

Untersuchung zur Effektivität virtueller Präparationssimulatoren im Vergleich zur klassischen Präparation am Phantomschädel

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

der Hohen Medizinischen Fakultät

der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität

Bonn

Fabian Werner Stephan

aus Bonn

2025

Angefertigt mit der Genehmigung
der Medizinischen Fakultät der Universität Bonn

1. Gutachter: Prof. Dr. Helmut Stark
2. Gutachter: Prof. Dr. Christoph Bourauel

Tag der Mündlichen Prüfung: 26.11.2024

Aus der Klinik und Poliklinik für zahnärztliche Prothetik, Propädeutik und
Werkstoffwissenschaften

Inhaltsverzeichnis

	Abkürzungsverzeichnis	5
1.	Einleitung	7
1.1	Einleitung	7
1.2	Historische Entwicklung der zahnärztlichen Ausbildung in Deutschland	8
1.3	Ziele und Schwerpunkte der zahnmedizinischen universitären Ausbildung	9
1.3.1	Traditionelle Lehrmethoden	10
1.4	Aktuelle Entwicklungen in der zahnmedizinischen Lehre	12
1.5	Präparationsassistenten (Selbstevaluationssoftware)	14
1.6	„Augmented Reality“ basierte Simulationssysteme	21
1.6.1	„DentSim“-Simulator der Firma Image Navigation	21
1.7	Virtuelle Präparationssimulatoren mit haptischem Feedback	24
1.7.1	„Dente“-Simulator der Firma SIMtoCARE	24
1.8	Herausforderungen in der zahnärztlichen Lehre mit Blick auf die ZApprO	30
1.9	Ziel der vorliegenden Dissertation	32
2.	Material und Methoden	33
2.1	Voraussetzung und Akquirierung der Teilnehmer/-innen	33
2.2	Einführung der Studienteilnehmer/-innen	33
2.3	Ablauf der Studie	35
2.3.1	Einteilung der Studienteilnehmer/-innen	35
2.3.2	Freie Übungszeit	40
2.3.3	Leistungsüberprüfung	44
2.4	Bewertung der Leistungsüberprüfung	44
2.5	Evaluation der Übungssysteme durch die Teilnehmer/-innen	46
2.6	Statistische Auswertung	48
3.	Ergebnisse	49
3.1	Ergebnisse der praktischen Prüfungen	49
3.1.1	Benotung und Vergleich der Frasco- und SIMtoCare-Teilnehmer/-innen	49
3.1.2	Inter-Rater Reliabilitätsanalyse: Vergleich der Prüferbenotungen	55
3.2	Auswertung der Evaluationsbögen	59

3.2.1	Aussagen A bis G	59
3.2.2	Frage H	67
4.	Diskussion	68
4.1	Bewertung der Methodik	68
4.2	Bewertung der Ergebnisse	69
4.3	Fazit	74
5.	Zusammenfassung	77
6.	Abbildungsverzeichnis	79
7.	Tabellenverzeichnis	84
8.	Literaturverzeichnis	88
9.	Danksagung	95

Abkürzungsverzeichnis

°	Grad
%	Prozent
α	Alpha
μm	Mikrometer
3D	Dreidimensional
4k	Bildauflösung von 4000 Pixeln
CA	California
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CCD	Charge-Coupled Device
E-Learning	Electronic Learning
HVRS	Haptic Virtual Reality Simulation Devices
Inc.	Incorporated
LED	Light-Emitting Diode
MA	Massachusetts
mm	Millimeter
mm^3	Kubikmillimeter
n	Größe der Stichprobe
PLY	Polygon File Format
TPK	Technisch Propädeutischer Kurs

U/min	Umdrehungen pro Minute
USA	United States of America
USB	Universal Serial Bus
ZApprO	Zahnärztliche Approbationsordnung

1. Einleitung

1.1 Einleitung

In Folge stetiger Innovationen im Bereich der Elektrotechnik und der daraus resultierenden globalen Digitalisierung wurden in den vergangenen 20 Jahren bedeutende Fortschritte im Bereich des Zahnarztberufs, der Behandlungstechniken und der Lehre erzielt. Viele Zahnarztpraxen in Europa verwenden bereits Computersoftware zur Digitalisierung von Patientenakten, Vereinfachung der Terminplanung und automatischen Materialbestellungen (Zitzmann et al., 2020). Parallel dazu nimmt die Nutzung von Intraoralscannern und CAD/CAM-Software, die ein computergestütztes Designen und Fertigen von Restaurationen ermöglicht, in zahnärztlichen Behandlungen kontinuierlich zu. Auch in der globalen zahnmedizinischen Ausbildung werden zunehmende digitale Technologien in die Lehrpläne integriert (Zitzmann et al., 2020), um die vorklinischen und klinischen Ausbildungsprozesse zu optimieren.

Die Präparation von Zähnen zur Aufnahme von direkten oder indirekten Restaurationen wird heutzutage als eine der wichtigsten zu erlernenden Kompetenzen für Studierende der Zahnmedizin angesehen (Hey et al., 2017). Für eine sichere Durchführung der Zahnpräparation an Patienten und Patientinnen ist zunächst eine simulative Übung essenziell. Seit Beginn des letzten Jahrhunderts und bis in die heutige Zeit kommen für diesen Zweck Phantomschädel mit austauschbaren Dentalmodellen und Kunststoffzähnen zum Einsatz. Um diesen Ausbildungsprozess zu optimieren, wurden im Rahmen der fortschreitenden Digitalisierung zunächst Präparationsassistenten entwickelt, die den Vergleich der studentischen Präparation mit der Präparation des Lehrpersonals ermöglichen. Hierdurch kann eine objektivere Bewertung der Präparationen im Vergleich zu den visuellen Bewertungen durch die Kursassistenten und Kursassistentinnen gewährleistet werden (Hamil et al., 2014; Kournetas et al., 2004; Kwon et al., 2014a; Renne et al., 2013). Ergänzend wurden sogenannte „Haptic Virtual Reality Simulation Devices“ (HVRS-Systeme), wie zum Beispiel der „Dente“-Simulator (SIMtoCARE, Vreeland, Niederlande) eingeführt, die eine vollständige virtuelle Präparation ermöglichen. Sie haben den Vorteil, dass Nutzer/-innen nicht in der Wiederholungsanzahl limitiert sind, da der Austausch der Kunststoffzähne fehlt. Somit kann eine hohe

Übungsfrequenz gewährleistet werden, die für einen guten Lerneffekt maßgeblich sein soll (Stoilov et al., 2021). Des Weiteren werden realitätsnähere Übungssituationen geschaffen, indem der Ober- und Unterkiefer des Patienten oder bereits extrahierte Zähne eingescannt werden. Dies kann das Verständnis für die Zahnmorphologie enorm verbessern (Leung et al., 2021). Nachteilig sind jedoch die mit der Anschaffung, Instandhaltung und Wartung von Hard- und Software verbundenen Kosten und der damit einhergehende Arbeitsaufwand.

Im Jahr 2020 erwarb die Poliklinik für zahnärztliche Prothetik, Propädeutik und Werkstoffwissenschaften der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn sechs Exemplare des „Dente“-Simulators der Firma SIMtoCare. Bisher wurden diese Geräte jedoch nur zur Schulung grundlegender Augen-Hand-Koordination in der vorklinischen Ausbildung verwendet, da die Effektivität der Geräte bei der zahnärztlichen Präparation (Vollkrone) fraglich ist. Mit Hinblick auf die neue Approbationsordnung für Zahnärzte und Zahnärztinnen (ZApprO), die ab dem Wintersemester 2021/2022 für Neustudierende in Kraft trat und der damit einhergehenden Kürzung der verfügbaren Lern- und Übungszeit in den vorklinischen praktischen Kursen, stellt sich nun die Frage, in welchem Ausmaß die „Dente“-Simulatoren zukunftsorientiert in die vorklinische Lehre etabliert werden können.

Auf dieser Grundlage ist das Ziel der vorliegenden Promotionsarbeit zu untersuchen, ob das Training an virtuellen Präparationssimulatoren, wie dem „Dente“-Simulator, der klassischen Präparationsübung am Phantommodell ebenbürtig ist oder nicht.

1.2 Historische Entwicklung der zahnärztlichen Ausbildung in Deutschland

Das zahnärztliche Handwerk wurde bis ins 19. Jahrhundert vor allem durch Barbieri, Wundärzte und Handwerkschirurgen ausgeübt (Krischel und Nebe, 2022). Durch das Preußische Medizinal-Reglement von 1825 und dessen Ergänzungen von 1835/1836 wurden erstmalig Anforderungen und Regulierungen an das zahnärztliche Berufsfeld gestellt. Ein weiterer wichtiger Meilenstein in der zahnärztlichen Lehre und Qualitätssicherung der praktizierenden Personen in Deutschland war die 1909 in Kraft getretene Prüfungs- und Studienordnung zur zentralen Zulassungsvoraussetzung zum Zahn-

medizinstudium. Diese setzte unter anderem erstmalig das Abitur bzw. die allgemeine Hochschulreife für ein Studium der Zahnmedizin voraus. Am 14. Februar 1952 beschloss schließlich der Deutsche Bundestag einstimmig das „Gesetz über die Ausübung der Zahnheilkunde“ und im Jahr 1955 wurde die erste einheitliche Approbationsordnung für Zahnärzte (ZApprO) eingeführt. Ihre jahrzehntelange Gültigkeit wurde nun durch eine aktualisierte Version abgelöst, die ab dem Wintersemester 2021/2022 für Neustudierende in Kraft trat.

1.3 Ziele und Schwerpunkte der zahnmedizinischen universitären Ausbildung

Ziel der heutigen zahnärztlichen Ausbildung ist es, zukünftige Zahnärzte/Zahnärztinnen wissenschaftlich und praktisch in der Zahnmedizin auszubilden, damit diese eigenverantwortlich und selbständig die Zahnheilkunde ausüben können (§1 Abs. 1 Satz 1 ZApprO). Dabei sollen in der zahnärztlichen Ausbildung „grundlegende Kenntnisse, Fähigkeiten und Fertigkeiten in allen Fächern, die für die zahnmedizinische Versorgung der Bevölkerung erforderlich sind“ vermittelt werden (§1 Abs. 2 Satz 1 ZApprO).

Um sich diese Fähigkeiten aneignen zu können, ist der praktischen Ausbildung im vorklinischen und klinischen Studienabschnitt eine hohe Priorität zuzuordnen. Bevor Studierende im klinischen Studienabschnitt Behandlungen an Patienten/Patientinnen durchführen dürfen, müssen zunächst die praktischen Grundlagen im Bereich der Zahnersatzkunde und Zahnerhaltungskunde unterrichtet werden. Dies geschieht im Rahmen der zahnärztlichen Prothetik durch das Absolvieren von Kursen, in denen sowohl zahntechnische als auch zahnärztliche Grundkenntnisse vermittelt werden.

Eine der wichtigsten zu erlernenden Kompetenzen ist hierbei die Präparation von Zähnen für die spätere Aufnahme einer Kronenversorgung (Hey et al., 2017). Dies stellt im späteren Beruf eine alltägliche Aufgabe dar. Der Zahn wird dafür zirkulär sowie okklusal beschliffen, wobei Präparationskriterien wie Präparationswinkel, Substanzabtrag, Oberflächenrauheit sowie die Unversehrtheit der Nachbarzähne berücksichtigt werden müssen. Zusätzlich hat auch die Materialwahl der späteren Versorgung sowie die Ästhetik einen Einfluss auf die Wahl der jeweiligen Präparationsform und ihrer Invasivität.

Angesichts der iatrogenen irreversiblen Schädigung der Zahnhartsubstanz der beschliffenen Zähne und der potenziellen Gefahr der Devitalisierung bei fehlerhafter Durchführung, sind Simulationen einer Präparation unverzichtbarer Bestandteil der vorklinischen Lehre. Durch diese Praxis sollen Studierende die Bewegungsabläufe und Vorgehensweisen erlernen und verinnerlichen, um sie später in der Praxis sicher replizieren zu können.

1.3.1 Traditionelle Lehrmethoden

Für die Patientensimulation haben sich in der Vergangenheit Phantomköpfe mit Kugelgelenk bewährt, in die Dentalmodelle des Ober- und Unterkiefers mit auswechselbaren Kunststoffzähnen befestigt werden können. Heutzutage gibt es zahlreiche Ausstattungsvariationen der Phantomschädel (Abb. 1). Sie können mit oder ohne Torso an oder auf Arbeitstischen oder sogar auf zahnärztlichen Behandlungseinheiten montiert werden (Abb. 2). Durch Verstellen der Neigung und Höhe des Torsos oder des Phantomschädels können Therapierende eine realistische Positionierung des Schädels vornehmen. Die Idee einiger Hersteller, die Zunge, die Wangen und den Oropharynx zu imitieren und in den Phantomschädel zu integrieren, konnte sich jedoch im europäischen Raum nicht durchsetzen (Stoilov et al., 2021).



Abb. 1: Phantomkopf mit eingespannten Dentalmodellen und hautähnlicher Gummimaske der Firma Frasaco (Tett nang, Deutschland) (Frasaco GmbH, 2020).

