

Aus der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik
der Universität Würzburg

Direktor: Professor Dr. med. dent. Marc Schmitter

**Etablierung eines neuen Lehrkonzeptes für die Schienung von parodontal
gelockerten Zähnen mithilfe des 3D-Druckverfahrens**

Inauguraldissertation

zur Erlangung der Doktorwürde der
Medizinischen Fakultät
der
Julius-Maximilians-Universität Würzburg

vorgelegt von

Sören Alexander Rehling
aus Hamburg

Würzburg, August 2021

Referent: Prof. Dr. med. dent. Marc Schmitter

Korreferentin: Prof. Dr. med. Sarah König

Dekan: Prof. Dr. med. Matthias Frosch

Tag der mündlichen Prüfung: 20.01.2022

Der Promovend ist Zahnarzt

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	3D-Druck als Chance für neue Ausbildungsmethoden	1
1.2	Die parodontale Schienung	5
1.3	Überblick über bisherige 3D-gedruckte Übungsmodelle.....	9
1.4	Zielsetzung	13
1.5	Hypothese	14
2	Material und Methoden	15
2.1	Herstellung der Übungszähne	15
2.1.1	Gestaltung der gedruckten Übungszähne	15
2.1.2	Druck und Fertigstellung der Zähne	16
2.2	Übungsseminar.....	19
2.2.1	Teilnehmende Studierende	19
2.2.2	Vorbereitung der Studierenden	20
2.2.3	Ablauf der Schienung	20
2.3	Fragebogen	23
2.4	Auswertung der Übungszähne	24
2.4.1	Überlagerung der Dateien	24
2.4.2	Vermessung der Abstände zwischen Schienungs- und Referenzmodell	27
2.5	Datenerhebung und Datenschutz	27
2.6	Ethik- und Tierversuchsvotum	28
2.7	Statistik	28
2.7.1	Kolmogorov-Smirnov-Test.....	28
2.7.2	Kruskal Wallis- oder auch H-Test.....	29
2.7.3	Mann Whitney U-Test.....	30
3	Ergebnisse	33
3.1	Der Fragebogen.....	33
3.1.1	Personenbezogene Teilnehmerdaten.....	33

3.1.2	Bewertung der Realitätsnähe der Übung sowie Handhabung der Modellzähne	34
3.1.3	Bewertung der Schienungsmaterialien	34
3.1.4	Der Lernprozess	34
3.1.5	Bevorzugtes Material zur späteren Verwendung	35
3.1.6	Freitextbeurteilung der Materialien und der Kursorganisation	36
3.1.7	Verbesserungsvorschläge	37
3.2	Auswertung der Schienungsmodelle	39
3.2.1	Material Ribbond Ultra	39
3.2.2	Material everStick Perio	41
3.2.3	Statistische Datenanalyse und paarweise Vergleiche	43
3.3	Zusammenfassung der Ergebnisse	45
4	Diskussion	46
4.1	Diskussion der Methodik	46
4.1.1	Fallzahl	46
4.1.2	Studiendesign	47
4.1.3	Erfordernis der praktischen Ausbildung vor Patientenkontakt	50
4.1.4	Diskussion der Lehrmethodik	52
4.2	Diskussion der Auswertung	57
4.2.1	Vergleich zum Idealmodell	57
4.2.2	Auswertungssoftware	57
4.3	Diskussion der Ergebnisse	59
4.3.1	Diskussion von Modell und Schienungsmaterial	59
4.3.2	Kosten der Druckzähne	60
4.4	Schlussfolgerung	62
5	Zusammenfassung	63
6	Literaturverzeichnis	65
	Anhang	
	Abkürzungsverzeichnis	
	Abbildungsverzeichnis	
	Tabellenverzeichnis	
	Danksagung	

Lebenslauf

1 Einleitung

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird in der folgenden Arbeit bewusst auf die genderkonforme Formulierung von Patientinnen und Patienten, Teilnehmerinnen und Teilnehmern sowie Studentinnen und Studenten verzichtet. Die Begriffe Patientinnen, Teilnehmer, Studierende und sonstige geschlechtsbezogene Bezeichnung werden verallgemeinernd sowie geschlechterübergreifend verwendet.

1.1 3D-Druck als Chance für neue Ausbildungsmethoden

Die Medizin steht aufgrund von technischen Fortschritten im Umbruch. Mit der bevorstehenden neuen Approbationsordnung für Zahnmediziner und dem sich daraus ergebenden stark veränderten Ausbildungsplan ist es an der Zeit, neue, zukunftsweisende Lehrmethoden zu entwickeln. Diese werden althergebrachte Verfahren ersetzen, verbessern oder erweitern, um die Lehre zukunftsorientierter und moderner zu gestalten. Das Ziel dieser Studie war es, ein neues Konzept für die präklinische Schulung zu entwickeln, parodontal gelockerte Zähne unter einheitlichen Bedingungen zu schienen. Hierbei wurde der an Relevanz gewinnende 3D-Druck zur Herstellung der Übungszähne eingesetzt.

Aktuell stehen mehrere technische Möglichkeiten des 3D-Druckes zur Verfügung, welche im folgenden Abschnitt genauer dargestellt werden.

Die unpräziseste, aber auch kostengünstigste und somit einsteigerfreundlichste Methode ist das Fused Deposition Modeling (FDM), zu Deutsch Schmelzschichtung. Aufgrund der günstigen Anschaffungs- und Produktionskosten ist dies die am weitesten verbreitete 3D-Druckmethode im Hobbybereich. Sie zeichnet sich dadurch aus, dass kabelförmige Filamente in einer Spritzdüse extrudiert und geschmolzen, sowie auf der Druckunterlage Schicht für Schicht aufgetragen werden. Dieser Druckvorgang benötigt somit für komplexere, instabile oder größere Druckkörper Stützelemente, die im Anschluss an den Druck manuell entfernt werden müssen. Dem genannten finanziellen Vorteil steht jedoch der deutliche Präzisionsnachteil verglichen mit anderen Druckverfahren mit einer vergleichsweise

höheren Auflösung gegenüber, weswegen die FDM nur zum Drucken von Prototypen oder Basis Proof-of-Concept-Modellen geeignet ist. Als Materialien werden hier Standard-Thermoplaste wie Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere (ABS) oder Polylactide (PLA) genutzt.

Die in der Industrie am häufigsten eingesetzte 3D-Druckmethode ist das Selective Laser Sintering (SLS). Sie zeichnet sich dadurch aus, dass ein Hochleistungslaser auf ein Polymerpulver trifft und dort die Partikel aufschmilzt, welche sich zu einem dreidimensionalen Körper verbinden. Aufgrund des nicht aufgeschmolzenen Pulvers, welches den Druckkörper während des weiteren Druckvorganges umschließt, ist es oft nicht notwendig, wie bei den anderen beiden etablierten Druckmethoden, während der Konstruktion des Körpers Stützelemente einzuplanen. Zur Anwendung kommen hier technische Thermoplaste wie Nylon. Nylon ist aus medizinischer Sicht von Vorteil, da es sterilisierbar und somit beispielsweise im OP-Saal einsetzbar ist (Dawood et al., 2015). Eine Unterform der SLS ist das Electron Beam Melting (EBM), bei welcher das Druckpulver in einer erhitzten Kammer durch einen Elektronenstrahl aufgeschmolzen wird. Aufgrund der hohen Temperaturen ist nach Ende des Drucks teilweise eine Nachbehandlung mit Wärme von Nöten, um Spannungen aus dem Druckobjekt zu entfernen. Nach Abschluss der Nachbehandlung weist das gedruckte Modell eine hervorragende Dichte und geringe Porosität auf. Der Prozess ist jedoch sehr kostspielig, das Pulver ist potenziell gesundheitsschädlich und aufgrund der erhitzten Kammer besteht bei der Produktion Explosionsgefahr (Dawood et al., 2015).

Eine besondere Form des 3D-Druckes mit Pulver stellt die Powder Binder Printings Technologie (PBP) dar. Hier wird wie bei einem klassischen Drucker ein Inkjet- (Tintenstrahl-) Kopf genutzt, welcher im Vorfeld modifiziert wurde. Dieser infiltriert eine dünne Schicht Gipsmörtelpulver mit Wasser. Das Modell wird mit einer neuen dünnen Schicht Pulver überschichtet und erneut infiltriert. So entsteht nach und nach das Modell. Der große Vorteil dieses Verfahrens ist, dass durch den Einsatz von eingefärbtem Wasser farbige Modelle gedruckt werden

können. Nachteilig ist die Stabilität der Gipsmodelle, welche jedoch nach Beendigung des Druckes durch Infiltration mit Epoxidharz oder Cyanoacrylat deutlich verbessert werden kann (Dawood et al., 2015).

Die präziseste Form des 3D-Druckens ist das Polyjetverfahren (PPJ). Auch hier wird eine besondere Art Druckkopf benötigt. Dieser trägt flüssigen Kunststoff auf eine Trägerplattform auf, wo er sofort mittels UV-Licht durchgehärtet wird. Durch das tropfenförmige Auftragen des flüssigen Materials verschmelzen die Schichten des Körpers miteinander, weshalb kaum Rillen oder Linien im gedruckten Körper zu erkennen sind. Bei überhängenden Bereichen im Druckkörper werden ebenfalls Stützstrukturen benötigt. Ein großer Vorteil des Verfahrens ist, dass verschiedene Materialien zeitgleich mit hoher Präzision miteinander verarbeitet werden können. Das PPJ-Verfahren ist jedoch sowohl sehr zeitaufwendig als auch mit hohen Kosten verbunden (3faktor.com, zuletzt besucht am 24.05.2021, Dawood et al., 2015). Wenn jedoch Kosten und Zeitaufwand kein Hindernis sind, erweist sich das Verfahren als dasjenige mit den geringsten Fehlerabbildungen und der größten Genauigkeit unter den 3D-Druckverfahren (Jin et al., 2018, Kim et al., 2018, Brown et al., 2018).

Die älteste und am weitesten etablierte Methode ist die Stereolithographie (SLA). Sie wurde Anfang der 1970er Jahre erfunden und war die weltweit erste Technologie des 3D-Druckes. Sie bietet nicht nur eine sehr hohe Präzision, sondern nach dem Polyjetverfahren auch die beste Oberflächenbeschaffenheit des endgültigen Druckkörpers sowie ein sehr gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis. Die SLA nutzt wie die SLS einen Laser, jedoch auf einem anderem Einsatzgebiet: Das dem Verfahren zugrundeliegende Konzept nennt sich Photopolymerisation, wobei ein Laser flüssiges Harz in einer dafür vorgesehenen Schale auf der Druckplatte punktgenau durchhärtet. Auch die SLA benötigt in der Planung im Vorfeld Stützstrukturen, da der fertige Körper während des Druckes von flüssigem Harz umgeben ist, welches keine stützende Funktion bietet. Neben den relativ niedrigen Kosten und der hohen Präzision bietet die SLA zudem noch den großen Vorteil, dass die Harze sehr divers gestaltet werden und somit in ihren optischen, mechanischen und thermischen Eigenschaften genau den Vorstellungen des Anwenders angepasst werden können (Saleh et al., 2015, Dawood et al., 2015).

Somit stellte die SLA für die Herstellung der Studienzähne das am besten geeignete Verfahren dar, da es ein gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis, hohe Präzision mit besonders glatten Oberflächen und eine Anpassung der Materialien an ihren Einsatz ermöglicht.

Der 3D-Druck hat bereits ein breites Einsatzgebiet in der Zahnmedizin zu verzeichnen. Die ersten Anwendungen fanden sich in der Chirurgie, in Form von 3D-gedruckten, patientenspezifischen, anatomischen Modellen. Die Patientendaten wurden mithilfe der digitalen Volumentomographie (DVT, engl. CBCT) gewonnen, welche in der zahnärztlichen Praxis mittlerweile fest etabliert ist (O'Neil, 2012). Somit lagen bereits digitale 3D-Modelle vor, anhand derer Operationen geplant werden konnten. Die Möglichkeit, diese Modelle zu drucken und somit operative Eingriffe wie beispielsweise Implantationen (Chan et al., 2010) an ungewöhnlich anatomisch geformten Kiefern vorab zu üben (Sinn et al., 2006), führten in Kombination mit ebenfalls gedruckten Bohr- oder Schnitthilfen dazu, dass Operationen günstiger, schneller durchzuführen und im Ergebnis besser vorherzusagen waren (Dawood et al., 2015, Tardieu et al., 2007).

Als großer Vorteil des 3D-Druckes gilt, dass keine aufwendige Prozessplanung vonnöten ist, um komplexeste Geometrien in einem einzigen Produktionsschritt herzustellen. Hinzu kommt, dass Designänderungen ohne großen Aufwand am Computer durchgeführt werden und im Anschluss direkt als Modell hergestellt werden können (Gibson et al., 2014). Dies führt insgesamt zu einer deutlichen Einsparung von Entwicklungszeit, -kosten und -ressourcen (Feldmann et al., 2019).

Auch in der zahnmedizinischen Ausbildung hat der 3D-Druck einen immer höheren Stellenwert.

Seit 2007 ist ein Anstieg der Publikationen über 3D-Druck im medizinischen sowie zahnmedizinischen Bereich zu beobachten, wobei der Anteil im medizinischen Bereich überwiegt. Die Publikationen der Zahnmedizin sind hauptsächlich

in den Fächern der Oralchirurgie und Prothetik zu finden, gefolgt von der Kieferorthopädie. Sehr gering vertreten sind Publikationen im Bereich der Endodontologie sowie Parodontologie (Oberoi et al., 2018).

Der Einsatz des 3D-Druckes beschränkte sich in der Parodontologie klinisch bisher auf Schablonen für die gingivale Rot-Weiß-Ästhetik im anterioren Bereich der Mundhöhle, welche aufgrund der hohen Genauigkeit und Individualisierbarkeit für geführte Gingivektomie und „smile-design“ genutzt wurden (Li et al., 2017). Es gibt zudem mehrere Studien, die auf dem Versuch basieren, die Regeneration von parodontalem Gewebe mit 3D-gedruckten Gerüsten zu unterstützen (Oberoi et al., 2018).

1.2 Die parodontale Schienung

Die Schienung von Zähnen ist ein altbekanntes Heilprinzip. Die erste nachgewiesene Schienung erfolgte bereits 2500 Jahre v. Chr. in Ägypten in Form einer Drahtligatur, welche einen dritten Molaren mit resorbierten Wurzeln an den Nachbarzahn schiente. Zu den Indikationen, Zähne miteinander zu verbinden, zählen Traumata wie Dislokationen unterschiedlichen Schweregrades und Wurzelquerfrakturen, post-kieferorthopädische Verankerung, Verhinderung von Zahnwanderung und -kipfung sowie Lockerungsgrade bedingt durch parodontale Schädigung oder okklusales Trauma (Watkins et al., 2000, Rao et al., 2011).

Patienten mit parodontalen Erkrankungen zeichnen sich unter anderem durch den Verlust von Alveolarknochen und daraus resultierenden Lockerungsgraden der befallenen Zähne aus (Mühlemann et al., 1965). Durch permanentes okklusales Trauma und Auslenkung des Zahnes wird der Knochenabbau gefördert und der Lockerungsgrad des Zahnes erhöht. Hierbei werden primäres und sekundäres Trauma unterschieden. Beim primären okklusalen Trauma entwickelt der Zahn durch abnormale okklusale Belastungen Lockerungsgrade, ohne dass eine Entzündung oder vertiefte Taschen des Parodonts vorliegen, röntgenologisch ist ein erweiterter Parodontalspalt (PA-Spalt) zu erkennen. Das sekundäre okklusale

Trauma zeichnet sich durch eine vorhandene Entzündung des Parodonts mit Taschenbildung aus, welches in Kombination mit okklusal auftretenden Kräften das Parodont nachhaltig zerstören kann (Watkins et al., 2000). Der Knochen wird durch ein Weichgewebe ersetzt, welches nach Entfernung des okklusalen Traumas Kapazitäten zur Knochenneubildung besitzt. In einer klinischen Untersuchung konnte gezeigt werden, dass die Knochenneubildung nach Entfernung des Weichgewebes deutlich verringert war im Gegensatz zu der Kontrollgruppe, wo das Gewebe belassen wurde (Nyman et al., 1982). Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass der radiologisch sichtbare erweiterte PA-Spalt kein pathologisches Anzeichen einer Erkrankung, sondern eine reversible physiologische Adaptation des Zahnhalteapparates an ein anhaltendes okklusales Trauma ist. Wie weiter oben beschrieben ist jedoch zu unterscheiden, ob der Zahn seine Lockerung aufgrund eines erweiterten PA-Spaltes oder einer chronischen Entzündung mit horizontalem Knochenverlust erhalten hat. Bei einer Erweiterung des PA-Spaltes ohne horizontalen Knochenverlust, also nach primär okklusalem Trauma, genügt eine okklusale Adjustierung, welche den Zahn entlastet, um eine Verringerung der parodontalen Beweglichkeit zu erreichen. Bei Lockerung aufgrund stärkeren Knochenabbaus sowie okklusaler Überbelastung hingegen, dem sekundären okklusalen Trauma, hilft eine rein okklusale Veränderung nicht. In diesem Fall muss der lockere Zahn an benachbarte Zähne geschient werden, wenn der Patient durch die Zahnmobilität beim Kauen gestört wird (Mangla et al., 2018). Sollten mehrere Zähne gelockert sein, ist es das Ziel, durch die Schienung über eine weitere Spanne des Zahnbogens die Mobilität der Zähne so weit herabzusetzen, dass diese als normal gilt. Dies führt zu einer deutlich herabgesetzten Hebelkraft, wodurch auch die Stabilität der Verblockung gesichert ist und die Lockerung der Zähne nicht weiter fortschreitet (Nyman et al., 1994). Die Verblockung parodontal gelockerter Zähne führt direkt nach ihrer Durchführung zu signifikant herabgesetzten Zahnbeweglichkeiten (Stoller et al., 1981). Die Schienung an parodontal gesunde Nachbarzähne führt zu erhöhter Kraftübertragung an die gesunden Zähne, was in einer Stressminderung am geschädigten Zahn resultiert (Durrani et al., 2019, Watkins et al., 2000). Zudem führt eine Schienung nicht zu erhöhtem

Risiko des Zahnverlustes, geschiente Zähne zeigen eher eine bessere Langzeitüberlebensrate (Graetz et al., 2019).

Kantor et al. zeigten in ihrer Studie an Totenkopffaffen, dass bei einer Koexistenz von okklusalem Trauma sowie einer Entzündung des marginalen Parodonts die Knochenregeneration deutlich herabgesetzt ist, wenn nur das okklusale Trauma entfernt wird. Eine duale Therapie des Traumas und der parodontalen Entzündung resultierte in einer Regeneration und somit Zunahme des Knochenvolumens. Die Höhe des crestalen approximalen Knochens hingegen verblieb im reduzierten Zustand. Die Verbesserung durch die duale Therapie deutet darauf hin, dass die Entzündung einen inhibitorischen Effekt auf den Wiederaufbau des Knochengewebes besitzt (Kantor et al., 1976). Dies wurde durch eine Studie an Beagle Hunden unterstützt, in welcher künstliche Plaqueakkumulation jeweils am geschienten sowie ungeschienten Zahn herbeigeführt wurde. Der Knochenrückgang war bei beiden Zähnen ähnlich, es gab keine signifikante Verbesserung nur durch die Schienung des einen Zahnes. Da der parodontale Gewebsverlust in diesem Experiment künstlich hervorgerufen und aufrecht erhalten wurde, ist das Ergebnis jedoch nur bedingt aussagekräftig (Ericsson et al., 1993).

Die Schienung von Zähnen sollte nur durchgeführt werden, wenn die Zahnlockerung die Kaufunktion oder Ästhetik der Zähne stört. Können diese Faktoren durch okklusale Adjustierung einzelner Zähne verbessert werden, ist die Schienung kontraindiziert, außer der Patient fühlt sich weiterhin in seinem Kaukomfort gestört (Nyman et al., 1994).

Eine veraltete Form der parodontalen Schienung stellt die Elbrecht-Schiene dar. Diese herausnehmbare Schiene wurde oft in herausnehmbaren Zahnersatz integriert und diente mit interdentalen Greifern oder Krallen zwischen den Frontzähnen zur Schienung von gelockerten Inzisiven. Aufgrund der ästhetisch störenden Krallen im Bereich der Schneidekanten, der Gussklammern im Seitenzahnbereich und der geringen Stabilisierungswirkung auf die Zähne wird diese Art der Schienung heute jedoch kaum noch im klinischen Alltag eingesetzt (Lehmann et al., 2009).

Früher wurden gegossene Metallnetze, Drähte oder Pins mit Komposit an Zähnen mit Lockerungsgrad zur Stabilisierung dieser befestigt. Nachteile dieser Methode waren die teilweise hohen Kosten, größerer technischer Aufwand bei gegossenen Netzen sowie eine hohe Schichtstärke, die zusätzlich auf den Zahn aufgebracht wurde. Durch neue Materialien, wie z.B. Polyethylenbänder oder Glasfaserstränge, welche in die Kompositverblockung eingebracht werden, können Zahnärzte heutzutage Patienten mit kostengünstigen, bruchzähnen, dünnen und deutlich haltbareren Lösungen versorgen. Diese Arten der Versorgung nennen sich faserverstärkte Komposite (FRC = Fiber Reinforced Composite) (Agrawal et al., 2011).

Alle metallenen Verblockungsmaterialien haben zusätzlich den Nachteil, sich chemisch nicht mit Kompositen zu verbinden. Dies führte zur Entwicklung von Verstärkungsfasern aus Polyethylen mit ultrahohem Molekulargewicht in Form von Bändern, welche nicht nur eine hohe Festigkeit und gute Biokompatibilität mit sich brachten, sondern auch ästhetisch ansprechend sowie leichter zu benutzen waren und eine chemische Verbindung mit dem eingesetzten Komposit eingehen konnten (Kathariya et al., 2016, Ritter, 2004). Eines der erhältlichen Polyethylenbänder ist Ribbond Ultra (Ribbond Inc, Seattle, Washington USA), ein einfach anzuwendendes Material für eine permanente Verblockung zur Stabilisierung von Zähnen (Yildirim Oz et al., 2006).

Eine andere Variante eines Werkstoffes, welcher sich zur Schienung eignet und mit Kompositen verbindet, sind vorimprägnierte, unidirektionale Glasfasern. Hierzu zählt das Material GC everStick Perio (GC Germany GmbH, Bad Homburg, Deutschland), welches in Kooperation zwischen der Universität Turku in Finnland und der Arbeitsgruppe StichTech Ltd. entwickelt wurde.

Die mittelfristige Anwendbarkeit und Überlebensrate von everStick Perio wurde 2011 in einer klinischen Studie überprüft. 19 Patienten, welche bereits eine Parodontaltherapie und -hygienephase durchlaufen hatten, bekamen eine Schienung der unteren Frontzähne mit Lockerungsgrad 3 und wurden über 4,5 Jahre hinweg regelmäßig untersucht. Dabei verbesserten sich die Taschentiefen der geschienten Zähne bis zum Ende der Studie signifikant. An einem Patienten

trat nach 40 Monaten ein partieller Defekt im Kompositverbund auf, welcher repariert werden konnte und anschließend bis zum Ende der Studie stabil in situ verblieb (Kumbuloglu et al., 2011).

Der bisher einzige Vergleich der Materialien everStick Perio und Ribbond Ultra fand in einer Studie im Jahr 2011 statt. Hierin wurden beide Materialien für die Zeiträume 0 s, 5 s sowie 5 min mit der Flüssigkeit Heliobond (Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein) infiltriert, unter Halogenlicht durchgehärtet und unter einem Elektronenmikroskop miteinander verglichen. Die Studie zeigte, dass eine längere Anfeuchtzeit zu einer tieferen Penetration der Flüssigkeit ins Gewebe beider Materialien führte, was eine deutliche Verbesserung der morphologischen Eigenschaften zufolge hatte (Lucchese et al., 2011).

