluss von Clear Alignern und festsitzenden Zahnspangen auf die intercanine Distanz beobachtet wurde, ist festzustellen, dass die Behandlung mit CA® im Vergleich zu einer Erhöhung dieser Distanz führt (Grünheid et al. 2016).

Die transparenten Schienen werden zumindest 20 Stunden, optimal 22 Stunden, pro Tag getragen und lediglich zum Essen, Trinken von säure- oder zuckerhaltigen Getränken und der täglichen Zahnhygiene entfernt. Dadurch sind sie vor allem bei

Patienten mit einem höheren Risiko für Entwicklung von Parodontalerkrankungen indiziert (Levrini et al. 2015a). Das regelmäßige Putzen mit Zahnbürste und Zahnpasta führt zu einer Reduktion der Bakterien auf der Oberfläche der Aligner (Rossini et al. 2015a). Noch bessere Ergebnisse werden durch das Anwenden von Natriumcarbonat- und Sulfattabletten erzielt (Levrini et al. 2016), sowie durch die zusätzliche Benutzung von Sulfatkristallen (Levrini et al. 2015b). In manchen Studien wurde jedoch eine negative Farbveränderung mancher Aligner nach Konsum von Kaffee nachgewiesen, was als nachteilig einzustufen ist (Liu et al. 2016). Bei Aligner-Wechsel zum nächsten Schritt lassen sich jeweils nach einer Anwendungsdauer von etwa 10 bis 14 Tagen bereits realisierte Zahnbewegungen bis zu 0,3 mm feststellen (Clements et al. 2003; Drake et al. 2012). Die Dauer der Behandlung hängt von der Komplexität ab und wird individuell bestimmt, wobei man in der Regel von einer Behandlungszeit von ca. 50 Wochen ausgehen kann.

Es gibt wissenschaftliche Beweise dafür, dass mit der Einsatzdauer der Aligner deren Lichtdurchlässigkeit sinkt und die Absorption steigt. Dies wurde im Laufe einer Spektrophotometriestudie mit Wellenlängen von 400 und 700 nm bei Alignern von drei verschiedenen Aligner-Herstellern entdeckt (Lombardo et al. 2015).

Die Vorteile der Aligner bestehen in ihrer im Vergleich zu den anderen kieferorthopädischen Geräten höheren ästhetischen Wirkung und Komfort beim Tragen, da weder Brackets noch Drähte angewandt werden. Die herausnehmbaren Schienen gewährleisten eine tägliche, uneingeschränkte Zahnpflege, was das Risiko von Demineralisation der Zähne verringert (Han 2015). Das Sprechen wird nur in den ersten 24 Stunden beeinflusst. Eine negative Beeinträchtigung der Kiefergelenkfunktion konnte nicht nachgewiesen werden.

Eine alternative Lösung für die hohe Nachfrage der Patienten nach ästhetischen Lösungen der Zahnfehlstellungskorrektur stellen außerdem die Keramikbrackets (Voudouris et al. 2010) und die Lingualbrackets dar. Allerdings können sie einerseits wegen ihrer Form und Größe zur Irritationen der Zunge, Mundschleimhaut, Lippen und Wangen führen (Jae und Tae 2009) und werden oft von Patienten als unangenehm empfunden. Andererseits wurden bestimmte Parameter wie Einengung des Zungenraums, Kauen, Abbeißen und eingeschränkte Mundhygiene

vor allem bei den Lingualbrackets als nachteilig beurteilt (Hohoff et al. 2003).

Als Nachteile der Alignertherapie ist zu erwähnen, dass deren Kosten in Deutschland nicht von den gesetzlichen Krankenkassen übernommen werden, sondern zum heutigen Zeitpunkt (2020) eine Privatleistung darstellen. Bei Kindern kommen auch am häufigsten Multibracketapparaturen zum Einsatz. Generell können Aligner-Schienen nur bei begrenzten Abweichungen der Zähne vom Zahnbogen angewandt werden. Immer noch limitiert sind vor allem die Torquebewegungen, bei deren Ausführung sich die Aligner einseitig vom Zahn abheben und nicht das Aufbringen eines für die Torquebewegung erforderlichen Kräftepaars ermöglichen. Dieses Kräftepaar besteht aus einer Initialkraft und aus einer Gegenkraft, die durch die Bewegung des Zahnes gegen die Innenfläche des Aligners erzeugt wird und senkrecht zu der Oberfläche des Aligners wirkt (Hahn et al. 2010b). Außerdem existieren Studien, die eine Resorption der Zähne durch Alignertherapie nachweisen (Gay et al. 2017). Die Resorption von <10 % der initialen Länge der Wurzeln entspricht der Wurzelresorption einer kieferorthopädischen Behandlung, die mit leichten orthopädischen Kräften assoziiert werden kann.

Auf dem Markt wurden bis heute zumindest 27 unterschiedliche Behandlungsmöglichkeiten auf Alignerbasis präsentiert, die alle mit dem englischen Begriff „Clear Aligners“ zusammengefasst werden können (Ercoli et al. 2014; Weir 2017). Diese werden in folgende Gruppen unterteilt:

- (1) Aligner für minimale Zahnkorrekturen – günstig, umfassen folgende Produkte: Originator, Simpli 5, MTM Clear Aligner und Clearguide System;
- (2) Behandlung für „Zuhause“ – 50 % günstiger als konventionelle Aligner, wurden entwickelt für eine Anwendung durch die Patienten Zuhause, zum Beispiel Crystal Braces und Smile Care Club;
- (3) Aligner, vor Ort oder laborangefertigt, mithilfe von Computersoftware, Scanner und 3D Drucker, oder Druckformgerät – Produkte wie Orchestra, 3 Shape, Suresmile, und Clear Aligner® (CA®) von Scheu-Dental, welche für die Untersuchungen der vorliegenden Studie zum Einsatz kommen;

(4) Aligner, die mittels Verwendung komplexerer CAD/CAM 3D Computersoftware auch komplizierte Bewegungen der Zähne steuern können und die Kontrolle der Zahnlage in allen Raumebenen erlauben und auch zusätzliche Mechanismen wie Attachments berücksichtigen – beispielsweise Invisalign®, ClearCorrect, ClearPath, eClinger, K Line und Orthocaps. Das computergestützte Planungs- und Herstellungsverfahren erfolgt im Fall von Invisalign® mittels der ClinCheck® Software (Krieger et al. 2011).

Martorelli hat in seiner Studie Aligner, die mithilfe von gängigen Herstellungsverfahren wie Stereolithographie (z. B. Invisalign®) und 3D Druck (ClearCorrect) hergestellt wurden, mit mittels aufwändigem CNC Verfahren angefertigten Alignern verglichen. Dabei wurden eine verbesserte Passgenauigkeit und schnellere Zahnkorrekturen, sowie eine erhöhte Transparenz bei den Alignern beobachtet, die im CNC Verfahren erzeugt wurden. Die Nachteile liegen aber in erhöhter Komplexität bei der Planung als auch der Herstellung, was zu höheren Kosten und längeren Wartezeiten führen würde (Martorelli et al. 2012).

Der Herstellungsprozess sowohl von CA®, als auch von Invisalign® Alignern beginnt mit der Anfertigung eines Behandlungsplanes und der Erstellung von regulären Abdrücken (z. B. mit Polyether Abformmaterial) durch einen Kieferorthopäden. Bei dem CA® Schienensystem werden später im Labor korrigierte Gipsmodelle angefertigt, wo ausgehend vom Originalmodell folglich jeder zu korrigierende Zahn individuell aus dem ursprünglichen Zahnbogen ausgetrennt und in der korrekten Position aufgestellt wird. Anschließend werden eine Reihe von CA® Schienen durch ein Druck- und Thermoformverfahren erzeugt, die dem Patienten schrittweise in einem Abstand von mindestens 10-14 Tagen eingesetzt werden.

Bei Invisalign® dagegen werden alle gesammelten Daten an Align Technology gesendet. Danach wird ein vollständiges digitales Zahnregistrar anhand von Röntgenaufnahmen und Patientenfotos zusammen mit den aufbereiteten Abdrücken erstellt. Es folgen drei Phasen der Analyse: Das Schneidverfahren, das Erstellen des endgültigen Simultanmodells und das Stufenverfahren. Zur finalen Kontrolle mittels ClinCheck® Software wird die digitale Simulation am Ende dem

behandelnden Kieferorthopäden übermittelt. Der von ihm genehmigte Plan dient letztlich dann zur Anfertigung von Serien der transparenten Kunststoffschienen, die in den USA mittels Stereolithografie hergestellt werden (Kuo und Miller 2003). Im Januar 2013 wurde das bei Invisalign® verwendete EX30 Alignermaterial durch das neue SmartTrack Alignermaterial ersetzt. Dieses weist vor allem eine höhere Elastizität und weniger Spannungsverlust über die Behandlungsdauer aus. Außerdem haben unterschiedliche Studien gezeigt, dass das SmartTrack Aligner Material patientenbezogen eine bessere Akzeptanz und einen höheren Komfort bietet (Sparaga 2011 and 2012).

Aligner benötigen einerseits eine gewisse Flexibilität, um den Patienten das tägliche Einsetzen und Herausnehmen zu erleichtern, und andererseits Steifigkeit, um die mechanische Spannung auf die Zähne auszuüben, die für die kieferorthopädische Bewegung erforderlich ist. Aus diesen Gründen wurden zusätzlich Attachments, also Kompositaufbauten auf den Zähnen, entwickelt, mit denen die angestrebte dreidimensionale Bewegung effizienter erreicht werden kann.

2.4 Verwendung von Attachments bei der Alignertherapie

Um den Halt des Aligners an den Zähnen zu verbessern und so die Therapie zu beschleunigen, wurden verschiedene Hilfsmittel entwickelt. Am häufigsten kommen die sogenannten Attachments (Englisch, wörtlich übersetzt in etwa „Aufsatz“ od. „Anfügung“) zum Einsatz. Diese werden für die Dauer der Behandlung aus niedrigviskosem (sogenanntem „flowable“) Komposit direkt auf den Zähnen aufgebracht. Die verschiedenen Aufbauverfahren werden in den folgenden Seiten genauer beschrieben.

Die Zähne müssen dazu vorher entsprechend vorbereitet werden, in dem die gewählten Stellen mit selektiver Ätztechnik und danach mit adhäsiven Bonding-Mitteln behandelt werden, um eine bessere Haftung der Attachments am Zahn sicherzustellen. Das Ziel dieser Aufsätze, die je nach Einsatzzweck verschiedene Formen (Dasy et al. 2015) und Größen annehmen können, vergrößern in wirksamer Weise die Angriffsfläche des Aligners am Zahn (Weir 2017). Sie werden folglich eingesetzt, um komplexe Zahnbewegungen wie z. B. Intrusion oder Extrusion,

Torquebewegungen der Frontzähne und Derotation der Prämolaren zu bewirken (Krieger et al. 2011; Simon et al. 2014).

Abgesehen von den nachfolgend genauer beschriebenen Attachments gibt es als weiteres Hilfsmittel auch noch die Vorgangsweise, angepasste Aligner-Geometrien einzusetzen, wie z. B. Extension der Alignerfolie über die Gingiva wie bei ClearCorrect (Weir 2017), Pressure Points oder Power Ridges wie bei Invisalign® (Simon et al. 2014).

Die verschiedenen Arten und die jeweiligen Herstellungsverfahren der Attachments werden im Folgetext ausführlich beschrieben.

Eine verbreitete Vorgehensweise beim Attachmentaufbau erfolgt mithilfe einer im Labor erstellten Negativform. Nach der Abformung, die der behandelnde Kieferorthopäde im Mund erstellt, wird im Zahntechniklabor ein Gipsmodell ausgegossen. Über diesem wird extra eine den Alignern ähnliche Schablone (sogenannt „Template“) hergestellt, die mit negativen Formen für die Attachments versehen ist. Diese werden später mithilfe des „Templates“ direkt im Mund des Patienten geformt. Zuerst erfolgt eine Konditionierung der Zahnoberflächen mit 37%iger Phosphorsäure (H_3PO_4). Danach wird der vorbehandelte Zahnschmelz durch einen Schmelzhaftvermittler (sogenannt „Bonding“) benetzt. Des Weiteren wird fließfähiges („flowable“) Komposit in die Negativformen der Schablone gefüllt und diese in die richtige Position in den Mund eingebracht. Wichtig ist, dass die Negativformen blasenfrei gefüllt werden (Holzmeier und Windsheimer 2013). Es erfolgt eine Lichthärtung des Komposits mit einer Polymerisationslampe für 20 Sekunden, was durch die hohe Transparenz der Schablone ermöglicht wird.

Eine andere Möglichkeit für den Attachmentaufbau ist die Erstellung von Negativformen in Alignern mithilfe von speziellen Alignerzangen. Auf dem Markt existieren verschiedene Zangenvariationen wie Hilliard Thermozyklen, Stanzzangen und H. I. T. Zangen, Produkte der Firma Ortho-Dent Specials (ODS GmbH) oder Zangen der Marke Clear Aligner® wie TIP1 - TIP 4. Hilliard Thermozyklen können genauer unterteilt werden, nämlich speziell für Attachments im Ober- oder Unterkiefer, mit größerem oder kleinerem Durchmesser, mit ovaler, runder oder abgerundeter rechteckiger Form. Die Stanzzangen andererseits

werden für inzisale oder gingivale Attachment-Applikationen unterteilt. Die H. I. T. Zangen können Negativformen in einem Aligner erstellen, die zur Positionierung von Häkchen für Gummizüge dienen. Dieses Verfahren findet z. B. eine Anwendung bei der Diastemakorrektur im Oberkiefer. Die Firma Clear Aligner® bietet die Produkte TIP1 und TIP2 an, welche zum Formen von Retentionspunkten und Aktivierungspunkten - mit einer Tiefe von einem Millimeter - verwendet werden können. Mit TIP3 kann hingegen eine labiolinguale Kronenneigung ausgeführt werden, während der Einsatz von TIP4-geformten Attachments zu einer Wurzelorque Aktivierung führt und ein bogenförmiges Plateau an der Zangenspitze besitzt. Ähnlich wie beim Attachmentaufbau mithilfe einer Negativform wird die für ein Attachment vorzubereitende Schmelzoberfläche zuerst mit 37%iger H_3PO_4 geätzt und danach mit Bonding Agent benetzt. Die Negativformen werden mit flowable Komposit gefüllt und nachfolgend lichtgehärtet.

Besondere Attachmentformen sind die sogenannten Multi-Plane Movement Attachments. Sie sind von Invisalign® bei Zahnkippen und Extrusionen indiziert, bei denen keine Wurzelbewegungen beabsichtigt sind. In diesem Fall erfolgt keine translatorische Zahnbewegung, weshalb diese Art von Attachments als eine einfachere Variante angesehen werden kann.

Optimized Root Control Attachments werden ebenfalls von Invisalign® angeboten. Laut dem Hersteller ermöglichen sie zusätzlich eine mesiodistale Wurzelaufrichtung oder translatorische Zahnbewegung. Zahntechniker können diese nicht manuell platzieren, sondern es erfolgt nur durch die proprietäre Software ClinCheck®. Bei Zähnen mit kleinerer Fläche und eingeschränkter Angriffsmöglichkeit wie z. B. den seitlichen oberen Incisiven verwendet man die Optimized Root Control Attachments in Kombination mit der sogenannten Pressure Point-Funktion. Bei dieser zusätzlichen Funktion handelt es sich um vorgeformte Elemente im Aligner, die mit dem Ziel einer besseren Kontrolle der Zahnsteuerung zusätzliche Kräfte ausüben. 2013 erschienen auf dem Markt die sogenannten SmartForce-Erweiterungen von Invisalign®. Diese universellen Strukturen finden generell ihren Einsatzbereich in Zahnbewegungen der oberen seitlichen Inzisiven und den oberen und unteren Prämolaren. Vorteilhaft ist deren Anwendung bei der Behandlung des offenen

Bisses und sie bieten eine bessere Wurzelspitzenkontrolle an (Aligntech und Institute 2013).

Klinisch werden alle Attachments allgemein aus UV-lichthärtendem Komposit hergestellt und anhand direkter Adhäsivtechnik befestigt. Deswegen sind Materialanforderungen wie leichte Verarbeitung und Thixotropie von großer Bedeutung. Niedrigviskoses bis fließfähiges Komposit wird bevorzugt, damit die Hohlform im Aligner, die für das Attachment vorgesehen wurde, komplett und blasenfrei ausgefüllt werden kann.

Für den Erfolg der kieferorthopädischen Behandlung ist es wichtig, dass die Attachments während der vollen Behandlungszeit ihre Position und Form nicht verändern. Daraus folgt, dass das verwendete Material ausreichend abrasions-, formstabil bzw. dauerhaft steif sein sollte. Alle oben genannten Kriterien werden von Materialien aus der Kategorie der Flowable Composites erfüllt, so z. B. SDR (Smart Dentin Replacement) von der Firma DENTSPLY (Holzmeier und Windsheimer 2013).

2.5 Problemstellung

Trotz der Vielfalt von Alignern auf dem Markt, sind deren Funktionen bei manchen Therapieanforderungen limitiert. Das gilt insbesondere für Wurzelbewegungen, Extrusion und umfangreiche Rotationen von seitlichen Schneidezähnen, Eckzähnen und Prämolaren (Cowley et al. 2012; Hauschopp 2012; Rossini et al. 2015b). In diesen Fällen entstehen die Einschränkungen der Alignertherapie aus der fehlenden Angriffsfläche für die Aligner am Zahn. Attachments, die den Behandlungsprozess effizienter machen, werden wie oben beschrieben erstellt und an den Zähnen adhäsiv befestigt, um die von dem Aligner angreifbaren Flächen zu vergrößern und bessere Retentionen auf den zu bewegenden Zähnen zu erzeugen. Bei dem Einsatz von Attachments können momentan kaum genauere Vorhersagen über deren Wirksamkeit gemacht werden. Im Besonderen ist nicht belegt, bei welchen Attachmentdimensionen (Höhe und Durchmesser) und welchen Alignerstärken („soft“, „medium“, „hard“) die optimale Passgenauigkeit der Attachments liegt.

2.6 Geplante Untersuchung

Intention der vorliegenden Arbeit ist es, die relative Passgenauigkeit zwischen Alignern und abgerundeten zylindrischen Attachments zu ermitteln, um die kieferorthopädische Bewegung der Zähne in die korrekte Position optimieren und so beschleunigen zu können. Damit sich dies realisieren lässt ist es notwendig, einerseits die optimalen Raumdimensionen des Attachments (Durchmesser, Höhe) festzustellen und andererseits die beste Passgenauigkeit bei unterschiedlichen Alignerstärken zu ermitteln. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie können dafür verwendet werden, Richtlinien für eine zukünftig optimierte Alignertherapie mit Attachments zu erstellen. Es werden in dieser Untersuchung Beispielattachments angefertigt, deren geometrische Parameter variieren, und darüber werden jeweils Aligner unterschiedlicher Stärken gezogen. Bei den verwendeten Alignern handelt es sich um Alignerfolien Duran® des Systems CA® der Firma Scheu-Dental, die im Zahntechniklabor mit einem Druckformgerät hergestellt werden. Mithilfe einer digitalen Mikroskopkamera wird dann auf zwei unterschiedliche Arten jeweils die Passgenauigkeit von Aligner zu Attachment gemessen. Folgende Aspekte werden schlussendlich dadurch überprüft: (1) ob höhere oder niedrigere Attachments die Passgenauigkeit der Aligner verbessern, (2) ob der Durchmesser der Attachments eine Rolle bei der Passgenauigkeit spielt und (3) ob die Alignerstärke die Passgenauigkeit beeinflusst. Alle Ergebnisse werden in Tabellen numerisch zusammengefasst und durch Diagramme illustriert, die danach analysiert, interpretiert und verglichen werden.

3 Versuchsaufbau und Methodik

Im folgenden Kapitel werden sowohl die Planung und der Aufbau, als auch die verwendeten Materialien und die eigentliche Durchführung der Versuche behandelt. Außerdem werden durch die detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise die Unterschiede zwischen den verwendeten Methoden erläutert und schließlich auf die statistische Datenanalyse hingewiesen.

3.1 *Versuchsplanung und Messmethoden*

Vermessen wurde prinzipiell die Passgenauigkeit der Aligner zu den Attachments mithilfe einer digitalen Mikroskopkamera, einerseits in der Draufsicht „a vertice“ und andererseits von der Seite, nach Entfernung des Aligners und Durchführung eines horizontalen Schnitts. Diese beiden eingesetzten Messverfahren werden genauer in Abschnitt 3.5 behandelt.

Aus der Anzahl der in den folgenden Abschnitten näher beschriebenen Alignerstärken (3) und Attachments unterschiedlicher Durchmesser (3) und Höhen (5) ergeben sich insgesamt 45 mögliche Aligner-Attachment Kombinationen. Zur Erhöhung der statistischen Aussagekraft der Messungen bei der Messmethode „a vertice“ wurden jeweils vier Einzelmesswerte vermessen, die den Mittelwert einer Messung ergeben. Außerdem wurden für die zweite, destruktive Messmethode mit Schnitt, für jede Kombination sieben weitere Aligner (ergo 8 insg.) hergestellt, sodass eine Gesamtanzahl von insgesamt 144 ($3 \times 3 \times 8 = 72 \times 2$) angefertigten Alignern resultiert. In Tabelle 1 ist die Aufstellung der so resultierenden 765 Messungen gezeigt. Die Legende gibt Auskunft über die in den unten aufgelisteten Tabelle 2 und Tabelle 3 verwendeten Abkürzungen. Die Messergebnisse bzw. Mittelwerte sind nachfolgend in Kapitel 4 in Tabellen aufgeführt sowie in Boxplotdiagrammen dargestellt und detailliert beschrieben.

Tabelle 1: Zusammensetzung aller resultierenden Messungen. Mit: EM – Einzelmesswert, UM 0 – ohne Vertiefung um das Beispielattachment, UM 2 – mit einer Vertiefung von 0,8 mm Tiefe, die das Beispielattachment in einem radialen Abstand von 2,0 mm umläuft; AF – Alignerfolie Duran®, U – Unterfolie Isofolan®, M – Messung, h – Höhe des Beispielattachments.

Messmethode „a vertice“		(1 x 4 EM) 1 M x 3 x 3 x 5 = 45 M
Messmethode	UM 0	1 M x 8 x 3 x 3 x 5 = 1 M x 8 x 45 = 360 M
	UM 2	1 M x 8 x 3 x 3 x 5 = 1 M x 8 x 45 = 360 M
Summe		765 M

Tabelle 2: Auflistung der Messungen „a vertice“.

Messmethode „a vertice“	Eigenschaften Attachments		
	0,9 mm \varnothing h = 0,5...2,5 mm	1,5 mm \varnothing h = 0,5...2,5 mm	2,5 mm \varnothing h = 0,5...2,5 mm
AF 0,500 mm + U	5 M	5 M	5 M
AF 0,625 mm + U	5 M	5 M	5 M
AF 0,750 mm + U	5 M	5 M	5 M

Tabelle 3: Auflistung der Messungen mit horizontalem Schnitt.

Messmethode „Schnitt“		0,9 mm \varnothing h = 0,5...2,5 mm	1,5 mm \varnothing h = 0,5...2,5 mm	2,5 mm \varnothing h = 0,5...2,5 mm
UM 0	AF 0,500 mm + U	40 M	40 M	40 M
	AF 0,625 mm + U	40 M	40 M	40 M
	AF 0,750 mm + U	40 M	40 M	40 M
UM 2	AF 0,500 mm + U	40 M	40 M	40 M
	AF 0,625 mm + U	40 M	40 M	40 M
	AF 0,750 mm + U	40 M	40 M	40 M

3.2 Zusammenstellung der verwendeten Alignerfolien

Gearbeitet wurde mit der Folie Duran® aus dem CA® Clear-Aligner System der Firma Scheu-Dental Technology. Diese in Abbildung 1 gezeigten Folien mit drei verschiedenen Stärken bestehen aus dem Polymerwerkstoff PET-G (Polyethylenterephthalat-Glycolmodifiziert). Für die vorliegenden Versuche wurden diese wie in Kapitel 3.4 beschrieben, im Labor, in Eigenarbeit mit einem Druckformgerät zu Alignern weiterverarbeitet.



Abbildung 1: Darstellung der PET-G (Polyethylenterephthalat-Glycolmodifiziert) Alignerfolien in drei verschiedenen Stärken: von links nach rechts 0,500 mm, 0,625 mm und 0,750 mm.

Wie in Tabelle 4 genauer aufgelistet, wurden die drei unterschiedlichen Stärken 0,500 mm („soft“), 0,625 mm („medium“) und 0,750 mm („hard“) mit einem jeweils identischen Durchmesser der Folienscheibe von 125 mm verwendet. Außerdem wurde als Unterfolie Isofolan® mit einer Stärke von 0,1 mm ausgewählt (Abbildung 3), deren genauer Einsatz noch in Kapitel 3.4 detailliert beschrieben wird.

Tabelle 4: Verwendete Alignerfolien und Unterfolien und deren Maße inkl. Toleranzen.

Hersteller/Produktname	Maße	Farbe
Duran®	0,500*x125 mm Ø * $-0/+0,12$ mm	klar
Duran®	0,625*x125 mm Ø * $-0/+0,115$ mm	klar
Duran®	0,750*x125 mm Ø * $-0/+0,15$ mm	klar
Isofolan® Unterfolie	0,1x125 mm Ø	klar

3.3 Anfertigung der Beispielattachments

Als Grundplattformen für diese zylindrischen Körper dienten drei selbsthergestellte Gipsmodelle mit einer identischen Länge von 5,3 cm, Breite von 4,5 cm und Höhe von 1,0 cm. Die Ecken dieser Plattformen wurden abgerundet, um Brüche beim späteren Abziehen der Folien zu vermeiden und somit einen konsistenten Ablauf der Versuche zu gewährleisten. In jedes Gipsmodell wurden Löcher gebohrt und jeweils fünf zylindrische Körper mit demselben Durchmesser eingeklebt. Dabei wurde darauf geachtet und mithilfe eines Messschiebers gemessen, dass sich die einzelnen sogenannten Beispielattachments vertikal in ihrer Höhe um jeweils 0,5 mm unterscheiden, wodurch sich jeweils die Attachmenthöhen von 0,5 bis 2,5 mm über der Oberfläche der Plattformen ergeben.

Wie in Abbildung 2 ersichtlich, weist jede der drei Grundplattformen einen anderen Durchmesser dieser fünf Körper auf, nämlich 0,9 mm, 1,5 mm und 2,5 mm. Bei der Anfertigung wurden diese vom selben Stück Draht geschnitten und nach der oben beschriebenen Einbettung zum Brechen der Kanten noch händisch an der oberen Seite mit einer Fräse vorsichtig bearbeitet. Dies erfolgte ohne Veränderung der ursprünglichen Attachmenthöhe.



Abbildung 2: Gipsplattformen mit Beispielattachments mit drei verschiedenen Durchmessern jeweils 0,9 mm, 1,5 mm und 2,5 mm (von rechts nach links).



Abbildung 3: Darstellung einer Unterfolie Isofolan® mit einer Folienstärke von 0,1 mm und einem Durchmesser der Folienscheibe von 125 mm.

3.4 Herstellung der Aligner

Für die durchzuführenden Versuche stand ein wie für viele Anwendungen der dentalen Tiefziehtechnik gängiges Universal-Druckformgerät der Firma Scheu-Dental mit einem Arbeitsdruck von 6,0 bar zur Verfügung (siehe Abbildung 4).



Abbildung 4: BIOSTAR® Druckformgerät der Firma Scheu-Dental zur Herstellung von Alignern.

Das Arbeitsprinzip des Druckformgeräts beruht auf Druckluft. Dessen Druck ist werksseitig auf 6,0 bar eingestellt und sollte nicht verändert werden. Dies ist notwendig, um bei dem Formprozess eine optimale Abformschärfe zu realisieren. Zuerst wird ein Code entsprechend der Spezifikationen des Aligners in die Software des Geräts eingegeben. Dieser Code enthält alle wichtigen Informationen zu Temperatur, Heiz- und Abkühldauer, um den Strahler mit der für die jeweilige Alignerfolie optimalen Temperatur arbeiten zu lassen. Auf diese Weise wird eine Unter-/Überhitzung und Inkonsistenz des Alignermaterials vermieden. Die angegebene Stärke der Alignerfolie entspricht stets dem Maß vor dem Erhitzen. Die Dauer der Temperaturaufwärmphase ist beispielsweise hauptsächlich von der Folienstärke abhängig. Die Stärke nach dem Thermoformen sinkt um 0,017-

0,022 mm (Dasy et al. 2015). Durch die 180° Drehung des Druckbehälters erfolgt die Erwärmung der dem Modell zugewandten Folienseite. Die Alignerfolie wird auf die Gipsplattformen mit den Beispielattachments gedrückt und unter Druckluft dicht daran angepasst. Durch die Erwärmung der Polyurethan-Folie wird diese unter Druck verformbar und legt sich dicht an das verwendete Modell mit Attachments an. Die Genauigkeit der Abformung hängt dabei insbesondere von der erreichten Temperatur ab, die das Fließverhalten des Kunststoffes entscheidend steuert. Es erfolgen ein Abkühlvorgang und die Entlüftung der Druckkammer. Um Ergebnisse höherer zahntechnischer Messqualität zu gewährleisten wurde bei der Herstellung der Aligner eine Unterfolie verwendet, mit dem Ziel, die Alignerfolie ohne Beeinträchtigung der Gipsmodelle ablösen zu können. Die dafür ausgewählte Folie Isofolan® wurde erstens wegen ihrer guten Isolierwirkung bei der Anwendung auf Gips bevorzugt und zweitens ist sie mit einer geringen Stärke von nur 0,1 mm gut als Platzhalterfolie geeignet.

