

Zusammenhang zwischen Modellhöhe und biomechanischem Verhalten thermoformbarer Alignerschienen

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades (Dr. med. dent.)

der Medizinischen Fakultät

der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität

Bonn

Omar Ghoraba

aus Gharbeya / Ägypten

2025

Angefertigt mit der Genehmigung
der Medizinischen Fakultät der Universität Bonn

1. Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Christoph Bourauel
2. Gutachter: PD Dr. Christoph Reichert

Tag der Mündlichen Prüfung: 18.08.2025

Aus der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik, Propädeutik
und Werkstoffwissenschaften
- Oralmedizinische Technologie -

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	4
1. Deutsche Zusammenfassung	5
1.1 Einleitung	5
1.2 Material und Methoden	6
1.2.1 Kraftmessung	6
1.2.2 Dicke-Messung	7
1.2.3 Statistische Analyse	8
1.3 Ergebnisse	8
1.4 Diskussion	9
1.5 Zusammenfassung	11
1.6 Literaturverzeichnis der deutschen Zusammenfassung	12
2. Veröffentlichungen	15
3. Erklärung zum Eigenanteil	16
4. Danksagung	17

Abkürzungsverzeichnis

ANOVA	Analysis of Variance
DICOM	Digital Imaging and Communications in Medicine
HSD	Honestly Significant Difference
μ CT	Mikrocomputertomografie
kVp	Spitzenkilovoltspannung
PDL	parodontales Ligament
STL	Stereolithography

1. Deutsche Zusammenfassung

1.1 Einleitung

Aligner-Therapien erfreuen sich zunehmender Beliebtheit, was sich auf ihre zahlreichen Vorteile gegenüber konventionellen festsitzenden Apparaturen zurückführen lässt. Diese bieten nicht nur ästhetische Vorteile, sondern ermöglichen auch eine bessere Mundhygiene. Für Behandler sind Aligner-Therapien oft aufgrund der geringeren Anzahl und kürzeren Dauer der Kontrolltermine besonders attraktiv (Macrì et al., 2022; Papageorgiou et al., 2020). Die Behandler stehen oftmals vor Herausforderungen, da die geplanten Behandlungsziele häufig nicht vollständig erreicht werden können. Daher ist ein genaues Verständnis der Biomechanik notwendig, um die Vorhersagbarkeit zu verbessern (Upadhyay et al., 2022). Um bessere Behandlungsergebnisse zu erzielen, müssen alle Faktoren, die bei der Herstellung von Alignern eine Rolle spielen, evidenzbasiert optimiert werden (Moutawakil et al., 2012). Dadurch könnten standardisierte Herstellungsmethoden entwickelt werden, die nicht nur die Effizienz der Aligner-Therapie verbessern, sondern auch Grundlage für die weitere Forschung sein können.

Eine verbreitete Methode zur Herstellung von Alignern ist das Tiefziehen von Kunststofffolien über 3D-gedruckte Modelle. Das Tiefziehverfahren verdünnt die Tiefziehfolien, was die übertragenen Kräfte beeinflusst (Elshazly et al., 2023b; Min et al., 2010). Die Aligner-Eigenschaften können mithilfe verschiedener Methoden gemessen werden. Zur Messung der Kontaktkräfte wurden in vorherigen Studien Druckmessfolien verwendet (Barbagallo et al., 2008; Cervinara et al., 2019; Zamani et al., 2022). Die Mikrocomputertomografie wurde zur Bestimmung der Dicke von Alignern verwendet (Ihssen et al., 2021; Lombardo et al., 2022). Die Auswirkungen der Modellhöhe auf die Eigenschaften von tiefgezogenen Alignern sind bislang bisher nicht ausreichend erforscht. Die Ergebnisse dieser Studie ermöglichen eine genaue Bestimmung der Relation zwischen Modellhöhe, Alignerdicke und Kraftübertragung.

