

Diplomarbeit

**Vergleich unterschiedlicher Reinigungsverfahren von 3D
gedruckten Folien mit Duranfolien – eine in-vitro-Studie**

eingereicht von

Lesia Motrych

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktorin der Zahnmedizin

(Dr.ⁱⁿmed.dent.)

an der

Medizinischen Universität Graz

ausgeführt an der

Klinischen Abteilung für Orale Chirurgie und Kieferorthopädie

unter der Anleitung von

Ass.-Prof.ⁱⁿ Dr.ⁱⁿmed.univ. et med.dent. Margit Pichelmayer

in Zusammenarbeit mit der

Montanuniversität Leoben

Department Kunststofftechnik – Lehrstuhl für Chemie der Kunststoffe

Zweitbetreuer: **Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.tech. Thomas Grießer**

Graz am, 15.02.2022

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe, andere als die angegebenen Quellen nicht verwendet habe und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 15.02.2022

Lesia Motrych eh.

Danksagungen

Mein besonderer Dank gilt Frau Ass.-Prof.ⁱⁿ Dr.ⁱⁿ med.univ. et med.dent. Margit Pichelmayer für die äußerst kompetente und herzliche Betreuung, die großartige Unterstützung, Geduld und Zeit während der Erarbeitung dieser Diplomarbeit.

Vielen Dank an Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Thomas Grießer für die wissenschaftliche Betreuung, die Bereitstellung des 3D-gedruckten Kunststoffes und die Unterstützung bei der Versuchsdurchführung.

Herrn Dr.scient.med Uwe Yacine Schwarze danke ich für die Unterstützung beim Versuchsaufbau und die kompetente fachliche Betreuung.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Erich Häupl und Herrn Herbert Lorenzer, die einen großen Beitrag zu dieser Diplomarbeit geleistet haben und mir bei der praktischen Umsetzung sehr geholfen haben.

Weiters möchte ich mich bei Frau Dipl.-Ing. Irene Mischak bedanken, die mir bei der statistischen Auswertung der Daten eine große Hilfe war.

Danke auch an Herrn Benjamin Reinhart, Herrn Philipp Tepesch und Frau Angela Zorn für ihre Hilfe und Unterstützung bei der Durchführung des praktischen Teils.

Herrn Markus Ast möchte ich für die Unterstützung beim 3D-Druck danken. Frau Michelle Puscher danke ich für die Rauheitsmessung mittels Digitalmikroskop an der Montanuniversität Leoben. Vielen Dank an Herrn Thomas Rockenbauer für die fachliche Beratung.

Mein größter Dank gilt meiner Familie. Sie hat mir während meines Studiums Kraft und Liebe geschenkt und mich unglaublich unterstützt. Besonders dankbar bin ich meiner Schwester Katya, die immer an mich geglaubt hat.

2.2.	Probenumfang.....	24
2.3.	Herstellung der Proben	26
2.3.1.	Herstellung der tiefgezogenen Duran®- und Clear-Aligner®-Pro- Proben der Firma Scheu Dental GmbH.....	26
2.3.2.	Herstellung der Proben des Kunststoffes von Univ.-Prof. DI Dr. Grießer.	30
2.4.	Lagerung.....	35
2.5.	Reinigungsmethoden	37
2.5.1.	Gruppe 1: Reinigung im Ultraschallbad	37
2.5.2.	Gruppe 2: Reinigung mittels Reinigungstabs.....	38
2.5.3.	Gruppe 3: Reinigung mittels Zahnbürste und Wasser	39
2.5.4.	Gruppe 4: Reinigung mittels Zahnbürste und Zahnpaste	44
2.6.	Markierung des Untersuchungsfeldes vor dem Messvorgang.....	46
2.7.	Vorbereitung der Proben für die Messung und Messvorgang	47
2.7.1.	Probentrocknung und Goldbeschichtung.....	47
2.7.2.	Messung.....	48
2.7.2.1.	Rauheitskenngrößen.....	49
3.	Ergebnisse.....	51
4.	Diskussion	59
5.	Schlussfolgerung	62
	Literaturverzeichnis.....	63

Abkürzungsverzeichnis

3D	dreidimensional
°C	Grad Celsius
ca.	circa
DLP	Digital Light Processing
EVA	Ethylenvinylacetat
g	Gramm
min	Minute
mm	Millimeter
µm	Mikrometer
nm	Nanometer
N	Newton
PC	Polycarbonat
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
PET-G	Polyethylenterephthalat-Glycolmodifiziert
PP	Polypropylen
PUR	Polyurethan
Ra	mittlere Rauheit des Profils
RDA	Relative Dentin Abrasion
Rp	Höhe der größten Profilspitze des Rauheitsprofils
Rt	Gesamthöhe des Rauheitsprofils
Rv	Tiefe des größten Profiltales des Rauheitsprofils
Rz	gemittelte Höhe des Rauheitsprofils
s	Sekunde
STL	Standard Tessellation Language
TPU	thermoplastisches Polyurethan
Tg	Glastemperatur
Tm	Schmelzpunkt

Produktverzeichnis

- Asiga Freeform PRO2™ – Asiga – 3D-Drucker
- BIOSTAR® –Scheu-Dental GmbH – Druckformgerät
- COREGA TABS Bioformel – GlaxoSmithKline Consumer Healthcare GmbH & Co. KG – OTC Medicines – Reinigungstabs
- Clear-Aligner®-Pro – Scheu-Dental GmbH – thermoplastische Tiefziehfolie
- Cressington Sputter Coater 108auto – TESCAN GmbH – Sputter Coater
- Digitalmikroskop VHX 7000 – KEYENCE DEUTSCHLAND GmbH
- DURAN® – Scheu-Dental GmbH – thermoplastische Tiefziehfolie
- elmex® – SENSITIVE PROFESSIONAL CP GABA GmbH – Zahnpasta
- Exsikkator – Carl Roth®
- Form Cure L – Formlabs® – Lichthärtegerät
- Infinite Focus G5plus – Bruker Alicona GmbH – Oberflächenmässiggerät
- ISOFOLAN® – Scheu-Dental GmbH – Isolationsfolie für Tiefziehprozess
- Muaket –SHUNSHUN GmbH – Feinwaage
- Oral-B Genius – Procter & Gamble – elektrische Zahnbürste
- Oral-B Soft – Procter & Gamble – Clean Aufsteckbürste
- Sialin-Sigma Lösung – Sigmapharm Arzneimittel GmbH – Speichelersatzmittel

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Einteilung der Kunststoffe	1
Abbildung 2 Im Tiefziehverfahren hergestellte kieferorthopädische Geräte	4
Abbildung 3 Reinigungsmethoden für thermoplastische Schienen	14
Abbildung 4 Vergleichsmaterialien	22
Abbildung 5 Clear Aligner Folien: Schichtstärken.....	23
Abbildung 6 Probenumfang.....	25
Abbildung 7 Probenform	26
Abbildung 8 Herstellung der tiefgezogenen Proben (1)	28
Abbildung 9 Herstellung der tiefgezogenen Proben (2)	29
Abbildung 10 Positionierung der Plättchen auf der Bauplattform in der "Asiga Composer" Software	30
Abbildung 11 3-D Drucker Asiga Freeform.....	31
Abbildung 12 Drucken der Proben: a) Auffüllen des Harztanks mit dem Kunststoff; b) Fertig gedruckte Proben auf der Bauplattformunterseite.	32
Abbildung 13 Entfernung der Proben aus der Bauplattform	33
Abbildung 14 Nachhärten der Proben in „Form Cure L“ der Firma Formlabs®.....	34
Abbildung 15 Lagerung der Proben (1)	35
Abbildung 16 Lagerung der Proben (2).....	36
Abbildung 17 Proben im Ultraschallbad der Firma iTronics	37
Abbildung 18 Reinigung mittels Reinigungstabs	38
Abbildung 19 Die elektrische Zahnbürste „Oral-B Genius“ mit der Aufsteckbürste „Oral-B Soft Clean“.....	40
Abbildung 20 Borsten des Bürstenkopfes „Oral-B Soft Clean“: a) abgeschnittene Borsten (links: innere helle Borste; rechst: äußere dunklere Borste); b) Borsten am Bürstenkopf (links: innere helle Borste; rechst: äußere dunklere Borste); c,d) Borstenspitzen.	41
Abbildung 21 Reinigungsbereich mittels Zahnbürste.....	42
Abbildung 22 die Reingungsapparatur für die Zahnbürste: a) Ansicht von der Seite; b) Anfangsposition des Bürstenkopfs.....	43
Abbildung 23 Reinigung mittels Zahnbürste und Paste	45
Abbildung 24 Markierung des Untersuchungsfeldes: links - markierte Duran® Probe auf dem Musterplättchen mit Reißnagel und Filzstift; rechts – markierte 3-D gedruckte Proben in der Schaumstoffplatte.	46
Abbildung 25 links: Exsikkators von Carl Roth®; rechts: Cressington Sputter Coater 108auto.....	47
Abbildung 26 das Digitalmikroskop VHX-7000 von Keyence.....	48
Abbildung 27 Graphische Darstellung von Ra (55)	49
Abbildung 28 Graphische Darstellung von Rz und Rt (55)	50
Abbildung 29 Graphische Darstellung von Rp und Rv in Anlehnung an Vockert (56).....	50
Abbildung 30 Grafische Darstellung Ra-Wert.....	52
Abbildung 31 Grafische Darstellung Rz-Wert.....	53
Abbildung 32 Graphische Darstellung Rp-Wert.....	53
Abbildung 33 Grafische Darstellung Rv-Wert.....	54
Abbildung 34 Signifikante Unterschiede: links zwischen der Kontrollgruppe und den Reinigungsgruppen (Rauheitszunahme ↑ Rauheitsabnahme ↓); rechts zwischen den Reinigungsgruppen untereinander.	57
Abbildung 35 Rauheitsveränderung (Ra-Wert): Duran®, Clear-Aligner®-Pro und 3D-gedruckter Kunststoff.	58

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Amorphe und teilkristalline Thermoplaste (2-5)	2
Tabelle 2 Ra und Rz/Rt Werte	51
Tabelle 3 Rp und Rv Werte	52
Tabelle 4 Signifikanzwerte beim paarweisen Vergleich mit der Kontrollgruppe	54
Tabelle 5 Signifikanzwerte beim Gruppenvergleich pro Material.....	56

Zusammenfassung

Hintergrund und Zielsetzung

Es liegt eine Kooperation zwischen der Medizinischen Universität Graz und der Montanuniversität Leoben vor. Im Zuge dieser wird von Univ. Prof. DI Dr. Thomas Grießer ein Kunststoff entwickelt, welcher sich für den 3D-Druck zur Herstellung von Alignern eignet.

Ziel dieser Studie war die Untersuchung der Veränderung der Oberflächenrauheit an 3 Aligner-Materialien: PET-G (Duran® der Firma Scheu Dental GmbH), Copolyester mit Thermoplastischem Elastomerkern (Clear-Aligner®-Pro der Firma Scheu Dental GmbH) und der 3D-druckbare Kunststoff der Montanuniversität Leoben in der derzeitigen Formel. Um die Frage zu beantworten, inwiefern die Materialien nach den unterschiedlichen Reinigungsprozessen ihre Oberflächenbeschaffenheiten verändern, wurde die Rauheit der Probeplättchenoberfläche mittels eines optischen Messgerätes ermittelt.

Material und Methode

Zu Beginn der Studie wurde eine Ausgangsmessung durchgeführt. Zunächst wurde eine dünne Goldschicht auf die Proben aufgebracht, damit das Gerät ihre Oberfläche erkennen kann. Da die Goldbeschichtung eine Wiederverwendung der Proben unmöglich macht, wurden von jedem Material 20 Proben als Kontrollgruppe für die Ausgangsmessungen verwendet.

Weiters wurden neue Proben, jeweils 40, von jedem untersuchten Material hergestellt. Über die Dauer von 14 Tagen wurden sie, unter standardisierten Bedingungen, einer von vier unterschiedlichen Reinigungstechniken (Ultraschallbad, Reinigungstabs, Zahnbürste und Wasser, Zahnbürste und Zahnpaste) unterzogen. Sie wurden in der Zeit, in der sie nicht gereinigt wurden, in künstlichem Speichel bei Körpertemperatur gelagert.

Am Ende erfolgte die Abschlussmessung mit derselben Methode, wie auch die Ausgangsmessung durchgeführt wurde (KYENCE Digitalmikroskop VHX 7000).

Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, dass nur die Duran®-Proben nach der Reinigung mit der Zahnbürste mit und ohne Zahnpasta eine Erhöhung der Oberflächenrauheit

aufwiesen. Nach der Anwendung des Ultraschallbades und der Reinigungstabs wurden keine signifikanten Unterschiede festgestellt. Die Rauheit der Clear-Aligner®-Pro und der 3D-gedruckten Proben nahm bei fast allen Reinigungsmethoden ab. Nur nach der Reinigung mit Zahnbürste und Wasser veränderte sich die Rauheit der Clear-Aligner®-Pro-Proben nicht signifikant.

Schlussfolgerung

Für Duran® ist die Reinigung mit Reinigungstabs oder im Ultraschallbad zu bevorzugen. Für Clear-Aligner®-Pro und den 3D-druckbaren Kunststoff sind alle vier Reinigungsmethoden (Ultraschallbad, Reinigungstabs, Zahnbürste mit und ohne Zahnpaste) zu empfehlen.

Abstract

Aim

There is a cooperation between the Medical University of Graz and the University of Leoben. In the course of this, Univ. Prof. DI Dr. Thomas Grießer is developing a resin that is suitable for 3D printing for the production of aligners.

The aim of this study was to investigate the change in surface roughness on 3 aligner materials: PET-G (Duran® from Scheu Dental GmbH), copolyester with thermoplastic elastomer core (Clear-Aligner®-Pro from Scheu Dental GmbH) and the 3D printable plastic from the University of Leoben in the current formula. In order to answer the question to what extent the materials change their surface properties after the different cleaning processes, the roughness of the sample platelet surfaces was determined using an optical measuring device.

Material and method

At the beginning of the study, a baseline measurement was taken. First, a thin layer of gold was applied to the samples so that the device could recognise their surface. Since the gold coating makes it impossible to reuse the samples, 20 samples of each material were used as a control group for the baseline measurements.

In addition, 40 new samples were prepared from each of the materials under investigation. They were subjected to one of four different cleaning techniques (ultrasonic bath, cleaning tablets, toothbrush and water, toothbrush and toothpaste) under standardised conditions for 14 days. During the time they were not cleaned, they were stored in artificial saliva at body temperature.

At the end, the final measurement was made using the same method as the initial measurement (KYENCE digital microscope VHX 7000).

Results

The results show that only the Duran® samples demonstrated an increase in surface roughness after toothbrushing with and without toothpaste. No significant differences were found after using the ultrasonic bath and cleaning tablets. The roughness of the Clear-Aligner®-Pro and the 3D printed samples decreased with

almost all cleaning methods. Only after cleaning with a toothbrush and water did the roughness of the Clear-Aligner®-Pro samples not change significantly.

Conclusion

For Duran®, cleaning with cleaning tablets or in an ultrasonic bath is preferable. For Clear-Aligner®-Pro and the 3D printable resin, all four cleaning methods (ultrasonic bath, cleaning tablets, toothbrush with and without toothpaste) are recommended.

1. Einleitung

1.1. Kunststoffe

Produkte aus Kunststoff sind heute aus unserem Leben nicht mehr wegzudenken. Aufgrund ihrer Eigenschaften werden sie in verschiedenen Bereichen, darunter auch in der Zahnmedizin, eingesetzt.

Die chemische Untereinheit von Kunststoffen nennt man Monomere. Diese verbinden sich durch Polymerisationsreaktionen zu größeren Einheiten, die man als Polymere bezeichnet. Durch Zusatz verschiedener Additive entstehen daraus Kunststoffe.

Nach ihrem thermischen und mechanischen Verhalten lassen sich diese Kunststoffe in Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere einteilen.

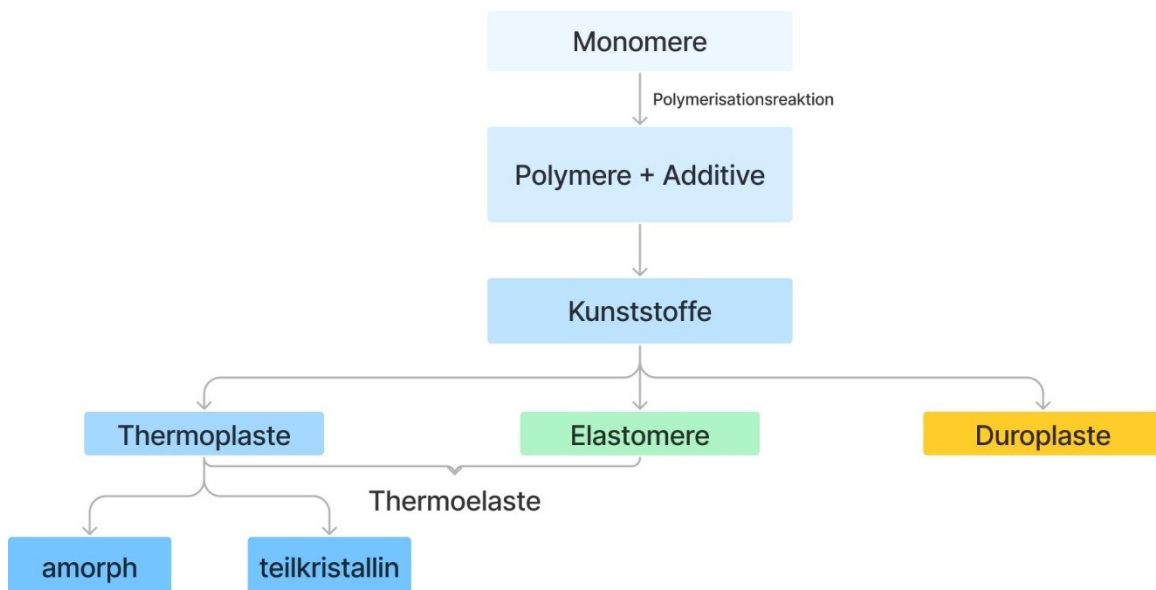


Abbildung 1 Einteilung der Kunststoffe

Makromoleküle von **Duroplasten (Duromeren)** sind engmaschig miteinander vernetzt. Deshalb ist diese Kunststoffgruppe hart, spröde und lässt sich im ausgehärteten Zustand durch Erhitzen nicht mehr nachträglich umformen (1). Der in dieser Studie untersuchte 3D-druckbare Kunststoff (siehe Kapitel 1.4.) gehört zu den Duroplasten (Duromeren).

Als *Elastomere* werden die schwach vernetzten Kunststoffe bezeichnet, die in der Wärme nicht verformbar sind, aber unter mechanischer Belastung elastische Eigenschaften aufweisen (1).

Thermoplaste haben ihren Namen deshalb, weil sie durch Zufuhr von Wärme (griech. thermós = warm, heiß) beliebig oft plastisch verformbar sind. Das erklärt sich daraus, dass die Molekülketten unvernetzt sind (2).

Es gibt noch eine weitere Gruppe von Kunststoffen - die sogenannten *thermoplastischen Elastomere*. Dank schmelzbarer amorpher Bereiche in ihrer Molekülstruktur können sie, wie Thermoplaste, ihre Form ändern, wenn sie höheren Temperaturen ausgesetzt werden (3). Bei normaler Raumtemperatur weisen sie hingegen die Eigenschaften von Elastomeren auf (3).

Da bei der im Rahmen dieser Diplomarbeit durchgeführten Studie Thermoplaste eingesetzt wurden, sollen diese nachfolgend genauer erläutert werden.

1.1.1. Einteilung und Eigenschaften der Thermoplaste

Je nach Anordnung der Makromoleküle kann man die Thermoplaste in amorph und teilkristallin unterteilen. Die nachstehende *Tabelle 1* enthält eine genaue Beschreibung und die wichtigsten Unterschiede zwischen den beiden Gruppen.

Thermoplaste	amorph	teilkristallin
Anordnung der Makromoleküle	Die Molekülketten sind ungeordnet und bilden sogenannte Knäuel.	Neben amorphen ungeordneten Bereichen liegen solche mit kristalliner Struktur vor. Die Kristallite werden entweder durch parallelliegende Molekülabschnitte oder durch gefaltete Molekülketten gebildet.
Transluzenz	klar und lichtdurchlässig	transluzent bis opak

E-Modul	höher	niedriger
Wasserabsorptionsrate	höher	niedriger
Resistenz	Geringere Beständigkeit gegenüber Chemikalien	Beständiger gegenüber Chemikalien
Thermisches Verhalten	Oberhalb der Glasatemperatur (Tg) ziehen sich die Polymerketten leicht auseinander und das Material wird weich und viskös. Bei weiterer Temperaturerhöhung wird es flüssig. Es gibt keinen exakt definierten Schmelzpunkt (Tm).	Diese Gruppe besitzt einen Schmelzpunkt (Tm). Zwischen der Glasatemperatur (Tg) und dem Schmelzpunkt (Tm) ist das Material zäh und elastisch. Oberhalb des Schmelzpunktes beginnt es zu fließen.

Tabelle 1 Amorphe und teilkristalline Thermoplaste (2-5)

1.1.1.1. PET-G

In dieser Arbeit wurde PET-G verwendet, ein amorpher Thermoplast. PET-G steht für Polyethylenterephthalat-Glykol. Wie die Einzelteile des Namens schon erkennen lassen, besteht dieser Kunststoff aus Polyethylen, Terephthalsäure und Glykol. Diese Glykol-Verbindung verleiht dem PET-G besondere Eigenschaften, da der Kunststoff dank Glykol hohe Transparenz aufweist. Zudem bleibt er bei hohen Temperaturen und längeren Heizzeiten amorph und kristallisiert nicht (6).