3.5 Messmethodik

Ziel der Untersuchungen ist es festzustellen, wie gut die Alignerfolie auf den Beispielattachments anliegt. Nach Anfertigung der Gipsmodelle samt unterschiedlichen Beispielattachments und den verschiedenen Alignern folgte jeweils eine optische Vermessung mit einer Mikroskopkamera MIRAZOOM vom Modell MZ902 mit einem Vergrößerungsfaktor von 10 bis 200. Es wurden Aufnahmen angefertigt, die anhand der Software eScope (Version 1.1.7.25, Oriental Inspiration Limited, Hong Kong Science Park, Shatin, Hong Kong) und der Abstandsmessfunktion bearbeitet und ausgewertet wurden. Die Auswertungen dieser Aufnahmen wurden als numerische Rohdaten ausgegeben und in Tabellen und Diagrammen aufbereitet.

Im Laufe dieser Versuchsdurchführung wurden zwei Arten von Aufnahmen für die Vermessung angefertigt - vertikale Aufnahmen ("a vertice") und horizontale Aufnahmen, nach einem Schnitt der Alignerfolie.

3.5.1 „a vertice“

Die Messungen bei den vertikalen Aufnahmen erfolgten mit einer Ausrichtung der digitalen Mikroskopkamera zur senkrechten Draufsicht auf den jeweils zu vermessenden zylindrischen Körper. Mit Hilfe der Kamera wurden Aufnahmen der tiefgezogenen Alignerfolien erstellt. Darauffolgend erlaubte das Aufnahmeprogramm der Mikroskopkamera, nach entsprechender vorheriger Kalibrierung, die Aufnahmen optisch zu vermessen. Dazu wurde die Distanz A von einem innenliegenden Punkt E am äußeren Umfang des Beispielattachments zum dazugehörigen außenliegenden Punkt F, an dem Aligner und Gipsmodell aufeinandertreffen, ermittelt.

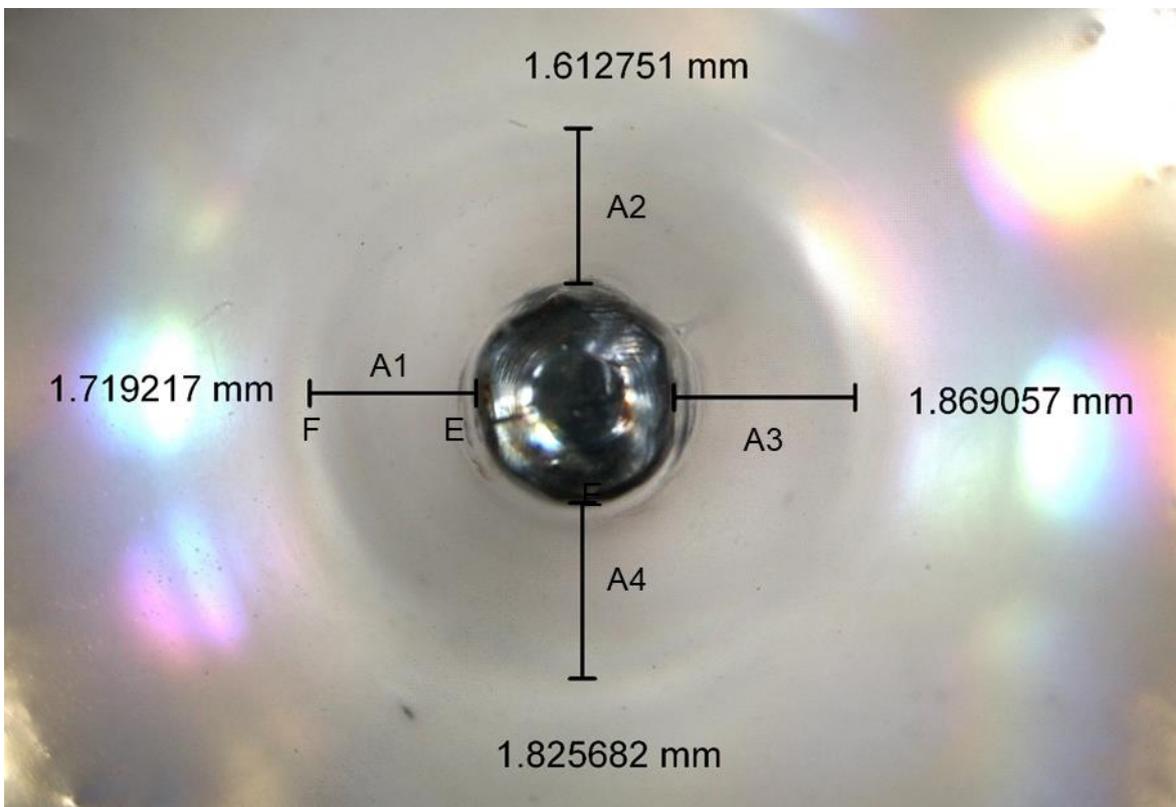


Abbildung 5: Darstellung der Vermessung bei einer Aufnahme „a vertice“. Mit A1-A4 wurde die jeweilige Distanz A bezeichnet, die von einem innenliegenden Punkt E am äußeren Umfang des Beispielattachments zum dazugehörigen außenliegenden Punkt F, an dem Aligner und Gipsmodell aufeinandertreffen, gemessen wurde. In der Abbildung gezeigt sind die Rohdaten einer solchen Auswertung, die allgemeine Darstellung der Ergebnisse wurde auf die zweite Dezimalstelle reduziert.

Wie in Abbildung 5 gezeigt, werden so in jeweils 90° Winkelabstand um den Umfang insgesamt 4 Messungen (A1-A4) pro Aufnahme durchgeführt, die dann gemittelt

werden. In den Tabellen und Diagrammen in Kapitel 4.1 finden sich deren Mittelwerte sowie deren Standardabweichungen wieder. Da das Vermessungsprogramm die Werte auf sechs Nachkommastellen genau ausgibt, die Anfangs- und Endpositionen der Messstrecke allerdings händisch bestimmt werden, werden in der folgenden Auswertung nur zwei Nachkommastellen berücksichtigt.

3.5.2 Horizontale Vermessung eines Alignerschnittes

Bei der zweiten Art von Aufnahmen wurden zuerst Alignerfolie und Unterfolie vom Gipsmodell abgelöst und die Alignerfolie in der horizontalen Ebene vermessen. Im Vergleich zu der Messmethodik „a vertice“ handelt es sich hierbei um ein destruktives Messverfahren, da die Aligner nach dem durchgeführten Schnitt nicht weiter eingesetzt werden können und auch die dünnen Unterfolien bei der Ablösung zerstört werden. Zur Erhöhung der statistischen Aussagekraft wurden pro Kombination aus Alignerstärke, Attachmentdurchmesser und –höhe jeweils 8 Aligner angefertigt. Jede Alignerfolie wurde nach Ablösen vom Gipsmodell entlang der Schnittgerade durch den Mittelpunkt der Abformung des zylindrischen Attachment-Körpers zerschnitten, danach wurden die Teile auf Objektträgern durch eine dünne Schicht Sekundenkleber befestigt. Diese Maßnahme wurde zur Sicherstellung der Position benötigt, damit die Aligner-Teile sich während der Anfertigung der Aufnahmen nicht verbiegen oder sich von der vorbestimmten Position vor der Mikroskopkamera wegbewegen konnten.

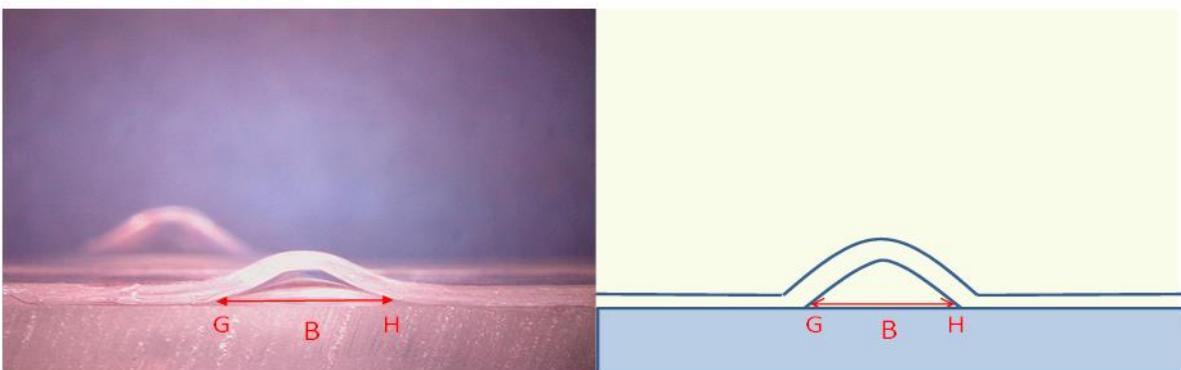


Abbildung 6: Darstellung der Vermessung des Aligners bei einer Aufnahme nach Zerschneiden entlang der Schnittgerade durch den Mittelpunkt des zylindrischen Beispielattachments. Das Maß B entspricht dem Abstand der beiden sich gegenüberliegenden Kontaktpunkte G und H von Alignerfolie und Gipsmodell.

Gemessen wurde hier bei allen 8 Alignern jeweils der Abstand B zwischen den beiden sich gegenüberliegenden Kontaktpunkten G und H von Aligner und Gipsmodell, wie in der Abbildung 6 zu sehen ist. In Kapitel 4.2 finden sich zu jeder Messreihe von acht mit gleichen Spezifikationen hergestellten Alignern die entsprechenden Extremwerte, der Mittelwert sowie die Standardabweichung wieder.

Zusätzlich wurde noch eine zweite Reihe ähnlicher Versuche gemacht, die sich durch eine Vertiefung im Gipsmodell um jedes Beispielattachment charakterisieren lässt. Diese Vertiefung von 0,8 mm Tiefe, gemessen unmittelbar an dem Beispielattachment, umläuft jeden der zylindrischen Körper in einem radialen Abstand vom Rand des Attachments von 2,0 mm (in Abbildung 7 entsprechend mit „b“ und „a“ gekennzeichnet). Dieser Abstand wurde vom Außenumfang der Beispielattachments abgemessen. Ein Überblick der beiden Aufbauten mit Schnitt wird in nachfolgender Abbildung 7 gezeigt.

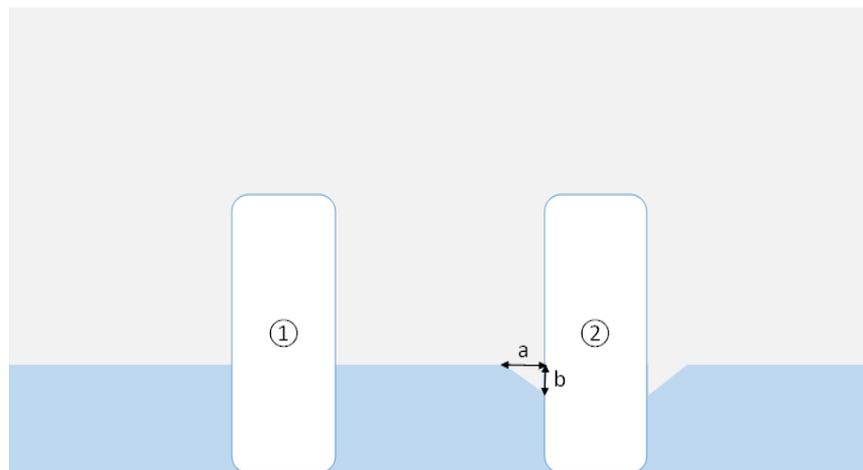


Abbildung 7: Schematische Darstellung von den unterschiedlichen Charakteristika der Aufbauten der beiden Messreihen, nach Zerschneiden der Alignerfolien und Vermessen der Distanz in der horizontalen Ebene. Mit ① wurde ein zylindrisches Beispielattachment abgebildet, dessen Wände einen rechten Winkel mit dem darunterliegenden Gipsmodell bilden, während bei ② zusätzlich im Gipsmodell eine Vertiefung mit einem radialen Abstand $a=2$ mm vom Attachment und einer Tiefe $b=0,8$ mm ausgeführt wurde.

Wie bei der Versuchsgruppe davor wurden erneut Aufnahmen mit der Mikroskopkamera MIRAZOOM angefertigt, die optisch mithilfe der dazugehörigen Software vermessen und ausgewertet wurden. Die Ergebnisse sind wieder in Tabellen und Diagrammen zusammengefasst und mit den anderen zwei

Messreihen mit Hilfe der im nächsten Absatz beschriebenen statistischen Analysemethoden verglichen.

Generell ist anzumerken, dass die gemessenen Abstandswerte der Messmethodik „a vertice“ nicht direkt mit denen der horizontalen Messmethodik mit Alignerschnitt verglichen werden können. Der Grund dafür ist im Kapitel 5.1 Methodenkritik nachzulesen.

3.6 Statistische Datenanalyse

Die statistische Analyse der Messdaten erfolgte mit dem Programm SPSS (Version 25, IBM, Armonk, USA). Nach einer Zusammenfassung aller Ergebnisse der drei Messreihen und der dazugehörigen Messparameter wurden umfangreiche statistische und grafische Datenanalysen durchgeführt. Für die deskriptive Statistik wurden Tabellen mit Anzahl der Messwerte, Mittelwert, Standardabweichung, Median, sowie Minimal- und Maximalwert erstellt. Die folgende schließende statistische Auswertung erfolgte auf Grund der nicht durchgängig vorhandenen Normalverteilung der Messwerte und wegen der geringen Fallzahlgröße mit Hilfe eines nicht parametrischen Verfahrens, dem Kruskal-Wallis-Test. Das Signifikanzniveau wurde auf $p < 0.05$ festgelegt.

4 Ergebnisse

Es wurden Messungen mit allen drei Aligner Folienstärken durchgeführt und jeweils deren Passgenauigkeit zu den einzelnen Beispielattachments überprüft. Auf den folgenden Seiten werden die erarbeiteten Ergebnisse dieser Messungen in drei Abschnitte gegliedert. Kapitel 4.1 gibt Auskunft über diese Passgenauigkeit, ermittelt durch vertikale Mikroskopkameraaufnahmen („a vertice“) von den Attachments mit den darüber tiefgezogenen Alignern. In Kapitel 4.2 wird die Passgenauigkeit der Alignerfolien bei Vermessung in der horizontalen Ebene nach einem Schnitt dargestellt. Kapitel 4.3 befasst sich mit einer Versuchsreihe die sich derselben Messmethodik bedient, die aber durch eine zusätzliche Vertiefung auf dem Gipsmodell andere Charakteristika aufweist. Kapitel 4.4 stellt die Auswertungen der statistischen Datenanalyse dar.

Aus den Messreihen wurden Tabellen und Boxplotdiagramme erarbeitet, die ebenfalls in den folgenden Kapiteln vorgestellt werden. Alle Einzelwerte sind in der auf CD gebrannten Rohdatensammlung zu finden.

4.1 Passgenauigkeitsbestimmung "a vertice"

In diesem Kapitel wird die Bestimmung der Passgenauigkeit von Aligner zu Attachment durch Aufnahmen "a vertice", wie in Kapitel 3.5.1 beschrieben, präsentiert. Die Passgenauigkeit wird dabei durch den gemessenen Abstand vom äußeren Umfang des Attachments zu dem Kontaktpunkt zwischen Aligner und Gipsmodell repräsentiert. Dieser Abstand wird nachfolgend als Mittelwert bezeichnet, weil er, wie in oben genanntem Kapitel nachzulesen, der Durchschnitt aus den vier Roh-Messwerten ist. Außerdem wird jeweils die dabei ermittelte Standardabweichung angegeben.

In Tabelle 5, Tabelle 6 und Tabelle 7 werden die so ermittelten Werte für drei Durchmesser der Beispielattachments und jeweils fünf Attachmenthöhen dargestellt. Die Ergebnisse werden des Weiteren auch in graphischer Form von Höhe-/Abstandsdiagrammen präsentiert. Dabei befinden sich für jeden der drei

Durchmesser die Höhe des Attachments auf der X-Achse und der Mittelwert des Abstands auf der Y-Achse. Eine genauere Beschreibung der erwähnten Parameter findet man in Kapitel 3.3.

Im nächsten Abschnitt werden zunächst die Ergebnisse von Alignern mit einer Folienstärke von 0,500 mm und einem Durchmesser der Alignerfolie von 125 mm dargestellt. In den darauffolgenden zwei Abschnitten werden Aligner mit Folienstärken von 0,625 mm und 0,750 mm bei gleichbleibendem Durchmesser eingesetzt.

4.1.1 Aligner mit Folienstärke 0,500 mm

Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, wird hier der Mittelwert zwischen dem äußeren Umfang jedes Beispielattachments und dem Kontaktpunkt der Alignerfolien mit dem Gipsmodell angeführt und auf diesem Weg die Passgenauigkeit der jeweiligen Aligner bestimmt. Die Veranschaulichung erfolgt durch kombinierte Tabellen und Boxplotdiagramme für die verschiedenen Attachmentdurchmesser und die zu den Abstands-Mittelwerten errechneten Standardabweichungen.

Tabelle 5: Mittelwerte des Abstands bei den fünf Höhen und der drei Durchmesser der Beispielattachments bei einer Folienstärke von 0,500 mm der Aligner. Legende: N – Anzahl der Messungen, MW – Mittelwert, SD – Standardabweichung, kursiv: kleinster und größter Mittelwert.

Attachment-Durchmesser [mm]	Attachment-Höhe [mm]	Gemessene Abstände [mm]					
		N	MW	SD	Min	Max	Median
0,9	0,5	4	0,81	0,12	0,67	0,97	0,79
	1,0	4	1,08	0,16	0,93	1,23	1,07
	1,5	4	1,07	0,30	0,63	1,29	1,18
	2,0	4	0,50	0,33	0,19	0,83	0,49
	2,5	4	1,10	0,44	0,66	1,72	1,01
1,5	0,5	4	0,40	0,08	0,30	0,49	0,40
	1,0	4	0,78	0,16	0,60	0,97	0,77
	1,5	4	1,45	0,10	1,37	1,60	1,42
	2,0	4	1,72	0,15	1,50	1,83	1,76
	2,5	4	1,70	0,51	1,00	2,11	1,85
2,5	0,5	4	0,84	0,17	0,62	0,97	0,90
	1,0	4	0,36	0,10	0,27	0,49	0,34
	1,5	4	1,01	0,05	0,95	1,06	1,02
	2,0	4	2,00	0,27	1,78	2,38	1,93
	2,5	4	2,31	0,32	2,02	2,74	2,24

Die oben gezeigte Tabelle 5 und nachfolgende Abbildung 8 zeigen einen Wertebereich bei den Mittelwerten der ermittelten Abstände von 0,36 bis 2,31 mm. Der jeweilige kleinste bzw. größte Mittelwert ist hier, wie in allen folgenden Abschnitten in den Tabellen, kursiv gekennzeichnet. Der kleinste Mittelwert von 0,36 mm befindet sich bei einem Attachmentdurchmesser von 2,5 mm und einer Höhe von 1,0 mm, der größte Mittelwert hingegen liegt bei dem größten Attachment, nämlich mit einem Diameter von 2,5 mm und einer Höhe von 2,5 mm.

Bei der Messreihe mit 0,9 mm Durchmesser zeigen sich das Mittelwertminimum von 0,50 mm bei einer Höhe von 2,0 mm, und das Mittelwertmaximum von 1,10 mm bei einer Höhe von 2,5 mm. Bei der Messreihe mit 1,5 mm Durchmesser zeigen sich der kleinste Mittelwert von 0,40 mm bei einer Attachmenthöhe von 0,5 mm und der größte Mittelwert von 1,72 mm bei einer Höhe von 2,0 mm. Bei der Messreihe mit einem Attachmentdurchmesser von 2,5 mm wurden der Minimalmittelwert von 0,36 mm bei einer Höhe von 1,0 mm und der Maximalmittelwert von 2,31 mm bei 2,5 mm Höhe ermittelt.

Im Falle der Messreihe mit 1,5 mm Durchmesser steigen, wie in Abbildung 8 ersichtlich, die Abstandswerte kontinuierlich mit dem Verlauf der Attachmenthöhe an und gehen ab einer Höhe von 2,0 mm in ein Plateau über. Die verbleibenden zwei Messreihen bei 0,9 und 2,5 mm Attachmentdurchmesser zeigen keinen gleichmäßigen Verlauf.

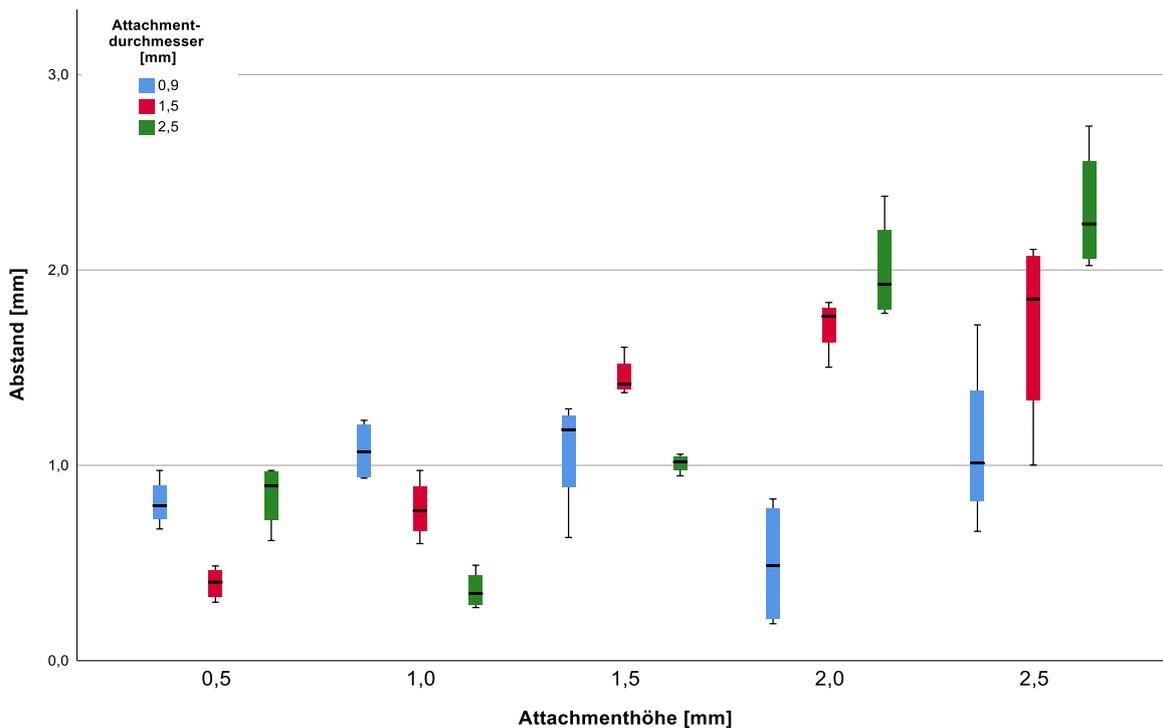


Abbildung 8: Boxplots der ermittelten Abstandswerte. Abgebildet sind hier die Messwerte vom Messverfahren „a vertice“ für Beispielattachments mit einem Durchmesser von 0,9 mm, 1,5 mm und 2,5 mm, die mit Alignerfolien mit einer Stärke von 0,500 mm überzogen wurden.

Insgesamt kann man bei den vorliegenden Messungen bei einer Folienstärke von 0,500 mm zwei markante Mittelwerte erkennen. Einer davon repräsentiert mit einem Wert von 0,36 mm gleichzeitig auch das absolute Minimum der drei Messreihen und liegt bei einem Attachmentdurchmesser von 2,5 mm und einer Attachementhöhe von 1,0 mm. Der zweite Ausreißer mit einem Mittelwert von 0,50 mm tritt bei einem Durchmesser von 0,9 mm und einer Attachementhöhe von 2,0 mm auf. Damit liegt dieser Wert weit außerhalb des schmalen Wertebereichs von 0,81 bis 1,10 mm und stellt der Grund für den ungleichmäßigen Verlauf dieser Messreihe mit 0,9 mm Attachmentdurchmesser dar.

Außerdem ist in Abbildung 8 eine unterschiedlich breite Streubreite der Werte auch graphisch erkennbar. Die größten Streuungen zeigen sich dabei generell in den Messungen bei Attachementhöhen von 2,0 und 2,5 mm, sowie bei einer Kombination von 0,9 mm Attachmentdurchmesser und 1,5 mm Höhe.

4.1.2 Aligner mit Folienstärke 0,625 mm

Analog zu Kapitel 4.1.1 werden hier die Ergebnisse zur Passgenauigkeitsbestimmung der Abstandsmessungen „a vertice“ dargestellt. Die hier verwendeten Aligner weisen jedoch eine größere Folienstärke von 0,625 mm auf. Alle Werte dazu wurden in Tabelle 6 aufgelistet und in Abbildung 9 illustriert.

Tabelle 6: Mittelwerte des Abstands bei den fünf Höhen und der drei Durchmesser der Beispielattachments bei einer Folienstärke von 0,625 mm der Aligner. Legende: N – Anzahl der Messungen, MW – Mittelwert, SD – Standardabweichung, kursiv: kleinster und größter Mittelwert.

Attachment-Durchmesser [mm]	Attachment-Höhe [mm]	Gemessene Abstände [mm]					
		N	MW	SD	Min	Max	Median
0,9	0,5	4	0,80	0,11	0,69	0,96	0,77
	1,0	4	1,00	0,06	0,95	1,09	0,98
	1,5	4	0,96	0,10	0,83	1,07	0,96
	2,0	4	1,16	0,26	0,82	1,39	1,22
	2,5	4	1,19	0,11	1,06	1,32	1,19
1,5	0,5	4	0,51	0,04	0,47	0,54	0,51
	1,0	4	1,10	0,11	1,00	1,22	1,09
	1,5	4	1,18	0,21	0,89	1,39	1,23
	2,0	4	1,12	0,25	0,77	1,34	1,18
	2,5	4	2,04	0,26	1,76	2,33	2,03
2,5	0,5	4	0,70	0,17	0,54	0,92	0,67
	1,0	4	0,93	0,06	0,88	1,01	0,90
	1,5	4	0,93	0,19	0,73	1,18	0,90
	2,0	4	1,34	0,04	1,29	1,38	1,35
	2,5	4	1,76	0,11	1,61	1,87	1,77

Der Wertebereich der gemessenen Aligner mit 0,625 mm Folienstärke umfasst Mittelwerte von minimal 0,51 bei einem Attachmentdurchmesser von 1,5 mm und einer Attachmenthöhe von 0,5 mm, bis maximal 2,04 mm bei dem gleichen Durchmesser von 1,5 mm und einer Höhe von 2,5 mm. Bei der Messreihe mit 0,9 mm Durchmesser liegen das Minimum von 0,80 mm bei der geringsten Höhe von 0,5 mm und das Maximum von 1,19 mm bei dem höchsten Attachment mit 2,5 mm. Bei der Messreihe mit 1,5 mm Durchmesser können der minimale Wert von 0,51 mm erneut bei der geringsten Höhe von 0,5 mm und der maximale Mittelwert von 2,04 mm bei der größten Höhe von 2,5 mm abgelesen werden. Bei der Messreihe des Attachments mit dem größten Durchmesser, nämlich 2,5 mm, tritt der kleinste Mittelwert von 0,70 mm wieder bei einer Höhe von 0,5 mm auf. Der maximale Wert von 1,76 mm wird dagegen wiederum bei der Höhe von 2,5 mm ermittelt.

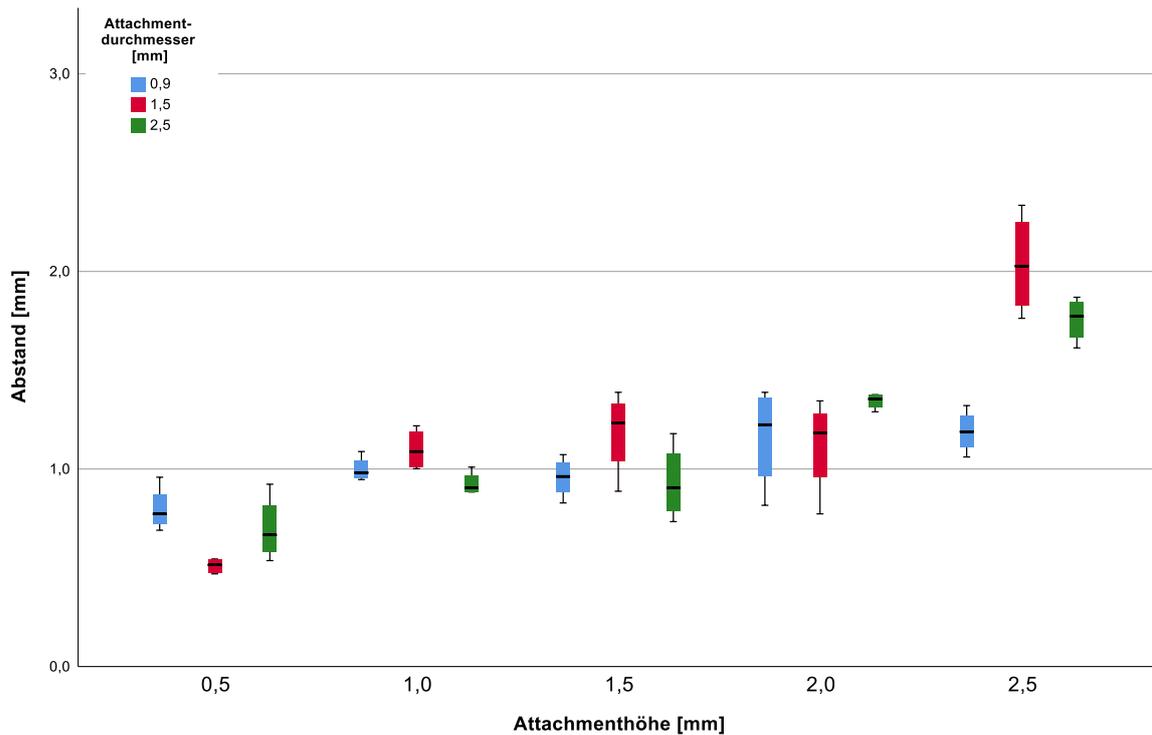


Abbildung 9: Boxplots der ermittelten Abstandswerte. Abgebildet sind hier die Messwerte vom Messverfahren „a vertice“ für Beispielattachments mit einem Durchmesser von 0,9 mm, 1,5 mm und 2,5 mm, die mit Alignerfolien mit einer Stärke von 0,625 mm überzogen wurden.