1.2 Material und Methoden

Fünf verschiedene Dentalmodelle wurden mithilfe einer Bildverarbeitungssoftware (3-matic 17.0; Materialise, Leuven, Belgien) auf der Basis eines digitalen Oberkiefermodells (Digimation Corp., St. Rose, LA, USA) konstruiert. Vier wurden für Untersuchungen des Tiefziehverfahrens verwendet. Die Zahnstellung wurde dabei nicht verändert. Die Modelle unterschieden sich in der Höhe zwischen Basis und Okklusionsebene. Die Höhe betrug jeweils 15, 20, 25 oder 30 mm. Modell 10 bezeichnet ein Modell mit einer Höhe von 15 mm, Modell 20 eines mit 20 mm, Modell 25 eines mit 25 mm und Modell 30 eines mit 30 mm (s. Abb. 1 in der anhängenden Publikation). Diese Bezeichnungen wurden zur Vereinfachung der Zuordnung und Darstellung in der Analyse verwendet. Das fünfte Modell diente der Kraftmessung. Der Zahn 11 wurde um 0,2 mm körperlich nach labial versetzt. Außerdem wurde ein Spalt von 100 µm Breite vestibulär zwischen den Zähnen 12 und 22 sowie der Modellbasis modelliert, um hier Druckmessfolien einzulegen. Die fünf Modelle wurden als STL-Datei zu einem 3D-Drucker (P20+; Straumann, Basel, Schweiz) exportiert und unter Einsatz von Acrylkunststoff (P pro resin; Straumann, Basel, Schweiz) gedruckt.

Vierzig thermoplastische Tiefziehfolien mit einer Dicke von 0,76 mm (Zendura FLX; Bay Materials LLC, Fremont, CA, USA) wurden über den vier Modellen (je n=10) mit einem Druckformgerät (Biostar; Scheu-Dental GmbH, Iserlohn) tiefgezogen. Alle Aligner wurden anschließend auf einer Höhe von 2 mm über dem Gingivasaum mithilfe einer auf dem Modell gezeichneten Rille gekürzt.

1.2.1 Kraftmessung

Die Kraftübertragung der Aligner auf den Zahn 11 wurde mithilfe von Druckmessfolien gemessen (Fuji® Prescale Film; Fuji Film, Tokyo, Japan). Dieses Verfahren wurde in der Studie von Elshazly et al. (2022) beschrieben. Die verwendete Druckmessfolie besteht aus zwei Blättern, dem A-Übertragungs-Blatt und dem C-Entwickler Blatt. Ihre gesamte Dicke beträgt 100 µm. Die Mikro-Kapseln in den A-Blättern platzen unter Druck und reagieren mit der Entwicklerschicht auf den C-Blättern. Dadurch entstehen, entsprechend des Druckes, Flecken auf den A-Blättern von blassrosa bis dunkelrot. Die Messfolien

wurden auf die labiale Fläche der Inzisiven des fünften Modells gelegt. Danach wurden die Aligner vorsichtig darüber gesetzt. Anschließend wurden die Messfolien für zwei Minuten belassen, um den Druck kontinuierlich zu messen. Anschließend wurde jede Folie mit einem für die Folienauswertung spezialisierten Scanner (EPSON Perfection V300 series; SEIKO Epson CORPORATION, Tokyo, Japan) mit einer Auflösung von 200 dpi gescannt. Die Kräfte wurden digital durch eine zugehörige Software analysiert (FPD-8010E analysis system; Fuji® Film, Tokyo, Japan). Die Software berechnete die Kraft wie folgt:

$$\text{Kraft} = \text{Druck} \times \text{Fläche.}$$

Es wurden die Kraftwerte (in N) im zervikalen, mittleren und inzisalen Drittel sowie auf der gesamten labialen Fläche des Zahns 11 gemessen.

Der Scanner wurde nach Vorgabe kalibriert; Raumtemperatur, Luftfeuchtigkeit und Dicke der Messfolien (LW) wurden in der Software eingetragen, weil Temperatur und Luftfeuchtigkeit die Farbintensität der Folien beeinflussen können. Die Versuche wurden bei einer Raumtemperatur von $21,0 \pm 2,0$ °C und einer Luftfeuchtigkeit von $29,0 \pm 4,0$ % durchgeführt. Die A-Blätter wurden anschließend in den Scanner mit der rauen Seite nach oben und der glänzenden Seite nach unten eingesetzt.