Eine klinische Vergleichsstudie beider Materialien liegt nach aktuellem Kenntnisstand noch nicht vor.

1.3 Überblick über bisherige 3D-gedruckte Übungsmodelle

Es gibt derzeit nur eine überschaubare Anzahl an Ansätzen, den 3D-Druck in der zahnmedizinischen Ausbildung einzusetzen. Des Weiteren steht nur eine limitierte Auswahl an Übungsmodellen zur Verfügung, welche von den Herstellern KaVo (KaVo, Biberach an der Riß, Deutschland) sowie Frasaco (Frasaco, Tettnang, Deutschland) angeboten werden und welche aufgrund ihrer idealisierten Zahnstellungen nur eine bedingte patientennahe Ausbildung erlauben. Dabei ist es wichtig, dass Studierende sowie Zahnärzte neue Techniken intensiv üben und eine ausreichende technische Kompetenz erreichen, bevor sie am Patienten zum Einsatz kommen (Hanafi et al., 2020).

Aufgrund der größeren Variabilität der Übungsmöglichkeiten besteht mit neuen Technologien die Chance, das Spektrum der vorklinischen Ausbildung mit 3D-gedruckten Zähnen deutlich zu erweitern und die Studierenden besser auf die klinische Diversität der Patienten vorzubereiten. So können sie Fehler begehen und aus ihnen lernen, bevor es im klinischen Studienabschnitt zu Behandlungsfehlern am Patienten kommt (Höhne et al., 2020b).

Studierende bewerteten bisher entwickelte 3D-Druck Modelle als herausfordernder gegenüber den herkömmlichen Übungszähnen, fühlten sich jedoch besser vorbereitet und hatten subjektiv einen deutlich geringeren Stresspegel in der ersten Patientenbehandlung nach dem vorhergehenden Training (Hanafi et al., 2020).

Es wurden bereits mehrere verschiedene Übungszähne an der Universität Würzburg zur vorklinischen Ausbildung entwickelt:

Der erste Übungszahn (Zahn 36) hatte komplexe anatomische Eigenschaften im Sinne einer ausgedehnten kariösen Läsion sowie einer Pulpenkammer und wurde in dem Standard KaVo Modell verwendet. Die Übung bestand aus Kariesexkavation, Abdeckung der eröffneten Pulpa, Legen einer Aufbaufüllung und Präparation einer Krone. Die Studierenden konnten blaues LED-Licht mit einer Wellenlänge von 395 nm zur Kontrolle der Kariesexkavation sowie der Aufbaufüllung in einer geschlossenen Kammer nutzen (Höhne et al., 2019a).

Aufgrund des Übungserfolges und positiven Feedbacks von Seiten der Studierenden wurde das Konzept weiterentwickelt. Der zweite Übungszahn wurde entwickelt, um eine Präparation am natürlichen Zahn möglichst realitätsnah zu gestalten, weshalb in Härte und Farbe unterschiedliche Materialien zur Darstellung von Zahnschmelz und -dentin sowie der Pulpa zum Einsatz kamen. Nach erfolgreicher Präparation für eine Krone wurde der Zahnstumpf trepaniert, um ein Gefühl für den Substanzverlust durch die Präparation zu erlangen. Anschließend wurde die Pulpa abgedeckt und verschlossen. Zur selbstständigen Kontrolle erhielten die Studierenden ein Modell mit idealer Präparation des Stumpfes. Die Übung wurde von Studierenden, sowie fertig ausgebildeten Zahnärzten durchgeführt und bekam gleichermaßen großen Zuspruch für die Realitätstreue (Höhne et al., 2019b).

Der Ansatz der Trepanation und Zugang zum Wurzelkanal wurde mit der Entwicklung eines dritten Übungszahnes weiterverfolgt. Dieser stellte die Übungsmöglichkeit eines Stift-Stumpf-Aufbaus anhand eines stark zerstörten und bereits wurzelkanalgefüllten Zahnstumpfes dar. Die Studierenden sollten die Gutta-

percha aus dem distalen Kanal entfernen, die Bohrung für den Wurzelstift vornehmen und diesen einprobieren. Zum Ausschluss einer Perforation konnte der Zahnstumpf zu jeder Zeit aus dem Modell entnommen werden. Mit dieser Übung konnte ein positiver Lerneffekt nachgewiesen werden, da mit jedem gesetzten Stift, trotz der für Anfänger schwierigen Situation, die Wurzelperforationen signifikant abnahmen (Höhne et al., 2020b).

Der vierte Übungszahn verfolgte erneut die Verbesserung der Kronenpräparation. Es wurde ein Zahn entwickelt, welcher unter der Schmelzschicht einen farblich stark abweichenden Bereich enthielt. Dieser stellte den idealen Substanzabtrag während der Präparation dar. Unterhalb der eingefärbten Schicht kam erneut die normale Zahnfarbe zum Vorschein, um eine zu invasive Präparation zu identifizieren. Auch dieser Zahn zeigte einen deutlichen Trainingseffekt gegenüber den Standard KaVo Zähnen und erhielt großen Zuspruch von Seiten der Studierenden (Höhne et al., 2020c).

Ein ähnlicher Ansatz wurde 2018 an der Universität Iowa verfolgt, um eine ideale Präparation zur Aufnahme einer Krone zu vermitteln. Da zweidimensionale Lehrmittel keine räumliche Tiefe oder Winkel von präparierten Flächen zueinander darstellen, die Information über Größe und Form eines Objektes aber essentiell sind um es erfolgreich nachzuarbeiten, wurden ideal präparierte Modellzähne eingescannt und im 3D-Druck Verfahren hergestellt. Diese Zähne wurden in die klassischen Übungsmodelle eingegliedert und dienten als Anschauungsobjekte für die Studierenden (Boonsiriphant et al., 2019).

Ein früherer Versuch, die Lehre um 3D-Modelle zu erweitern, erfolgte 2010 in Brasilien. Hintergrund war auch hier die mangelnde Nachvollziehbarkeit einer Präparation aufgrund von 2D-Lehrmaterialien sowie limitierter Einsicht der Studierenden bei Live Demonstrationen durch den Assistenten. Grundlage war das digitale Design eines Prämolaren mit okklusaler, mesial-okklusaler und mesial-okklusal-distaler Kastenpräparation, welcher im Additive-Manufacturing-Verfahren (AM-Verfahren) als Modell hergestellt und digital in Videoform betrachtet werden konnte. Die so geschaffenen Lehrunterlagen wurde sowohl vom Lehrpersonal als auch durch die Studierenden überwiegend als sehr gut bewertet (Soares et al., 2013).

In Chile wurden an einer zahnmedizinischen Fakultät, mithilfe von Scans extrahierter Echtzähne, 3D-Modellzähne gedruckt, welche eine Alternative bzw. Erweiterung zur Lehre beim Studium der Zahnanatomie und -morphologie an extrahierten Echtzähnen und Standardmodellzähnen darstellten (Cantín et al., 2015). Eine vielversprechende Studie von der Universität Münster aus dem Jahr 2016 nutzte drei verschiedene 3D-Modelle zum Erlernen neuer Fähigkeiten. Ziel war es, den Studierenden die komplexen interdisziplinären Zusammenhänge der zahnmedizinischen Fächer näherzubringen. Studierende im vierten Jahr ihrer Ausbildung hatten die Möglichkeit, am ersten Modell die Präparation von Veneers, deren provisorische Versorgung sowie die klassische 2-Phasen Abformung zu üben. Das zweite Modell enthielt insuffiziente Füllungen, keilförmige Defekte, Chipping und Abrasionen. Die Studierenden lernten, insuffiziente Füllungen sowie Karies zu entfernen und die vorhandenen Defekte in Adhäsivtechnik inklusive Säure-Ätz-Technik wiederherzustellen. Das dritte Modell enthielt eine insuffiziente Kronenrestauration sowie ebenfalls kariöse Läsionen. Die Studierenden mussten die Krone mitsamt Befestigungszement entfernen, die Karies exkavieren, eine Aufbaufüllung legen und den Zahn für eine neue Krone präparieren, wofür ein Zeitfenster von drei Stunden vorgesehen war. Die Übungsmodelle wurden als gut bewertet, wobei der größte Kritikfaktor das Fehlen einer andersfarbigen Gingivamaske war (Kröger et al., 2017).

An der Universität München wurden ebenfalls zwei Übungsmodelle entwickelt. Das erste Modell basierte auf einem DVT eines Oberkiefers und wurde digital designt, um traumatisch geschädigte obere Frontzähne dazustellen. Die Studierenden bekamen einen komplexen Fall, welcher schriftliche Dokumentation, ein simuliertes Telefongespräch und schließlich die Versorgung der Zahntraumata am 3D-Modell beinhaltete (Reymus et al., 2018).

Das zweite Modell basierte auf DVT-Aufnahmen ausgewählter extrahierter menschlicher Zähne. Die daraus digital erstellten sowie gedruckten 3D-Übungszähne dienten zur einheitlichen Übung endodontischer Behandlung inklusive Trepanation, Aufbereitung und Abfüllung der Wurzelkanäle (Reymus et al., 2019).

Ein anderes 3D-Übungsmodell wurde für die Lehre der Kinderzahnheilkunde entwickelt. Die Studierenden mussten am 3D-gedruckten Modell eines jungen Patienten, welches auf einem Computertomographie-Datensatz (CT-Datensatz) basierte, eine Pulpotomie sowie eine Präparation für eine Stahlkrone am Zahn 85 vornehmen und dies mit dem Vorgang am herkömmlichen Frasaco-Modell vergleichen. Das Ergebnis war, dass bezüglich des Übungserfolges kein signifikanter Unterschied zwischen den Modellen zu erkennen war, die Studierenden jedoch subjektiv das 3D-Modell als eine realistischere Erfahrung einstufen (Marty et al., 2019).

Für die Ausbildung am parodontal geschädigten Gebiss gibt es bisher Modelle der Firma KaVo (KaVo, Biberach an der Riß, Deutschland) zur Bestimmung des Parodontalstatus und Erstellung eines Behandlungsplanes, für Scaling und Kürettage sowie Root planing („Wurzelglättung“) und Wurzelamputationen (Kavo.com, 02.01.2021).

Die Firma Frasaco (Frasaco, Tettngang, Deutschland) bietet zwei Modelle mit anfänglicher bis fortgeschrittener sowie weit fortgeschrittener Parodontitis mit eingeschraubten Modellzähnen zum Kauf an (Frasaco Lieferprogramm 2020, s. 51-55).

Ein anderer Versuch, die Lockerung von Frontzähnen an Phantommodellen zu simulieren, erfolgte bereits 2011, indem Frasaco Zähne mit Zinnfolie umwickelt und der freiliegende Raum der Alveole mit dünnfließendem Silikon aufgefüllt wurde. Diese Technik erwies sich als zu umständlich und unpraktisch für die Anwendung zur Ausbildung (Adam, 2011).

Andere Modelle für Übungen an gelockerten und verschobenen Zähnen sind auf dem Markt aktuell nicht zu finden.

1.4 Zielsetzung

Ziel dieser Studie war es, ein Modell für die Lehre der parodontalen Schienung zu entwickeln und somit die Bandbreite der konventionellen Übungsmodelle zu

erweitern. Zusätzlich sollten digitale Lehrinhalte in Form eines Videos, sowie online verfügbare Skripte bereitgestellt werden. Eine kostengünstige Produktion wurde angestrebt, weswegen das 3D-Druck Verfahren zur Herstellung der Modellzähne genutzt wurde. Wenn die notwendige, relativ preisgünstige Hardware vorhanden ist, können die erstellten Modellzähne später an jeder anderen zahnmedizinischen Fakultät kostengünstig produziert werden.

Neben der reinen Schienungsübung der oberen Frontzähne sollten zwei Schienungsmaterialien von unerfahrenen Studierenden des siebten Fachsemesters getestet und miteinander bezüglich ihrer Handhabung verglichen werden.

Um ein einheitliches Werkzeug zur Bewertung sowohl der Modellzähne als auch der Schienungsmaterialien zu gewährleisten, wurde ein Fragebogen entwickelt, welcher direkt im Anschluss an die Übung per QR-Code auf dem Smartphone aufgerufen und ausgefüllt wurde. Die Schienungen wurden nach Abschluss des Kurses eingescannt und mit einer 3D-Analysesoftware ausgewertet.

1.5 Hypothese

Mit der dieser Arbeit zugrundeliegenden Studie sollen folgende Hypothesen überprüft werden:

1. Die Druckzähne stellen eine praxisnähere Alternative zum Standardmodell für eine realistische Simulation einer parodontalen Schienung dar.
2. Das Material Ribbond Ultra ist in seiner Handhabung besser für Anfänger geeignet als das Material GC everStick Perio.
3. Bei der zweiten Schienung erzielen die Teilnehmer unabhängig vom Material aufgrund des Lerneffektes ein messbar besseres Ergebnis.

2 Material und Methoden

Die Entwicklung der Übungszähne wird anhand Abbildung 1 schematisch dargestellt.

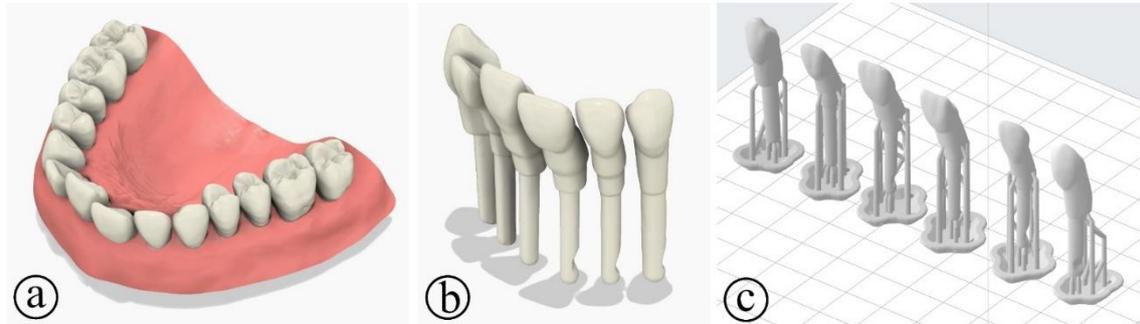


Abb. 1: Überblick über die Herstellung der Druckzähne. a) Modell mit veränderten Zahnpositionen, b) Studienzähne mit veränderter Basis, c) Vorbereitung zum Druck mit Stützstruktur. Eigene Abbildung, erstellt mit Gom Inspect und Inkscape.

2.1 Herstellung der Übungszähne

2.1.1 Gestaltung der gedruckten Übungszähne

Diese Studie nutzte neu entwickelte und veränderte Zähne auf Basis von Scans der originalen KaVo Übungszähne, sodass diese weiterhin im klassischen Studienmodell für Dentalausbildung (KaVo, Biberach an der Riß, Deutschland) verwendet werden können (Abb. 1). Hierfür wurde das gesamte Oberkiefermodell sowie die Front- und Eckzähne des Oberkiefers einzeln mit einem InEos X5 Scanner (Dentsply Sirona, York, Pennsylvania, USA) digitalisiert. Um Spiegelungen auf den Modelloberflächen zu verringern, wurden sowohl die Einzelzähne als auch die Modelle mit Scanspray vorbehandelt (Helling GmbH, Heidgraben, Deutschland). Als Verarbeitungsprogramm wurde InLab (Dentsply Sirona, V.18.0.131717), genutzt, es erfolgten Einzelstumpfaufnahmen im 55° Schwenkungsbereich. Der Scanner benutzt das sogenannte Streifenlichtscanverfahren (Dentsply Sirona, 2020), welches mit einer Brücke als Prüfkörper eine Genauigkeit von $2,1 \mu\text{m} \pm 2,8 \mu\text{m}$ sowie bei einem Inlay als Prüfkörper eine Genauigkeit von $1,3 \mu\text{m} \pm 0,4 \mu\text{m}$ besitzt, was nach DIN EN ISO12836:2015 überprüft wurde (ZM-Online.de, 07.11.2020, Sirona, 25.03.2021a).

Das zu scannende Objekt wurde auf einer Platte mit Parallelschraubstock befestigt und mit dieser magnetisch auf einem schwenk- und rotierbaren Arm montiert. Das Modell wurde bis zum Ende des Scans nicht aus seiner Schraubplatte bewegt. Ein Projektor projizierte ein Streifenmuster wechselnder Breite auf das Modell, welches von einer Kamera aufgenommen wurde. Hierbei änderte der Rotationsarm die Ausrichtung des Modelles zu Projektor und Kamera zwischen den Aufnahmen, um die dreidimensionale Darstellung berechnen zu können. Die Scansoftware ermittelte aus den zahlreichen zweidimensionalen Bildern ein 3D-Modell. Dieses Modell wurde im Anschluss im Dateiformat „standard tessellation language (.stl)“ mit der Einstellung „höchste Auflösung“ gespeichert und in Autodesk ReCap Photo geöffnet (Autodesk, San Rafael, USA). Hier wurde der Datensatz in ein reines Quadmesh umgewandelt und als "Wavefront OBJ-file (.obj)"-Format gespeichert. Dieser Datensatz wurde anschließend in das Programm Autodesk Inventor 2019 (Autodesk, San Rafael, USA) importiert. In Autodesk Inventor wurden in der Konstruktionsdatei die Basis der Modellzähne 12-22 soweit verändert, sodass sie nicht mehr der eugnathen durchschnittlichen Position, sondern der eines parodontal vorgeschädigten und gelockerten Gebisses entsprachen. Um die Lockerung der Zähne zu simulieren, wurden die Retentionsstifte der Modellzähne, welche normalerweise für festen Halt im Modell sorgen, zum größten Teil entfernt. Zusätzlich wurden die Zahnformen derart verändert, dass eine deutliche Verschiebung und Verdrehung der Zähne zum Standardmodell erkennbar war. Die Zähne 13 und 23 dienen im Fall dieser Studie als Ankerzähne für die Schienung, weswegen sie in ihrer Form nicht verändert wurden (Abb. 1b). Um Verwechslungen vorzubeugen, wurde noch die jeweilige Bezeichnung des Zahnes in Zahlenform auf die Zahnhalsoberfläche modelliert. Die so konstruierten Zähne wurden digital mit minimalem Abstand auf die Grundfläche des Druckers platziert, um eine maximale Auslastung eines einzelnen Druckvorganges zu gewährleisten (beispielhaft in Abb. 1c).

2.1.2 Druck und Fertigstellung der Zähne

Nachdem die Gestaltung der Zähne im Computer Aided Design (CAD)-Verfahren beendet wurde, wurde das Modell als Datei im .obj - Format in das Programm

PreForm 2.19.3 (Formlabs Inc., Somerville, Massachusetts, USA) importiert. Hier erfolgte die Vorbereitung für den dreidimensionalen Druck im Sinne des Computer Aided Manufacturing (CAM).

Die Herstellung der Zähne erfolgte mittels des 3D-Druckers „Form2“ (Formlabs Inc., Somerville, Massachusetts, USA). Der Form2-Drucker nutzt die Stereolithographie (SLA) als Druckverfahren, bei welcher mittels eines UV-Lasers flüssiges Harz ausgehärtet wird. Dieser Aushärtungsprozess wird Photopolymerisation genannt. Das Verfahren hat den Vorteil, dass unterschiedliche Harze mit unterschiedlichsten Materialeigenschaften verarbeitet werden können. In diesem Fall wurde ein photopolymer Resin, das sogenannte „White Resin RS-F2-GPWH-04“ (Formlabs Inc., Somerville, Massachusetts, USA) zum Druck verwendet. Die reinweiße Farbe des Harzes entspricht nicht der natürlichen Zahnfarbe, was aber für die vorliegende Studie unerheblich ist. Pro Platte wurden 11 Sets á 6 Zähne innerhalb von 7 Stunden und 42 Minuten produziert, was einer Dauer von 7 Minuten pro Zahn entspricht. Die Schichtstärke des Drucks betrug 50 µm, insgesamt wurden 788 Schichten gedruckt. Für eine gesamte Platte wurden 59,07 ml Dental Model Resin verbraucht, was bei einem Preis von 135 €/l (Formlabs Inc.) zu Kosten von 7,97 € pro Platte oder 13,3 ct pro Zahn führte. Insgesamt wurden 88 Sets á sechs Zähne hergestellt.

Nach der Herstellung wurden die gedruckten Objekte im dafür vorgesehenen Gerät „Form Wash“ (Formlabs Inc.) in 20 Minuten über einen automatischen Waschzyklus gereinigt. Hierfür wurde 100 % reiner Isopropanol (VWR Chemicals BDH, Poole, Vereinigtes Königreich) verwendet. Im Anschluss wurden die gedruckten Zähne an der Luft getrocknet. Der Waschautomat ist vom Hersteller als kompatibel zum Drucker „Form2“ zertifiziert. Nach Ende des Waschvorganges wurden die Zähne im „Form Cure“ (Formlabs Inc.) für 60 Minuten bei 60 °C mit UV-Licht gehärtet, um die Endhärte des Kunststoffes zu erreichen.

Abschließend wurden die zum Druck notwendigen Stützstrukturen entfernt.

Die zur Produktion notwendigen Maschinen inkl. Drucker und der Geräte zur Nachbearbeitung kosteten 4400 USD, was zum Zeitpunkt der Anschaffung ungefähr 3600 € entsprach.

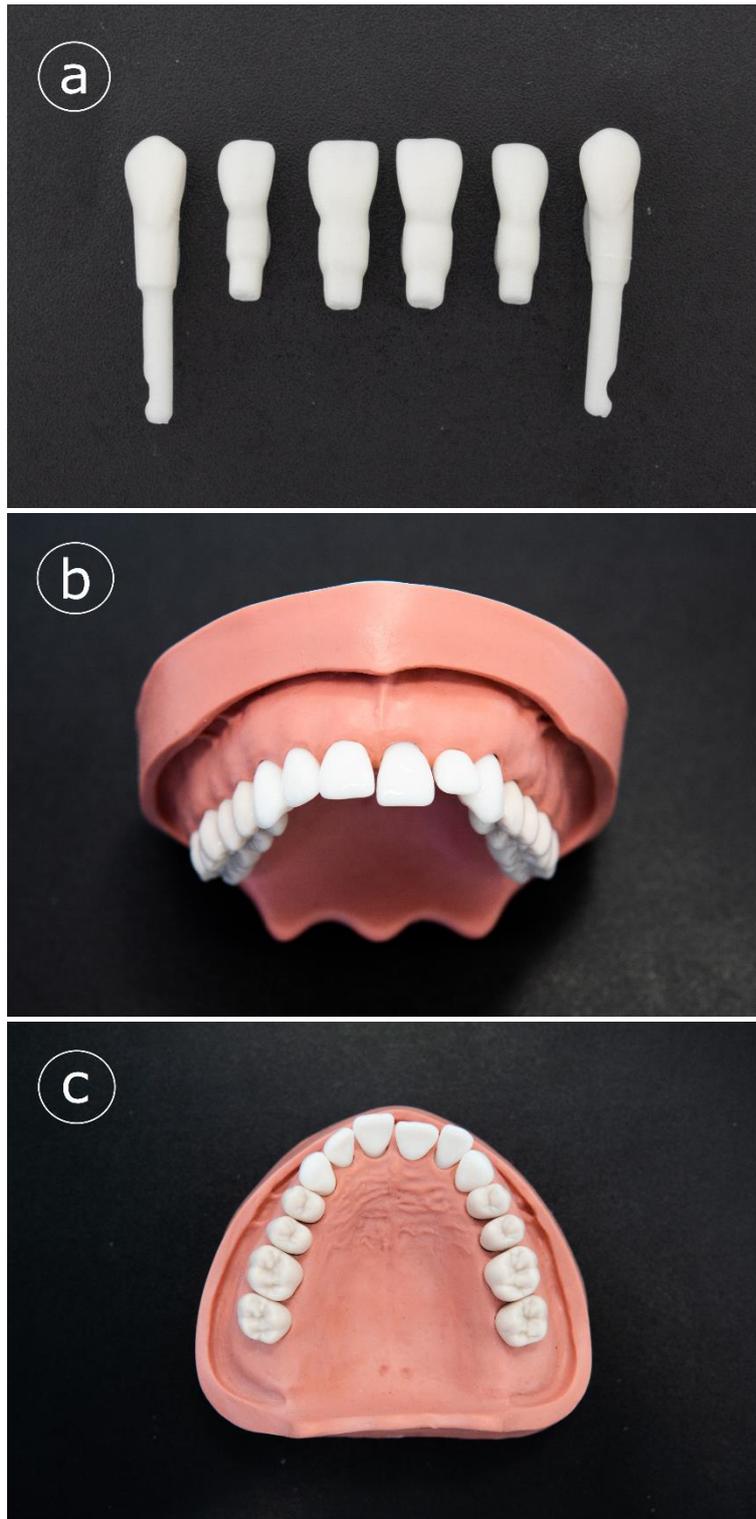


Abb. 2: Gedruckte Zähne. a) Gedruckte Zähne nach Entfernung der Stützstrukturen, b) Modellansicht frontal, c) Modellansicht palatinal. Eigene Abbildung, erstellt mit Inkscape.