Des Weiteren lässt sich bei Abbildung 9 als grobe Tendenz eine geringe kontinuierliche Steigung der Mittelwerte über die jeweiligen Attachementhöhen feststellen. Außerdem kann man beobachten, dass innerhalb der jeweiligen Attachmentdurchmesser die Abstände über alle untersuchten Attachementhöhen nahe beieinanderliegen. Eine Ausnahme dieses Trends bilden die Messungen bei der Höhe von 2,5 mm und den Durchmessern von 1,5 bzw. 2,5 mm.

Darüber hinaus kann man in Abbildung 9 bei einigen Kombinationen von Attachment-Parametern größere Streubreiten ablesen. Dies ist der Fall sowohl bei einem Attachmentdurchmesser von 0,9 mm und einer Attachementhöhe von 2,0 mm, als auch bei einem Durchmesser von 1,5 mm und Höhen von 1,5 und 2,0 und 2,5 mm sowie bei einem Durchmesser von 2,5 mm und Höhen von 0,5 und 1,5 mm.

4.1.3 Aligner mit Folienstärke 0,750 mm

Bei den Messreihen für diesen Abschnitt wurde eine dickere Alignerfolie mit einer Stärke von 0,750 mm verwendet, wobei die restlichen Parameter unverändert blieben. Verglichen zu den Kapiteln 4.1.1 und 4.1.2 wird auch hier die Relation der Passgenauigkeit in Form der Mittelwerte, der zugehörigen Standardabweichungen, Minimal- und Maximalwerte sowie des Medians, zu den drei Durchmessern und den fünf Höhen der angefertigten Beispielattachments präsentiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 aufgeführt und in Abbildung 10 dargestellt.

Tabelle 7: Mittelwerte des Abstands bei den fünf Höhen und der drei Durchmesser der Beispielattachments bei einer Folienstärke von 0,750 mm der Aligner. Legende: N – Anzahl der Messungen, MW – Mittelwert, SD – Standardabweichung, kursiv: kleinster und größter Mittelwert.

Attachment-Durchmesser [mm]	Attachment-Höhe [mm]	Gemessene Abstände [mm]					
		N	MW	SD	Min	Max	Median
0,9	0,5	4	1,12	0,55	0,77	1,93	0,88
	1,0	4	1,12	0,18	0,96	1,39	1,10
	1,5	4	1,19	0,21	1,00	1,44	1,16
	2,0	4	1,73	0,39	1,16	2,03	1,86
	2,5	4	1,06	0,35	0,82	1,56	0,92
1,5	0,5	4	0,73	0,12	0,57	0,87	0,74
	1,0	4	0,88	0,09	0,77	0,96	0,90
	1,5	4	0,86	0,05	0,80	0,92	0,85
	2,0	4	1,97	0,16	1,73	2,12	2,01
	2,5	4	1,41	0,31	1,15	1,80	1,35
2,5	0,5	4	0,25	0,13	0,13	0,43	0,23
	1,0	4	0,62	0,12	0,53	0,80	0,58
	1,5	4	1,14	0,26	0,83	1,36	1,18
	2,0	4	0,82	0,31	0,64	1,29	0,68
	2,5	4	2,17	0,24	1,86	2,44	2,19

Der gesamte Wertebereich der Mittelwerte ist mit 0,25 mm bis 2,17 mm anzugeben. Bei der ersten Messreihe mit 0,9 mm Durchmesser wurde der kleinste Mittelwert von 1,06 mm bei einer Attachmenthöhen von 2,5 mm gefunden, der größte Mittelwert von 1,73 mm liegt dagegen bei einer Höhe von 2,0 mm. Bei der zweiten Messreihe mit 1,5 mm Durchmesser beträgt der kleinste Mittelwert 0,73 mm bei einer Höhe von 0,5 mm und der größte Mittelwert 1,97 mm ebenso bei 2,0 mm Attachmenthöhe. Bei der dritten Messreihe mit 2,5 mm Durchmesser wurde der kleinste Mittelwert von 0,25 mm bei einer Höhe von 0,5 mm ermittelt und der größte Mittelwert von 2,17 mm bei dem höchsten Attachment von 2,5 mm. Der minimale Einzelwert liegt bei tatsächlich 0,13 mm.

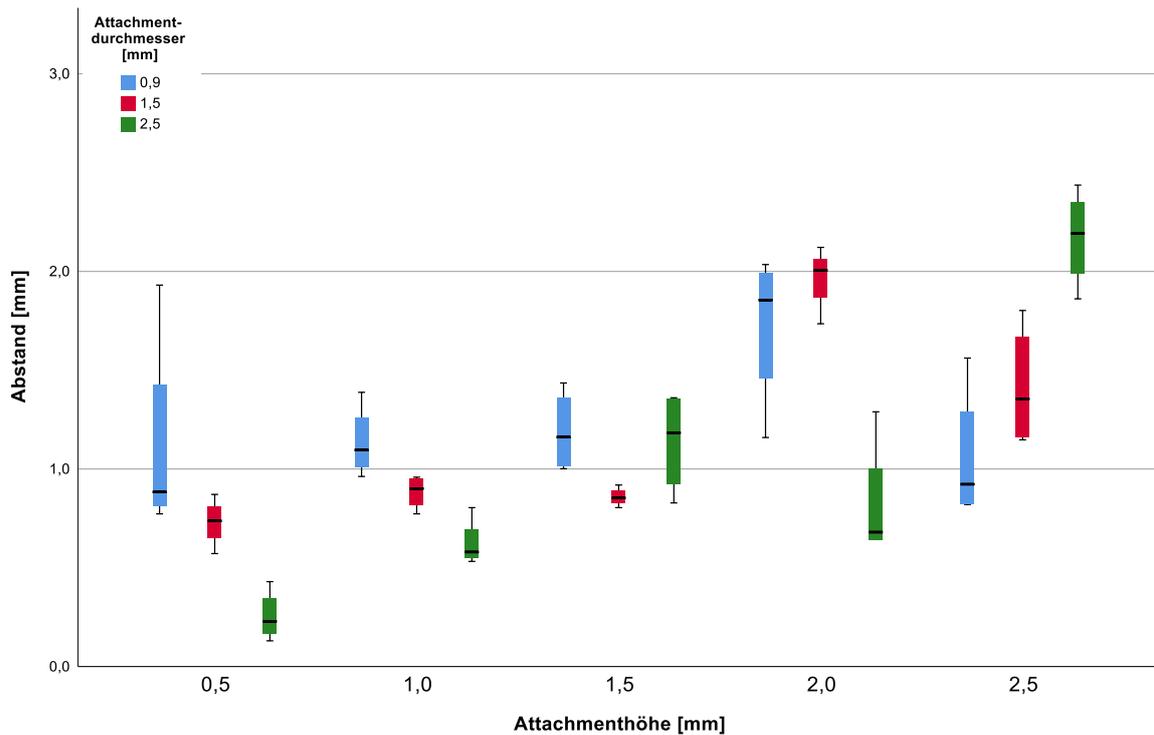


Abbildung 10: Boxplots der ermittelten Abstandswerte. Abgebildet sind hier die Messwerte vom Messverfahren „a vertice“ für Beispielattachments mit einem Durchmesser von 0,9 mm, 1,5 mm und 2,5 mm, die mit Alignerfolien mit einer Stärke von 0,750 mm überzogen wurden.

Bei Betrachtung von Abbildung 10 kann man als groben Trend einen Anstieg der Mittelwerte über die Höhe der Beispielattachments erkennen. Ausnahmen sind bei dem Attachmentdurchmesser von 0,9 mm der Mittelwert 1,06 mm bei dem höchsten Attachment mit 2,5 mm, bei einem Attachmentdurchmesser von 1,5 mm unterbricht der Mittelwert 0,86 bei einer Höhe von 1,5 mm die ansteigende Reihe, der um lediglich 0,02 mm niedriger ist als der vorhergehende. Auffälligerweise zeigt sich auch bei einem Durchmesser von 1,5 mm bei dem höchsten Attachment mit 2,5 mm wieder ein niedriger Mittelwert von 1,41 mm, während der bei einer Attachementhöhe von 2,0 mm ermittelte Wert bei höheren 1,97 mm liegt. Bei der dritten Messreihe mit einem Attachmentdurchmesser von 2,5 mm stört ein Mittelwert von 0,82 mm bei einer Höhe von 2,0 mm den ansonsten gleichmäßig und monoton steigenden Trend. Auf Abbildung 10 ist des Weiteren zu erkennen, dass bei dem kleinsten Durchmesser des Beispielattachments von 0,9 mm die Werte des jeweils gemessenen Abstandes nur innerhalb eines kleinen Bereichs fast von unter einem Millimeter variieren. Bei beiden Beispielattachments mit Diameter 0,9 und 1,5 mm

steigt der Mittelwert bei einer Attachmenthöhe von 2,0 mm drastisch an, während bei dem Attachment mit dem größten Durchmesser – 2,5 mm – eine genau umgekehrte Tendenz beobachtet wird. Der Mittelwert erhöht sich dort über die Attachmenthöhe stetig bis zu einer Höhe von 1,5 mm auf einen Wert von 1,14 mm, worauf der Mittelwert auf 0,82 mm fällt und danach bei einer Höhe von 2,5 mm wieder steigt. Die Ergebnisse bei 0,9 mm Attachmentdurchmesser und Attachmenthöhen von 0,5 und 2,0 sowie 2,5 mm fallen in Abbildung 10 durch eine große Streuung auf. Eine vergleichbare Situation mit einer nur geringfügig niedrigeren Streuungsbreite ergibt sich bei den Messungen von 1,5 mm Attachmentdurchmesser und einer Höhe von 2,5 mm sowie einem Durchmesser von 2,5 mm und einer Höhe von 2,0 mm.

4.2 Passgenauigkeitsbestimmung nach einem Schnitt

Das Kapitel 4.2 gibt Information über die Passgenauigkeit der hergestellten Aligner zu Gipsmodell und Beispielattachment bei Vermessung in der horizontalen Ebene nach einem Schnitt durch den Aligner. Da es dadurch ein destruktives Verfahren ist, wurden jeweils acht Aligner mit denselben Parametern angefertigt und vermessen. Eine genaue Beschreibung des Versuchsaufbaues und der Messmethodik befindet sich in Kapitel 3.5.2. Analog zu Kapitel 4.1 wurden hier alle geometrischen Messungen mithilfe einer Mikroskopkamera und der dazugehörigen Software durchgeführt. Des Weiteren werden die Ergebnisse wieder in Form von Tabellen und Höhe-/Abstandsdiagrammen dargestellt. In Tabelle 8 bis Tabelle 10 werden sowohl die Mittelwerte und Standardabweichungen der jeweils acht Aligner, als auch die dazugehörigen Maximum- und Minimumwerte zusammengefasst. Zusätzlich wurden für jede Kombination aus Alignerfolienstärke, Attachmentdurchmesser und –höhe auch die Medianwerte berechnet. Bei den Diagrammen wird auf der X-Achse die Höhe des Beispielattachments aufgetragen und auf der Y-Achse repräsentiert der gemittelte Abstand zwischen den Kontaktpunkten von Aligner und Gipsmodell die Passgenauigkeit.

Im folgenden Abschnitt werden zunächst die Ergebnisse von Alignern mit Folienstärke 0,500 mm bei unterschiedlichen Attachmentdurchmessern und -höhen

dargestellt. In den zwei darauffolgenden Abschnitten werden dann Aligner mit Folienstärken von 0,625 mm und 0,750 mm eingesetzt.

4.2.1 Aligner mit Folienstärke 0,500 mm

In diesem Kapitel wird bei einer Folienstärke von 0,500 mm die Passgenauigkeit der jeweiligen Aligner zum Gipsmodell und zum Beispielattachment bei den drei Durchmessern – 0,9 mm, 1,5 mm und 2,5 mm – und fünf Höhen präsentiert.

Tabelle 8: Abstandsmittelwerte bei Alignerschnitt der acht Aligner für eine Alignerfolienstärke von 0,500 mm bei den drei Attachmentdurchmessern und fünf Attachmenthöhen. Legende: N – Anzahl der Messungen, MW – Mittelwert, SD – Standardabweichung, Min – Minimumwert, Max – Maximalwert.

Attachment-Durchmesser [mm]	Attachment-Höhe [mm]	N	Strecke zwischen den beiden sich gegenüberliegenden Kontaktpunkten G und H [mm]				
			MW	SD	Min	Max	Median
0,9	0,5	8	7,24	0,74	6,08	8,80	7,06
	1,0	8	8,65	3,07	3,15	12,21	9,62
	1,5	8	9,14	3,09	1,34	12,19	9,76
	2,0	8	10,14	3,69	2,04	11,15	10,90
	2,5	8	9,62	1,11	8,23	9,32	9,34
1,5	0,5	8	6,37	0,87	4,99	8,09	6,33
	1,0	8	8,44	1,08	7,31	10,61	8,12
	1,5	8	10,67	2,20	8,01	15,37	10,54
	2,0	8	11,53	2,13	7,05	14,65	12,05
	2,5	8	9,66	1,18	8,31	12,31	9,45
2,5	0,5	8	8,68	1,37	6,38	11,49	8,28
	1,0	8	10,03	1,69	7,95	13,79	9,91
	1,5	8	10,22	2,28	6,06	13,97	10,55
	2,0	8	12,19	2,00	8,19	15,21	12,07
	2,5	8	10,74	1,42	8,72	13,90	10,54

In Tabelle 8 erkennt man für den Attachmentdurchmesser 0,9 mm bis auf eine Ausnahme bei einer Höhe von 2,5 mm eine kontinuierliche Steigung des Abstandes mit dem Anstieg der Attachmenthöhen. Die Mittelwerte befinden sich in einem Wertebereich von 7,24 mm bei der Attachmenthöhe von 0,5 mm bis zu 10,14 mm bei einer Höhe von 2,0 mm. Das absolute Minimum der acht Einzelwerte von 1,34 mm tritt bei einer Höhe von 1,5 mm auf. Das dazugehörige absolute Maximum beträgt 12,21 mm bei einer Attachmenthöhe von 1,0 mm. Der Medianwert bei diesem Durchmesser zeigt sich in einem Bereich von 7,06 mm bei der Attachmenthöhe von 0,5 mm bis 10,90 mm bei der Höhe von 2,0 mm.

Ähnlich wie schon bei dem kleineren Durchmesser tritt für einen Durchmesser der Beispielattachments von 1,5 mm ein steigender Trend des Mittelwerts auf. Dieser ist nun bei einer Attachmenthöhe von 2,5 mm mit einem niedrigeren Wert von 9,66 mm unterbrochen. Generell konnten hier Mittelwerte in einem Bereich von 6,37 mm bei der Attachmenthöhe von 0,5 mm bis zu 11,53 mm bei der Höhe von 2,0 mm festgestellt werden. Das absolute Minimum der Einzelwerte von 4,99 mm liegt bei einer Attachmenthöhe von 0,5 mm und der absolut größte Einzelwert beträgt in diesem Fall 15,37 mm bei 1,5 mm Höhe. Der niedrigste Medianwert von 6,33 mm liegt hier bei einer Attachmenthöhe von 0,5 mm und der höchste Medianwert von 12,05 mm wurde wieder bei einer Höhe von 2,0 mm gefunden.

Für den Attachmentdurchmesser 2,5 mm lässt sich aus Tabelle 8 entnehmen, dass der Wertebereich der Mittelwerte von 8,68 mm bei einer Attachmenthöhe von 0,5 mm bis zu 12,19 mm bei einer Höhe von 2,0 mm reicht. Bei diesem größten Attachmentdurchmesser von 2,5 mm wurde außerdem der größte Mittelwert aus den Messreihen aller drei Attachmentdurchmesser verzeichnet, welcher bei einem Wert von 12,19 mm und einer Attachmenthöhe von 2,0 mm liegt. Für die Messreihe dieses Attachmentdurchmessers stellt 6,06 mm bei einer Attachmenthöhe von 1,5 mm das Minimum der Einzelwerte dar und der maximale Einzelwert macht bei 2,0 mm Höhe des Beispielattachments 15,21 mm aus. Der Wertebereich des Medians beträgt hier von 8,28 mm bei einer Attachmenthöhe 0,5 mm bis 12,07 mm bei einer Höhe von 2,0 mm und danach fällt der Medianwert wieder ab, wie bei den zwei kleineren Durchmessern.

Abbildung 11 zeigt die Mediane und die Verteilung der Messwerte des Abstandes für alle drei untersuchten Attachmentdurchmesser in Abhängigkeit von der Attachmenthöhe. Bei einem Durchmesser von 0,9 mm zeigen sich bei 1,0 mm und 2,5 mm Höhe größere Streubreiten. Die anderen beiden Durchmesser 1,5 mm und 2,5 mm weisen bei einer Höhe von 1,5 und 2,0 mm eine relativ große Streuung der Werte auf. Erwähnenswert ist auch, dass sich bei einer Höhe von 2,5 mm sowohl der Median als auch die Streuung für die Durchmesser von 0,9 und 1,5 mm in einem relativ ähnlichen Wertebereich befinden.

Die punktuellen Einzelmesswerte, die zum ersten Mal in Abbildung 11 zu erkennen

sind, zeigen Ausreißer, die mehr als das Eineinhalbfache des Interquartilsabstandes ober - oder unterhalb der Diagrammbox liegen. Als Interquartilsabstand wird die Differenz zwischen dem 3. Quartil oben und dem 1. Quartil unten bezeichnet. Zum Beispiel bei dem Durchmesser von 0,9 mm und der Attachmenthöhe 0,5 mm liegt der Interquartilsabstand bei $7,61 - 6,86 = 0,75$ mm und die Ausreißergrenze dementsprechend bei $7,61 + 1,5 \times 0,75 = 8,74$ mm. Der Ausreißer bildet in diesem Fall einen Einzelmesswert von 8,80 mm ab. Desgleichen wurden Ausreißerwerte bei den Durchmessern 1,5 und 2,5 mm festgestellt, sowie bei allen Höhen. Die größte Häufung wurde bei einer Attachmenthöhe von 0,5 mm beobachtet.

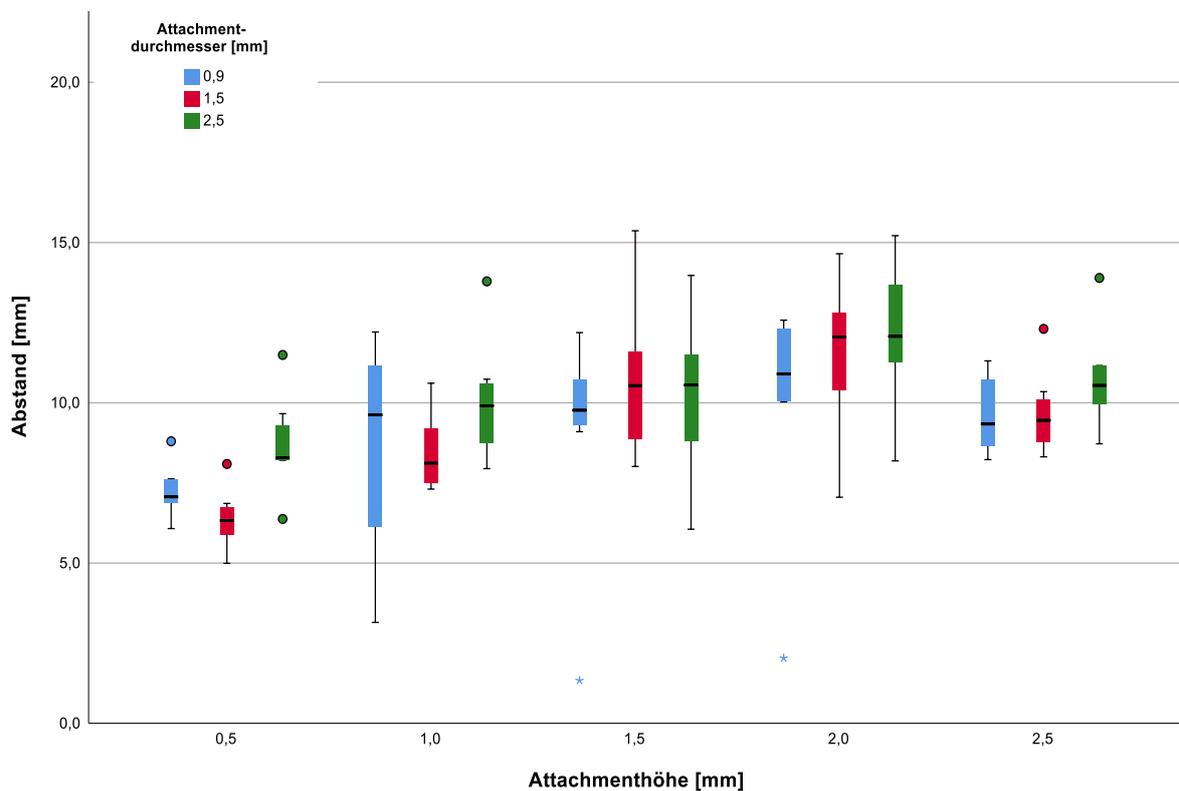


Abbildung 11: Boxplots der ermittelten Abstandswerte. Abgebildet sind hier die Messwerte vom Messverfahren bei Alignerschnitt für Beispielattachments mit einem Durchmesser von 0,9 mm, 1,5 mm und 2,5 mm, die mit Alignerfolien mit einer Stärke von 0,500 mm überzogen wurden.

4.2.2 Aligner mit Folienstärke 0,625 mm

Im folgenden Abschnitt wird noch einmal die Passgenauigkeit von Alignerfolie zum Gipsmodell und Beispielattachment durch die im Kapitel 3.5.2 beschriebene Methode überprüft, diesmal bei einer Alignerfolienstärke von 0,625 mm bei gleichbleibenden Restparametern. Es wurden erneut Messungen mit allen drei

Attachmentdurchmessern durchgeführt. Die Ergebnisse sind ähnlich wie in Abschnitt 4.2.1 in Tabelle 9 und in Abbildung 12 eingegliedert.

Tabelle 9: Abstandsmittelwerte bei Alignerschnitt der acht Aligner für eine Alignerfolienstärke von 0,625 mm bei den drei Attachmentdurchmessern und fünf Attachmenthöhen. Legende: N – Anzahl der Messungen, MW – Mittelwert, SD – Standardabweichung, Min – Minimumwert, Max – Maximalwert.

Attachment-Durchmesser [mm]	Attachment-Höhe [mm]	N	Strecke zwischen den beiden sich gegenüberliegenden Kontaktpunkten G und H [mm]				
			MW	SD	Min	Max	Median
0,9	0,5	8	9,20	2,25	5,72	13,88	8,94
	1,0	8	10,21	2,69	5,82	13,07	10,80
	1,5	8	9,78	3,11	4,60	12,84	10,99
	2,0	8	11,57	2,96	4,65	15,07	12,44
	2,5	8	11,93	2,65	6,84	15,31	12,74
1,5	0,5	8	6,82	2,20	4,19	11,59	6,40
	1,0	8	8,49	2,12	5,18	11,65	8,87
	1,5	8	9,49	1,72	6,81	11,77	9,83
	2,0	8	10,85	1,77	6,68	12,08	11,82
	2,5	8	10,21	1,15	8,32	11,94	10,06
2,5	0,5	8	8,08	1,96	4,50	11,28	8,25
	1,0	8	10,88	1,56	7,85	12,66	11,33
	1,5	8	10,24	2,13	6,67	12,50	11,11
	2,0	8	11,95	0,65	10,98	13,03	11,99
	2,5	8	11,12	1,79	7,83	14,00	11,29

Wie Tabelle 9 zeigt, ist bei der Mittelwertbestimmung des Beispielattachments mit dem Durchmesser 0,9 mm ein stetiger Anstieg des Wertes zu sehen außer bei dem Mittelwert, abgelesen bei der Attachmenthöhe 1,5 mm. Der Mittelwert fällt hier von 10,21 mm auf 9,78 mm und steigt danach wieder auf 11,57 mm bei einer Attachmenthöhe von 2,0 mm. Der Maximalwert unter den Einzelwerten beträgt 15,31 mm bei einer Höhe des Beispielattachments von 2,5 mm, während der minimale Einzelwert bei 4,60 mm und einer Attachmenthöhe von 1,5 mm liegt. Die Medianwerte liegen bei diesem Attachmentdurchmesser im Wertebereich von 8,94 mm bei einer Attachmenthöhe von 0,5 mm bis 12,74 mm bei der Höhe 2,5 mm. Aus Tabelle 9 geht bei einem Attachmentdurchmesser von 1,5 mm hingegen ein kontinuierlicher aber schwacher Anstieg der Mittelwerte über den Verlauf der Attachmenthöhen hervor. Die Mittelwerte befinden sich in einem Wertebereich von 6,82 mm bei der Attachmenthöhe von 0,5 mm bis zu 10,85 mm bei der Höhe von 2,0 mm. Der maximale Einzelwert der durchgeführten Messungen beläuft sich auf 12,08 mm bei einer Attachmenthöhe von 2,0 mm und der minimale Einzelwert

beträgt 4,19 mm bei 0,5 mm Höhe des Beispielattachments. Der niedrigste Medianwert von 6,40 mm tritt bei der Attachmenthöhe 0,5 mm auf, während der höchste Medianwert von 11,82 mm bei der Höhe 2,0 mm zu erkennen ist.

Als Haupttendenz lässt sich für einen Attachmentdurchmesser von 2,5 mm in Tabelle 9 erkennen, dass je höher die Beispielattachments sind, desto größer der Mittelwert ist. Mittelwerte, die von dieser Feststellung ausgenommen sind, sind die Werte von 10,24 mm bei einer Attachmenthöhe von 1,5 mm und der Wert von 11,12 mm bei 2,5 mm Höhe.

Der Mittelwertbereich der Abstände reicht bei dem Attachmentdurchmesser 2,5 mm von 8,08 mm bei der Attachmenthöhe von 0,5 mm bis zu einem Wert von 11,95 mm bei der Höhe von 2,0 mm. Den absoluten maximalen Wert bildet der Einzelwert 14,00 mm, der bei einer Attachmenthöhe von 2,5 mm gemessen wurde. Das absolute Minimum bildet der Einzelwert von 4,50 mm, gemessen bei 0,5 mm Attachmenthöhe. Der niedrigste Medianwert 8,25 mm zeigt sich bei diesem Durchmesser erneut bei der niedrigsten Attachmenthöhe 0,5 mm. Der höchste Medianwert von 11,99 mm ist bei einer Höhe von 2,0 mm.

Abbildung 12 stellt die Mittelwerte des Abstandes und die sich daraus ergebenden Streuungen bei allen drei Durchmessern der Beispielattachments und über deren Höhen dar. Bei Betrachtung der Boxen für die einzelnen Gruppen von Attachmenthöhen fällt auf, dass es jeweils einen M-förmigen Verlauf der Mittelwerte gibt. Die Mittelwerte von 0,9 und 2,5 mm Attachmentdurchmesser sind stets höher als der dazwischen, aber niedriger liegende Mittelwert 1,5 mm. Zusätzlich zeigt sich bei dem Großteil der Ergebnisse aller drei Attachmentdurchmesser eine relativ große Streuung. Auch hier sind bei den Attachmentdurchmessern 0,9 und 1,5 mm Ausreißer unter den Einzelmesswerten zu erkennen. Insgesamt wurden bei der Folienstärke 0,625 mm drei Ausreißerwerte ermittelt, während die Anzahl der deformierten Alignerfolien bei den Folienstärken 0,500 und 0,750 mm wesentlich größer war.

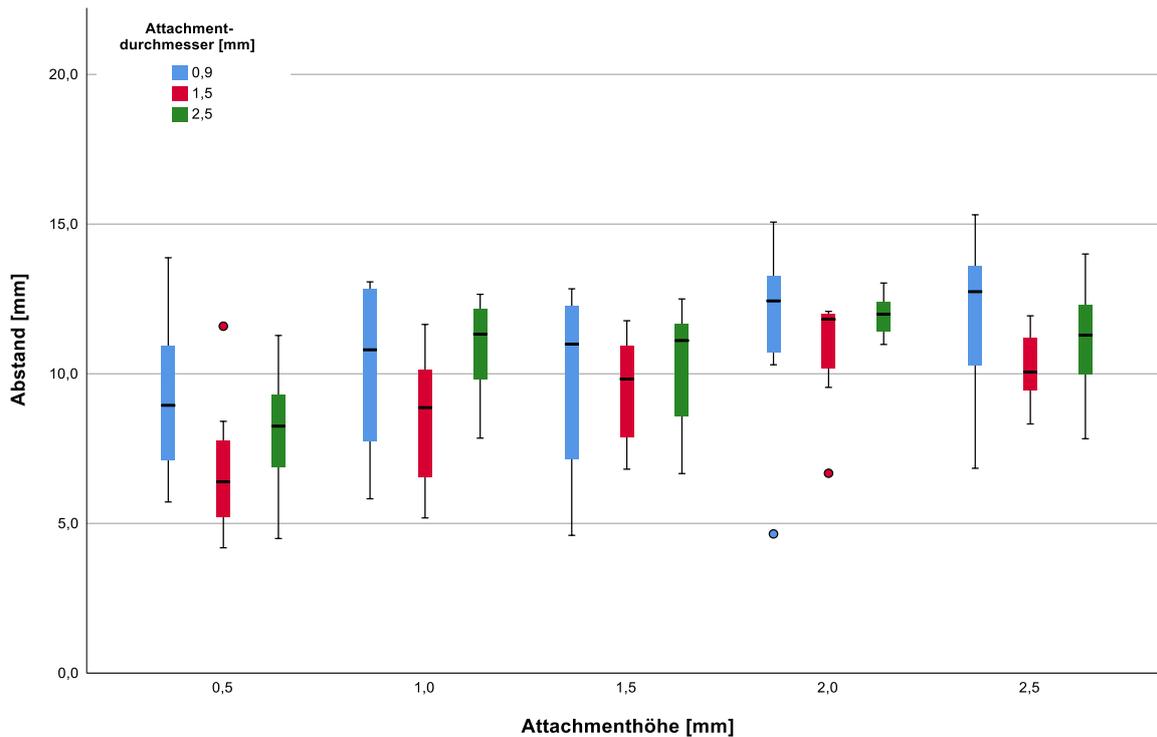


Abbildung 12: Boxplots der ermittelten Abstandswerte. Abgebildet sind hier die Messwerte vom Messverfahren bei Alignerschnitt für Beispielattachments mit einem Durchmesser von 0,9 mm, 1,5 mm und 2,5 mm, die mit Alignerfolien mit einer Stärke von 0,625 mm überzogen wurden.