Es wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um zu ermitteln, ob die zeitliche Verzögerung zwischen Kraftapplikation und Scannen die Ergebnisse beeinflusst. Die Folien wurden zu drei verschiedenen Zeitpunkten gescannt (unmittelbar nach Belastung, nach 30 Minuten und nach 60 Minuten), wobei keine Unterschiede zwischen den drei Proben festgestellt werden konnten.

1.2.2 Dicke-Messung

Um die Ergebnisse zu verifizieren, wurde die Dicke mittels zwei verschiedener Methoden gemessen. Mit einem digitalen Messschieber (Dial Caliper D; Aura-Dental GmbH, Aura an der Saale) und mittels Mikrocomputertomografie (μCT, Skyscan 1174, Skyscan, Kontich, Belgien) wurde die Dicke jedes Aligners an fünf Stellen auf der Mittellinie des

Zahns 11 gemessen: zervikolabial, mediolabial, inzisal, mediolingual und zervikolingual. Die μ CT-Aufnahmen wurden mit einer Auflösung von 22 μ m, einer Beschleunigungsspannung von 50 kVp, Freistrahstrom von 800 μ A, einer Expositionszeit von 22 Sekunden, einer Rotation von 360° und ohne Filter durchgeführt. Die durchschnittliche Dauer eines Scans betrug 90 Minuten. Die durchschnittliche Anzahl von Schnitten war 1018. Die 2D-Daten wurden anschließend als DICOM-Dateien in ein 3D-interaktives medizinisches Bildverarbeitungssystem (Mimics 25.0; Materialise, Leuven, Belgien) übertragen. Die Software ermöglichte die Erstellung von 3D-Modellen, auf denen die Dicke der Aligner mithilfe eines Programms zur Bestimmung der Radio-Opazität-Schwelle von Bildern gemessen werden konnte. Die Bestimmung der genauen Schwellenwerte war ein entscheidender und hochsensibler Schritt.

1.2.3 Statistische Analyse

Die statistischen Ergebnisse wurden durch Mittelwert und Standardabweichung beschrieben und mit dem Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung geprüft. Es wurde festgestellt, dass die Daten parametrisch verteilt waren. Für die Auswertung kam eine einfaktorielle ANOVA zum Einsatz, gefolgt von einem Post-hoc-Tukey-HSD-Test. Das Signifikanzniveau wurde auf $p < 0,05$ festgelegt. Die Analysen wurden mit der IBM SPSS Statistics Software, Version 25 für Windows, durchgeführt.

1.3 Ergebnisse

Die Aligner, die über Modell 15 hergestellt wurden, hatten den höchsten Kraftwert von 88,9 N, gefolgt von Modell 20 mit einem Kraftwert von 81,0 N, Modell 25 mit einem Kraftwert von 67,5 N und zuletzt Modell 30 mit dem niedrigsten Kraftwert von 45,7 N. Die Kontaktkraft war dabei ungleichmäßig verteilt, wobei in bestimmten Bereichen höhere Kräfte vorhanden waren als in anderen. Die höchste Kontaktkraft bei den Modellen 15, 20 und 25 lag im mittleren Drittel, gefolgt vom inzisalen Drittel und schließlich dem zervikalen Drittel. Bei Modell 30 lag die höchste Kontaktkraft im inzisalen Drittel (s. Abb. 4 in der anhängenden Publikation).

Die Dicke der Tiefziehfolien wurde durch das Tiefziehverfahren um 30-66 % reduziert. Je höher die Modelle waren, desto dünner waren die Aligner, insbesondere auf der labialen Fläche. Die geringste Ausdünnung fand an der Inzisalkante (0,4 bis 0,5 mm; 30 bis 50 % Ausdünnung) statt, während die stärkste Ausdünnung im zervikolabialen Bereich (0,1 bis 0,3 mm; 60 bis 85 % Ausdünnung) gemessen wurde (s. Abb. 5 in der anhängenden Publikation).