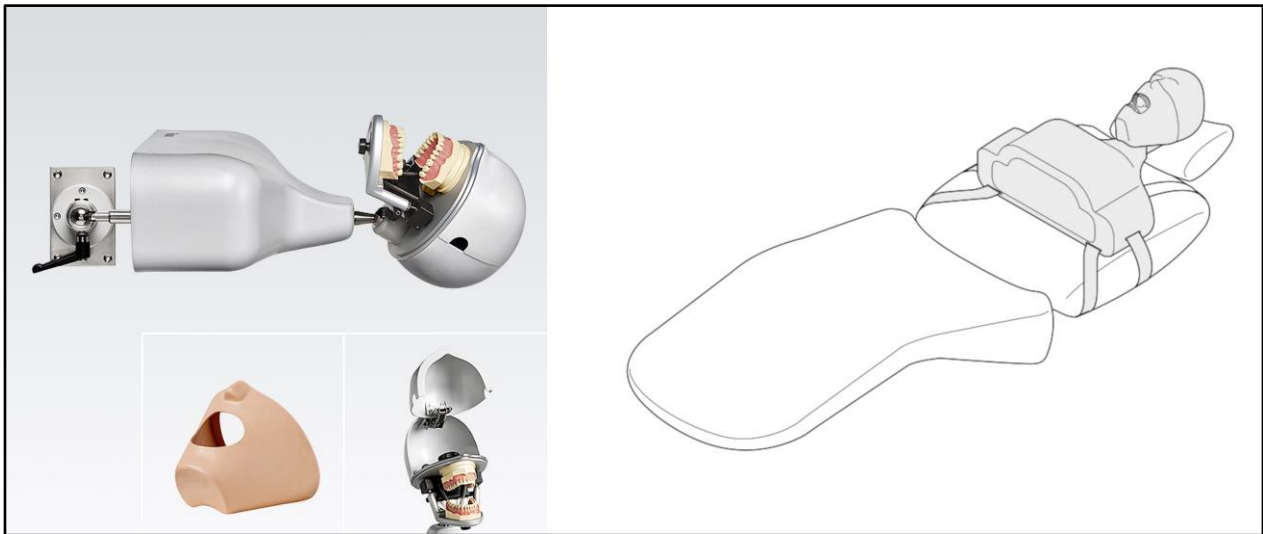


Abb. 2: Phantomkopf mit eingespannten Dentalmodellen, Torso und hautähnlicher Gummimaske der Firma Frasaco (Tettnang, Deutschland) (Frasaco GmbH, 2020).

Die in den Phantomschädel zu verankernden Dentalmodelle entsprechen dem natürlichen typischen Erwachsenengebiss. Ober- und Unterkiefer okkludieren in einer sicheren habituellen Okklusion der internationalen Angle-Klassifikation vom Typ I mit physiologischen Kontaktpunkten. Zusätzlich sind die Wilson-, Spee- und helikoide Verwindungskurve räumlich ausgebildet und dynamische Okklusionskonzepte wie Eckzahnführung und unilaterale Gruppenführung möglich.

Bei den zu verwendenden Zähnen gibt es ebenfalls eine Vielzahl von Variationen. Neben herkömmlichen Kunststoffzähnen aus Duroplast existieren unter anderem „Spezialzähne“, die das Arbeiten mit Scannern oder Kamerasystemen ohne Verwendung von Kontrastpulvern oder -sprays ermöglichen oder unterschiedlich harte Dentin- und Schmelzschichten sowie eine artifizielle, gewebeähnliche Pulpa aufweisen (Abb. 3). Diese „Spezialzähne“ ermöglichen beim Präparieren einen fühlbaren Härteunterschied zwischen Zahnschmelz und Dentin, wodurch die Patientensituation noch realistischer dargestellt werden kann. Alle Zähne sind zudem austauschbar und ermöglichen somit eine hohe Übungsfrequenz.



Abb. 3: Darstellung von Kunststoffzähnen der Firma Frasaco (Tettang, Deutschland) mit unterschiedlich harter Schmelz- und Dentinschicht sowie einer artifiziellen gewebeähnlichen Pulpa (links) sowie einem klassischen Modellzahn aus Duroplast (rechts) (Frasaco GmbH, 2020).

Im Rahmen der Phantomkurse der Zahnersatzkunde haben somit Studierende die Möglichkeit, ihre praktischen Fähigkeiten unter anderem im Präparieren von Zähnen zu schulen und zu festigen. Hierbei werden sie durch einen/eine Oberarzt/Oberärztin (Kursleiter/-in) und Assistenz Zahnärzten/Assistenz Zahnärztinnen (Kursassistenten/Kursassistentinnen) betreut und bewertet. Tutoren/Tutorinnen aus höheren Fachsemestern stehen den Studierenden ebenfalls bei Fragen zur Verfügung. Die Kontrolle und Bewertung der Präparation erfolgt durch das Kurspersonal. Dabei müssen alle wichtigen Präparationskriterien (siehe Kapitel 1.3) eingehalten werden. Falls die Präparation nicht den Anforderungen entspricht, werden Hilfestellungen zur Korrektur der Mängel gegeben. Anschließend muss der/die Studierende diese praktisch umsetzen. Falls dies nicht möglich ist, wird ein neuer Modellzahn präpariert. Wenn keine Mängel ersichtlich sind, erfolgt die Vortestierung durch das Kurspersonal. Abschließend begutachtet der/die Kursleiter/-in alle vortestierten Zähne und vergibt bei zufriedenstellender Leistung das Haupttestat.

1.4 Aktuelle Entwicklungen in der zahnmedizinischen Lehre

In Anbetracht des kontinuierlichen Fortschritts im Fachbereich der Elektrotechnik und der damit verbundenen globalen Digitalisierung wurden in den vergangenen Jahren zahlreiche digitale Lernsysteme für die zahnmedizinische Ausbildung entwickelt, die weltweit zunehmend in die zahnmedizinischen Lehrpläne eingebunden werden (Zitzmann et al., 2020). Diese lassen sich in „E-Learning“-Programme, Präparations-

assistenten (Selbstevaluationssoftware) und computerassistierte Simulatoren kategorisieren.

Unter „E-Learning“ oder „Electronic Learning“ (deutsch: elektronisches Lernen) werden „alle Formen von Lernen verstanden, bei denen elektronische oder digitale Medien für die Präsentation und Distribution von Lernmaterialien zum Einsatz kommen“ (Kerres und Preußler, 2012). Es beinhaltet multisensorische Lerninhalte in Form von zweidimensionalen und dreidimensionalen Abbildungen, Texten, Videos oder Animationen mit denen der/die Nutzer/-in interagieren kann, um sich im Bereich der Diagnostik, Entscheidungsfindung und Problemlösung weiterbilden zu können (Langer et al., 1998; Plasschaert et al., 1997).

Im Bereich der Zahnmedizin können Fächer wie Anatomie, Radiologie, Kieferorthopädie, Parodontologie, Prothetik, Traumatologie, Implantologie und Endodontologie abgedeckt werden. Vorteile gegenüber den klassischen Lernmethoden sind die Möglichkeiten der Studenten/Studentinnen in ihrem eigenen Tempo zu lernen (Plasschaert et al., 1997; Rosenberg et al., 2003) und die Gewährleistung eines intensiveren Lernens durch die multisensorischen Lerninhalte (Preston, 1997). Hierdurch sind Studierende in der Lage, schneller zu lernen (Plasschaert et al., 1997). Zusätzlich können Lektionen beliebig oft wiederholt werden und Studierende können jederzeit auf das Lernmaterial zugreifen (Rosenberg et al., 2003). Daher wird „E-Learning“ in der Literatur den klassischen Lernmethoden als überlegen oder zumindest als ebenbürtig angesehen (Rosenberg et al., 2003).

Die Gruppe der Präparationsassistenten umfasst digitale, scanner-basierte Bewertungssysteme (Selbstevaluationssoftware), die einen objektiven Vergleich der studentischen Präparation mit der der Lehrkraft ermöglichen (Hamil et al., 2014; Kournetas et al., 2004; Kwon et al., 2014b; Renne et al., 2013). Somit sind die Nutzer in der Lage, selbständig, objektiv und ohne die Hilfe vom Kurspersonal praktische Fähigkeiten zu schulen. Bekannte Vertreter der Präparationsassistenten sind „PrepCheck 5“ der Firma Dentsply Sirona (Bensheim, Deutschland), „Dental Teacher 4.0“ der Firma KaVo Dental (Biberach, Deutschland) und „Romexis Compare“ der Firma Planmeca (Helsinki, Finnland).

Die Nutzung computerassistierter Simulatoren ist bereits in vielen Berufsfeldern wie zum Beispiel der Luftfahrt (Helmreich, 2000) und der Kernkraft (Jayanthi, 2007) sowie dem Militär (Lele, 2013) und dem Gesundheitswesen (Kitagawa et al., 2005; Ström et al., 2006; Tanzawa et al., 2013) verbreitet. Sie ermöglichen eine multimediale Lernumgebung in der visuelle, akustische und motorische Lernkanäle gleichzeitig bedient werden (Welk et al., 2004) und führen bei praktischen zahnärztlichen Prüfungen zu einer notwendigen Verbesserung der Zuverlässigkeit, der Standardisierung und der Validität (Buchanan, 1991). In den letzten Jahren haben sich hier zwei verschiedene Arten von zahnärztlichen Simulationssystemen etabliert.

Einerseits gibt es „Augmented Reality“ basierende Systeme, wie zum Beispiel den „DentSim“-Simulator der Firma Image Navigation (New York, USA), bei denen virtuelle Informationen über den Arbeitsprozess der Zahnpräparation auf einen Computerbildschirm des Nutzenden in Echtzeit projiziert werden.

Andererseits gibt es sogenannte „Haptic Virtual Reality Simulation Devices“ (HVRS-Systeme) zur vollständigen virtuellen Präparation. In der vorliegenden Dissertation wird exemplarisch für die Gruppe der HVRS-Systeme der „Dente“-Simulator der Firma SIMtoCare (Vreeland, Niederlande) verwendet.

Im Folgenden soll auf die einzelnen Präparationsassistenten und Simulationssysteme genauer eingegangen werden.

1.5 Präparationsassistenten (Selbstevaluationssoftware)

Bedingt durch ein häufig ungünstiges Betreuungsverhältnis zwischen Studierenden und dem Kurspersonal ist eine ausführliche individuelle Betreuung und Hilfestellung zur Umsetzung und Optimierung praktischer Arbeiten meist nicht möglich. Um dieses Problem in Bezug auf die Bewertung der Präparationen positiv lösen zu können, wurden digitale, scanner-basierte Bewertungssysteme wie „PrepCheck 5“ der Firma Dentsply Sirona (Bensheim, Deutschland), „Dental Teacher 4.0“ der Firma KaVo Dental (Biberach, Deutschland) und „Romexis Compare“ der Firma Planmeca (Helsinki, Finnland) entwickelt. Somit stehen zur Bewertung und Begutachtung der Präparationen

nicht nur Kurspersonal, sondern ergänzend auch die oben genannten maschinellen Assistenten zur Verfügung.

Grundlegend sind alle Präparationsassistenten ähnlich aufgebaut. Sie bestehen aus einer mobilen (Abb. 4) oder stationären (Abb. 6) Computereinheit, die mit Bedienelementen und Selbstevaluationssoftware ausgestattet ist sowie einem kompatiblen Intraoralscanner (Abb. 4 u. 5) oder Desktopscanner (Abb. 6). Bevor Studierende die „PrepCheck 5“- , „Dental Teacher 4.0“- oder „Romexis Compare“-Software, folgend dem Prinzip des selbständigen Lernens zur Bewertung und Begutachtung ihrer Präparationen verwenden können, muss zunächst der/die Kursleiter/-in mithilfe des jeweils ausgerüsteten Intraoralscanners/Desktopscanners die ideale Meisterpräparation des zu Übungszwecken ausgewählten Modellzahns einscannen und einspeichern.



Abb. 4: Darstellung einer CEREC Primescan AC-Einheit der Firma Dentsply Sirona (Bensheim, Deutschland) bestehend aus Touchbildschirm (1), Touchpad (2), Intraoralscanner: hier CEREC Primescan (3) und mobiler Computereinheit (4) (Dentsply Sirona, 2024).

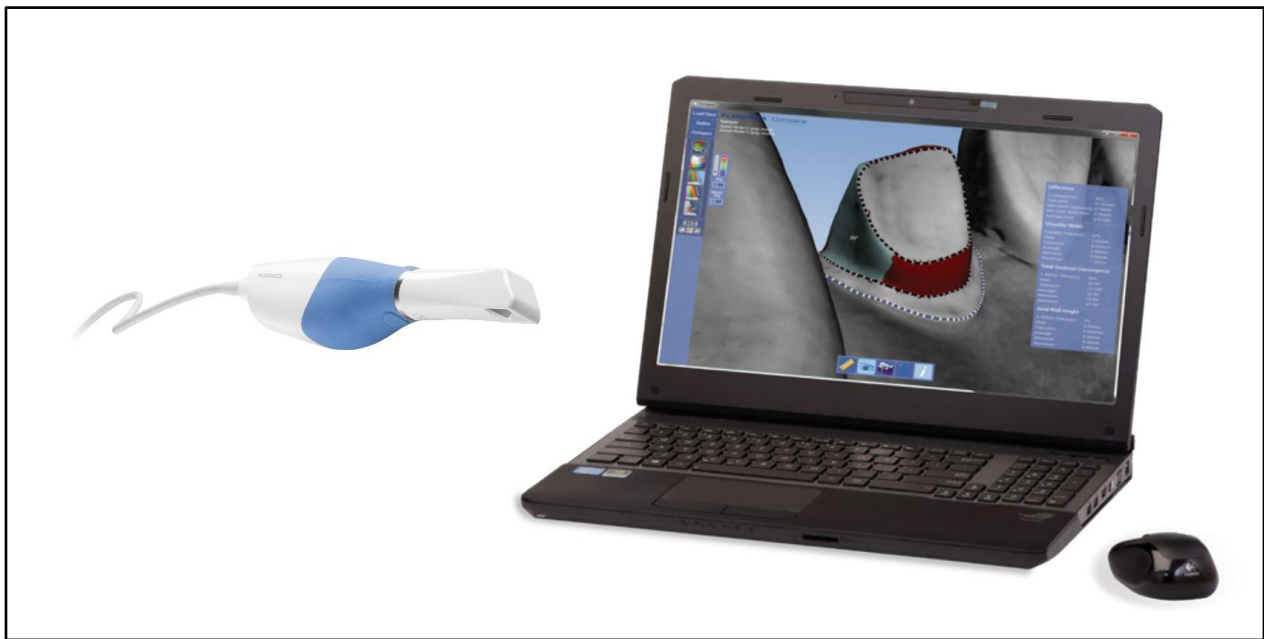


Abb. 5: Darstellung der Bestandteile des „Romexis Compare“-Systems der Firma Planmeca (Helsinki, Finnland). Es besteht aus dem Intraoralscanner „Emerald S“ (Planmeca, Helsinki, Finnland) (links) und der „Romexis Compare“-Software, die auf einem nicht im Lieferumfang enthaltenen stationären Computer oder hier Laptop (rechts) installiert werden kann. Der Intraoralscanner kann über USB-Schnittstelle mit dem jeweiligen Computer verbunden werden (Planmeca, 2024).