1.1.2. Verwendung der Thermoplaste in der Zahnmedizin

Aufgrund ihrer Eigenschaften werden Thermoplaste in der Zahnmedizin häufig eingesetzt. Das Anwendungsspektrum ist vielfältig und deckt fast alle Teilbereiche ab, darunter Kieferorthopädie, Implantologie, Prothetik, konservierende Zahnheilkunde, Chirurgie und ästhetische Zahnmedizin (4). Dabei werden sie in der Regel im Spritzgieß- und Tiefziehverfahren verarbeitet (3).

In der Kieferorthopädie kann man das Einsatzgebiet von tiefgezogenen Thermoplasten in 2 Gruppen unterteilen (*Abbildung 2*).

Zu der ersten Gruppe gehören die Geräte, die man als aktive Geräte bezeichnet. Die Hauptvertreter sind Aligner und Positioner, mit denen die Zähne umgestellt werden können.

Die zweite Gruppe beinhaltet die passiven Apparaturen (diese Geräte sollen keine Kräfte auf die Zähne ausüben), die für die Retention der Zähne nach kieferorthopädischer Behandlung Verwendung finden. Sie werden daher als „Retainer“ bezeichnet. Dieser Terminus darf nicht mit den festsitzenden geklebten Drahtretainern verwechselt werden. Schlechte Mundhygiene, Parodontitis, ein nicht vollständig korrigierter Tiefbiss und hohe Kariesanfälligkeit sind Kontraindikationen für solche festsitzende Retainer (7, 8). Bei diesen Patienten und Patientinnen sind die abnehmbaren, tiefgezogenen Retainer eine gute Lösung.

Auch die Bracketübertragungsschienen können zu zweiter Gruppe gezählt werden.

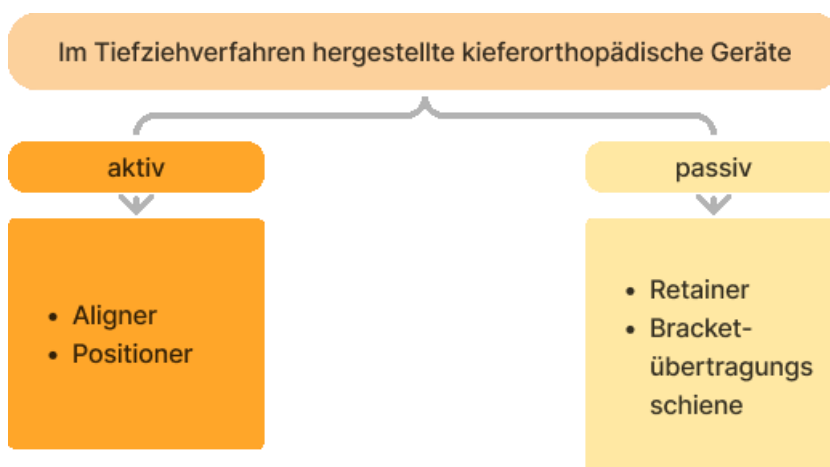


Abbildung 2 Im Tiefziehverfahren hergestellte kieferorthopädische Geräte

1.1.3. Tiefziehprozess

Thermoformen, auch als Tiefziehen und Warmformen genannt (9), gehört zur Gruppe der Umformverfahren von Kunststoffen. Beim Tiefziehen in der Zahnmedizin verwendet man thermoplastische Kunststoffe in Form dünner Folien. Die ersten tiefgezogenen enoralen Schienen wurden bereits 1963 hergestellt (3,

10). Im Unterschied zu den Formgebungsverfahren, wie zum Beispiel Spritzgießen, wird beim Tiefziehen unter erhöhter Temperatur eine thermoplastische Folie mit Hilfe von Druckluft oder Vakuum zu einem Formteil verarbeitet (3, 4). Nach diesem Prinzip können die Tiefziehgeräte, abhängig von der Verfahrenstechnik, in Vakuumformgeräte und Druckformgeräte unterteilt werden.

Beim Vakuumformen wird die beheizte Folie auf die Oberfläche des abzuformenden Werkstoffstückes gesaugt, wobei der Umformdruck durch die Erzeugung eines Vakuums entsteht. Dieser Umformdruck errechnet sich aus der Differenz zwischen atmosphärischem Druck und dem Unterdruck, den die Vakuumpumpe erzeugt. Der Unterdruck bei dieser Technik liegt bei ca. 1 bar, was dem atmosphärischen Druck auf Meereshöhe entspricht (11, 12). Die Vakuumgeräte sind einfacher in der Handhabung und kostengünstiger (3, 4).

Beim Druckformen wird ein abgedichteter Druckluftraum benötigt, in welchen Druckluft einströmen kann. Die erwärmte Folie kann dann mit Druckluft gegen die Oberfläche des formgebenden Werkzeuges gepresst werden (12). Der Umformdruck wird in diesem Fall aus der Differenz zwischen dem Druck im Formraum und dem atmosphärischen Druck bestimmt (4). Im Vergleich zu dem Arbeitsdruck der Vakuumgeräte kann bei den Druckluftgeräten ein größerer Druck erzielt werden, der normalerweise im Bereich von 0,1 bis 6 bar liegt (4, 12). Im Rahmen dieser Studie wurde ein druckluftbetriebenes Tiefziehgerät verwendet.

Die Erwärmung der Folien erfolgt bei diesem Gerätentyp mit einem Infrarotstrahler. Die Aufheiztemperatur und die Aufheizzeit müssen je nach Art und Stärke der Folie individuell ausgewählt werden. Bei bis zu 2,5 mm dicken Folien reicht es, wenn man nur eine Seite beheizt. Bei stärkeren Folien sollte die Erwärmung beidseits geschehen, da dadurch eine bessere Temperaturverteilung über die Folie erzielt werden kann (3, 4).

1.2. Aligner

Elastische kieferorthopädische Gerätschaften gibt es schon seit längerer Zeit. Sogenannte „Positioner“ wurden schon im Jahre 1945 von Harold Kesling vorgestellt (10, 11, 13, 14). Bei ihnen handelte es sich um einen Apparat aus Kautschuk, der in der Endphase der kieferorthopädischen Behandlung zur feinen Umstellung der Zähne und zur Vorbeugung von Rezidiven gedacht war (10, 15, 16). Nach Verwendung seines Kautschukgerätes kam Kesling zum Schluss, dass dieses Material wegen seiner elastischen Eigenschaften auch zur größeren Umstellung von Zähnen geeignet sein müsste (16). Aus dieser Grundüberlegung heraus hat sich das große Gebiet der kieferorthopädischen Therapie mittels thermoplastischer Materialien entwickelt.

Entscheidend dabei war die Entdeckung der vakuumgeformten thermoplastischen Platten in den 1980er Jahren.

1994 erfand Sheridan ein eigenes Aligner System (Essix), das für kleine Korrekturen an Frontzähnen geeignet war (13). Zusammen mit Schwartz etablierten sie dieses System in erweiterter Form 1997, das auch heute noch in vielen Zahnarztpraxen verwendet wird (10).

1999 wandten zwei Doktoranden der Stanford University die CAD/CAM Technologie in der „Elasto-KFO“ an und entwickelten auf dieser Basis die weltweit erste serienmäßig hergestellte, individuell angepasste Aligner-Technologie (Invisalign). CAD/CAM wird dabei für das Drucken der Modelle verwendet. Die Folien selbst werden bei dieser Alignerherstellung tiefgezogen.

Inzwischen sind weitere Aligner-Firmen mit ähnlichen Technologien auf dem Markt, auch wenn die in den einzelnen Unternehmen verwendeten Kunststoffe unterschiedlich sein können, und die Diagnose-/Behandlungsplanungssoftware von Unternehmen zu Unternehmen variieren kann. Derzeit sind die am meisten verwendeten Alignermaterialien: Polyethylen Terephthalat (PET), glykolmodifiziert (PET-G), Polyurethan (PUR), Polypropylen (PP), Polycarbonat (PC), thermoplastische Polyurethane (TPU), Ethylvinylacetat (EVA) und Polyethylen (PE) (17, 18).

Aligner haben eine Reihe von Vorteilen, dank derer sie bei Ärzten und Patienten/-innen schnell an Beliebtheit gewonnen haben. Ihr ästhetisches Erscheinungsbild ist eine ihrer größten Stärken. Das wachsende Bedürfnis der Patienten/-innen nach ästhetischen kieferorthopädischen Geräten hat die Entwicklung von Alignern vorangetrieben. Da Aligner transparent und in der Mundhöhle nahezu unsichtbar sind, entscheiden sich immer mehr Patienten/-innen für dieser Form der kieferorthopädischen Behandlung (19).

1.2.1. Aligner als herausnehmbare Apparatur

Abgesehen davon, dass Aligner transparent sind und somit eine ästhetische Behandlung ermöglichen, können sie angenehmerweise während der Mahlzeiten und bei der Mundhygiene entfernt werden. Es wird allgemein eine tägliche Alignertragedauer von 22 Stunden pro Tag empfohlen. Nach 14 Tagen wird auf die nächsten Aligner gewechselt (20, 21).

Eine bessere, ungehinderte Mundhygiene ist der größte Vorteil der Aligner gegenüber den klassischen festsitzenden kieferorthopädischen Geräten (17). Einige Studien haben bestätigt, dass Patienten/-innen, die mit Alignern behandelt wurden, während der Therapie eine bessere parodontale Gesundheit aufwiesen als Patienten/-innen mit festsitzenden Apparaturen (22, 23).

Die Tatsache, dass Aligner herausgenommen werden können, schließt ihren Einfluss auf die intraorale Situation, sowie bakterielle Kontamination und Proliferation auf ihrer Oberfläche nicht aus. Da Aligner fast den ganzen Tag getragen werden sollen, sind die Zähne, und in manchen Fällen auch die Weichgewebe, über einen längeren Zeitraum bedeckt. Der Speichelfluss über diese Bereiche ist eingeschränkt und deshalb können dort die reinigenden, puffernden und remineralisierenden Eigenschaften des Speichels nicht wirken (17, 24, 25). Außerdem erfolgt keine natürliche, mechanische Zahnreinigung mit Hilfe von Lippen, Zunge und Wangen, sodass die Bakterien vor ihrer Entfernung geschützt sind (26, 27).

Oft trinken Patienten/-innen Flüssigkeiten, ohne ihre Aligner zuvor entfernt zu haben, wodurch sich diese Flüssigkeiten unter den Schienen ansammeln können (17). Besonders problematisch ist es, wenn es stark säurehaltige, kariogene Softdrinks oder Fruchtsäfte sind (21). Einige Patienten/-innen nehmen ihre Aligner auch während der Mahlzeiten nicht heraus, weil sie sich schämen, zu faul sind oder weil es keinen sauberen Platz gibt, um die Schiene abzulegen (21). Wenn diese Faktoren mit schlechter Mundhygiene kombiniert werden, kann dies zu einer raschen Demineralisierung führen - oft in Bereichen, die normalerweise nicht als kariesanfällig gelten (21).

1.2.2. Faktoren, die in Relation zur Alignerreinigung stehen

1.2.2.1. Auftreten von Biofilm auf der Aligneroberfläche

Etwa 60 Prozent der menschlichen Infektionen, einschließlich Karies und Parodontalerkrankungen, werden durch mikrobielle Biofilme verursacht (28). Zahnärzte tragen in gewissem Maße zur Biofilmbildung im oralen Milieu bei. Durch das Einbringen einer Vielzahl von Fremdoberflächen, wie Zahnersatz und Zahnprothesen, sowie kieferorthopädischen Geräten, werden Bedingungen geschaffen, die ideal für die Ansiedlung von Mikroben in der Mundhöhle sind (28). In der Studie von Batoni et al. wurde eine höhere bakterielle Besiedlung mit *Streptococcus mutans* in der Plaque bei Patienten/-innen mit herausnehmbaren kieferorthopädischen Geräten bestätigt, im Vergleich zu einer Gruppe unbehandelter Patienten/-innen (29). Auch die Ergebnisse einer anderen Studie von Türköz haben gezeigt, dass sich bei Verwendung von thermoplastischen „Retainern“ die Anzahl von *Streptococcus mutans* und *Lactobacillus* im Speichel und an der Zahnoberfläche erhöht hat (30).

Biofilme sind je nach Umgebung, in der sie sich bilden, einzigartig (28). Eine Reihe von Faktoren, wie die Morphologie der kolonisierenden Oberfläche, die Oberflächenrauigkeit und die Sauerstoff- oder Substratverfügbarkeit, können jedoch letztlich die Zusammensetzung der Flora, ihre Interaktionen, sowie die Matrix des Biofilms beeinflussen (28, 31).

In ihrer Studie untersuchten Low et al. die Morphologie und Ultrastruktur des Biofilms auf Invisalign-Alignern. Zu Beginn dieser Studie wurden die Patienten und Patientinnen anhand der Plaquebildungsrate auf ihren Zähnen nach 48 Stunden als „schnelle“ und „langsame“ Plaquebildner:innen eingestuft (28). Im Folgenden werden die Phasen der Biofilmbildung auf den Aligner von den Probanden und Probandinnen vorgestellt, die in der Studie beschrieben wurden (28):

- In der ersten Stunde: auf der Oberfläche der Aligner wurden kugelförmige oder diffuse Präzipitate festgestellt.
- In den nächsten 6 Stunden: die ersten Bakterien schienen sich auf der Oberfläche anzusiedeln.

- Nach 12 Stunden: die Besiedlung der Oberfläche mit Organismen wurde deutlicher, wobei die meisten Bakterien zu den Kokken gehörten.
- Nach 24-48 Stunden wurden faden- und stäbchenförmige Bakterien, sowie Kokken in Form von Clustern und Ketten nachgewiesen.
- Zeitraum von 2 bis 14 Tagen: die Proben wiesen voll entwickelte Biofilme auf. Die Bakterien waren von einer dicken Matrix aus extrazellulärer polymerer Substanz umgeben.
- Nach 7 Tagen: unregelmäßige und glatte Kristalline, die den Verkalkungen des Biofilmmaterials oder der Bildung von mikrokristallinen Strukturen entsprechen, wurden nachgewiesen.

Es ist beachtenswert, dass in der Gruppe der „schnellen“ Plaquebildner:innen auch eine schnellere bakterielle Besiedlung auf den Alignern beobachtet wurde. Der Biofilm war dicker und bedeckte eine größere Oberfläche als in der Gruppe der „langsamen“ Plaquebildner:innen. Aus diesen Ergebnissen lässt sich schließen, dass Patienten und Patientinnen, die zu schneller Plaquebildung neigen, während der Behandlung besonders auf die Reinigung der Aligner achten sollten.

Die Ablagerung von Plaque auf Alignern kann negative Folgen sowohl für die Aligner, als auch für die Mikroflora im gesamten Körper haben. Dies kann zu einer Verringerung der Transparenz, einer Verschlechterung des ästhetischen Erscheinungsbildes, sowie zu einem unangenehmen Geruch der Aligner führen und aus diesen Gründen die Compliance der Patientinnen und Patienten beeinträchtigen (27, 32).

Die Form der Aligner ist komplex und umfasst viele Bereiche, die schwer zu reinigen sind. Wenn sich Plaque auf der Innenseite eines Aligners, zum Beispiel an der Schneidekante, ansammelt, führt dies zu einem unzureichenden Kontakt zwischen den Zähnen und dem Aligner. Die Folge davon kann eine unvollständige Bewegung der Zähne sein (33).

Ebenfalls kann sich der vorhandene Belag auf der Oberfläche von Alignern im Mund ausbreiten, eine Störung der bereits vorhandenen oralen Mikroflora verursachen (27) und eine schnellere Wiederansiedlung des Biofilms auf gereinigten Oberflächen fördern (33). Dies begünstigt die Entstehung von bakteriell bedingten Krankheiten in der Mundhöhle und sogar systemischen Krankheiten (27, 34), was

besonders bei gesundheitlich angeschlagenen Patienten/-innen eine Gefahr darstellt (28, 34).

Selbst bei kurzzeitigem, intraoralem Einsatz sind Aligner andauernd Einflüssen wie Temperaturschwankungen, Feuchtigkeit, Speichelenzymen, Flüssigkeiten, eingeatmeter und ausgeatmeter Luft, sowie Traumata durch Schlucken, Sprechen und Bruxismus ausgesetzt (18, 35). Gracco et al. (35) untersuchten intraoral gealterte Aligner und stellten molekulare sowie morphologische Veränderungen fest. Nach 14 Tagen wurden Abrasionen, Mikrorisse, Delaminationen, lokale kalzifizierte Biofilmbelagerungen und Verlust der Transparenz nachgewiesen. Die Ansammlung von kalzifizierter Plaque wurde vor allem an jenen Gebieten der Aligneroberfläche gefunden, die grubenartig eingezogen sind (35). Schuster hat in seiner Studie ebenfalls kalzifizierte Ablagerungen von Biofilm sowie Abrasionen an den intraoral getragenen Alignern vorgefunden (20).

Die Zunahme der Rauheit des Materials durch den intraoralen Gebrauch kann die Ansammlung von Zahnbelag fördern (24, 33). Obwohl es zahlreiche andere Faktoren gibt, die die anfängliche Anhaftung kolonisierender Spezies auf einer bestimmten Oberfläche beeinflussen, darunter die Reaktivität des Materials, die freie Oberflächenenergie und die Hydrophobie, spielen die Oberflächenrauheit und -konfiguration die wichtigste Rolle (28, 36). Um die Ablagerung von Plaque und Bakterien zu vermeiden, sollten zahnmedizinische Werkstoffe mittlere Rauheitswerte (Ra) von unter 0,2 μm aufweisen (18). Wible hat in ihrer Studie festgestellt, dass die Rauheit ihrer untersuchten thermoplastischen Retainer in einer Spannbreite von 0.14-0.25 μm liegt (37). In der Studie von Poroyan et al. überschreitet die Rauheit der thermoplastischen Folien ebenfalls nicht den Grenzwert von 0,25 μm . Zur Orientierung: Streptokokken liegen in einer Größenordnung von 0,5 bis 1 μm .

Unebene Oberflächen bieten Mikroorganismen in der Mundhöhle Nischen, wo sie vor physikalischen Kräften geschützt sind (28, 36). Darüber hinaus sind raue Oberflächen zusätzlich schwieriger zu reinigen und begünstigen daher das erneute Wachstum überlebender Organismen im Gegensatz zur vollständigen Neubesiedlung der Oberfläche (28, 36). Außerdem vergrößert sich mit

zunehmender Rauheit die physische Oberfläche für die Adhäsion von Bakterien um den Faktor 2 bis 3 (28, 36).

1.2.2.2. Auftreten von Verfärbungen der Aligner

Die Verfärbungen der Aligner können durch:

- Physikalische (Oberflächenbeschaffenheit) und
- chemische Einflüsse (Chemie des Aligners per se oder die Ansammlung von Farbpigmenten aus der Umgebung) verursacht werden.

Diese zwei Einflüsse sind nicht so leicht voneinander zu trennen - in der Regel ist es eine Kombination aus beiden. Die Färbung der Aligner wird durch die Beschaffenheit des Materials selbst, und durch äußere Einflüsse, denen die Aligner beim Tragen ständig ausgesetzt sind, bestimmt (17). Eine erhöhte Oberflächenrauigkeit kann ihrerseits selbst zur Anreicherung von Pigmenten im Kunststoff beitragen (18).

Bernard et al. stellten in ihrer Arbeit fest, dass Invisalign-Aligner eine höhere Anfälligkeit zur Pigmentierung aufweisen, und vermuteten, dass dies auf ihre Oberflächenporosität und die polare Natur von Polyurethanen zurückzuführen sein könnte (38). In mehreren Studien wurde die Verfärbung von thermoplastischen Schienen in vitro unter dem Einfluss von Kaffee, Tee, Coca Cola und Rotwein nachgewiesen (18, 38-40). Dies zeigt, wie wichtig es wäre, dass die Patienten/-innen während des Tragens von Alignern oder Retainern auf färbende Getränke verzichten sollten.

1.3. Reinigung der Aligner

In Anbetracht der oben genannten bakteriellen Einflüsse und Verfärbungen, denen die Aligner ständig ausgesetzt sind, wird deutlich, wie wichtig ihre richtige Pflege ist. Optimalerweise sollte ein Reinigungsprotokoll festgelegt werden, um den Patienten und Patientinnen die sachgemäße Reinigung ihrer Aligner zu erleichtern. Derzeit existiert jedoch noch kein derartiges, standardisiertes Protokoll.

2022 führten Charavet et al. eine Übersichtsarbeit durch, um die unterschiedlichen Reinigungsmethoden zu vergleichen, die in verschiedensten Studien in vivo durchgeführt wurden (27). Dabei wurden auch einige grundlegende Anforderungen an ein Reinigungsprotokoll formuliert:

- Alle mechanischen und chemischen Eigenschaften des Aligners dürfen nicht beeinträchtigt werden.
- Die Farbe des Aligners muss stabil bleiben.
- Das Reinigungsmittel muss in der Lage sein, auch unangenehme Gerüche zu neutralisieren.
- Bei einem mehrstufigen Protokoll ist es wichtig, zu überprüfen, ob die Patientin bzw. der Patient dieses Protokoll einhält, da dies mit zusätzlichen Kosten verbunden ist und viel Zeit in Anspruch nimmt (27).

Außerdem sollten die Patienten/-innen auch über die richtige Reinigungstechnik instruiert werden. In manchen Studien wurde eine höhere Ansammlung von Biofilm auf der inneren Oberfläche von Alignern festgestellt, insbesondere im Bereich der Schneidekanten, Höckerspitzen (21, 28, 32, 33) und Attachments (28). Die Untersuchungen von Spack et al. deuten auf eine stärkere bakterielle Adhäsion posterior und vor allem auf der palatinalen Seite der Aligner hin (33). Daher ist es notwendig, im Gespräch mit den Patienten/-innen auf die anatomischen Merkmale der Aligner und das Vorhandensein von Vertiefungen hinzuweisen, die bei der Reinigung besonders beachtet werden sollten.

Eine unzureichende oder unsachgemäße Hygiene der Aligner kann sich, wie bereits erwähnt auf ihre mechanischen, chemischen und ästhetischen Eigenschaften, als auch auf die Gesundheit der Mundhöhle und des gesamten Körpers negativ auswirken.