4.2.3 Aligner mit Folienstärke 0,750 mm

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der horizontalen Messungen von Alignerschnitten analog zu Kapitel 4.2.1 und 4.2.2 dargestellt. In Tabelle 10 und in Abbildung 13 werden die Mittelwerte, die dazugehörigen Standardabweichungen und jeweils Minimum/Maximum der Einzelwerte, sowie die ausgerechneten Medianwerte für jeden der drei Attachmentdurchmesser und fünf -höhen präsentiert. Alle Versuche dieses Abschnittes wurden mit einer Folienstärke von 0,750 mm durchgeführt.

Wie Tabelle 10 für den Attachmentdurchmesser von 0,9 mm zeigt, liegt der Wertebereich der Mittelwerte hier bei 7,77 bis 11,55 mm. Eine Erhöhung des Mittelwertes mit steigender Attachementhöhe ist erkennbar. Eine Ausnahme stellt jedoch der Wert von 10,85 mm bei einer Höhe von 2,5 mm dar, der kleiner ist als sein Vorgänger von 11,55 mm bei 2,0 mm Höhe. Der absolute minimale Einzelwert beträgt 4,41 mm bei der Attachementhöhe 0,5 mm. Das absolute Maximum unter den Einzelwerten ist der Wert 14,59 mm, gemessen bei einer Höhe von 2,0 mm. Der

niedrigste Medianwert 8,06 mm bei diesem Durchmesser liegt bei dem Attachment mit der Höhe 0,5 mm, während der höchste Medianwert 11,59 mm bei der Höhe 2,0 mm zu finden ist.

Tabelle 10: Abstandsmittelwerte bei Alignerschnitt der acht Aligner für eine Alignerfolienstärke von 0,750 mm bei den drei Attachmentdurchmessern und fünf Attachmenthöhen. Legende: N – Anzahl der Messungen, MW – Mittelwert, SD – Standardabweichung, Min – Minimumwert, Max – Maximalwert.

Attachment-Durchmesser [mm]	Attachment-Höhe [mm]	N	Strecke zwischen den beiden sich gegenüberliegenden Kontaktpunkten G und H [mm]				
			MW	SD	Min	Max	Median
0,9	0,5	8	7,77	1,38	4,41	9,61	8,06
	1,0	8	9,04	1,63	5,16	11,02	9,13
	1,5	8	9,68	1,57	5,96	11,20	10,07
	2,0	8	11,55	1,78	7,92	14,59	11,59
	2,5	8	10,85	1,78	7,07	13,14	11,05
1,5	0,5	8	6,85	0,87	5,67	8,53	6,87
	1,0	8	9,52	0,82	8,38	10,90	9,45
	1,5	8	10,29	0,92	9,47	12,20	9,87
	2,0	8	11,71	1,23	9,05	13,16	11,90
	2,5	8	11,50	0,90	10,66	13,60	11,23
2,5	0,5	8	7,56	1,41	4,45	9,03	8,03
	1,0	8	8,78	1,34	7,02	10,89	8,86
	1,5	8	9,99	1,34	6,59	11,07	10,31
	2,0	8	11,01	1,18	8,53	12,72	10,91
	2,5	8	11,21	1,06	9,62	12,86	11,19

Tabelle 10 lässt sich des Weiteren entnehmen, dass bei einem Attachmentdurchmesser von 1,5 mm die Mittelwerte im Bereich von 6,85 mm bis 11,71 mm liegen. Der kleinste Mittelwert von 6,85 mm wurde bei einer Höhe des Attachments von 0,5 mm gemessen und der größte Mittelwert von 11,71 mm bei einer Attachmenthöhe von 2,0 mm. Bei den Einzelwerten liegen das absolute Minimum von 5,67 mm bei der Attachmenthöhe 0,5 mm, und das absolute Maximum von 13,60 mm wurde bei der 2,5 mm Attachmenthöhe gemessen. Es wurden Medianwerte von 6,87 mm bei einer Höhe von 0,5 mm bis 11,90 mm bei einer Höhe von 2,0 mm ausgerechnet.

Aus Tabelle 10 geht auch hervor, dass die Mittelwerte bei dem Attachmentdurchmesser von 2,5 mm in einen Bereich von 7,56 bis 11,21 mm fallen. Es ist eine stetige Zunahme der Mittelwerte über den Anstieg der Attachmenthöhe festzustellen. Der kleinste Mittelwert von 7,56 mm tritt bei einer Attachmenthöhe von 0,5 mm auf und der größte Mittelwert von 11,21 mm zeigt sich bei der Höhe 2,5 mm.

Das absolute Minimum bei den Einzelwerten beläuft sich auf 4,45 mm bei einer Attachmenthöhe von 0,5 mm, während bei einer Höhe von 2,5 mm der absolute maximale Einzelwert von 12,86 mm zu verzeichnen ist. Die Medianwerte bei diesem Durchmesser zeigen diesmal ähnlich der Mittelwerte einen stetigen Anstieg über die Attachmenthöhen. Der niedrigste Medianwert beträgt 8,03 mm bei einer Höhe von 0,5 mm und der höchste Median von 11,19 mm wurde bei einer Attachmenthöhe von 2,5 mm ermittelt.

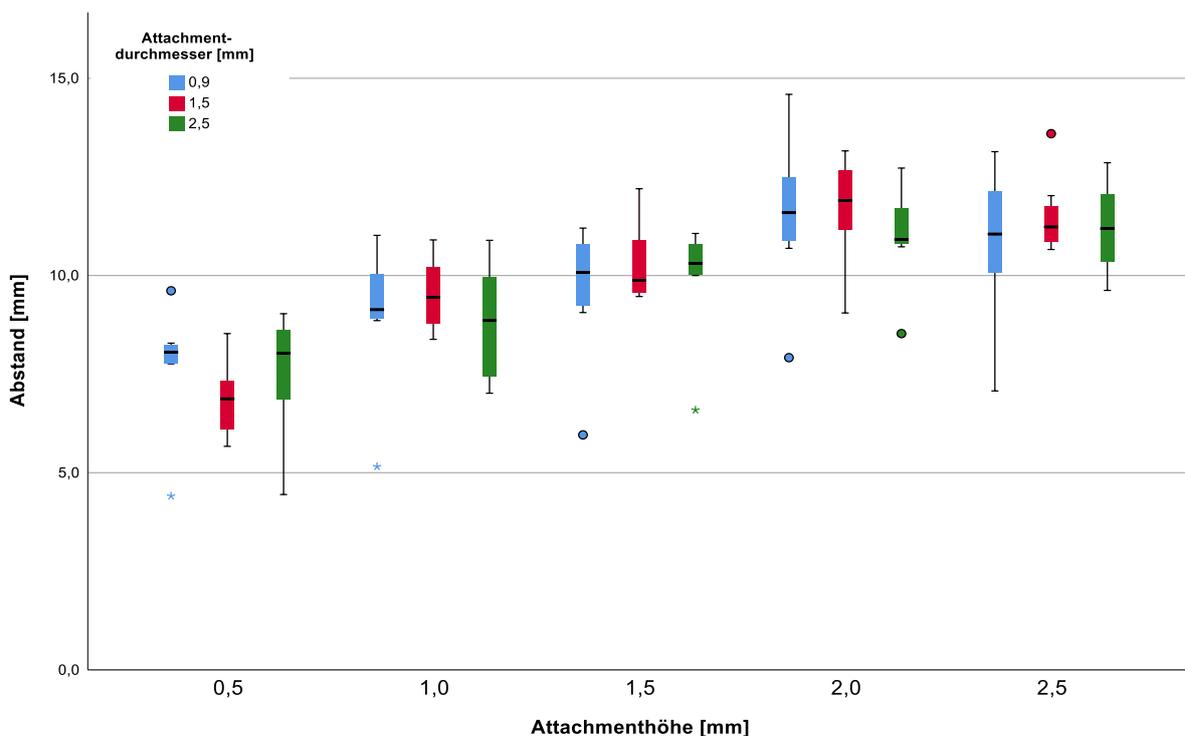


Abbildung 13: Boxplots der ermittelten Abstandswerte. Abgebildet sind hier die Messwerte vom Messverfahren bei Alignerschnitt für Beispielattachments mit einem Durchmesser von 0,9 mm, 1,5 mm und 2,5 mm, die mit Alignerfolien mit einer Stärke von 0,750 mm überzogen wurden

Ähnlich wie bei Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigt Abbildung 13 die bei allen drei Messreihen mit Attachmentdurchmessern von 0,9 mm, 1,5 mm und 2,5 mm bestimmten Werte für eine Folienstärke von 0,750 mm. So wird bei Betrachtung ein Vergleich der Mediane sowohl über Attachmentdurchmesser als auch Attachmenthöhe möglich. Allgemein kann von Abbildung 13 als Haupttendenz abgelesen werden, dass mit der Höhe der Beispielattachments die Medianwerte des gemessenen Abstandes zunehmen. Bei einem Attachmentdurchmesser von 0,9 mm wurde bei fast allen Höhen eine relativ große Streuung berechnet, mit Werten

von 1,38 bis 1,78 mm. Im Vergleich dazu liegen die Standardabweichungen bei einem Durchmesser von 1,5 mm in einem kleineren Wertebereich von 0,82 bis 1,23 mm. Bei dem Attachment mit Durchmesser 2,5 mm fällt die Streuung dazwischen und beträgt 1,06 bis 1,41 mm.

Auffällig sind die gehäuften Ausreißer unterhalb der Ausreißergrenze. Sie zeigen sich bei den Durchmessern 0,9 und 2,5 mm und bei jeder Attachmenthöhe außer 2,5 mm.

4.3 Passgenauigkeitsbestimmung durch horizontalen Schnitt mit Vertiefung im Gipsmodell

Zu der wie im vorigen Kapitel 4.2 beschriebenen Methodik (Bestimmung der Alignerpassgenauigkeit nach einem horizontalen Schnitt) wird zusätzlich eine Vertiefung im Gipsmodell mit 0,8 mm Tiefe und einem radialen Abstand von 2,0 mm um jedes Beispielattachment angefertigt. Eine genaue Beschreibung der Messmethodik kann in Kapitel 3.5.2 nachgelesen werden. Die Ergebnisse werden wieder wie in Kapitel 4.2 in kombinierten Tabellen und Höhe-/Abstandsdiagrammen präsentiert. In Tabelle 11 bis Tabelle 13 werden sowohl die Mittelwerte und die dazugehörigen Standardabweichungen, als auch die absoluten Minima und Maxima der Einzelwerte, sowie die ausgerechneten Medianwerte jedes der acht Aligner zusammengefasst. Zusätzlich werden in Abbildung 14 bis Abbildung 16 die Ergebnisse der Messreihen untereinander verglichen.

Zuerst werden im folgenden Abschnitt die Ergebnisse von Alignern mit Folienstärke 0,500 mm dargestellt. In den darauffolgenden zwei Abschnitten werden Aligner mit Folienstärken von 0,625 mm und 0,750 mm bei gleichbleibenden Restparametern behandelt.

4.3.1 Aligner mit Folienstärke 0,500 mm

Wie in Kapitel 4.3 beschrieben, werden hier die Ergebnisse der Messungen nach einem horizontalen Schnitt und mit Vertiefung im Gipsmodell präsentiert. Die hier verwendeten Aligner weisen eine Folienstärke von 0,500 mm auf. Alle ermittelten Messwerte dazu werden in der folgenden Tabelle 11 und in Abbildung 14 dargestellt.

Tabelle 11: Abstandsmittelwerte bei Alignerschnitt der acht Aligner für eine Alignerfolienstärke von 0,500 mm bei den drei Attachmentdurchmessern und fünf Attachmenthöhen. Legende: N – Anzahl der Messungen, MW – Mittelwert, SD – Standardabweichung, Min – Minimumwert, Max – Maximalwert.

Attachment-Durchmesser [mm]	Attachment-Höhe [mm]	N	Strecke zwischen den beiden sich gegenüberliegenden Kontaktpunkten G und H [mm]				
			MW	SD	Min	Max	Median
0,9	0,5	8	8,74	1,34	5,34	9,73	9,04
	1,0	8	9,12	3,47	1,84	12,78	11,10
	1,5	8	11,06	1,16	8,97	13,39	10,98
	2,0	8	11,64	1,08	9,71	12,78	11,85
	2,5	8	10,69	1,64	8,87	13,88	10,16
1,5	0,5	8	7,67	1,13	6,20	9,29	8,02
	1,0	8	9,74	1,00	8,32	11,28	9,87
	1,5	8	10,97	0,74	9,85	12,26	10,90
	2,0	8	11,76	1,13	10,24	13,45	11,71
	2,5	8	10,81	0,88	9,43	11,84	10,96
2,5	0,5	8	8,06	1,11	5,62	9,72	8,26
	1,0	8	11,42	1,09	9,21	12,47	11,74
	1,5	8	11,43	0,92	10,06	12,76	11,34
	2,0	8	12,32	1,50	9,86	14,28	11,86
	2,5	8	12,59	1,82	9,47	15,39	12,63

Tabelle 11 liefert Information über die Resultate bei einem Durchmesser des Beispielattachments von 0,9 mm. Die Mittelwerte befinden sich in einem Wertebereich von 8,74 bis 11,64 mm. Der niedrigste Mittelwert von 8,74 mm kann bei einer Attachmenthöhe von 0,5 mm abgelesen werden, während der höchste Mittelwert von 11,64 mm bei einer Attachmenthöhe von 2,0 mm zu finden ist. Unter den Einzelwerten beträgt das absolute Minimum 1,84 mm bei der Attachmenthöhe von 1,0 mm und das absolute Maximum von 13,88 mm kann bei der Höhe 2,5 mm abgelesen werden. Zusätzlich wurde der niedrigste Medianwert von 9,04 mm bei der Attachmenthöhe 0,5 mm gefunden und der höchste Median von 11,85 mm bei einer Höhe von 2,0 mm.

Der Tabelle 11 lässt sich auch entnehmen, dass die Mittelwerte bei 1,5 mm Attachmentdurchmesser in einem Bereich von 7,67 mm bis 11,76 mm liegen. Der niedrigste Mittelwert von 7,67 mm tritt bei der Attachmenthöhe von 0,5 mm auf und der höchste Mittelwert von 11,76 mm bei einem Beispielattachment mit Höhe 2,0 mm. Es wurde ein stetiger Anstieg der Mittelwerte mit zunehmender Höhe festgestellt. Das absolute Minimum unter den Einzelwerten beträgt 6,20 mm bei einer Attachmenthöhe von 0,5 mm. Das absolute Maximum unter den Einzelwerten

beläuft sich auf 13,45 mm bei der Attachmenthöhe von 2,0 mm. Des Weiteren wurden bei diesem Durchmesser Mediane im Wertebereich von 8,02 mm bei einer Attachmenthöhe von 0,5 mm bis 11,71 mm bei der Höhe 2,0 mm bestimmt.

Tabelle 11 zeigt auch die Messungen bei einem Attachmentdurchmesser von 2,5 mm. Die gemessenen Mittelwerte befinden sich in einem Wertebereich von 8,06 mm bei der Attachmenthöhe 0,5 mm bis zu 12,59 mm bei einer Attachmenthöhe von 2,5 mm. Das absolute Minimum unter den Einzelwerten beträgt hier 5,62 mm und tritt bei einer Höhe von 0,5 mm auf, während das absolute Maximum unter den Einzelwerten im Wert von 15,39 mm bei der Attachmenthöhe 2,5 mm ermittelt wurde. Der bei diesem Durchmesser niedrigste Medianwert von 8,26 mm liegt bei der Attachmenthöhe 0,5 mm und der höchste Median von 12,63 mm bei einer Höhe von 2,5 mm.

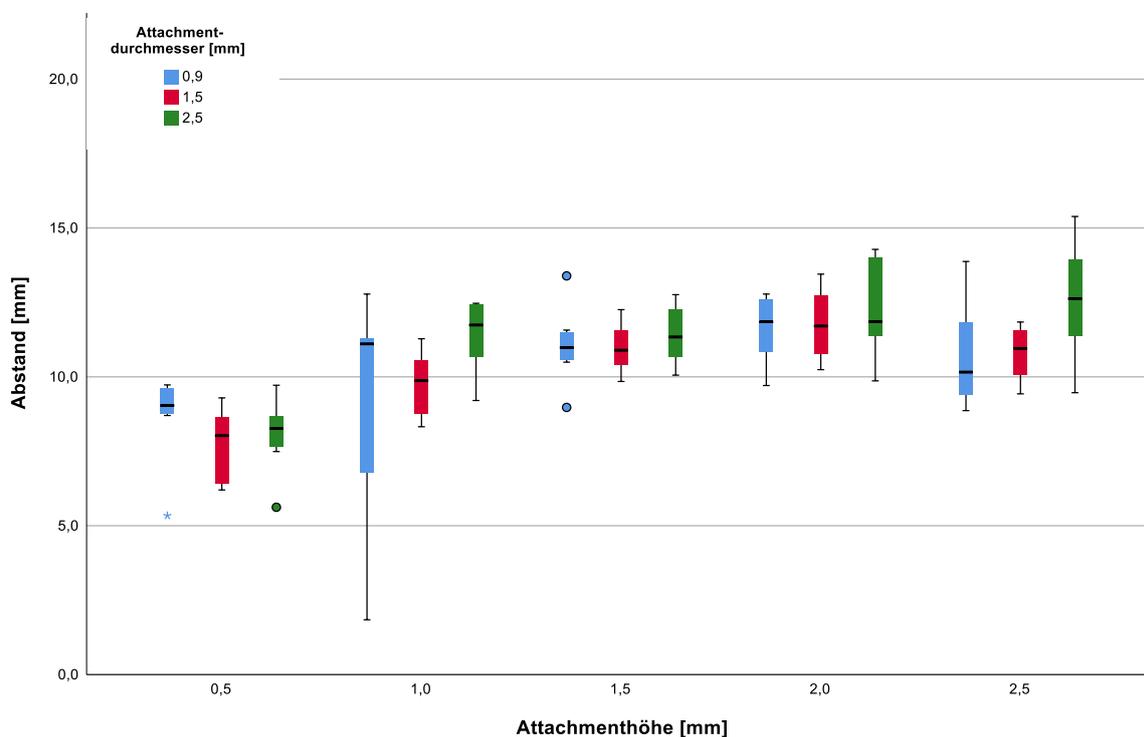


Abbildung 14: Boxplots der ermittelten Abstandswerte. Abgebildet sind hier die Messwerte vom Messverfahren bei Alignerschnitt mit Vertiefung im Gipsmodell für Beispielattachments mit einem Durchmesser von 0,9 mm, 1,5 mm und 2,5 mm, die mit Alignerfolien mit einer Stärke von 0,500 mm überzogen wurden.

In Abbildung 14 lassen sich alle Mediane und die Verteilungen für die in diesem Abschnitt eingesetzte Messmethodik ablesen. Die Mediane jeder Messreihe können

so für alle drei Attachmentdurchmesser sowohl über den Verlauf der Attachmenthöhe, als auch untereinander verglichen werden.

Bei der Messreihe mit Attachmentdurchmesser 0,9 mm fallen die größten Streuungen im Vergleich zu den anderen zwei Messreihen auf. Dies ist besonders stark bei dem Attachment mit Höhe 1,0 mm mit einem mittleren Fehler von $\pm 3,47$ mm (entsprechend ca. 38 % des ermittelten Mittelwertes) ausgeprägt. Bei der gesamten Messreihe mit Attachmentdurchmesser 1,5 mm können hingegen für die Standardabweichung Werte abgelesen werden, die in einem schmäleren Bereich von 0,74 bis 1,13 mm liegen. Bei der Betrachtung der Messreihe mit 2,5 mm Attachmentdurchmesser werden lediglich bei den zwei höchsten Attachments – 2,0 und 2,5 mm Höhe – größere Standardabweichungen im Vergleich zu den niedrigeren Attachments ermittelt. Der mittlere Fehler beträgt dabei 1,50 mm bei einer Attachmenthöhe von 2,0 mm und 1,82 mm bei der Attachmenthöhe von 2,5 mm. Aus den Boxplots lässt sich überdies schlussfolgern, dass drei von vier Ausreißer beim Attachmentdurchmesser 0,9 mm festgestellt wurden.

4.3.2 Aligner mit Folienstärke 0,625 mm

Analog zu Kapitel 4.3.1 werden hier sowohl in Tabelle 12, als auch in Abbildung 15 die Mittelwerte mit den dazugehörigen Standardabweichungen, sowie absolute Minima und Maxima unter den Einzelwerten und die ausgerechneten Medianwerte dargestellt. Allerdings wurden hier alle Messungen mit Alignern der Folienstärke 0,625 mm durchgeführt.

Tabelle 12 zeigt die oben beschriebenen Größen bei einem Attachmentdurchmesser von 0,9 mm. Die Mittelwerte liegen im Bereich von 8,30 mm bei der Attachmenthöhe 0,5 mm bis 11,60 mm bei einer Höhe von 2,0 mm. Das absolute Minimum unter den Einzelwerten beträgt 6,44 mm und liegt bei der Attachmenthöhe 2,5 mm. Das absolute Maximum von 15,20 mm kann hingegen bei einer Attachmenthöhe von 2,5 mm abgelesen werden. Die Medianwerte bei diesem Durchmesser wurden im Wertebereich von 8,41 mm bei der Attachmenthöhe 0,5 mm bis 12,21 mm bei einer Höhe von 2,5 mm ermittelt.

Aus Tabelle 12 geht auch für einen Attachmentdurchmesser von 1,5 mm hervor,

dass die dafür gemessenen Mittelwerte im Bereich von 6,97 mm bis 11,28 mm liegen. Der niedrigste Mittelwert von 6,97 mm befindet sich bei dem Attachment mit Höhe 0,5 mm, während der höchste Mittelwert bei einer Höhe von 2,0 mm festgestellt wurde. Bei den Einzelwerten beläuft sich das absolute Minimum auf 4,25 mm bei der Attachmentshöhe 0,5 mm, während das absolute Maximum 14,58 mm bei einer Höhe von 2,0 mm ausmacht. Der niedrigste Medianwert hier beträgt 7,23 mm erneut bei der Attachmentshöhe 0,5 mm, während der höchste Medianwert 11,99 mm bei einer Höhe von 2,0 mm registriert wurde.

Tabelle 12: Abstandsmittelwerte bei Alignerschnitt der acht Aligner für eine Alignerfolienstärke von 0,625 mm bei den drei Attachmentdurchmessern und fünf Attachmenthöhen. Legende: N – Anzahl der Messungen, MW – Mittelwert, SD – Standardabweichung, Min – Minimumwert, Max – Maximalwert.

Attachment-Durchmesser [mm]	Attachment-Höhe [mm]	N	Strecke zwischen den beiden sich gegenüberliegenden Kontaktpunkten G und H [mm]				
			MW	SD	Min	Max	Median
0,9	0,5	8	8,30	0,73	7,06	9,53	8,41
	1,0	8	10,56	0,88	8,82	11,65	10,87
	1,5	8	10,83	1,01	9,23	12,32	11,03
	2,0	8	11,60	1,50	8,24	13,12	12,08
	2,5	8	11,34	2,93	6,44	15,20	12,21
1,5	0,5	8	6,97	1,28	4,25	8,48	7,23
	1,0	8	8,45	1,96	5,18	10,90	9,10
	1,5	8	9,36	2,50	5,65	12,45	9,92
	2,0	8	11,28	2,61	6,56	14,58	11,99
	2,5	8	10,82	2,29	6,37	13,71	11,40
2,5	0,5	8	8,27	1,14	6,85	9,96	8,26
	1,0	8	9,55	0,76	8,62	11,26	9,36
	1,5	8	10,50	1,42	7,70	12,31	10,86
	2,0	8	11,39	1,62	8,49	14,48	11,47
	2,5	8	10,90	2,25	7,48	15,29	10,80

Analog zu Tabelle 11 gibt Tabelle 12 auch Informationen zu den Messungen, die bei Attachments mit einem Durchmesser von 2,5 mm durchgeführt wurden. Der Mittelwertbereich umfasst Werte von 8,27 mm bei einer Attachmentshöhe von 0,5 mm bis 11,39 mm bei der Höhe 2,0 mm. Außerdem kann ein kontinuierlicher Anstieg der Mittelwerte mit Zunahme der Höhe vermerkt werden. Das absolute Minimum unter den Einzelwerten liegt bei 6,85 mm bei Attachmentshöhe 0,5 mm. Das absolute Maximum hingegen beträgt 15,29 mm bei einer Höhe von 2,5 mm. Der Wertebereich der Mediane wurde von 8,26 mm bei einer Attachmentshöhe von 0,5 mm bis 11,47 mm bei der Höhe 2,0 mm ermittelt.

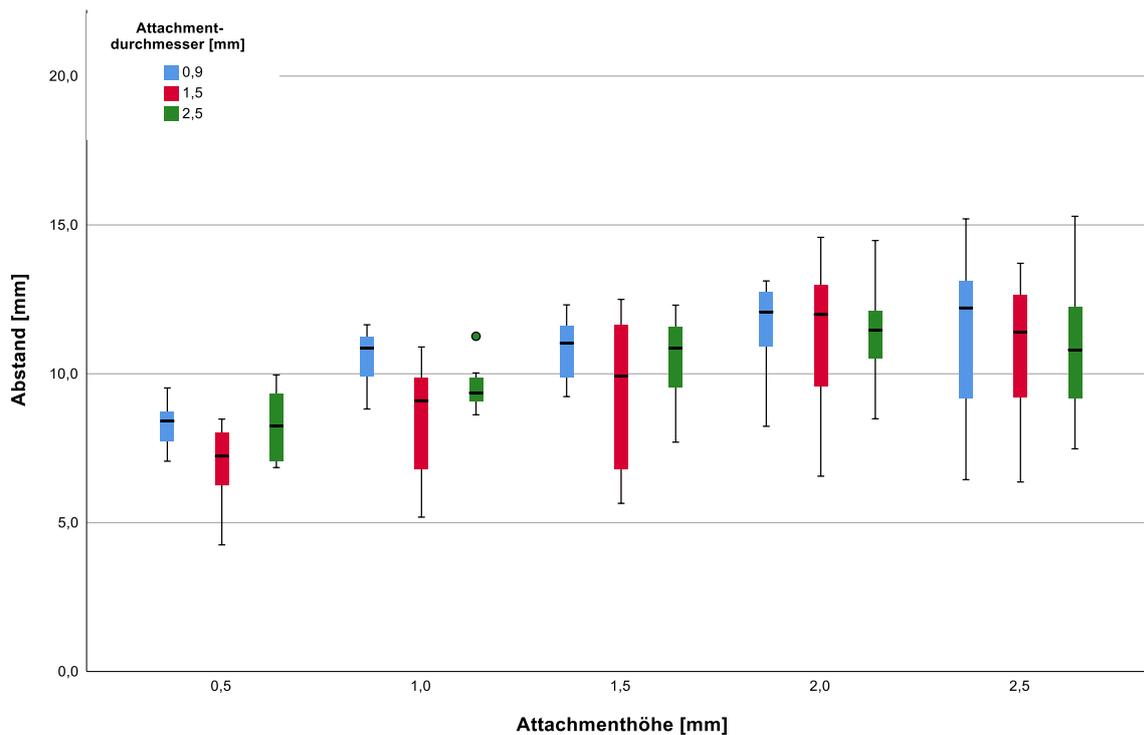


Abbildung 15: Boxplots der ermittelten Abstandswerte. Abgebildet sind hier die Messwerte vom Messverfahren bei Alignerschnitt mit Vertiefung im Gipsmodell für Beispielattachments mit einem Durchmesser von 0,9 mm, 1,5 mm und 2,5 mm, die mit Alignerfolien mit einer Stärke von 0,625 mm überzogen wurden.

In Abbildung 15 werden alle Mittelwerte für die Folienstärke 0,625 mm und die dazugehörigen Streuungen präsentiert. Dadurch wird ein graphischer Vergleich der Mittelwerte über die drei verschiedenen Attachmentdurchmesser als auch die fünf Höhen möglich. Die Messreihe mit Durchmesser 0,9 mm weist eine stetige Steigerung der Standardabweichungswerte mit größerer Attachementhöhe auf, bis auf eine Ausnahme bei einer Attachementhöhe von 2,5 mm und einem Wert von 2,93 mm. Bei der Messreihe mit Durchmesser 1,5 mm liegen die Standardabweichungen zwischen 1,28 mm bei der kleinsten Attachementhöhe von 0,5 mm und 2,61 mm bei Attachementhöhe 2,0 mm. Die Messreihe mit 2,5 mm Attachmentdurchmesser zeigt größere mittlere Fehler bei den höheren Attachments von 1,5 mm, 2,0 mm und 2,5 mm im Vergleich zu den niedrigeren Attachementhöhen 0,5 und 1,0 mm. Der einzige Ausreißer in dieser Messreihe findet sich bei dem größten Durchmesser 2,5 mm und bei einer Attachementhöhe von 1,0 mm.