Abb. 6: Übersicht über die Bestandteile des „Dental Teacher 4.0“-Systems im Bild links: Desktopscanner der Firma Smartoptics (1), Universalmodellhalter (2), 2 USB-Sticks mit „Dental Teacher 4.0“-Software und Lizenz (3), Workstation (4). Bild rechts: KaVo-Modellhalter für das KaVo-Pinsystem der KaVo-Studienmodelle (1), Universalmodellhalter (2) und Kalibrierungskörper (3) (Kavo Dental GmbH, 2021).

Im Folgenden legt der/die Student/Studentin nach Fertigstellung der Präparation in der jeweiligen Bediensoftware einen/eine neuen/neue Patienten/Patientin an und scannt anschließend seinen/ihren fertig beschliffenen Zahn und die umliegenden relevanten Bereiche ein. Anschließend ist die jeweilige Software in der Lage, ein virtuelles Modell der eingescannten Situation zu erstellen und mit der Meisterpräparation zu vergleichen. Schließlich kann mithilfe der jeweiligen Analysesoftware und individuellen Farbcodierungen angezeigt werden, wie stark die Studentenpräparation von der Meisterpräparation abweicht (Abb. 7 bis 9), wobei bei der „PrepCheck 5“- und „Romexis Compare“-Software ein individueller Toleranzbereich für Abweichungen von der Meisterpräparation (z.B. $\pm 0,1$ mm) eingestellt werden kann. Somit werden Bereiche mit hohen Übereinstimmungen mit der Meisterpräparation in der „PrepCheck 5“-Software in einer separaten Farbe angezeigt (Abb. 7) und in der „Romexis Compare“-Software ausgeblendet (Abb. 9).

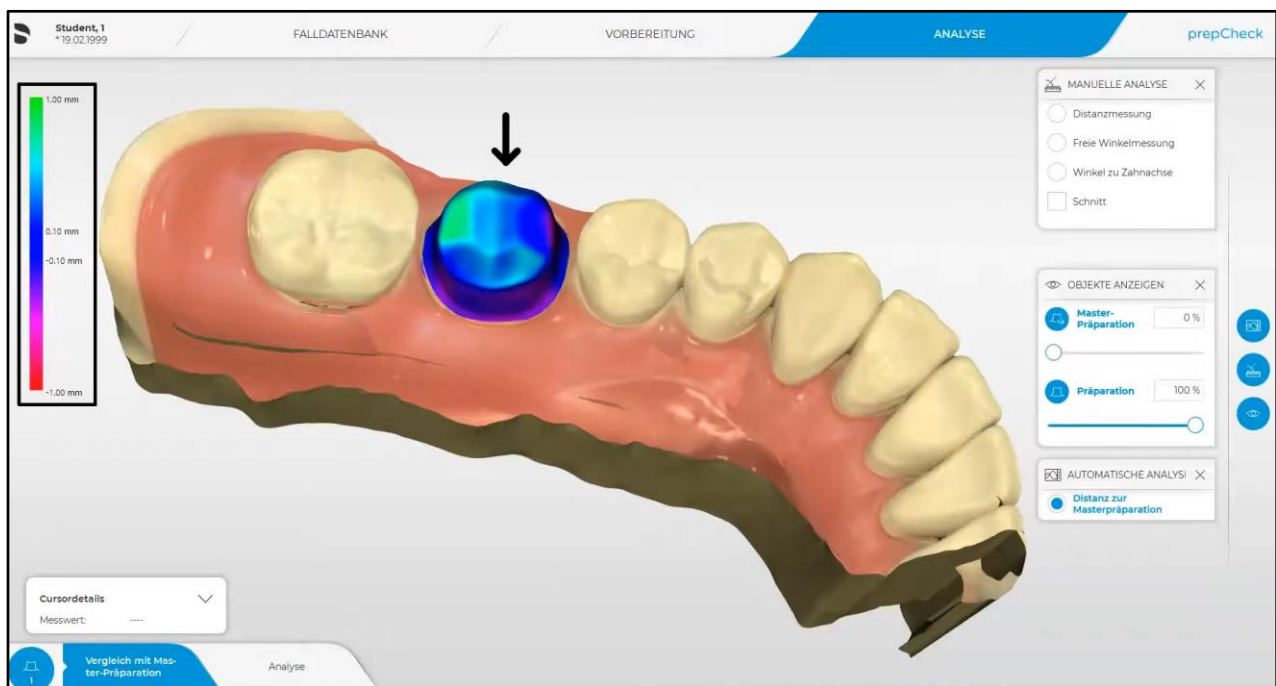


Abb. 7: Darstellung der Überlagerung einer eingescannten Studentenpräparation des Zahnes 36 mit der jeweiligen Meisterpräparation in der „PrepCheck 5“-Software (siehe Pfeil). Hohe Übereinstimmungen mit der Meisterpräparation, die im vorher eingestellten Toleranzbereich $\pm 0,1$ mm liegen, werden durch blaue Flächen definiert. Bei Abweichungen ≥ 1 mm wird ein zu geringer Substanzabtrag mittels grüner Flächen und ein zu hoher Substanzabtrag mittels roter Flächen angezeigt. Liegen die Abweichungen lediglich zwischen 0,1 mm und maximal 1 mm werden die Substanzabtragabweichungen in hellblauer oder violetter Farbe dargestellt (Dentsply Sirona, 2021).

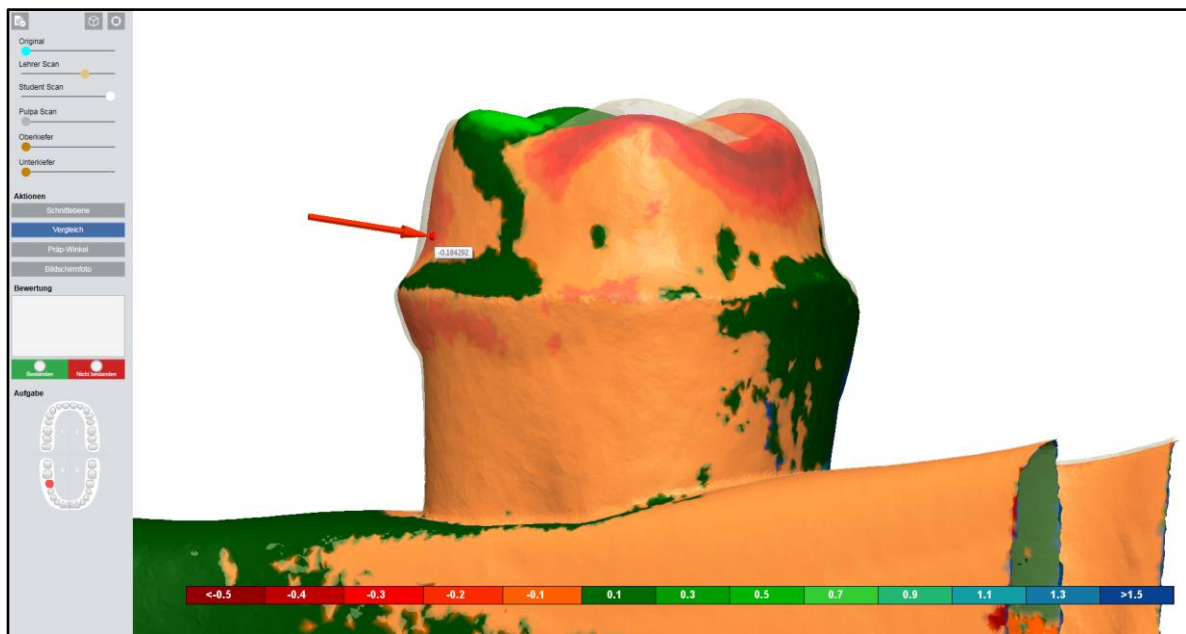


Abb. 8: Darstellung eines Vergleichs der studentischen Präparation mit der hinterlegten Meisterpräparation in der „Dental Teacher 4.0“-Software. Rote und orange Flächen stehen für einen zu hohen, grüne und türkis/blau Flächen für einen zu geringen Substanzabtrag. Hierbei ist kein Toleranzbereich ersichtlich (Kavo Dental GmbH, 2021).

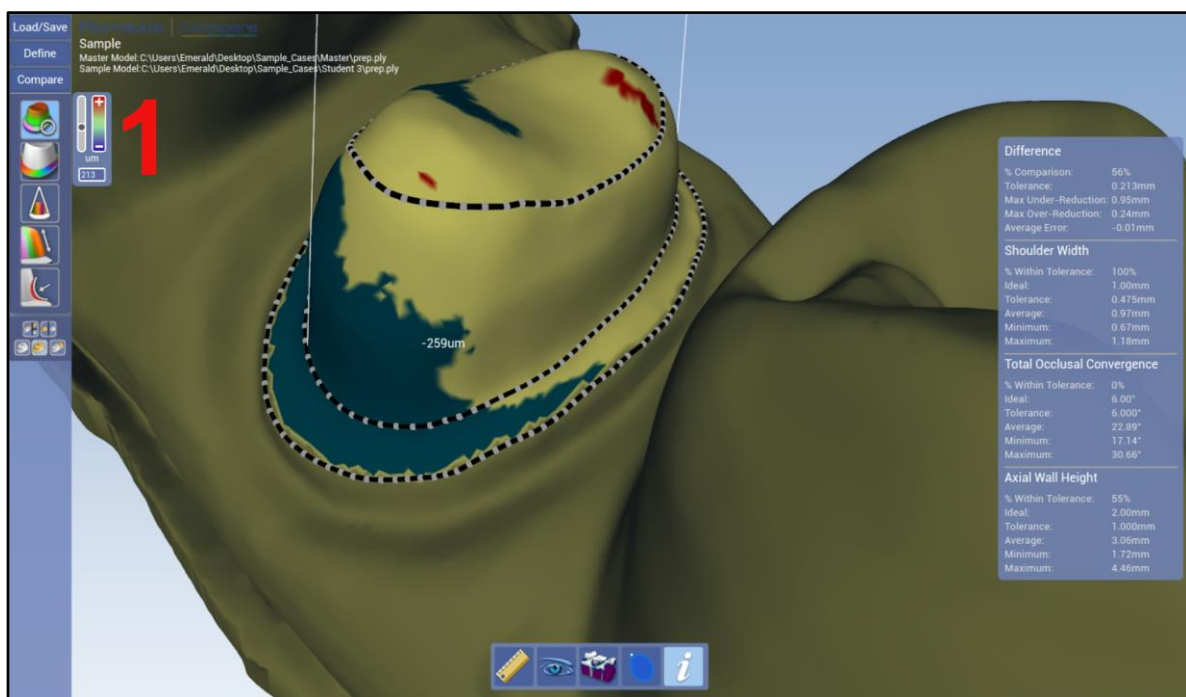


Abb. 9: Darstellung eines Vergleichs der studentischen Präparation mit der hinterlegten Meisterpräparation in der „Romexis Compare“-Software. Rote/blau Flächen zeigen einen zu hohen/ zu geringen Substanzabtrag der studentischen Präparation im Vergleich zur Meisterpräparation an. Mithilfe der Computermouse kann die exakte μm -Abweichung angezeigt werden. Abweichungen innerhalb des unter (1) einstellbaren Toleranzbereichs werden nicht angezeigt (Planmeca, 2024).

Darüber hinaus können bei Bedarf alle Systeme Schnittebenen der Präparation (Abb. 10) sowie einzelne Parameter wie z.B. den Präparationswinkel (Abb. 11 u. 12) anzeigen. Die „PrepCheck 5“-Software ermöglicht zusätzlich die Betrachtung der Oberflächenbeschaffenheit und den Verlauf des Präparationsrandes im Detail. Die „Dental Teacher 4.0“-Software ermöglicht die Überlagerung mit dem zuvor eingescannten, unbeschliffenen Originalzahn (Abb. 11).

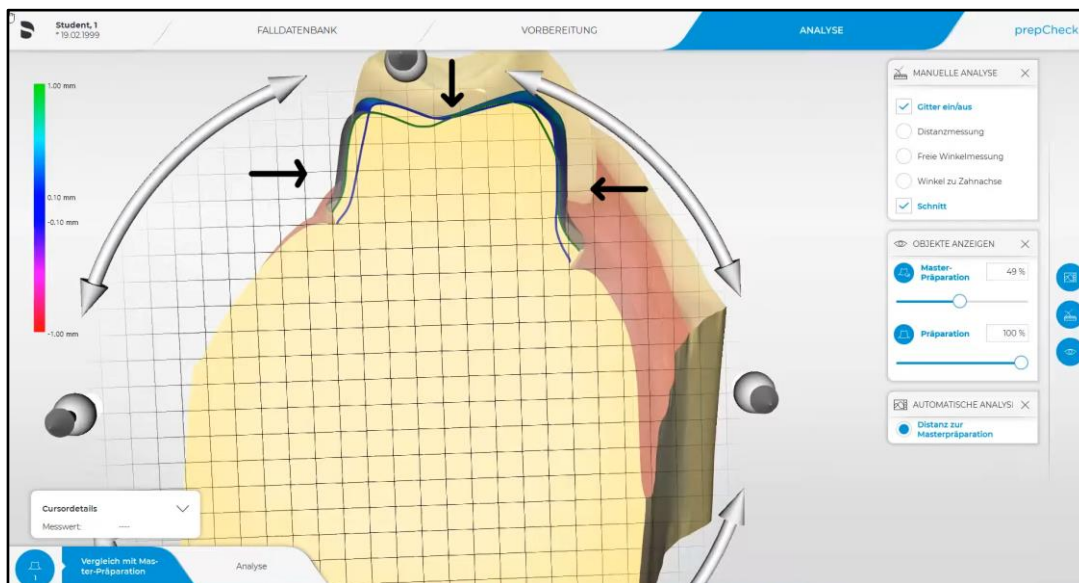


Abb. 10: Darstellung einer Schnittebene der überlagerten Meisterpräparation (grün) mit der studentischen Präparation (blau) in der „PrepCheck 5“-Software (Dentsply Sirona, 2021).