1.3.1. Arten von Aligner-Reinigungsmethoden

1.3.1.1. Einteilung

Auf Basis mehrerer Studien, in denen verschiedene Methoden zur Reinigung von Alignern (18, 26, 32, 33, 38) und thermoplastischen „Retainern“ (24, 34, 37, 41) angewandt wurden, wurde folgendes Schema erstellt (Abbildung 2) ->

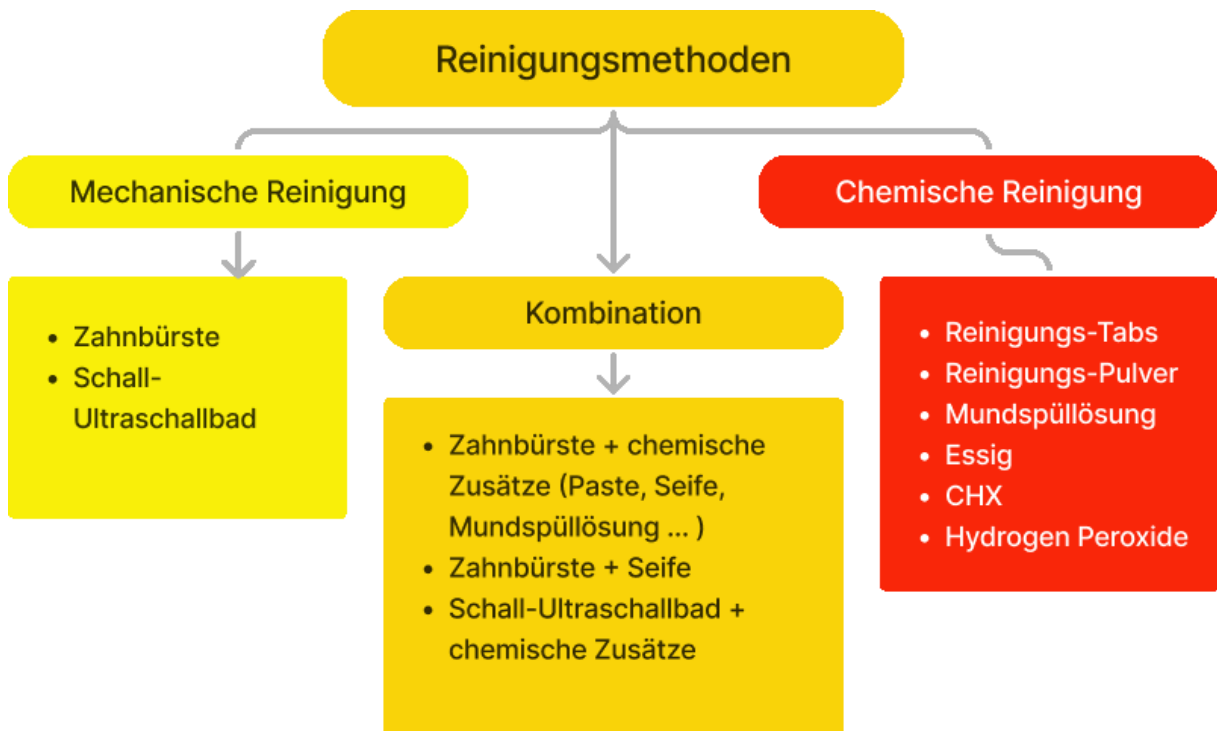


Abbildung 3 Reinigungsmethoden für thermoplastische Schienen

Die Reinigungsmethoden können generell in 3 Gruppen eingeteilt werden: mechanisch, chemisch und eine Kombination der ersten beiden Techniken (34). Charavet et al. kamen in ihrer Studie zu dem Schluss, dass eine Kombination aus chemischen und mechanischen Mitteln die effizienteste Methode ist (27). Für jede Gruppe sind in diesem Schema Beispiele für die in diesen Studien verwendeten Reinigungsverfahren dargestellt.

1.3.1.2. Ultraschall

Als Ultraschall bezeichnet man Schallwellen, deren Frequenz oberhalb des Hörbereiches des menschlichen Ohres liegt, der meist mit etwa 16 kHz nach oben abgegrenzt wird (42). Ultraschall kann auf verschiedene Weise erzeugt werden. Nach der Art der Erzeugung unterscheidet man:

- mechanische
- magnetostriktive
- piezoelektrische Schallgeber (48).

Die gängigste Methode der Ultraschallerzeugung in modernen Anwendungen basiert auf dem piezoelektrischen Effekt (42). Bei manchen Kristallen entstehen durch Druck oder Dehnung in definierte Richtungen elektrische Ladungen an ihren Oberflächen. Dieses Phänomen wird als direkter piezoelektrischer Effekt bezeichnet. Legt man eine elektrische Spannung an geeignete Kristallflächen, erhält man umgekehrt eine Verformung des Materials. Nach diesem Prinzip entsteht der reziproke piezoelektrische Effekt (43, 44).

Wenn sich Ultraschallwellen in Flüssigkeiten ausbreiten, können hohe Unterdruckamplituden auftreten (42). Dadurch entstehen Hohlräume, die Kavitationsblasen genannt werden. Diese Blasen können oszillieren und kollabieren. Diesen Prozess nennt man Kavitation, der den Hauptteil der Reinigungswirkung in Ultraschallbädern ausmacht (45).

Im Allgemeinen gibt es 3 Mechanismen für die Wirkung von Kavitationsblasen auf die Verschmutzung. Die Erzeugung von:

- *Stoßwellen*
- *Scherströmungen*
- „*Jets*“ (42).

Stoßwellen: Bei einem Blasenkollaps entsteht ein hoher Druck, der zur Bildung einer Ultraschallwelle führt. Die Ultraschallwelle breitet sich als Stoßwelle aus und kann beim Auftreffen auf Schmutz kleine Schmutzpartikeln „herausschlagen“ (42).

Scherströmungen: Durch die schnelle Bewegung der Blasenwand entwickelt sich eine starke Strömung um die Blase herum. Die erzeugten Scherströmungen können unter die Verschmutzung eindringen und sie ablösen (42).

Jets: Der dritte Mechanismus verursacht den meisten Kavitationsschaden und beruht auf der Wirkung von sogenannten Jets. Befindet sich die Blase zu nahe an der zu reinigenden Oberfläche, kann sie nicht mehr radialsymmetrisch oszillieren. Die Jets, die dabei entstehen, können hohe Flussgeschwindigkeiten erreichen und starke, erodierende Defekte an der Oberfläche hervorrufen (42).

Die Reinigungswirkung ist von der Frequenz des Ultraschalls abhängig. Je höher die Frequenz ist, desto kleiner sind die beteiligten Blasen und desto feiner ist die Reinigungswirkung. Da die Blasen bei der Ultraschallreinigung generell ein kleines Volumen haben, eignet sie sich gut für Objekte mit komplexen Oberflächenstrukturen und Hohlräumen (42).

1.3.1.3. Anwendung von Ultraschall zur Reinigung von Alignern

Aufgrund seiner guten Reinigungswirkung wird Ultraschall in der Medizin häufig zur Reinigung von Instrumenten eingesetzt. Er kann aber auch von Patienten und Patientinnen zu Hause in Form von kleinen Ultraschallbädern zur Reinigung von Zahnersatz und herausnehmbaren kieferorthopädischen Geräten verwendet werden. Solche Ultraschallbäder haben in der Regel eine Frequenz von etwa 40 kHz.

Bereits 1989 bestätigte Diedrich in seiner Studie (46), dass ein Ultraschallbad in Kombination mit Desinfektionsmitteln eine Dekontamination plaqueakkumulierender Nischen kieferorthopädischer Platten bewirkt. Moshiri et al. (21) empfehlen, die Aligner mehrmals pro Woche in ein Ultraschallbad zu geben, um Bereiche, die mit der Zahnbürste nicht erreicht werden können, wie z. B. Höckerspitzen, effektiv reinigen zu können.

Lombardo et al. untersuchten in ihrer in-vivo-Studie die Wirksamkeit verschiedener Methoden zur Reinigung von Alignern mit Ultraschall- und Schallbädern, Wasser und unterschiedlichen Detergentien (26). Die Reinigung der Aligner in einem 0,3%igen kationischen Detergens unter Verwendung eines Ultraschallbades hat

sich als die wirksamste Methode erwiesen und zeigte eine bessere Effizienz als die Verwendung eines Ultraschallbades nur mit Wasser (26). Auch in der Studie von Shpack et al. wurde die maximale Reduzierung der Biofilmbilagerung auf den Alignern durch die Verwendung eines Vibrationsbades mit Reinigungslösung erreicht (33). Deshalb wird diese Methode als tägliches Reinigungsprotokoll für Aligner empfohlen, insbesondere für Patienten/-innen mit schneller Plaquebildung (33), weil bei diesen auch eine stärkere Verschmutzung des Aligners zu erwarten ist.

Die Studie von Bernard et al. belegte außerdem die Effektivität von Schallbädern bei der Entfernung von Pigmentierungen auf Alignern, die durch färbende Getränke verursacht wurden (38).

Allerdings kann die Oberfläche von Alignern durch die Ultraschallschwingungen beschädigt werden. In der Studie von Lombardo et al. wurden Anzeichen von Wasseraufnahme und Ultraschallkavitation auf der Oberfläche von Polyurethan-Alignern nach der Ultraschallreinigung nachgewiesen. Die Ergebnisse zeigten, dass die durch die Schallwellen erzeugten mechanischen Turbulenzen und die ständige Bildung und das Zerplatzen von Kavitationsblasen genügend Energie freisetzen, um nicht nur die Zellwände der Bakterien, sondern auch die Oberfläche des thermoplastischen Polyurethans zu schädigen (26). Die Unregelmäßigkeiten der Oberfläche erhöhen die potenzielle Anhaftung von Bakterien. Auch die Wasseraufnahme kann sich negativ auf die Eigenschaften der Aligner auswirken, da sie zu einer Expansion des Materials und zu einer Verringerung des Elastizitätsmoduls führt (5, 27). Somit können die Passung der Aligner und in Folge dessen die Übertragung der kieferorthopädischen Kräfte auf die Zahnreihe beeinflusst werden (5, 27).

1.3.1.4. Chemische Reinigung

Verschiedene chemische Reinigungsmittel wie Peroxide, Hypochloride, Enzyme und Säuren können zur Reinigung herausnehmbarer kieferorthopädischer Geräte verwendet werden. Sie sind auch als kommerzielle Reinigungsprodukte auf dem Markt erhältlich. Letztere gibt es in Form von Pulvern und Tabletten, die in Wasser aufgelöst werden müssen, oder bereits als fertige Lösung angeboten werden. Die Tabletten haben einen zusätzlichen positiven Effekt: nämlich die Freisetzung von Gas, wenn sie in Wasser aufgelöst werden (47).

Alkalisches Peroxid ist ein handelsübliches Desinfektionsmittel. Seine mechanische Reinigungswirkung erfolgt durch Sauerstoffabgabe. Es hat eine gute mikrobielle Wirkung und verursacht weniger physikalische Schäden als Natriumhypochlorit (24). Allerdings ist ein längerer Zeitraum erforderlich, um damit eine gründliche Reinigung von Plaque und Zahnstein zu erreichen. Zu diesem Zweck sollten die Geräte mehrere Stunden lang in die Lösung eingelegt werden (47).

In der Studie von Wible (37) zeigten die Essix-Proben nach der Reinigung mit 3%igem Wasserstoffperoxid eine Zunahme der Steifigkeit. Dies kann auf die oxidierende Wirkung des Wasserstoffperoxids auf den Kunststoff zurückzuführen sein (37).

Alkalische Hypochlorite haben eine bakterizide und fungizide Wirkung und können Verfärbungen effizient beseitigen (47).

Zitronensäure kann die Kalziumbrücken im Biofilm aufbrechen und ist somit in der Lage, die Biofilmmatrix zu zerstören (48). In der Studie von Faot et al. (48) wurde bestätigt, dass Zitronensäurereiniger die Lebensfähigkeit von *C. albicans* auf Prothesen verringern können, aber die Wiederbesiedlung des Biofilms innerhalb von 48 Stunden nicht verhindern (48).

Weißer Essig kann aufgrund seiner antimikrobiellen und zahnsteinhemmenden Eigenschaften auch zur Reinigung von kieferorthopädischen Apparaturen verwendet werden (24). In der Studie von Akgün et al. (24) wurde auf thermoplastischen Retainern sowohl nach der Reinigung mit Zahnbürste und Reinigungstabs (auf Peroxid-Basis), als auch nach der Reinigung mit Zahnbürste und Essig eine nahezu gleich niedrige Bakterienanzahl festgestellt.

Chlorhexidin gilt als der Goldstandard unter den Mitteln gegen Zahnbelag und Zahnfleischentzündung (27). Es ist auch bekannt, dass durch längeres Verbleiben von CHX an der Zahnoberfläche, seine Wirkung länger anhält (27). Auf der Oberfläche von Aligner-Materialien, die zuvor in Chlorhexedin getaucht worden waren, wurde jedoch keine Bakterienhemmung gefunden (33). Eine Studie von Chang et al. (34) bestätigte eine höhere Wirksamkeit von CHX bei der Beseitigung von Plaque auf Retainern - selbst bei niedrigen Konzentrationen. Aufgrund des färbenden Effekts von Chlorhexidin wird seine tägliche Anwendung jedoch nicht empfohlen, sondern nur als Ergänzung, wenn das Risiko einer Infektion durch intraorale opportunistische Mikroorganismen besteht (34).

1.3.1.5. Reinigung mit der Zahnbürste

Die Reinigung herausnehmbarer kieferorthopädischer Geräte mit einer Zahnbürste ist derzeit aus Kosten- und Verfügbarkeitsgründen die bevorzugte Methode (25). Üblich ist die zusätzliche Verwendung von Zahnpaste (47). Moshiri et al. (21) empfehlen bei jedem Zähneputzen die Reinigung der Aligner mit einer Zahnbürste und Paste durchzuführen. Um eine abrasive Wirkung zu minimieren, sollte Zahnpaste mit einem hohen RDA-Wert (Relative Dentin Abrasion) vermieden werden (47).

In der Studie von Dyer et al. verursachten harte Zahnbürsten weniger Abrieb an der Oberfläche von Polymethylmethacrylat als weiche Zahnbürsten (49). Diese widersprüchlichen Daten lassen sich dadurch erklären, dass weiche Zahnbürsten aufgrund der höheren Dichte und des geringeren Durchmessers der Borsten die Zahnpasta besser festhalten können (49). Außerdem bietet die stärkere Biegung der Borsten einer weichen Zahnbürste eine größere Kontaktfläche mit dem zu reinigenden Objekt (49). Die Reinigung mit einer Zahnbürste und Wasser verursachte keinen signifikanten Abrieb auf der Acryloberfläche, was die entscheidende abrasive Wirkung der Zahnpasta bestätigte (49).

In ihrer Studie berichteten Wible et al. (37) hingegen von einer erhöhten Steifigkeit und sichtbaren Kratzer auf der Oberfläche von thermoplastischen Retainern nach 6 Monaten Reinigung mit einer Zahnbürste und Wasser.

Die Proben aus thermoplastischem Duran®-Material zeigten nach dem Putzen mittels einer Zahnbürste die höchste Rauheitszunahme im Vergleich zu anderen Materialien, die in der Studie von Porojan et al. untersucht wurden (18).

Die Reinigung mit einer Zahnbürste führt zu geringeren Keimzahlen auf thermoplastischen Retainern als das Abspülen mit Wasser, reicht aber nicht aus, um eine gute Gerätehygiene zu gewährleisten (24). Aus diesem Grund empfehlen einige Autoren die Verwendung eines chemischen Mittels zusätzlich zur mechanischen Reinigung mit der Zahnbürste (24, 27, 32, 34).

Allerdings wurden die besten Ergebnisse in Bezug auf die Bakterienkonzentration bei der Verwendung von Ultraschall und chemischen Reinigungsmitteln erzielt (27).

1.4. **3D-gedruckter Kunststoff** von Univ.-Prof. DI Dr. Grießer

Der Kunststoff von Univ.-Prof. DI Dr. Grießer gehört zu den Harzen, die aus multifunktionellen Thiol- und En-Monomeren hergestellt werden.

Es handelt sich um eine Reaktion zwischen Thiolen und reaktiven Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen („En-Verbindungen“ oder Ene) (50). Thiole sind organische Moleküle. Sie tragen eine Thiolgruppe, die sich aus Wasserstoff und Schwefel zusammensetzt. Wenn der Fotoinitiator mit der Thiolgruppe agiert, kommt es zur Abstraktion des S-H Wasserstoffatoms und Bildung eines Thiylradikals. Dieses Radikal kann dann durch eine *Additionsreaktion* an die Doppelbindung der En-Monomere koppeln. Die Radikalspezies, die dabei entstehen, können ein Wasserstoffatom einer anderen Thiolgruppe abspalten, was wieder zur Bildung des Thiylradikals führt -> *Kettentransferreaktion*.

Die Abwechslung der Additions- und Kettentransferreaktion führt zur langsamen homogenen Bildung eines 3D-Polymernetzwerkes (50). Diese Art der Polymerisation gehört zu den *Stufenwachstumsreaktionen*.

Im Gegensatz zur Kettenwachstumsreaktion von Methacrylat- und Acrylatmonomeren (50), aus denen die meisten kommerziellen lichthärtenden Kunststoffe hergestellt sind, kann man mit Stufenwachstumspolymerisationen einen höheren Gesamtmonomerumsatz erreichen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der Stufenwachstumspolymerisation die Monomere langsamer gebunden werden und länger frei beweglich sind. Daher findet mehr Polymerisation statt, wenn der Kunststoff noch flüssig ist, was die Polymerisation in der Gelphase minimiert. In diesem Fall wird eine geringere Schrumpfungsspannung und dadurch eine geringere Sprödigkeit des Materials erreicht.

Die freien Monomere sind toxisch und können allergische Reaktionen hervorrufen. Unter diesem Gesichtspunkt ist der Monomerumsatz für die Biokompatibilität von Kunststoffen sehr wichtig. Je höher er ist, desto biokompatibler ist das Material.

Aufgrund der geringen Konzentration an freien Monomeren nach der Polymerisation, weist der neu entwickelte Kunststoff eine hohe Biokompatibilität auf, weshalb er auch für die Herstellung von zahnmedizinischen Schienen verwendet werden kann. Außerdem ist er auch für 3D-Druckverfahren geeignet.

2. Material und Methode

2.1. Ausgangsmaterial

Im Rahmen dieser Studie wurden 3 verschiedene Materialien verglichen:

- **Duran®**-Folien der Firma Scheu Dental GmbH
- **Clear-Aligner®**-Pro-Folien der Firma Scheu Dental GmbH
- **3D-gedruckter Kunststoff** von Univ.-Prof. DI Dr. Grießer

Die ersten beiden liegen in Form von planen Rohlingen vor, das heißt nicht in ihrer ursprünglichen Harznatur. Der 3D-gedruckte Kunststoff hingegen wurde als Harz in einem lichtdichten Behältnis geliefert.



Abbildung 4 Vergleichsmaterialien

2.1.1. Duran®-Folien der Firma Scheu Dental GmbH

Duran® ist eine transparente Folie, die für die Herstellung von dentalen Tiefziehschienen geeignet ist. Es handelt sich um Polyethylenterephthalat-Glycol Copolyester (PET-G) (siehe Kapitel 1.1.1.1.). In der Verpackung sind die Folien nicht einzeln verpackt, was die Oberfläche des Materials anfälliger für äußere Einflüsse macht. Duran®-Folien sind in unterschiedlichen Dicken erhältlich. Im Rahmen dieser Studie wurde eine Folienstärke von 0,75 mm genommen.

2.1.2. **Clear-Aligner®**-Pro-Folien der Firma Scheu Dental GmbH

CA®-Pro ist eine dreischichtige Alignerfolie. Die innere Schicht besteht aus einem thermoplastischen Elastomer (*siehe Kapitel 1.1*) und ist weich und flexibel, was für hohe Elastizität, besseren Tragekomfort und Bruchfestigkeit sorgt. Die beiden äußeren Schichten sind härter und bestehen aus Copolyester. Im Gegensatz zu den Duran®-Folien sind CA®-Pro-Folien einzeln in einem Barrierebeutel verpackt. Nach dem Öffnen des Beutels müssen die Folien binnen 15 Minuten tiefgezogen und weiterverarbeitet werden, um eine Blasenbildung während der Verarbeitung zu verhindern. Für den Versuch wurde eine Folienstärke von 0,75 mm ausgewählt. Jede der 3 Schichten, aus denen der Folie besteht, ist gleich 0,25 mm dick (*Abbildung 5*).

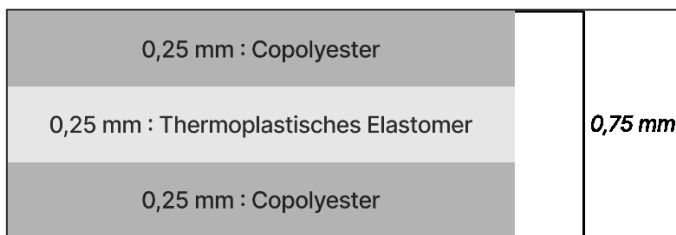


Abbildung 5 Clear Aligner Folien: Schichtstärken

2.1.3. **3D-gedruckter Kunststoff** von Univ.-Prof. DI Dr. Grießer

Der 3D druckbare Kunststoff wurde deshalb als Harz verschickt, weil dieses mittels eines 3D-Druckers weiterverarbeitet werden sollte. Eine Lagerung bei Zimmertemperatur war möglich.

2.2. Probenumfang

Da für die Untersuchung eine Goldbeschichtung der Plättchen notwendig und eine Wiederverwendung dieser Proben nach der Testung unmöglich war, wurde beschlossen, von jedem Material *20 Proben* als Kontrollgruppe für die Ausgangsmessungen zu nehmen.