2.2 Übungsseminar

Für die Übung benutzten die Studierenden die ihnen zur Verfügung gestellten Phantomköpfe (PK-2 PT Phantomkopf, Frasaco, Tettang, Deutschland), welche mit einer Stuhlbefestigung an der Behandlungseinheit befestigt wurden (P-SH 9998-004, Frasaco, Tettang, Deutschland), sowie die Übungsmodelle von KaVo (Studienmodell Basic, KaVo, Biberach an der Riß, Deutschland), welche mit einer Adapterplatte eingespannt wurden. Zur Schienung wurden die Materialien Ribbond Ultra (Ribbond Inc., Seattle, Washington USA) sowie everStick Perio (GC Germany GmbH, Bad Homburg, Deutschland) verwendet.

Die Studierenden erhielten während der Übung keine Rückmeldung über ihre Schienung. Die Modelle wurden nach erfolgter Schienung mit der Teilnehmernummer markiert, um im Anschluss die korrekte Zuordnung zum jeweiligen Fragebogen zu gewährleisten.

2.2.1 Teilnehmende Studierende

Die Studie wurde mit Studierenden des siebten Fachsemesters im Sommersemester 2020 auf freiwilliger Basis im Rahmen des Kursteils „Parodontologie“ durchgeführt. Die Studierenden hatten alle Propädeutik- sowie Phantomkurse erfolgreich absolviert und aufgrund dessen bereits ausreichend Erfahrung am Phantomkopf, um die Handhabung der Übungszähne bewerten zu können. Aufgrund der Corona-Pandemie fand das siebte Fachsemester ebenfalls am Phantomkopf statt. Insgesamt nahmen 43 Zahnmedizinistudentinnen und -studenten an der Studie teil, davon 24 Frauen und 19 Männer. Sie waren zwischen 20 und 33 Jahren alt, das Durchschnittsalter betrug 25 Jahre. Die Studierenden wurden in zwei Gruppen aufgeteilt und jedem einzelnen eine Behandlungsbox zugewiesen. Aufgrund der Abstands- und Hygieneregeln der zum Zeitpunkt der Studie andauernden Covid-19 Pandemie mussten die Studierenden die Schienung komplett selbstständig ohne die Unterstützung durch eine Assistenz vornehmen.

2.2.2 Vorbereitung der Studierenden

Zur Vorbereitung auf den Kurs wurde den Studierenden vorab ein Lehrvideo auf der Plattform Youtube sowie ein Skript im PDF-Format zur Verfügung gestellt. Das Lehrvideo wurde in den Räumlichkeiten der Vorklinik der Zahnklinik Würzburg gedreht, hierzu standen eine Sony Alpha 6000 Kamera (Sony, Tokio, Japan) mit einem 56 mm F1.4 DC DN Objektiv (Sigma Corporation, Kawasaki, Japan) sowie ein Stativ zur Verfügung. Das Video wurde anschließend mit dem kostenlosen Programm „Shotcut“ (Melttech, LLC, bezogen über www.shotcut.org) geschnitten. Das Skript basierte auf den Inhalten des Lehrvideos. Die Studierenden wurden aufgefordert, die theoretische Vorbereitung auf den Kurs eigenständig durchzuführen. Während des Kurses wurde zur Schienung mit dem Material Ribbond Ultra zusätzlich noch eine Anleitung vom Hersteller ausgeteilt.

2.2.3 Ablauf der Schienung

Die Studierenden sollten je eine Schienung mit Ribbond Ultra (Ribbond Inc., Seattle, Washington USA) sowie everStick Perio (GC Germany GmbH, Bad Homburg, Deutschland) durchführen und dabei nach idealen Gesichtspunkten die Zähne repositionieren. Die Einteilung in die jeweilige Gruppe bestimmte hierbei, mit welchem Material zuerst geschient wurde. Dies hatte den Hintergrund, einen eventuellen Lerneffekt nach der ersten Schienung von einer möglicherweise besseren Handhabung eines einzelnen Materials unterscheiden zu können.

Für die Übung standen jedem Teilnehmer zwei Sätze Übungszähne, je einer pro Schienungsmaterial, zur Verfügung. Zuerst wurden die im Vorfeld produzierten Übungszähne 13-23 als Ersatz für die originalen KaVo-Zähne in das Modell eingebracht. Dieses wurde im Anschluss an den Phantomköpfen mit der jeweiligen Adapterplatte eingespannt und die Okklusion korrekt eingestellt. Nun sollte eine initiale Korrektur der Zahnposition manuell durchgeführt werden, um den idealen Zahnbogenverlauf, welcher den original KaVo-Übungszähnen entsprechen sollte, darzustellen. Anschließend wurde palatinal eine Rille von 13-23 präpariert, welche etwa 2 mm oberhalb des Sulkus zu liegen kommen und etwa 1,5 x 1,5 mm Tiefe und Breite aufweisen sollte. Sie sollte über die komplette

Breite der Zähne 12, 11, 21, 22 reichen sowie ca. das mesiale Drittel der Zähne 13, 23 fassen. Die Länge der Rille wurde mit einem Wedjet (Coltene Holding AG, Altstätten, Schweiz) abgemessen, welches mit einem Skalpell auf Länge geschnitten wurde.

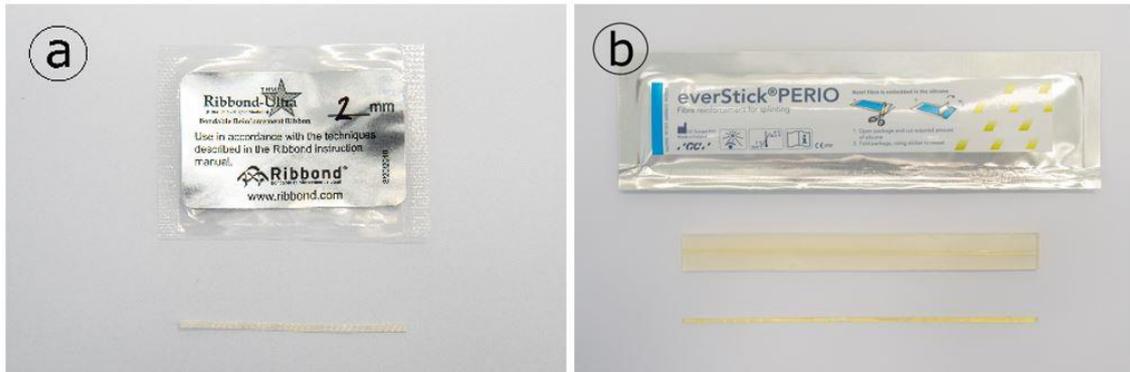


Abb. 3: Schienungsmaterialien. a) Ribbond Ultra, Verpackung, darunter das Material, b) everStick Perio, Verpackung, darunter Material in Schutzgel eingebettet, darunter Material ohne Schutzgel. Eigene Abbildung, erstellt mit Inkscape.

Im Anschluss wurde das jeweilige Schienungsmaterial mithilfe des Wedjets auf die richtige Länge gebracht, was im Fall des Materials everStick Perio mit einem Skalpell durchgeführt werden konnte, für das Material Ribbond Ultra standen spezielle Scheren zur Verfügung. Das Material everStick Perio sollte unter Lichtschutz in einem Vivapad (Ivoclar Vivadent GmbH, Ellwangen, Deutschland) gelagert, das Material Ribbond Ultra zuerst in dem Adhäsiv Optibond FL (Kerr GmbH, Bioggio, Schweiz) geschwenkt und dann ebenfalls unter Lichtschutz gelagert werden. Dieser zusätzliche Schritt für das Material Ribbond Ultra war der ausgeteilten Anleitung des Herstellers zu entnehmen und wurde zusätzlich durch die Kursbetreuung angesprochen. Zur Konditionierung der Zahnoberfläche in Schmelz-Ätz-Technik wurde die 35 %-ige Phosphorsäure Ultra Etch in Gelform (Ultradent, Brunthal, Deutschland) sowie Primer und Adhäsiv Optibond FL (Kerr GmbH, Bioggio, Schweiz) verwendet. Nach Lichthärtung des Adhäsivs wurde etwas Filtek Flowable Komposit (3M Deutschland GmbH, Neuss, Deutschland) in die Kavität eingebracht, die korrekte Position der Zähne erneut überprüft und das jeweilige Schienungsmaterial eingebracht. Nun erfolgte eine initiale Aushärtung, um die korrekte Position festzuhalten. Im Anschluss wurde das Schienungsmaterial komplett mit Flowable überschichtet, erneut ausgehärtet und ausgearbeitet.



Abb. 4: Ablauf der Schienung. a) Übungszähne in Modell eingesetzt, b) Zähne korrekt positioniert, Okklusion überprüft und Rille palatinal einpräpariert, c) Abmessung der Länge mit Wedjet, d) Säure-Ätz-Technik mit 35%iger Phosphorsäure, e) Einbringen von Flowable Komposit, f) Schienungsmaterial in weiches Flowable eingebracht, g) Schienungsmaterial mit Flowable überschichtet, h) Flowable ausgehärtet, poliert und Okklusion überprüft, i) Ansicht der geschienten Zähne von vestibulär. Eigene Abbildung, erstellt mit Inkscape.

Dazu standen für die grobe Ausarbeitung rote Winkelstücke E25L EXPERTmatic (KaVo) mit Präparationsdiamanten von Komet (DENTAL Brasseler GmbH, Lemgo, Deutschland) sowie für die Politur blaue Winkelstücke E20L EXPERTmatic (KaVo) mit „Brownie“- und „Greenie“-Polierern (Shofu Dental GmbH, Ratingen, Deutschland) zur Verfügung. Die Studierenden erhielten während der Durchführung kein Feedback von Seiten der Kursbetreuung, es war jedoch erlaubt das Skript zurate zu ziehen. Die Studierenden hatten pro Schienung drei Stunden Zeit, welche von keinem Teilnehmer voll ausgenutzt wurde. Zwischen der ersten und der zweiten Schienung lagen zwei Wochen Zeit.

2.3 Fragebogen

Nachdem jeder der 43 Studierenden die zweite und somit letzte Schienung durchgeführt hatte, wurde ihnen ein QR-Code zum Ausfüllen des digitalen Fragebogens ausgehändigt, was sofort per Smartphone oder Tablet im Kurssaal durch die Teilnehmer erfolgte. Dieser Fragebogen wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Medizinische Lehre und Ausbildungsforschung (IMLA) entwickelt und mit dem EvaSys (Electric Paper Evaluationssysteme GmbH, Lüneburg, Germany) erstellt. Der Fragebogen wurde im Vorfeld bereits mehrfach für Studien an 3D-gedruckten Zähnen verwendet und hat sich somit bereits bewährt. Er wurde an die aktuellen Inhalte der Studie angepasst (Höhne et al., 2020a, Höhne et al., 2019a, Höhne et al., 2019b, Höhne et al., 2020c). Der Fragebogen ist im Anhang zu finden.

Textblock 1 des Fragebogens beinhaltete die Einleitung in den Fragebogen. Die Studierenden sollten in Block 2 „Personenbezogene Daten“ des Fragebogens Angaben zur eigenen Person machen, welche Teilnehmernummer (Punkt 2.1) Geschlecht (2.2), Alter (2.3), eventuelle zahntechnische Ausbildungen im Vorfeld des Studiums (2.4) und falls ja, welche (2.5, Freitext) beinhalteten. Des Weiteren wurden Erfahrungen mit stark gelockerten Zähnen im Sinne eines Lockerungsgrades II oder III (2.6), Erfahrungen mit Schienungen (2.7) und Erfahrungen mit Schienungsmaterialien (2.8, Freitext) erfragt. Es folgte die Angabe, mit welchem Material die Schienungsübung begonnen wurde (2.9). Anschließend wurden die eigenen Fähigkeiten eingeschätzt, ob ihnen die Zahntechnik der vorklinischen Kurse leichtfiel (2.10) und ob sie Freude an den praktischen Arbeiten des Studiums haben (2.11) sowie eine generelle Bewertung der eigenen manuellen Fertigkeiten (2.12). In Fragenblock 3 „Handhabung der Zähne“ wurde das realistische Verhalten der Zahnlockerung (3.1) sowie die Repositionierung der Zähne im Zahnbogen (3.2) bewertet. In Fragenblock 4 „Schienung der Zähne“ wurde die generelle Bewertung der Schienungsübung (4.1), sowie die Handhabung der einzelnen Materialien „everStick Perio“ (4.2) sowie „Ribbond Ultra“ (4.3) abgefragt. In Fragenblock 5 „Lernzielkontrolle“ sollten die Studierenden bewerten, wie gut sie sich vor (5.1) und nach dem Kurs (5.2) auf die parodontale Schienung vorbereitet fühlen, wie hoch sie den Lerneffekt der praktischen Übung einschätzen

(5.3), wie sehr sie die Übung als klinisch relevant empfinden (5.4) und ob und warum sie mit jeweils dem einen oder anderen Material später eine Schienung am Patienten durchführen würden (5.5 everStick Perio; 5.6 Warum dieses Material als Freitext; 5.7 Ribbond Ultra; 5.8 Warum dieses Material als Freitext). In Block 6 „Offene Fragen“ waren zwei Freitextfelder vorhanden, um mit eigenen Worten beschreiben zu können, was am Kurs gut funktionierte (6.1) und was weniger gut verlaufen ist, beziehungsweise wo noch Verbesserungsbedarf bestünde (6.2). Um eine einheitliche Beurteilung des Fragebogens durchführen zu können, wurde die Bewertung mit dem Schulnotensystem [Note 1 (sehr gut); Note 2 (gut); Note 3 (befriedigend); Note 4 (ausreichend); Note 5 (mangelhaft); Note 6 (ungenügend)] durchgeführt, welche in Kästchen angekreuzt werden konnten. Insgesamt lagen nach der Angabe der personenbezogenen Daten elf Fragen zum Ankreuzen sowie vier Fragen mit Freitextfeld vor.

2.4 Auswertung der Übungszähne

2.4.1 Überlagerung der Dateien

Die insgesamt 86 Übungsmodelle mit den durchgeführten Schienungen wurden wie bereits zur Konstruktion der Übungszähne mit dem Streifenlichtscanner InEos X5 eingescannt, hinzu kam ein vom Kursleiter geschientes Idealmodell, welches als Referenzkörper dienen sollte. Hierzu wurden die Modelle wie zuvor mit dem Scanspray Helling 3D besprüht, um eine genauere Erfassung der Modelloberfläche zu ermöglichen. Die Entfernung von Spraydose zu Modell betrug während des Sprayvorganges etwa 20 cm. Als Programm wurde erneut InLab (Dentsply Sirona) genutzt. Nach einem initialen Scan der Modelloberfläche wurde der Zahnbogen als Orientierung für das Programm markiert, dann erfolgte der komplette Scan, aus dem das dreidimensionale Bild errechnet wurde. Mögliche Löcher der Oberfläche, die durch den Scan nicht erfasst wurden, konnten durch Doppelklick auf die jeweilige Stelle des Modells von der Kamera erkannt, nachgescannt und somit geschlossen werden. Scanartefakte traten bei diesem Vorgehen nicht in nennenswerter Menge auf. Das virtuelle 3D-Modell wurde als

.stl-Datei in höchster Auflösung abgespeichert. Für die anschließende Überlagerung wurde die Software „GOM Inspect 2019“ (GOM GmbH, Braunschweig, Deutschland) verwendet, ein Programm zur Analyse von dreidimensionalen Messdaten.

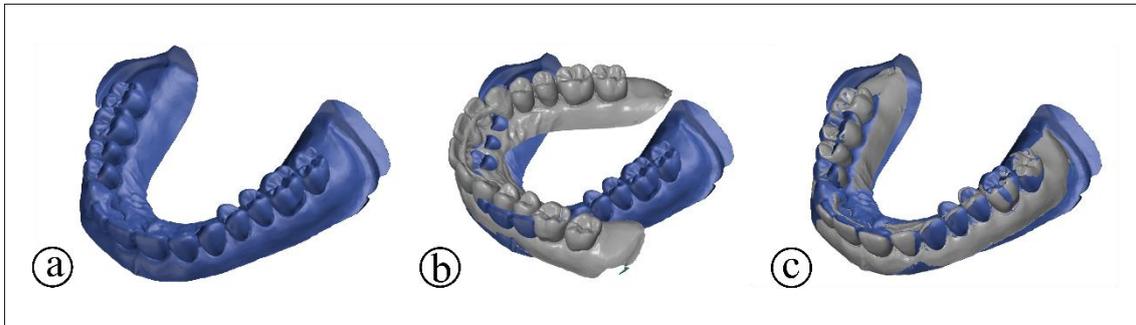


Abb. 5: Matchingprozess der digitalen Modelle. a) Soll-Element CAD-CAM-Körper in blau. b) Ist-Element als Netz in grau eingefügt, noch nicht gematcht. c) Matching von Soll- und Ist-Element. Eigene Abbildung, erstellt mit Gom Inspect und Inkscape.

Zuerst wurde ein neues Projekt geöffnet und das Referenzmodell als „CAD/CAM-Körper“ in Form der gespeicherten .stl-Datei importiert, womit das „Soll-Element“ festgelegt war. Dieses erschien im Programm als blauer Körper (Abb. 5a). Anschließend wurde jeweils ein Studienmodell als .stl-Datei importiert. Als Importparameter wurden die Skalierung in Millimeter, sowie der Elementtyp „Netz“ festgelegt. Die so importierten Modelle entsprachen somit dem „Ist-Element“ des Programms, welche als graue Körper dargestellt wurden (Abb. 5b). Um die Datensätze miteinander vergleichen und die Unterschiede analysieren zu können, mussten sie in gleichartigen Bereichen, sprich dem Seitenzahnbereich mit Zähnen 14-17 sowie 24-27, überlagert werden. Dies erfolgte in zwei Schritten, zuerst mithilfe des Programmpunktes „Operation - Ausrichtung - Initiale Ausrichtung - Vorausrichtung“ mit der Suchzeit „Kurz“. Die Genauigkeit betrug dabei ca. 0,05 - 0,6 mm. Falls dies misslang, weil das Programm nicht genügend gemeinsame Bildpunkte finden konnte, wurde die Funktion „Operation - Ausrichtung - Initiale Ausrichtung - 3-Punkt-Ausrichtung“ genutzt. Um die Suche nach gemeinsamen Flächen zu vereinfachen, wurden dem Programm drei Punkte per Hand vorgegeben. Es wurden markante Höcker im Seitenzahnbereich markiert, was schlussendlich immer zum erfolgreichen initialen Matching der Modelle führte. Um eine

noch genauere Übereinstimmung der Modelle zu erzielen, wurde eine Feinausrichtung benötigt, welche mit dem „Durch Oberfläche selektieren / deselektieren“ Befehl erfolgte. Hierbei wurden die Seitenzähne im Soll- und im Ist-Modell per Hand markiert. Im Anschluss konnten die Modelle über den Programmpunkt „Operation - Ausrichtung - Hauptausrichtung - Lokales Best-fit“ mit einem maximalen Suchabstand von 1,000 mm gematcht werden. Das Programm sucht hierbei in dem markierten Bereich der Seitenzähne nach gemeinsamen Bildpunkten beider Modelle und lagert diese so dicht wie möglich übereinander, was mit einer Genauigkeit von etwa 0,02 - 0,2 mm gelang. Die so ausgerichteten Modelle wurden erneut als .stl-Datei exportiert und abgespeichert (Abb. 5c).

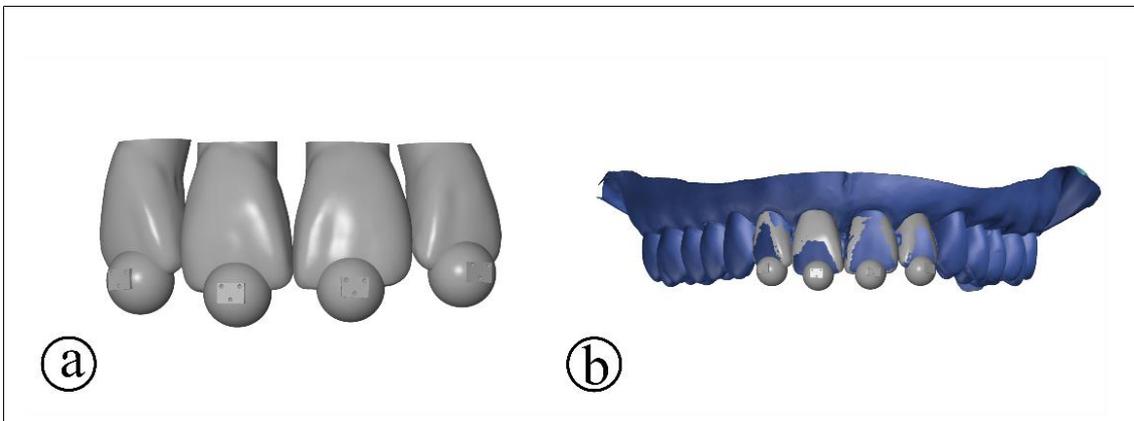


Abb. 6: Referenzkugeln für Matchingprozess. a) Großansicht Einzelzähne mit Matchingkugeln. b) Matchingzähne auf Referenzmodell. Eigene Abbildung, erstellt mit Gom Inspect und Inkscape.

Damit die Zähne einzeln miteinander vergleichbar werden, wurden auf Basis der vorangegangenen Konstruktionsdateien der Kurszähne 3D-Matchingzähne erstellt. Hierzu wurden mithilfe des Programms Autodesk Inventor Kugeln mit definierter Größe von 6 mm mittig auf die Schneidekanten modelliert, sowie vestibulär ein Rechteck mit jeweils drei halbrunden Vertiefungen auf der Kugel eingelassen (Abb. 6a). Diese wurden jeweils wie oben beschrieben erst über eine initiale Ausrichtung und anschließend über ein „lokales Best-fit“ sowohl mit dem Soll- als auch mit den Ist-Modellen überlagert, was mit einer Genauigkeit von 0,01 - 0,03 mm erfolgte. Hierzu wurden alle Bereiche von Soll- und Ist-Zahn händisch markiert, welche starke Übereinstimmungen aufwiesen. Hierzu zählten mesiale und distale Schneidekante, Vestibulärfläche und palatinales Grübchen. Die

so mit dem dreidimensionalen Schienungsmodell überlagerten Einzelzähne wurden erneut als .stl-Datei abgespeichert (Abb. 6b).