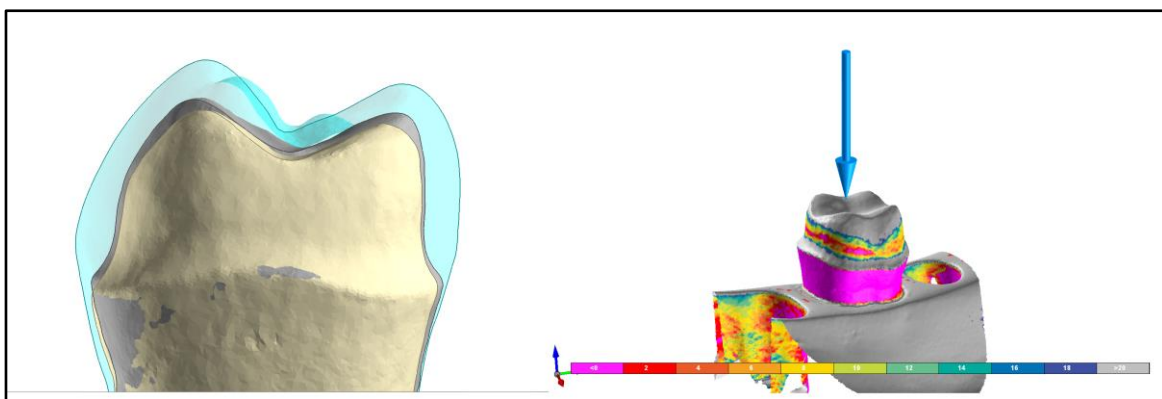


Abb. 11: Darstellung einer Seitenansicht des präparierten Zahns mit Überlagerung des Originalzahns in Hellblau in der „Dental Teacher 4.0“-Software (links) sowie Darstellung der Analysefunktion „Präparationswinkel einblenden“ (rechts). Rosa/rote Flächen stehen für einen steilen Präparationswinkel, Flächen in Türkis/Blau für einen flachen Präparationswinkel und Flächen in Gelb/Hellgrün für einen optimalen Präparationswinkel (Kavo Dental GmbH, 2021).

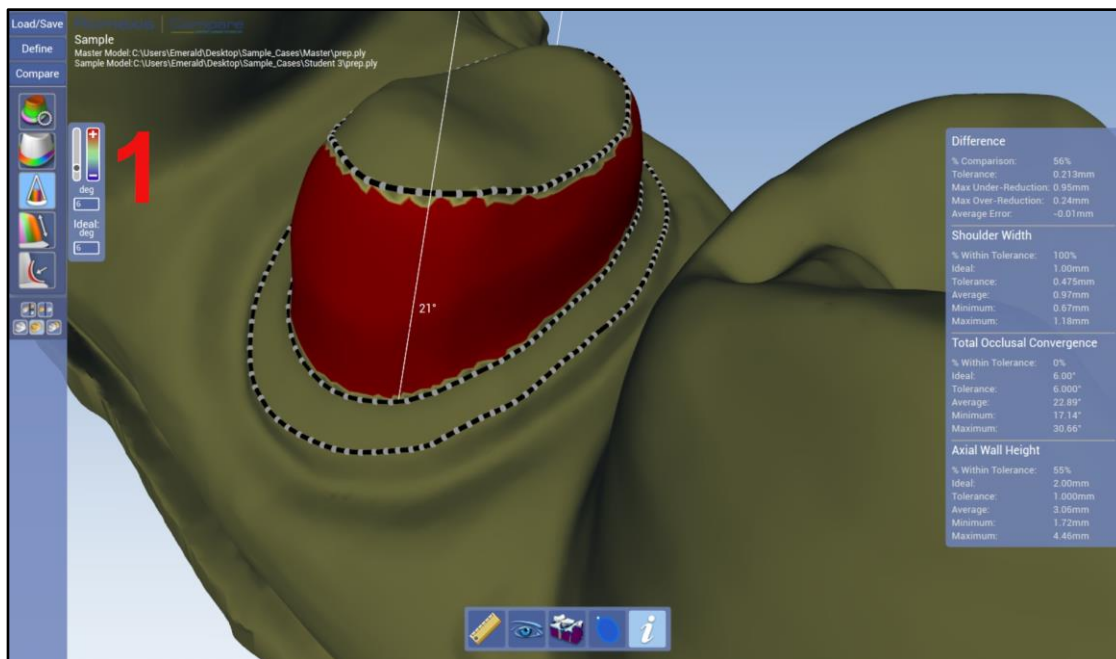


Abb. 12: Darstellung der Analysefunktion „Präparationswinkel“ in der „Romexis Compare“-Software. Rote Flächen markieren Bereiche mit einer zu starken Konizität der studentischen Präparation. Mithilfe der Computermouse kann der exakte Konuswinkel angezeigt werden. Abweichungen innerhalb des unter (1) einstellbaren Toleranzbereichs werden nicht angezeigt (Planmeca, 2024).

In der Literatur wird die Verwendung von Präparationsassistenten in der vorklinischen Ausbildung positiv bewertet. Stoilov et al. (2021) kamen zu der Erkenntnis, dass die „PrepCheck“ und „Dental Teacher“-Software im Vergleich zu den konventionellen Lernmethoden als ebenbürtig angesehen werden können, da die Art der Betreuung keinen Einfluss auf die Leistung der Studienteilnehmer habe. Wolgin et al. (2018) kamen in ihrer Untersuchung über die „PrepCheck“-Software auf dasselbe Ergebnis. Nagy et al. (2018) stuften die „Dental Teacher“-Software sogar als überlegen ein: Besonders leistungsschwächere Studierende würden von einem tieferen Verständnis für die Dimensionen der Präparationsform profitieren (Nagy et al., 2018).

Alle Systeme gewährleisten eine objektivere Bewertung im Vergleich zu der sonst subjektiven Bewertung durch die Kursassistenten/Kursassistentinnen (Kournetas et al., 2004; Lenherr und Marinello, 2014; Mays und Levine, 2014; Mays et al., 2016; Renne et al., 2013; Schepke et al., 2020) und können somit einen wichtigen Beitrag zur Bewältigung des häufig schlechten Betreuungsschlüssels zwischen den Studierenden und dem Lehrpersonal leisten (Wolgin et al., 2018).

1.6 „Augmented Reality“ basierte Simulationssysteme

Ein wesentlicher Bestandteil des Lernprozesses zur eigenständigen Präparation ist nicht nur die Fehlererkennung, sondern auch das Verständnis für die Fehlerentstehung. Um Studierenden diesen Lernaspekt besser vermitteln zu können, wurden computer-assistierte Patientensimulatoren entwickelt, die auf dem Prinzip der erweiterten Realität („Augmented Reality“) basieren. Hierbei werden virtuelle Erweiterungen in Live-Videos oder die Umgebung der Nutzer in Echtzeit integriert. Die virtuelle Welt wird mit der realen Welt verbunden.

1.6.1 „DentSim“-Simulator der Firma Image Navigation

1993 wurde die erste Generation des computerassistierten Patientensimulators „DentSim“ der Firma DenX (Jerusalem, Israel) veröffentlicht (Zheng et al., 2014). 30 Jahre später wird nun die derzeitige Version v 5.0 durch die Firma Image Navigation (New York, USA) weltweit vermarktet. Die „DentSim“-Einheit basiert auf dem oben beschriebenen Prinzip der erweiterten Realität und besteht aus einem klassischen Phantomkopf mit Dentalmodellen, einem Winkelstück der Firma KaVo Dental (Biberach, Deutschland), einer CCD-Infrarot-Kamera sowie einem Computer mit Tracking- und „DentSim“-Software (Abb. 13).



Abb. 13: Darstellung einer „DentSim“-Einheit bestehend aus einer CCD-Infrarot-Kamera, die der Aufnahme der Behandlungsschritte des Anwenders dient (1), einem Bildschirm mit „DentSim“-Benutzeroberfläche (2) und einem Phantomkopf mit Dentalmodellen (3) (Dr. Samuel Elhadad - Image Navigation, 2024).

Im Phantomkopf und im Winkelstück sind jeweils 7 bzw. 16 Leuchtdioden verbaut, die während der Nutzung infrarotes Licht emittieren, welches durch die Infrarot-Kamera aufgezeichnet wird. Somit kann das Computerprogramm die Position zwischen Phantomkopf und Winkelstück berechnen und die Bilder auf dem Monitor darstellen. Durch dieses Verfahren kann die Präparation in Echtzeit auf dem Bildschirm dargestellt werden.

Die „DentSim“-Software bietet dem/der Nutzer/-in die Auswahl zwischen sieben verschiedenen Modi. Im Hauptmodus „Clinic“, werden die zahnärztlichen Präparationen angefertigt. Der Modus „Evaluation“ ermöglicht die ergebnisorientierte Bewertung auf Grundlage vordefinierter Kriterien (Meisterpräparation). Um mögliche Präparationsfehler einfacher verstehen zu können, stehen dem/der Studenten/Studentin unter anderem frei wählbare Quer- und Längsschnittbilder der Zähne zur Verfügung (Abb. 14). Dies ermöglicht eine bessere Visualisierung der Fehlerquellen und ein schnelleres Erlernen der geforderten Präparationsübung (Welk et al., 2004). Im Modus „Review“ wird eine prozessorientierte Bewertung ermöglicht. Durch die computergestützte Aufzeichnung der gesamten Präparationsübung, einschließlich der Bewegungsabläufe, ist der/die Nutzer/-in in der Lage, nicht nur den Fehler selbst, sondern auch die Fehlerentstehung nachzuvollziehen. Dies wird als eine große Hilfe beim autonomen Lernen ohne Lehrpersonal angesehen (Jasinevicius et al., 2004; Welk et al., 2004). Mithilfe der Modi „Lesson“ und „Practice“, ist das Vorbereiten auf eine vordefinierte Aufgabe oder das freie Präparieren möglich. Falls der/die Nutzer/-in eine vergangene gespeicherte Sitzung erneut evaluieren möchte, muss er/sie den Modus „Previous Session“ auswählen. Letztlich gibt es auch den Prüfungsmodus „Assignment“.



Abb. 14: Darstellung der Benutzeroberfläche des „DentSim“-Systems. In der oberen linken Ecke ist die fertige Inlay-Präparation abgebildet. Unten links werden die jeweiligen Bewertungskriterien aufgelistet. Auf der rechten Seite erkennt man im oberen Bereich die Fehleranalyse der Software sowie im unteren Bereich die ausgewählten Schnittbilder der Meisterpräparation und der studentischen Präparation (Dr. Samuel Elhadad - Image Navigation, 2024).

In bisherigen Untersuchungen erhält die Nutzung der „DentSim“-Software in der vor-klinischen zahnärztlichen Lehre viel Zustimmung. Studierende sollen in der Lage sein, mit dem „DentSim“-System schneller zu lernen und ihre Fähigkeiten in deutlich kürzerer Zeit zu entwickeln (Buchanan, 2004; Gluch et al., 1999; LeBlanc et al., 2004; Stewart et al., 1999). Ferner ermöglicht das System eine erhöhte Anzahl von Übungswiederholungen (Buchanan, 2004) und führt zu einem gesteigerten Interesse und Motivation der Studierenden (Feeney et al., 2008; Welk et al., 2006). Kikuchi et al. (2013) konnten sogar nachweisen, dass Studenten/Studentinnen mithilfe der „DentSim“-Software bessere Kronenpräparationen anfertigen als mit konventionellen Lernmethoden.

1.7 Virtuelle Präparationssimulatoren mit haptischem Feedback

Mit voranschreitender Digitalisierung und Weiterentwicklung der Computertechnik wurden in den vergangenen Jahren sogenannte „Haptic Virtual Reality Simulation Devices“ (HVRS-Systeme) entwickelt. Diese computerassistierten Patientensimulatoren basieren auf dem Konzept der virtuellen Realität und ermöglichen mithilfe von haptischem Feedback eine realistische Interaktion mit den virtuellen Objekten durch den Tastsinn (Fager und Wowern, 2004; Gottlieb et al., 2013; Robles-De-La-Torre, 2006). Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Systemen kann somit auf die Verwendung von Phantomschädeln und Kunststoffzähnen verzichtet werden. Die Computerprogramme erschaffen virtuelle Dentalmodelle und klinische Patientensituationen mit denen der/die Nutzer/-in ähnlich wie im wirklichen Leben interagieren kann.