Weiters wurden von jedem untersuchten Material *40 neue Proben* hergestellt. Über die Dauer von 14 Tagen wurden sie, unter standardisierten Bedingungen, je einer von vier unterschiedlichen Reinigungstechniken, unterzogen. Sie wurden in der Zeit, in der sie nicht gereinigt wurden, in künstlichem Speichel bei Körpertemperatur gelagert.

Am Ende erfolgte die Abschlussmessung mit der gleichen Methode, mit der auch die Ausgangsmessung durchgeführt wurde.

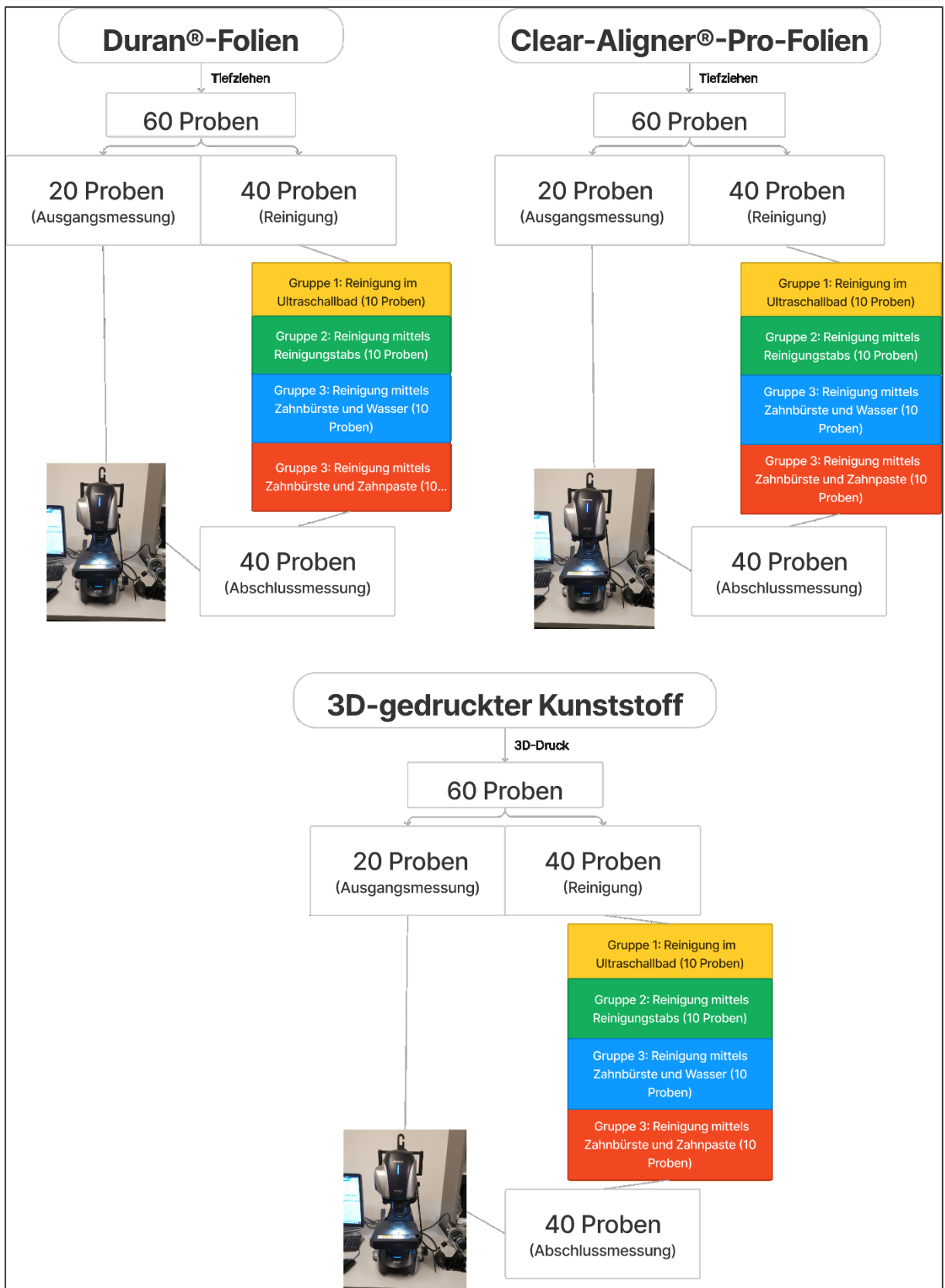


Abbildung 6 Probenumfang

2.3. Herstellung der Proben

Alle Proben wurden in Form planer Plättchen (*Abbildung 7*) hergestellt und hatten die gleiche Größe.



Abbildung 7 Probenform

Die trapezförmige Form bot eine reproduzierbare Positionierung der Proben in der Apparatur, die für die Reinigung der Plättchen mittels einer Zahnbürste verwendet wurde. Außerdem sorgte der spitze Rand für eine leichtere Platzierung der Proben in der Halterung, in der die Proben zwischen den Messungen gelagert wurde (Schaumstoffplatte) (*siehe Kapitel 3.4.*).

Der Herstellungsprozess unterschied sich in Abhängigkeit von der Methode, die für die Verarbeitung des untersuchten Materials geeignet war und letztendlich auch verwendet wurde → dementsprechend wurden die Duran®- und Clear-Aligner®-Pro-Folien mittels eines Druckformgerätes tiefgezogen. Die Plättchen der dritten Gruppe wurden im 3D-Druckverfahren gedruckt.

2.3.1. Herstellung der tiefgezogenen Duran®- und Clear-Aligner®-Proben der Firma Scheu Dental GmbH

In der Studie von Ryu et al (51) wurden die physikalischen und mechanischen Eigenschaften von thermoplastischen Materialien analysiert. Die Ergebnisse dieser Studie zeigten, dass sich thermoplastische Materialien im Laufe des Tiefziehprozesses verändern. Daher erschien es notwendig, die thermoplastischen Folien nicht in Originalform aus der Packung zu verwenden, sondern diese ebenfalls tiefzuziehen, und zwar *plan*.

Da man für den Tiefziehprozess eine Form benötigt, auf die die thermoplastischen Folien gezogen werden können, wurde eine *flache* Glasplatte als Basis gewählt. Diese führt beim Tiefziehen zu einer möglichst gleichmäßigen Dickenreduktion der Folien und bietet außerdem eine große Fläche für die Probenentnahme.

Der Tiefziehprozess wurde in dieser Studie mit dem Druckformgerät BIOSTAR® der Firma Scheu Dental GbmH durchgeführt.

Zunächst wurde eine Isofolan®-Folie (ebenfalls Scheu Dental) über die Glasplatte tiefgezogen. Diese Isolierfolie wurde mit einer Schere entlang der Unterkante der Glasplatte geschnitten, ohne sie von der Platte zu entfernen.

Jede Duran®- und Clear-Aligner®-Pro-Folie wurde dann unter einem Überdruck von etwa 5 bar über eine Glasplatte tiefgezogen, auf die eine Isofolan®-Folie aufgebracht worden war.

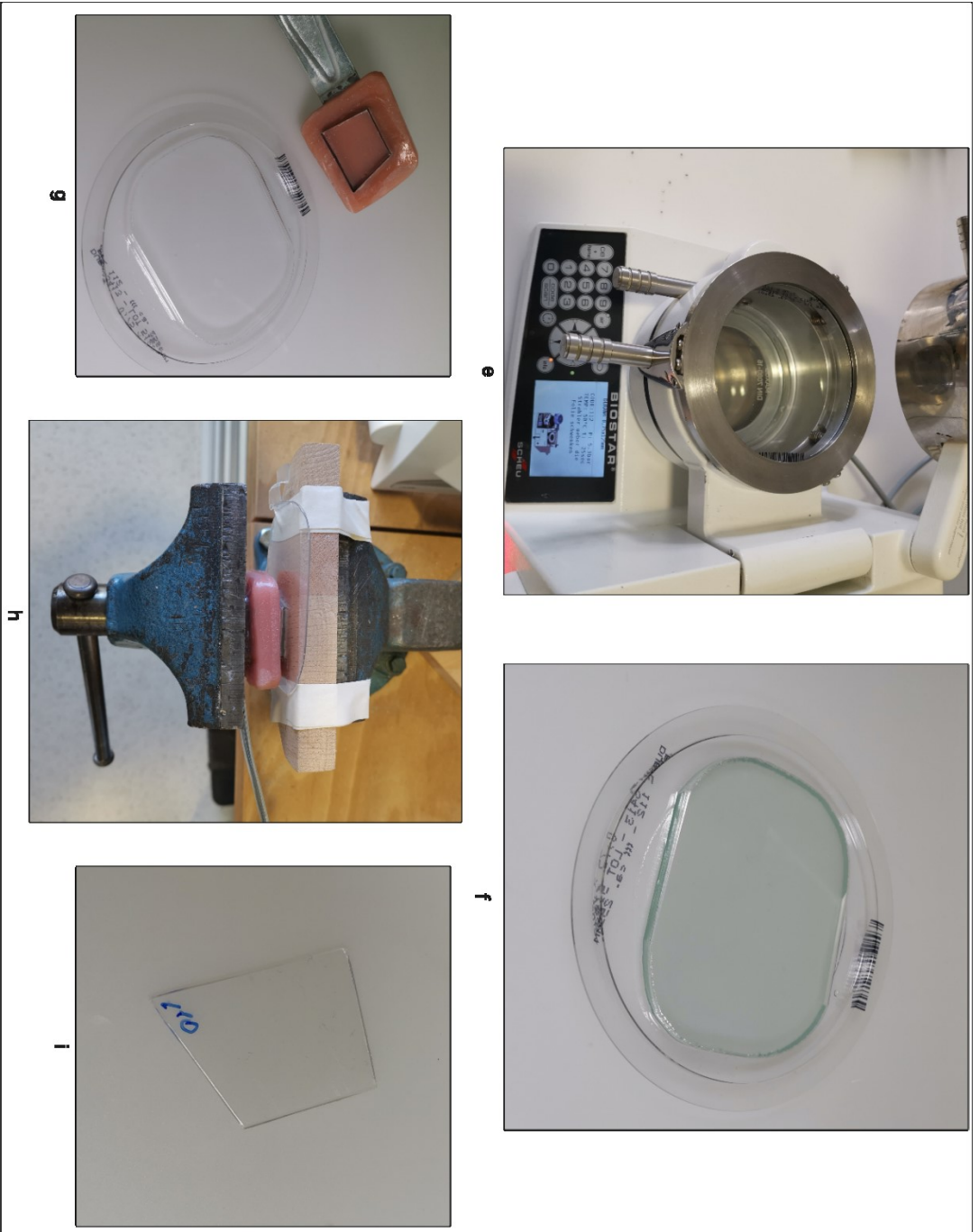
Danach wurde sie vom Boden der Platte abgehoben und mit einer Schere entlang der Kante geschnitten, die der Oberkante der Glasplatte entsprach. Die so entstandene flache Folie wurde dann gestanzt, um 4 trapezförmige Plättchen von jeder Folie mit den Abmessungen 25 mm × 27 mm × 34 mm × 25,5 mm zu erhalten. Die Stanze selbst wurde aus Edelstahlklingen in der Technik laser-geschweißt und in einen Kunststoffsockel eingebettet. Der Stanzvorgang wurde mit einem Schraubstock durchgeführt, um einen größeren Anpressdruck der Stanze zu erreichen. Im Durchschnitt hatten alle ausgestanzten Proben eine Stärke von 0,7 mm.

Insgesamt wurden nach dieser Methode 60 Duran®-Proben und 60 Clear-Aligner®-Pro-Proben hergestellt. Von jedem Material wurden 20 Plättchen als Kontrollgruppe der Anfangsmessung unterzogen und die restlichen 40 wurden für die Reinigung bzw. Abschlussmessung ausgewählt.



a) Druckformgerät BIOSTAR® der Firma Scheu Dental GmbH; b) Glasplatte auf der Modellstützplatte; c) Beheizen der Folie; d) über die Glasplatte tiefgezogene Isofolan®-Folie.

Abbildung 8 Herstellung der tiefgezogenen Proben (1)



e) eingespannte Duran®-Folie; f) tiefgezogene Duran®-Folie mit Glasplatte g) Stanze und tiefgezogene Duran®-Folie; h) Stanzen einer Probe; i) ausgestanzte Probe.

2.3.2. Herstellung der Proben des Kunststoffes von Univ.-Prof. DI Dr. Grießer.

Es wurden insgesamt 60 Proben aus Thiol-En-Photopolymer hergestellt. 20 davon (randomisiert ausgewählt) wurden für die *Anfangsmessung* herangezogen. Die verbliebenen 40 wurden - nach der Reinigung - der *Abschlussmessung* unterzogen.

Die Proben wurden von einem Technikermeister hausintern mit einem 3D-Zeichenprogramm virtuell konstruiert und als STL-Datensatz (Standard Tessellation Language) abgespeichert. Als finales Produkt wurde ein trapezförmiges Plättchen mit den Abmessungen von 25mm × 27mm x 34mm x 25,5mm und einer Stärke von 0,7mm entworfen. Die Dicke von 0,7 mm wurde deshalb gewählt, weil sie der durchschnittlichen Stärke der Folien aus den anderen beiden Vergleichsgruppen nach dem Tiefziehen entspricht.

Die STL-Datei wurde in die Asiga Composer Software importiert und die Plättchen wurden horizontal in einer Menge von 8 Stück auf der Bauplattform virtuell positioniert.

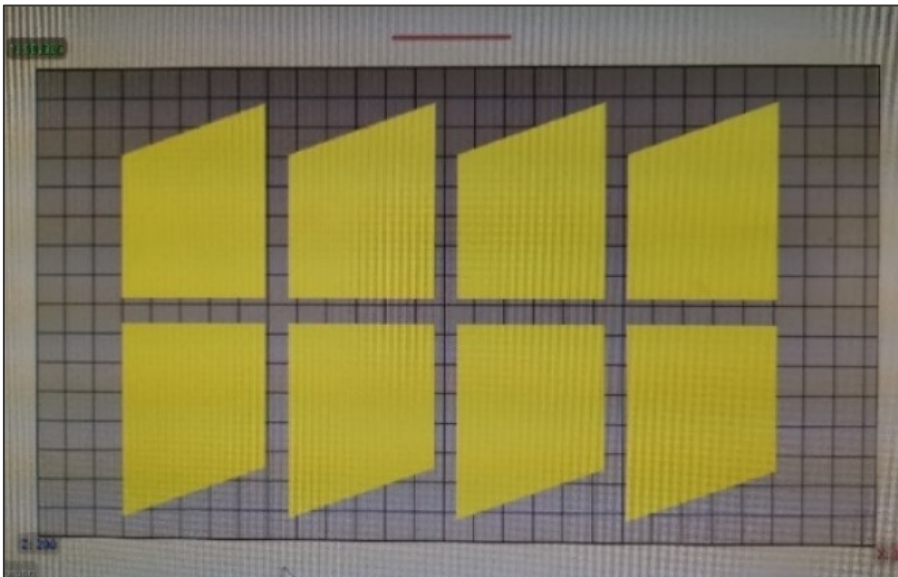


Abbildung 10 Positionierung der Plättchen auf der Bauplattform in der "Asiga Composer" Software

Der STL-Datensatz wurde an den hauseigenen 3D-Drucker Asiga Freeform PRO2 übermittelt und von diesem ausgedruckt.



Abbildung 11 3-D Drucker Asiga Freeform

Dabei wurde der Harztank mit dem Kunststoff der Montanuniversität Leoben gefüllt (Abbildung 12), die Bauplattform angebracht und dann der Druckvorgang gestartet.

Der Druck der Proben erfolgte nach der DLP-Technologie (Digital Light Processing). Dabei sinkt zuerst die Bauplattform so weit nach unten, dass der Abstand zwischen der Bauplattform und dem transparenten Boden des Tankes einer Schichtstärke entspricht, die in dieser Studie auf 0,075 festgelegt wurde. Dann erfolgt die Belichtung des Harzes, bei der das Bild einer Schicht auf die Bauplattform projiziert und gleichzeitig die gesamte Schicht ausgehärtet wird. Anschließend fährt die Bauplattform mit dem ausgehärteten Kunststoff nach oben. Dieser lässt sich leicht aus der nicht-haftenden Oberfläche des Tankbodens ablösen. Die Bildung der nachfolgenden Schichten erfolgt nach dem gleichen Prinzip.

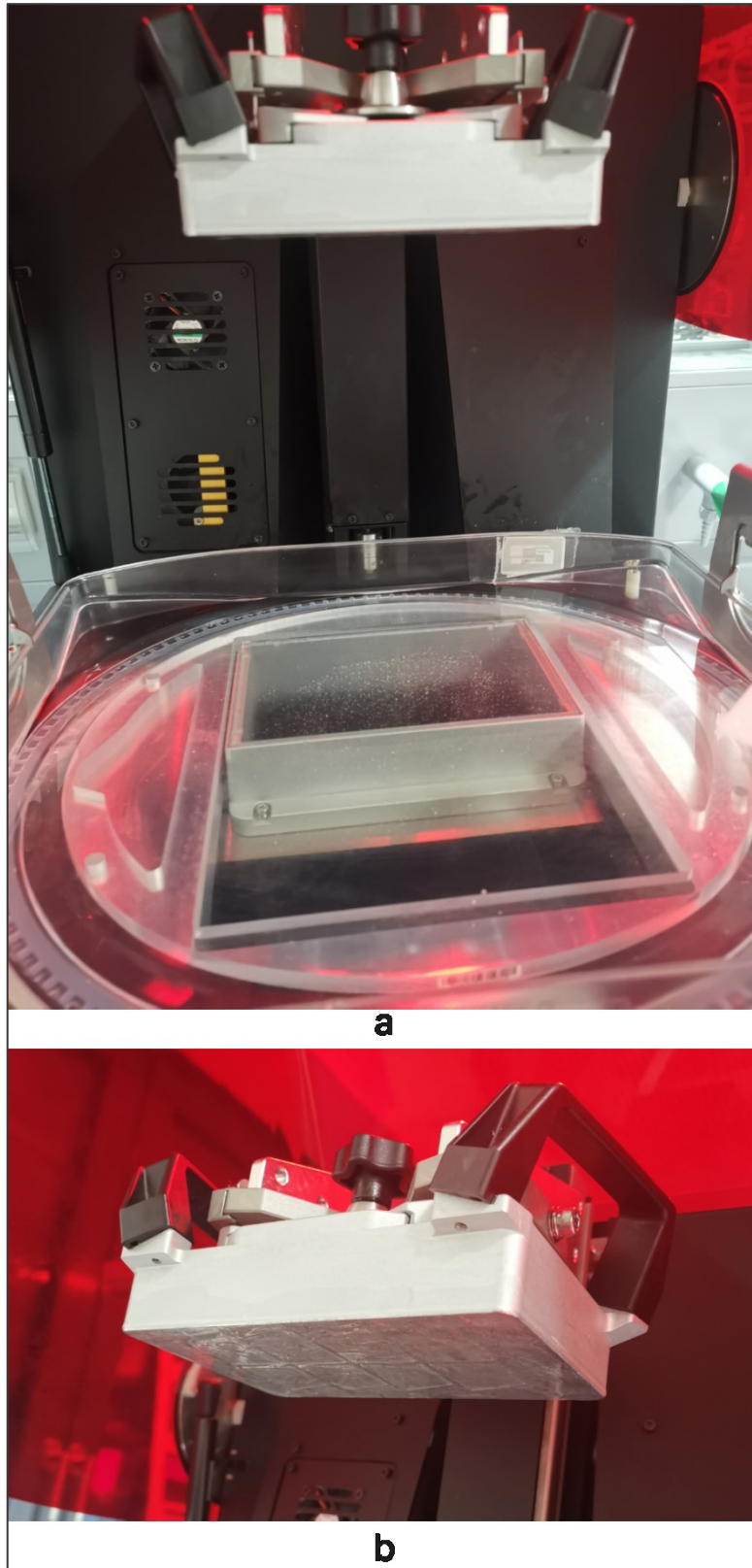


Abbildung 12 Drucken der Proben: a) Auffüllen des Harztanks mit dem Kunststoff; b) Fertig gedruckte Proben auf der Bauplattformunterseite.

Nach Abschluss des Druckvorganges wurden die Plättchen von der Basisplatte unter Verwendung eines Spatels abgehoben (*Abbildung 13*). Da sich unmittelbar

nach dem Druck klebrige Harzreste auf der Oberfläche befanden, wurden die Proben gründlich mit Isopropanol gereinigt, um diese Reste zu entfernen.

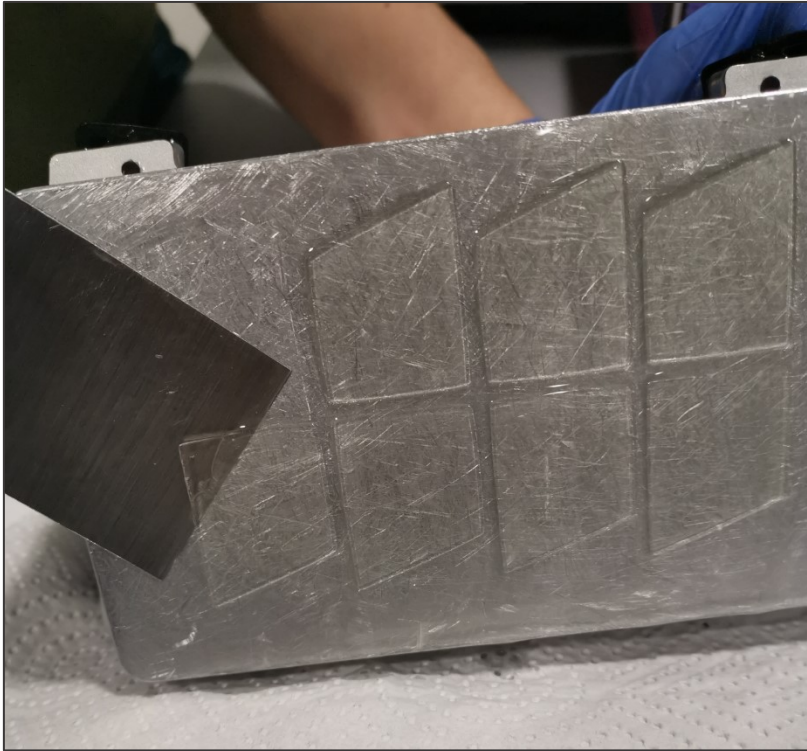


Abbildung 13 Entfernung der Proben aus der Bauplattform

Da die Proben mit einem Spatel von der Bauplattform entfernt werden mussten, sind Kratzer auf ihrer Unterseite zu sehen, die vermutlich entweder vom Spatel oder von den Kratzen in der Plattform stammen. Die Oberfläche dieser Unterseite wurde jedoch im Rahmen der Studie nicht untersucht, weshalb die Kratzer keine Relevanz haben. Die Plättchen wurden Schicht für Schicht gedruckt, wodurch eine Mikrostruktur entstand, an der das Licht gebrochen wird. Aus diesem Grund sind die 3D-gedruckten Plättchen, nach dem Entfernen der Harzreste, milchig-trüb und weniger transparent als die tiefgezogenen Proben.