4.3.3 Aligner mit Folienstärke 0,750 mm

Wie im Kapitel 4.3.1 und 4.3.2 erfolgt auch hier die Präsentation der Mittelwerte, der dazugehörigen Standardabweichungen, sowie der Minima und Maxima unter den Einzelwerten und der ausgerechneten Medianwerte. Die drei Messreihen mit Attachmentdurchmesser 0,9 mm, 1,5 mm und 2,5 mm wurden in Tabelle 13 und in Abbildung 16 dargestellt. Hier wurde mit einer Folie der Stärke 0,750 mm gearbeitet.

Tabelle 13: Abstandsmittelwerte bei Alignerschnitt der acht Aligner für eine Alignerfolienstärke von 0,750 mm bei den drei Attachmentdurchmessern und fünf Attachmenthöhen. Legende: N – Anzahl der Messungen, MW – Mittelwert, SD – Standardabweichung, Min – Minimumwert, Max – Maximalwert.

Attachment-Durchmesser [mm]	Attachment-Höhe [mm]	N	Strecke zwischen den beiden sich gegenüberliegenden Kontaktpunkten G und H [mm]				
			MW	SD	Min	Max	Median
0,9	0,5	8	8,59	0,80	7,41	9,73	8,61
	1,0	8	10,69	0,73	9,16	11,51	10,70
	1,5	8	11,51	1,33	9,72	14,10	11,14
	2,0	8	12,41	0,83	11,10	13,78	12,33
	2,5	8	12,99	0,90	11,68	14,80	12,83
1,5	0,5	8	7,19	1,02	5,28	8,39	7,59
	1,0	8	9,31	0,95	7,20	10,15	9,71
	1,5	8	10,46	1,98	7,07	14,03	10,30
	2,0	8	11,07	1,32	8,28	12,78	11,29
	2,5	8	11,66	1,99	7,68	14,29	12,09
2,5	0,5	8	7,63	0,75	6,54	8,96	7,67
	1,0	8	10,73	0,59	9,83	11,78	10,69
	1,5	8	11,22	1,14	9,47	13,30	11,14
	2,0	8	12,88	1,05	11,76	14,67	12,48
	2,5	8	14,21	1,22	11,79	15,39	14,62

Der Tabelle 13 lässt sich entnehmen, dass die Mittelwerte bei einem Attachmentdurchmesser von 0,9 mm in einem Bereich von 8,59 mm bis 12,99 mm liegen. Der kleinste Mittelwert von 8,59 mm ist bei der Attachmenthöhe 0,5 mm zu finden, während der höchste Mittelwert von 12,99 mm bei einer Höhe von 2,5 mm auftritt. Das absolute Minimum unter den Einzelwerten 7,41 mm liegt bei der Attachmenthöhe 0,5 mm. Das absolute Maximum von 14,80 mm wurde dagegen bei einer Höhe von 2,5 mm ermittelt. Der niedrigste Medianwert von 8,61 mm wurde bei einer Attachmenthöhe von 0,5 mm gefunden, während sich der höchste Median von 12,83 mm bei der Höhe 2,5 mm zeigt.

Tabelle 13 stellt auch die Ergebnisse für den nächstgrößeren Attachmentdurchmesser von 1,5 mm dar. Bei Betrachtung der Resultate kann eine stetige Zunahme der Mittelwerte in Richtung der höheren Attachments festgestellt werden. Der minimale Mittelwert liegt bei 7,19 mm bei der Attachmenthöhe 0,5 mm und der maximale Mittelwert beläuft sich auf 11,66 mm bei einer Höhe von 2,5 mm. Das absolute Minimum bei den Einzelwerten von 5,28 mm kann bei der Höhe 0,5 mm und das absolute Maximum von 14,29 mm bei einer Höhe von 2,5 mm abgelesen werden. Bei diesem Durchmesser liegt der Medianwertebereich bei 7,59 mm bei der Höhe 0,5 mm bis 12,09 mm bei einer Höhe von 2,5 mm.

Als Haupttendenz für den Durchmesser 2,5 mm lässt sich bei Tabelle 13 erkennen, dass die Mittelwerte des gemessenen Abstandes mit steigender Attachmenthöhe zunehmen. Sie befinden sich im Bereich von 7,63 mm bei der Attachmenthöhe 0,5 mm bis 14,21 mm bei einer Höhe von 2,5 mm. Das absolute Minimum unter den Einzelwerten verzeichnet den Wert 6,54 mm bei der Attachmenthöhe 0,5 mm, während das absolute Maximum von 15,39 mm bei der Höhe von 2,5 mm liegt. Hier beträgt der niedrigste Medianwert 7,67 mm bei einer Attachmenthöhe von 0,5 mm und der höchste Medianwert 14,62 mm bei der Höhe 2,5 mm.

Abbildung 16 zeigt die Mittelwerte aller drei Attachmentdurchmesser und aller fünf Attachmenthöhen. Als Haupttendenz kann eine Zunahme des Medianwertes des gemessenen Abstandes über die steigende Attachmenthöhe festgestellt werden. Diese Entwicklung kann sowohl bei den Attachmentdurchmessern von 0,9 mm und 1,5 mm, als auch bei den größten Attachments mit einem Durchmesser von 2,5 mm beobachtet werden.

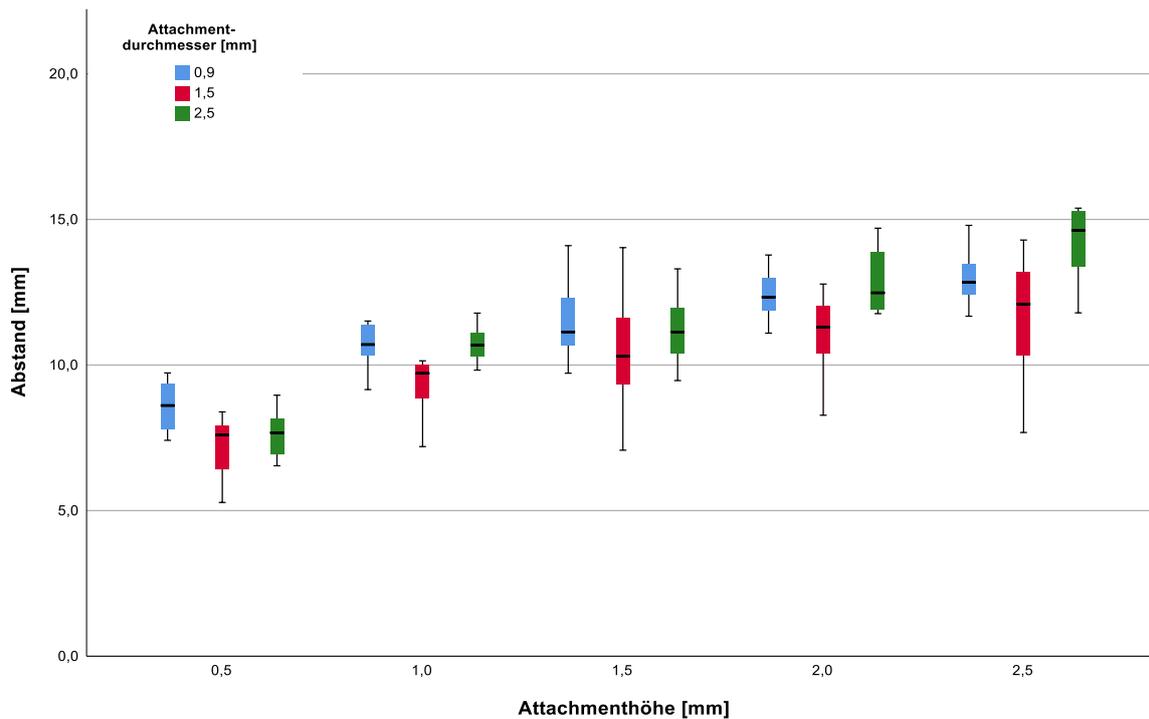


Abbildung 16: Boxplots der ermittelten Abstandswerte. Abgebildet sind hier die Messwerte vom Messverfahren bei Alignerschnitt mit Vertiefung im Gipsmodell für Beispielattachments mit einem Durchmesser von 0,9 mm, 1,5 mm und 2,5 mm, die mit Alignerfolien mit einer Stärke von 0,750 mm überzogen wurden.

Die breiteste Streuung bei der Messreihe mit einem Attachmentdurchmesser von 0,9 mm wird mit einem Wert von 1,33 mm bei dem Attachment mit Höhe von 1,5 mm abgelesen. Bei den restlichen vier Höhen liegt die Streuung im Wertebereich von 0,73 bis 0,90 mm. Bei der Messreihe mit Durchmesser 1,5 mm zeigen die Attachementhöhen 1,5 mm, 2,0 mm und 2,5 mm die größten Standardabweichungen im Bereich von 1,32 bis 1,99 mm. Bei den niedrigeren Attachementhöhen 0,5 mm und 1,0 mm werden dementsprechend niedrige Werte von 1,02 mm und 0,95 mm ermittelt. Bei der Messreihe des breitesten Attachments mit dem Durchmesser 2,5 mm streuen die Mittelwerte in einem Bereich von 0,59 mm bei Attachementhöhe von 1,0 mm bis 1,22 mm bei der Attachementhöhe von 2,5 mm. Einen Wert der Standardabweichung größer als 1,0 mm weisen hier allerdings alle höheren Attachments mit 1,5 mm, 2,0 und 2,5 mm auf.

4.4 Auswertung der statistischen Datenanalyse

Der hier realisierte statistische Vergleich umfasst sowohl die drei im Kapitel 3.5 beschriebenen Messverfahren, als auch den Vergleich der einzelnen Messgrößen untereinander bei jeder Messmethode. Es wurde mit den folgenden Vergleichsgruppen gearbeitet: Vergleich aller Messreihen, Vergleich der Aligner-Folienstärken, Vergleich der Höhen und Vergleich der Durchmesser der Beispielattachments untereinander.

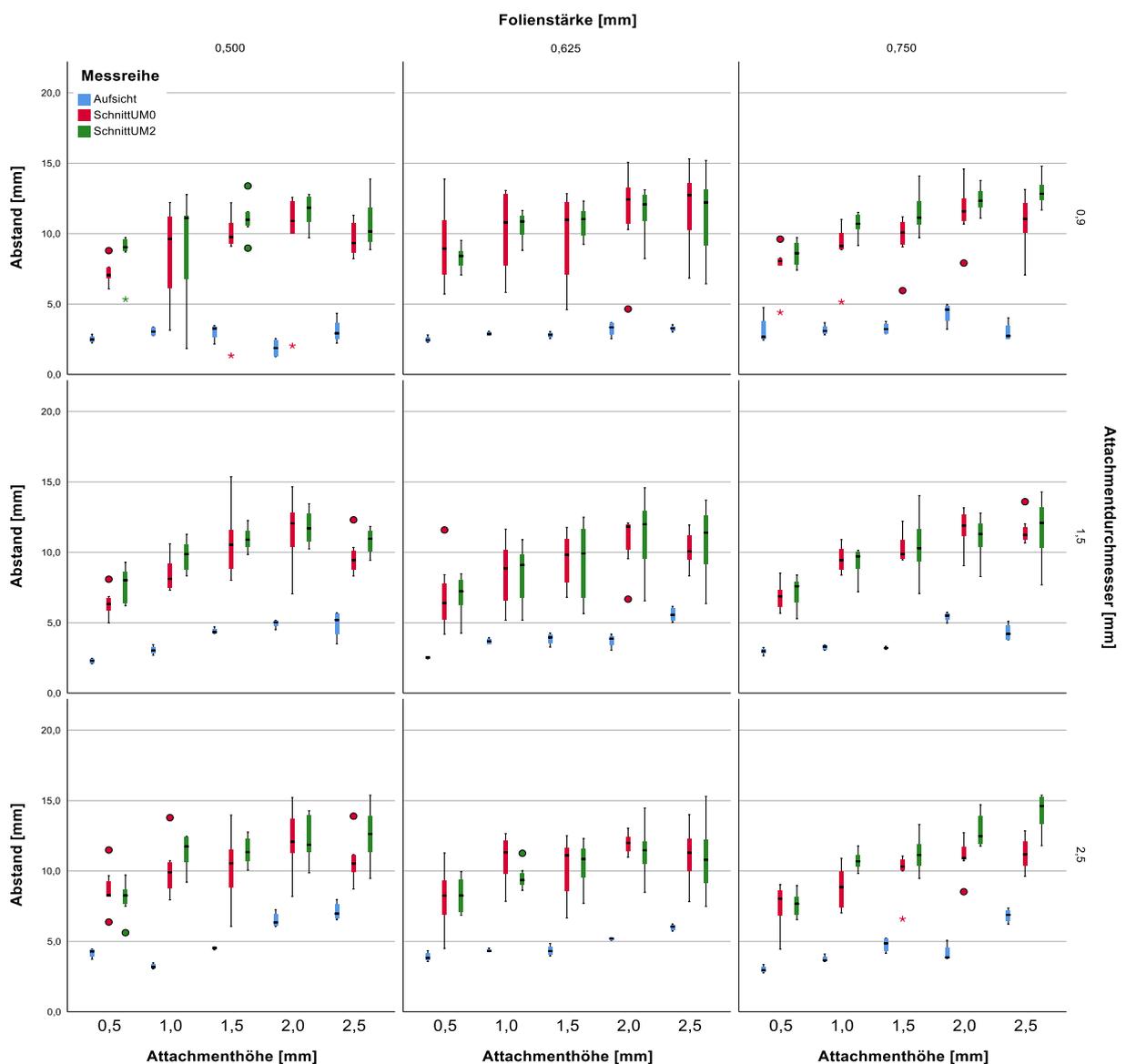


Abbildung 17: Methodenvergleich der Messreihen. Zu sehen sind die beiden Messreihen mit Schnitt (UM0 & UM2) und die Aufsichtmethode. Die Aufsichtmethode zeigt systematisch zu niedrige, nicht mit den anderen beiden Methoden vergleichbare Messwerte.

Im ersten Abschnitt der statistischen Datenanalyse wurden alle Messreihen mit den Parametern Folienstärke, Attachmenthöhe und Durchmesser in Abbildung 17 einer graphischen Darstellung durch Boxplots präsentiert. Mit der blauen Farbe wurde das Messverfahren „a vertice“ dargestellt, die rote Farbe kennzeichnet die Messreihe mit horizontaler Vermessung eines Alignerschnitts ohne Vertiefung und grün repräsentiert die Versuchsreihe mit Vertiefung um das Attachment. Klar zu erkennen ist die Tendenz, dass die Abstandswerte des Messverfahrens „a vertice“ im Vergleich zu den Messwerten der beiden „Schnitt“- Methoden zu klein sind. Dies ist mit dem Methodenaufbau zu erklären und wird zusätzlich durch Schwierigkeiten bei der Umsetzung der Messungen verstärkt. Genauer ist dem Kapitel 5.1.1 zu entnehmen. Im Vergleich der Messmethoden „Schnitt 0“ und „Schnitt 2“ zeigt sich eine ähnliche Verteilung der Abstandswerte. Während bei der dünnsten und der dicksten Folienstärke (0,500 mm und 0,750 mm) die einzelnen Messpunkte näher am Median liegen, zeigt sich bei der Folienstärke 0,625 mm eine breitere Streuung. Bemerkenswert ist, dass bei den verschiedenen Messmethoden ohne und mit Vertiefung um das Attachment ebenfalls eine breite Streuung innerhalb der einzelnen Messreihen zu erkennen ist.

Wie im Kapitel 3.6 beschrieben, wurde hier zur statistischen Datenanalyse der Kruskal-Wallis-Tests angewandt. Aus diesem Test resultierten Signifikanzwerte, die mit der Software SPSS (Version 25, IBM, Armonk, USA) als asymptotische Signifikanz definiert wurden. Die Entscheidung, ob sich die zentralen Tendenzen zwischen den Abstandsmesswerten der zu vergleichenden Parameter ausreichend differenzieren, wird durch ein Signifikanzniveau bestimmt. Dieses wurde auf $p < 0.05$ festgelegt. Alle Signifikanzwerte darüber ergeben keine signifikanten Unterschiede zwischen den Abstandsmesswerten und Signifikanzwerte darunter führen zu statistisch signifikanten Unterschieden der zentralen Tendenzen. In diesem Fall schlüsselt SPSS die einzelnen Paarvergleiche auf und stellt die jeweiligen signifikanten Unterschiede mit dem zugehörigen korrigierten p-Wert dar. Diese Werte sind in den Tabellen unter „Multi“ zu finden.

Im diesem Abschnitt der Datenanalyse wurden in jeder der oben aufgezählten Vergleichsgruppen Paarvergleiche zwischen den Messmethoden horizontales

Vermessen eines Alignerschnittes ohne und mit Vertiefung um das Attachment gemacht. Die Methode „a vertice“ wird in der Berechnung der Statistik bewusst nicht integriert, da die gemessenen Abstände und deren Streubreiten im direkten Vergleich zu den anderen zwei Methoden zu klein sind. Die Ergebnisse für jeden durchgeführten Vergleich werden jeweils in Tabellen aufgegliedert.

Bei Betrachtung der Signifikanzwerte der Analyse der Messverfahren „Schnitt 0“ und „Schnitt 2“ in Abhängigkeit von der Folienstärke von Tabelle 14 lässt sich feststellen, dass sich die meisten Abstandswerte nicht signifikant voneinander unterscheiden. Bei der Messmethode horizontales Vermessen eines Alignerschnittes ohne Vertiefung um das Attachment mit Durchmesser 1,5 mm und Höhe 2,5 mm findet sich ein signifikanter Unterschied in den Messwerten bei den Folienstärken 0,500 und 0,750 mm. Bei dem Vergleich der Signifikanzwerte von „Schnitt 2“ ist kein signifikanter Unterschied zwischen den Abstandswerten zu sehen. Es finden sich lediglich zwei Ausnahmen beim Durchmesser von 2,5 mm. Der erste signifikante Unterschied tritt bei 1 mm Attachmenthöhe in den Messwerten bei den Folienstärken 0,500 und 0,625 mm auf, während die zweite signifikante Differenz bei einer Höhe von 2,5 mm bei den Werten der Folienstärken 0,625 und 0,750 mm zu finden ist.

Es lässt sich zusammenfassen, dass die Messmethode „Schnitt 2“ bei dem gemessenen Abstand eine vermehrte Anzahl signifikant unterschiedlicher Messwerte in Abhängigkeit der Folienstärke liefert.

Tabelle 14: Kruskal-Wallis-Test: Unterschiede im Abstand in Abhängigkeit von der Folienstärke (0,500 – 0,625 – 0,750 mm) bei definiertem Durchmesser und definierter Höhe. Multiple Vergleiche bei signifikantem Kruskal-Wallis-Test.

Durchmesser [mm]	Höhe [mm]	Schnitt 0		Schnitt 2	
		K-W (p)	Multi (p_{korrr})	K-W (p)	Multi (p_{korrr})
0,9	0,5	0,084		0,213	
	1,0	0,468		0,968	
	1,5	0,655		0,785	
	2,0	0,344		0,556	
	2,5	0,098		0,058	
1,5	0,5	0,594		0,468	
	1,0	0,269		0,406	
	1,5	0,617		0,498	
	2,0	0,508		0,526	
	2,5	0,015*	0,500 vs. 0,750: 0,014*	0,473	
2,5	0,5	0,651		0,320	
	1,0	0,060		0,006*	0,500 vs. 0,625: 0,005*
	1,5	0,464		0,432	
	2,0	0,120		0,144	
	2,5	0,573		0,023*	0,625 vs. 0,750: 0,018*

Wie in Tabelle 15 zu sehen ist, wird hier der Kruskal-Wallis-Test in Abhängigkeit des Attachmentdurchmessers angewandt. Bei Betrachtung der Signifikanzwerte der Messmethode „Schnitt 0“ ist festzustellen, dass generell kein signifikanter Unterschied in den Messwerten zu sehen ist. Der Signifikanzwert für die Folienstärke 0,500 mm und Höhe 0,5 mm zeigt bei den Durchmessern 1,5 und 2,5 mm einen statistisch signifikanten Unterschied.

Bei der „Schnitt 2“-Messreihe, horizontales Vermessen eines Alignerschnittes mit Vertiefung um das Attachment, zeigen sich vor allem in den Messwerten für die Folienstärke 0,750 mm mehrere statistisch signifikante Unterschiede. Während signifikante Unterschiede in den Messwerten bei den Durchmessern 0,9 und 1,5 mm eher für die kleineren Höhen zu erkennen sind, beziehen sich die signifikanten Unterschiede für die größeren Höhen auf die Durchmesser 1,5 und 2,5 mm.

Zusammenfassend werden bei der Methode „Schnitt 2“ für die Folienstärke 0,750 mm deutlich mehr aussagekräftige statistisch signifikante Unterschiede bei den Durchmessern 0,9 und 1,5 mm und 1,5 und 2,5 mm festgestellt.

Tabelle 15: Kruskal-Wallis-Test: Unterschiede im Abstand in Abhängigkeit des Durchmessers (0,9 – 1,5 – 2,5 mm) bei definierter Folienstärke und Höhe. Multiple Vergleiche bei signifikantem Kruskal-Wallis-Test.

Folienstärke [mm]	Höhe [mm]	Schnitt 0		Schnitt 2	
		K-W (p)	Multi (p_{korr})	K-W (p)	Multi (p_{korr})
0,500	0,5	0,003*	1,5 vs. 2,5: 0,002*	0,074	
	1,0	0,190		0,065	
	1,5	0,617		0,658	
	2,0	0,363		0,774	
	2,5	0,203		0,062	
0,625	0,5	0,148		0,079	
	1,0	0,126		0,030*	1,5 vs. 0,9: 0,033*
	1,5	0,655		0,623	
	2,0	0,403		0,859	
	2,5	0,157		0,789	
0,750	0,5	0,129		0,038*	1,5 vs. 0,9: 0,049*
	1,0	0,605		0,003*	1,5 vs. 0,9: 0,011* 1,5 vs. 2,5: 0,010*
	1,5	0,698		0,435	
	2,0	0,432		0,041*	1,5 vs. 2,5: 0,044
	2,5	0,844		0,026*	1,5 vs. 2,5: 0,023*

In Tabelle 16 bestätigt der Kruskal-Wallis-Test, dass sich fast alle Messwerte in Abhängigkeit von der Attachmenthöhe signifikant voneinander unterscheiden. Am meisten verbreitet ist die statistisch signifikante Differenz in den Messwerten bei den Höhen 0,5 und 2,0 mm, sowie 0,5 und 2,5 mm. Gefolgt wird diese Tendenz vom Unterschied in den Abstandswerten bei den Attachmenthöhen 0,5 und 1,5 mm, die sowohl bei „Schnitt 0“, als auch bei „Schnitt 2“ zu erkennen sind. Zusätzlich ergeben sich bei der Messmethode horizontales Vermessen eines Alignerschnitts mit Vertiefung um das Attachment statistisch signifikante Differenzen in den Messwerten bei den Höhen 1,0 und 2,5 mm für die Folienstärke 0,750 mm und die Durchmesser 0,9 und 2,5 mm.

Tabelle 16: Kruskal-Wallis-Test: Unterschiede im Abstand in Abhängigkeit der Attachmenthöhe (0,5 – 1,0 – 1,5 – 2,0 – 2,5 mm) bei definierter Folienstärke und definiertem Durchmesser. Multiple Vergleiche bei signifikantem Kruskal-Wallis-Test.

Folienstärke [mm]	Durchmesser [mm]	Schnitt 0		Schnitt 2	
		K-W (p)	Multi (p_{korrr})	K-W (p)	Multi (p_{korrr})
0,500	0,9	0,019*	0,5 vs. 2,0: 0,008*	0,010*	0,5 vs. 1,5: 0,088* 0,5 vs. 2,0: 0,006*
	1,5	<0,001*	0,5 vs. 1,5: 0,002* 0,5 vs. 2,0: <0,001* 0,5 vs. 2,5: 0,019*	<0,001*	0,5 vs. 1,5: 0,005* 0,5 vs. 2,0: <0,001* 0,5 vs. 2,5: 0,008*
	2,5	0,020*	0,5 vs. 2,0: 0,009*	<0,001*	0,5 vs. 1,5: 0,005* 0,5 vs. 2,0: <0,001* 0,5 vs. 2,5: 0,008*
0,625	0,9	0,187		0,006*	0,5 vs. 2,0: 0,008* 0,5 vs. 2,5: 0,012*
	1,5	0,006*	0,5 vs. 2,0: 0,004*	0,011*	0,5 vs. 2,0: 0,019* 0,5 vs. 2,5: 0,046*
	2,5	0,013*	0,5 vs. 2,0: 0,007*	0,006*	0,5 vs. 2,0: 0,007*
0,750	0,9	0,001*	0,5 vs. 2,0: 0,002* 0,5 vs. 2,5: 0,015*	<0,001*	0,5 vs. 2,0: <0,001* 0,5 vs. 2,5: <0,001* 1,0 vs. 2,5: 0,031*
	1,5	<0,001*	0,5 vs. 1,5: 0,048* 0,5 vs. 2,0: <0,001* 0,5 vs. 2,5: <0,001*	<0,001*	0,5 vs. 1,5: 0,032* 0,5 vs. 2,0: 0,004* 0,5 vs. 2,5: 0,001*
	2,5	<0,001*	0,5 vs. 2,0: 0,002* 0,5 vs. 2,5: 0,003*	<0,001*	0,5 vs. 2,0: <0,001* 0,5 vs. 2,5: <0,001* 1,0 vs. 2,5: 0,014*

Es kann resümiert werden, dass die Messmethode „Schnitt 2“ - horizontales Vermessen eines Alignerschnitts mit der zusätzlichen Vertiefung um das Attachment - Messwerte mit besser definierten Unterschieden der zentralen Tendenzen liefert. Die Einflüsse, die die einzelnen Parameter auf die Abstandswerte haben, sind mit einer Vertiefung im Gipsmodell deutlicher zu erkennen.

5 Diskussion

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Versuche und insbesondere deren Ergebnisse ausführlich diskutiert. In Abschnitt 5.1 werden sowohl die Vor- und Nachteile der angewendeten Versuchs- und Messmethoden, als auch mögliche Fehlerquellen beschrieben. In Unterkapitel 5.2 werden alle Ergebnisse von Abschnitt 4.1 bis einschließlich 4.3 einerseits einzeln interpretiert und andererseits miteinander verglichen. Anschließend zeigt Kapitel 5.3 einen Vergleich der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit mit der bis dato vorhandenen Literatur.

5.1 Methodenkritik

Im Laufe dieser Forschungsarbeit wurde die in Kapitel 3.5 beschriebene Messmethodik angewandt. Es wurden folgende drei unterschiedliche Messreihen ausgewertet: (1) „a vertice“, (2) horizontale Vermessung eines Alignerschnitts und (3) nochmalige horizontale Vermessung eines Schnittes, jedoch mit Vertiefung im Gipsmodell, siehe Kapitel 4.

5.1.1 „a vertice“

Bei der Messmethode „a vertice“ wurden pro Kombination aus Alignerstärke, Attachmentdurchmesser und –höhe vier senkrechte Draufsichtvermessungen mit der Mikroskopkamera durchgeführt, wie in Kapitel 3.5.1 genauer beschrieben. Eine Schwierigkeit bei der Umsetzung dieser Messungen bestand darin, dass die Kontaktpunkte der Alignerfolie mit dem Gipsmodell visuell nicht immer eindeutig wahrnehmbar waren. Da die Punkte für die Vermessung per Software der Mikroskopkamera händisch gesetzt wurden, ist dies eine der möglichen Ursachen für die ermittelte Streuung des jeweiligen Mittelwerts aus diesen vier Draufsichtmessungen. Zusätzlich ergibt sich aufgrund der Perspektive (Draufsicht) durch die transparente Alignerfolie hindurch ein Verzeichnungseffekt. Als Folge kommt es zu einer lokalen Veränderung des Messmaßstabes. Das optische Messverfahren wird dadurch so gestört, dass die vier gemessenen Abstände von Attachmentaußenumfang zum Kontaktpunkt des Aligner-Gipsmodells kleiner als

tatsächlich erscheinen. Der Schweregrad dieses Effekts ist von mehreren Faktoren abhängig, u.a. Höhe und Durchmesser des Attachments oder sowohl nomineller als auch tatsächlicher Alignerfolienstärke. Somit muss angenommen werden, dass je nach Geometrie des Attachments die Messungen unterschiedlich stark gestört werden. In Abbildung 18 ist einerseits außen ein konzentrischer Kreis (mit dem gelben Pfeil gekennzeichnet), andererseits weiter innen ein nicht kreisförmiger Umriss um das Attachment sichtbar. Eine Ursache dafür könnte die unter dem Aligner verwendete Isofolan® Unterfolie mit der Stärke 0,1 mm sein, die zwar bei allen drei Messverfahren zum Einsatz kam, jedoch bei der Messdurchführung von „a vertice“ nicht entfernt wurde. Vermutlich wurde der innere Kreis durch die Kontaktpunkte der Unterfolie zum Gipsmodell geformt, während der äußere Kreis durch die Kontaktpunkte der stärkeren Alignerfolie zur Unterfolie, die auf dem Gipsmodell liegt, gebildet wurde.

Generell ist auch noch zu vermerken, dass bei den angegebenen Mittelwerten von „a vertice“ der jeweilige Attachmentdurchmesser nicht miteinberechnet wurde. Um einen Vergleich der Werte aus den verschiedenen Messmethoden zu ermöglichen, wurden im Abschnitt 5.1.3 die „a vertice“-Werte zusammen mit dem jeweiligen Attachmentdurchmesser ausgerechnet und direkt mit den Mittelwerten der anderen Methoden verglichen. Abschließend werden bei den anderen Messmethoden Potenziale aufgezeigt, die die Konsistenz der Messungen verbessern können, indem man, beispielsweise statt wie bisher einen Aligner, mehrere anfertigt und diese separat vermisst. Des Weiteren könnten die Aligner aus der Methode „a vertice“ anschließend auch für die zweite (destruktive) Messmethode mit Schnitt verwendet werden, die für die vorliegende Arbeit bereits mit acht Alignern durchgeführt wurde. Ein direkter Vergleich mit einer angepassten Mittelwertbildung, wie in Abschnitt 5.1.3 beschrieben wird, wäre dann mit denselben acht Alignern für diese zwei Methoden möglich.