1.7.1 „Dente“-Simulator der Firma SIMtoCARE

Der „Dente“-Simulator ist ein virtueller 3D-Simulator mit haptischem Feedback (HVRS-System), der von der Firma SIMtoCARE (Vreeland, Niederlande) entwickelt wurde und seit 2019 im Handel ist. Der „Dente“-Simulator setzt sich aus zahlreichen Bestandteilen zusammen: einem hochauflösenden 4k 3D-Display, mithilfe dessen eine 3D-Brille für die Tiefenwahrnehmung entfällt, einem Tablet der Firma Apple (Cupertino, CA, USA) zur Bedienung des Systems, einem Phantomkopf mit Dentalmodellen zur Abstützung der Finger und der Hand, einem Fußpedal sowie einem Winkelstück und einem Griff für einen zahnärztlichen Spiegel, die durch bewegliche Arme mit der Einheit verbunden sind (Abb. 15). Mithilfe der „SIMtoCARE“-Lernsoftware kann der/die Nutzer/-in über das beigefügte Tablet nach Anmeldung zunächst aus zahlreichen Übungsmodulen auswählen. Hierfür stehen unter anderem Module für manuelle Geschicklichkeitsübungen, Kariologie, Implantologie, Endodontologie sowie Kronen- und Brückenpräparationen zur Verfügung (Abb. 16). Nach gewünschter Modulauswahl hat der/die Nutzer/-in die Möglichkeit, aus verschiedenen Winkelstücken, Diamanten sowie Spiegeln zu wählen. Auch andere zahnärztliche Instrumente wie z.B. Scaler, Ultraschallaufsatz und Anästhesiespritze stehen zur Auswahl (Abb. 17).



Abb. 15: Darstellung des „Dente“-Simulators der Firma SIMtoCare mit 4k 3D-Display (1), Tablet (2), Phantomkopf mit Dentalmodellen (3), Fußpedal (4) sowie einem Winkelstück (5) und einem Griff für einen zahnärztlichen Spiegel (6).

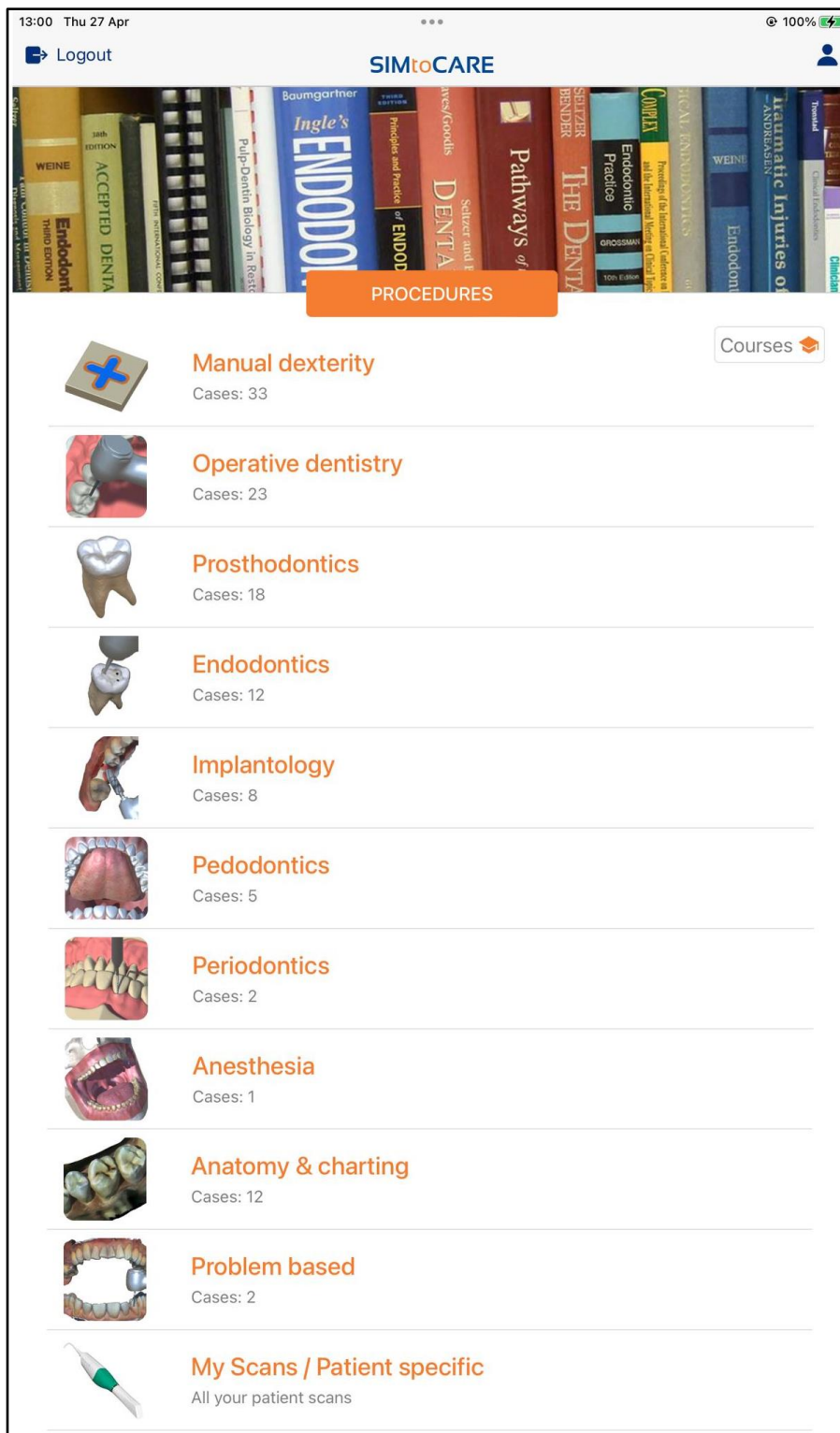


Abb. 16: Übersicht der möglichen Übungsmodule für den/die Nutzer/-in des „Dente“-Simulators der Firma SIMtoCARE.

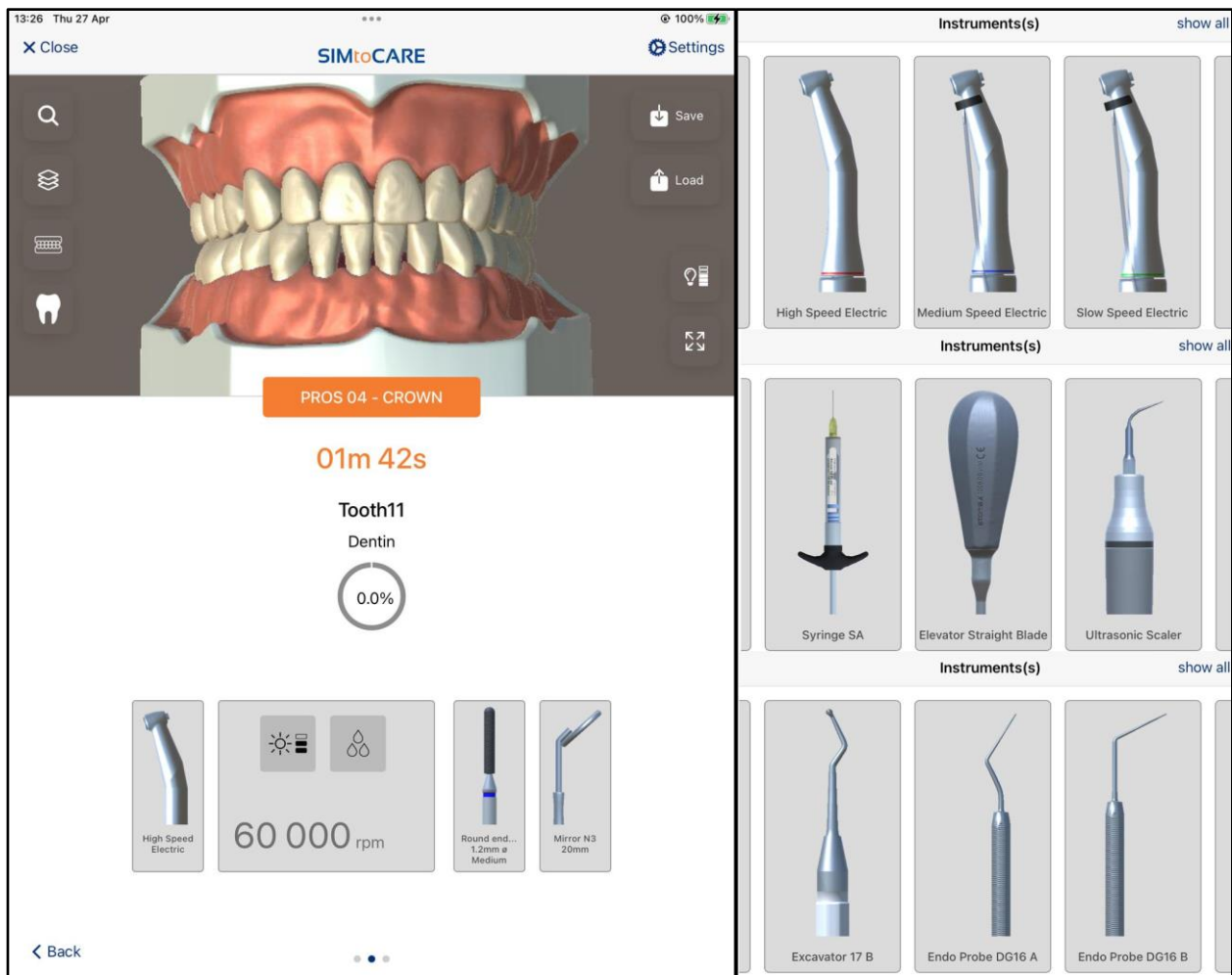


Abb. 17: Darstellung der Benutzeroberfläche der „SIMtoCARE“-Lernsoftware, nach ausgewähltem Übungsmodul sowie ausgewählten zahnärztlichen Instrumenten und Diamanten (links). Ausschnitt der möglichen Auswahl der zahnärztlichen Instrumente (rechts).

Schließlich wird das Dentalmodell und die zu verwendenden zahnärztlichen Instrumente in Originalgröße virtuell auf dem 3D-Display dargestellt (Abb. 18). Falls nun der/die Nutzer/-in das physische Winkelstück und den zusätzlichen Griff bewegt, kann die „SIMtoCARE“-Software mithilfe der entstehenden Datensätze die Bewegung der virtuellen zahnärztlichen Instrumente in Echtzeit auf dem 3D-Display darstellen. Dabei steht dem/der Nutzer/-in ein Bewegungsradius von $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ zur Verfügung. Während der Nutzung des Gerätes greift der „Dente“-Simulator auf den „Force Feedback“ Mechanismus zurück. Sobald der/die Nutzer/-in mit dem virtuellen Winkelstück das virtuelle Modell berührt oder einen Zahn virtuell beschleift, werden Widerstände erzeugt, die über das physische Winkelstück an den/die Nutzer/-in weiter-

gegeben werden. Dadurch soll eine realistische Interaktion mit den virtuellen Objekten durch den Tastsinn ermöglicht werden (Fager und Wowern, 2004; Gottlieb et al., 2013; Robles-De-La-Torre, 2006). Ergänzend werden akustische Effekte (z.B. Geräusch des Winkelstücks) und visuelle Effekte (z.B. virtuelle Wasserkühlung) verwendet, um die Simulation realistischer zu gestalten.



Abb. 18: Darstellung des virtuellen Unterkiefer-Dentalmodells und dem ausgewählten virtuellen Winkelstück mit Präparationsdiamant, die auf dem 3D-Display abgebildet werden.

Während der Nutzung können über die Benutzeroberfläche des Tablets zahlreiche Einstellungen vorgenommen werden. Dazu gehören unter anderem die Höheneinstellung des Geräts, die Vergrößerung in der das Dentalmodell angezeigt wird, die Anzeigeeinstellung des Ober- und Unterkiefers, der Winkel des einfallenden Lichtes und eine Anzeige, wie viel Prozent Schmelz und Dentin durch die Präparation entfernt wurde. Nach Abschluss der Modulaufgabe kann schließlich der/die Nutzer/-in das Endergebnis dem Lehrkörper hochladen, um eine abschließende Bewertung der Leistung zu erhalten.

Eine Besonderheit stellt das in der Software enthaltene Modul „My Scans/Patient specific“ (Abb. 16) dar. Es bietet die Möglichkeit, klinische Patientensituationen mithilfe von Intraoralscannern zu erfassen und zu importieren. Hierbei ist das SIMtoCARE-System mit jedem intraoralen Scanner kompatibel, der STL- oder PLY-Dateien erzeugt. Dadurch kann der/die Behandler/-in zunächst die klinische Situation an dem „Dente“-Simulator üben, bevor er/sie den/die Patienten/Patientin behandelt (Abb. 19).



Abb. 19: Darstellung eines importierten Intraoralscans eines Unterkiefers. Der/die Nutzer/-in präpariert den Zahn 46 virtuell mithilfe eines Winkelstücks und eines Spiegels.

Der „Dente“-Simulator kann als wissenschaftlich nicht ausreichend untersucht angesehen werden, da die Effektivität und der Nutzen dieses Systems bisher nur in einer Studie untersucht wurden: Philip et al. (2023) kamen in ihrer Untersuchung zu dem Ergebnis, dass es keine signifikanten Unterschiede zwischen Studierenden gab, die das Präparieren von Trepanationsöffnungen für Unterkiefermolaren sowohl am „Dente“-Simulator als auch klassisch am Dentalmodell geübt hatten, und denen, die nur am Modell geübt hatten. Zudem waren die meisten Studienteilnehmer/-innen der Ansicht, dass der „Dente“-Simulator herkömmliche Übungsmethoden am Dentalmodell nicht vollständig ersetzen könne, sondern eher eine Ergänzung darstelle (Philip et al., 2023).

1.8 Herausforderungen in der zahnärztlichen Lehre mit Blick auf die ZApprO

Nach stetigen Diskussionen über die Neuauflage der aus dem Jahre 1955 stammenden ersten einheitlichen zahnärztlichen Approbationsordnung (ZApprO), stimmte schließlich der Deutsche Bundestag am 7. Juni 2019 der Verordnung zur Neuregelung der zahnärztlichen Ausbildung zu, die für Neustudierende ab dem Wintersemester 2021/2022 in Kraft trat. Im Rahmen der neuen zahnärztlichen Approbationsordnung wird die zahnärztliche Ausbildung neu strukturiert.