Die gedruckten Proben wurden direkt nach der Reinigung in einen dunklen Kasten gelegt, um das Material vor Licht zu schützen. Im Anschluss daran wurden diese an die Montanuniversität geschickt.

Da die Polymerisation des Kunststoffes nach dem Druck noch nicht abgeschlossen ist, ist nach der Reinigung eine Nachhärtung erforderlich. An der Montanuniversität

Leoben wurden die Plättchen 15 Minuten lang bei 60°C in dem Nachbearbeitungsgerät „Form Cure L“ der Firma Formlabs® ausgehärtet.

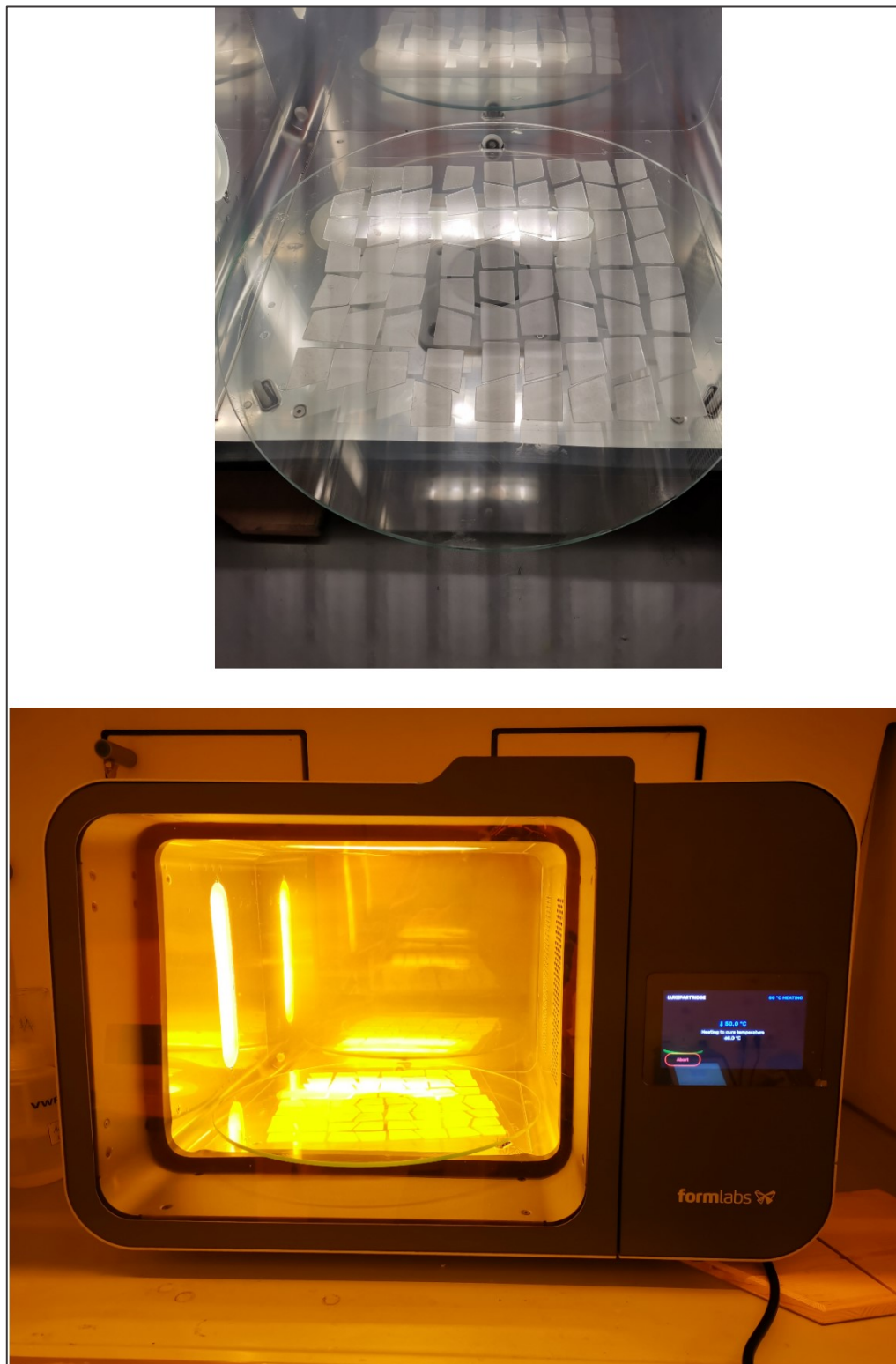


Abbildung 14 Nachhärten der Proben in „Form Cure L“ der Firma Formlabs®

2.4. Lagerung

Während der Studie wurden jeweils 40 Plättchen in einem von 3 Glasbehältern (je nach Material) mit künstlichem Speichel Sialin-Sigma® der Firma SIGMAPHARM Arzneimittel GmbH gelagert. Um zu verhindern, dass die Proben miteinander in Berührung kommen, wurden sie mit dem Teil, der einen scharfen Winkel aufwies, in eine Schaumstoffplatte eingesetzt. Diese war so weich, dass die Proben durch Einsinken ohne weitere Berührung der Untersuchungsfläche positionsstabil geblieben sind. Zu diesem Zweck waren 40 Vertiefungen für die Proben zuvor mit einem Skalpell in jede Platte geschnitten worden.

Nachdem alle Proben in der Schaumstoffplatte platziert waren, wurde die Platte umgedreht und in einen Glasbehälter mit künstlichem Speichel eingebracht. Es wurde so viel künstlicher Speichel verwendet, dass die Plättchen vollständig eingetaucht waren.

Dann wurde jeder Glasbehälter mit einer Plexiglasplatte abgedeckt und in den 37°C warmen Inkubator WIG von der Firma witeg Labortechnik GmbH gestellt.

Die Proben wurden nur für die mechanischen und chemischen Reinigungsprozesse aus dem Speichel entnommen.

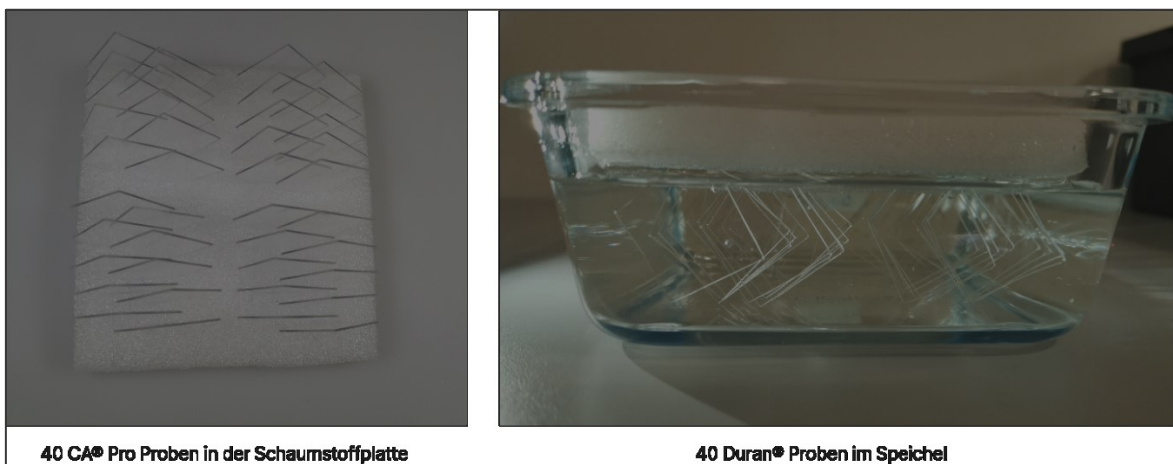
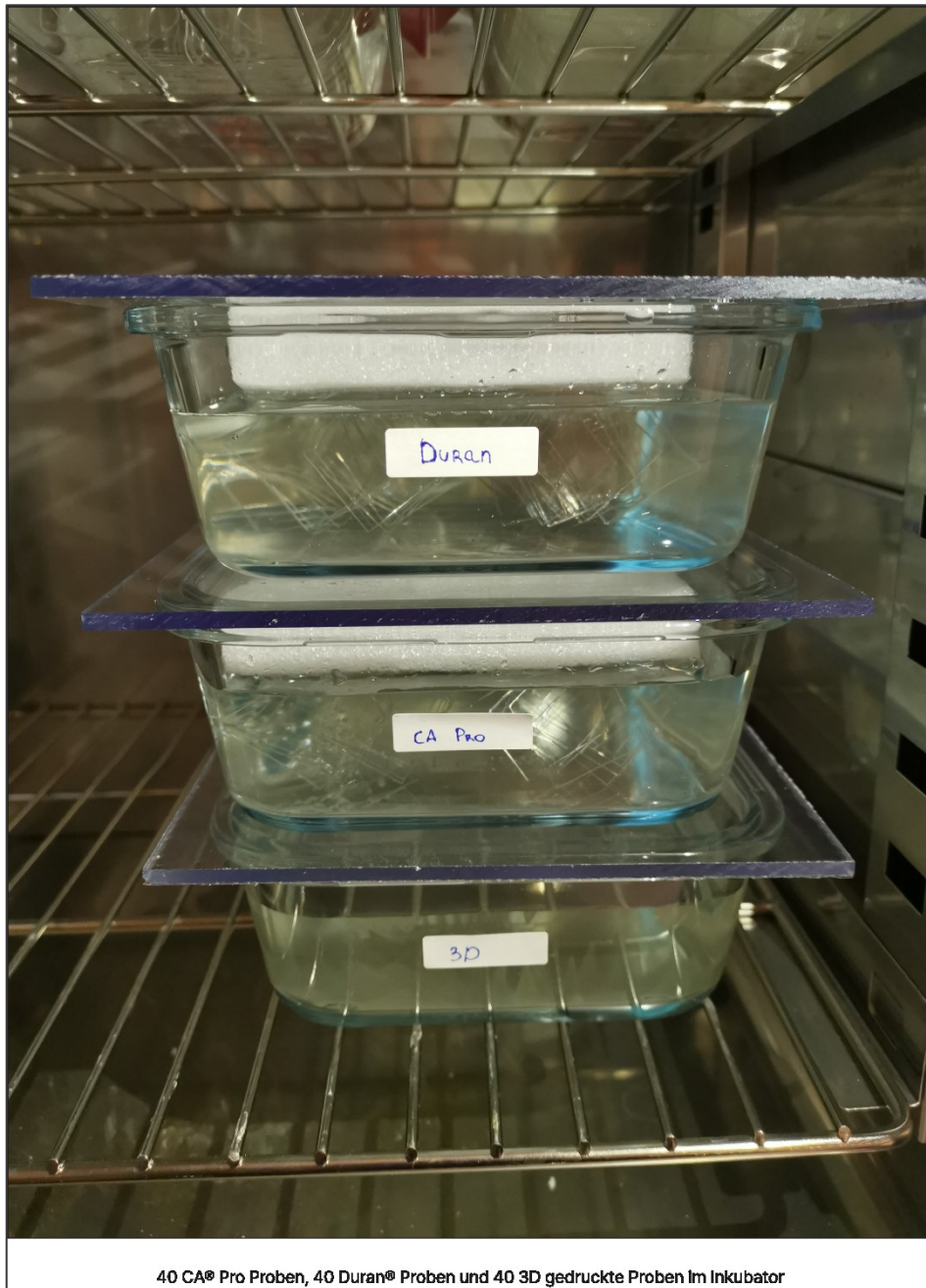


Abbildung 15 Lagerung der Proben (1)



40 CA® Pro Proben, 40 Duran® Proben und 40 3D gedruckte Proben Im Inkubator

Abbildung 16 Lagerung der Proben (2)

2.5. Reinigungsmethoden

Es gab 40 Proben von jedem untersuchten Material. Für jedes Material wurden 4 Gruppen zu jeweils 10 Proben gebildet, die 4 Reinigungsmethoden repräsentieren sollten. Somit gab es für jede Reinigungsmethode 30 Proben. Diese wurden randomisiert verteilt und die Reinigung an sich unter standardisierten Bedingungen durchgeführt.

Auf jeder Probe wurde mit einem wasserfesten Stift eine Nummer geschrieben, die der Nummer der Reinigungsgruppe entsprach. Es wurde der Teil der Probe beschriftet, mit dem diese in die Schaumstoffplatte eingesetzt war.

2.5.1. Gruppe 1: Reinigung im Ultraschallbad

Bei der ersten Untersuchungsgruppe wurden die Plättchen im Ultraschallbad ITronics mit einer Frequenz von etwa 42.000 Hz gereinigt. Die Flüssigkeit für das Ultraschallbad war kaltes Wasser ohne Zusatz von chemischen Desinfektionsmitteln.

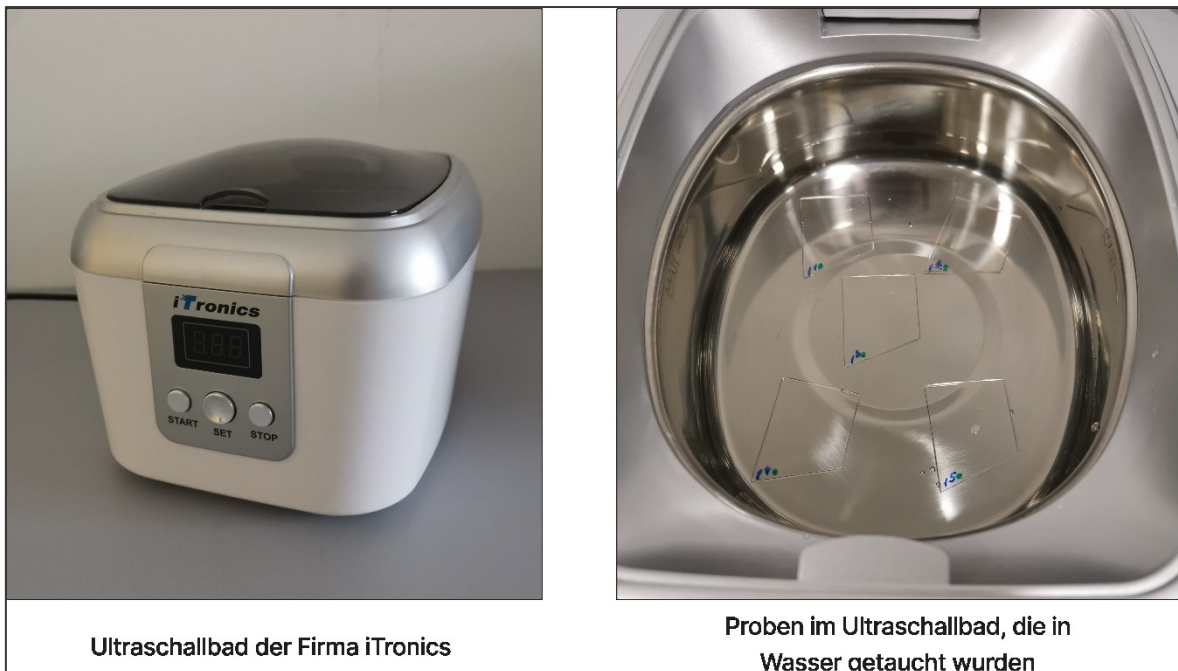


Abbildung 17 Proben im Ultraschallbad der Firma iTronics

Das Ultraschallbad wurde mit 300 ml Wasser (kalt) gefüllt. Dann wurden 5 Plättchen desselben Materials genommen, in das Wasser gelegt und der Deckel des Ultraschallbads geschlossen. Die jeweiligen Proben wurden 5 min lang gereinigt, danach gründlich unter fließendem Wasser abgespült und wieder im künstlichen Speichel (37°C) platziert.

2.5.2. Gruppe 2: Reinigung mittels Reinigungstabs

In der Gruppe 2 wurden die Proben mit den Reinigungstabs COREGA TABS Bioformel® des Herstellers GlaxoSmithKline Consumer Healthcare (Deutschland) gereinigt. Die Tabletten bestehen aus: Natrium Bicarbonate, Citric Acid, Potassium Carbonate (potassium monopersulfate), Sodium Carbonate, Sodium Carbonate Peroxide, TAED, Sodium Benzoate, PEG-180, Sodium Lauryl Sulfoacetate, PVP/VA Copolymer, Aroma, Subtilisin, CI 42090 und CI 73015.

Ein Glasbehälter wurde mit 500 ml Wasser (warm) gefüllt. 10 Plättchen eines der 3 untersuchten Materialien wurden in das Wasser getaucht und am Boden des Behälters aufgeteilt, sodass diese nicht miteinander in Berührung kamen. Dann wurden 2 COREGA Tabs in das Wasser gegeben. Gemäß der Gebrauchsanweisung von COREGA TABS Bioformel® wurden die Proben nach 15 Minuten aus der Lösung genommen.



Abbildung 18 Reinigung mittels Reinigungstabs

Anschließend wurden die Proben gründlich unter fließendem Wasser abgespült und bis zur nächsten Reinigung wieder in künstlichem Speichel (37°C) gelagert.

2.5.3. Gruppe 3: Reinigung mittels Zahnbürste und Wasser

Im Rahmen dieser Studie wurde die elektrische Zahnbürste „Oral-B Genius“ mit der Aufsteckbürste „Oral-B Soft Clean“ verwendet. Durch gleichzeitige oszillierende und pulsierende Bewegungen kann die Zahnbürste eine dreidimensionale Reinigung gewährleisten. Sie verfügt auch über 6 Putzmodi: Tägliche Reinigung, Professionelle Reinigung, Zahnfleischreinigung, Schonende Reinigung, Aufhellung und Zungenreinigung. Bei jedem oben genannten Putzmodus führt die Zahnbürste oszillierende und pulsierende Bewegungen mit unterschiedlicher Geschwindigkeit durch.

Bei dem Versuch wurde der Modus „Tägliche Reinigung“ ausgewählt, da er meistens bei allen oszillierenden Zahnbürsten Firma „Oral-B“ vorhanden ist. Außerdem ist bei diesem Modus die Geschwindigkeit der Putzbewegungen gleichmäßig und beträgt für Oszillationen 9900 Bewegungen/min und Pulsationen 45000 Bewegungen/min.

Die Zahnbürste verfügt auch über einen dreifachen Überlastungsschutz. Wenn der angewendete Druck auf die gereinigte Oberfläche ca. 3 N überschreitet, kommt es zu einer Geschwindigkeitsreduktion. Der Sensor gibt ein rotes Lichtsignal ab und die Pulsation hört auf.



Abbildung 19 Die elektrische Zahnbürste „Oral-B Genius“ mit der Aufsteckbürste „Oral-B Soft Clean“

Merkmale des Bürstenkopfes „Oral-B Soft Clean“:

Der runde Bürstenkopf kann um ca. 45° nach beiden Seiten rotieren und hat einen runden Durchmesser von ca. 12 mm. Er besteht aus 12 hellblauen Borstenbüschel, die sich auf der Innenreihe befinden, und 14 dunkelblauen Borstenbüschel auf der Außenreihe des Bürstenkopfes. Die Dicke und Länge der Borsten wurde mit einem an der Klinik vorhandenen Oberflächenmessgerät (Infinite Focus G5plus von Bruker Alicona GmbH) gemessen (Abbildung 20). Die Borsten haben eine Länge von etwa 8,2 mm und eine Dicke von ca. 0,16 mm, wobei die inneren, hellen Borsten eine gewellte Form haben, während die äußeren Borsten ziemlich gerade sind.

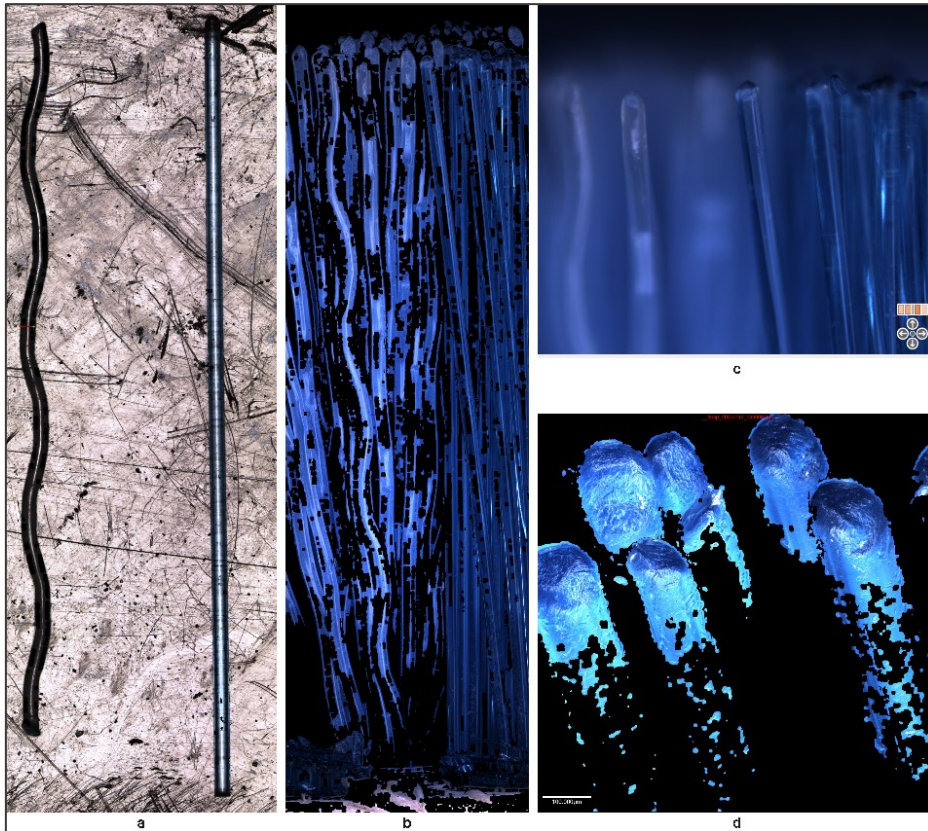


Abbildung 20 Borsten des Bürstenkopfes „Oral-B Soft Clean“: a) abgeschnittene Borsten (links: innere helle Borste; rechts: äußere dunklere Borste); b) Borsten am Bürstenkopf (links: innere helle Borste; rechts: äußere dunklere Borste); c, d) Borstenspitzen.