2.4.2 Vermessung der Abstände zwischen Schienungs- und Referenzmodell

Um einen Vergleich zwischen den im Kurs geschienten Zähnen und dem Referenzmodell zu ermöglichen, wurden im folgenden Schritt im Programm „GOM Inspect 2019“ ein neues Projekt erstellt und darin die in Punkt 2.4.1 gematchten Einzelzahnmodelle in einer Datei zusammengeführt. Hierbei wurden die Referenzzähne als „CAD/CAM-Körper“ und somit als Soll-Element, die Kurszähne als „Netz“ und somit als Ist-Element importiert. Nun wurde in den Kugeln an der Inzisalkante der acht Einzelzähne mit dem Programmpunkt „Konstruieren - Kugel - Fitting-Kugel“ jeweils ein kugelförmiges Fittingelement mit definiertem Mittelpunkt erzeugt. Der Übersicht halber wurden nun die Zahnmodelle ausgeblendet, sodass nur noch die acht Fitting-Kugeln sichtbar waren. Um den Abstand zwischen den Mittelpunkten, und damit den gemittelten Abstand zwischen dem Referenzzahn und dem geschienten Zahn zu ermitteln, wurde die Funktion „Konstruieren - Linie - 2-Punkt-Linie“ genutzt. Mit dieser Funktion wurden die Mittelpunkte der Kugeln markiert, zwischen ihnen eine Linie erstellt und die Länge dieser Geraden gemessen. Die Ergebnisse wurden händisch in einer Excel-Tabelle notiert.

2.5 Datenerhebung und Datenschutz

Die Rohdaten des Fragebogens wurden pseudonymisiert mit einer Nummer über EvaSys erhoben. Abschließend wurden die Daten verschlüsselt sowie passwortgeschützt auf einem Dienstrechner gespeichert und aus EvaSys gelöscht.

Die geschienten Modelle wurden mit derselben Nummer je Teilnehmer pseudonymisiert und gescannt. Die entstandenen Datensätze wurden verschlüsselt sowie passwortgeschützt auf einem Dienstrechner gespeichert. Anschließend wurden die Daten vom Scancomputer gelöscht.

Aufgrund der übereinstimmenden Nummern von Fragebogen und gescannten Modellen war es möglich, Arbeit und Bewertung aufeinander zu beziehen.

Die Liste zur Entschlüsselung der Pseudonymisierung wurde verschlüsselt auf einem anderen Computer gespeichert und lag der Studienleitung während der Auswertung der Rohdaten nicht vor.

Die Daten wurden nach Abschluss der Studie und nach Anonymisierung durch Entfernung der Pseudonymisierung aus dem Datensatz auf einem USB-Stick verschlüsselt und passwortgeschützt archiviert.

2.6 Ethikvotum

Ein Ethikantrag war für diese Studie nicht notwendig. Aus der Unbedenklichkeitsbescheinigung der Ethikkommission vom 03.12.2018 geht hervor, dass keine Notwendigkeit einer gesonderten Antragstellung für die geplante Auswertung von anonymisierten Fragebögen und 3D-gedruckten Zähnen besteht. Das Schreiben befindet sich im Anhang.

2.7 Statistik

2.7.1 Kolmogorov-Smirnov-Test

Der Kolmogorov-Smirnov-Test vergleicht die beobachteten Häufigkeiten einer Stichprobe mit den theoretisch zu erwarteten Häufigkeiten, falls eine Verteilungsvermutung zutrifft. Hierzu nutzt der Test nur den betragsmäßig höchsten Wert. Die relativen Häufigkeiten (h_j) erhält man, indem die beobachteten Häufigkeiten (n_j) durch die Gesamtzahl der Beobachtungen (n) dividiert werden:

$$h_j = \frac{n_j}{n}$$

Die empirische Verteilungsfunktion erhält man durch Kumulieren der relativen Häufigkeiten:

$$F_{emp}(j) = \sum_{i=1}^j h_j = \sum_{i=1}^j \frac{n_i}{n}$$

Hierfür gilt folgende Hypothese:

H_0 : Die Zufallsvariable „Abstand der Zähne“ ist normalverteilt.

H_1 : Die Zufallsvariable „Abstand der Zähne“ ist nicht normalverteilt.

Da wir mittels der Nullhypothese erwarten, dass eine Normalverteilung zutrifft, standardisieren wir zuerst die Klassenmitten (z_j) mit den Schätzwerten für den Mittelwert (\bar{x}) und die Standardabweichung (s_x) der Stichproben:

$$z_j = \frac{x_j^m - \bar{x}}{s_x}$$

Zu diesen Klassenmitten (z_j) wird im Anschluss die theoretische Verteilungsfunktion ($F_{theor} = F_{NV}(z_j)$) als Wahrscheinlichkeit ermittelt, bei der ein standardisierter Wert kleiner oder gleich z_j beobachtet werden wird, falls die Nullhypothese als geltend betrachtet werden kann.

Der Kolmogorov-Smirnov-Test gilt als robuster Test für alle Skalenniveaus.

2.7.2 Kruskal Wallis- oder auch H-Test

Aufgrund der Erkenntnis des Kolmogorov-Smirnov-Tests, dass keine Normalverteilung der Werte vorliegt (s. Ergebnisteil), mussten für die weiteren statistischen Untersuchungen nichtparametrische Tests angewendet werden. Da mehr als zwei Gruppen miteinander verglichen werden sollten, wurde der Kruskal Wallis- oder auch H-Test durchgeführt. Dieser ermöglicht es, zwei oder mehr Stichproben darauf zu untersuchen, ob sie hinsichtlich des Verteilungsparameters aus der gleichen Verteilung stammen, ohne Verteilungsannahmen, wie die Normalverteilung, erfüllen zu müssen.

Bei diesem Test werden die Beobachtungswerte in eine Rangfolge gebracht. Hierbei wird der Rangwert r_{ij} aus der j-ten Beobachtung sowie der i-ten Stichprobe ermittelt. Anschließend wird der mittlere Rangwert für alle Beobachtungswerte \bar{r} sowie nach Testgruppen gemittelte Rangwerte $\bar{r}_1, \bar{r}_2, \dots, \bar{r}_n$ ermittelt.

Es wird im Anschluss die Summe der quadratischen Abweichung des Durchschnittsranges der einzelnen Gruppen mit dem gesamten durchschnittlichen

Rang verglichen, jeweils gewichtet mit der Anzahl der Beobachtungen pro Gruppe n_i .

Zusätzlich wird die Summe der quadratischen Abweichung zwischen jedem beobachteten Rangwert und dem insgesamt durchschnittlichen Rangwert über alle Gruppen und Beobachtungen betrachtet.

Der Quotient der beiden Summen, multipliziert mit $(N-1)$ mit N als Gesamtzahl der Beobachtungen, ergibt die Teststatistik:

$$H = (N - 1) * \frac{\sum_{i=1}^m n_i * (\bar{r}_i - \bar{r})^2}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (r_{ij} - \bar{r})^2}$$

Anschließend kann im Vergleich von H_{pr} mit H_{kr} die Nullhypothese bestätigt oder verworfen werden, wobei gilt: Die Nullhypothese ist bestätigt bei $H_{pr} < H_{kr}$ und wird verworfen bei $H_{pr} > H_{kr}$. Die kritischen H-Werte liegen hierbei für kleinere Stichproben tabellarisch vor. Für größere Stichproben ist H approximativ mit $(m-1)$ Freiheitsgraden χ^2 -verteilt.

2.7.3 Mann Whitney U-Test

Der Mann Whitney U-Test ist ebenfalls ein nichtparametrischer Test, welcher zwei nicht abhängige Stichproben auf Gleichheit der Lageparameter Mittelwert bzw. Median testet. Der Test kann auf zwei ordinalskalierte Zufallsvariablen X und Y angewendet werden. Hierbei ist der Gedanke, dass bei gleichem Lageparameter von zwei zufällig ausgewählten Stichproben X und Y die Wahrscheinlichkeit für $X > Y$ genau so groß ist wie für $Y > X$. Wenn jedoch der Mittelwert und/oder Median von X größer ist als von Y, so besteht eine größere Wahrscheinlichkeit, dass ebenfalls die zufällige Stichprobe X größer ist als Y. So werden folgende Hypothesen aufgestellt:

H_0 : $P(X>Y) = P(Y>X)$ gegen

H_1 : $P(X>Y) \neq P(Y>X)$ bzw. $P(X>Y) > P(Y>X)$ oder $P(X>Y) < P(Y>X)$

Als nächstes müssen die U-Werte bestimmt werden, welche angeben, wie viele Rangwerte der anderen Variablen insgesamt niedriger sind. Dies geschieht in diesem Fall mittels der folgenden Formeln:

$$U_a = R_a - \frac{n_a * (n_a + 1)}{2}$$

und

$$U_b = R_b - \frac{n_b * (n_b + 1)}{2}$$

Wobei R_a und R_b die Summe der Rangplätze, die auf beide Variablen entfallen, und n_a und n_b die Anzahl der Beobachtungen darstellen. Der kleinere der beiden U-Werte entspricht im Anschluss der Prüfgröße ($U_{pr} = \min(U_a, U_b)$). Die für den zweiseitigen Test kritischen Werte liegen bei einem Niveau von 5 %, sodass bei gegebenen Stichprobengrößen unter der Nullhypothese gilt:

$$P(U \geq U_{kr} | H_0; n_a, n_b) = 5 \%$$

Die Nullhypothese wird verworfen, wenn U_{pr} kleiner ist als U_{kr} .

Bei dem Vergleich vieler unabhängiger Gruppen miteinander ergibt sich ein Alphafehler (Fehler 1. Grades). Dies ergibt sich daraus, dass bei einem Alphaniveau von 5 % fünf von 100 Tests zu einem falsch positiven Ergebnis führen, wir also die Nullhypothese ablehnen, obwohl sie zutreffen würde. Um diesem, auch Alphafehlerkumulierung genannten Effekt entgegenzuwirken, wurde die Bonferroni-Korrektur durchgeführt, welche das Signifikanzniveau an die Anzahl der Testgruppen anpasst.

Zur statistischen Beratung wurde die Abteilung für Biometrie der Universität Würzburg konsultiert. Zur statistischen Auswertung wurde das Programm SPSS, Version 26, (IBM Deutschland GmbH, Ehningen, Deutschland) genutzt. Die Abbildungen der Ergebnisse wurden mit dem Programm Graphpad Prism, Version 8.3.0.538 (GraphPad Software, San Diego, Kalifornien, USA) sowie Microsoft

Excel (Microsoft Corporation, Redmond, Washington, Vereinigte Staaten) erstellt.

Die Abbildungen der Modelle wurden mit GOM Inspect 2019 (GOM GmbH, Braunschweig, Germany) und dem kostenfreien Grafikprogramm Inkscape, Version 1.1 (Inkscape Group, inkscape.org) erstellt.

3 Ergebnisse

Im Folgenden werden zuerst die Ergebnisse aus dem Fragebogen sowie im Anschluss die Ergebnisse aus der Auswertung der individuellen Frontzahn-schienenmodelle besprochen.

3.1 Der Fragebogen

Der per QR-Code zugängliche Fragebogen wurde, wie in Kapitel 2.3 beschrieben mit der EvaSys Software ausgewertet. Die Bewertung erfolgte in Form des deutschen Schulnotensystems (1 = sehr gut, 2 = gut, 3 = befriedigend, 4 = ausreichend, 5 = mangelhaft, 6 = ungenügend). Der Fragebogen ist im Anhang zu finden.

3.1.1 Personenbezogene Teilnehmerdaten

An der Umfrage nahmen alle 43 Studienteilnehmer teil. Die Studierenden teilten sich in 24 Frauen und 19 Männer mit einem Durchschnittsalter von 25 Jahren auf. Vier der Teilnehmer gaben an, vor Beginn des Zahnmedizinstudiums bereits eine Ausbildung absolviert zu haben (Frage 2.4). Drei davon absolvierten eine Ausbildung zum Zahntechniker (ZT), eine Teilnehmerin eine Ausbildung zur zahnmedizinischen Fachangestellten (ZFA) (Frage 2.5). Alter und Geschlecht nahmen keinen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse des Fragenkataloges. Erfahrung mit Zähnen mit Lockerungsgrad II oder III sowie deren Schienung (Fragen 2.6 und 2.7) hatte ausschließlich jene Teilnehmerin, welche die Ausbildung zur ZFA absolviert hatte. Sie hatte Erfahrung mit einem andersartigen Glasfaserstrang (Frage 2.8). Die Frage, ob ihnen die zahntechnische Arbeit in der Vor-klinik leichtgefallen sei, beantworteten die Studierenden mit der Schulnote „befriedigend“ (\bar{x} 2,7 \pm 1,07, Frage 2.10), wobei nur 6 Teilnehmer die Frage mit sehr gut beantworteten. Die Frage, ob sie große Freude an den praktischen Arbeiten hatten, wurde als „gut“ (\bar{x} 1,6 \pm 0,62, Frage 2.11) bewertet. Die eigenen handwerklichen Fähigkeiten schätzten die Studierenden ebenfalls als „gut“ ein

(\bar{x} 2,3 \pm 0,57, Frage 2.12). 21 Probanden begannen die Übung mit Ribbond Ultra, 22 Probanden mit everStick Perio (Frage 2.9).

3.1.2 Bewertung der Realitätsnähe der Übung sowie Handhabung der Modellzähne

In Frage 3.1 wurde evaluiert, wie realistisch die Zahnlockerungen der Modellzähne seien. Die Studierenden bewerteten diesen Punkt mit der Schulnote „befriedigend“ (\bar{x} 2,5 \pm 0,82). Die Frage 3.2, wie sich die Repositionierung der Übungszähne im Zahnbogen gestaltete, wurde ebenfalls mit „befriedigend“ angegeben (\bar{x} 2,5 \pm 0,97). Die Schienungsübung wurde insgesamt als „gut“ empfunden (\bar{x} 1,8 \pm 0,69, Frage 4.1).

3.1.3 Bewertung der Schienungsmaterialien

Im folgenden Abschnitt wurde die Handhabung der Materialien everStick Perio sowie Ribbond Ultra miteinander verglichen, wobei everStick Perio die Note „befriedigend“ (\bar{x} 2,7 \pm 0,95, Frage 4.2) und Ribbond Ultra die Note „gut“ (\bar{x} 2,4 \pm 0,92, Frage 4.3) bekamen.

3.1.4 Der Lernprozess

Im nächsten Fragenblock sollten die Studierenden evaluieren, inwieweit sie sich vor und nach dem Kurs auf eine parodontale Schienung vorbereitet fühlten und wie sie die klinische Relevanz des Kurses einschätzten. Die Einschätzung, vor dem Kurs eine parodontale Schienung durchführen zu können, wurde mit der Note „mangelhaft“ bewertet (\bar{x} 4,6 \pm 1,11, Frage 5.1). Nach Durchführung des Kurses stieg die Einschätzung der eigenen Fähigkeiten auf die Note „gut“ (\bar{x} 2,3 \pm 0,61, Frage 5.2). Der Lerneffekt wurde ebenfalls mit der Note „gut“ bewertet (\bar{x} 1,6 \pm 0,58, Frage 5.3). Die Studierenden vergaben auf die Frage zur klinischen Relevanz der Übung erneut die Note „gut“ (\bar{x} 1,5 \pm 0,66, Frage 5.4).

3.1.5 Bevorzugtes Material zur späteren Verwendung

Die Frage, ob die Studierenden später eine parodontale Schienung am Patienten mit everStick Perio durchführen würden, wurde insgesamt mit der Note „befriedigend“ beantwortet (\bar{x} 2,7 \pm 1,29, Frage 5.5). Die gleiche Frage für das Material Ribbond Ultra wurde mit der Note „gut“ bewertet (\bar{x} 2,4 \pm 1,12, Frage 5.7).

Aus der Gruppe, welche zuerst mit Ribbond Ultra geschient hat, empfanden neun Personen das Material Ribbond Ultra, zwölf Personen das Material everStick Perio für den späteren Einsatz als besser geeignet. Aus der Gruppe, welche die erste Schienung mit everStick Perio durchführte, bevorzugten 14 Personen das Material Ribbond Ultra und sechs Personen everStick Perio. Zwei Personen bewerteten die Materialien als gleichwertig. Insgesamt bewerteten 23 Personen Ribbond Ultra als besser, 18 Personen empfanden everStick Perio als besser, zwei Personen hielten beide Materialien für gleich gut.

Im Freitextfeld wurde anschließend genauer für beide Materialien erläutert, warum diese Entscheidung der Notenvergabe getroffen wurde.

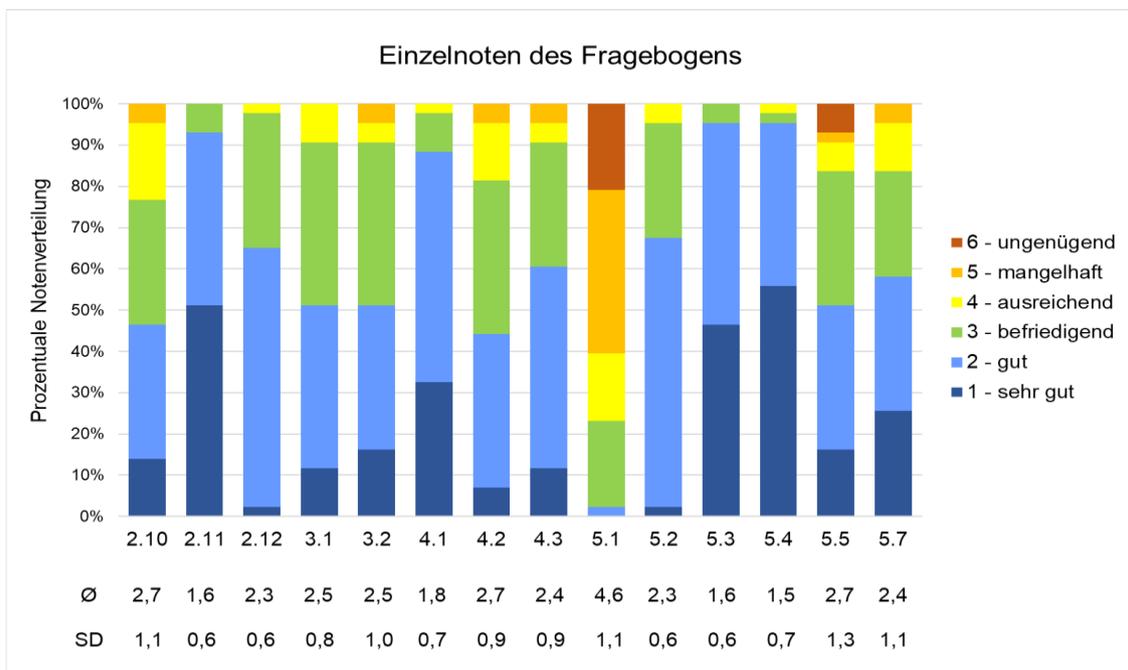


Abb. 7: Auswertung des Fragebogens. Gestapeltes Balkendiagramm mit der prozentualen Notenverteilung. Unter der Fragenummer findet sich die Durchschnittsnote (\bar{x}) und die jeweilige Standardabweichung (SD) der einzelnen Fragen. Die Bewertung erfolgte in Schulnoten, in der Legende ist die Zuordnung der Farbskala dargestellt. Eigene Abbildung, erstellt mit Microsoft Excel.

3.1.6 Freitextbeurteilung der Materialien und der Kursorganisation

In den zwei zur Verfügung stehenden Freitextfeldern (Frage 5.6 sowie 5.8) konnten die Studierenden in Textform äußern, was sie an den jeweiligen Materialien bevorzugten und was sie als weniger gut empfanden. Die Antworten wurden thematisch sortiert, zusammengefasst und gezählt, wobei pro Teilnehmer auch mehrere Themengebiete genannt werden konnten.

3.1.6.1 Bewertung Material everStick Perio

In Frage 5.6 wurde untersucht, warum die Probanden das Material everstick Perio später zur Schienung parodontal gelockerter Zähne verwenden oder nicht verwenden würden.

Der größte Kritikpunkt an everStick Perio war die schwere Handhabung sowie die schwierige Adaptation des Materials in die präparierte Rille (n = 13). Zudem wurde das Material als zu dick bewertet, wodurch die Präparation zu invasiv oder der Patientenkomfort gestört wurden (n = 5). Außerdem wurde das Material als zu starr / zu steif (n = 3) oder zu klebrig (n = 2) empfunden.

Der am meisten genannte Vorteil von everStick Perio war die bessere Handhabung sowie Adaptation am Zahn im Gegensatz zu Ribbond Ultra (n = 18). Zudem war für einige Probanden eine schnellere Schienung möglich (n = 4), außerdem wurde das Material als stabiler sowie widerstandsfähiger empfunden (n = 3). Die Verarbeitung nach Adaptation der Schienung empfanden zwei Probanden als einfacher (n = 2). Ein Proband hob die subjektiv bessere Ästhetik hervor (n = 1), ein Proband empfand den runden Querschnitt des Materials als angenehmer (n = 1).

Sechs Probanden füllten das Freitextfeld nicht aus. Somit betrug die Teilnahmequote 86,0 %.

3.1.6.2 Bewertung Material Ribbond Ultra

In Frage 5.8 wurde untersucht, aus welchen Gründen die Studierenden das Material Ribbond Ultra später am Patienten zur Schienung einsetzen oder nicht einsetzen würden.

Am häufigsten negativ wurde das schlechtere Handling und die schwierigere Adaptation des Materials am Zahn (n = 13) im Gegensatz zu everStick Perio genannt. Die Verarbeitungszeit wurde als kürzer oder zu kurz beschrieben (n = 3), außerdem wurde die faserartige Konsistenz bemängelt (n = 2). Das Material wurde teilweise bei der Ausarbeitung der Schiene freigelegt (n = 2) und lies sich schlecht zurechtschneiden (n = 1). Ein Proband nannte hier auch die schlechtere Ästhetik des Materials (n = 1).

Der am häufigsten genannte positive Aspekt war die bessere Handhabung, Positionierung und Adaptation des Materials (n = 20). Das Material und somit die Schienung war dünner (n = 7), was sich positiv auf den Patientenkomfort auswirken würde, hinzu kam der geringere Verlust von Zahnhartsubstanz (n = 1). Das Material wurde als biegsamer empfunden (n = 3) und besaß eine bessere Haftung am Zahn oder in der präparierten Rille (n = 2), zudem empfand ein Proband, mit dem Einsatz von Ribbond Ultra schneller in der Anwendung zu sein (n = 1). Fünf Teilnehmer füllten das Freitextfeld nicht aus. Somit betrug die Teilnahmequote 88,4 %.

3.1.7 Verbesserungsvorschläge

Zum Ende des Fragebogens sollten die Studierenden generell Lob (Frage 6.1) und Kritik (Frage 6.2) am Studienkurs in zwei Freitextfeldern üben.

Die größte Kritik am Kurs war das (Covid-19 bedingte) Fehlen einer Assistenz und der daraus resultierenden deutlich erhöhten Schwierigkeit, die Schienung zufriedenstellend durchzuführen (n = 14). Die Realitätsnähe der Übung wurde infrage gestellt (n = 3), der Lockerungsgrad wurde als unrealistisch empfunden (n = 2), zudem war die Einstellung der Okklusion am Phantomkopf nicht ideal (n = 2). Die Technik oder das Material zur Längenbestimmung der Präparationsrille wurde als nicht gut empfunden (n = 2), außerdem wurde mehr Zeit für ein ausführliches Evaluationsgespräch am Ende des Kurses gewünscht (n = 2). Jeweils ein Proband merkte an, dass die Druckzähne deutlich weicher als echte Zähne wären (n = 1), ein Anschauungsmodell einer korrekten Schienung fehlen würde (n = 1), eine Erklärungslücke beim Zuschneiden des everStick Perio in der Anleitung bestünde (n = 1) und dass das Zeitmanagement im Kurs schwierig war

(n = 1). Ein Proband wünschte sich, die Arbeit am Patienten durchzuführen (n = 1). Jeweils ein Proband merkte an, dass es eine inhaltliche Differenz zwischen Kursskript und ausgeteilter Anleitung gab (n = 1), man sich mehr Unterstützung und Informationen wünschen würde (n = 1), sowie dass ein Video zur Vorbereitung wünschenswert gewesen wäre (n = 1), was in Anbetracht des vorhandenen Videos auf eine mangelnde Vorbereitung des Studierenden schließen lässt.

Insgesamt füllten 15 Teilnehmer das Freitextfeld von Frage 6.2 nicht aus. Somit lag die Teilnahmequote bei 65,1 %.