1.4 Diskussion

Die steigende Nachfrage nach Aligner-Therapie sollte zum Anlass genommen werden, die biomechanische Forschung auf dem Gebiet der Aligner zu intensivieren. Die Anwendung eines evidenzbasierten Ansatzes bei der Herstellung und Anwendung von Alignern ist ein wesentlicher Faktor, um effizient behandeln zu können. In der vorliegenden Studie wurde der Einfluss der Modellhöhe, die beim Tiefziehverfahren von Alignern verwendet wird, auf die Kraftübertragung auf Zahn 11 und die Aligner-Dicke untersucht. Die Wahl fiel auf Zahn 11, da er in den vorherigen Studien über Kräfte am häufigsten Gegenstand der Untersuchungen war. Dies ermöglicht eine Vergleichbarkeit mit anderen Ergebnissen aus der Literatur. Die Aligner-Therapie besteht aus einer Reihe von Alignern, die so gestaltet sind, dass jeder Zahn pro Aligner um etwa 0,2 mm bewegt wird. Die Geometrie der Aligner-Schiene ist ein wesentlicher Faktor bei der Bestimmung der Zahnbewegung. Jeder Aligner enthält vorprogrammierte Zielpositionen der Zähne. Er übt dadurch eine dreidimensionale Kraft auf den zu behandelnden Zahn aus (Upadhyay und Arqub, 2021).

Die in dieser Studie ermittelten Kraftwerte waren höher als die in anderen Studien angegebenen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Druckmessfolien den Kontaktdruck nur eindimensional messen können. Der Einfluss von Knochen und PDL wurde nicht untersucht. Diese Einflussfaktoren konnten jedoch vernachlässigt werden, da alle Gruppen unter den gleichen standardisierten Bedingungen bewertet wurden. In einer experimentellen Studie von Cervinara et al. (2017) wurde ein Druck von annähernd 3,3 MPa ermittelt, was den vorliegenden Ergebnissen entspricht. In einer klinischen Studie (Bargallo et al., 2008) wurden bei der Verwendung von Druckmessfolien Kräfte von etwa

28,0 N nachgewiesen. Die aufgebrachte Kraft wurde durch die Auslenkung des Zahns reduziert, die durch das Vorhandensein des parodontalen Ligaments ermöglicht wurde, was zu einer Diskrepanz zwischen klinischen und experimentellen Ergebnissen führte.

Die Aligner selbst könnten ebenfalls eine wichtige Rolle bei den beobachteten Ergebnissen spielen. Unterschiede bei den verwendeten Materialien (Ho et al., 2021), dem Design der Trimmlinie oder bei Zahnaktivierung und Dicke der Aligner (Elshazly et al., 2022) könnten die Ergebnisse beeinflussen. Zur optimalen Kraftübertragung sollte die Innenfläche des Aligners der Zahnoberfläche eng anliegen. Die Ergebnisse dieser Studie bestätigen Ergebnisse früherer Studien (Cervinara et al., 2019; Elshazly et al., 2022), dass die Kraftverteilung auf der fazialen Zahnoberfläche ungleichmäßig, mit Bereichen verstärkten und verringerten Drucks, war. Die Ungleichmäßigkeiten sind wahrscheinlich auf die individuelle Beschaffenheit der jeweiligen Zahnoberfläche zurückzuführen.

Entsprechend den Ergebnissen früherer Studien (Elshazly et al., 2022; Lee et al., 2022; Lombardo et al., 2020) zeigten die Aligner nach dem Tiefziehverfahren eine deutliche Materialreduktion (um 60 bis 85 %), die im gingivalen Drittel am ausgeprägtesten war (Ihssen et al., 2021; Krey et al., 2019). Im Bereich der Inzisalkante war die Ausdünnung hingegen deutlich geringer. Eine übermäßige Ausdünnung des Aligners kann seine strukturelle Beschaffenheit beeinträchtigen, was zu unerwünschter Flexibilität und einer Schwächung der Ränder führt. Höhere Modelle werden dieses Problem weiterhin verschärfen, insbesondere im zervikalen Bereich. Die Folge ist eine deutliche Abschwächung der Übertragungskraft und eine veränderte Kraftverteilung, was zu Abweichungen in Bezug auf Ausmaß und Art der Zahnbewegung führen kann. Aufgrund des kubischen Verhältnisses zwischen Dicke und Trägheitsmoment kann eine Verringerung der Alignerdicke um 10 % zu einer erheblichen Verringerung der ausgeübten Kräfte führen, möglicherweise um bis zu 30 % (Elshazly et al., 2022; Ihssen et al., 2021).