Um die Reinigung der Proben mit einem reproduzierbaren Anpressdruck und gleichmäßigen Putzbewegungen mit einer elektrischen Zahnbürste durchführen zu können, wurde im Rahmen dieser Diplomarbeit auch eine spezielle Apparatur von einem Ingenieur der Zahnklinik entwickelt.

Die Zahnbürste mit der Aufsteckbürste wurde durch die Apparatur mit einem Anpressdruck von ca. 2,7 N (+/- 0,5 N) eingestellt, wodurch sichergestellt war, dass das rote Lichtwarnsignal vermieden wurde. Die Zahnbürste mit den Halterungen war auf zwei Schienen montiert und wurde mit einem Servo um +/- 4 mm in Längsrichtung hin und her bewegt. Da der Bürstenkopf einen Durchmesser von 1,2 cm hat, ergab sich ein Reinigungsbereich von 2 cm (Abbildung 21). Gleichzeitig führte der Bürstenkopf, nach Aktivierung der elektrischen Zahnbürste, selbst oszillierende und pulsierende Bewegungen durch.

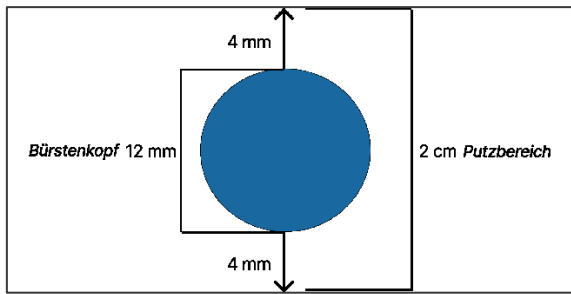


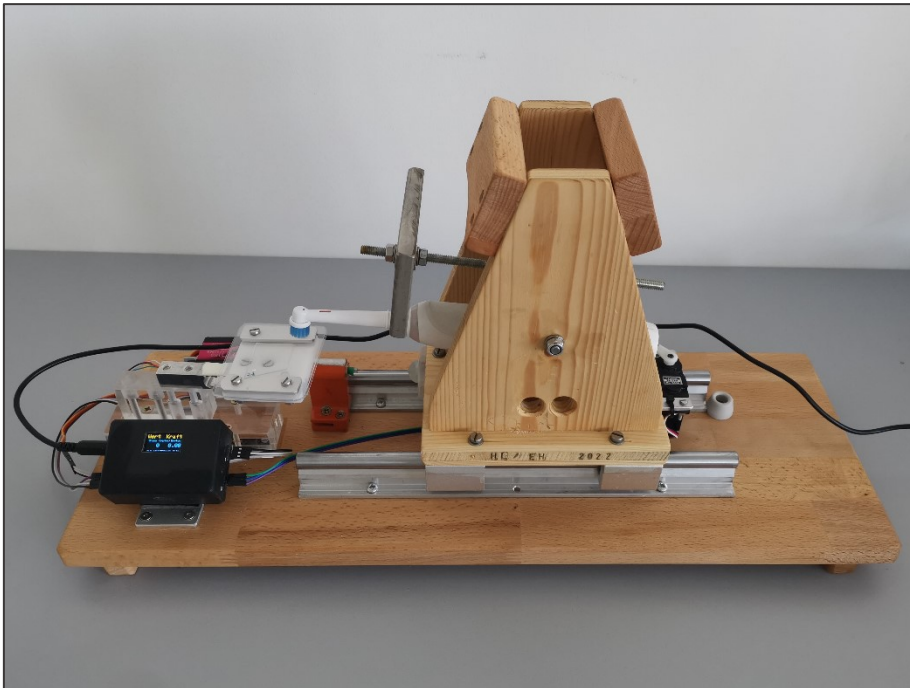
Abbildung 21 Reinigungsbereich mittels Zahnbürste

Es wird davon ausgegangen, dass die Aligneroberfläche der Zahnoberfläche (genauer gesagt der Oberfläche der Zahnreihe) entspricht. Aufgrund dessen wurde die Zeit, die die Patienten und Patientinnen normalerweise aufwenden, um ihre eigenen Zähne zu putzen, auf das Putzen der Aligner übertragen. Es ist empfohlen, die Zähne zweimal täglich 2 min lang zu putzen, wobei jede Zahnoberfläche in der Regel dabei für maximal 5 s geputzt werden kann (52).

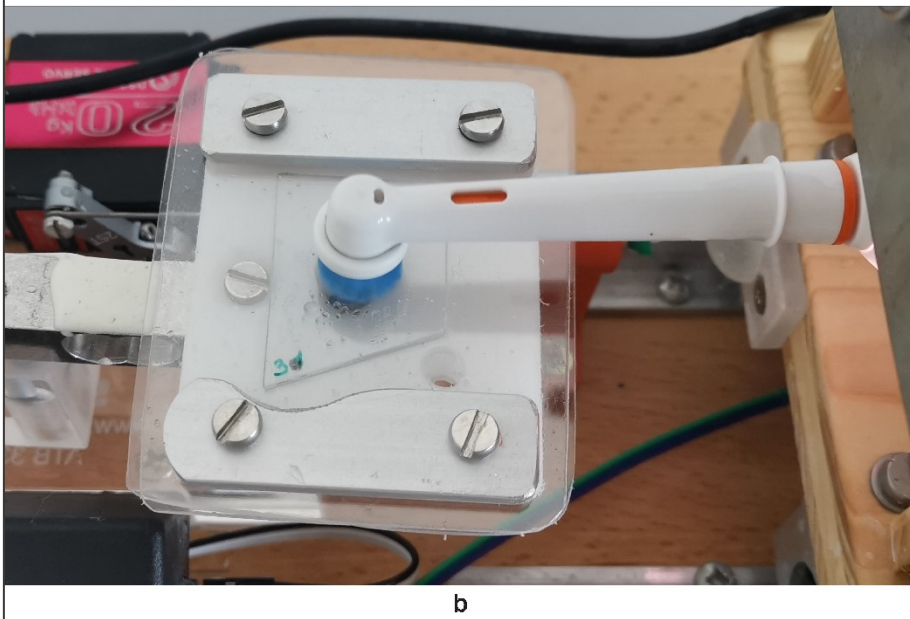
Die Proben wurden ausschließlich in der Mitte als Repräsentationsfläche für die gesamte Probe untersucht. Da die Bürste an dieser Stelle durchgehend Kontakt mit der Probe hatte, kann man diese ganze Probe als eine Zahnoberfläche ansehen. In der vorliegenden Studie sollten die Proben 14 Tage lang einem Reinigungsprozess unterzogen werden, was insgesamt für die angegebene Methode 5 s pro Tag und somit 70 s über 14 Tage beträgt.

Die tägliche Reinigung der Proben für jeweils 5 s hätte aufgrund der kurzen Reinigungszeiten zu einer Fehlerquelle führen können. Aus diesem Grund wurden die Proben zwei Mal gereinigt: am siebenten und vierzehnten Tag, nachdem sie das erste Mal im künstlichen Speichel gelagert wurden. Beim ersten und zweiten Mal wurden die Proben jeweils 35 s lang mit der elektrischen Zahnbürste geputzt, was einer Putzdauer von 5 s pro Tag entspricht.

Eine Aufsteckbürste wurde nur für die Reinigung eines der 3 getesteten Materialien verwendet. Nach 5 Reinigungsvorgängen wurde sie ausgetauscht.



a



b

Abbildung 22 die Reinigungsapparatur für die Zahnbürste: a) Ansicht von der Seite; b) Anfangsposition des Bürstenkopfs.

Reinigungsvorgang:

Am Anfang des Versuchs wurde eine Probe aus dem künstlichen Speichel entnommen, unter fließendem Wasser gespült und auf den angegebenen Platz der Apparatur gelegt. Die Aufsteckbürste wurde ebenso vor und nach jedem Putzvorgang mit fließendem Wasser abgespült.

Beim nächsten Schritt wurde die Zahnbürste manuell eingeschaltet und der Reinigungsvorgang wurde für 35 s aktiviert. Die Zahnbürste wurde zunächst nach vorne bewegt und dann abgesenkt, bis der Bürstenkopf eine Anfangsposition in der Mitte der Probe erreichte und der Anpressdruck auf die Probe circa 2,7 N (+/- 0,5 N) betrug. Es folgte eine lineare Bewegung vorwärts und rückwärts entlang der Längsachse durch die Ausgangsposition mit einer Geschwindigkeit von 0,5 s pro Bewegung. Nach 35 s Reinigung wurde die Zahnbürste nach oben gehoben, nach hinten bewegt und manuell ausgeschaltet.

Anschließend wurden die Proben unter fließendem Wasser abgespült und wieder in künstlichem Speichel (37°C) gelagert.

2.5.4. Gruppe 4: Reinigung mittels Zahnbürste und Zahnpaste

Bei dieser Methode wurden die untersuchten Materialien zusätzlich mit einer Zahnpaste gereinigt. Dafür wurde die Zahnpaste „Elmex Sensitive Professional“ verwendet, die einen RDA-Wert (siehe Kapitel 1.3.1.5.) von 40 hat (53).

Die Zahnpaste „Elmex Sensitive Professional“ besteht aus: Arginin, Calcium carbonate, Sorbitol, Sodium lauryl sulfate, Sodium Monofluorophosphate, Zinc Phosphate, Sodium Bicarbonate, Tetrasodium Pyrophosphate, Sodium Saccharin, Benzyl Alcohol, Xanthan Gum, Sucralose, Limonene, CI 77891, Natriummonofluorophosphat.

Für jedes Reinigungsverfahren wurde 0,11 g Zahnpaste genommen.

Am Anfang des Versuchs wurde jede Probe aus dem künstlichen Speichel entnommen und unter fließendem Wasser gespült. Die Zahnpaste wurde immer in der Mitte der Probe aufgetragen, was der Anfangsposition des Bürstenkopfes entsprach. Zu diesem Zweck wurde ein zusätzliches transparentes Plättchen genommen, das die Form der untersuchten Proben hatte. Auf seiner Oberfläche wurde die Ausgangsposition der Bürsten mit einem wasserfesten Stift markiert. Bei der Messung der Pastenmenge wurden die Proben auf das markierte Plättchen gelegt, wodurch die korrekte Positionierung der Paste erreicht werden konnte.

Die richtige Menge der Zahnpaste wurde wie folgt auf das Plättchen aufgetragen: eine Probe mit dem markierten Plättchen wurde auf eine Muaket-Feinwaage gelegt, die Waage wurde auf Null gestellt und so viel Zahnpasta aufgetragen, bis die Waage einen Wert von 0,11 g anzeigte.

Beim nächsten Schritt wurden die Proben mit der Zahnpaste auf den angegebenen Platz der Apparatur gelegt.

Die weiteren Schritte wurden entsprechend der Reinigung der Proben der dritten Gruppe durchgeführt.

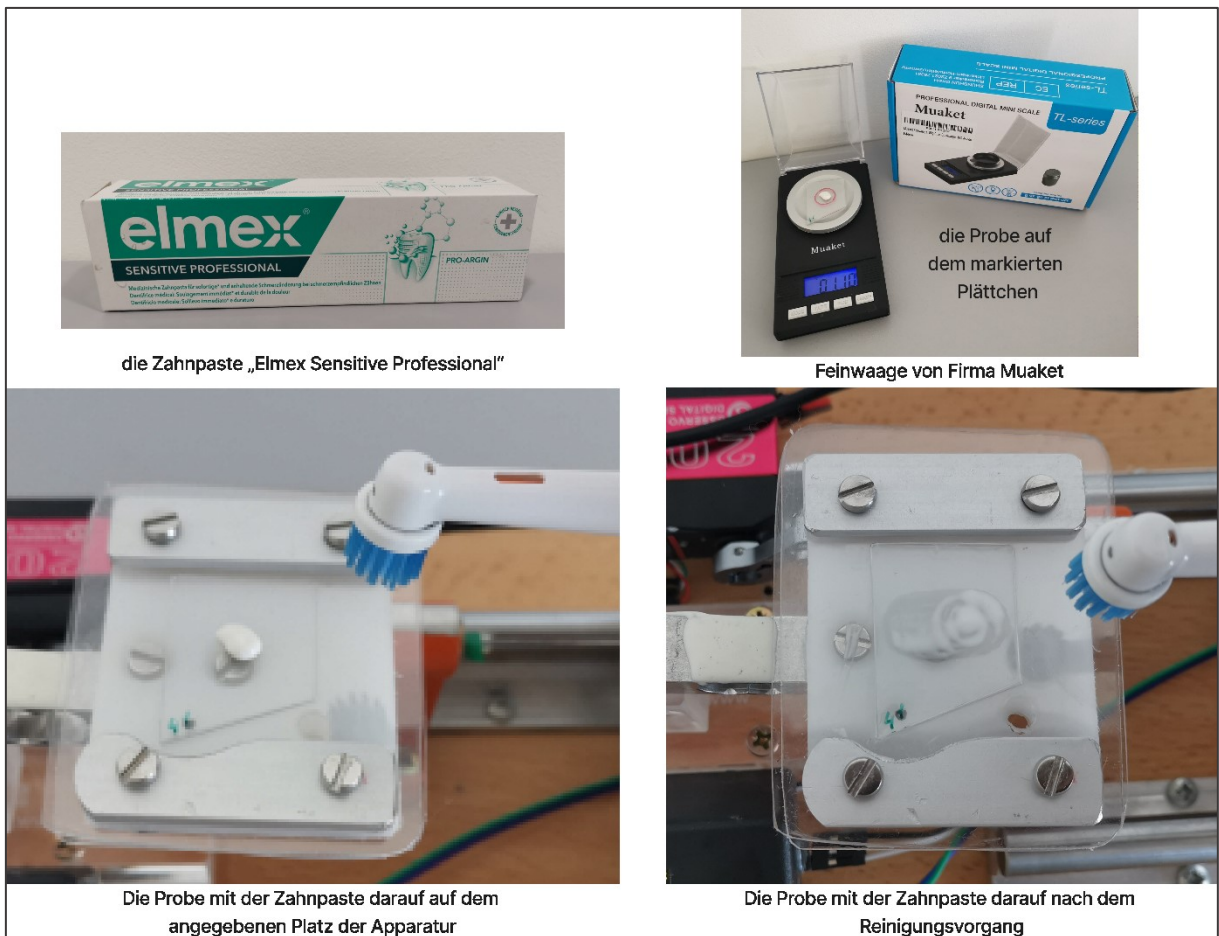


Abbildung 23 Reinigung mittels Zahnbürste und Paste

2.6. Markierung des Untersuchungsfeldes vor dem Messvorgang

Die Proben, die den Reinigungsmethoden unterzogen wurden, wurden nach 14 Tagen aus dem künstlichen Speichel entnommen, mit destilliertem Wasser abgespült und mit einem Luftbläser sanft getrocknet.

Vor der Messung mit einem Digitalmikroskop wurde das Untersuchungsfeld auf jeder Probe markiert. Zu diesem Zweck wurde das gleiche markierte Plättchen (Musterplättchen) verwendet, das auch zur Messung der Pastenmenge benutzt wurde. Jede Probe wurde auf das markierte Plättchen gelegt, und das Untersuchungsfeld wurde zunächst mit einem roten wasserfesten Filzstift angezeichnet und dann mit einem Reißnagel entlang des Randes angerissen.



Abbildung 24 Markierung des Untersuchungsfeldes: links - markierte Duran® Probe auf dem Musterplättchen mit Reißnagel und Filzstift; rechts – markierte 3-D gedruckte Proben in der Schaumstoffplatte.

Nach der Markierung wurden die Proben in einer Schaumstoffplatte mit Vertiefungen in der gleichen Weise wie die Plättchen zur Lagerung im Speichel platziert und zur Messung der Oberflächenrauheit an die Montanuniversität Leoben gebracht.

2.7. Vorbereitung der Proben für die Messung und Messvorgang

Da die untersuchten Proben eine stark reflektierende Oberfläche haben, ist es schwierig, sie mit einem Digitalmikroskop zu untersuchen. Diesbezügliche Vorversuche mussten abgebrochen werden. Aus diesem Grund die Montanuniversität beschlossen, die Plättchen vor dem Messvorgang mit einer Beschichtung aus Gold zu versehen, damit das Gerät ihre Oberfläche leichter erkennen kann.

Da die Goldbeschichtung eine Wiederverwendung der Proben unmöglich macht, wurden von jedem Material 20 ungeputzte Proben als Kontrollgruppe für die *Ausgangsmessungen* herangezogen.

Die *Abschlussmessungen* wurden an den Proben durchgeführt, die den Reinigungsprozessen unterzogen worden waren.

2.7.1. Probentrocknung und Goldbeschichtung

Vor der Goldbeschichtung mussten Wasser und andere Lösungsmittel möglichst schonend aus den Proben entfernt werden. Die Proben wurden mittels eines an der Montanuniversität vorhandenen Exsikkators von Carl Roth® getrocknet. Dieser ist aus einem dickwandigen Duran® Glas gefertigt und kann mit einem Deckel hermetisch verschlossen werden.

Nach dem Trocknen wurden die Proben einzeln in die Probenkammer des Cressington Sputter Coaters 108auto gelegt. Dort wurde eine Goldschicht mit minimaler Probenbelastung aufgedampft.



Abbildung 25 links: Exsikkators von Carl Roth®; rechts: Cressington Sputter Coater 108auto.

Das in dieser Studie verwendete Gerät ermöglichte das Auftragen von reproduzierbaren Schichten.

2.7.2. Messung

Die Messung wurde mit einem an der Montanuniversität Leoben vorhandenen Digitalmikroskop VHX 7000 von Keyence (KEYENCE DEUTSCHLAND GmbH, Neu-Isenburg, Deutschland) mit dem Objektiv VHX-E20 durchgeführt. Die Vergrößerung wurde auf $\times 20$ eingestellt.

Bei diesem Digitalmikroskop kann sich das Objektiv automatisch in der Z-Achse bewegen. So können Tiefendaten erfasst werden. Daraus wird ein tiefenscharfes Bild über Fokusvariationen zusammengesetzt. Dies ermöglicht eine dreidimensionale Darstellung des Objekts und die Messung seiner Rauheit.



Abbildung 26 das Digitalmikroskop VHX-7000 von Keyence

In der Mitte des Untersuchungsbereiches jeder Probe (siehe Kapitel 3.6.) wurde ein Sichtfeld untersucht. Innerhalb dieses Sichtfeldes wurden insgesamt 3 Messstrecken gezeichnet und die unten aufgeführten Rauheitsparameter (siehe Kapitel 2.4.3.1.) jeder Messstrecke erfasst.

2.7.2.1. Rauheitskenngrößen

Im Rahmen dieser Studie wurden folgenden Rauheitsparameter ermittelt: **Ra** (mittlere Rauheit des Profils), **Rz** (gemittelte Höhe des Rauheitsprofils), **Rt** (Gesamthöhe des Rauheitsprofils), **Rp** (Höhe der größten Profilspitze des Rauheitsprofils) und **Rv** (Tiefe des größten Profiltales des Rauheitsprofils). Diese Profilkenngrößen sind nach DIN EN ISO 4287 an der Einzelmessstrecke definiert.

- **Ra** ist der arithmetische Mittelwert der Beträge aller Ordinatenwerte des Oberflächenprofils innerhalb der Messstrecke. Dieser Parameter wird in der Praxis am häufigsten zur Beschreibung der Oberflächenrauheit verwendet und kann mit der folgenden Formel berechnet werden (54):

$$Ra = \frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z(x)| dx$$

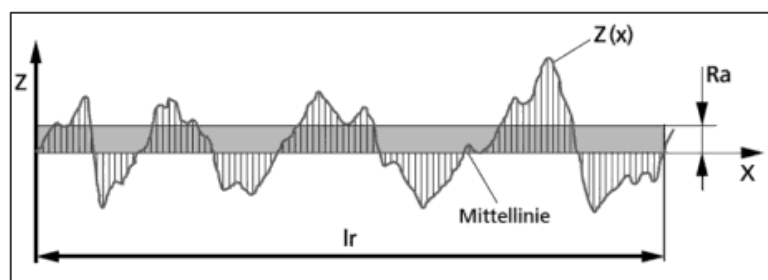


Abbildung 27 Graphische Darstellung von Ra (55)

- **Rz** ist gemittelte maximale Rauhtiefe von fünf aufeinander folgenden Einzelmessstrecken im Rauheitsprofil (55). In jeder Messstrecke wird der Abstand zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Punkt gemessen, die Werte werden addiert und durch die Anzahl der Messstrecken geteilt. Rz wird mithilfe folgender Formel berechnet:

$$R_z = \frac{1}{5} (R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} + R_{z4} + R_{z5})$$

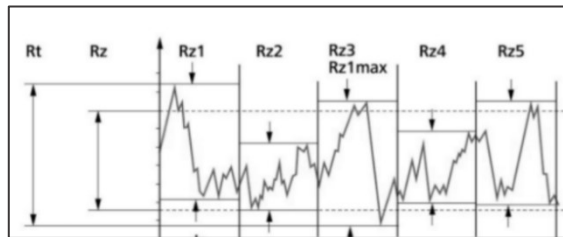


Abbildung 28 Graphische Darstellung von R_z und R_t (55)

- **R_t** ist der Abstand zwischen der höchsten Spitze und dem tiefsten Tal innerhalb des Rauheitsprofil (55).
- **R_p** ist die Höhe der höchsten Spitze des Rauheitsprofils innerhalb der Messstrecke (56).
- **R_v** ist die Tiefe des tiefsten Punktes des Rauheitsprofils innerhalb der Messstrecke (56).