Der am meisten positiv hervorgehobene Punkt war das Erlernen von neuen praktischen Fertigkeiten generell und der Schienung im speziellen (n = 25), da diese normalerweise nicht im Lehrplan enthalten ist. Die (rechtzeitig, n = 1) zur Verfügung gestellten Übungsmaterialien in Form von Kursskript und Onlinevideo bekamen großen Zuspruch (n = 12), auch die Kursbetreuung wurde positiv hervorgehoben (n = 6). Die Studienteilnehmer fanden es gut, einen Vergleich zwischen zwei verschiedenen Schienungsmaterialien zur eigenen Meinungsbildung zu bekommen (n = 6). Die Realitätsnähe (n = 5) sowie die Druckzähne (n = 2) wurden als gut empfunden. Der Lerneffekt zwischen der ersten und zweiten Schienung fiel positiv auf (n = 2). Einen Probanden erfreute es, „einfach mal drauf los zu machen“ (n = 1), ein weiterer empfand das Arbeiten und Ausprobieren ohne Leistungsbewertung als positiv (n = 1). Es wurde teilweise angegeben, dass kein Verbesserungsbedarf vorlag (n = 2).

Insgesamt füllten zwei Teilnehmer das Freitextfeld von Frage 6.1 nicht aus. Somit betrug die Teilnahmequote 95,3 %.

3.2 Auswertung der Schienungsmodelle

3.2.1 Material Ribbond Ultra

Im folgenden Abschnitt werden die Werte der Modelle beschrieben, welche mit dem Material Ribbond geschient wurden. Zur Übersicht sind die Werte zusätzlich in einem Boxplot Diagramm dargestellt:

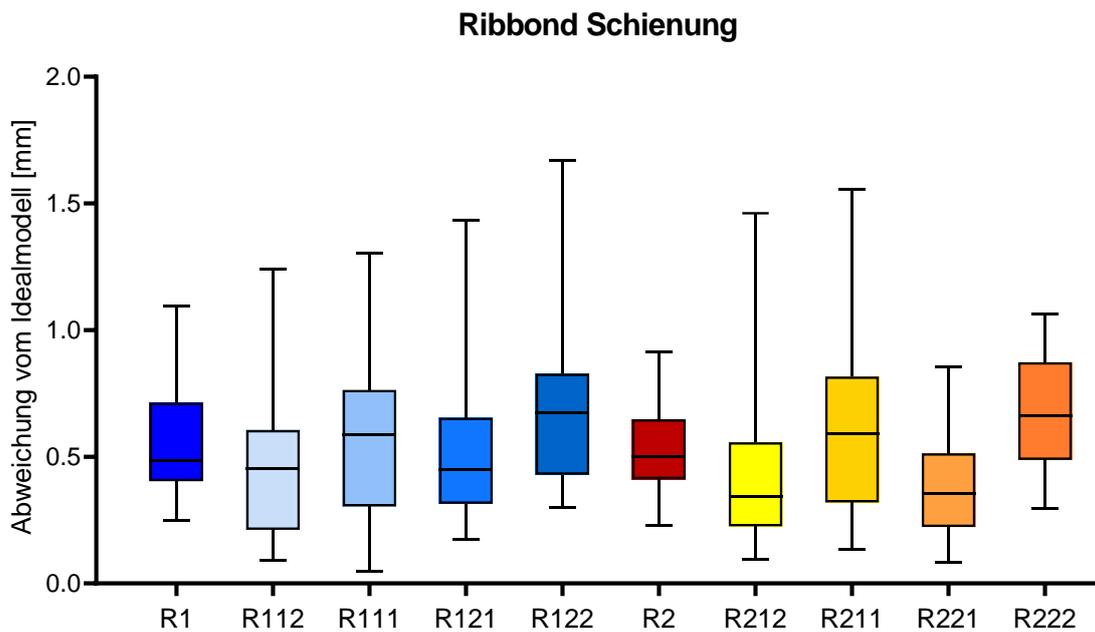


Abb. 8: Ribbond Schienung Boxplot. Abweichungen der gruppierten sowie einzelnen Zähne nach Schienung mit Ribbond Ultra vom Idealmodell. R / E (Material), 1 / 2 (Erst- / Zweitschienung), 12 / 11 / 21 / 22 (jeweiliger Zahn nach FDI Zahnschema). Eigene Abbildung, erstellt mit Graphpad Prism.

Die Gruppe aller mit Ribbond im Erstversuch geschienten Zähne (R1) hatten einen medianen Abstand von 0,48 mm mit einem minimalen Abstand von 0,25 mm und einem maximalen Abstand von 1,10 mm zum Kontrollmodell. Alle im Zweitversuch mit Ribbond geschienten Zähne (R2) hatten einen medianen Abstand von 0,50 mm mit einem minimalen Abstand von 0,24 mm und einem maximalen Abstand von 1,56 mm. Zahn 12 im Erstversuch mit Ribbond geschient (R112) hatte einen medianen Abstand von 0,45 mm mit einem minimalen Abstand von 0,09 mm und einem maximalen Abstand von 1,24 mm. Der im Erstversuch mit Ribbond geschiente Zahn 11 (R111) hatte einen medianen Abstand von 0,59 mm mit einem minimalen Abstand von 0,05 mm und einem maximalen Abstand von

1,3 mm. Der Zahn 21 mit Ribbond im Erstversuch geschient (R121) hatte einen medianen Abstand von 0,45 mm mit einem minimalen Abstand von 0,17 mm und einem maximalen Abstand von 1,43 mm. Zahn 22 im Erstversuch mit Ribbond geschient (R122) hatte einen medianen Abstand von 0,68 mm mit einem minimalen Abstand von 0,3 mm und einem maximalen Abstand von 1,67 mm. Der im Zweitversuch mit Ribbond geschiente Zahn 12 (R212) hatte einen medianen Abstand von 0,34 mm mit einem minimalen Abstand von 0,09 mm und einem maximalen Abstand von 1,46 mm. Zahn 11 mit Ribbond im Zweitversuch geschient (R211) hatte einen medianen Abstand von 0,59 mm mit einem minimalen Abstand von 0,14 mm und einem maximalen Abstand von 1,56 mm. Zahn 21 im Zweitversuch mit Ribbond geschient (R221) hatte einen medianen Abstand von 0,35 mm mit einem minimalen Abstand von 0,08 mm und einem maximalen Abstand von 0,85 mm. Der im Zweitversuch mit Ribbond geschiente Zahn 22 (R222) hatte einen medianen Abstand von 0,66 mm mit einem minimalen Abstand von 0,29 mm und einem maximalen Abstand von 1,06 mm.

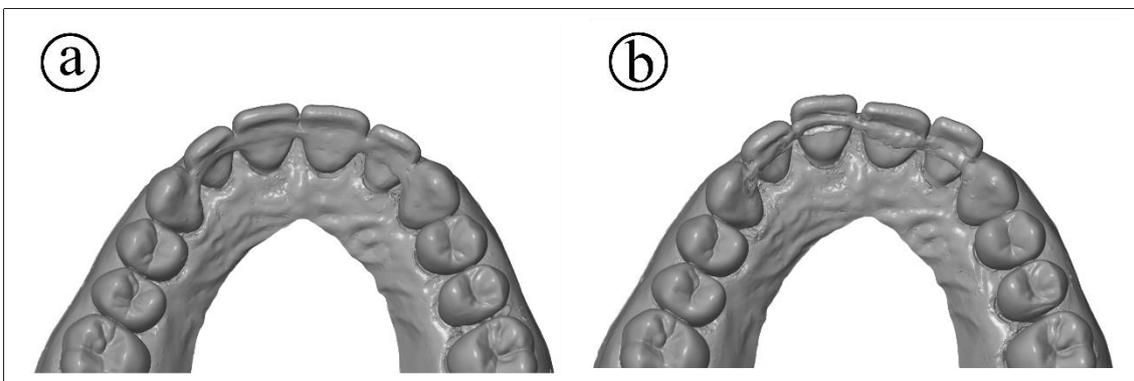


Abb. 9: Vergleich von Ribbond Ultra Schienungen. a) Gute Schienung und Zahnbogen, Komposit gleichmäßig. b) Schlechte Schienung, 11 und 22 nicht in Zahnbogen, Schienungsmaterial liegt frei. Eigene Abbildung, erstellt mit Gom Inspect und Inkscape.

3.2.2 Material everStick Perio

Im folgenden Abschnitt werden die Werte der mit dem Material everStick Perio geschienten Modelle erläutert. Zur Übersicht sind die Werte in einem Boxplot Diagramm dargestellt:

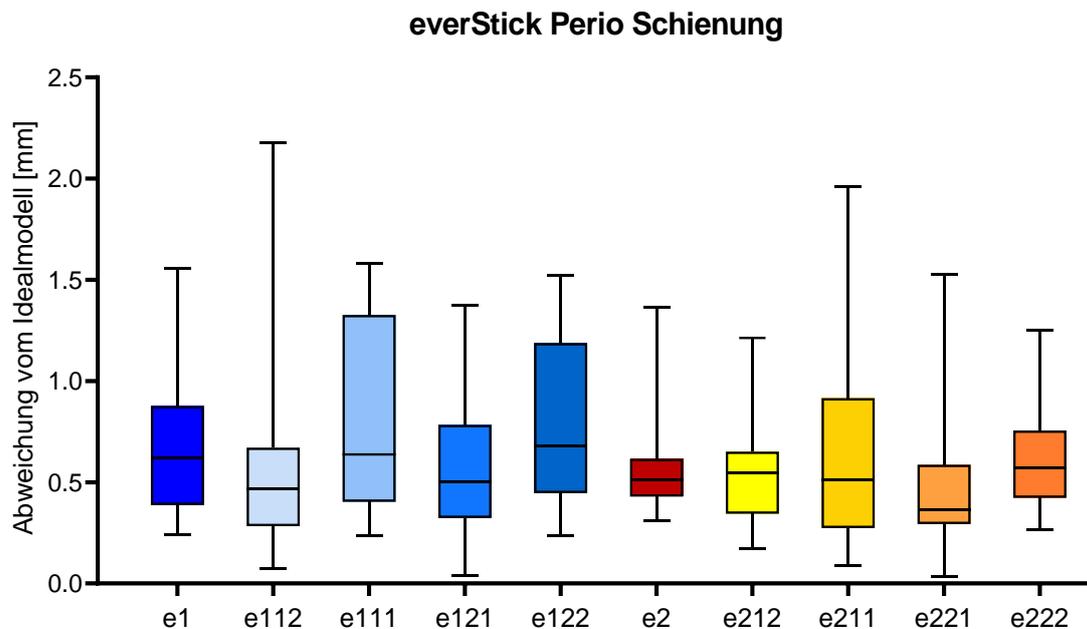


Abb. 10: everStick Perio Schienung Boxplot. Abweichungen der gruppierten sowie einzelnen Zähne nach Schienung mit everStick Perio vom Idealmodell. R / E (Material), 1 / 2 (Erst- / Zweit-schienung), 12 / 11 / 21 / 22 (jeweiliger Zahn nach FDI Zahnschema). Eigene Abbildung, erstellt mit Graphpad Prism.

Die Gruppe aller mit everStick im Erstversuch geschienten Zähne (e1) hatten einen medianen Abstand von 0,62 mm mit einem minimalen Abstand von 0,24 mm und einem maximalen Abstand von 1,56 mm zum Kontrollmodell. Alle im Zweitversuch mit everStick geschienten Zähne (e2) hatten einen medianen Abstand von 0,51 mm mit einem minimalen Abstand von 0,31 mm und einem maximalen Abstand von 1,37 mm. Der mit everStick im Erstversuch geschiente Zahn 12 (e112) hatte einen medianen Abstand von 0,47 mm mit einem minimalen Abstand von 0,08 mm und einem maximalen Abstand von 2,18 mm. Zahn 11 im Erstversuch mit everStick geschient (e111) hatte einen medianen Abstand von 0,64 mm mit einem minimalen Abstand von 0,24 mm und einem maximalen Abstand von 1,58 mm. Zahn 21 mit everStick im Erstversuch geschient (e121) hatte

einen medianen Abstand von 0,50 mm mit einem minimalen Abstand von 0,04 mm und einem maximalen Abstand von 1,38 mm. Der mit everStick geschiente Zahn 22 im Erstversuch (e122) hatte einen medianen Abstand von 0,68 mm mit einem minimalen Abstand von 0,24 mm und einem maximalen Abstand von 1,52 mm. Der im Zweitversuch mit everStick geschiente Zahn 12 (e212) hatte einen medianen Abstand von 0,55 mm mit einem minimalen Abstand von 0,17 mm und einem maximalen Abstand von 1,21 mm. Zahn 11 im Zweitversuch mit everStick geschient (e211) hatte einen medianen Abstand von 0,51 mm mit einem minimalen Abstand von 0,09 mm und einem maximalen Abstand von 1,96 mm. Der mit everStick geschiente Zahn 21 im Zweitversuch (e221) hatte einen medianen Abstand von 0,36 mm mit einem minimalen Abstand von 0,03 mm und einem maximalen Abstand von 1,53 mm. Zahn 22 im Zweitversuch mit everStick geschient (e222) hatte einen medianen Abstand von 0,57 mm mit einem minimalen Abstand von 0,27 mm und einem maximalen Abstand von 1,25 mm.

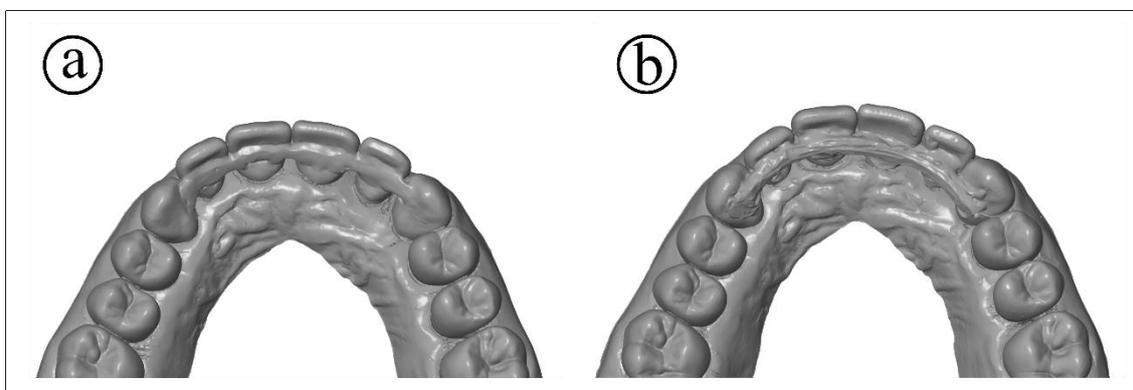


Abb. 11: Vergleich von everStick Perio Schienungen. a) Gute Schienung und Zahnbogen, Komposit gleichmäßig. b) Schlechte Schienung, Zahnbogen nicht ideal, Kompositabdeckung zu dick und unsauber. Eigene Abbildung, erstellt mit GOM Inspect und Inkscape.

Die Daten aller 20 Gruppen wurden mittels Kolmogorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung überprüft, wobei 15 einer Normalverteilung ($p > 0,05$) entsprachen und fünf der 20 Testgruppen nicht normalverteilt ($p < 0,05$) waren.

Die Gruppen, welche keiner Normalverteilung entsprachen, waren e2 ($p = 0,005$), R121 ($p = 0,004$), e112 ($p = 0,011$), e111 ($p = 0,026$) und e221 ($p = 0,009$).

Das Ergebnis des Kolmogorov-Smirnov-Tests kann Tab. 3 im Anhang entnommen werden.

3.2.3 Statistische Datenanalyse und paarweise Vergleiche

3.2.3.1 Kruskal Wallis-Test

Aufgrund der nicht normalverteilten Gruppen wurde der nicht-parametrische Test nach Kruskal Wallis durchgeführt. Dieser ergab, dass signifikante Unterschiede im Vergleich der Gruppen R221 - R122, R221 - e111, R221 - e122 sowie R221 - R222 vorlagen. Diese Gruppen stellen jedoch keine sinnvolle Überschneidung dar, da jeweils die Ergebnisse für unterschiedliche Zähne miteinander verglichen wurden. Für eine genauere Abbildung wurde im Anschluss der paarweise Vergleich mittels Mann Whitney U-Test durchgeführt. Dies sollte genauer auf Unterschiede zwischen den vergleichbaren Gruppen eingehen. Das genaue Ergebnis des Kruskal Wallis-Tests kann Tab. 4 im Anhang entnommen werden.

3.2.3.2 Mann Whitney U-Test

Da die ausgewerteten Daten der Schienungsmodelle keiner Normalverteilung entsprachen, der Kruskal Wallis-Test ein signifikantes Ergebnis hervorbrachte und in diesem Versuch ausschließlich jeweils zwei voneinander unabhängige Gruppen miteinander verglichen werden sollten, wurde der nicht-parametrische Mann Whitney U-Test als post-hoc-Test nach dem Kruskal Wallis-Test für den paarweisen Vergleich durchgeführt.

Zum Vergleich wurden nur sinnvoll miteinander vergleichbare Gruppen einbezogen, was zu 46 Paarungen führte. Die Paarungen der Gruppen können Tab. 1 entnommen werden.

Zum Ausgleich der Alphafehlerkumulierung wurde die Bonferroni-Korrektur durchgeführt, welche zu einem korrigierten Signifikanzniveau von $\alpha = 0,001$ führte.

Nach Durchführung der Korrektur war keiner der gemessenen Abstände zwischen den Gruppen signifikant unterschiedlich.

Dass in der Auswertung nach Mann Whitney U kein signifikantes Ergebnis vorlag bestätigt die Annahme, dass das signifikante Ergebnis aus dem Kruskal Wallis-Test in nicht relevanten Gruppen hervorgebracht wurde.

Auffällig war jedoch eine Häufung starker, nicht signifikanter Differenzen in Bezug auf den Zahn 21. Im Vergleich verschiedener Gruppen mit Bezug zum Zahn 21 traten geringere p-Werte auf, welche vor Korrektur nach Bonferroni Signifikanz erreichten: R2 – R221 ($p = 0,006$), R121 – R221 ($p = 0,044$), e121 – R221 ($p = 0,039$) sowie e2 – e221 ($p = 0,043$). Alle p-Werte nach Mann Whitney U-Test können Tab. 5 im Anhang entnommen werden.

Tab. 1: Paarung sinnvoll vergleichbarer Gruppen für Mann Whitney U-Test. Bezeichnung der Gruppen wie folgt: R / E (Material) 1 / 2 (Erst- / Zweitschienung) 12 / 11 / 21 / 22 (jeweiliger Zahn nach FDI Zahnschema). Die vergleichbaren Paarungen sind grau hervorgehoben. Eigene Abbildung, erstellt mit Microsoft Excel.

	R1	e1	R2	e2	R1 12	R1 11	R1 21	R1 22	e1 12	e1 11	e1 21	e1 22	R2 12	R2 11	R2 21	R2 22	e2 12	e2 11	e2 21	e2 22	
R1	x																				
e1		x																			
R2			x																		
e2				x																	
R112					x																
R111						x															
R121							x														
R122								x													
e112									x												
e111										x											
e121											x										
e122												x									
R212													x								
R211														x							
R221															x						
R222																x					
e212																	x				
e211																		x			
e221																			x		
e222																					x

3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Der Kurs zur parodontalen Schienung wurde insgesamt mit der Schulnote 1,8 bewertet, die dreidimensional gedruckten Zähne, spezieller deren Lockerung sowie die Handhabung bei Repositionierung wurden jeweils mit der durchschnittlichen Schulnote 2,5 bewertet. Das Material everStick Perio erhielt die Note 2,7, Ribbond Ultra die Note 2,4. Vor dem Kurs lag die Selbsteinschätzung, eine Schienung selbstständig durchzuführen bei Note 4,6, nach dem Kurs stieg die Selbsteinschätzung auf die Note 2,3. Die klinische Relevanz der Übung wurde insgesamt mit der Note 1,5 bewertet.

Die am häufigsten genannte Kritik am Kurs war das aufgrund der Covid-19-Pandemie bedingte Fehlen einer Assistenz während der Schienungsübung. Die größte Zusprache bekam das generelle Erlernen neuer praktischer Fähigkeiten sowie die zur Verfügung gestellten Vorbereitungsmaterialien.

Die detaillierte Auswertung der geschienten Zähne ergab keinen signifikanten Unterschied zwischen den einzelnen Gruppen, welche sich nach Material, Erst- oder Zweitversuch der Schienung sowie der einzelnen geschienten Zähne aufgliederten. Der Zahn 21 stach jedoch teilweise nicht signifikant in seinen Ergebnissen hervor.

4 Diskussion

Diese Studie beschreibt eine Methode, in der die 3D-Drucktechnologie zur Herstellung von künstlichen Übungszähnen mit speziellem Einsatzgebiet zur zahnärztlichen Ausbildung genutzt wurde. Mithilfe der Druckzähne sollten Studierende eine Schienung parodontal gelockerter Zähne erlernen und einen Vergleich zwischen zwei unterschiedlichen Schienungsmaterialien bekommen. Zur Vorbereitung standen ein Lehrvideo und ein Kursskript zur Verfügung.

Ziel der Studie war es, ein weiteres Lehrkonzept zu entwickeln. Zähne zur Übung einer parodontalen Schienung existierten noch nicht in dieser Form und sollen das vorklinische Ausbildungsspektrum vor Behandlung am Patienten erweitern. Zudem sollte ein möglicher Unterschied in der Handhabung verschiedener Schienungsmaterialien erforscht werden, wenn diese von unerfahrenen Behandlern eingesetzt werden.

4.1 Diskussion der Methodik

Bevor die gewonnenen Ergebnisse interpretiert werden können, soll im folgenden Abschnitt die angewandte Methodik des Kursablaufes, des Fragebogens und des Auswertungssystems kritisch bewertet werden. Damit sollen mögliche Fehlerquellen der Studie aufgezeigt werden, um eine bessere Beurteilung der Ergebnisse zu ermöglichen.

4.1.1 Fallzahl

An der Studie zum Erlernen der parodontalen Schienung von gelockerten Frontzähnen nahmen 43 Studierende freiwillig teil, was dem gesamten siebten Semester der Zahnklinik Würzburg entsprach. Andere Studien zur Erprobung von neuen Lehrmethoden, welche mit Zahnmedizinierenden durchgeführt wurden, enthielten ähnliche Teilnehmerzahlen. So wurde in einer Studie von Smith et al. der Nutzen von Videosequenzen als Ersatz für Live Demos mit 26 Studierenden überprüft (Smith et al., 2012). Ebenso verglichen Thilakumara et al. die unterschiedliche Effektivität von Live Demos und Lehrvideos mithilfe von

76 Studierenden (Thilakumara et al., 2018). Soares et al. testeten virtuelle 3D-Modelle zur Lehre der Kavitätenpräparation zusammen mit 40 Studierenden (Soares et al., 2013). Kröger et al. übten mit 22 Studierenden verschiedene zahnmedizinische Techniken an drei verschiedenen, auf Patientendaten basierenden, 3D-gedruckten Modellen (Kröger et al., 2017). Auch Seifert et al. nutzten 3D-gedruckte Modelle für ihre Studie, in welcher 36 Studierende im Fachgebiet der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie zu Lehrzwecken die künstlich hergestellten Modelle mit der Situation an Leichen verglichen (Seifert et al., 2020). Die Studien von Höhne et al. zur Etablierung neuer Lehrkonzepte mithilfe der 3D-Drucktechnik wurden ebenfalls mit 48, 47 sowie 38 Studierenden durchgeführt (Höhne et al., 2020b, Höhne et al., 2019a, Höhne et al., 2020c). Die Zahl der Probanden dieser Studie liegt also im Bereich der Teilnehmerzahlen vergleichbarer Studien über die präklinische Lehre an Zahnkliniken.