Die biomechanischen Eigenschaften der Aligner werden maßgeblich von der Alignerdicke beeinflusst. Eine ausreichende Dicke gewährleistet eine optimale Kraftübertragung und ermöglicht eine präzise Steuerung der Zahnbewegung. Eine angemessene Alignerdicke an den Gingivarändern ist entscheidend für eine optimale Kraftverteilung und die

Kontrolle der Zahnbewegung. Dies kann zu einer größeren Krafteinwirkung im Gingivabereich führen, was die körperliche Zahnbewegung begünstigt. Eine geringe Krafteinwirkung im Gingivabereich kann die körperliche Zahnbewegung beeinträchtigen (Elshazly et al., 2022; Elshazly et al., 2023a; Tuncay, 2006).

Eine Einschränkung der Studie besteht darin, dass lediglich ein einzelnes Aligner-Material getestet wurde (Zendura FLX, thermoplastic polyurethane-based multilayer sheets). In zukünftigen Studien sollten Materialien verschiedener Zusammensetzungen und Dicken untersucht werden. Zudem wurden Materialverformungen der Aligner und die Speicheleinwirkung auf die Aligner nicht untersucht. Die Anpassung der Dicke der Aligner während des Behandlungsverlaufs an die angestrebte Art der Zahnbewegung könnte die Vorhersagbarkeit der Behandlung verbessern. Durch den Einsatz der 3D-Drucktechnik könnte eine präzise Steuerung der Dicke ermöglicht werden (Park et al., 2023). Die in dieser Studie etablierten Methoden dienen als Grundlage für künftige Forschungen im Bereich der 3D-gedruckten Alignern.

Die durchgeführte In-vitro-Studie zeigte, dass das Tiefziehverfahren eine signifikante und ungleichmäßige Ausdünnung der Tiefziehfolien verursacht, wobei im inzisalen Bereich eine durchschnittliche Reduktion von 30 % und im gingivalen Bereich bis zu 85 % auftritt, was zu einer verminderten Krafteinwirkung auf die Zähne führt. Eine geringere Modellhöhe kann jedoch das übermäßige Ausdünnen reduzieren, die Kraftübertragung verbessern und damit die körperliche Zahnbewegung fördern. Eine Modellhöhe von etwa 15 Millimetern von der Okklusionsebene bis zur Basis wird daher empfohlen.

1.5 Zusammenfassung

Zielsetzung: Untersuchung des Einflusses der Höhe des Modells, das für die Aligner-Tiefziehverfahren verwendet wird, auf die Kraftübertragung und die Dicke des Aligners. **Materialien und Methoden:** Vierzig Zendura FLX-Folien wurden auf vier Modellen mit unterschiedlichen Höhen tiefgezogen (15, 20, 25 und 30 mm, jeweils n=10). Die Kontaktkraft, die auf der labialen Fläche des Zahns 11 entsteht, wurde mit Druckmessfolien gemessen. Die Dicke des Aligners am Zahn 11 wurde anhand von fünf Punkten gemessen. Zur Dickenmessung wurden digitale Messschieber und eine Mikro-Computer-

tomographie (μ CT) verwendet. Ergebnisse: Die Kontaktkraft war nicht im gesamten Schienenbereich gleich und konzentrierte sich auf bestimmte Bereiche. Das Modell mit der Höhe 15 zeigte die größte Kraft ($88,9 \pm 23,2$ N), während das Modell mit Höhe 30 die geringste zeigte ($45,7 \pm 15,8$ N). Die Kraftverteilung am Modell 15 war für eine körperliche Zahnbewegung günstiger. Die Dickenmessungen zeigten, dass die Aligner durch das Tiefziehverfahren deutlich dünner wurden. Die Inzisalkantale zeigte die ausgeprägteste Verdünnung mit einem Verlust von 50 % der ursprünglichen Dicke. Im zervikolabialen Bereich war die Verdünnung mit einem Verlust von 15 % am geringsten. Die Alignerdicke variierte umgekehrt proportional zur Modellhöhe, Diese Abnahme war an den labialen Zahnflächen am ausgeprägtesten. Schlussfolgerung: Die zunehmende Modellhöhe führt zu einer verstärkten Verdünnung der thermoplastischen Tiefziehfolien, was die Kraftübertragung der Alignern reduziert und die körperliche Zahnbewegung negativ beeinflussen kann.