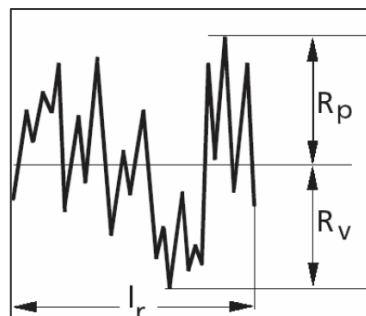


Abbildung 29 Graphische Darstellung von R_p und R_v in Anlehnung an Vockert (56)

3. Ergebnisse

In dieser Studie wurden 3 verschiedene Materialien untersucht, von denen jeweils 60 Proben hergestellt wurden. Davon wurden 20 Proben der Anfangsmessung und 40 Proben nach der Reinigung der Abschlussmessung unterzogen:

- Kontrollgruppe (ungeputzte Proben) (20 Stück)
- Gruppe 1 (Reinigung mittels Ultraschallbad) (10 Stück)
- Gruppe 2 (Reinigung mittels Reinigungstabs) (10 Stück)
- Gruppe 3 (Reinigung mittels Zahnbürste) (10 Stück)
- Gruppe 4 (Reinigung mittels Zahnbürste und Zahnpaste) (10 Stück)

Um die Oberflächenrauheit zu bestimmen, wurden 3 Messungen im Untersuchungsbereich jeder Probe durchgeführt. Pro Messung wurden 5 Messparameter erfasst: Ra, Rz, Rt, Rp und Rv. Die erhaltenen Messwerte jeder Gruppe wurden zur Auswertung herangezogen.

Der Mittelwert (MW), die Standardabweichung (SD) und der Median der einzelnen Messparameter sind in den *Tabellen 1* und *2* dargestellt. Die MW-, SD- und Medianwerte von Rz waren annähernd identisch mit den jenen von Rt. Aus diesem Grund wurden sie in der *Tabelle 1* zusammen dargestellt.

		Ra		Rz/Rt	
		MW (±SD) (µm)	Median (µm)	MW (±SD) (µm)	Median (µm)
3D gedruckt	Ungeputzt	45,0(±14,8)	39,9	181,6(±58,1)	159,8
	Ultraschallbad	39,7(±5,5)	37,9	162,3(±33,8)	151,7
	Reinigungstabs	39,3(±3,9)	38,0	160,9(±21,5)	152,5
	Zahnbürste / Wasser	39,1(±3,6)	37,9	159,3(±23,1)	153,1
	Zahnbürste / Zahnpasta	40,7(±12,0)	38,1	181,9(±58,6)	154,8
Duran	Ungeputzt	47,0(±21,2)	38,2	196,8(±79,9)	154,4
	Ultraschallbad	45,5(±18,0)	41,0	205,4(±63,8)	191,1
	Reinigungstabs	46,8(±19,7)	42,9	195,9(±66,9)	195,3
	Zahnbürste / Wasser	56,1(±24,9)	49,3	242,2(±96,2)	206,9
	Zahnbürste / Zahnpasta	52,7(±8,1)	53,8	214,6(±29,9)	217,0
Clear-Aligner	Ungeputzt	37,6(±4,3)	37,3	151,1(±14,6)	149,4
	Ultraschallbad	26,3(±6,9)	26,4	125,5(±25,7)	123,5
	Reinigungstabs	27,9(±3,8)	28,1	114,4(±14,2)	116,2
	Zahnbürste / Wasser	40,7(±19,3)	33,6	182,8(±68,2)	165,5
	Zahnbürste / Zahnpasta	34,5(±4,1)	35,1	138,2(±15,4)	140,4

Tabelle 2 Ra und Rz/Rt Werte

		Rp		Rv	
		MW (±SD) (µm)	Median (µm)	MW (±SD) (µm)	Median (µm)
3D gedruckt	Ungeputzt	97,3(±42,4)	79,9	84,1(±19,1)	79,5
	Ultraschallbad	87,0(±28,3)	76,1	75,2(±9,5)	75,4
	Reinigungstabs	84,3(±18,4)	76,7	76,5(±4,6)	75,8
	Zahnbürste / Wasser	85,6(±20,6)	76,7	73,6(±6,9)	75,4
	Zahnbürste / Zahnpasta	103,1(±41,0)	86,9	78,7(±27,4)	75,8
Duran	Ungeputzt	100,5(±50,1)	77,1	96,3(±39,6)	77,1
	Ultraschallbad	107,8(±31,7)	108,7	97,3(±45,3)	79,6
	Reinigungstabs	102,0(±39,6)	101,0	93,9(±33,3)	85,4
	Zahnbürste / Wasser	138,2(±70,4)	109,3	103,9(±41,2)	97,1
	Zahnbürste / Zahnpasta	108,7(±15,6)	109,3	105,9(±18,5)	109,3
Clear-Aligner	Ungeputzt	75,2(±7,6)	74,7	75,8(±8,8)	75,1
	Ultraschallbad	67,0(±18,9)	62,6	58,4(±16,2)	54,7
	Reinigungstabs	59,5(±13,8)	58,0	54,9(±11,6)	56,1
	Zahnbürste / Wasser	95,5(±38,3)	92,6	87,0(±40,8)	69,4
	Zahnbürste / Zahnpasta	69,4(±6,9)	70,2	68,7(±8,6)	70,0

Tabelle 3 Rp und Rv

Die obigen Daten zeigen, dass die Mittelwerte der Kontrollgruppen der Duran®- und 3D-gedruckten Proben höhere Rauheitswerte aufweisen, was auf eine rauere Oberflächenbeschaffenheit im Vergleich zur Kontrollgruppe der Clear-Aligner®-Pro-
Proben hindeutet.

Die *Abbildungen 30-33* stellen in Form von Box-Plots die Messergebnisse der 3
Materialien, unterteilt in die jeweiligen Untersuchungsgruppen dar.

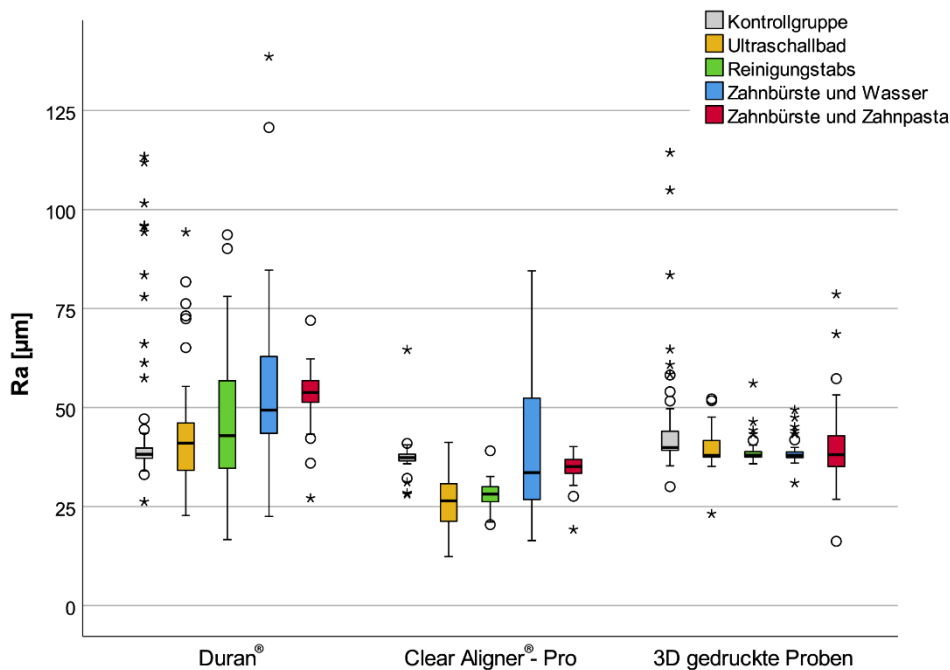


Abbildung 30 Grafische Darstellung Ra-Wert

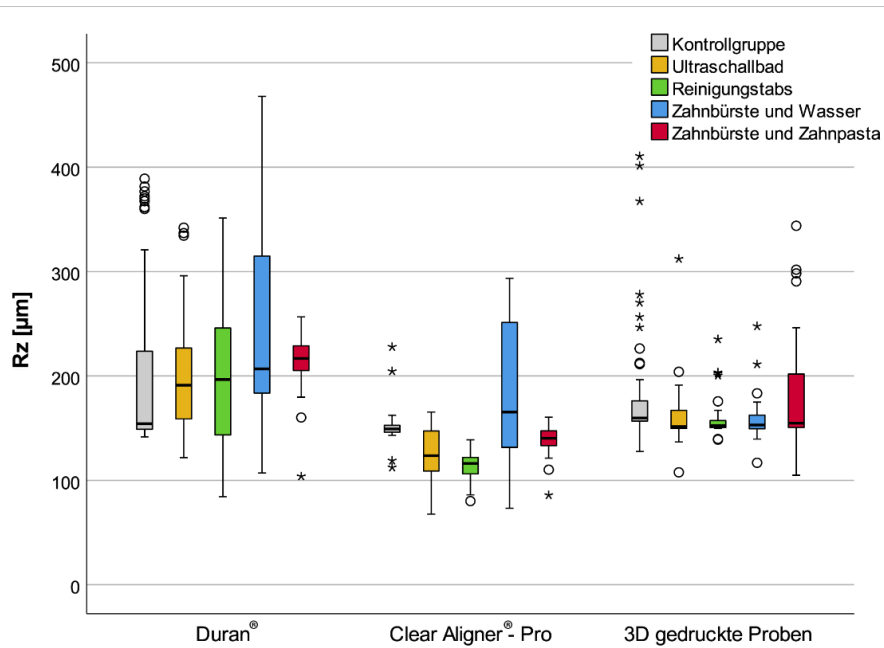


Abbildung 31 Grafische Darstellung Rz-Wert

Die Messergebnisse der Parameter Rz und Rt waren sehr ähnlich, so dass die Box-Plots für diese Parameter keine Unterschiede zeigen. Deshalb wurde auf eine grafische Darstellung des Rt-Wertes verzichtet. Wenn die die Rz- und Rt-Werte sehr ähnlich sind, bedeutet das, dass die Rauheit gleichmäßig über die Probe verteilt ist.

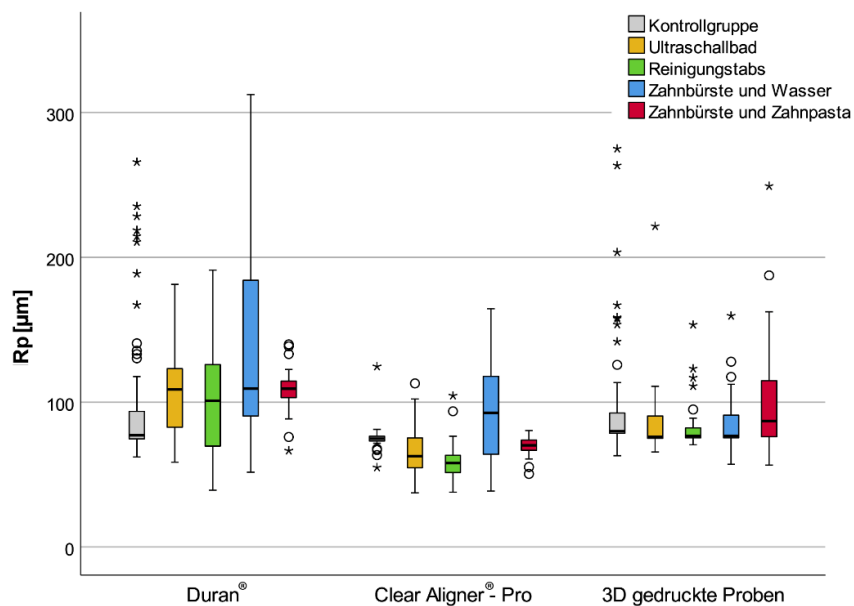


Abbildung 32 Graphische Darstellung Rp-Wert

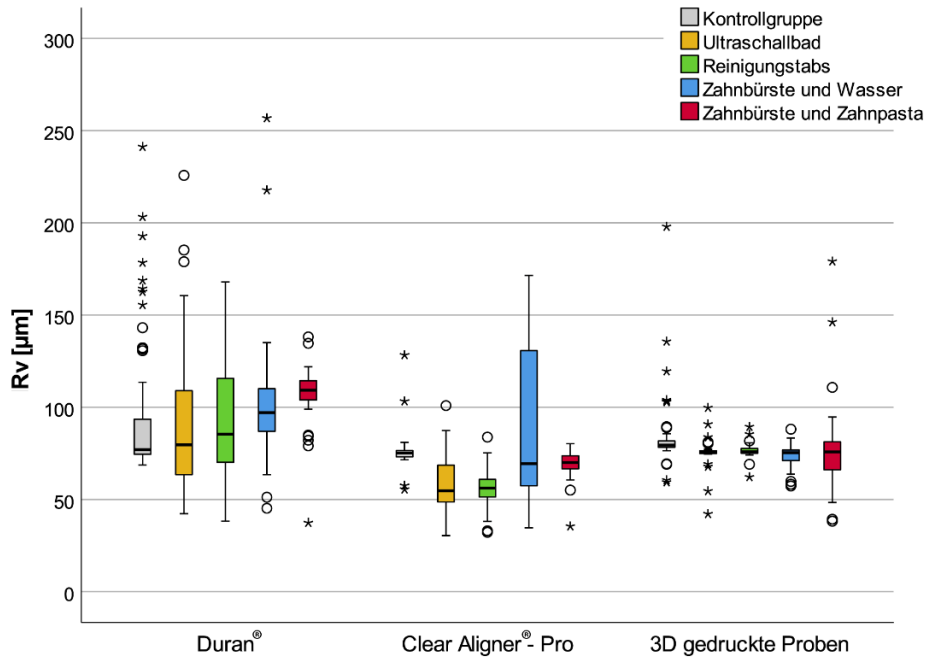


Abbildung 33 Grafische Darstellung Rv-Wert

Die Gruppen 1 bis 4 wurden einzeln mit der Kontrollgruppe verglichen, um einen Einfluss der Reinigung auf die Oberflächenrauheit der Proben zu ermitteln. Die Vergleiche wurden mit dem Mann-Whitney-U-Test durchgeführt. Die statistische Signifikanz wurde auf $p < 0,05$ festgelegt.

		Ultraschallbad	Reinigungstabs	Zahnbürste und Wasser	Zahnbürste und Zahnpasta
3D gedruckt	Ra	$p = 0,003$	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p = 0,005$
	Rt	$p = 0,004$	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p = 0,091$
	Rz	$p = 0,004$	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p = 0,089$
	Rp	$p = 0,013$	$p < 0,001$	$p = 0,015$	$p = 0,788$
	Rv	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p = 0,001$
Duran	Ra	$p = 0,627$	$p = 0,621$	$p = 0,001$	$p < 0,001$
	Rt	$p = 0,091$	$p = 0,652$	$p = 0,003$	$p = 0,001$
	Rz	$p = 0,087$	$p = 0,639$	$p = 0,003$	$p = 0,001$
	Rp	$p = 0,019$	$p = 0,573$	$p = 0,001$	$p < 0,001$
	Rv	$p = 0,828$	$p = 0,896$	$p = 0,004$	$p < 0,001$
Clear-	Ra	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p = 0,211$	$p < 0,001$
	Rt	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p = 0,057$	$p < 0,001$
	Rz	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p = 0,056$	$p < 0,001$
	Rp	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p = 0,041$	$p < 0,001$
	Rv	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p = 0,266$	$p < 0,001$

Tabelle 4 Signifikanzwerte beim paarweisen Vergleich mit der Kontrollgruppe

In *Tabelle 3* sind die signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Reinigungsmethoden und der Kontrollgruppe rot markiert. Aus der Tabelle geht nicht hervor, ob die Rauheitsparameter der gereinigten Proben größer oder kleiner sind. Dazu sind die oben dargestellten Box-Plots heranzuziehen.

Duran®: Die Gruppen 1 (Ultraschallbad) und 2 (Reinigungstabs) zeigen im Vergleich zu den nicht gereinigten Proben keine signifikanten Unterschiede bei allen gemessenen Rauheitsparametern, außer dass R_p in der ersten Gruppe größer ist als in der Kontrollgruppe. Die R_p weist darauf hin, dass das Rauheitsprofil ihrer Proben höhere Spitzen enthält.

Im Gegensatz dazu sind die Rauheitswerte der dritten (Zahnbürste und Wasser) und vierten Gruppe (Zahnbürste und Zahnpaste) signifikant höher als die der Kontrollgruppe, was auf eine Zunahme der Oberflächenrauheit des Materials nach der Reinigung mit der Zahnbürste mit und ohne Paste hindeutet.

Clear Aligner®-Pro: Die Gruppen 1, 2 und 4 zeigen geringere Rauheitswerte als die Kontrollgruppe. Die Werte R_a , R_z , R_t und R_v der dritten Gruppe unterscheiden sich nicht signifikant von denen der ungeputzten Gruppe. Lediglich R_p der dritten Gruppe liegt mit $p = 0,041$ leicht über der Signifikanzgrenze.

3D gedruckte Proben: Die Werte R_a und R_v aller Gruppen und die Werte R_z , R_t und R_p der ersten drei Gruppen sind signifikant niedriger als die der Kontrollgruppe, was im Allgemeinen auf eine Verringerung der Oberflächenrauheit der gereinigten Proben hinweist. Nur R_z , R_t und R_p der vierten Gruppe unterscheiden sich nicht signifikant von der Kontrollgruppe. Dies könnte auf eine große Streuung dieser Werte zurückzuführen sein.

Weiterhin wurde ein Vergleich der 4 Reinigungsmethoden untereinander mit dem Kruskal Wallis Test, getrennt nach Materialart, durchgeführt. Ein Signifikantwert $p < 0,05$ bedeutet, dass sich mindestens 2 der 4 Reinigungsmethoden voneinander unterscheiden. Der Post-hoc-Test zeigt dann, wie sich der Unterschied zwischen den Gruppen verteilt:

Signifikanzwerte beim Gruppenvergleich pro Material			
		Signifikanz	Post-hoc-Test
3D gedruckt	Ra	p = 0,999	
	Rt	p = 0,423	
	Rz	p = 0,394	
	Rp	p = 0,040	Grp. 1, 2, 3 < Grp. 4
	Rv	p = 0,633	
Duran	Ra	p = 0,009	Grp. 1, 2 < Grp. 3, 4
	Rt	p = 0,098	
	Rz	p = 0,102	
	Rp	p = 0,388	
	Rv	p = 0,024	Grp. 1, 2 < Grp. 3, 4
Clear-Aligner	Ra	p < 0,001	Grp. 1,2 < Grp. 4 < Grp 3
	Rt	p < 0,001	Grp. 1,2 < Grp. 4 < Grp 3
	Rz	p < 0,001	Grp. 1,2 < Grp. 4 < Grp 3
	Rp	p < 0,001	Grp. 1,2 < Grp. 4 < Grp 3
	Rv	p < 0,001	Grp. 1,2 < Grp. 4 < Grp 3

Tabelle 5 Signifikanzwerte beim Gruppenvergleich pro Material

Duran®: Die mittlere Rauheit des Profils (Ra) ist in der dritten und vierten Gruppe signifikant höher und zeigt, dass das Material nach der Reinigung mit der Zahnbürste mit und ohne Zahnpaste eine höhere Oberflächenrauheit im Vergleich zu den Reinigungsmethoden mit Ultraschallbad und Reinigungstabs aufweist.

Clear Aligner®-Pro: Die Proben der ersten und zweiten Gruppen haben signifikant geringere Rauheit als die Proben, die mit der Zahnbürste und Zahnpaste gereinigt wurden. Die Werte der vierten Gruppe, die einer Reinigung mit der Zahnbürste und Wasser unterzogen wurde, haben im Vergleich zu den anderen Methoden die höchsten Rauheitsparameter.

3D gedruckte Proben: Es gibt keinen signifikanten Unterschied zwischen den Reinigungsgruppen bei allen Rauheitsparametern, außer dass der Rp-Wert der vierten Gruppe (Zahnbürste und Zahnpaste) größer als bei den anderen Reinigungsmethoden ist. Im Allgemeinen kann festgestellt werden, dass die Rauheit der gedruckten Proben unabhängig von der gewählten Reinigungsmethode in allen gereinigten Gruppen ziemlich gleichmäßig war.

In den Abbildungen 34 und 35 sind die signifikanten Veränderungen der Oberflächenrauheit zwischen der Kontrollgruppe und den Reinigungsgruppen einzeln und zwischen den Reinigungsgruppen untereinander zusammengefasst.