In dem nun kürzeren viersemestrigen vorklinischen Studienabschnitt sollen medizinische und zahnmedizinische Grundlagen vermittelt werden. Studierende der Zahnmedizin besuchen dieselben Unterrichtsveranstaltungen wie Studierende der Medizin und absolvieren eine Ausbildung in Erster Hilfe sowie einen einmonatigen Krankenpflagedienst. Zusätzlich wird der Technisch Propädeutische Kurs (TPK) durch Seminare und Praktika ersetzt, in denen bereits frühzeitig Grundlagen präventiver und restaurativer Zahnheilkunde mit klinischen Bezügen vermittelt werden. Schließlich müssen Studierende eine staatliche Prüfung zum Abschluss des vorklinischen Studienabschnitts ablegen. Diese entspricht nun dem bisherigem Ersten Abschnitt der Ärztlichen Prüfung. Somit werden einerseits in der Vorklinik die Studiengänge der Medizin und Zahnmedizin angeglichen, um zusammen mit mehr medizinischen Unterrichtsveranstaltungen im klinischen Studienabschnitt eine bessere Ausbildung im Bereich der Allgemeinerkrankungen zu gewährleisten, andererseits werden den Studierenden durch Seminare und Praktika frühzeitig fundierte Grundlagen in präventiver und restaurativer Zahnheilkunde mit direktem klinischem Bezug vermittelt.

Der nachfolgende klinische Studienabschnitt von insgesamt sechs Semestern ist in jeweils zwei Abschnitte aufgeteilt. Im fünften und sechsten Semester werden standardisierte Ausbildungssituationen am Phantomkopf im Rahmen der Kurse der Zahnerhaltung und Zahnersatzkunde geübt, wobei sich die zahntechnischen Lerninhalte ausschließlich auf die für den Zahnarzt und die Zahnärztin relevanten Arbeitstechniken beschränken. Die Betreuungsrelation zwischen Lehrenden und Studenten/Studentinnen soll von derzeit 1:20 auf 1:15 angehoben werden. Der Phantomkurs 2 der Zahnersatzkunde entfällt vollständig. Im siebten bis zehnten Semester werden die Studenten/Studentinnen weiterhin an Patienten/Patientinnen praktisch ausgebildet, wobei die Betreuungsrelation von 1:6 auf 1:3 verbessert werden soll.

Die Kürzung der verfügbaren Lern- und Übungszeit in den vorklinischen praktischen Kursen stellt die zahnmedizinischen Fakultäten vor eine große Herausforderung. Das angestrebte verbesserte Betreuungsverhältnis zwischen Lehrenden und Studenten/Studentinnen stellt eine mögliche Lösung dar, jedoch ist die Umsetzung und das Aufstocken des zahnärztlichen Personals nicht an allen Fakultäten unmittelbar möglich. Eine Reduktion der Anzahl der Studienplätze ist aufgrund des Ärztemangels ebenfalls keine alternative Option.

Eine Möglichkeit, dieses Problem anzugehen, besteht darin, digitale Bewertungs- und Übungssysteme in Form von Simulationszentren einzusetzen. Studierende können in Gruppen eingeteilt werden, die abwechselnd entweder unter Betreuung vom Kurspersonal oder autodidaktisch und selbstkritisch mithilfe der digitalen Bewertungs- und Übungssysteme arbeiten. Somit muss weder die Zahl des zahnärztlichen Personals wesentlich erhöht, noch die Anzahl der Studenten/Studentinnen reduziert werden. Zudem besteht die Möglichkeit, die Simulationszentren den Studenten/Studentinnen außerhalb der Kurszeit frei zugänglich zu machen, um ihnen je nach individuellem Ermessen mehr Übungszeit für Präparationen zu ermöglichen. Dies kann einen nicht zu unterschätzenden motivierenden Vorteil für die Studenten/Studentinnen darstellen.

In Absatz A der Drucksache 592/17 über die „Verordnung zur Neuregelung der zahnärztlichen Ausbildung“, die dem Bundesrat am 03.08.2017 vorgelegt wurde, ist die Novellierung der Approbationsordnung für Zahnärzte durch die fachliche Weiterentwicklung der Zahnmedizin und die steigenden Anforderungen an eine moderne und interdisziplinäre Lehre begründet. Die Implementierung digitaler Lerninhalte in Form von digitalen Bewertungs- und Übungssystemen in die konventionelle vorklinische Lehre kann somit ebenfalls als ein Schritt in Richtung geforderter „moderner“ Lehre angesehen werden. Potenziell hohe Investitions- und Instandhaltungskosten halten jedoch viele Fakultäten davon ab, digitale Lerninhalte in ausreichendem Maße in die zahnmedizinischen Curricula zu implementieren. Den Landesregierungen wird somit eine maßgebliche Rolle bei der finanziellen Unterstützung der Fakultäten zugewiesen, um die gewünschte „moderne“ Lehre gemäß der neuen Approbationsordnung erfolgreich umsetzen zu können.

1.9 Ziel der vorliegenden Dissertation

Trotz umfangreicher Forschung über HVRS-Systeme und deren Implementierung in die zahnärztliche Lehre bleiben viele Fragen unbeantwortet.

Studien deuten darauf hin, dass HVRS-Systeme in der Lage sind, die manuelle Geschicklichkeit/Augen-Hand-Koordination der Nutzer/-innen zu verbessern (Aliaga et al., 2020; Bakker et al., 2010). Zudem wird die Nutzung von HVRS-Systemen in Bezug auf das Training von zahnerhaltenden Eingriffen wie Kariesexkavation, Kavitätenpräparation und Trepanationsöffnungen gegenüber den traditionellen Übungsmethoden am Dentalmodell als ähnlich effektiv angesehen (Dwisaptarini et al., 2018; Philip et al., 2023; San Diego et al., 2022; Suebnukarn et al., 2011; Vincent et al., 2020).

Die Effektivität von HVRS-Systemen in Bezug auf das Training von prothetischen Eingriffen, wie die Zahnpräparation von Vollkronen, im Vergleich zur klassischen Übungsmethode am Dentalmodell, wurde bis jetzt jedoch noch nicht im Detail untersucht. Lediglich Zafar et al. (2020) untersuchten das subjektive Empfinden Studierender, die Pulpotomien und Kronenpräparationen sowohl an einem HVRS-System (Simodont der Firma Nissin Dental (Kyoto, Japan)) als auch konventionell am Dentalmodell durchführten. Hierbei blieb allerdings die objektive Bewertung der Verbesserung der Präparationsfertigkeiten der teilnehmenden Studierenden aus. Mit Hinblick auf die neue Approbationsordnung für Zahnärzte und Zahnärztinnen (ZApprO), die ab dem Wintersemester 2021/2022 für Neustudierende in Kraft trat und der damit einhergehenden Kürzung der verfügbaren Lern- und Übungszeit in den vorklinischen praktischen Kursen der zahnärztlichen Prothetik, ist jedoch die Erörterung dieses Aspektes von besonderer Wichtigkeit.

Auf dieser Grundlage ist das Ziel der vorliegenden Promotionsarbeit zu untersuchen, ob das Training an virtuellen Präparationssimulatoren (HVRS-Systemen), wie dem „Dente“-Simulator, der klassischen Präparationsübung am Phantommodell ebenbürtig ist oder nicht.

2. Material und Methoden

Die Durchführung der vorliegenden Studie erfolgte im Zeitraum von März bis April 2023 in der Poliklinik für zahnärztliche Prothetik, Propädeutik und Werkstoffwissenschaften am Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Universitätsklinik Bonn. Die Studie wurde gemäß den Grundsätzen der Deklaration von Helsinki durchgeführt und durch die Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn unter dem Aktenzeichen 159/20 genehmigt.

2.1 Voraussetzung und Akquirierung der Teilnehmer/-innen

Die Studie umfasste insgesamt 60 Teilnehmer/-innen (50 weiblich und 10 männlich). Die Rekrutierung erfolgte zwischen dem 1. Januar 2023 und dem 28. Februar 2023. Hierbei wurden die Teilnehmenden durch den Einsatz von Flyern kontaktiert und angeworben (Abb. 20). Voraussetzung zur sonst freiwilligen Teilnahme an der Studie war, dass sich die Studierenden im vorklinischen Studienabschnitt der neuen Approbationsordnung (ZApprO) befinden sollten, nur geringe oder keine Präparationserfahrung aufweisen und noch nicht am Praktikum der zahnärztlichen Prothetik am Phantom nach ZApprO teilgenommen haben.

Nach Anmeldung wurde den Teilnehmern zufällig eine Nummer von „1“ bis „60“ zugeteilt, damit die spätere Gruppeneinteilung und Bewertung anonym stattfinden konnten.

2.2 Einführung der Studienteilnehmer/-innen

Alle Teilnehmer/-innen erhielten zunächst eine Einführungsvorlesung, um theoretische Grundlagen in Präparationsformen und -anforderungen, Materialkunde, Ergonomie sowie Bedienung der jeweiligen Einheiten zu erhalten. Abschließend wurde das Ziel der Studie, ihr konkreter Ablauf sowie die Aufgabenstellung erörtert und ausstehende Fragen geklärt. Somit konnte ein gleicher Kenntnisstand aller Teilnehmer/-innen garantiert werden.

Studie

Modell



vs.

SIMtoCare



„Können digitale Präparationssimulatoren das klassische Präparieren eines Zahnes am Modell in der vorklinischen Ausbildung von Zahnärzten ersetzen?“

Dies soll mit Hilfe der folgenden Studie untersucht werden:

Wer?

Gesucht werden Studierende des vorklinischen Studienabschnittes (neue Approbationsordnung), die noch nicht den Phantomkurs der Zahnersatzkunde absolviert haben und Interesse haben vor Kursbeginn präparieren zu üben und Erfahrung zu sammeln

(Empfehlenswert)



Wann?

In den Semesterferien (Februar bis April) für ca. 2 Wochen, genaues Datum folgt, wenn die Anzahl der Studienteilnehmer abzusehen ist

Was wird benötigt?

Mundschutz, Schutzbrille, Kittel
010/012 Diamant (Rotring und Grünring)
Frasaco-Modell (ANKA-4V), Frasaco-Maske

Was wird gestellt?

Handschuhe + Frasaco-Zähne

Anmeldung unter folgender Emailadresse bis zum 25.01. '23

██████@uni-bonn.de

ZA Fabian Stephan

Dr. Milan Stoilov, M.Sc.

Prof. Dr. Helmut Stark



Abb. 20: Darstellung des Flyers zur Akquirierung der Studienteilnehmer/-innen. Der Flyer wurde im Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde ausgelegt. Zusätzlich wurde dieser über die Fachschaft in einer Informationsgruppe für Studierende der Zahnmedizin in Bonn geteilt.

2.3 Ablauf der Studie

2.3.1 Einteilung der Studienteilnehmer/-innen

Nach Abschluss der Einführungsvorlesung wurden alle Teilnehmer/-innen gebeten, den Zahn 36, zunächst ohne Nachbarzähne, an dem Dentalmodell ANKA-4V der Firma Frasaco (Tettnang, Deutschland) (Abb. 21) für eine Vollguss-Kronenversorgung innerhalb von zwei Stunden zu präparieren.



Abb. 21: Darstellung der in der Studie verwendeten Dentalmodelle ANKA-4V der Firma Frasaco (Tettnang, Deutschland) (links), die mit 28 Zähnen bestückt sind. Diese Zähne sind jedoch nicht verschraubt, sondern mit dem Frasaco-Klicksystem befestigt. Rechts ist das verwendete Schnellaufwinkelstück Expertmatic LUX E25L der Firma KaVo Dental (Biberach, Deutschland) abgebildet.

Hierfür wurde jedem/jeder Teilnehmer/-in ein Phantomarbeitsplatz mit Zubehör (Abb. 23), ein Schnellaufwinkelstück der Firma KaVo Dental (Biberach, Deutschland) (Abb. 21), Handschuhe und der jeweilige Übungszahn zur Verfügung gestellt. Die zu verwen-

denden Dentalmodelle ANKA-4V, die Phantommaske der Firma Frasaco (Tettnang, Deutschland), das zahnärztliche Grundbesteck (Spiegel, Sonde und Pinzette) und die empfohlenen Präparationsdiamanten (Abb. 22) waren eigenverantwortlich mitzubringen. Die Anschaffung ist als keine zusätzliche finanzielle Belastung anzusehen, da der Erwerb dieser Gegenstände bereits eine Voraussetzung für das im ersten vorklinischen Semester durchgeführte Modul 10 „Dentale Technologie“ (ZApprO) war und auch in den kommenden Phantomkursen der Zahnerhaltung und Zahnersatzkunde (ZApprO) erforderlich sein wird.



Abb. 22: Darstellung der zur Verwendung empfohlenen Diamanten. Die „Football“-förmigen Diamanten auf der rechten Seite wurden zur okklusalen Reduktion und zur Abrundung scharfer Kanten empfohlen. Für die zirkuläre Präparation und Darstellung der funktionellen Anschrägung wurde die Verwendung von Hohlkehldiamanten in den Durchmessern 010 (1 mm) und 012 (1,2 mm) angeraten (links). Alle Diamanten sollten in den Körnungen 125 μm (grün) und 40 μm (rot) erworben werden, wobei die grün markierten Diamanten mit der Drehzahlempfehlung von 20.000 - 30.000 U/min zur Formgebung und die rot markierten Diamanten mit der Drehzahlempfehlung von 5.000 - 10.000 U/min zum Finieren der Präparation dienen.



Abb. 23: Darstellung des Phantomarbeitsplatzes mit LED-Behandlungsleuchte (1), LED-Arbeitslicht für zahntechnische Arbeiten (2), Wasser- und Luftpüster (3), Mikromotor und Winkelstück (4), Phantomkopf mit Halterung und bereits angelegter Gummimaske (5), Absaugschläuche (6), Luftpüster und Handstück für zahntechnische Arbeiten (7), Kniepedal zur Drehzahlanpassung des Handstücks (8) sowie Fußpedal zur Drehzahlanpassung des Winkelstücks (9).