1.6 Literaturverzeichnis der deutschen Zusammenfassung

Barbagallo LJ, Shen G, Jones AS, Swain MV, Petocz P, Darendeliler MA. A novel pressure film approach for determining the force imparted by clear removable thermoplastic appliances. *Ann Biomed Eng* 2008; 36: 335–341

Cervinara F, Cianci C, De Cillis F, Pappalettera G, Pappalettere C, Siciliani G, Lombardo L. Experimental study of the pressures and points of application of the forces exerted between aligner and tooth. *Nanomaterials* 2019; 9: 1010

Elshazly TM, Keilig L, Salvatori D, Chavanne P, Aldesoki M, Bourauel C. Effect of trimming line design and edge extension of orthodontic aligners on force transmission: An in vitro study. *J Dent* 2022; 125: 104276

Elshazly TM, Bourauel C, Aldesoki M, Ghoneima A, Abuzayda M, Talaat W, Talaat S, Keilig L. Computer-aided finite element model for biomechanical analysis of orthodontic aligners. *Clin Oral Investig* 2023; 27: 115–124

Elshazly TM, Salvatori D, Elattar H, Bourauel C, Keilig L. Effect of trimming line design and edge extension of orthodontic aligners on force transmission: A 3D finite element study. *J Mech Behav Biomed Mater* 2023; 140: 105741

Ho CT, Huang YT, Chao CW, Huang TH, Kao CT. Effects of different aligner materials and attachments on orthodontic behavior. *J Dent Sci* 2021; 16: 1001–1009

Ihssen BA, Kerberger R, Rauch N, Drescher D, Becker K. Impact of dental model height on thermoformed PET-G aligner thickness—An in vitro micro-CT study. *Appl Sci* 2021; 11: 6674

Krey KF, Behyar M, Hartmann M, Corteville F, Ratzmann A. Behaviour of monolayer and multilayer foils in the aligner thermoforming process. *J Aligner Orthod* 2019; 3: 139–145

Lee SY, Kim H, Kim HJ, Chung CJ, Choi YJ, Kim SJ, Cha JY. Thermo-mechanical properties of 3D printed photocurable shape memory resin for clear aligners. *Sci Rep* 2022; 12: 6246

Lombardo L, Palone M, Longo M, Arveda N, Nacucchi M, De Pascalis F, Spedicato GA, Siciliani G. MicroCT X-ray comparison of aligner gap and thickness of six brands of aligners: An in-vitro study. *Prog Orthod* 2020; 21: 1–12

Macrì M, Murmura G, Varvara G, Traini T, Festa F. Clinical performances and biological features of clear aligners materials in orthodontics. *Front Mater* 2022; 9: 819121

Min S, Hwang CJ, Yu HS, Lee SB, Cha JY. The effect of thickness and deflection of orthodontic thermoplastic materials on its mechanical properties. *Korean J Orthod* 2010; 40: 16–26

Moutawakil A, Bennamar F, Aouame AEL, Alami S. Biomechanics of aligners: Literature review. *Adv Dent Oral Health* 2021; 13: 555872

Papageorgiou SN, Koletsi D, Iliadi A, Peltomaki T, Eliades T. Treatment outcome with orthodontic aligners and fixed appliances: A systematic review with meta-analyses. *Eur J Orthod* 2020; 42: 331–343

Park SY, Choi SH, Yu HS, Kim SJ, Kim H, Kim KB, Cha JY. Comparison of translucency, thickness, and gap width of thermoformed and 3D-printed clear aligners using micro-CT and spectrophotometer. *Sci Rep* 2023; 13: 10921

Tuncay OC. *The Invisalign System*. Berlin, Germany: Quintessence Publishing Company, 2006

Upadhyay M, Arqub SA. Biomechanics of clear aligners: Hidden truths & first principles. *J World Fed Orthod* 2022; 11: 12–21