Eine größere Teilnehmeranzahl führt zu repräsentativeren Ergebnissen, weshalb die Rekrutierung von mehr Probanden vorteilhaft ist. An der Universität Würzburg liegt die Semestergröße zwischen ca. 30 und 60 Studierenden, weshalb die Beschränkung auf einzelne Semester auch eine Beschränkung der Teilnehmerzahl zur Folge hat. Eine Möglichkeit wäre, einen Kurs auf freiwilliger Basis semesterübergreifend anzubieten, wobei eine gewisse praktische Erfahrung weiterhin vorausgesetzt werden müsste. Auch ein Übungsseminar in Zusammenarbeit mit einer anderen Universität wäre denkbar, um eine größere Anzahl an Studienteilnehmern zu erreichen.

4.1.2 Studiendesign

Ziel der Studie war es, eine bisher noch nicht untersuchte Übungsmethode zur Schienung parodontal gelockerter Zähne zu entwickeln und zu bewerten. Da es bisher keinen ähnlichen Ansatz für dieses spezielle Gebiet der Ausbildung gibt, ist ein Vergleich mit anderen Studien nur bedingt möglich.

Der Ansatz, die Teilnehmer in zwei zufällig ausgewählte gleich große Gruppen aufzuteilen, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten ist weit verbreitet. So haben Nagy et al. Onlaypräparationen in zwei Gruppen mit verschiedenen Anleitungen durchführen lassen (Nagy et al., 2018), Yee et al. ließen Studierende in

zwei Gruppen die inzisale Reduktion von Fronzähnen teilweise mithilfe von geführten Bohrern trainieren (Yee et al., 2019). Auch die bisher genannten Studien von Höhne et al. erfolgten nach zufälliger Aufteilung der Teilnehmer in zwei Gruppen (Höhne et al., 2020b, Höhne et al., 2019a, Höhne et al., 2020c).

Der größte Kritikpunkt seitens der Probanden war das Fehlen einer Assistenz bei der Durchführung der Schienung. Dies war eingehend nicht so geplant, jedoch aufgrund der zum Zeitpunkt der Studie andauernden Covid-19-Pandemie nicht anders durchzuführen. Die Studierenden mussten den Sicherheitsabstand von 1,5 m einhalten, weswegen jedem Teilnehmer seine eigene Behandlungseinheit zugewiesen wurde. Nur auf diese Weise konnte neben der allgemeinen Maskenpflicht und den Hygieneregeln hinsichtlich Händedesinfektion die Sicherheit aller Anwesenden gewährleistet werden. Die Behandlung ohne Assistenz kann jedoch auch als positiver Umstand gesehen werden, da unter diesen Bedingungen das handwerkliche Geschick des einzelnen Teilnehmers getestet wurde, ohne durch Interaktion mit einer Assistenz verfälscht zu werden.

Eine Idee der Studie war es, den Studierenden bei der Schienung freie Hand zu lassen und so herauszufinden, mit welchem Material sie besser zurechtkämen. Aus diesem Grund wurden zwar ausreichend Informationsmaterialien zur Verfügung gestellt, jedoch gab es kein explizites geschientes Anschauungsmodell in den Kursräumlichkeiten. Die Studierenden sollten nach eigenem ästhetischem Empfinden, sowie der Vorgabe des originalen KaVo-Modelles arbeiten. Ein Kontrollmodell kann aufgrund der direkten Vergleichbarkeit die Genauigkeit der durchzuführenden Arbeit verbessern (Dunne, 1993). Thilakumara et al. haben gezeigt, dass eine Anleitung durch den Kursassistenten im Vergleich zur Vorbereitung durch ein Lehrvideo zwar nicht zu einer signifikanten Verbesserung der Ergebnisse führte, jedoch die Klärung von Fragen nur durch einen Assistenten erfolgen kann (Thilakumara et al., 2018). Auch Schlenz et al. zeigten, dass die digitale Lehre (CAL, Computer Assisted Learning) zwar deutlichen Zuspruch bei Studierenden findet und eine Steigerung der Lernmotivation hervorbrachte, doch eine Rücksprache mit dem Kursassistenten, zumindest beim Erlernen von Kronenpräparationen, weiterhin notwendig ist (Schlenz et al., 2020). Für einen ähnlichen Vergleich in dieser Studie hätte eine größere Teilnehmerzahl akquiriert

werden müssen, um die Größe der Testgruppen nicht zu sehr zu minimieren. Eine Hälfte der Probanden hätte dann die Vorbereitung per Lehrvideo, die andere Hälfte die Vorbereitung per Live-Demo sowie Betreuung im Kurs erfahren.

Um einen eindeutigeren Lerneffekt nachzuweisen oder auszuschließen, wäre es möglich, mehr als zwei Schienungen pro Teilnehmer durchführen zu lassen, und diese mit einem geringeren Abstand als zwei Wochen zu planen. Möglich ist, dass nach den zwei Wochen bereits so viel Trainingseffekt verloren gegangen ist, sodass sich dieser in der zweiten Schienung nicht mehr widerspiegelte, oder die Anzahl von zwei Schienungen nicht ausreichend war für das Erzielen eines Trainingseffekts. Außerdem ist der Vergleich von zwei verschiedenen Materialien nach einem längeren Zeitraum erschwert, da dies aus der Erinnerung erfolgt. Vincent et al. ließen ihren Probanden zwischen den drei Trainingseinheiten jeweils eine Woche Zeit (Vincent et al., 2020).

Anders lässt sich jedoch argumentieren, dass bei der Durchführung von nur einer Schienung pro Sitzung und einem großen Abstand zwischen den Trainingseinheiten die Motivation seitens der Studierenden höher sein könnte, da sie nicht von der Masse der durchzuführenden Aufgaben in zu kurzer Zeit demotiviert werden. Den größeren Lerneffekt durch kürzere Lernperioden über mehrere Sitzungen hinweg gegenüber einer langen Lerneinheit bestätigten Rutenfranz et al. schon im Jahr 1966 (Rutenfranz et al., 1966).

Es zeigte sich, dass ein Lerneffekt auch über die eigentliche Übungszeit hinaus stattfindet. Wenn sich das Individuum bewusst ist, eine neue Fähigkeit erlernt zu haben, wird das Erlernte über den Schlaf gefestigt (Robertson et al., 2004). Auch Fischer et al. stellten die wichtige Rolle des Schlafes bei Speicherung und Verbesserung neu erlernter motorischer Fähigkeiten fest (Fischer et al., 2002). Für einen idealen Trainingseffekt würde also ein Kurs mit kurzen Übungseinheiten über mehrere Tage hinweg die besten Ergebnisse erzielen. Der Kurs für diese Studie konnte aufgrund des Semesterstundenplans nur einmal wöchentlich angeboten werden, in Zukunft könnte die Übung aber mit kürzeren Intervallen in den Stundenplan integriert werden.

Es ist bekannt, dass Probanden bei der Teilnahme an Experimenten unter Beobachtung häufig stärker motiviert sind, als im regulären Universitätsbetrieb. Dies

wird auch „Hawthorne-Effekt“ genannt. Ebenso bringt der sogenannte Neuigkeitseffekt bei Anwendung einer Tätigkeit zum ersten Mal oft andere Ergebnisse, als bei regelmäßiger Anwendung (Prechelt, 1999). Daher wäre es interessant zu untersuchen, wie sich die Motivation der Studierenden verändert, wenn eine solche Schienung regelmäßig, z.B. mehrfach pro Semester und über mehrere Semester hinweg durchgeführt werden würde.

Das Prinzip der Evaluation mittels eines Fragebogens ist weit verbreitete Praxis. So wurden, wie in dieser Studie, Fragebögen mit Multiple-Choice- sowie offenen Fragen auch von Smith et al. (Smith et al., 2012), Kröger et al. (Kröger et al., 2017) Thilakumara et al. (Thilakumara et al., 2018), Schlenz et al. (Schlenz et al., 2020) und Seifert et al. (Seifert et al., 2020) zur Evaluation genutzt. Der Fragebogen dieser Studie wurde bereits mehrfach mit Erfolg an der Universität Würzburg eingesetzt und an die Studieninhalte angepasst.

4.1.3 Erfordernis der praktischen Ausbildung vor Patientenkontakt

Es ist bekannt, dass Fähigkeiten durch Training verbessert werden können. Sportler trainieren zum Beispiel, um schneller zu laufen oder höher springen zu können. Ebenso ist die manuelle Ausbildung in der Zahnmedizin neben der theoretischen Ausbildung unerlässlich, wobei keine besondere Grundgeschicklichkeit vorhanden sein muss. Giuliani et al. zeigten in ihrer Studie, dass Studierende, die regelmäßig an Trainingseinheiten teilnahmen, ihre manuelle Geschicklichkeit unabhängig von ihrer Ausgangsgeschicklichkeit signifikant verbessern konnten (Giuliani et al., 2007). Ein Vergleich nach Chambers et al. von „Beginner“ Studenten mit solchen, die kurz vor ihrem Examen standen, zeigte ebenfalls signifikante Unterschiede in der manuellen Geschicklichkeit bei Präparation einer okklusalen Amalgamfüllung, wobei die erfahrenen Teilnehmer deutlich schneller und sicherer zu Werke gingen (Chambers et al., 1997). Teilnehmer an der Studie von Kröger et al. beschrieben, nach Durchführung des Trainings deutlich besser auf die klinischen Kurse vorbereitet zu sein (Kröger et al., 2017). Hegarty et al. zeigten, dass die dentale Ausbildung generell das dreidimensionale Arbeiten an zahnmedizinischen Objekten verbesserte (Hegarty et al., 2009).

Aus ethischen Gründen sollte das notwendige Training, um eine bestimmte Fähigkeit zu erlangen, nicht zuerst am Patienten stattfinden. Simulationen bieten eine sichere Umgebung, in der bestimmte Techniken wiederholt geübt und verbessert werden können, ohne Patienten aufgrund von fehlenden Fähigkeiten zu gefährden. Außerdem werden die Erfolgsrate verbessert und Komplikationen verringert (Kneebone et al., 2004, Barsuk et al., 2009). Zusätzlich führt das ausschließliche Sammeln von Erfahrungen am Patienten nach dem „fake it `till you make it“ - Prinzip zu Stress und Verlust an Selbstvertrauen aufgrund des Übersteigens der eigenen Kompetenz (Speirs et al., 2018). Durch das Erlernen neuer Fähigkeiten in sicherer Umgebung wächst das Selbstvertrauen in das eigene Können und somit die Sicherheit bei der eigenen Behandlung. So zeigten Coleman et al., dass ein Training eines chirurgischen Eingriffes nicht nur die Geschicklichkeit, sondern auch die Selbstsicherheit der Teilnehmer verbessert (Coleman et al., 2019). Dies zeigt sich auch in dieser Studie, wonach die 43 Teilnehmer vor dem Kurs ihre Fähigkeit, parodontal gelockerte Zähne zu schienen, mit „mangelhaft“ (Note Ø 4,6), und nach dem Kurs mit „gut“ (Note Ø 2,3) bewerteten.

Die Lernkurve steigt bei jedem Menschen je nach Motivation, Fingerfertigkeit und Risikobereitschaft unterschiedlich steil an um schlussendlich gegen eine Asymptote zu streben, ab welchem Punkt keine Verbesserung mehr beobachtet wird (Heinzl et al., 2007). Im Idealfall sollte dieser Punkt im Zahnmedizinstudium bereits vor dem ersten Patientenkontakt erreicht sein, was jedoch aufgrund der Fülle der zu erlernenden Fähigkeiten unrealistisch erscheint. Es kann zudem nicht jeder Studierende jede einzelne Behandlungsform am Patienten durchführen, da hierfür nicht genügend Patienten zur Verfügung stehen. Aus diesem Grund ist es umso wichtiger neue Lehrmethoden zu entwickeln, um Studierende zumindest am Modell auf möglichst viele Situationen praktisch vorzubereiten und zu trainieren.

4.1.4 Diskussion der Lehrmethodik

Die Idee des Kurses war, die teilnehmenden Studierenden weitgehend autark arbeiten zu lassen, um einen Einfluss des Assistenten auf die Meinung des Teilnehmers zu minimieren und die Studierenden zur Selbsteinschätzung zu animieren. Einerseits sollte die Schienung parodontal geschädigter Zähne erlernt, andererseits ein Vergleich zwischen zwei unterschiedlichen Schienungsmaterialien vom unerfahrenen Behandler erfasst werden. Zu diesem Anlass wurden ein Skript zur Vorbereitung sowie ein Lehrvideo erstellt. Das Lehrvideo konnte online nach eigenem Bedarf mehrfach angeschaut werden.

Boud definierte die Selbstbewertung als „Einbeziehung der Studierenden in das Erkennen von Standards, welche auf die eigene Arbeit angewendet werden, und die Bewertung, in welchem Umfang sie diese Kriterien erfüllt haben“ (Boud, 1995). Seiner Meinung nach führt das fehlende Einbeziehen von Studierenden in die Bewertung von Kriterien dazu, dass diese aus dem Kernprozess des Lernens ferngehalten, sowie davon abgehalten werden, dem Feld der Praxis beizutreten, welches sie gerne erreichen wollten. Studierende müssen lernen wie man lernt, womit die Selbstbewertung ein wichtiger Aspekt des generellen Erfolges wird (Boud, 1999). Die Teilnehmer dieser Studie sollten sich eine eigene Meinung über zwei verschiedene Schienungsmaterialien bilden, was angesichts der Studien von Boud et al. dazu führen kann, dass sie später leichter entscheiden können, welche Materialien in Ihren Augen besser zu verwenden sind. Dies ist angesichts der großen Fülle an zahnmedizinischen Materialien und Herstellern ein sehr wichtiger Prozess für junge Zahnärzte, die in Ihr Berufsleben starten.

Auch Schön beschrieb schon 1983, dass das selbstaneignende Lernen für die Weiterentwicklung des Praktikers von Bedeutung sei. Dies helfe beim Lösen von Problemen, bei welchen man mit den bisher erfahrenen Methoden nicht zur Lösung käme (Schön, 1983). Im Jahr 2010 zeigten McDonald et al., dass die Leistungsfähigkeit der Probanden durch ein Training ihrer Selbsteinschätzung signifikant verbessert wurde (McDonald et al., 2010). Die Kenntnis der eigenen Kompetenzen, Stärken und Schwächen hilft dabei zu entscheiden, ab welchem Punkt einer Aufgabe Hilfe benötigt wird. Dies führt ebenfalls zu einer Steigerung des

Selbstvertrauens (Eva et al., 2005). Es kann argumentiert werden, dass die Teilnehmer an dieser Studie aufgrund der Bewertung ihrer eigenen Arbeit mittels Fragebogen den nach Schön, McDonald und Eva et al. beschriebenen Lerneffekt erfuhren. Auch Sharma et al. entdeckten eine signifikante Steigerung in der akademischen Leistungserbringung nach Training der Selbsteinschätzung, wobei zusätzlich Interesse und Motivation der Studierenden am jeweiligen Fach gesteigert werden konnte (Sharma et al., 2016). So erfolgte auch die positive Freitextbewertung der Studierenden, dass die Motivation, neue Methoden eigenständig zu erlernen, sehr hoch war ($n = 25$).

Ein spezielles Kontrollmodell war für diese Studie nicht notwendig, da sich die Teilnehmer an dem original KaVo Modell orientieren konnten. Dies galt als Richtlinie für die durchzuführende Schienung und war zur Selbstkontrolle und -einschätzung ausreichend. Der später durchgeführte Scan der Modelle sowie die digitale Auswertung wurden eingesetzt, um vergleichbare Daten für diese Studie zu erlangen. Diese Technik ist jedoch mit großem Zeit- und Materialaufwand verbunden, was nicht praxistauglich für die Bewertung dieser speziellen Arbeit im Kurs ist. Zudem ist ein so aufwendiger Vergleich für eine reguläre Lehre der parodontalen Schienung nicht notwendig. Es besteht in Deutschland das Verlangen nach digitaler Lehre (Computer-Assisted-Learning, CAL), und diese fand auch bereits großen Zuspruch (Schlenz et al., 2020), jedoch zeigten Welk et al., dass der Umsetzung die hohen Kosten der Gerätschaften, ein schlechtes Kosten-Nutzen-Verhältnis und der große Aufwand, diese Geräte initial in die Kurse zu integrieren, im Wege stehen (Welk et al., 2005).

4.1.4.1 Das Schienungsmodell / Die Wackelzähne

Die Modellzähne, welche zur Schienung im Kurs entwickelt wurden, wurden digital designt und mittels des 3D-Druckverfahrens hergestellt. Sie entsprachen in Ihrer Grundform den Standard KaVo Übungszähnen und hatten eine soweit veränderte Basis, dass sie teilweise verdreht und locker im Original KaVo Modell saßen. Die händische Reposition der Zähne in einen ästhetisch ansprechenden Zahnbogen war möglich.

Zur Herstellung der Studienzähne wurden die original KaVo Übungszähne gescannt, ebenso wurde zum späteren Vergleich der geschienten Modelle verfahren. Der hierfür genutzte Streifenlichtscanner InEos X5 hat eine sehr hohe Genauigkeit von $2,1 \mu\text{m} \pm 2,8 \mu\text{m}$ bei einer Brücke als Normprüfkörper (Sirona, 25.03.2021b). In einer Studie von Burde et al. ergab sich eine Auflösung von $6,4 \mu\text{m} \pm 0,55$ sowie eine Genauigkeit von $4,32 \mu\text{m} \pm 0,34$ (Burde et al., 2019). Zudem besteht die Möglichkeit, die gescannten Modelle im offenen .stl-Dateiformat zu exportieren, was eine freie Bearbeitung des Datensatzes sowie eine freie Materialwahl für den späteren Druck ermöglichte (Sirona, 25.03.2021a). Auch Ender et al. nutzten den Scanner InEos X5 in Ihrer Studie für den Vergleich eines konventionellen Modells mit einem Modell, welches durch einen Intraoralscan erzeugt wurde (Ender et al., 2019). Aufgrund der hohen Genauigkeit und möglichen Freiheiten war der Scanner für diese Studie, sowohl im Herstellungsprozess der Zähne als auch den späteren Vergleich der geschienten Modelle, gut geeignet. Zum dreidimensionalen Druck der Zähne wurde der 3D-Drucker Form2 verwendet. Der Form2 verwendet die Technik der Stereolithografie (SLA) und kam bereits in einem weiten Feld an Studien zur Herstellung ähnlicher Übungsmodelle zum Einsatz. So stellten Boonsiriphant et al. Anschauungsmodelle zur idealen Kronenpräparation (Boonsiriphant et al., 2019), Reymus et al. endodontologische Übungsmodelle sowie solche zum Training bei Zahntraumata (Reymus et al., 2018, Reymus et al., 2019), Hanafi et al. Ober- und Unterkiefermodelle zur Einbettung von Echtzähnen, ebenfalls zur endodontologischen Übung (Hanafi et al., 2020) und nicht zuletzt Höhne et al. Modelle zum Training diverser Präparationen mit Erfolg her (Höhne et al., 2019a, Höhne et al., 2019b, Höhne et al., 2020a). Eine Alternative zum Form2 mit dem SLA Verfahren hätte der 3D-Drucker Object30 Prime (Stratasys, Rehovot, Israel) dargestellt, welcher die Polyjet Drucktechnologie nutzt. Die Herstellung der Übungsmodelle ist jedoch bei ähnlicher Präzision mit dem Polyjet-Verfahren deutlich kostenintensiver als im Vergleich zur SLA-Drucktechnik (Kim et al., 2020). Ein Vorteil der Polyjet-Drucker ist, dass sie verschiedene Materialien in einem Druckvorgang drucken können (Gebhard et al., 2016), was für diese Studie jedoch keinen Unterschied ergeben hätte, da die erstellten Zähne keine integrierten Schichten hatten und somit nur aus einer

Art Kunststoff bestanden. Auch andere Universitäten hätten somit die Möglichkeit, die Ergebnisse dieser Studie einfach zu reproduzieren oder die hier verwendeten Übungszähne in ihren Lehrplan aufzunehmen, da der Form2 ein Drucker mit geringem Anschaffungspreis ist (Gibson et al., 2014) und das Gerät sehr einfach zu bedienen ist.

Der verwendete Kunststoff „White Resin“ ist ein spezielles Harz für die Herstellung von Modellen. Höhne et al. haben dieses Harz bereits mehrfach für die Herstellung von Studienzähnen benutzt, Hanafi et al. nutzten ein ähnliches Harz („Dental Model Resin“) zur Herstellung der vorher genannten Modellbasen zur Einbettung von Echtzähnen (Hanafi et al., 2020). Dass das Harz nicht unbedingt zur Herstellung von Übungszähnen gedacht ist, spiegelt sich auch in der Freitextauswertung wider. Es wurde angegeben, dass die Zahnschmelz sehr weich sei, weshalb bei initialer Präparation die zu präparierende Rille zu groß und zu tief angelegt wurde. Langfristig kann eine Lösung für dieses Problem durch die Entwicklung neuer Harze für den 3D-Druck, welche in ihren Eigenschaften der natürlichen Zahnhartsubstanz stärker ähneln, bestehen. Auch die Farbe könnte in dem Zug angepasst werden, da das Reinweiß der Zähne im Modell sehr unnatürlich aussah. Hao et al. veränderten 2018 in einer Studie die Eigenschaften eines photopolymer Resin von Formlabs Inc. unter anderem durch die Beimischung von Gips. So konnten die Materialeigenschaften angepasst werden, dass sie der Knochenstruktur und Farbe von Wirbelkörpern sehr nahe kamen (Hao et al., 2018). Es ist also möglich, Knochenstrukturen durch 3D-Druck nachzuahmen. Somit ist die Herstellung von dentinähnlichen Materialien nur ein kleiner Schritt in die gleiche Richtung. Zahnschmelz ist das Material des menschlichen Körpers mit der größten Härte (Lacruz et al., 2017), und stellt deswegen eine größere Herausforderung dar, die jedoch mit fortschreitender Technologie und Entwicklung sicher gelöst werden kann. So ist seit kurzem ein neues Harz mit dem Namen „Rigid 10K“ erhältlich, welches eine deutlich höhere Endhärte aufweist und dem Zahnschmelz somit schon deutlich ähnlicher ist.

Dieses Material könnte in Zukunft zur Herstellung der Übungszähne genutzt werden, um ein realistischeres Gefühl beim Beschleifen der Zähne zu gewährleisten.

Einen Einfluss auf das Ergebnis der Studie hat die Lockerung der entwickelten Zähne. Diese wurde im Freitextfeld von zwei Teilnehmern als unrealistisch beschrieben, ohne genauer ins Detail zu gehen. Diese Äußerung kam jedoch nur von einer geringen Anzahl an Teilnehmern, welche zum Zeitpunkt der Studie noch keinen klinischen Kontakt zu parodontal gelockerten Zähnen erfahren hatten, weshalb die Aussagekraft fragwürdig ist. Für eine weitere Studie mithilfe dieser Zähne sollte trotzdem die Zahnbasis überarbeitet werden, um die Zahnlockerungen und -kippen noch realistischer zu gestalten.

4.1.4.2 Die Schienungsmaterialien

Schienungsmaterialien gibt es in einer großen Auswahl am Markt. Die Wahl für diese Studie fiel auf zwei der marktführenden Schienungsmaterialien, everStick Perio (GC Germany GmbH, Bad Homburg, Deutschland) sowie Ribbond Ultra (Ribbond Inc, Seattle, Washington USA). Das Material everStick Perio besteht aus vorimprägnierten unidirektionalen Glasfasern und ist eher rigide, Ribbond Ultra ist ein eher flexibles Polyethylen-Faserband. Beide Materialien haben, bei genügend langer Einwirkzeit, einen gleichmäßigen Verbund zum Adhäsivsystem (Lucchese et al., 2011). Obwohl die Materialien dem gleichen Zweck dienen, ist die Handhabung unterschiedlich. EverStick Perio hat einen größeren Querschnitt und benötigt somit eine invasivere Präparation, um einen Überstand der Schienung zu vermeiden. Ribbond Ultra muss vor Anwendung mit Adhäsiv benetzt werden, was einen zusätzlichen Arbeitsschritt darstellt, benötigt jedoch weniger Platz aufgrund des geringeren Querschnittes. Der größere Querschnitt des everStick Perio wurde im Freitextfeld des Fragebogens negativ bewertet, fünf Teilnehmer empfanden das Vorgehen mit diesem Material als zu invasiv.