Die vorgegebene ideale Lage der Präparationsgrenze wurde auf 0,5 mm supragingival festgelegt, der Präparationswinkel bzw. Konvergenzwinkel sollte sich zwischen 4 - 6° bzw. 8 - 12° befinden (Abb. 24).



Abb. 24: Darstellung einer Meisterpräparation des Zahnes 36 mit angestrebtem Präparationswinkel zwischen 4 - 6°.

Zudem sollte der Substanzabtrag ca. 0,5 mm zirkulär und 1 mm okklusal betragen (Abb. 25). Es war ebenfalls wichtig, eine ausreichende funktionelle Abschrägung im 45°-Winkel zu berücksichtigen (Abb. 26).



Abb. 25: Darstellung einer Meisterpräparation des Zahnes 36 mit idealem zirkulärem Substanzabtrag von 0,5 mm



Abb. 26: Darstellung einer Meisterpräparation des Zahnes 36 mit funktioneller Abschrägung im 45°-Winkel.

Nach Abgabe wurden die Zähne verblindet in einer Box archiviert, die mit der zum Studierenden korrespondierenden Nummer markiert wurde. Daraufhin erfolgte eine anonyme Bewertung der Zahnpräparationen durch einen vorklinischen Oberarzt der zahnärztlichen Prothetik, Propädeutik und Werkstoffwissenschaften aus dem Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde, der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn. Hierbei hatte der Prüfer die Option, aus den Noten gut „+“, befriedigend „0“ und schlecht „-“ auszuwählen.

Somit konnte die Begabung der Studierenden, eine neuartige und komplexe praktische Aufgabe umzusetzen, ermittelt werden. Auf dieser Grundlage wurden anschließend die Teilnehmer/-innen gleichmäßig in die Frasaco- und SIMtoCare-Gruppen eingeteilt.

2.3.2 Freie Übungszeit

Nach der Einteilung in Gruppen, erhielten die Studierenden die Möglichkeit, ihre praktischen Fähigkeiten durch freies Üben zu schulen und ihre Präparation an Zahn 36 für eine Vollguss-Kronenversorgung zu verbessern.

Hierbei arbeiteten Gruppe 1 und 2 mit je 15 Probanden/Probandinnen, wie bereits zuvor beschrieben, an den Dentalmodellen ANKA-4V der Firma Frasco (Tettnang, Deutschland) und Gruppe 3 bis 7 mit je 6 Probanden/Probandinnen, wie nachfolgend beschrieben, an den digitalen Präparationssimulatoren „Dente“ der Firma SIMtoCare (Vreeland, Niederlande). Die Übungszeit jeder Gruppe betrug 28 Übungsstunden (Abb. 27).

Alle Teilnehmer/-innen wurden angewiesen, die Nachbarzähne mitzuverwenden, um eine realistischere Patientensituation im Vergleich zum Vortestat zu simulieren. Um Chancengleichheit zu gewährleisten, wurden Gruppe 1 und 2 die Verbrauchsgegenstände wie z.B. Übungszähne, Nachbarzähne und Handschuhe unbegrenzt zur Verfügung gestellt. Somit war kein/keine Teilnehmer/-in in seiner/ihrer Wiederholungsanzahl limitiert. Während der gesamten Übungszeit konnten alle Teilnehmer/-innen jederzeit und beliebig oft Zahnärzte und Zahnärztinnen für konstruktives Feedback aufsuchen. Zudem war es den Teilnehmern/Teilnehmerinnen möglich, eine „Meisterpräparation“ des Zahnes 36 einzusehen, um sich die Verbesserungsvorschläge auch räumlich vorstellen zu können (Abb. 24 bis 26).

Woche 1 (13.3 - 17.3.23)					
Uhrzeit	Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag
8:00-8:15 Aufbau	Gruppe 1 + 3				
8:15-10:15 freies Präparieren					
10:15-12:15 freies Präparieren					
12:15-12:30 Abbau					
12:30-13:00 Pause					
13:00 -13:15 Aufbau	Gruppe 2 + 4				
13:15-15:15 freies Präparieren					
15:15-17:15 freies Präparieren					
17:15-17:30 Abbau					
Woche 2 (20.3. - 24.3.23)					
Uhrzeit	Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag
8:00-8:15 Aufbau	Gruppe 1 + 3		Präptestat Gruppe 1,2,3,4	Gruppe 5	
8:15-10:15 freies Präparieren					
10:15-12:15 freies Präparieren					
12:15-12:30 Abbau					
12:30-13:00 Pause					
13:00 -13:15 Aufbau	Gruppe 2 + 4		Gruppe 5	Gruppe 6	
13:15-15:15 freies Präparieren					
15:15-17:15 freies Präparieren					
17:15-17:30 Abbau					
Woche 3 (27.3. - 31.3.23)					
Uhrzeit	Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag
8:00-8:15 Aufbau	Gruppe 5				Gruppe 6
8:15-10:15 freies Präparieren					
10:15-12:15 freies Präparieren					
12:15-12:30 Abbau					
12:30-13:00 Pause					
13:00 -13:15 Aufbau	Gruppe 6				Präptestat Gruppe 5,6
13:15-15:15 freies Präparieren					
15:15-17:15 freies Präparieren					
17:15-17:30 Abbau					
Woche 4 (3.4. - 7.4.23)					
Uhrzeit	Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag
8:00-8:15 Aufbau	Gruppe 7				Karfreitag
8:15-10:15 freies Präparieren					
10:15-12:15 freies Präparieren					
12:15-13:15 Pause					
13:15-15:15 freies Präparieren	Gruppe 7			Präptestat Gruppe 7	
15:15-17:15 freies Präparieren					
17:15-17:30 Abbau					

Abb. 27: Zeitplan der durchgeführten Studie mit jeweils 28 Übungsstunden pro Gruppe und Präparationstestat nach jeweiligem Übungsblock.

Im Folgenden soll auf die Anwendung des digitalen Präparationssimulators „Dente“ der Firma SIMtoCare (Vreeland, Niederlande) im Kontext dieser Studie eingegangen werden.

Anwendung des „Dente“-Simulators:

Zu Beginn der freien Übungszeit waren alle Teilnehmer/-innen der Gruppen 3 bis 7 zunächst aufgefordert, sich in der „SIMtoCare“-Lernsoftware über das beigelegte Tablet (Abb. 15) mit dem jeweils zugeteilten Benutzernamen und Passwort anzumelden und anschließend das Übungsmodul „Prosthodontics“ sowie Fall „04 - Crown“ auszuwählen. Daraufhin bestand die Möglichkeit, aus zahlreichen Winkelstücken, Diamanten sowie Spiegeln auszuwählen (Abb. 28).

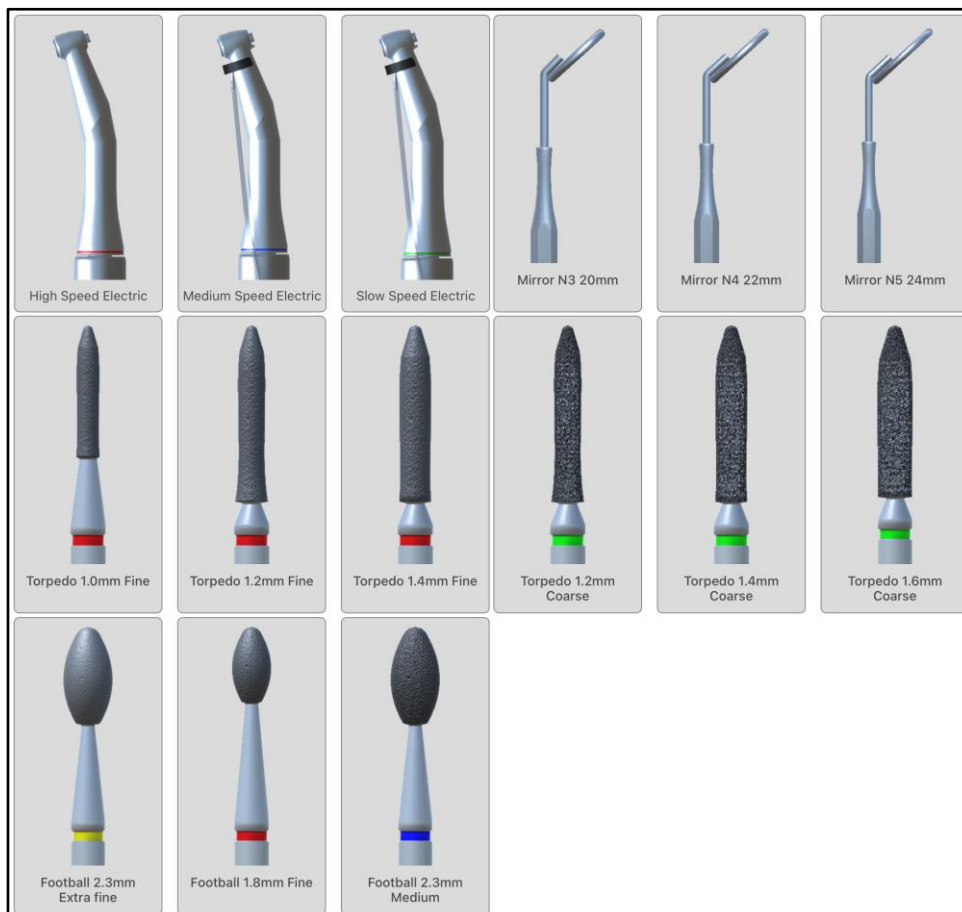


Abb. 28: Darstellung der zahlreichen Auswahlmöglichkeiten des/der Nutzers/Nutzerin bezüglich Winkelstück, Präparationsdiamant und Spiegel, wobei die Nutzung des Schnellaufwinkelstücks „High speed Electric“, der Diamanten „Torpedo 1,2 mm Fine“, „Torpedo 1,2 mm Course“ und „Football 1,8 mm Fine“ sowie des Spiegels „Mirror N4 22 mm“ empfohlen wurde.

Nach erfolgreicher Auswahl werden das Dentalmodell und die zu verwendenden zahnärztlichen Instrumente in Originalgröße virtuell auf dem 3D-Display dargestellt (Abb. 18 u. 19). Der/die Nutzer/-in kann anschließend mit dem virtuellen Dentalmodell interagieren und die notwendige Präparation durch die virtuelle Darstellung der Instrumente in Echtzeit vornehmen, indem er das physische Winkelstück und den Griff für den zahnärztlichen Spiegel am Gerät bewegt bzw. das Fußpedal betätigt. Unterstützend stehen hierbei zahlreiche Funktionen zur Verfügung: Die Höheneinstellung des Geräts, die anpassbare Vergrößerung des Dentalmodells, die Option zum Ein- und Ausblenden des Gegenkiefers, die Anpassung des Lichteinfallswinkels sowie eine Anzeige, die den Prozentsatz des entfernten Schmelzes und Dentins während der Präparation darstellt (Abb. 29). Abschließend kann der/die Nutzer/-in das Endergebnis durch Wischen nach rechts auf dem Tablet und Betätigen des "Submit"-Knopfes dem Lehrpersonal hochladen (Abb. 29).

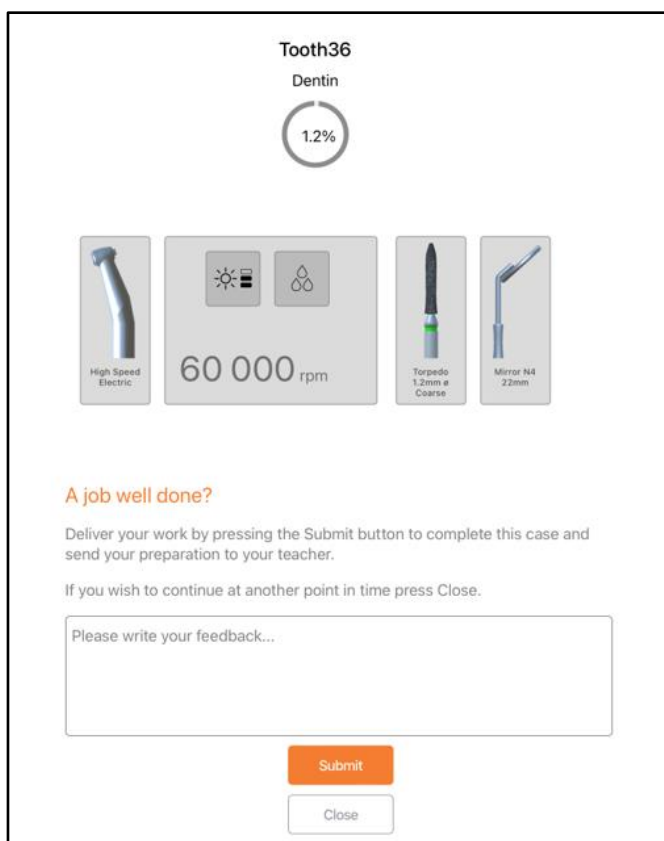


Abb. 29: Darstellung des ausgewählten empfohlenen Winkelstücks, des Diamanten und des Spiegels (oben). Besonderes Augenmerk soll auf die mittige Anzeige des bereits reduzierten Dentineanteils für den Zahn 36 gelegt werden. Unten ist der „Submit“ Button dargestellt mit dem das Endergebnis dem Lehrpersonal hochgeladen werden kann.

2.3.3 Leistungsüberprüfung

Am jeweils letzten Tag der Übungsblöcke der jeweiligen Gruppen erfolgte ein abschließendes Präparationstestat für alle Studierenden, unabhängig ihrer Übungsgruppe. Hierbei sollten alle Studierenden unter Prüfungsbedingungen den Zahn 36 unter Verwendung von Nachbarzähnen an dem Frasaco-Modell ANKA-4V (Frasaco, Tettnang, Deutschland) für eine Vollguss-Kronenversorgung innerhalb von zwei Stunden präparieren. Nach Ablauf der Zeit wurden die Zähne 35, 36 und 37 abgegeben, markiert und in der jeweiligen nummerierten Box aufbewahrt. Somit konnte eine anschließende anonymisierte Bewertung durch das Lehrpersonal gewährleistet werden.