Zamani NSM, Ashari A, Ali SHM, Gan KB, How RAWM, Wahab RMA, Mohamed AMFS, Sinnasamy S, Mokhtar MHH. Distributed force measurement and mapping using pressure-sensitive film and image processing for active and passive aligners on orthodontic attachments. *IEEE Access* 2022; 10: 52853–52865

2. Veröffentlichungen

Dieser Publikationsdissertation liegt die folgende, unabhängig begutachtete Veröffentlichung zugrunde:

Ghoraba O, Bourauel C, Aldesoki M, Singer L, Ismail AM, Elattar H, Alhotan A, Elshazly TM. Effect of the height of a 3D-printed model on the force transmission and thickness of thermoformed orthodontic aligners. *Materials* 2024; 17: 3019.

<https://doi.org/10.3390/ma17123019>

3. Erklärung zum Eigenanteil

Die vorliegende Arbeit wurde an der Universität Bonn unter der Betreuung von Prof. Dr. Christoph Bourauel durchgeführt.

Die Konzeption und Planung der wissenschaftlichen Arbeit erfolgten zu 75 % durch mich in enger Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Christoph Bourauel und Dr. Tarek M. Elshazly (25 %).

Die Datenerhebung wurde zu 90 % eigenständig von mir durchgeführt. Weitere Beiträge kamen von Prof. Dr. Christoph Bourauel, Dr. Tarek M. Elshazly, Dr. Mostafa Aldesoki, Dr. Lamia Singer und Dr. Ahmed M. Ismail (10 %).

Die Auswertung der Daten einschließlich Softwarevalidierung wurde zu 90 % von mir übernommen, unterstützt durch die genannten Koautoren (10 %).

Die Interpretation der Ergebnisse sowie die Erstellung und Ausformulierung des Manuskripts lagen zu 80 % in meiner Verantwortung. Die verbleibenden 20 % der Interpretationsleistung und redaktionellen Bearbeitung erfolgten durch die Mitautoren, darunter Prof. Dr. Christoph Bourauel, Dr. Tarek M. Elshazly, Dr. Mostafa Aldesoki, Dr. Lamia Singer, Dr. Ahmed M. Ismail, Dr. Hanaa Elattar und Dr. Abdulaziz Alhotan.

Ich bin alleiniger Erstautor der Publikation „Effect of the Height of a 3D-Printed Model on the Force Transmission and Thickness of Thermoformed Orthodontic Aligners“ und habe die erste Version des Manuskripts selbstständig verfasst.

Zur sprachlichen Optimierung habe ich das KI-Tool ChatGPT (OpenAI, GPT-4) zur Verbesserung von Lesbarkeit und Formulierung einzelner Passagen eingesetzt. Alle durch das Tool generierten Textelemente wurden von mir überprüft und gegebenenfalls überarbeitet. Ich übernehme die vollständige Verantwortung für den Inhalt der Dissertationsschrift.

Ich versichere, die Dissertationsschrift selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet zu haben.

4. Danksagung

Prof. Dr. Bourauel bin ich zutiefst dankbar für die Möglichkeit, unter seiner Anleitung zu forschen. Die sorgfältige Planung und Durchführung der Forschungsarbeiten unter seiner Anleitung waren von unschätzbarem Wert. Seine fachliche Expertise und seine geduldige Begleitung haben maßgeblich zum Gelingen meiner Promotion beigetragen.

Dr. Dr. Tarek Elshazly bin ich sehr dankbar für seine intensive Betreuung. Seine sorgfältige Betrachtung jeder einzelnen Komponente hat meine Arbeit verfeinert. Besonders dankbar bin ich für seine umfassende Arbeit in diesem Bereich, die diese Arbeit zweifellos bereichert hat.

Dr. Anne Ziegler dank ihrer Hilfe und ihres Anstoßes konnte ich diese Arbeit beginnen und zeitnah beenden.

Meiner Familie bin dankbar für ihre bedingungslose Unterstützung, ihre Liebe und ihr Glaube an mich waren eine große Stütze und haben maßgeblich zu meinem Erfolg beigetragen.

Die sorgfältige und professionelle Arbeit **meiner Kollegen** hat wesentlich zur erfolgreichen Umsetzung dieser Arbeit beigetragen.