Aufgrund dieser Differenzen bei gleichem Einsatzzweck waren die Materialien eine gute Wahl, um sie durch unerfahrene Behandler vergleichen zu lassen. So konnte eine Aussage über die Anwenderfreundlichkeit der beiden Materialien erfasst werden, da sich die Teilnehmer der Studie (bis auf eine Teilnehmerin, welche aufgrund ihrer Ausbildung zur ZFA bereits Erfahrung mit Schienungsmaterialien hatte) bisher noch keine Meinung bilden konnten.

4.2 Diskussion der Auswertung

Im Anschluss an den praktischen Kurs wurden die geschienten Modelle auf Abweichung vom Idealmodell ausgewertet. Die Präzision der Auswertung und die hierfür verwendete Software werden im folgenden Abschnitt diskutiert.

4.2.1 Vergleich zum Idealmodell

Abweichungen von der idealen Schienung konnten mit einer Genauigkeit von $\pm 0,01$ mm dargestellt werden. Dies ist deutlich genauer, als für die Schienung von gelockerten Frontzähnen notwendig ist. Zur Erfassung der Genauigkeit der Schienung wurden virtuelle Kugeln in die Mitte der Schneidekanten der zu schiehenden Zähne projiziert, um eindeutig reproduzierbare Messpunkte für einen sinnvollen Vergleich zu erlangen. Anschließend wurden die Abstände der Mittelpunkte der Kugeln der Idealzähne zu denen der Kurszähne gemessen. Da die Abweichung der Zähne keine zweidimensionale Abbildung, sondern eine Bewegung im dreidimensionalen Raum ist, lässt diese Art der Vermessung keine Aussage über den genauen Stand des Zahnes im Zahnbogen zu. Eine technische Umsetzung mit der genutzten Software zur genauen dreidimensionalen Bestimmung der Zahnposition war im Sinne dieser Studie aber auch nicht notwendig, da der durchschnittliche Abstand zwischen den Schneidekanten für die Abklärung der Fragestellung, wie dicht die Schienung am Idealmodell lag, ausreichte.

4.2.2 Auswertungssoftware

Um die geschienten Modelle miteinander zu vergleichen, wurde die 3D-Analysesoftware GOM Inspect (GOM GmbH, Braunschweig, Germany) genutzt. Diese freie Analysesoftware findet hauptsächlich Anwendung in der Industrie der Luft- und Raumfahrt, der Automobilindustrie und der Energieerzeugung. Sie wurde nach ihrem erstmaligen Erscheinen auf dem Markt 2011 (Maschinenmarkt.de, 2011) jedoch auch im Bereich der Zahnmedizin regelmäßig eingesetzt.

Die Genauigkeit der systemunabhängigen Auswertungssoftware wurde der Klasse 1 zugeteilt, was der Kategorie der geringsten Messabweichungen entspricht. Diese Präzision wurde durch die Physikalisch-Technische Bundesanstalt

(PTB; Braunschweig und Berlin) sowie das National Institute of Standards and Technology (NIST; Gaithersburg, Maryland, USA) zertifiziert (GOM.com, 2021). Damit ist es möglich, 3D-Datensätze nahezu perfekt zu überlagern und Modelle mit höchster Präzision miteinander zu vergleichen. Hinzu kommt die Nutzung des offenen .stl-Dateiformates, was eine direkte Übertragung hochauflösender Datensätze in das Programm ermöglicht. Aus diesen Gründen fand die Software auch bereits öfter in der zahnmedizinischen Forschung Verwendung. So nutzten Kröger et al. GOM Inspect für die Nachbearbeitung von Löchern und Fehlern ihrer 3D-Scandaten sowie die Kombination ihrer Datensätze für ideale Modellbasen ihrer Übungsmodelle (Kröger et al., 2017). Lee et al. nutzten GOM Inspect vor Präparation stark abradierter Fronzähne zur Darstellung der idealen minimal-invasiven Präparation, um aus dem Datensatz eine Präparationshilfe zu erstellen (Lee et al., 2020). Morris et al. verglichen die Genauigkeit der Scanergebnisse der Smartphoneapp DM (Dental Monitoring, Paris, Frankreich) mit den Ergebnissen eines Intraoralscanners vor und nach kieferorthopädischer Therapie mittels Invisalign Schienen (Align Technology Switzerland GmbH, Rotkreuz, Schweiz) (Morris et al., 2019) und auch Deregibus et al. nutzten die Auswertungssoftware für den Vergleich von Zahnbögen vor, während und nach kieferorthopädischer Behandlung mittels Invisalign (Deregibus et al., 2020). Nagy et al. nutzten GOM Inspect, um die Genauigkeit von sieben Intraoralscannern mit den Ergebnissen eines herkömmlich im Labor gescannten Gipsmodelles zu vergleichen (Nagy et al., 2020), und auch Ender et al. nutzen die Software, um Intraoralkameraaufnahmen von kompletten Zahnbögen sowie Teilzahnbögen auf ihre Genauigkeit gegenüber der klassischen Laborscanmethode mit Gipsmodell und stationärem Scanner zu überprüfen (Ender et al., 2019).

Die Software ist also in ihrem Gebrauch weit verbreitet, da ihre Präzision und der Umfang an Messwerkzeugen alle notwendigen Anforderungen erfüllt. Zudem wurde sie bereits mehrfach für den Vergleich einzelner Zähne im Bezug zum gesamten Kieferkamm genutzt (Morris et al., 2019, Deregibus et al., 2020). Aus diesem Grund war sie auch für unsere Studie das Mittel der Wahl zum Vergleich der Modelle.

4.3 Diskussion der Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse des Fragebogens sowie die Ergebnisse der Schienungsübung diskutiert.

4.3.1 Diskussion von Modell und Schienungsmaterial

Ziel der Studie war einerseits, ein Modell zum Erlernen der parodontalen Schienung zu entwickeln, und andererseits zwei unterschiedliche Schienungsmaterialien *in vitro* miteinander zu vergleichen. Die Schienungsübung kann nach Auswertung des Fragebogens als Erfolg gewertet werden, da die Studierenden die Übung als realistisch und klinisch relevant bewerteten. Der größte Kritikpunkt, das Fehlen einer Assistenz bei Durchführung der Übung, war der Covid-19-Situation geschuldet. Dies kann jedoch auch als Vorteil gesehen werden, da das Geschick des einzelnen Kursteilnehmers ohne Einfluss einer Assistenz bewertet werden konnte.

Interessant waren die stark abweichenden Meinungen bezüglich der Schienungsmaterialien. Eine etwas größere Gruppe ($n = 24$) bevorzugte das Material Ribbond Ultra nach gesamter Auswertung, jedoch fand auch das Material everStick Perio viel Zuspruch ($n = 19$), wobei zwei Teilnehmer beide Materialien als gleichwertig beschrieben. Dies ist teilweise über den Lerneffekt zwischen erster und zweiter Übung zu erklären, da das jeweils als zweites eingesetzte Material die bessere Bewertung erhielt. Nur vier (everStick Perio) bzw. fünf (Ribbond Ultra) Teilnehmer bewerteten das zuerst verwendete Material besser. Auf beiden Seiten wurde die schlechtere Handhabung als größtes Gegenargument gegen das jeweilig andere Material angeführt. Die Auswertung der Modelle ergab keine signifikanten Abweichungen zwischen den Erst- und Zweitversuchen sowie zwischen den Schienungsmaterialien.

Einzig auffällig war jedoch Zahn 21, welcher im Vergleich nach Schienung stärker abwich als die restlichen Modellzähne.

Die Basis des Zahnes 21 hatte im Vergleich zu den restlichen Schienungszähnen die stärkste Abweichung von der normalen Zahnachse. Dies führte zu einer erschweren Repositionierung des Zahnes in den Zahnbogen sowie zu einer stär-

keren Rückstellung in die gekippte Position aufgrund der Elastizität der künstlichen Gingiva. So waren die Zähne ohne Assistenz nur schwer in Endposition zu halten. Vor erneuten 3D-Druck der Zähne sollte der Zahn 21 angepasst werden. Das Ergebnis kann so interpretiert werden, dass es für den Anfänger keinen Unterschied macht, welches Material zur parodontalen Schienung benutzt wird. Bei häufigerer Schienung ergibt sich automatisch ein Lerneffekt, welcher zu einer besseren Bewertung des jeweiligen Materials führt.

Der fehlende signifikante Unterschied zwischen Erst- und Zweitversuch kann durch die insgesamt geringen Abweichungen der Zähne von der idealen Achse erklärt werden. So kann argumentiert werden, dass die Schwierigkeit nicht in der Repositionierung der Zähne, sondern in der Handhabung des Schienungsmaterials lag. Ein weiterer Erklärungsansatz könnte sein, dass die Studierenden durch die Vorbereitung per Lehrvideo bereits sehr genaue Kenntnis über die Schienung hatten und sie so bereits im Erstversuch sehr gut umsetzen konnten. Den großen Lerneffekt durch die Übung kann man zudem der Bewertung durch die Studierenden entnehmen, da diese ihre Vorbereitung auf die parodontale Schienung am Patienten vor (Note 4,6) und nach dem Kurs (Note 2,3) signifikant besser bewerteten.

4.3.2 Kosten der Druckzähne

Die geringen Herstellungskosten der 3D-gedruckten Zähne stellen einen weiteren positiven Aspekt dar. Das Studium der Zahnmedizin ist einer der material- und somit kostenintensivsten Studiengänge in Deutschland. Das Grundinstrumentarium kostet in der Regel einmalig mehrere tausend Euro in der Anschaffung, hinzu kommen regelmäßige Ausgaben für Verbrauchsmaterialien, wie z.B. die Modellzähne von KaVo. Die Kosten für die Materialien tragen die Studierenden in der Regel selbst. Nach Aussage des Dentaldepots Gerl verbrauchen Studierende im Laufe ihres Studiums etwa 200 bis 300 solcher Übungszähne, was bei einem Preis von 2,20 € brutto pro Zahn zwischen 440 € und 660 € an Kosten nur für Übungszähne bedeutet. An anderen Universitäten wird auch das Frasaco-Übungsmodell verwendet, der Preis von 1,85 € brutto pro Zahn liegt jedoch nicht

weit unter dem Preis der Exemplare von KaVo. Allein für diese Studie wurden pro Teilnehmer zwölf Zähne benötigt.

Die Materialkosten für die 3D-gedruckten Übungszähne, welche in dieser Studie verwendet wurden, betragen 13,3 ct pro Zahn. Hierbei sind die Anschaffungskosten der Hardware, als auch die notwendige Arbeitszeit nicht eingerechnet. Ein Scanner, wie der in dieser Studie verwendete InEos X5, hat zwar hohe Anschaffungskosten, wird aber nicht zwingend für den Druck eigener Modellzähne benötigt. Da die Datei, auf welcher der Druck basiert, nur einmalig erstellt werden muss, kann der Scan auch in einem zahntechnischen Labor erfolgen, welches den Scanner besitzt. Im Anschluss ist das Design mittels der für Universitäten und Lehreinrichtungen kostenfreien Software Autodesk Inventor möglich, und auch die Drucksoftware PreForm von Formlabs Inc. steht kostenfrei zur Nutzung zur Verfügung.

Es folgt eine Beispielrechnung, wie eine Universität kostengünstig Modellzähne drucken und den Studierenden zur Verfügung stellen könnte.

Tab. 2: Beispielhafte Kostenübersicht bei regelmäßiger Produktion der Druckzähne.

<i>Maximale Anzahl an Druckzähnen pro Durchgang</i>	<i>66 stk</i>
<i>Dauer eines Durchgangs</i>	<i>7 std 42 min</i>
<i>Mögliche Durchläufe pro Arbeitstag (8 Stunden)</i>	<i>2</i>
<i>Mögliche Produktionszahl an Zähnen pro Tag</i>	<i>132 stk</i>
<i>Mögliche Produktionszahl an Zähnen pro Woche (5-Tage-Woche)</i>	<i>660 stk</i>
<i>Materialkosten pro gedrucktem Standardmodellzahn</i>	<i>13,3 ct</i>
<i>Anschaffungskosten der Druckausrüstung, einmalig</i>	<i>3600 €</i>

So beschrieben auch Seifert et al. eine Kostenersparnis durch den 3D-Druck für Studierende (Seifert et al., 2020).

Die für diese Studie erstellten Zähne waren sehr einfach in ihrer Herstellung. Sie entsprachen grundsätzlich den original KaVo Modellzähnen mit leicht veränderter Basis und waren aus einem Stück hergestellt. Kompliziertere Übungszähne, welche verschiedene Kunststoffe in mehreren Schichten benötigen, wären dementsprechend in ihrer Herstellung kostenintensiver.

Durch die Ersparnis für die Studierenden ist es möglich, die finanzielle Belastung im Studium zu verringern, was möglicherweise zu einer höheren Motivation in den Phantomübungen führt.

Der Drucker Form2, welcher in dieser Studie verwendet wurde, wurde in der Zwischenzeit von seinem Nachfolger, dem Form3, abgelöst. Die Anschaffungskosten für den Form3 sind höher als die des Vorgängers, inklusive Form Wash und Form Cure Gerät beträgt der Kaufpreis ca. 5000 €.

4.4 Schlussfolgerung

Die Verbesserung der manuellen Geschicklichkeit durch die handwerkliche Ausbildung ist Kernelement des Zahnmedizinstudiums. Die in dieser Studie erprobte Lehrmethode, parodontal gelockerte Zähne vor erstem Patientenkontakt an der Phantomeinheit zu schienen, bietet eine Möglichkeit, das vorklinische handwerkliche Ausbildungsspektrum um eine bisher nicht vorhandene Übung zu erweitern. Auch ohne einen signifikant nachweisbaren Lernerfolg über die Auswertung der Schienungsmodelle beschrieben die Studierenden eine deutliche Verbesserung ihres Selbstbewusstseins bezüglich der Schienungsanwendung, außerdem wurde das grundsätzliche Erlernen neuer Fähigkeiten mehrfach positiv hervorgehoben. Ein zusätzlicher Erfolg war die Vorbereitung mittels Lehrvideo, welches die Studierenden positiv bewerteten. So kann ein Lehrvideo die Ausbildung neben Live-Demos erweitern und unterstützen.

Für den Anfänger scheint es zudem keinen Unterschied zu ergeben, mit welchem Material eine Frontzahnschienung durchgeführt wird, da das jeweils als zweites verwendete Material den größeren Zuspruch erlangte. Hieraus lässt sich ein grundsätzlicher Lerneffekt bei der ersten Durchführung der Schienung ablesen, welcher vom Material unabhängig erscheint.

Insgesamt kann das Ergebnis dieser Studie als Erfolg gewertet werden. Das Feedback war größtenteils positiv, die Kritik seitens der Teilnehmer war konstruktiv und nachvollziehbar. So wurden die limitierenden Faktoren dieser Studie diskutiert und können in zukünftigen Kursen eine Verbesserung nach sich ziehen.

5 Zusammenfassung

Im präklinischen Ausbildungsabschnitt des Zahnmedizinstudiums sollen die Studierenden möglichst umfassend und vielseitig auf die Behandlung von Patienten vorbereitet werden. Bislang zählt die Schienung parodontal gelockerter Zähne nicht zum Ausbildungsspektrum und es gibt kein Übungsmodell, mit welchem diese Art der Versorgung erlernt werden könnte. Ziel dieser Studie war es, Zähne für ein Übungsmodell zu entwickeln, dieses mithilfe des 3D-Druckes herzustellen, sowie zusätzlich die Handhabung von verschiedenen Schienungsmaterialien von ungeübten Behandlern bewerten zu lassen.

Es wurden parodontal gelockerte Zähne digital designt und mithilfe eines Stereolithographie 3D-Druckers gedruckt. Insgesamt 43 Studierende des siebten Fachsemesters nahmen im Rahmen des Parodontologiekurses freiwillig an der Studie teil. Es wurden pro Teilnehmer zwei Garnituren Zähne jeweils mit dem Material everStick Perio und dem Material Ribbond Ultra geschient. Die Bewertung der gedruckten Übungszähne sowie der zwei Schienungsmaterialien durch die Teilnehmer erfolgte mithilfe eines Fragebogens unter Nutzung der Schulnoten von 1 (sehr gut) bis 6 (ungenügend). Die geschienten Modelle wurden gescannt und digital verglichen.

Die Schienungsübung wurde insgesamt als „gut“ empfunden. Die Realitätstreue der Zahnlockerungen sowie die Repositionierung der Zähne in den Zahnbogen wurden mit der Note „befriedigend“ bewertet. Das Material everStick Perio bekam in der Handhabung die Note „befriedigend“, das Material Ribbond Ultra die Note „gut“. Der Lerneffekt der Übung wurde mit der Note „gut“ bewertet, wobei die Teilnehmer ihre eigenen Fähigkeiten vor dem Kurs als „mangelhaft“ und nach dem Kurs als „gut“ bewerteten. Die digitale Auswertung der geschienten Modelle ergab keinen signifikanten Unterschied zwischen den einzelnen Gruppen, welche sich nach Schienungsmaterial, Erst- oder Zweitversuch der Schienung sowie den einzelnen geschienten Zähnen aufgliederten.

Die Anwendbarkeit dieses Trainingskonzeptes wurde bestätigt. Die Studierenden hatten erstmals die Möglichkeit, an einem präklinischen Übungsmodell die

Schienung parodontal gelockerter Zähne vor dem ersten Patientenkontakt zu erlernen, wobei sich subjektiv aus Sicht der Studierenden ein positiver Lerneffekt zeigte.

Mit der Einführung der neuen Approbationsordnung des Zahnmedizinstudiums werden neue, moderne Ausbildungsmöglichkeiten benötigt. Aus diesem Grund ist geplant, die Trainingsmodelle dieser Studie in Zukunft dauerhaft im Kursus für Parodontologie zu integrieren.

6 Literaturverzeichnis

- 3faktor.com zuletzt besucht am 24.05.2021. <https://3faktor.com/3d-druck-materialien-und-verfahren/mjm-polyjet-verfahren/#1481032334093-9c9cb5b4-6e92>.
- Adam, M. 2011. Über die Eignung von Phantommodellen zur Testung der Rigidität von Zahntraumaschienen - Milan Adam Dissertation.
- Agrawal, A. A. & Chitko, S. S. 2011. The use of silane-coated industrial glass fibers in splinting periodontally mobile teeth. *Indian J Dent Res*, 22:594-6.
- Barsuk, J. H., McGaghie, W. C., Cohen, E. R., O'Leary, K. J. & Wayne, D. B. 2009. Simulation-based mastery learning reduces complications during central venous catheter insertion in a medical intensive care unit. *Crit Care Med*, 2697-701.
- Boonsiriphant, P., Al-Salihi, Z., Holloway, J. A. & Schneider, G. B. 2019. The Use of 3D Printed Tooth Preparation to Assist in Teaching and Learning in Preclinical Fixed Prosthodontics Courses. *J Prosthodont*, 28, e545-e547.
- Boud, D. 1995. Enhancing Learning Through Self-Assessment.
- Boud, D. 1999. Avoiding the traps: seeking good practice in the use of self assessment and reflection in professional courses. *Social Work Education*, 18, 121-132.
- Brown, G. B., Currier, G. F., Kadioglu, O. & Kierl, J. P. 2018. Accuracy of 3-dimensional printed dental models reconstructed from digital intraoral impressions. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 154, 733-739.
- Burde, A. V., Manole, M., Campian, R. S., Sinescu, C. & Baciuc, S. 2019. In Vitro Comparison of Accuracy of Two Scanners Used in Dental Medicine. *Rev. Chim.*
- Cantín, M., Muñoz, M. & Olate, S. 2015. Generation of 3D Tooth Models Based on Three Dimensional Scanning to Study the Morphology of Permanent Teeth. *International Journal of Morphology*, 33(2): 782-787.
- Chambers, D. W. & Geissberger, M. 1997. Toward a competency analysis of operative dentistry technique skills. *J Dent Educ.*, 61(10), 95-803.
- Chan, H. L., Misch, K. & Wang, H. L. 2010. Dental imaging in implant treatment planning. *Implant Dent*, 19, 288-98.
- Coleman, J. R., Lin, Y., Shaw, B. & Kuwayama, D. 2019. A Cadaver-Based Course for Humanitarian Surgery Improves Manual Skill in Powerless External Fixation. *J Surg Res*, 242, 270-275.
- Dawood, A., Marti Marti, B., Sauret-Jackson, V. & Darwood, A. 2015. 3D printing in dentistry. *Br Dent J*, 219, 521-9.
- Dentsply Sirona. 2020. *InEos X5, Scan with inLab* [Online]. Available: <https://www.dentsplysirona.com/en-us/categories/lab/cad-cam-equipment-dental-lab/scan.html> [Accessed].
- Deregibus, A., Tallone, L., Rossini, G., Parrini, S., Piancino, M., et al. 2020. Morphometric analysis of dental arch form changes in class II patients treated with clear aligners. *J Orofac Orthop*, 81, 229-238.
- Dunne, S. M. 1993. The limitation of visual perception in restorative dentistry. *Dent Update*, 20(5), 198-201, 203-5.
- Durrani, F., Galohda, A., Rai, S. K., Singh, N. K., Verma, R., et al. 2019. Evaluation and comparison of stress distribution around periodontally

- compromised mobile teeth splinted with different materials: Three-dimensional finite element analysis. *Indian J Dent Res*, 30:97-101.
- Ender, A., Zimmermann, M. & Mehl, A. 2019. Accuracy of complete- and partial-arch impressions of actual intraoral scanning systems in vitro. *Int J Comput Dent*, 11-19.
- Ericsson, I., Giargia, M., Lindhe, J. & Neiderud, A. M. 1993. Progression of periodontal tissue destruction at splinted/non-splinted teeth. An experimental study in the dog. *J Clin Periodontol*, 20(10):693-8.
- Eva, Kevin, W., Regehr & Glenn 2005. Self-Assessment in the Health Professions: A Reformulation and Research Agenda. *Academic Medicine*, 80(10), 46-54.
- Feldmann, C., Schulz, C. & Fernströning, S. 2019. Digitale Geschäftsmodell-Innovationen mit 3D-Druck. *Springer Gabler*.
- Fischer, S., Hallschmid, M., Elsner, A. L. & Born, J. 2002. Sleep forms memory for finger skills. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 11987-11991.
- Gebhard, A., Kessler, J. & HThurn, L. 2016. 3D-Drucken: Grundlagen und Anwendungen des additive manufacturing (AM). *Carl Hanser Verlag GmbH Co. KG*.
- Gibson, I., Rosen, D. W. & Stucker, B. 2014. Additive Manufacturing Technologies (17. Auflage). *Springer Verlag*, 2-10.
- Giuliani, M., Lajolo, C., Clemente, L., Querqui, A., Viotti, R., et al. 2007. Is manual dexterity essential in the selection of dental students? *Br Dent J*, 203, 149-55.
- GOM.com 2021. <https://www.gom.com/de-de/produkte/gom-inspect-suite>. Abgerufen am 26.03.2021.
- Graetz, C., Ostermann, F., Woeste, S., Salzer, S., Dorfer, C. E., et al. 2019. Long-term survival and maintenance efforts of splinted teeth in periodontitis patients. *J Dent*, 80, 49-54.
- Hanafi, A., Donnermeyer, D., Schafer, E. & Burklein, S. 2020. Perception of a modular 3D print model in undergraduate endodontic education. *Int Endod J*, 53, 1007-1016.
- Hao, J., Nangunoori, R., Wu, Y. Y., Rajaraman, M., Cook, D., et al. 2018. Material characterization and selection for 3D-printed spine models. *3D Print Med*, 4, 8.
- Hegarty, M., Keehner, M., Khooshabeh, P. & Montello, D. R. 2009. How spatial abilities enhance, and are enhanced by, dental education. *Learning and Individual Differences*, 19, 61-70.
- Heinzl, H. & Mittlböck, M. 2007. Eine Einführung zu chirurgischen Lernkurvenstudien. *Forum der Medizin_Dokumentation und Medizin_Informatik*.
- Höhne, C., Dickhaut, N. & Schmitter, M. 2020a. Introduction of a new teaching concept for dentin post preparation with 3D printed teeth. *Eur J Dent Educ*, 24, 499-506.
- Höhne, C., Dickhaut, N. & Schmitter, M. 2020b. Introduction of a new teaching concept for dentin post preparation with 3D printed teeth. *Eur J Dent Educ*.
- Höhne, C. & Schmitter, M. 2019a. 3D Printed Teeth for the Preclinical Education of Dental Students. *J Dent Educ*, 83, 1100-1106.