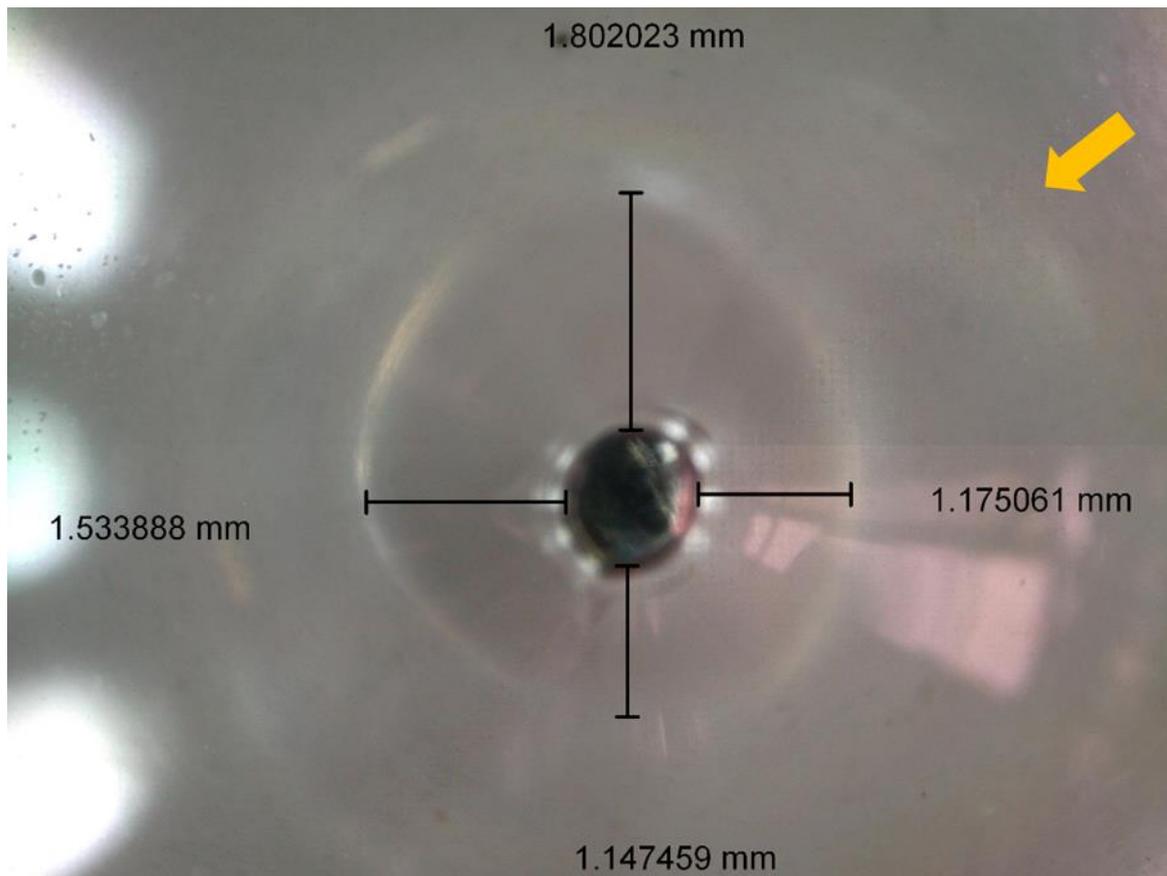


Abbildung 18: Darstellung des Einflusses der Alignerform und ihrer Orientierung zu der Lage eines Attachments mit dem Durchmesser 1,5 mm und der Höhe 2,5 mm. Die hier verwendete Alignerfolie hat eine Folienstärke von 0,750 mm.

5.1.2 Horizontale Vermessung eines Alignerschnitts

Bei der zweiten Messmethode wurde der Versuch gemacht, die jeweiligen Aligner entlang einer Geraden durch den Mittelpunkt der Abformung des Attachments zu zerschneiden und danach in horizontaler Lage zu vermessen. Um die statistische Sicherheit und die Konsistenz dieser Messungen zu verbessern, wurde die Passgenauigkeit pro Kombination aus Folienstärke, Attachmentdurchmesser und –höhe bei jeweils acht separat angefertigten Alignern ermittelt und abschließend als Mittelwert der acht Einzelwerte dargestellt. Als eine mögliche Fehlerquelle kommt hier einerseits die optische Abschätzung der Mitte für die Schnittgerade in Frage, andererseits die visuelle Bestimmung der Kontaktpunkte von Alignerschnitt zu Gipsmodell in der horizontalen Ebene. Mit der Lage der Schnittlinie ergibt sich ein

mitunter sogar signifikanter Einfluss auf den gemessenen Abstandswert von zwei sich gegenüberliegenden Kontaktpunkten daraus, dass sich dieser Abstand von Attachmentaußenumfang zu Aligner-Gipsmodell Kontaktpunkt radial nicht gleichmäßig verhält. So kann es dazu kommen, dass sich beispielsweise der Messwert von einem Alignerschnitt mit einer horizontalen Schnittlinie von 3 nach 9 Uhr zu einem Alignerschnitt mit der vertikalen Schnittlinie von 6 nach 12 Uhr deutlich unterscheidet. Dieser Einfluss der Alignerform und ihrer Orientierung zu der festgelegten Schnittlinie ist in Abbildung 18 erkennbar. So ergeben die beiden Abstandswerte aus den jeweils sich gegenüberliegenden Maßen einerseits mit horizontaler Schnittlinie 4,21 mm und andererseits mit vertikaler 4,45 mm. Diese Werte setzen sich aus den beiden Abständen links und rechts bzw. ober- und unterhalb des Attachments, zuzüglich dessen Durchmesser zusammen.

Die Situation der visuellen Bestimmung der ebenso frei gewählten Kontaktpunkte von Alignerschnitt zu Gipsmodell in der horizontalen Ebene als zweite signifikante mögliche Fehlerquelle wird auch dadurch erschwert, dass es bei der Messung selbst durch die zwischen Alignerschnitt und Objektträger zur Positionsfixierung aufgebrachte Kleberschicht zu einer optischen Beeinträchtigung kommt. Diese Störung kann dazu führen, dass die visuell frei gewählten Kontaktpunkte von Alignerschnitt zu Objektträger fehlerhaft bestimmt werden. Die Festlegung dieser Kontaktpunkte ist stellvertretend für die jeweiligen Kontaktpunkte zwischen Alignerschnitt und Gipsmodell. Das für diese Messmethodik resultierende gemessene Abstandsmaß von Kontaktpunkt zu Kontaktpunkt kann jedenfalls auch dadurch verfälscht werden.

Ein signifikanter Nachteil dieser zweiten Messmethodik liegt generell darin, dass es sich dabei um ein destruktives Messverfahren handelt.

5.1.3 Direkter Vergleich

Da bei der zweiten Messmethodik der erste der jeweils acht vermessenen Aligner dem bei der ersten Messmethodik einzigen vermessenen Aligner entspricht, ist ein direkter Vergleich der zwei Messmethoden, wenn auch ausschließlich für jeweils

diesen ausgewählten Aligner, bedingt möglich. Verglichen wird dabei das berechnete Abstandsmaß zwischen den jeweiligen Kontaktpunkten inkl. dem Attachmentdurchmesser. Ansonsten ist dies hauptsächlich deshalb schwierig, weil der Passgenauigkeitsbestimmung „a vertice“ Mittelwerte der jeweils vier gemessenen Teilabstände zugrunde liegen, und auch der jeweilige Attachmentdurchmesser dabei nicht einberechnet wurde. Bei der Passgenauigkeitsbestimmung mit Schnitt wurde hingegen anstatt eines Teilabstands der gesamte Abstand optisch gemessen. In diesem Wert ist stets der Attachmentdurchmesser enthalten.

Im Unterschied zu der in Kapitel 3.5.1 beschriebenen Messmethodik „a vertice“ wird also nachfolgend für den direkten Vergleich die Summe der gegenüberliegenden gemessenen Abstände, A1 und A3 einerseits und A2 und A4 andererseits (siehe Abbildung 5), sowie dem jeweiligen Attachmentdurchmesser herangezogen. Tatsächlich gegenübergestellt wird dieser Abstandswert dann zu dem analog zu Kapitel 3.5.2 gemessenen Abstand der zweiten Messmethode mit Alignerschnitt. Um zusätzlich den Einfluss der primären Alignerparameter (Folienstärke, Attachmentdurchmesser und –höhe) feststellen zu können, werden die jeweils ermittelten Abstände hier zumindest für die Kombinationen dieser jeweils kleinsten, mittleren und größten Parameterwerte verglichen.

Bei diesem direkten Vergleich ist nun festzustellen, dass ein großer numerischer Unterschied, hauptsächlich durch die bei der Methodenkritik der ersten Methode beschriebenen Faktoren bedingt, vorhanden ist. Bei der kleinsten Kombination aus Folienstärke 0,500 mm, Attachmentdurchmesser 0,9 mm und Attachmenthöhe 0,5 mm wurde so ermittelt, dass der Wert der zweiten Messmethodik 3mal so groß wie der Wert der ersten Messmethodik ist. Bei der mittleren Folienstärke 0,625 mm, dem mittleren Attachmentdurchmesser 1,5 mm und der mittleren Attachmenthöhe 1,5 mm ergab sich ein noch immer erheblicher Unterschied mit dem Verhältnis ca. 2,35mal so groß im direkten Vergleich. Bei der dicksten Folienstärke 0,750 mm, dem größten Attachmentdurchmesser 2,5 mm und dem höchsten Attachment mit 2,5 mm ist der zweite Wert noch ca. 1,7mal so groß wie der erste Wert.

Aus diesen Daten lässt sich schnell erkennen, dass die Ergebnisse der beiden

Methoden bei Alignern gleicher Stärke nicht nur nicht identisch sind, sondern weit auseinanderklaffen und dementsprechend nicht annähernd vergleichbar oder in Relation zueinander zu setzen sind. Dies wird auch durch das Ergebnis der statistischen Datenanalyse der zwei Methoden widerspiegelt, das in Abbildung 17 in Kapitel 4.4 genau gezeigt wird. Es soll nochmals festgehalten werden, dass hier zwar mit durch die „a vertice“ Messmethodik optisch erfassten Daten Vergleichswerte inklusive der Abmessungen der Attachmentdurchmesser gebildet wurden. Diese hier mit den Abstandswerten der zweiten Messmethode für die exakt selben Aligner (den jeweils ersten der acht Stück) gegenübergestellten Werte entsprechen aber nicht den in Kapitel 4.1 präsentierten „a vertice“ Ergebnissen.

Darüber hinaus ist zu beobachten, dass das berechnete Verhältnis der Abstandswerte aus erster und zweiter Messmethodik stark über den Anstieg der Alignerparameter (Folienstärke, Attachmentdurchmesser und -höhe) abfällt. So sinkt das Verhältnis bei den kleinsten Alignerparametern von 3 auf ca. 1,7 bei den größten Parametern.

Die bereits beschriebenen Fehlerquellen bei der Messmethode „a vertice“ lassen die Schlussfolgerung zu, dass bei Verwendung der zweiten Messmethode, also der horizontalen Vermessung eines Alignerschnitts, von einer präziseren und aussagekräftigeren Ergebnisqualität auszugehen ist. Nichtsdestotrotz könnten auch beim zweiten Messverfahren mögliche Fehlerquellen weiter eliminiert oder minimiert werden, wie bereits eingangs in Kapitel 5.1.2 beschrieben.

5.1.4 Weitere Einflüsse

Unter den zusätzlichen Faktoren, die die Messergebnisse und deren Konsistenz negativ beeinflussen, finden sich auch die vom Hersteller Scheu-Dental Technology angegebenen geometrischen Abweichungen der Alignerstärke. Diese produktionsbedingten Toleranzen sind auf jeder Folienverpackung aufgelistet und können u.a. auch auf das Folienverhalten während und nach dem Thermoform- und Druckvorgang bei der Alignerherstellung im Labor einen Effekt haben.

Bei einer Alignerfolie mit einer Stärke von 0,500 mm als Nennmaß sind Toleranzen

im Wertebereich von $-0/+0,12$ mm angegeben, was einer Abweichung von $-0/+24$ % entspricht, wie Tabelle 17 zeigt. Dies kann im Grenzfall also zur Folge haben, dass ein Aligner im oberen Grenzmaß mit einer tatsächlichen Stärke von 0,62 mm in den Messreihen von 0,500 mm Folienstärken vorkommt, obwohl dies schon fast dem Nennmaß der nächst größeren Alignerfolienstärke entspricht. Bei der Alignerfolie mit einer angegebenen Stärke von 0,625 mm ist der Toleranzbereich mit $-0/+0,115$ mm angeführt, während bei der größten Folienstärke von 0,750 mm die Werte bei $-0/+0,15$ mm liegen. Sogar bei der zweiten Messmethodik können diese Produktionstoleranzen die Streuung der Messwerte der einzelnen Aligner stark beeinflussen und somit eine Basis für eine inkonsistente Zusammensetzung der Mittelwerte sein, da für jeden der acht Aligner eine andere Alignerfolie mit anderen tatsächlichen Maßen verwendet wurde.

Tabelle 17: Darstellung der vom Hersteller angegebenen Alignerfolientoleranzen, der resultierenden unteren und oberen Grenzmaße und der dazugehörigen Abweichungen.

Nennmaß Folienstärke [mm]	Toleranzangabe [mm]	Untere Toleranz [mm]	Unteres Grenzmaß [mm]	Abweichung unteres Grenzmaß [%]	Obere Toleranz [mm]	Oberes Grenzmaß [mm]	Abweichung oberes Grenzmaß
0,500	$-0/+0,12$	0	0,500	-	0,12	0,62	+24%
0,625	$-0/+0,115$	0	0,625	-	0,115	0,74	+18%
0,750	$-0/+0,15$	0	0,750	-	0,15	0,9	+20%

In manchen Studien wurde eine Abweichung der nach dem Thermoformvorgang gemessenen Alignerfolienstärke im Vergleich zu der ursprünglichen Folienstärke nachgewiesen. So beschrieb z. B. Dasy, dass die Alignerfolienstärke allgemein durch den Thermoformprozess um 0,017 bis 0,022 mm bei den Folienstärken 0,500 mm, 0,625 mm und 0,750 mm reduziert wurde (Dasy et al. 2015). Auch laut Cowley wurde bei Aligner Duran® mit einer ursprünglichen Folienstärke 1,0 mm nach dem Thermoformverfahren eine Veränderung der Folie um 0,15 mm nachgewiesen (Cowley et al. 2012).

Eine weitere Schwierigkeit besteht in den kleinen Dimensionen der Attachments und in den kleinen zu messenden Abständen bei den Methoden „a vertice“ und „Horizontale Vermessung eines Schnittes“. In Vorversuchen wurde zuerst damit experimentiert, die Beispielattachments mit größeren Dimensionen herzustellen, nämlich mit einer Höhe von 20 mm und einem Durchmesser von 20 mm. Die

Durchführung der Messungen konnte aber bei diesen Maßstäben nicht verwirklicht werden, weil die Alignerfolien Falten in Längsrichtung der zylindrischen Attachments bildeten (Abbildung 19). Dieses Verhalten der Alignerfolie wurde bei den späteren Beispielattachments mit kleineren Abmessungen nicht beobachtet. Letztere kamen dann für die durchgeführten Versuche in dieser Studie zum Einsatz.

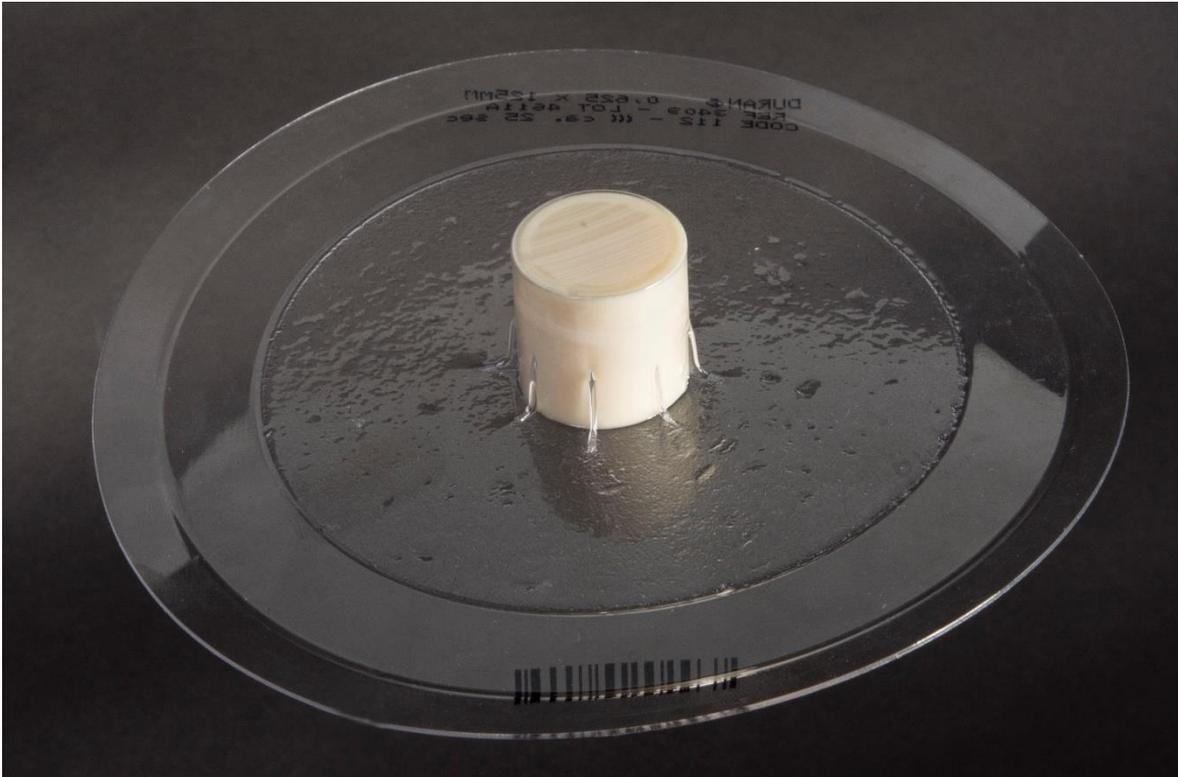


Abbildung 19: Darstellung des zylindrischen Körpers eines größeren Beispielattachments und einer darüber tiefgezogenen Alignerfolie aus den Vorversuchsreihen. Ersichtlich sind die Falten der Alignerfolie, die sich bei diesen größeren Attachments in Längsrichtung gebildet haben.

5.2 Ergebnisdiskussion

In diesem Kapitel werden ausführlich die Ergebnisse diskutiert, die in Kapitel 4 präsentiert wurden. Die Daten aus dieser Studie können folglich dazu verwendet werden, um Richtlinien zur präziseren Behandlung von Alignern in Kombination mit Attachments zu erstellen. Es wurden folgende Punkte diskutiert: (1) die Resultate der Messmethode „a vertice“, (2) die der Methode „horizontale Vermessung eines Schnittes ohne und (3) mit Vertiefung und (4) der umfassende Vergleich aus allen Methoden.

5.2.1 „a vertice“

Im folgenden Abschnitt wurden die Ergebnisse von Kapitel 4.1 Passgenauigkeitsbestimmung "a vertice" ausführlich diskutiert und in Abbildung 20 zusammengefasst. Die Details für die einzelnen Aligner Folienstärken finden sich in Abbildung 8, Abbildung 9 und Abbildung 10 des vorhin erwähnten Kapitels.

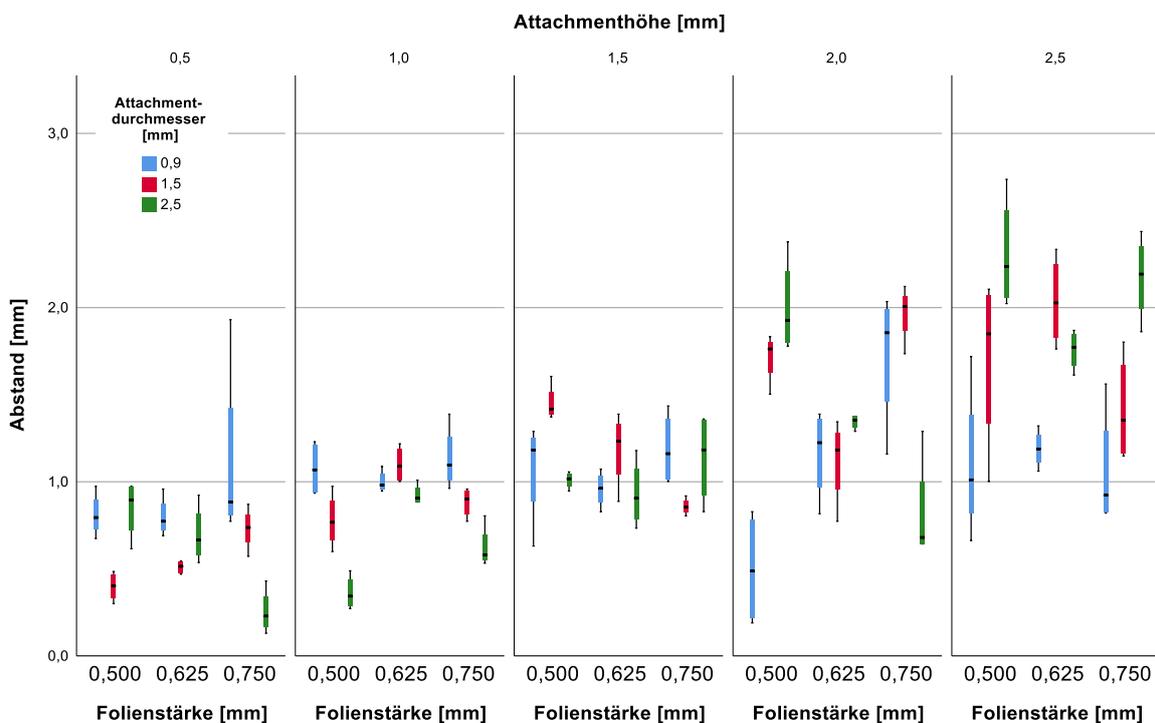


Abbildung 20: Zusammenfassung der Ergebnisse von Kapitel 4.1 Passgenauigkeitsbestimmung "a vertice". Ersichtlich sind die ausgerechneten Mittelwerte mit den dazugehörigen Standardabweichungen für die primären Messparameter: Aligner Folienstärke (untere X- Achse: 0,500; 0,625; 0,750 mm), Attachmenthöhe (obere X-Achse, H=0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 mm) und Attachmentsdurchmesser.

Bei den Ergebnissen für eine Alignerfolienstärke von 0,500 mm (Kapitel 4.1.1) ist keine klare Abhängigkeit der Abstandsmittelwerte vom Attachmentsdurchmesser und/oder der -höhe festzustellen. Die drei für diese Messreihe niedrigsten Mittelwerte wurden bei verschiedenen Attachmentsdurchmessern und -höhen identifiziert. Bei 0,9 mm Durchmesser und einer Attachmenthöhe von 2,0 mm wurde ein Mittelwert von 0,50 mm, bei dem Attachmentsdurchmesser 1,5 mm und ebenfalls einer Höhe von 0,5 mm ein gemittelter Abstand von 0,40 mm, und für 2,5 mm Attachmentsdurchmesser bei 1,0 mm Höhe der bei dieser Folienstärke kleinste und

somit beste Mittelwert von 0,36 mm ermittelt. Die Passgenauigkeit ist bei den beschriebenen Parameterkombinationen also relativ gut, jedoch lässt sich aus diesen Daten keine deutliche Abhängigkeit zu Attachmentdurchmesser und –höhe ableiten. Der mittlere Fehler hingegen zeigt in Abbildung 8 und Abbildung 20 einen ansteigenden Trend über die Attachmenthöhen. Bis zu einer Attachmenthöhe von 1,0 mm bleibt die Standardabweichung gering und relativ gleichmäßig, bei 1,5 mm ist ein größerer Ausreißer bei dem Durchmesser 0,9 mm zu sehen und bei den höheren Attachments mit 2,0 und 2,5 mm sind zumindest zwei von drei Durchmessern in Hinblick auf die Häufigkeit dieser Ausreißer auffällig.

In Abschnitt 4.1.2, in welchem die Ergebnisse der 0,625 mm Alignerfolienstärke beschrieben wurden, wurden Zusammenhänge zwischen den untersuchten Parametern festgestellt. Eine bessere Passgenauigkeit findet sich generell bei der Attachmenthöhe 0,5 mm. Diese Ergebnisse wurden bei allen drei Durchmessern bei der Attachmenthöhe 0,5 mm beobachtet. Während die ermittelten Einzelwerte bei den Durchmessern 0,9 und 1,5 mm relativ nah aneinander liegen, zeigt sich bei dem größten Durchmesser von 2,5 mm eine größere Streuung unter den Messwerten. Im weiteren Verlauf ist mit Zunahme der Attachmenthöhe zu erkennen, dass die Messwerte bei den Durchmessern 0,9 und 2,5 mm bei den Attachmenthöhen 1,0 und 1,5 mm kleiner sind, als die Werte bei einem Durchmesser von 1,5 mm. Auch hier lässt sich dies mit einer besseren Passgenauigkeit der Alignerfolie bei den Diametern 0,9 und 2,5 mm in Verbindung bringen. Anhand der in Abbildung 20 dargestellten Werte, lassen sich keine weiteren Zusammenhänge zwischen den anderen Kombinationen aus Durchmessern und Attachmenthöhen bei einer Folienstärke von 0,625 mm deduzieren.

Aus Kapitel 4.1.3 wurden für die Alignerfolienstärke von 0,750 mm keine allgemeinen eindeutigen Abhängigkeiten zwischen den Mittelwerten erkannt. Bei Attachmentdurchmesser 0,9 mm wird der extrem schmale Wertebereich der Mittelwerte von 1,06 bis 1,19 mm nur durch den ausreißenden Mittelwert von 1,73 mm, gemessen bei einer Attachmenthöhe von 2,0 mm, unterbrochen. Bei dem Attachment mit dem Durchmesser 1,5 mm sind die Mittelwerte der ersten drei Attachmenthöhen wieder in etwa gleich groß. Diese zwei Auffälligkeiten scheinen

darauf hinzuweisen, dass die Passgenauigkeit der Aligner bei einer Folienstärke von 0,750 mm bei diesen geringeren Attachmentdurchmessern 0,9 und 1,5 mm vom Parameter der Attachmenthöhe beinahe unbeeinflusst ist. Ein ansteigender Trend der Mittelwerte und somit eine relative Verschlechterung der Passgenauigkeit über die Attachmenthöhe kann hingegen bei dem größten Attachmentdurchmesser von 2,5 mm erkannt werden. Dieser Anstieg wird jedoch durch einen relativ kleinen Mittelwert bei der Höhe 2,0 mm unterbrochen. Des Weiteren fällt bei diesem Durchmesser von 2,5 mm im Vergleich mit den kleineren Durchmessern 0,9 und 1,5 mm auf, dass bei den Attachmenthöhen 0,5 mm, 1,0 und 2,0 mm die Passgenauigkeit besser ausfällt.

In Hinblick auf die Standardabweichung kann grob festgestellt werden, dass die Streubreite ab einer Attachmenthöhe von 1,5 mm ansteigt. Für den Durchmesser 0,9 mm wird außerdem bei dem niedrigsten Attachment mit einer Höhe von 0,5 mm und bei der größten Folienstärke 0,750 mm eine erhebliche Streubreite beobachtet. Zusammenfassend lassen sich von den Ergebnissen der oben beschriebenen Messmethodik „a vertice“ bei Vergleich der Mittelwerte keine deutlichen Abhängigkeiten identifizieren. Aufgrund der wie eingangs in Kapitel 5.1.1 kritisierten Inkonsistenzen bei den Messwerten der Methode „a vertice“ und sämtlichen Ausreißern präsentiert sich die Lage für ein Erkennen allgemeiner Tendenzen erwartungsgemäß schwierig. Wie die niedrigeren Mittelwerte bei diesen Parameterkombinationen zeigen, scheint die Passgenauigkeit aber unabhängig von Folienstärke und Durchmesser bei der geringsten Höhe von 0,5 mm im Allgemeinen besser zu sein. Die gemessenen Abstände steigen außerdem insgesamt über den Verlauf der Attachmenthöhe mit an, sodass die verallgemeinernde Behauptung nahe liegt, dass bei den höheren Attachments generell von einer schlechteren Passgenauigkeit ausgegangen werden kann. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass sich trotz veränderter Folienstärke die Materialeigenschaften der Alignerfolie vermutlich nicht signifikant ändern. Dies bewirkt, dass im orthogonalen Messverfahren bei Zunahme der vertikalen Abmessung (Attachmenthöhe), die verbindende Hypotenuse (Alignerfolie), an Länge gewinnt und der horizontale Messwert (Verweis Abbildung 5: Strecke E bis F) konkomitant zunimmt.

In Bezug auf den Einfluss des Attachmentdurchmessers auf die Passgenauigkeit konnte lediglich festgestellt werden, dass die Mittelwerte bei Attachments mit einem Durchmesser von 0,9 mm bis auf zwei Ausreißer, beide bei einer Attachmenthöhe von 2,0 mm, ungeachtet der Alignerfolienstärke als auch der Attachmenthöhe durchgehend in einem ungefähren Wertebereich um 1,0 mm liegen.

Für die Auswirkungen der Folienstärke kann keine konkrete Behauptung aufgestellt werden.

Die berechneten Standardabweichungen der Mittelwerte steigen im Großen und Ganzen mit zunehmender Attachmenthöhe unabhängig von der Alignerfolienstärke oder den Attachmentdurchmessern an.