Vergleich Kontrollgruppe und Reinigungsgruppen		Vergleich der Reinigungsgruppen untereinander			
Ra	Duran®	3,4 ↑	Ra	Duran®	1,2<3,4
	CA®Pro	1,2,4 ↓		CA®Pro	1,2<4<3
	3D	1,2,3,4 ↓		3D	-
Ra/Rt	Duran®	3,4 ↑	Ra/Rt	Duran®	-
	CA®Pro	1,2,4 ↓		CA®Pro	1,2<4<3
	3D	1,2,3 ↓		3D	-
Rp	Duran®	1,3,4 ↑	Rp	Duran®	-
	CA®Pro	1,2,4 ↓ 3 ↑ (p=0,041)		CA®Pro	1,2<4<3
	3D	1,2,4 ↓		3D	1,2,3<4 (p=0,04)
Rv	Duran®	3,4 ↑	Rv	Duran®	1,2<3,4
	CA®Pro	1,2,4 ↓		CA®Pro	1,2<4<3
	3D	1,2,3,4 ↓		3D	-

Gruppe 1 Ultraschallbad
Gruppe 2 Corega Tabs
Gruppe 3 Zahnbürste und Wasser
Gruppe 4 Zahnbürste und Zahnpaste

Abbildung 34 Signifikante Unterschiede: links zwischen der Kontrollgruppe und den Reinigungsgruppen (Rauhigkeitszunahme ↑ Rauhigkeitsabnahme ↓); rechts zwischen den Reinigungsgruppen untereinander.

Duran®			Kontrollgruppe	nach der Reinigung	
Kontakt flüssig	1.Ultraschallbad	mechanisch			1,2<3,4 *
	2.CoregaTabs	chemisch			
Kontakt fest	3.Zahnbürste und Wasser	mechanisch		*	
	4.Zahnbürste und Zahnpaste	mech + chem		*	
Clear-Aligner®-Pro			Kontrollgruppe	nach der Reinigung	
Kontakt flüssig	1.Ultraschallbad	mechanisch		*	1,2<4<3 *
	2.CoregaTabs	chemisch		*	
Kontakt fest	3.Zahnbürste und Wasser	mechanisch			
	4.Zahnbürste und Zahnpaste	mech + chem		*	
3D-gedruckter Kunststoff			Kontrollgruppe	nach der Reinigung	
Kontakt flüssig	1.Ultraschallbad	mechanisch		*	↑ ↓
	2.CoregaTabs	chemisch		*	
Kontakt fest	3.Zahnbürste und Wasser	mechanisch		*	
	4.Zahnbürste und Zahnpaste	mech + chem		*	
<p>* signifikanter Unterschied</p> <p> Rauigkeitsabnahme</p> <p> Rauigkeitszunahme</p>					

Abbildung 35 Rauheitsveränderung (Ra-Wert): Duran®, Clear-Aligner®-Pro und 3D-gedruckter Kunststoff.

4. Diskussion

Die Aligner befinden sich bei ihrem therapeutischen Einsatz ca. 22 Stunden pro Tag im Mund und sind dort verschiedenen Einflüssen ausgesetzt, die ihre Eigenschaften beeinträchtigen (20, 35). Sie selbst können das intraorale Milieu belasten und zu einem zusätzlichen Reservoir für die Plaqueansammlung werden. Ihre sorgfältige Hygiene spielt daher eine wichtige Rolle.

Bei der Wahl der optimalen Reinigungsmethode sind eine Reihe von Faktoren zu berücksichtigen. Denn zum einen sollen die Aligner möglichst gründlich gereinigt werden, zum anderen dürfen ihre mechanischen und physikalischen Eigenschaften dadurch nicht verschlechtert werden.

In dieser in-vitro-Studie wurde die Veränderung der Oberflächenrauheit von drei Aligner-Materialien nach Anwendung von vier Reinigungsmethoden untersucht.

Die Rauheit thermoplastischer Materialien, die für die Herstellung intraoraler Schienen geeignet sind, wird in verschiedenen Studien unterschiedlich angegeben (18, 37, 57-59). Die Schwankungen sind dabei so groß, dass sie sich um mehrere Potenzen unterscheiden. Warum diese Abweichungen bestehen, können wir nicht wirklich erklären. Eine mögliche Erklärung für diesen Unterschied könnte darin liegen, dass in den Untersuchungen nicht die gleichen Messgeräte verwendet wurden und auch die Größe des Messbereiches nicht identisch war. Laut Aussage des Physikers der Montanuniversität Leoben können die großen Schwankungen nicht durch unterschiedliche Messgeräte bedingt sein.

Die Ergebnisse der ungereinigten Proben zeigen, dass Duran® und der 3D-gedruckte Kunststoff höhere Rauheitswerte im Vergleich zu den Clear-Aligner®-Pro-Proben aufweisen.

Die rauere Oberfläche der Duran®-Proben kann auf die Verpackung der Materialien zurückzuführen sein, da die Duran®-Folien im Gegensatz zu den Clear-Aligner®-Pro-Folien nicht einzeln verpackt sind. Daher könnten durch äußere Einflüsse mehr Kratzer auf den Duran® -Folien entstanden sein, die nach dem Tiefziehen eventuell zurückgeblieben sind.

Nach der mechanischen Reinigung mit der Zahnbürste nahm die Rauheit der Duran®-Proben ebenfalls signifikant zu. Die Ergebnisse mit Zahnpasta zeigten eine geringere Streuung und der Median lag höher als bei der Reinigung mit der Zahnbürste ohne Zahnpasta. Der Unterschied war jedoch nicht signifikant. Eine Erhöhung der Oberflächenrauheit von Duran® nach der Reinigung mit der Zahnbürste wurde auch in der Studie von Porojan (18) nachgewiesen. Die Reinigung im Ultraschallbad und mit Reinigungstabs COREGA zeigt keine signifikante Veränderung der Rauheit, was auf die Beständigkeit des Materials gegenüber diesen Reinigungsmethoden und auf die Empfindlichkeit gegenüber der mechanischen Beanspruchung durch die Zahnbürste zurückzuführen sein könnte. Eine Zunahme der Rauheit nach der Verwendung der Zahnbürste könnte entweder durch den Abrieb der Spitzen oder durch die Bildung von Ablagerungen auf der Oberfläche verursacht worden sein. Um diese Frage zu klären, wären weitere Studien notwendig, die die Formationen der Oberflächenprofile vor und nach der Reinigung genauer analysieren.

Die Rauheitsparameter der beiden anderen Materialien (Clear-Aligner®-Pro und 3D-gedruckter Kunststoff) haben sich im Rahmen der Reinigungsprozesse etwas verringert: bei den Clear-Aligner®-Pro-Proben durch die Ultraschallreinigung, die Carega Tabs Anwendung und die Reinigung mit Zahnbürste und Paste. Die Streuung der Rauheitswerte nach der Reinigung mit Zahnbürste und Wasser war größer als bei den anderen Gruppen, und ein signifikanter Unterschied zur Kontrollgruppe war nicht nachweisbar.

Die Glättung der Oberfläche der ersten Gruppe könnte durch die Wirkung der Kavitationsblasen auf die Spitzen im Ultraschallbad verursacht worden sein.

Die Tatsache, dass die Reinigung mit Zahnpasta zu einer geringeren Rauheit führt als die Reinigung mit Zahnbürste und Wasser alleine, steht im Widerspruch zu den Ergebnissen der Studie von Šimunović et al. (57), wo die zusätzliche Verwendung von Zahnpasta zu einer größeren oder gleich großen Veränderung der Rauheit führte. Šimunović et al. haben jedoch die Zahnpaste mit einem RDA-Wert von 113 verwendet, der im Vergleich zum RDA-Wert 50 der in dieser Studie verwendeten Zahnpaste wesentlich höher ist. Dies könnte zur Rauheitsunterschieden führen, da

die abrasiven Zahnpasten die Rauheit der thermoplastischen Materialien erhöhen können (57).

Bei Clear-Aligner®-Pro führten die beiden Methoden, die in erster Linie einen chemischen Einfluss nehmen, zu einer glatteren Oberfläche. Sowohl die Zahnpasta als auch die in Wasser aufgelösten COREGA TABS sind basisch. Ein basisches Milieu könnte unter Umständen den Abrieb von Unebenheiten der Probenoberfläche durch die Einwirkung der Zahnbürste und der Bestandteile der Reinigungstabs begünstigen.

In der Studie von Wible et al. (37) wurde nach der chemischen Reinigung von Copolyester Retainern (Essix® ACE) mit Listerine® ebenfalls eine Abnahme der Rauheit beobachtet.

Beim Vergleich der Reinigungsgruppen untereinander waren die Rauheitswerte der 3D-gedruckten Proben einheitlich. Lediglich der Rp der Gruppe 4 war höher, die Signifikanz war jedoch sehr gering ($p=0,04$).

Alle Proben wurden während der Untersuchung 14 Tage lang bei 37 °C in künstlichem Speichel gelagert. Da sich die Oberfläche des 3D-gedruckten Materials bei allen Reinigungsmethoden relativ gleich reduzierte, könnte die Veränderung der Oberfläche auf den Einfluss des Speichels beziehungsweise der Temperatur zurückzuführen sein. Diese Faktoren könnten zu einer Wasseraufnahme und damit zu einer Ausdehnung des 3D-gedruckten Materials und einer weiteren Glättung der Oberfläche führen. Es sind zusätzliche Studien notwendig, um diese Hypothese zu bestätigen.

In der Studie von Chang et al. (34) konnte bei der Eliminierung von Mikroorganismen auf thermoplastischen Essix® -Retainern eine höhere Effizienz durch Reinigung mit Zahnbürste und Zahnpasta als ohne Zahnpasta erzielt werden. In einigen Studien wurde zusätzlich zur mechanischen Reinigung mit der Zahnbürste auch die Verwendung eines chemischen Mittels empfohlen (24, 27, 32). Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen keine signifikant höhere Rauheit der Proben nach der Reinigung mit der Zahnbürste und Zahnpaste im Vergleich zu den Proben, die nur mit der Zahnbürste gereinigt wurden.

5. Schlussfolgerung

1. Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen eine Erhöhung der Rauheit der Duran®-Proben nach der Reinigung mit der Zahnbürste mit und ohne Zahnpaste. Aus Gründen der Rauheitszunahme ist es daher wünschenswert, für dieses Material alternativ die Reinigung mit Reinigungsstabs oder im Ultraschallbad zu bevorzugen.
2. Für die Reinigung der Clear-Aligner®-Pro- und 3D-gedruckten Proben sind alle vier Reinigungsmethoden zu empfehlen, da die Rauheit bei beiden Materialien entweder nicht signifikant verändert oder verringert wurde.
3. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde nur ein Aspekt der Reinigung von Alignern untersucht. Weitere Studien, die auch die Elastizität, die Transparenz sowie die antibakterielle Wirkung und andere Kriterien nach Anwendung verschiedener Reinigungsmethoden überprüfen könnten, wären erforderlich.

Literaturverzeichnis

1. Tieke B. Makromolekulare Chemie: Eine Einführung: John Wiley & Sons; 2014.
2. Roos E, Maile K, Seidenfuß M. Werkstoffkunde für Ingenieure: Grundlagen, Anwendung, Prüfung: Springer-Verlag; 2017.
3. Hammer F. Einfluss verschiedener Faktoren im Thermoformverfahren auf die Verformbarkeit und den Verzug von thermoplastischen Tiefziehfolien: Imu; 2020.
4. Schäfer J. Tiefziehverblendung in der Zahnheilkunde: Vergleich mit einer konventionellen Verblendung und monolithischen Restaurationen: Universitätsbibliothek der Ludwig-Maximilians-Universität; 2019.
5. Schmidt S. Mechanisches Verhalten von kieferorthopädisch thermoplastischen PET-G Materialien bei simulierter intraoraler Umgebung: Universität Ulm; 2019
6. Lamha M. Experimenteller Vergleich von Folienmaterial für die Herstellung von kieferorthopädischen Alignern nach einer DIN-Ringversuchsvorschrift: Universitäts- und Landesbibliothek Bonn; 2020.
7. Bronkhorst E, Fudalej PS, Katsaros C. Orthodontic retention procedures in Switzerland. 2013.
8. Langer C. Festsitzende Retainer in der Kieferorthopädie. Zahnmedizin up2date. 2018;12(04):335-47.
9. Hegemann B. Deformationsverhalten von Kunststoffen beim Thermoformen: experimentelle und virtuelle Bestimmung. 2004.
10. Lozano Zafra J, Palma Moya S. Aligner techniques in orthodontics. 1st ed. Chichester: Wiley Blackwell; 2021.
11. Sander C, Wiethoff H, Sander F. Die kieferorthopädische Behandlung mit thermoplastischen Schienen. Informationen aus Orthodontie & Kieferorthopädie. 2009;41(03):183-8.
12. Schwarzmann P. Thermoformen in der Praxis: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG; 2016.
13. El-Bialy T. Orthodontic biomechanics : treatment of complex cases using clear aligner. Place of publication not identified: Bentham Science Publisher; 2016.
14. Tai S, Huffman L, ProQuest. Clear aligner technique. Hanover Park, IL: Quintessence Publishing Co, Inc; 2018.
15. Lou T, Mair A. An Historical Overview of Clear Aligner Therapy the Evolution of Clear Aligners. Oral Health Group. 2020.

16. Kesling HD. The philosophy of the tooth positioning appliance. *American Journal of Orthodontics and Oral Surgery*. 1945;31(6):297-304.
17. Eliades T, Athanasiou AE. *Orthodontic aligner treatment : a review of materials, clinical management, and evidence*. Stuttgart ; New York: Thieme; 2021. xiv, 186 pages : 239 illustrations p.
18. Porojan L, Vasiliu R-D, Porojan S-D, Bîrdeanu M-I. Surface Quality Evaluation of Removable Thermoplastic Dental Appliances Related to Staining Beverages and Cleaning Agents. *Polymers*. 2020;12(8):1736.
19. Tartaglia GM, Mapelli A, Maspero C, Santaniello T, Serafin M, Farronato M, et al. Direct 3D Printing of Clear Orthodontic Aligners: Current State and Future Possibilities. *Materials (Basel)*. 2021;14(7).
20. Schuster S, Eliades G, Zinelis S, Eliades T, Bradley TG. Structural conformation and leaching from in vitro aged and retrieved Invisalign appliances. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics*. 2004;126(6):725-8.
21. Moshiri M, Eckhart JE, Mcshane P, German DS. Consequences of poor oral hygiene during clear aligner therapy. *JCO*. 2013;8(47):494-98.
22. Karkhanechi M, Chow D, Sipkin J, Sherman D, Boylan RJ, Norman RG, et al. Periodontal status of adult patients treated with fixed buccal appliances and removable aligners over one year of active orthodontic therapy. *The Angle Orthodontist*. 2013;83(1):146-51.
23. Azaripour A, Weusmann J, Mahmoodi B, Peppas D, Gerhold-Ay A, Van Noorden C, et al. Braces versus Invisalign®: gingival parameters and patients' satisfaction during treatment: a cross-sectional study. *BMC oral health*. 2015;15(1):1-5.
24. Akgun FA, Senisik NE, Cetin ES. Evaluation of the Efficacy of Different Cleaning Methods for Orthodontic Thermoplastic Retainers in terms of Bacterial Colonization. *Turk J Orthod*. 2019;32(4):219-28.
25. AKGÜN FA. Cleaning Methods and Materials for Removable Orthodontic Appliances: A Questionnaire Study. *Black Sea Journal of Health Science*. 2021:5-6.
26. Lombardo L, Martini M, Cervinara F, Spedicato GA, Oliverio T, Siciliani G. Comparative SEM analysis of nine F22 aligner cleaning strategies. *Progress in Orthodontics*. 2017;18(1):1-6.
27. Charavet C, Gourdain Z, Graveline L, Lupi L. Cleaning and Disinfection Protocols for Clear Orthodontic Aligners: A Systematic Review. *Healthcare*. 2022;10(2):340.
28. Low B, Lee W, Seneviratne CJ, Samaranayake LP, Hägg U. Ultrastructure and morphology of biofilms on thermoplastic orthodontic appliances in 'fast' and 'slow' plaque formers. *European Journal of Orthodontics*. 2010;33(5):577-83.

29. Batoni G, Pardini M, Giannotti A, Ota F, Rita Giuca M, Gabriele M, et al. Effect of removable orthodontic appliances on oral colonisation by mutans streptococci in children. *European journal of oral sciences*. 2001;109(6):388-92.
30. Türköz Ç, Bavbek NC, Varlik SK, Akça G. Influence of thermoplastic retainers on *Streptococcus mutans* and *Lactobacillus* adhesion. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics*. 2012;141(5):598-603.
31. Bowden G, Li Y. Nutritional influences on biofilm development. *Advances in dental research*. 1997;11(1):81-99.
32. Levrini L, Mangano A, Margherini S, Tenconi C, Vigetti D, Muollo R, et al. ATP bioluminometers analysis on the surfaces of removable orthodontic aligners after the use of different cleaning methods. *International journal of dentistry*. 2016;2016.
33. Shpack N, Greenstein RB-N, Gazit D, Sarig R, Vardimon AD. Efficacy of three hygienic protocols in reducing biofilm adherence to removable thermoplastic appliance. *The Angle Orthodontist*. 2013;84(1):161-70.
34. Chang CS, Al-Awadi S, Ready D, Noar J. An assessment of the effectiveness of mechanical and chemical cleaning of Essix orthodontic retainer. *Journal of orthodontics*. 2014;41(2):110-7.
35. Gracco A, Mazzoli A, Favoni O, Conti C, Ferraris P, Tosi G, et al. Short-term chemical and physical changes in invisalign appliances. *Australian orthodontic journal*. 2009;25(1):34-40.
36. Teughels W, Van Assche N, Sliepen I, Quirynen M. Effect of material characteristics and/or surface topography on biofilm development. *Clinical oral implants research*. 2006;17(S2):68-81.
37. Wible E. Long-Term Mechanical and Physical Effects of Various Cleaning Methods on Retainer Thermoplastics: University of Illinois at Chicago; 2017.
38. Bernard G, Rompré P, Tavares JR, Montpetit A. Colorimetric and spectrophotometric measurements of orthodontic thermoplastic aligners exposed to various staining sources and cleaning methods. *Head & Face Medicine*. 2020;16(1):1-11.
39. Liu C-L, Sun W-T, Liao W, Lu W-X, Li Q-W, Jeong Y, et al. Colour stabilities of three types of orthodontic clear aligners exposed to staining agents. *International journal of oral science*. 2016;8(4):246-53.
40. Zafeiriadis AA, Karamouzos A, Athanasiou AE, Eliades T, Palaghias G. In vitro spectrophotometric evaluation of Vivera clear thermoplastic retainer discolouration. *Australian Orthodontic Journal*. 2014;30(2):192-200.
41. Hussein AM, Mohammed-Salih HS, Al-Sheakli II. Effects of various cleaning agents on polypropylene and copolyester thermoplastic orthodontic retainer materials. *Journal of Taibah University Medical Sciences*. 2022.

42. Koch C. Ultraschall in Medizin und Technik. In: Müller G, Möser M, editors. Ultraschall in Medizin und Technik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2017. p. 1-29.
43. Eichler HJ, Kronfeldt H-D, Sahm J. Das neue physikalische Grundpraktikum: Springer; 2006.
44. Sorge G. Faszination Ultraschall: Springer; 2002.
45. Kahlen I. Untersuchung des Reinigungseffektes von Ultraschall auf Oberflächen von Chirurgie-Instrumenten und dessen prototypische Umsetzung in ein Dekontaminationsverfahren. 2012.
46. Diedrich P. Keimbesiedlung und verschiedene Reinigungsverfahren kieferorthopädischer Geräte. Fortschritte der Kieferorthopädie. 1989;50(3):231-9.
47. Fathi H. In-vivo-Evaluation der Reinigungseffizienz verschiedener Reiniger für herausnehmbare kieferorthopädische Apparaturen: eine Pilotstudie 2015.
48. Faot F, Cavalcanti YW, Pinto LdR, da Silva WJ, Del Bel Cury AA. Efficacy of citric acid denture cleanser on the *Candida albicans* biofilm formed on poly (methyl methacrylate): effects on residual biofilm and recolonization process. BMC oral health. 2014;14(1):1-7.
49. Dyer D, Addy M, Newcombe R. Studies in vitro of abrasion by different manual toothbrush heads and a standard toothpaste. Journal of Clinical Periodontology. 2000;27(2):99-103.
50. Hoyle CE, Bowman CN. Thiol-En-Klickchemie. Angewandte Chemie. 2010;122(9):1584-617.
51. Ryu J-H, Kwon J-S, Jiang HB, Cha J-Y, Kim K-M. Effects of thermoforming on the physical and mechanical properties of thermoplastic materials for transparent orthodontic aligners. The korean journal of orthodontics. 2018;48(5):316-25.
52. Hooper S, West N, Pickles M, Joiner A, Newcombe R, Addy M. Investigation of erosion and abrasion on enamel and dentine: a model in situ using toothpastes of different abrasivity. Journal of clinical periodontology. 2003;30(9):802-8.
53. Tawakoli PN, Sener B, Attin T. Mechanical effects of different Swiss market-leading dentifrices on dentin: evaluation of cleaning potential, relative dentin abrasion and surface roughening. Swiss Dental Journal. 2015;125(11):1210-9.
54. Vogler N, Gluth G, Oppat K, Kühne H-C. Charakterisierung von Bauteiloberflächen-Rautiefenbestimmung mittels konventioneller und laserbasierter Verfahren. Bauingenieur. 2017;92(3):97-104.
55. Drewello R. Risikoziffer: Umweltschäden an Marmor und Sandsteinskulpturen erfassen und objektiv bewerten: University of Bamberg Press; 2018.

56. Vockert G. Der Einfluss von Zahnpasten und Mundspüllösungen auf die Oberflächenbeschaffenheit kieferorthopädischer Bänder und Brackets: Frankfurt (Main), Univ., Diss., 2006.
57. Šimunović L, Blagec T, Meštrović S. The Influence of Different Cleaning Protocols on the Surface Roughness of Orthodontic Retainers. *Applied Sciences*. 2023;13(3):1319.
58. Susarchick L. Staining and Cleaning Effects of Copolyester and Copolymer Retainer Materials: University of Illinois at Chicago; 2021.
59. Suter F, Zinelis S, Patcas R, Schätzle M, Eliades G, Eliades T. Roughness and wettability of aligner materials. *Journal of orthodontics*. 2020;47(3):223-31.