- Höhne, C., Schwarzbauer, R. & Schmitter, M. 2019b. 3D Printed Teeth with Enamel and Dentin Layer for Educating Dental Students in Crown Preparation. *J Dent Educ*, 83, 1457-1463.
- Höhne, C., Schwarzbauer, R. & Schmitter, M. 2020c. Introduction of a new teaching concept for crown preparation with 3D printed teeth. *Eur J Dent Educ*, 24, 526-534.
- Jin, S.-J., Jeong, I.-D., Kim, J.-H. & Kim, W.-C. 2018. Accuracy (trueness and precision) of dental models fabricated using additive manufacturing methods. *Int J Comput Dent.*, 21(2): 107-113.
- Kantor, M., Polson, A. M. & Zander, H. A. 1976. Alveolar Bone Regeneration after Removal of Inflammatory and Traumatic Factors. *J. Periodontol.*
- Kathariya, R., Devanoorkar, A., Golani, R., Bansal, N., Vallakatla, V., et al. 2016. To Splint or Not to Splint: The Current Status of Periodontal Splinting. *Journal of the International Academy of Periodontology*, 18(2):45-56.
- Kavo.com 02.01.2021. <https://www.kavo.com/de-de/zahnaerztliche-ausbildung/parodontologie-studien-und-zahnmodelle-zahn-und-studienmodelle>.
- Kim, S. Y., Shin, Y. S., Jung, H. D., Hwang, C. J., Baik, H. S., et al. 2018. Precision and trueness of dental models manufactured with different 3-dimensional printing techniques. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 153, 144-153.
- Kim, T., Lee, S., Kim, G. B., Hong, D., Kwon, J., et al. 2020. Accuracy of a simplified 3D-printed implant surgical guide. *J Prosthet Dent*, 124, 195-201 e2.
- Kneebone, R. L., Scott, W., Darzi, A. & Horrocks, M. 2004. Simulation and clinical practice: strengthening the relationship. *Med Educ*, 38, 1095-102.
- Kröger, E., Dekiff, M. & Dirksen, D. 2017. 3D printed simulation models based on real patient situations for hands-on practice. *Eur J Dent Educ*, 21, e119-e125.
- Kumbuloglu, O., Saracoglu, A. & Ozcan, M. 2011. Pilot study of unidirectional E-glass fibre-reinforced composite resin splints: up to 4.5-year clinical follow-up. *J Dent*, 39, 871-7.
- Lacruz, R. S., Habelitz, S., Wright, J. T. & Paine, M. L. 2017. Dental Enamel Formation and Implications for Oral Health and Disease. *Physiol Rev*, 97, 939-993.
- Lee, H., Fehmer, V., Kwon, K. R., Burkhardt, F., Pae, A., et al. 2020. Virtual diagnostics and guided tooth preparation for the minimally invasive rehabilitation of a patient with extensive tooth wear: A validation of a digital workflow. *J Prosthet Dent*, 123, 20-26.
- Lehmann, K. M., Hellwig, E. & Wenz, H.-J. 2009. Zahnärztliche Propädeutik - Einführung in die Zahnheilkunde, 11. Auflage. *Elsevier*, 326-328.
- Li, Z., Liu, Y. S., Ye, H. Q., Liu, Y. S., Hu, W. J., et al. 2017. Diagnosis and treatment of complicated anterior teeth esthetic defects by combination of whole-process digital esthetic rehabilitation with periodontic surgery. *Beijing Da Xue Xue Bao*, 49, 71-75.
- Lucchese, A., Carinci, F., Brunelli, G. & Monguzzi, R. 2011. Everstick and Ribbond Fiber Reinforced Composites: Scanning Electron Microscope

- (SEM) Comparative Analysis. *European Journal of Inflammation*, 9(3):73-79.
- Mangla, C. & Kaur, S. 2018. Splinting - A Dilemma in Periodontal Therapy. *Int J Res Health Allied Sci*, 4(3):76-82.
- Marty, M., Broutin, A., Vergnes, J. N. & Vaysse, F. 2019. Comparison of student's perceptions between 3D printed models versus series models in paediatric dentistry hands-on session. *Eur J Dent Educ*, 23, 68-72.
- Maschinenmarkt.de 2011. <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/gom-eroeffnet-mit-gratis-inspect-software-freien-zugang-zur-3d-datenbearbeitung-a-341074/>. Aufgerufen am 26.03.2021.
- McDonald, B. & Boud, D. 2010. The Impact of Self-assessment on Achievement: The effects of self-assessment training on performance in external examinations. *Assessment in Education: Principles, Policy & Practice*, 10, 209-220.
- Morris, R. S., Hoyer, L. N., Elnagar, M. H., Atsawasuwan, P., Galang-Boquiren, M. T., et al. 2019. Accuracy of Dental Monitoring 3D digital dental models using photograph and video mode. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 156, 420-428.
- Mühlemann, H. R., Savdir, S. & Rateitschak, K. H. 1965. Tooth Mobility - Its Causes and Significance. *J Periodontol*, 36:148-53.
- Nagy, Z., Simon, B., Mennito, A., Evans, Z., Renne, W., et al. 2020. Comparing the trueness of seven intraoral scanners and a physical impression on dentate human maxilla by a novel method. *BMC Oral Health*, 20, 97.
- Nagy, Z. A., Simon, B., Toth, Z. & Vag, J. 2018. Evaluating the efficiency of the Dental Teacher system as a digital preclinical teaching tool. *Eur J Dent Educ*, 22, e619-e623.
- Nyman, S., Karring, T. & Bergenholtz, G. 1982. Bone regeneration in alveolar bone dehiscences produced by jiggling forces.
- Nyman, S. R. & Lang, N. P. 1994. Tooth mobility and the biological rationale for splinting teeth.
- O'Neil, P. 2012. Cone Beam Computed Tomography for General Dentists. *Dentistry*, 01.
- Oberoi, G., Nitsch, S., Edelmayer, M., Janjic, K., Muller, A. S., et al. 2018. 3D Printing-Encompassing the Facets of Dentistry. *Front Bioeng Biotechnol*, 6, 172.
- Prechelt, L. 1999. Experimentelles Arbeiten. <http://page.mi.fu-berlin.de/prechelt/swt2/node27.html>, zuletzt besucht am 22.03.2021.
- Rao, A., Rao, A. & Shenoy, R. 2011. Splinting - When and How? *Dent Update*, 38: 341-346.
- Reymus, M., Fotiadou, C., Hickel, R. & Diegritz, C. 2018. 3D-printed model for hands-on training in dental traumatology. *Int Endod J*, 51, 1313-1319.
- Reymus, M., Fotiadou, C., Kessler, A., Heck, K., Hickel, R., et al. 2019. 3D printed replicas for endodontic education. *Int Endod J*, 52, 123-130.
- Ritter, A. V. 2004. Talking with Patients: Periodontal Splinting. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 16(5), 329-330.
- Robertson, E. M., Pascual-Leone, A. & Press, D. Z. 2004. Awareness modifies the skill-learning benefits of sleep. *Curr Biol*, 14, 208-12.

- Rutenfranz, J. & Iskander, A. 1966. Über den Einfluss von Pausen auf das Erlernen einer einfachen sensumotorischen Fertigkeit. *Internationale Zeitschrift für Angewandte Physiologie Einschließlich Arbeitsphysiologie*, 22(3), 207-235.
- Saleh, W. K., Ariffin, E., Sherriff, M. & Bister, D. 2015. Accuracy and reproducibility of linear measurements of resin, plaster, digital and printed study-models. *J Orthod*, 42, 301-6.
- Schlenz, M. A., Michel, K., Wegner, K., Schmidt, A., Rehmann, P., et al. 2020. Undergraduate dental students' perspective on the implementation of digital dentistry in the preclinical curriculum: a questionnaire survey. *BMC Oral Health*, 20, 78.
- Schön, D. 1983. The Reflective Practitioner, How Professionals Think In Action.
- Seifert, L. B., Schnurr, B., Herrera-Vizcaino, C., Begic, A., Thieringer, F., et al. 2020. 3D-printed patient individualised models vs cadaveric models in an undergraduate oral and maxillofacial surgery curriculum: Comparison of student's perceptions. *Eur J Dent Educ*, 24, 799-806.
- Sharma, R., Jain, A., Gupta, N., Garg, S., Batta, M., et al. 2016. Impact of self-assessment by students on their learning. *Int J Appl Basic Med Res.*, 6(3), 226-9.
- Sinn, D. P., Cillo, J. E. J. & Miles, B. A. 2006. Stereolithography for Craniofacial Surgery.
- Sirona, D. 25.03.2021a. <https://www.dentsplysirona.com/de-de/entdecken/lab/cad-cam-fuer-das-labor/scannen.html>.
- Sirona, D. 25.03.2021b. inLab Gesamtbroschüre "Weil Zahntechniker Freiheit brauchen".
- Smith, W., Rafeek, R., Marchan, S. & Paryag, A. 2012. The use of video-clips as a teaching aide. *Eur J Dent Educ*, 16, 91-6.
- Soares, P., Milito, G., Pereira, F., Reis, B. R., Soares, C., et al. 2013. Rapid Prototyping and 3D-virtual Models for Operative Dentistry Education in Brazil. *Journal of dental education*, 77(3): 358-363.
- Speirs, C. & Brazil, V. 2018. See one, do one, teach one: Is it enough? No. *Emerg Med Australas*, 30, 109-110.
- Stoller, N. H. & Green, P. A. 1981. A Comparison of a Composite Restorative Material and Wire Ligation as Methods of Stabilizing Excessively Mobile Mandibular Anterior Teeth. *Journal of Periodontology*, 52(8), 451-454.
- Tardieu, P. B., Vrielinck, L., Escolano, E., Henne, M. & Tardieu, A. L. 2007. Computer-assisted implant placement: scan template, simplant, surgiguide, and SAFE system. *Int J Periodontics Restorative Dent*, 27(2):141-9.
- Thilakumara, I. P., Jayasinghe, R. M., Rasnayaka, S. K., Jayasinghe, V. P. & Abeyesundara, S. 2018. Effectiveness of Procedural Video Versus Live Demonstrations in Teaching Laboratory Techniques to Dental Students. *J Dent Educ*, 82, 898-904.
- Vincent, M., Joseph, D., Amory, C., Paoli, N., Ambrosini, P., et al. 2020. Contribution of Haptic Simulation to Analogic Training Environment in Restorative Dentistry. *J Dent Educ*, 84, 367-376.
- Watkins, S. J. & Hemmings, K. W. 2000. Periodontal Splinting in General Dental Practice. *Dental Update*, 27(6), 278-285.

- Welk, A., Rosin, M., Seyer, D., Splieth, C., Siemer, M., et al. 2005. German dental faculty attitudes towards computerassisted learning and their correlation with personal and professional profiles. *European Journal of Dental Education*, 123-130.
- Yee, S., Richert, R., Viguie, G., Couraud, S., Dehurtevent, M., et al. 2019. Evaluation of the use of a guided bur during preclinical teaching of tooth preparation: A pilot study. *Clin Exp Dent Res*, 5, 588-593.
- Yildirim Oz, G., Ataoglu, H., Kir, N. & Karaman, A. I. 2006. An alternative method for splinting of traumatized teeth: case reports. *Dent Traumatol*, 22, 345-9.
- ZM-Online.de 07.11.2020. <https://www.zm-online.de/markt/news/dentsply-sirona/praезisionsscanner-ineos-x5-feiert-fuenften-geburtstag/>.

Tab. 5: Ergebnis p-Werte nach Mann Whitney U.

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
		R1	e1	R2	e2	R112	R111	R121	R122	e112	e111	e121	e122	R212	R211	R221	R222	e212	e211	e221	e222	
1	R1	X																				
2	e1	0,331	X																			
3	R2	0,697	0,173	X																		
4	e2	0,970	0,296	0,865	X																	
5	R112	0,122				X																
6	R111	0,990					X															
7	R121	0,399						X														
8	R122	0,155							X													
9	e112		0,133			0,576				X												
10	e111		0,453				0,096				X											
11	e121		0,291					0,680				X										
12	e122		0,526						0,697				X									
13	R212			0,057		0,716				0,313				X								
14	R211			0,622			0,789				0,181				X							
15	R221			0,006				0,044				0,039				X						
16	R222			0,051					0,981				0,639				X					
17	e212				0,970	0,155				0,593				0,639				X				
18	e211				0,831		0,950				0,174				0,680				X			
19	e221				0,043			0,346				0,206				0,409				X		
20	e222				0,521				0,285				0,234				0,308				X	

Tab. 6: Bonferroni Korrektur.

Bonferroni-Korrektur	
Signifikanzniveau:	0,05
Anzahl Testpaare:	46
neues Signifikanzniveau:	0,001086957

Fragebogen

MUSTER

EvaSys	PA-Schienung	
Universitätsklinikum Würzburg	Dr. Christian Höhne	
Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik	Schienung lockerer Frontzähne	

Bitte so markieren: Bitte verwenden Sie einen Kugelschreiber oder nicht zu starken Filzstift. Dieser Fragebogen wird maschinell erfasst.
Korrektur: Bitte beachten Sie im Interesse einer optimalen Datenerfassung die links gegebenen Hinweise beim Ausfüllen.

1. Einleitung

Sehr geehrte Studierende,
im Rahmen einer Studie, die sich mit der Verwendung von Druckzähnen in der parodontalen Ausbildung beschäftigt, möchten wir gerne von Ihnen erfahren, wie Sie die Arbeit mit diesen Zähnen einschätzen. Bitte beantworten Sie sorgfältig die nachfolgenden Fragen.

2. Personenbezogene Daten

2.1 Bitte geben Sie Ihre Teilnehmernummer an.

2.2 Bitte geben Sie Ihr Geschlecht an. weiblich männlich

2.3 Bitte geben Sie Ihr Alter an.

2.4 Haben Sie vor dem Zahnmedizinstudium eine Ausbildung im zahntechnischen Bereich abgeschlossen? Ja Nein

2.5 Wenn ja, welche?

2.6 Haben Sie Erfahrung mit stark gelockerten Zähnen (Grad II oder III)? Ja Nein

2.7 Haben Sie Erfahrung mit der Schienung von Zähnen? Ja Nein

2.8 Wenn ja, mit welchem Material?

2.9 Mit welchem Material haben Sie bei der Übung an den Druckzähnen die erste Schienung durchgeführt? Ribbond TMH everStick Perio

Bewerten Sie in Schulnoten von 1 (sehr gut) bis 6 (mangelhaft).

	1	2	3	4	5	6
2.10 Die zahntechnische Arbeit in den vorklinischen Kursen fiel mir leicht.	<input type="checkbox"/>					

2.11 Ich habe große Freude an den praktischen Inhalten des Studiums der Zahnmedizin.	<input type="checkbox"/>					
--	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

2.12 So schätze ich meine manuellen Fertigkeiten ein.	<input type="checkbox"/>					
---	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

3. Handhabung der Zähne

Bewerten Sie folgende Fragen nach dem **Schulnotenprinzip 1-6** (1 = sehr gut, 2 = gut, 3 = befriedigend, 4 = ausreichend, 5 = mangelhaft, 6 = ungenügend)

MUSTER

EvaSys

PA-Schienung



3. Handhabung der Zähne [Fortsetzung]

	1	2	3	4	5	6
3.1 Wie realistisch waren die Zahnlockerungen?	<input type="checkbox"/>					
3.2 Wie gestaltete sich die Repositionierung der Zähne in den Zahnbogen?	<input type="checkbox"/>					

4. Schienung der Zähne

Bewerten Sie folgende Fragen nach dem **Schulnotenprinzip 1-6** (1 = sehr gut, 2 = gut, 3= befriedigend, 4 = ausreichend, 5 = mangelhaft, 6 = ungenügend)

	1	2	3	4	5	6
4.1 Wie bewerten Sie die Schienungsübung?	<input type="checkbox"/>					
4.2 Wie gestaltet sich die Handhabung mit dem Schienungsmaterial „everStick Perio“?	<input type="checkbox"/>					
4.3 Wie gestaltet sich die Handhabung mit dem Schienungsmaterial „Ribbond THM“?	<input type="checkbox"/>					

5. Lernzielkontrolle

Bewerten Sie folgende Fragen nach dem **Schulnotenprinzip 1-6** (1 = sehr gut, 2 = gut, 3= befriedigend, 4 = ausreichend, 5 = mangelhaft, 6 = ungenügend)

Wie gut vorbereitet fühlten Sie sich eine parodontale Schienung an Patienten durchzuführen?

	1	2	3	4	5	6
5.1 ... vor dem Kurs ...	<input type="checkbox"/>					
5.2 ... nach dem Kurs ...	<input type="checkbox"/>					

5.3 Wie hoch schätzen Sie den Lerneffekt dieser praktischen Übung ein?	<input type="checkbox"/>					
5.4 Inwieweit schätzen Sie diese Übung als klinisch relevant ein?	<input type="checkbox"/>					
5.5 Würden Sie später parodontale Schienungen an Patienten mit „everStick Perio“ durchführen?	<input type="checkbox"/>					

5.6 Warum?

5.7 Würden Sie später parodontale Schienungen an Patienten mit „Ribbond THM“ durchführen?	<input type="checkbox"/>					
---	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

5.8 Warum?

6. Offene Fragen

MUSTER

EvaSys

PA-Schienung



6. Offene Fragen [Fortsetzung]

6.1 Was hat Ihnen besonders gut an diesem Kurs gefallen?

6.2 Was hat Ihnen weniger gut gefallen, bzw. wo sehen sie noch Verbesserungsbedarf?

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

Unbedenklichkeitsbescheinigung Ethikkommission



Ethik-Kommission • Versbacher Str. 9 • 97078 Würzburg

Dr. Christian Höhne
Universitätsklinikum Würzburg
Klinik und Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik
Pleicherwall 2
97070 Würzburg

Ethik-Kommission
Institut für Pharmakologie und Toxikologie
Versbacher Str. 9
97078 Würzburg

Vorsitzende: Prof. Dr. E.-B. Bröcker
Geschäftsführung: K. Reith, Ass. Jur.
Dr. R. Wölfel
Sekretariat: S. Schmidt, A. Meister, A. Metzger
Telefon 0049 (0)931 31 48315
Telefax 0049 (0)931 31 87520
ethikkommission@uni-wuerzburg.de

Würzburg, 03.12.2018/am

bei Schriftwechsel bitte angeben: **20181116 01**

Unbedenklichkeitsbescheinigung
Projekt: 3D gedruckte Zähne für die Ausbildung von Studenten vor klinischen Kursen

Sehr geehrter Dr. Höhne,

zu Ihrer Anfrage vom 15.11.2018 zu o.g. Frage bzw. Projekt nimmt die Ethik-Kommission wie folgt Stellung.

Auf der Grundlage der vorgelegten Informationen besteht keine Notwendigkeit einer gesonderten Antragstellung bei der Ethik-Kommission für die geplante Auswertung von anonymisierten Fragebögen und 3-D gedruckten Zähnen.

Bei der Verwendung der Daten zu wissenschaftlichen Untersuchungen ist darauf zu achten, dass nur vollständig und irreversibel anonymisierte Daten verwendet werden.

Es obliegt dem Antragsteller, dass geltende Datenschutzbestimmungen eingehalten werden.

Die Ethik-Kommission wünscht Ihnen viel Erfolg.

Mit freundlichen Grüßen

Prof. Dr. med. Eva-Bettina Bröcker
Seniorprofessorin
Vorsitzende der Ethik-Kommission

Ausgefertigt im Auftrag

Ass. jur. Katharina Reith
Geschäftsführerin der Ethik-Kommission

Abkürzungsverzeichnis

AM.....	Additives Manufacturing
CAD.....	Computer Aided Design
CAL.....	Computer Assisted Learning
CAM.....	Computer Aided Manufacturing
CAS.....	Computer Aided Simulation
CT.....	Computertomographie
DVT, engl. CBCT.....	Digitale Volumetomographie
EBM.....	Electron Beam Melting
FDM.....	Fused Deposition Modeling
FRC.....	Fiber Reinforced Composite
OBJ.....	Wavefront Object File
PA-Spalt.....	Parodontalspalt
PBP.....	Powder Binder Printing
PPJ.....	Polyjet Druckverfahren
p-Wert.....	Signifikanzwert
QR-Code.....	Quick-Response Code
SD.....	Standardabweichung
SLA.....	Stereolithografie
SLS.....	Selective Laser Sintering
STL.....	Standard Tessellation Language
ZFA.....	Zahnmedizinische Fachangestellte
ZT.....	Zahntechniker

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Überblick über die Herstellung der Druckzähne	15
Abb. 2: Gedruckte Zähne	18
Abb. 3: Schienungsmaterialien.....	21
Abb. 4: Ablauf der Schienung.....	22
Abb. 5: Matchingprozess der digitalen Modelle	25
Abb. 6: Referenzkugeln für Matchingprozess.....	26
Abb. 7: Auswertung des Fragebogens	35
Abb. 8: Ribbond Schienung Boxplot.....	39
Abb. 9: Vergleich von Ribbond Ultra Schienungen.....	40
Abb. 10: everStick Perio Schienung Boxplot.	41
Abb. 11: Vergleich von everStick Perio Schienungen	42

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Paarung sinnvoll vergleichbarer Gruppen für Mann Whitney U-Test. ...	44
Tab. 2: Beispielhafte Kostenübersicht bei regelmäßiger Produktion der Druckzähne.	61
Tab. 3: Auswertung nach Kolmogorov-Smirnov.	71
Tab. 4: Ergebnis p-Werte nach Kruskal Wallis.	71
Tab. 5: Ergebnis p-Werte nach Mann Whitney U.	72
Tab. 6: Bonferroni Korrektur.	72

Danksagung

Zuallererst möchte ich mich bei Prof. Dr. med. dent. Schmitter für die Möglichkeit bedanken, diese Promotionsarbeit unter seiner Obhut schreiben zu dürfen. Danke für die schnellen und hilfreichen Änderungsvorschläge und die gute Betreuung.

Ich bedanke mich bei Frau Prof. Dr. med. Sarah König für die schnelle und konstruktive Korrektur dieser Arbeit in Ihrer Position als Korreferentin.

Mein großer Dank geht an Dr. med. dent. Christian Höhne. Ohne seine Ideen und seinen Enthusiasmus für den 3D-Druck wäre diese Arbeit nicht zustande gekommen. Danke auch für die Betreuung über die Arbeitszeit hinaus, danke, dass ich meine großen und kleinen Fragen zu jeder Tages- und Nachtzeit stellen durfte.

Mein Dank geht auch an Peter Quang Huy Nguyen für die gemeinsame Vorbereitung und Durchführung des Kurses.

Danke an Axel Schurig, der mich mit meinen statistischen Problemen und Fragestellungen nie alleine hat dastehen lassen und der auch den einen oder anderen guten Vorschlag zur Verbesserung für mich parat hatte.

Danke an Prof. Dr. med. dent. Jockel-Schneider, Prof. Dr. med. dent. Schlagenhaut und Dr. med. dent. Heß für die zügige und konstruktive Korrektur meiner Einleitung.

Ich bedanke mich bei meinen Freunden und allen Kollegen, die mich fachlich und seelisch unterstützt und motiviert haben.

Zuguterletzt danke ich meiner Familie, meinen Eltern Lutz und Renate und meinem Bruder Nico. Ohne euch wäre mein Werdegang nicht der, der er ist.