5.2.2 Horizontale Vermessung eines Alignerschnitts

In Kapitel 4.2 wurden Mittelwerte der Abstände präsentiert, die anhand der Messmethodik des Alignerschnitts ermittelt worden sind. Diese sind hier in Abbildung 21 zusammengefasst und als Detailansichten in erwähntem Kapitel als Abbildung 11, Abbildung 12 und Abbildung 13 dargestellt.

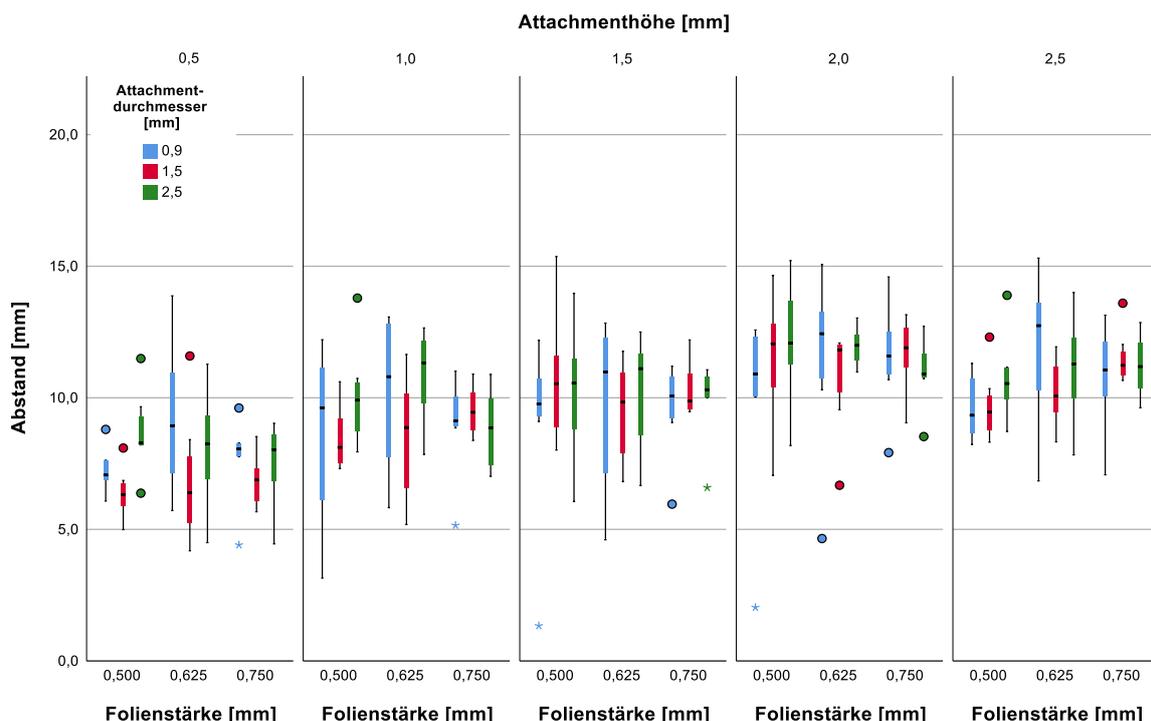


Abbildung 21: Zusammenfassung der Ergebnisse von Kapitel 4.2 Passgenauigkeitsbestimmung nach einem Schnitt. Ersichtlich sind die Mediane, inklusive der zugehörigen Konfidenzintervalle für

die primären Messparameter: Aligner Folienstärke (X-Achsen: 0,500; 0,625; 0,750 mm), Attachmentshöhe (Reihen, H=0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 mm) und Attachmentdurchmesser.

Für die Aligner mit einer Folienstärke 0,500 mm ist ohne Einbeziehung des Fehlerbereiches generell ein ansteigendes Verhalten der Mittelwerte über die Attachmenthöhen zu beobachten. Bei einer Attachmenthöhe von 2,5 mm stellen sich diese jedoch wieder kleiner als die Mittelwerte bei einer Höhe von 2,0 mm dar, und das unabhängig von dem jeweiligen Attachmentdurchmesser (0,9 mm, 1,5 mm oder 2,5 mm). Außerdem wurden bei dem größten Attachmentdurchmesser 2,5 mm sehr nah beieinander liegende Werte von 10,03 und 10,22 mm bei den Attachmenthöhen 1,0 und 1,5 mm ausgerechnet. Bei dieser Messmethodik ist die Streuung auf die Differenz zwischen dem Maximal- und Minimalwert der Abstandsmessungen der jeweiligen acht Aligner zurückzuführen. Bei dem Attachmentdurchmesser 0,9 mm und den Attachmenthöhen 1,0 mm, 1,5 mm und 2,0 mm tritt ein großer mittlerer Fehler auf. In diesen Fällen handelt es sich um fünf Einzelwerte, die aufgrund ihres geringen Messwerts bei den Mikroskopkameraufnahmen Deformationen der Alignerfolie darstellen. Im Laufe der Messversuche wurde immer wieder ein solches abnormales Verhalten der Alignerfolie beobachtet.

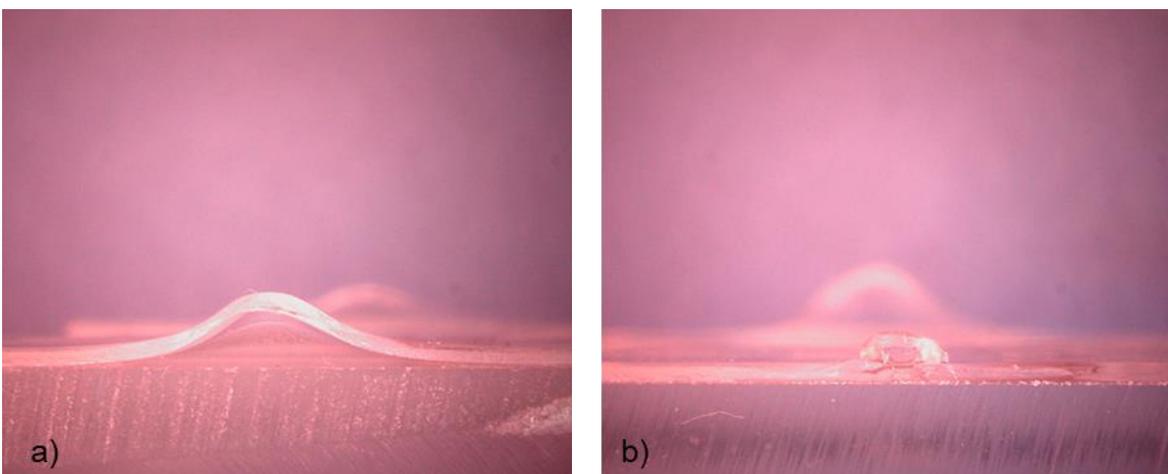


Abbildung 22: Vergleich zwischen einer durchschnittlichen und einer Ausreißer Alignerfolie mit der gleichen Stärke 0,625 mm, tiefgezogen über dasselbe Attachment mit Durchmesser 0,9 mm und einer Höhe von 1,5 mm; Darstellung in horizontaler Lage nach Schnitt einer a) durchschnittlichen Alignerfolie, b) Ausreißer-Alignerfolie;

Dieses erklärt sich dadurch, dass sich die Alignerfolie unvorhersehbar deformiert

und viel enger an dem Attachment liegt, als durchschnittlich bei den anderen Folien beobachtet wurde (Vergleich siehe Abbildung 22). Der Effekt dieser Randerscheinungen konnte leider nicht kontrolliert reproduziert oder erklärt werden, führt aber paradoxerweise zu einer sehr hohen Passgenauigkeit und könnte deshalb für eine Untersuchung durch weitere Studien relevant sein. Es ist darüber hinaus erwähnenswert, dass diese Unregelmäßigkeit der 0,5 mm Alignerfolien nur bei den Attachments mit Durchmesser 0,9 mm auftrat. Bei den Attachmentdurchmessern 1,5 und 2,5 mm wurden keine solchen Ausreißer beobachtet.

In Kapitel 4.2.2 wurden die Ergebnisse der Messungen des Schnittmessverfahrens präsentiert, die mit einer Alignerfolienstärke von 0,625 mm durchgeführt wurden. Als allgemeine Tendenz wurde wieder bei allen Attachmentdurchmessern ein Anstieg des Mittelwertes über die Attachmenthöhe beobachtet, jedoch mit folgenden Ausnahmen: Bei dem Attachmentdurchmesser 0,9 mm war der Mittelwert bei einer Attachmenthöhe von 1,5 mm kleiner als bei einer Attachmenthöhe von 1,0 mm. Dazu wurde bei dem Attachmentdurchmesser 1,5 mm und bei der Attachmenthöhe 2,5 mm ein niedrigerer Mittelwert im Vergleich zum Mittelwert bei der Höhe von 2,0 mm gefunden. Des Weiteren wurden für das größte Attachment mit einem Durchmesser von 2,5 mm sowohl bei der mittleren Attachmenthöhe von 1,5 mm als auch bei dem höchsten Attachment mit 2,5 mm niedrigere Mittelwerte abgelesen.

Interessant ist die Tatsache, dass bei demselben Attachmentdurchmesser 0,9 mm eine von den acht gemessenen Alignerfolien (Folie Versuch 2, V2) sehr niedrige Messwerte bei regulärer Form zeigt und somit eine gute Passgenauigkeit aufweist. Da dasselbe Exemplar Folie über ein Gipsmodell mit fünf Attachments gleichen Durchmessers, aber unterschiedlicher Höhen gezogen wurde, ist hier deutlich zu sehen, dass dieses Verhalten der Folie unabhängig von der Höhe auftreten kann. Jedoch konnte ermittelt werden, dass die Passform bei der Alignerfolie V2 keinen signifikanten Unterschied im Vergleich zu der der anderen „normalen“ Alignerfolien zeigte und deswegen nicht zu den oben gezeigten und beschriebenen Ausreißern mit Deformation zählt. Der einzige deformierte Ausreißerwert bei der 0,625 mm-Alignerfolie wurde bei einer der Messreihen bei einem Attachmentdurchmesser von

0,9 mm und der Attachmenthöhe 1,5 mm erkannt.

Auch bei einem Attachmentdurchmesser von 1,5 mm wurden bei einer von acht Alignerfolien (Folie Versuch 3, V3) erneut wesentlich niedrigere Mittelwerte bei allen fünf Attachmenthöhen abgelesen. Analog zu dem oberen Abschnitt wurde auch hier keine atypische Deformation der Alignerfolie festgestellt. Des Weiteren befand sich bei dem Durchmesser von 1,5 mm und der Attachmenthöhe 0,5 mm der größte Unterschied zwischen dem Minimal- und Maximalwert. Dieser Unterschied lag daran, dass bei einer der Folien ein sehr niedriger und bei einer anderen ein sehr hoher Einzelmesswert ermittelt wurde. Bei dem Durchmesser 1,5 mm konnten keine deformationsbedingten Ausreißer nachgewiesen werden.

Bei der Betrachtung der Messwerte bei dem größten Attachmentdurchmesser mit 2,5 mm wurde ersichtlich, dass auch in diesem Fall eine der Alignerfolien (Folie Versuch 3, V3) niedrigere Einzelmesswerte im Vergleich zu den anderen Folien zeigt. Weitere Abweichungen vom Mittelwert traten bei den Attachmenthöhen 0,5 mm und 2,5 mm auf, wo die jeweiligen Einzelmesswerte höher lagen, und bei der Attachmenthöhe 1,5 mm, wo ein sehr niedriger Messwert aufgenommen wurde. Alle genannten Abweichungen bei dem größten Attachmentdurchmesser 2,5 mm sind nicht auf eine Deformation der Alignerfolie nach dem Thermoformprozess zurück zu führen, was eindeutig aus den Mikroskopkamerabildern ersichtlich war. In Kapitel 4.2.3 wurden die Ergebnisse der Messungen präsentiert, die mit einer Aligner Folienstärke von 0,750 mm durchgeführt wurden. Genau wie bei den anderen Messreihen von Kapitel 4.2 wurden auch hier acht Alignerfolien bei jeder Kombination aus Alignerstärke, Attachmentdurchmesser und Attachmenthöhe erstellt. Grundsätzlich wurde hier erneut bei allen Attachmentdurchmessern eine stetige Zunahme der gemessenen Abstände über die Attachmenthöhe festgestellt, außer bei den zwei Kombinationen aus Attachmenthöhe 2,5 mm und Attachmentdurchmesser 0,9 mm sowie Attachmentdurchmesser 1,5 mm. Erwähnenswert ist auch die Tendenz, dass mit dem Anstieg des Attachmentdurchmessers auch die Differenz der Mittelwerte zwischen den Attachmenthöhen 2,5 mm und 2,0 mm vergrößert wurde. Aus Tabelle 10 ist ersichtlich, dass bei Durchmesser 0,9 mm der Unterschied zwischen dem Mittelwert

bei 2,5 mm und 2,0 mm Attachmenthöhe -0,70 mm beträgt. Des Weiteren beläuft sich bei dem größeren Durchmesser 1,5 mm und gleichen Attachmenthöhen die Differenz auf -0,21 mm, während bei dem größten Attachmentdurchmesser eine positive Differenz von 0,20 mm ermittelt wurde.

Bei dem Attachmentdurchmesser 0,9 mm wurde analog zu dem Abschnitt mit der Folienstärke 0,625 mm festgestellt, dass eine der Alignerfolien (Folie Versuch 1, V1) wesentlich kleinere Einzelwerte im Vergleich zu den anderen zeigt. Anhand der Mikroskopkameraaufnahmen wurde die Passform der geschnittenen Aligner wieder überprüft, was in diesem Fall Ausreißer ausschließen konnte, die durch Deformationen beim Thermoformprozess verursacht wurden.

Bei der Beobachtung der Einzelmesswerte des Attachmentdurchmessers 1,5 mm sind weder große Abweichungen, noch abnormale Deformationen der Alignerfolie registriert worden.

Bei dem Attachment mit dem größten Durchmesser, nämlich 2,5 mm, gab es wieder eine Alignerfolie (Folie Versuch 2, V2), die bei allen Attachmenthöhen niedrigere Einzelwerte im Vergleich zu den anderen Versuchen zeigte. Bei der Folie V2 waren alle abgelesenen Einzelwerte deutlich niedriger als die Mittelwerte der jeweiligen Attachmenthöhen, mit einer Ausnahme der Höhe 2,5 mm, wo der Einzelwert etwas näher bei dem Durchschnittswert lag. Bei der Attachmenthöhe 1,0 mm wurden noch zwei niedrige Einzelwerte festgestellt, was die bereits vorher aufgestellte Behauptung über die größere Streuung im Wertebereich der niedrigeren Attachments mit einer Höhe von 0,5 und 1,0 mm stützt.

Als Haupttendenz der bisher aufgeführten Diskussion der Ergebnisse vom Schnittmessverfahren lässt sich folgendes zusammenfassen:

- ➔ Bei der Attachmenthöhe 2,5 mm wurden am häufigsten kleinere Mittelwerte der Abstände im Vergleich zu denen der Höhe 2,0 mm unmittelbar davor abgelesen. Diese Tendenz wurde in sieben von neun der oben beschriebenen Kombinationen aus allen drei Alignerfolienstärken, allen drei Attachmentdurchmessern und dieser Höhe 2,5 mm festgestellt und deutet hier auf ein engeres Anliegen der Alignerfolie an das Attachment hin und dementsprechend auf eine bessere Passgenauigkeit.
- ➔ In zwei von neun Fällen wurden kleinere Mittelwerte bei der Attachmenthöhe

1,5 mm festgestellt, die sowohl bei dem kleinsten, als auch bei dem größten Attachmentdurchmesser und jeweils bei den Alignern mit der Stärke 0,625 mm vorkamen.

- ➔ Bei der Alignerfolienstärke 0,750 mm erhöhte sich tendenziell bei der Attachmenthöhe 2,5 mm der im Schnitt-Messverfahren gemessene Abstand mit dem steigenden Durchmesser der Attachments. Das zeigt, dass hier die Passgenauigkeit der 0,750 mm-Alignerfolie bei Attachments mit kleineren Durchmessern besser ist im Vergleich zu der bei größeren Durchmessern. Bei den anderen zwei Alignerfolienstärken wurde jedoch kein ähnliches Verhalten erkannt.
- ➔ Es treten auch ganze Alignerfolienreihen mit niedrigeren Einzelwerten auf. Als eine Alignerfolienreihe sind hier alle fünf Messungen, die bei einer einzigen Alignerfolie auf einem Gipsmodell mit dem gleichen Attachmentdurchmesser bei fünf verschiedenen Attachmenthöhen durchgeführt wurden. Dieser Effekt war am stärksten bei der vom Hersteller angegebenen Folienstärke 0,625 mm, bei der bei jedem Durchmesser eine solche Alignerfolienreihe von den acht vermessenen auftritt. Zusätzlich kommen auch bei der Folienstärke 0,750 mm zwei solche Alignerfolienreihen mit niedrigen Einzelwerten vor. Bei einer Folienstärke von 0,500 mm wurden hingegen keine solchen Alignerfolienreihen festgestellt.
- ➔ Interessante Resultate in dieser Studie wegen der wesentlich besseren Passgenauigkeit der Alignerfolie stellen die bereits beschriebenen Ausreißer mit atypischen Deformationen der Alignerfolie nach dem Thermoformverfahren dar. Im vorliegenden Kapitel wurden insgesamt sechs solche Ausreißer von allen 360 Einzelwerten festgestellt. Hinsichtlich der Gesamtanzahl der Messungen dieses Verfahrens stellen diese also einen kleinen relativen Anteil dar. Allerdings ist zu vermerken, dass die Ausreißer vermehrt bei bestimmten Kombinationen aus Folienstärken, Attachmentdurchmessern und –höhen vorkommen. So wurden fünf von sechs Ausreißern bei der Kombination aus Folienstärke 0,500 mm und einem Attachmentdurchmesser von 0,9 mm beobachtet, und zwar bei Attachmenthöhen 1,0 und 1,5 und 2,0 mm. Relativ betrachtet ergibt das

insgesamt bei allen fünf Attachmenthöhen einen Anteil von 12,5 % von allen Einzelmessungen bei der Kombination aus 0,500 mm Folienstärke und Attachmentdurchmesser 0,9 mm. Der sechste Ausreißer ergab sich bei der mittleren Folienstärke 0,625 mm, wieder bei dem kleinsten Attachmentdurchmesser 0,9 mm und einer Attachmenthöhe von 1,5 mm. Sowohl bei den Alignern mit der größten Folienstärke von 0,750 mm, als auch bei den mittleren (1,5 mm) und größten (2,5 mm) Attachmentdurchmessern wurden gar keine solchen Ausreißer ermittelt. Deswegen kann hier das Fazit gezogen werden: Einerseits ist das Verhalten der Alignerfolie umso stabiler und die Ergebnisse umso konsistenter und vorhersagbarer, je größer die Folienstärke und der Attachmentdurchmesser sind. Dabei liegen keine Beweise dafür vor, dass die Attachmenthöhe in Verbindung mit dem Auftreten von Ausreißern steht. Andererseits stellen die Ausreißer-Aligner eine nahezu perfekte Passgenauigkeit dar und wären als solche erstrebenswert, wenn die Reproduzierbarkeit gegeben und die Herstellung kontrolliert wäre.

5.2.3 Horizontale Vermessung eines Alignerschnitts mit Vertiefung im Gipsmodell

In den folgenden Abschnitten wurden die in Kapitel 4.3 aufgeführten Ergebnisse vom Messverfahren „Schnitt mit Vertiefung im Gipsmodell“ ausführlich diskutiert. Eine Zusammenfassung aller Mittelwerte mit deren Standardabweichungen wurde sowohl in Abbildung 23, als auch detailliert in Abbildung 14, Abbildung 15 und Abbildung 16 des Kapitels 4.3 dargestellt.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse der Versuche mit der mittleren Alignerfolienstärke 0,625 mm zeigen sich bei allen drei Attachmentdurchmessern kleinere Abstände bei der Attachmenthöhe von 2,5 mm. Insgesamt drei Alignerfolienreihen mit deutlich kleineren Abständen wurden ermittelt, davon zwei bei dem Durchmesser von 1,5 mm und eine bei dem größten Attachmentdurchmesser von 2,5 mm. Im Gegensatz dazu zeigten die Messungen bei dem kleinsten Attachmentdurchmesser 0,9 mm keine ganzen wie oben beschriebenen Messreihen von dichter anliegenden Alignerfolien, sondern nur zwei einzelne Ausreißerwerte, deren Folien sich vermutlich ebenfalls während des therm-

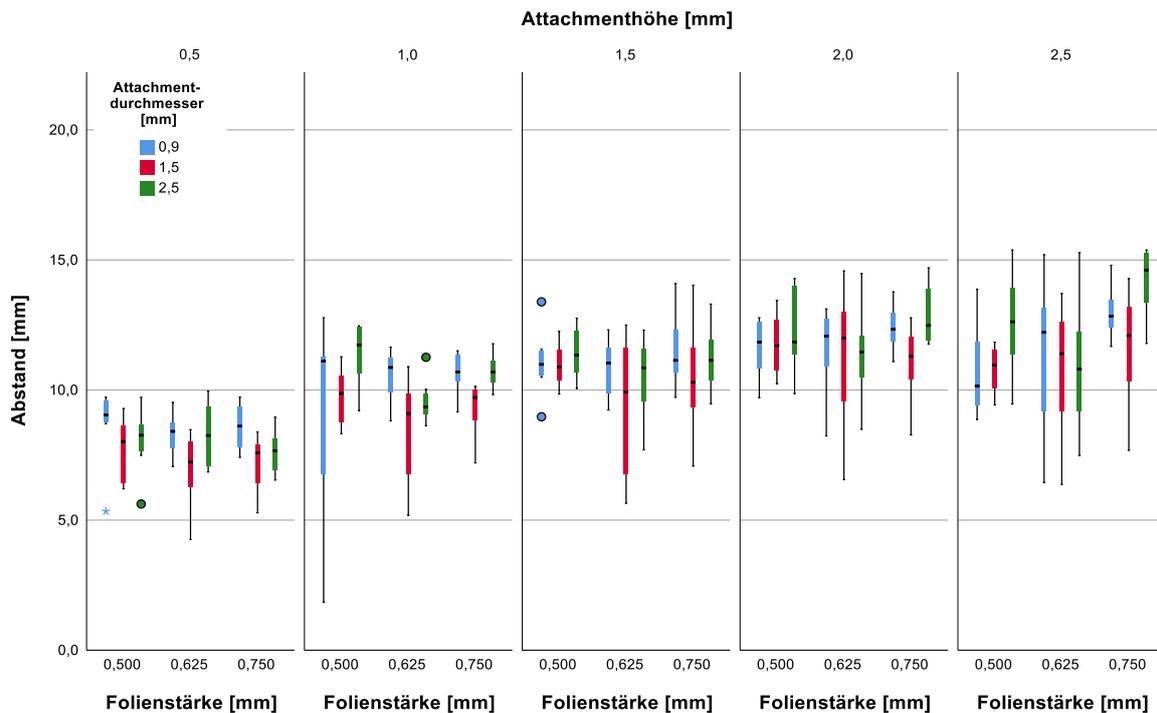


Abbildung 23: Zusammenfassung der Ergebnisse von Kapitel 4.2 Passgenauigkeitsbestimmung nach einem Schnitt mit Vertiefung im Gipsmodell. Ersichtlich sind die Mediane, inklusive zugehöriger Konfidenzintervalle für die primären Messparameter: Aligner Folienstärke (X- Achsen: 0,500; 0,625; 0,750 mm), Attachmenthöhe (Reihen, H=0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 mm) und -durchmesser.

ischen Vorgangs abnormal deformierten. Beide Ausreißerwerte befinden sich jedoch bei der Attachmenthöhe 2,5 mm, was auch die kleineren Mittelwerte bei diesem Attachment erklärt. Es lässt sich vermutlich die Tendenz konstatieren, dass durch eine zusätzliche Vertiefung im Gipsmodell Attachments mit dem Durchmesser 0,9 mm stabilere Einzelmesswerte im Vergleich zu Attachments mit dem Durchmesser 1,5 mm bei einer Folienstärke von 0,625 mm zeigen. Andererseits kann das Vorkommen von einzelnen Ausreißerwerten bei einem Attachment mit dem Durchmesser 0,9 mm noch nicht genau vorhergesehen und kontrolliert werden.

Bei einer Alignerfolienstärke von 0,750 mm wurde jeweils bei allen drei Attachmentdurchmessern – 0,9 mm, 1,5 mm und 2,5 mm – ein kontinuierlicher Anstieg der Mittelwerte über die Attachmenthöhe festgestellt. Es wurden auch kaum Alignerfolien gefunden, die mit deren Einzelmesswerten beträchtlich von den anderen und damit auch vom Mittelwert abwichen. Als einziger Unterschied ließen sich zwei Alignerfolien der Messreihe mit 1,5 mm Durchmesser erkennen, die leichte

Abweichungen kleinerer Einzelwerte pro Alignerfolie gezeigt haben. Diese Einzelwerte sind auch die Ursache für die größere Streuung bei den höheren Attachments. Außerdem konnten bei den Mikroskopkameraaufnahmen keine Ausreißer erkannt werden, bei denen die Alignerfolien während des Thermoformverfahrens irregulär deformiert worden waren.

Zuletzt liefert Abbildung 23 Information über die bei allen drei Attachmentdurchmessern bestimmten Mittelwerte für eine Folienstärke von 0,750 mm. So wird bei Betrachtung ein Vergleich der Mittelwerte sowohl über Attachmentdurchmesser als auch Attachmenthöhe möglich. Allgemein kann wie oben beschrieben von Abbildung 13 als Haupttendenz abgelesen werden, dass mit der Höhe der Beispielattachments der berechnete Abstand zunimmt. Bei einem Attachmentdurchmesser von 0,9 mm wurde bei allen Höhen eine relativ große Standardabweichung berechnet, mit Werten von 1,38 bis 1,78 mm (bis ca. 18 %). Im Vergleich dazu liegen die Standardabweichungen bei einem Durchmesser von 1,5 mm in einem kleineren Wertebereich von 0,82 bis 1,23 mm. Bei dem Attachment mit Durchmesser 2,5 mm fällt die Streuung bei einer Attachmenthöhe von 1,0 mm und befindet sich bei allen Höhen im Wertebereich von 1,06 bis 1,41 mm.

Als Haupttendenz in diesem Kapitel lässt sich feststellen, dass eine Vertiefung im Gipsmodell mit den Maßen 0,8 mm Tiefe und 2,0 mm Umfang um das Attachment einen Einfluss auf die Passgenauigkeit und das Verhalten der Alignerfolie ausübt. Folgende Besonderheiten wurden festgestellt:

- ➔ Generell wurde ein kontinuierlicher Anstieg der Abstände über die Attachmenthöhe beobachtet. Eine Ausnahme stellten die Resultate bei der Alignerfolienstärke 0,625 mm dar, wo bei allen drei Attachmentdurchmessern bei einer Attachmenthöhe von 2,5 mm ein engeres Anliegen der Alignerfolie im Vergleich zu der Höhe davor ermittelt wurde.
- ➔ Analog zu Kapitel 5.2.2 wurden auch hier Ergebnisse von ganzen Alignerfolienreihen abgelesen, die am Stück niedrigere Einzelwerte im Vergleich zu den ermittelten Mittelwerten zeigten. Insgesamt fünf von 72 Alignerfolienreihen zeigten solche kleineren Abstände, wobei drei von diesen bei der Alignerfolienstärke 0,625 mm (und bei den Attachmentdurchmessern

1,5 und 2,5 mm) und zwei bei der Stärke von 0,750 mm (beide bei dem Attachmentdurchmesser 1,5 mm) gemessen wurden. Es ist zu vermerken, dass sowohl bei der dünnsten Folienstärke von 0,9 mm, als auch bei dem kleinsten Attachmentdurchmesser keine ganzen Folien mit kleineren Abständen nachgewiesen werden konnten.

- Der nächste wichtige Punkt stellt das Vorkommen von thermoformbedingten Ausreißern unter den Einzelwerten dar. In diesem Kapitel wurden alles in allem drei deformierte Ausreißer beschrieben, die alle bei den Attachments mit dem Durchmesser 0,9 mm und bei den Folienstärken von 0,500 mm und 0,625 mm nachgewiesen wurden. Bei den dickeren Folienstärken und bei den größeren Attachmentdurchmessern wurden keine solchen oder ähnliche Ausreißer belegt. Es lässt sich ein eindeutiger Trend erkennen, dass durch eine zusätzliche Vertiefung im Gipsmodell die deformationsbedingten Ausreißer tendenziell eher bei einer dünneren (0,500 mm) und mittleren Folienstärke (0,625 mm) und / oder bei dem kleinsten Attachmentdurchmesser (0,9 mm) zu finden sind.

5.2.4 Vergleich der Ergebnisse aller verwendeten Methoden

Bei der angewandten Messtechnik „a vertice“ ist keine deutliche Abhängigkeit der Passgenauigkeit von den verschiedenen Folienstärken oder Attachmentdurchmessern zu erkennen. Jedoch kann anhand der ermittelten niedrigen Mittelwerte die konkrete Behauptung aufgestellt werden, dass die Passgenauigkeit der Alignerfolie bei der niedrigsten Attachmenthöhe, nämlich 0,5 mm am besten ist und sich über die zunehmende Höhe mit generell steigenden Mittelwerten verschlechtert. Ebenso steigen die ermittelten Standardabweichungen mit der zunehmenden Attachmenthöhe, unabhängig von Alignerfolienstärke oder Attachmentdurchmesser. Im Allgemeinen scheint die Tendenz vertreten zu sein, dass bei den höheren Attachments generell von einer schlechteren Passgenauigkeit ausgegangen werden kann.

Die zwei Messmethoden „Horizontale Vermessung eines Alignerschnittes“ ohne und mit Vertiefung im Gipsmodell - können aufgrund deren Ähnlichkeit in einen direkten

Vergleich hineinbezogen werden. Markant ist die Tatsache, dass bei den Ergebnissen beider Messmethoden ein engeres Anliegen der Alignerfolie vorwiegend bei der Attachmenthöhe von 2,5 mm im Vergleich zu der Attachmenthöhe 2,0 mm, unmittelbar davor, festgestellt wurde. Den Resultaten der Alignerfolienreihen, bei denen geringere Einzelwerte im Vergleich zu den jeweiligen Mittelwerten bei allen Höhen bestimmt wurden, lässt sich entnehmen, dass bei der Alignerfolienstärke 0,625 mm die Häufigkeit der Alignerfolien, die enger auf dem Attachment liegen, steigt. Dies ist weder von der Attachmenthöhe noch von dem Attachmentdurchmesser abhängig. Zusätzlich kann hier auch vermerkt werden, dass eine geringere Anzahl von den oben beschriebenen Alignerfolienreihen auch bei der Alignerfolie mit der Stärke von 0,750 mm nachgewiesen wurde. Im Gegensatz dazu zeigen sich bei einer Folienstärke von 0,500 mm keine solchen Auffälligkeiten.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass die Häufigkeit der thermoformbedingten Foliendeformationen durch eine Vertiefung im Gipsmodell beeinflusst wird. Dadurch wurde die Anzahl der Ausreißer im Vergleich zu den Resultaten, die ohne Vertiefung ermittelt wurden, minimiert. Beispielsweise kommen so im vorherigen Kapitel weniger Ausreißer und nur bei dem kleinsten Attachmentdurchmesser (0,9 mm) und der kleinsten (0,500 mm) und mittleren (0,625 mm) Folienstärke vor.

Außerdem lässt sich daraus schließen, dass größere Durchmesser (1,5 und 2,5 mm) eher zu besserer Passgenauigkeit ganzer Alignerfolienreihen tendieren, während kleinere Durchmesser z. B. 0,9 mm eher zu einzelnen deformationsbedingten Ausreißern neigen.

5.3 Ergebnisdiskussion im Vergleich zur Literatur

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der drei Untersuchungsmethoden im Vergleich zu der relevanten Literatur diskutiert.

Charakteristisch für Aligner ist, dass sie nach dem Einsetzen Langzeitkräfte ausüben, die mit der Zeit stark nachlassen. Nach zwei Wochen erfolgt eine rapide Abnahme der ausgeübten Kraft um das Vierfache. (Barbagallo et al. 2008). Deswegen ist es für eine erfolgreiche kieferorthopädische Behandlung umso wichtiger, eine

langfristig sichere und gute Passgenauigkeit von Aligner zu Attachment und zum Zahn zu erreichen. Die Ursache für das Nachlassen der Kräfte ist einerseits in der auftretenden Zahnbewegung zu sehen, wodurch Spannungen zwischen KFO-Gerät und Zahnkrone abgebaut werden. Andererseits treten bei Polyurethan – genau wie bei fast allen Polymeren – bereits bei Mundtemperatur sogenannte Kriecheffekte, also thermisch bedingte, plastische Verformungen, auf. Der Betrag der Dehnung aufgrund von Kriechen hängt dabei von der Differenz zwischen der Mundtemperatur und der Glasübergangstemperatur T_G des Polymers ab: Je höher die Differenz desto höher ist die Neigung des Materials zu plastischer Verformung und damit zum Abbau der mechanischen Spannung.

Es existieren viele verschiedene Alignersysteme, aber alle haben gemeinsam, dass die Folien üblicherweise eine Stärke von 1,0 mm nicht überschreiten (Ercoli et al. 2014; Weir 2017). Die auf die Zähne wirkende Kraft ist u. a. auch von der Folienstärke abhängig. Für das Alignersystem CA®, mit dem im Rahmen der vorliegenden Studie gearbeitet wurde, wurde bereits durch Gao und Wichelhaus gezeigt, dass die Folien mit einer Stärke von 0,750 mm die höchsten angewandten Kräfte und die größte Formstabilität der Alignerfolie im Vergleich zu den anderen zwei Alignerstärken des gleichen Systems: (0,500 und 0,625 mm) aufweisen. Dabei wurde des Weiteren erkannt, dass bei der mittleren Alignerfolienstärke von 0,625 mm die Ergebnisse von Kraftmessungen in drei Bewegungsrichtungen nicht aussagekräftig und statistisch nicht signifikant waren (Gao und Wichelhaus 2017). Ein weiterer ihrer Punkte war, dass Aligner mit einem längeren Gingivalrand höhere Kräfte im Vergleich zu Alignern mit einem kürzer ausgeschnittenen Rand aufweisen. Außerdem war die Kraft bei verschiedenen Bewegungsrichtungen der Zähne auch von der gingivalen Randbreite des Aligners abhängig, v. a. bei Intrusion.

Brezniak beobachtete in einigen Fällen bei der Behandlung mit Alignern eine unerwünschte Intrusion, die er im Folgenden als Melonenkerneffekt bezeichnete (Brezniak 2008). Laut Brezniak ist die durch ein Aligner auf die Zähne ausgeübte Kraft okklusal am größten. Wenn Zähne eine unzureichende Retentionsfläche aufweisen, kommt es folglich zum Abheben der Alignerränder von den Zähnen und zu einer ungewollten Intrusion derselben. Durch die Positionierung von Attachments

auf diese Zähne kann dieser Effekt minimiert werden. Infolgedessen führt dies zu einer präziseren und schnelleren Zahnbewegung (Hauschopp 2012). In dieser Hinsicht hat sich der Einsatz von Attachments in der Alignertherapie stark etabliert. In der aktuellen Studie wird diese Tendenz fortgesetzt, wobei die Passgenauigkeit verschiedener Attachmentdurchmesser und -höhen zu den drei Clear Aligner Stärken untersucht wird. Im Gegensatz dazu wurde in vergangenen Studien festgestellt, dass CA®-soft (Alignerstärke 0,500 mm), CA®-medium (Alignerstärke 0,625 mm) und CA®-hard (Alignerstärke 0,750 mm) keinen signifikanten Einfluss auf die Verbesserung der Retention ausüben, abgesehen von einer Kombination der Aligner mit Attachments (Dasy et al. 2015).

Zudem wird die Retention des Aligners durch Größe, Form und Position des Attachments beeinflusst. Rechteckige Attachments, die am Zahn längs im gingivalen Drittel befestigt wurden, zeigten die größte Retention. Im Gegensatz dazu präsentierten die im inzisalen Drittel geklebten Attachments die niedrigste Retention (Jones et al. 2009).

Basierend auf Ergebnissen früherer Studien besteht die Überlegung eines Ersetzens der Drei-Schritt-Methode durch eine Zwei-Schritt-Methode, wobei Aligner mit einer Folienstärke von 0,625 mm aus der Behandlung ausgeschlossen werden. Der Grund dafür ist, dass es keinen signifikanten Unterschied in den Ergebnissen der Alignerfolie mit 0,625 mm Stärke zu den anderen beiden Folienstärken (0,500 mm und 0,750 mm) im Laufe von Kraftmessungen gibt (Gao und Wichelhaus 2017). Jedoch haben 0,625 mm-Aligner in der aktuellen Studie mit Attachments wesentlich vorhersagbarere und konstante Ergebnisse im direkten Vergleich mit der 0,500 mm-Alignerfolie gezeigt.

Von den Ergebnissen der drei vorliegenden Messreihen können folgende Abhängigkeiten festgestellt werden:

Bei der angewandten Messtechnik „a vertice“ kann die Aussage gemacht werden, dass die Passgenauigkeit der Alignerfolie bei der niedrigsten von fünf untersuchten Attachmenthöhen mit 0,5 mm am besten ist und sich über die zunehmende Höhe mit dem steigenden gemessenen Abstand verschlechtert. Genauso steigen die ermittelten Standardabweichungen über die Attachmenthöhe, unabhängig von

Alignerfolienstärke oder Attachmentdurchmesser.

Die Messmethoden „Horizontale Vermessung eines Alignerschnittes“ ohne und mit Vertiefung im Gipsmodell zeigen bei den Ergebnissen vorwiegend eine bessere Passung der Alignerfolie bei der Attachmenthöhe von 2,5 mm im Vergleich zu der Attachmenthöhe 2,0 mm.

Außerdem ist es anzumerken, dass bei der Alignerfolienstärke 0,625 mm die Anzahl der Alignerfolien, die enger auf dem Attachment liegen, steigt. Dies wurde unabhängig von der Attachmenthöhe und dem Attachmentdurchmesser festgestellt. Zusätzlich kann hier auch angedeutet werden, dass eine geringe Anzahl an Alignerfolienreihen, mit an den Gipsmodellen enger liegenden Alignerfolien nicht nur bei der Folienstärke 0,625 mm, sondern auch bei der Stärke von 0,750 mm nachgewiesen wurde. Im Gegensatz dazu zeigen sich bei einer Folienstärke von 0,500 mm kein solches Verhalten.

Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass die Häufigkeit von atypischen thermoformbedingten Foliendeformationen durch eine zusätzliche Vertiefung im Gipsmodell beeinflusst wurde. Dadurch wurde die Anzahl der Ausreißer in der gesamten Ergebniszahl der Messreihe „Horizontale Vermessung eines Alignerschnittes mit Vertiefung im Gipsmodell“ verringert im Vergleich zu den Resultaten, die ohne Vertiefung ermittelt wurden.

Außerdem kann vermerkt werden, dass größere Durchmesser (1,5 und 2,5 mm) eher zu Abweichungen im Bereich der ganzen Alignerfolienreihen tendieren, während kleinere Durchmesser z. B. 0,9 mm eher zu einzelnen Ausreißern neigen.

Die Suche nach der optimalen Effektivität eines Attachments ist auch das Ziel der Studie von Cai, in der er beschreibt, dass jedes Attachment eine aktive Oberfläche hat. Auf dieser wird durch die elastische Spannung des Alignermaterials ein optimales Moment/Kraft-Verhältnis ausgeübt, was zu der Verbesserung der Zahnbewegung durch die Flächenrichtung des Attachments wirkt (Cai et al. 2015). Während sich Cai's Studie auf den Effekt der Attachmentform und die daraus resultierende kieferorthopädische Kraft konzentriert, wurde in der vorliegenden Arbeit die Effektivität der Attachmentdimensionen (Höhe, Durchmesser) in

Verbindung mit verschiedenen Folienstärken festgestellt. Alle diese Ergebnisse können dafür verwendet werden, genauere Richtlinien für eine zukünftig optimierte Alignertherapie mit Attachments zu erstellen.

6 Zusammenfassung

Das Ziel der Arbeit ist die Untersuchung der Passgenauigkeit von robusten Metallzylindern als Attachments unterschiedlicher Höhe und Durchmesser, bestimmt für die schnellere und präzisere zahnärztliche Behandlung mit Aligner Duran®. Alle Ergebnisse werden in Form von Tabellen zusammengefasst und durch Diagramme dargestellt sowie diskutiert.

Vermessen wurde die Passgenauigkeit der Aligner zu den Attachments mithilfe einer digitalen Mikroskopkamera MIRAZOOM und mit der Software eScope (Version 1.1.7.25). Es wurden insgesamt 144 Aligner angefertigt, woraus sich bei der Vermessung 765 Einzelmesswerte ergaben. Gearbeitet wurde mit der Alignerfolie Duran® von der Firma Scheu-Dental Technology mit den Stärken 0,500 mm; 0,625 mm und 0,750 mm. Bei allen Alignern wurde außerdem als Unterfolie Isofolan® mit einer Stärke von 0,1 mm verwendet.

Als Grundplattformen für diese zylindrischen Körper dienten drei identische, selbst hergestellte Gipsmodelle. In jedes dieser Modelle wurden Löcher gebohrt und jeweils fünf Metallstifte mit demselben Durchmesser eingeklebt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die einzelnen Beispielattachments in einem vertikalen Abstand von jeweils 0,5 mm zueinander bei einer Höhe von 0,5 bis 2,5 mm über der Oberfläche des Gipsmodells als Bezugsebene eingebettet wurden. Die Beispielattachments besaßen einen Durchmesser von 0,9 mm, 1,5 mm und 2,5 mm. In der Herstellung wurden diese vom selben Stück Draht geschnitten und nach oben beschriebener Einbettung noch händisch zum Brechen der Kanten an der oberen Seite mit einer Fräse bearbeitet.

Für die durchzuführenden Versuche stand ein Universal-Druckformgerät der Firma Scheu-Dental mit einem Arbeitsdruck von 6,0 bar zur Verfügung, mit dem die Alignerfolie erhitzt und über die zylindrischen Körper gezogen wurden.

Es wurden jeweils zwei Arten von Aufnahmen mit der Mikroskopkamera MIRAZOOM für die Vermessung angefertigt - vertikale Aufnahmen ("a vertice") und horizontale Aufnahmen, nach einem Schnitt der Alignerfolie.

Die Messungen bei den vertikalen Aufnahmen erfolgten mit einer Ausrichtung der digitalen Mikroskopkamera zur senkrechten Draufsicht auf den jeweils zu vermessenden zylindrischen Körper. Gemessen wurde die Distanz von äußerem Umfang des Beispielattachments zum Kontaktpunkt von Aligner und Gipsmodell. Dafür wurden jeweils 4 optische Messungen pro Aufnahme durchgeführt, ein Mittelwert gebildet und die Standardabweichung berechnet.

Bei der zweiten Art von Aufnahmen wurden Alignerfolie und Unterfolie vom Gipsmodell abgelöst und die Alignerfolie nach einem horizontalen Schnitt vermessen. Im Vergleich zu der Messmethodik „a vertice“ handelte es sich hierbei um ein zerstörendes Messverfahren, da die Aligner nach dem Schnitt nicht weiter eingesetzt werden können und auch die dünnen Unterfolien bei der Ablösung zerstört wurden. Pro Kombination aus Alignerstärke, Attachmentdurchmesser und –höhe wurden für diese Vermessungsart jeweils 8 Aligner angefertigt. Nachdem jede Alignerfolie an der Stelle der zylindrischen Körper geschnitten wurde, wurden die Teile auf Objektträgern durch eine dünne Schicht Sekundenkleber befestigt. Diese Vorgehensweise war zur eindeutigen Positionierung der Aligner bei der Anfertigung der Aufnahmen erforderlich.

Anhand der oben beschriebenen Messungen wurden die in drei Messreihen zusammengefassten Ergebnisse (1) „a vertice“, 2) Schnittverfahren und 3) Schnittverfahren mit einer Vertiefung im Gipsmodell) in Tabellen und Diagrammen systematisiert. Dadurch wurden folgende Schlussfolgerungen möglich:

- Bei der angewandten Messtechnik „a vertice“ war keine deutliche Abhängigkeit bezüglich der verschiedenen Folienstärken oder Attachmentdurchmesser erkennbar. Jedoch kann die konkrete Behauptung aufgestellt werden, dass die Passgenauigkeit der Alignerfolie bei der niedrigsten Attachmenthöhe, nämlich 0,5 mm am besten ist und sich über die zunehmende Höhe verschlechtert. Ebenso stiegen die ermittelten Standardabweichungen mit der zunehmenden Attachmenthöhe, unabhängig von Alignerfolienstärke oder Attachmentdurchmesser.

- Bei den nachfolgenden zwei Messmethoden „Horizontale Vermessung eines Alignerschnittes“ ohne und mit Vertiefung im Gipsmodell war die Tatsache markant, dass bei den Ergebnissen beider Messmethoden vorwiegend ein engeres Anliegen der Alignerfolie bei der Attachmenthöhe von 2,5 mm im Vergleich zu der Attachmenthöhe 2,0 mm festgestellt wurde.
- Bei der Alignerfolienstärke 0,625 mm stieg die Häufigkeit der Alignerfolien, die enger auf dem Attachment liegen. Dies war weder von der Attachmenthöhe noch vom Attachmentdurchmesser abhängig. Zusätzlich konnte auch vermerkt werden, dass eine geringere Anzahl der oben beschriebenen Alignerfolienreihen auch bei der Alignerfolie mit der Stärke von 0,750 mm nachgewiesen wurde. Unter einer Alignerfolienreihe waren Einzelmesswerte bei einer Alignerfolienstärke, einem Attachmentdurchmesser und allen fünf Attachmenthöhen zusammengefasst. Im Gegensatz dazu zeigte sich bei einer Folienstärke von 0,500 mm kein solches Verhalten.
- Die Häufigkeit der thermoformbedingten Foliendehformationen wurde durch eine Vertiefung im Gipsmodell beeinflusst. Dadurch wurde die Anzahl der Ausreißer minimiert im Vergleich zu den Resultaten, die ohne Vertiefung ermittelt wurden.
- Außerdem konnte das Fazit gezogen werden, dass größere Durchmesser (1,5 mm und 2,5 mm) eher zu Abweichungen im Bereich der ganzen Alignerfolienreihen (wie im vorigen Absatz beschrieben) tendierten, während kleinere Durchmesser z. B. 0,9 mm eher zu einzelnen Ausreißern neigten.
- Weitere Studien könnten Informationen durch eine erhöhte Anzahl von Stichproben liefern. Nebenbei sollte auch die bedeutende Toleranz der Alignerfolienstärke, bedingt durch den konventionellen Herstellungsprozess, mit den auf der Folienverpackung angegebenen Werten verglichen und deren Einfluss auf die Aussagekraft der Ergebnisse erforscht werden.

7 Literaturverzeichnis:

- Aligntech, Institute (2013). Invisalign G4 Erweiterungen. Invisalign Institute; 2013:1-5.
- Angle EH (1899). The Angle System of Regulation and Retention of the Teeth, and Treatment of Fractures of the Maxillae. 5th Ed. Philadelphia: S. S. White Dental MFG. Co.
- Barbagallo LJ, Shen G, Jones AS, Swain MV, Petocz P, Darendeliler MA (2008). A Novel Pressure Film Approach for Determining the Force Imparted by Clear Removable Thermoplastic Appliances. *Annals of Biomedical Engineering*; 36:335-341.
- Brezniak N (2008). The Clear Plastic Appliance. A Biomechanical Point of View. *Angle Orthodontist*; 78:381-382.
- Burden DJ (2007). Oral Health-Related Benefits of Orthodontic Treatment. Elsevier Inc.; 13:76-80.
- Cai Y, He B, Yang X, Yao J (2015). Optimization of configuration of attachment in tooth translation with transparent tooth correction by appropriate moment-to-force ratios: Biomechanical analysis. *Bio-Medical Materials and Engineering*; 11:S507-S517.
- Cassetta M, Altieri F, Barbato E (2016a). The combined use of corticotomy and clear aligners: A case report. *Angle Orthodontist*; 86:862-870.
- Cassetta M, Altieri F, Pandolfi S, Giansanti M (2016b). The combined use of computer-guided, minimally invasive, flapless corticotomy and clear aligners as a novel approach to moderate crowding: A case report. *The Korean Journal of Orthodontics*; 12:130-141.
- Chisari JR, McGorray SP, Nair M, Wheeler TT (2014). Variables affecting orthodontic tooth movement with clear aligners. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*; 145:S82-S91.
- Choi N-C, Park Y-C, Jo Y-M, Lee K-J (2009). Combined use of miniscrews and clear appliances for the treatment of bialveolar protrusion without conventional brackets. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*; 135:671-681.
- Clements KM, Bollen A-M, Huang G, King G, Hujoel P, Ma T (2003). Activation time and material stiffness of sequential removable orthodontic appliances. Part 2: Dental improvements. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*; 124:502-508.
- Cottingham LL (1969). Gnathologic clear plastic positioner. *Am J Orthod*; 55(1):23-31.
- Cowley DP, Mah J, B OT (2012). Effect of Gingival Margin Design on Retention of Thermoformed Orthodontic Aligners. [Master of Science in Oral Biology] Las Vegas: UNLV University Libraries, University of Nevada.
- Dasy H, Dasy A, Asatrian G, Rózsa N, Lee H, Kwak JH (2015). Effects of variable attachment shapes and aligner material on aligner retention. *Angle Orthodontist*; 85:934-940.
- Drake CT, McGorray SP, Dolce C, Nair M, Wheeler TT (2012). Orthodontic Tooth Movement with Clear Aligners. *International Scholarly Research Network Dentistry*; 7:1-7.
- Ercoli F, Tepedino M, Parziale V, Luzi C (2014). A comparative study of two different clear aligner systems. *Progress in Orthodontics a SpringerOpen Journal*; 5:1-5.
- Gao L, Wichelhaus A (2017). Forces and moments delivered by the PET-G aligner to a maxillary central incisor for palatal tipping and intrusion. *Angle Orthodontist*;

- 87:534-541.
- Gay G, Ravera S, Castroflorio T, Garino F, Rossini G, Parini S, Cugliari G, Deregibus A (2017). Root resorption during orthodontic treatment with Invisalign®: a radiometric study. *Progress in Orthodontics*; 6:1-6.
- Göz G (2010). Stellungnahme der DGKFO zur Behandlung mit Alignern (Stand Januar 2010). Deutsche Gesellschaft für Kieferorthopädie. (01.2010).
- Grünheid T, Gaalaas S, Hamdan H, Larson BE (2016). Effect of clear aligner therapy on the buccoligual inclination of mandibular canines and the intercanine distance. *Angle Orthodontist*; 86:10-16.
- Guarneri MP, Oliverio T, Silvestre I, Lombardo L, Siciliani G (2013). Open bite treatment using clear aligners. *Angle Orthodontist*; 83:913-919.
- Hahn W, Engelke B, Jung K, Dathe H, Fialka-Fricke J, Kubein-Meesenburg D, Sadat-Khonsari R (2010a). Initial Forces and Moments Delivered by Removable Thermoplastic Appliances during Rotation of an Upper Central Incisor. *Angle Orthodontist*; 80:239-246.
- Hahn W, Zapf A, Dathe H, Fialka-Fricke J, Fricke-Zech S, Gruber R, Kubein-Meesenburg D, Sadat-Khonsari R (2010b). Torquing an upper central incisor with aligners-acting forces and biomechanical principles. *European Journal of Orthodontics*; 32:607-613.
- Han J-Y (2015). A comparative study of combined periodontal and orthodontic treatment with fixed appliances and clear aligners in patients with periodontitis. *Journal of Periodontal & Implant Science*; 12:193-204.
- Hauschopp NK (2012). Effektivität der Invisalign-Teen-Behandlung - Validierung einer Analyse-Methode. Hohe Medizinische Fakultät, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- Hennessy J, Garvey T, Al-Awadhi EA (2016). A randomized clinical trial comparing mandibular incisor proclination produced by fixed labial appliances and clear aligners. *Angle Orthodontist*; 7:706-712.
- Hohoff A, Fillion D, Stamm T, Goder G, Sauerland C, Ehmer U (2003). Oral Comfort, Function and Hygiene in Patients with Lingual Brackets. *Journal of Orofacial Orthopedics*; 13:359-371.
- Holzmeier M, Windsheimer U (2013). Herstellung patientenindividueller Invisalign®-Attachments mithilfe von SDR. *ZWP Zahnarzt Wirtschaft Praxis*; 3:1-3.
- Jae PH, Tae KW (2009). Anterior Crossbite Correction with a Series of Clear Removable Appliances: A Case Report. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*; 21:149-159.
- Joffe L (2003). Invisalign: early experiences. *J Orthod*; 30(4):348-52.
- Jones M, Mah J, B OT (2009). Retention of Thermoformed Aligners with Attachments of Various Shapes and Positions. *J Clin Orthod*; 43:113-117.
- Kesling (1945). The philosophy of the tooth positioning appliance. *American Journal of Orthodontics and Oral Surgery*:297-304.
- Krieger E, Seiferth J, Saric I, Jung BA, Wehrbein H (2011). Accuracy of Invisalign(R) treatments in the anterior tooth region. First results. *J Orofac Orthop*; 72(2):141-9.
- Kuhlman DC, de Lima TA, Duplat CB, Capelli JJ (2016). Esthetic perception of orthodontic appliances by Brazilian children and adolescents. *Dental Press Journal of Orthodontics*; 9:58-66.
- Kuo E, Miller RJ (2003). Automated custom-manufacturing technology in orthodontics. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*; 123:578-581.

- Lau PYW, Wey MC (2004). Computerised Imaging, Virtual Treatment Planning and Orthodontic Treatment of Dental Malocclusions Using the Invisalign Appliance. *Hong Kong Medical Diary*; 9(10):3-4.
- Levrini L, Mangano A, Montanari P, Margherini S, Caprioglio A, Abbate GM (2015a). Periodontal health status in patients treated with the Invisalign® system and fixed orthodontic appliances: A 3 months clinical and microbiological evaluation. *European Journal of Dentistry*; 9:1-9.
- Levrini L, Novara F, Margherini S, Tenconi C, Raspanti M (2015b). Scanning electron microscopy analysis of the growth of dental plaque on the surfaces of removable orthodontic aligners after the use of different cleaning methods. *Clinical, Cosmetic and Investigational Dentistry*; 7:125-131.
- Levrini L, Mangano A, Margherini S, Tenconi C, Vigetti D, Muollo R, Abbate GM (2016). ATP Bioluminometers Analysis on the Surfaces of Removable Orthodontic Aligners after the Use of Different Cleaning Methods. *International Journal of Dentistry*; 2016:1-6.
- Liu C-L, Sun W-T, Liao W, Lu W-X, Li Q-W, Jeong Y, Liu J, Zhao Z-H (2016). Colour stabilities of three types of orthodontic clear aligners exposed to staining agents. *International Journal of Oral Science*; 8:246-253.
- Lombardo L, Arreghini A, Maccarrone R, Bianchi A, Scalia S, Siciliani G (2015). Optical properties of orthodontic aligners-spectrophotometry analysis of three types before and after aging. *Progress in Orthodontics*; 8:1-8.
- Martorelli M, Gerbino S, Giudice M, Ausiello P (2012). A comparison between customized clear and removable orthodontic appliances manufactured using RP and CNC techniques. *Dental Materials*; 10:1-10.
- Noll D, Mahon B, Schroff B, Carrico C, Lindauer SJ (2017). Twitter analysis of the orthodontic patient experience with braces vs invisalign. *Angle Orthodontist*; 7:377-383.
- Pagani R, Signorino F, Poli PP, Manzini P, Panisi I (2016). The Use of Invisalign® System in the Management of the Orthodontic Treatment before and after Class III Surgical Approach. Hindawi Publishing Corporation. 10:1.
- Ponitz RJ (1971). Invisible retainers. *Am J Orthod*; 59(3):266-72.
- Pravindevasarad A, Therese BA (2013). Tooth positioners and their effects on treatment outcome. *Journal of Natural Science, Biology and Medicine*; 5:1-5.
- Rossini G, Parini S, Castroflorio T, Deregibus A, Debernardi CL (2015a). Periodontal health during clear aligners treatment: a systematic review. *European Journal of Orthodontics*; 37:539-543.
- Rossini G, Parrini S, Castroflorio T, Deregibus A, Debernardi CL (2015b). Efficacy of clear aligners in controlling orthodontic tooth movement: A systematic review. *Angle Orthodontist*; 85:881-889.
- Sander FG, Schwenzer N, Ehrenfeld M (Hrsg.) (2011). Kieferorthopädie. [Zahn-Mund-Kiefer-Heilkunde; 2. Aufl. Stuttgart, New York: Thieme.
- Schwarz MA (1932). Tissue changes incidental to orthodontic tooth movement. 22:331-352.
- Sheridan JJ, LeDoux W, McMinn R (1993). Essix retainers: fabrication and supervision for permanent retention. *J Clin Orthod*; 27(1):37-45.
- Simon M, Keilig L, Schwarze J, Jung BA, Bourauel C (2014). Treatment outcome and efficacy of an aligner technique--regarding incisor torque, premolar derotation and molar distalization. *BMC Oral Health*; 14:68.

- Sparaga JM (2011 and 2012). Pilot doctors share Invisalign cases treated with SmartTrack Aligner Material.
- Voudouris JC, Schismenos C, Lackovic K, Kufinec MM (2010). Self-Ligation Esthetic Brackets with Low Frictional Resistance. *Angle Orthodontist*; 80:188-194.
- Walton DK, Fields HW, Johnston WM, Rosenstiel SF, Firestone AR, Christensen JC (2010). Orthodontic appliance preferences of children and adolescents. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*; 138:698.e1-698.e12.
- Weir T (2017). Clear aligners in orthodontic treatment. *Australian Dental Journal*; 5:58-62.
- Yezdani AA (2014). Transparent aligners: An invisible approach to correct mild skeletal class III malocclusion. *Journal of Pharmacy & BioAllied Sciences*; 11.

8 Anhang

Firmenadresse des Aigneranbieters:

SCHEU-DENTAL GmbH

www.scheu-dental.com

phone +49 23 74 92 88-0

fax +49 23 74 92 88-90

Am Burgberg 20

58642 Iserlohn Germany

Die Rohdaten von den oben beschriebenen Versuchen können auf der dazugehörigen CD eingesehen werden.

9 Danksagung

Mein Dank gilt folgenden Personen: Frau Prof. Dr. med. dent. Andrea Wichelhaus, Herr Dr. rer. nat. Sebastian Stapfner, Herr Dipl.-Ing. Thomas Stocker, Herr Dipl.-Biol. Dr. rer. nat. Uwe Baumert, Frau Dr. med. dent. Elisa Ewers, Frau Jacqueline Hettmann, die mich während der Bearbeitung meiner Dissertation unterstützt haben.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mich auf meinem Weg durch das Studium begleitet haben.

Danken möchte ich außerdem meinen Freunden, die mich im Rahmen der Promotion moralisch unterstützt haben.

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertation selbständig verfasst, mich außer der angegebenen keiner weiteren Hilfsmittel bedient und alle Erkenntnisse, die aus dem Schrifttum ganz oder annähernd übernommen sind, als solche kenntlich gemacht und nach ihrer Herkunft unter Bezeichnung der Fundstelle einzeln nachgewiesen habe. Ich erkläre des Weiteren, dass die hier vorgelegte Dissertation nicht in gleicher oder in ähnlicher Form bei einer anderen Stelle zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht wurde.

Salzburg, 31.03.2021

Ort, Datum

Miroslava Stoyanova Yorgova

Miroslava Stoyanova Yorgova