2.4 Bewertung der Leistungsüberprüfung

Die Bewertung der präparierten Zähne erfolgte durch drei Oberärzte aus dem Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, die alle mindestens 15 Jahre Berufserfahrung in der studentischen Lehre aufweisen können. Dies sollte als Grundlage für eine möglichst objektive Bewertung der Teilnehmer dienen.

Hierbei handelte es sich zunächst um zwei Oberärzte der zahnärztlichen Prothetik, Propädeutik und Werkstoffwissenschaften, von denen einer im vorklinischen und der andere im klinischen Studienabschnitt lehrt. Beide bewerten regelmäßig Zahnpräparationen Studierender des jeweiligen Studienabschnittes. Der dritte Prüfer ist Oberarzt der Oralchirurgie, einem Fachgebiet, in dem es im Rahmen der zahnärztlichen Lehre nicht zu einer Bewertung von studentischen Präparationen kommt. Alle Prüfer nahmen eine unabhängige Bewertung der Präparationen vor. Kriterien der Benotung waren: Möglichkeit der Befestigung einer Krone auf dem Zahn, Substanzabtrag, Präparationswinkel, Anschrägung, Oberflächenrauheit, mögliche Unterschnitte, Präparationsgrenze und keine Schädigung der Nachbarzähne (Abb. 30).

<u>Bewertungsbogen</u>			
Dr. Stoilov ☐	Dr. Kraus ☐	Dr. Klünter ☐	
Teilnehmer Nr.:			
Übungsgruppe Frasaco ☐			
Übungsgruppe SIMtoCare ☐			
Bewertungskriterien:	Bewertung:		
	+/Ja	0	-/Nein
Kann man eine Krone befestigen?	☐		☐
Substanzabtrag	☐	☐	☐
Präparationswinkel	☐	☐	☐
Anschrägung	☐	☐	☐
Oberflächenrauheit	☐	☐	☐
Unterschnitte	☐	☐	☐
Präparationsgrenze	☐	☐	☐
Keine Schädigung der Nachbarzähne	☐		☐
Gesamtnote			

Abb. 30: Darstellung des Bewertungsbogens der jeweiligen Oberärzte für die Präparationen der Studienteilnehmer.

Hierbei hatten die Prüfer bei den meisten Bewertungskriterien die Möglichkeit aus 3 Bewertungen zu wählen:

„Gut“ = „+“

„Durchschnittlich“ = „0“

„Schlecht“ = „-“

Für die Bewertung „Keine Schädigung der Nachbarzähne“ wurden lediglich die Optionen „Ja“ oder „Nein“ zur Auswahl gestellt. Der Prüfer muss sich bei der Beantwortung dieser Frage eindeutig entscheiden. Selbst geringfügige Schäden an den benachbarten Zähnen werden als iatrogene Verletzungen betrachtet und sind eindeutig negativ zu vermerken. Jeder ausgewählten Bewertungsmöglichkeit ist anschließend ein fester Zahlenwert zugeteilt worden. Die Summe der Zahlenwerte kann folglich einer Gesamtnote („1“ = sehr gut bis „5“ = ungenügend) zugeordnet werden (Abb. 31).

Das übergeordnete und wichtigste Bewertungskriterium war die Frage, ob auf dem Zahn eine Krone befestigt werden kann. Für die Beantwortung dieses Kriteriums wurden ebenfalls nur die Optionen „Ja“ oder „Nein“ zur Auswahl gestellt. Um dieses Kriterium stärker gewichten zu können, wurden den Bewertungsmöglichkeiten andere Zahlenwerte zugeordnet. Dies hatte zur Folge, dass Teilnehmer/-innen, die dieses Kriterium nicht erfüllten, automatisch keine bessere Note als ausreichend = „4“ erlangen konnten.

Punktgewichtung	
Übergeordnetes Bewertungskriterium: Kann man eine Krone befestigen?	
Ja: 0 Punkte	
Nein: -21 Punkte	
+/Ja= 5 Punkte	
0 = 2,5 Punkte	
- /Nein = -1 Punkt	
Note	Punkte
1	28,5 - 35
2	21,5 - 28
3	14,5 - 21
4	7,5 - 14
5	≤ 7

Abb. 31: Darstellung der Punktgewichtung der einzelnen Bewertungsmöglichkeiten und Zusammenhang zwischen Gesamtpunktzahl und Endnote.

2.5 Evaluation der Übungssysteme durch die Teilnehmer/-innen

Nach Abschluss der Leistungsüberprüfung wurden alle Studienteilnehmer/-innen gebeten, einen Bewertungsbogen bezüglich ihrer Übungsmethode auszufüllen. Dabei war es einerseits wichtig zu erfahren, wie intuitiv oder kompliziert die Bedienung der jeweiligen Einheit war, und andererseits, ob sich die Studierenden durch die jeweiligen Übungsverfahren gut auf das abschließende Präparationstestat vorbereitet fühlten. Zusätzlich wurde erfragt, ob die Studierenden in Zukunft weiter Interesse daran hätten, das jeweilige Übungssystem zu nutzen. Darüber hinaus sollten sie das jeweilige Übungssystem benoten. Die Studierenden konnten für die Bewertung der Aussagen A

bis F aus den Noten „1“ bis „5“ wählen (Antwortskala vom Likert-Typ). Dabei entspricht „1“ = „stimme voll zu“, „2“ = „stimme zu“, „3“ = „stimme weder zu, noch lehne ich ab“, „4“ = „stimme nicht zu“ und „5“ = „stimme überhaupt nicht zu“. Für die Bewertung der Aussage G sind den Antwortmöglichkeiten „1“ bis „5“ die Gewichtung entsprechend des Schulnotensystems zugeordnet worden: „1“ = „sehr gut“, „2“ = „gut“, „3“ = „befriedigend“, „4“ = „ausreichend“ und „5“ = „mangelhaft“. Abschließend konnten potenzielle Verbesserungsvorschläge in Form eines Freitextes niedergeschrieben werden (Abb. 32).

Evaluationsbogen

Ich habe mit der:

Präparations-Einheit gearbeitet ☐

SIMtoCare-Einheit gearbeitet ☐

Bitte entsprechendes ankreuzen.

1= stimme voll zu	5= stimme überhaupt nicht zu	1	2	3	4	5
A : Die Bedienung der Präparations-/SIMtoCare-Einheit war intuitiv.		☐	☐	☐	☐	☐
B : Die Bedienung der Präparations-/SIMtoCare-Einheit war kompliziert.		☐	☐	☐	☐	☐
C : Das Üben an der Präparations-/SIMtoCare Einheit hat meine praktischen Fähigkeiten verbessert.		☐	☐	☐	☐	☐
D : Ich würde gerne im Phantomkurs weiter mit dem hier verwendeten System üben wollen.		☐	☐	☐	☐	☐
E : Das verwendete Übungssystem hat mich gut auf das Präparationsteststat vorbereitet.		☐	☐	☐	☐	☐
F : Mit dem Übungsverfahren sehe ich mich nach ausreichender Übung in der Lage einen Zahn am Patienten sicher präparieren zu können.		☐	☐	☐	☐	☐
G : Bitte bewerten Sie das jeweilige Übungsverfahren.		☐	☐	☐	☐	☐
H : Gibt es etwas was Sie verbessern würden?						

Abb. 32: Evaluationsbogen der Teilnehmer/-innen zur Bewertung ihrer Übungsmethode.

2.6 Statistische Auswertung

Für die statistische Auswertung wurden die Ergebnisse der zuvor genannten Bewertungs- und Evaluationsbögen zunächst in dem Tabellenkalkulationsprogramm „Microsoft Excel“ (Microsoft Corporation, Washington, USA) deskriptiv zusammengeführt. Anschließend erfolgte mithilfe der Statistiksoftware „PRISM 9“ (GraphPad Software, Inc., Boston, MA, USA) eine statistische Auswertung und Visualisierung der Ergebnisse in Box-Plot-Diagrammen. Zur Prüfung der Signifikanz wurde ein Mann-Whitney-U-Test mit einem angenommenen Signifikanzniveau $\alpha = 5 \%$ verwendet. Die Inter-Rater Reliabilität wurde ermittelt, indem der Friedman-Test und der Dunn's Multiple Comparison Test angewandt und das Fleiss' Kappa berechnet wurde.

3. Ergebnisse

3.1 Ergebnisse der praktischen Prüfungen

3.1.1 Benotung und Vergleich der Frasaco- und SIMtoCare-Teilnehmer/-innen

Die Bewertung der präparierten Zähne aus der Leistungsüberprüfung aller Teilnehmer/-innen erfolgte jeweils in einer verblindeten und unabhängigen Beurteilung durch drei Oberärzte (Vorklinik Prothetik, Klinik Prothetik und Oralchirurgie) des Zentrums für Zahn-, Mund-, und Kieferheilkunde der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn. Der vorklinische Prüfer der zahnärztlichen Prothetik benotete die Teilnehmer/-innen der Frasaco-Gruppe im Median (Zentralwert) mit der Note 2 und die der SIMtoCare-Gruppe mit der Note 4,5. Der klinische Prüfer der zahnärztlichen Prothetik vergab für die Frasaco-Gruppe im Median die Note 2 und für die SIMtoCare-Gruppe die Note 4. Der oralchirurgische Prüfer bewertete die Frasaco-Gruppe im Median mit einer 3 und die SIMtoCare-Gruppe mit einer 5 (Tab. 1 und Abb. 33 bis 35).

Tab. 1: Tabellarische Darstellung von absoluter Notenhäufigkeit, Median, Mittelwert und Standardabweichung (SD) der Leistungsüberprüfung durch die drei Prüfer (VK = Vorklinik Prothetik, KL = Klinik Prothetik, OC = Oralchirurgie) für die jeweiligen Teilnehmer/-innen der Frasaco- und SIMtoCare- (StC) Gruppe.

	Note 1	Note 2	Note 3	Note 4	Note 5	Median	Mittelwert ±SD
VK Frasaco	1	15	5	3	6	2	2,93 ± 1,26
VK StC	0	1	4	10	15	4,5	4,30 ± 0,84
KL Frasaco	10	12	2	4	2	2	2,20 ± 1,24
KL StC	4	3	5	7	11	4	3,60 ± 1,43
OC Frasaco	2	11	7	5	5	3	3 ± 1,23
OC StC	1	1	5	7	16	5	4,20 ± 1,06

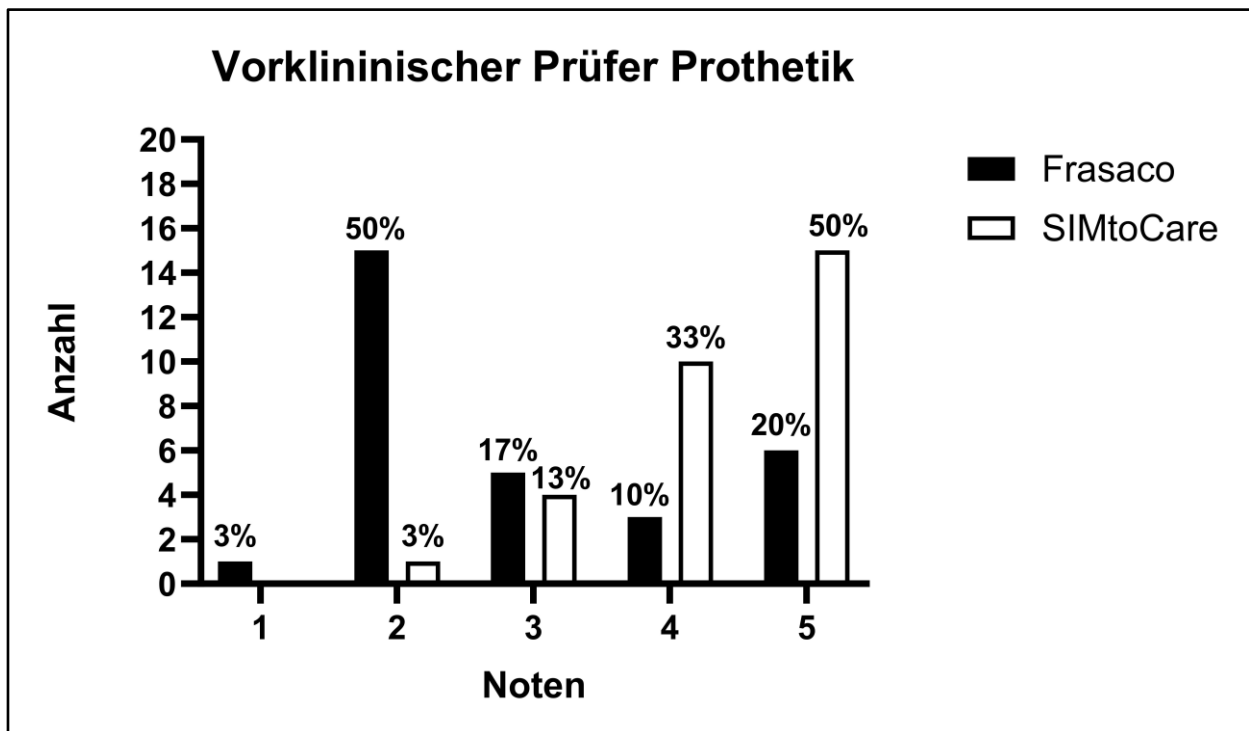


Abb. 33: Graphische Darstellung (Balkendiagramm) der vergebenen absoluten und relativen Notenhäufigkeit durch den vorklinischen Prüfer für die Teilnehmer/-innen der Frasaco- und SIMtoCare-Gruppe.

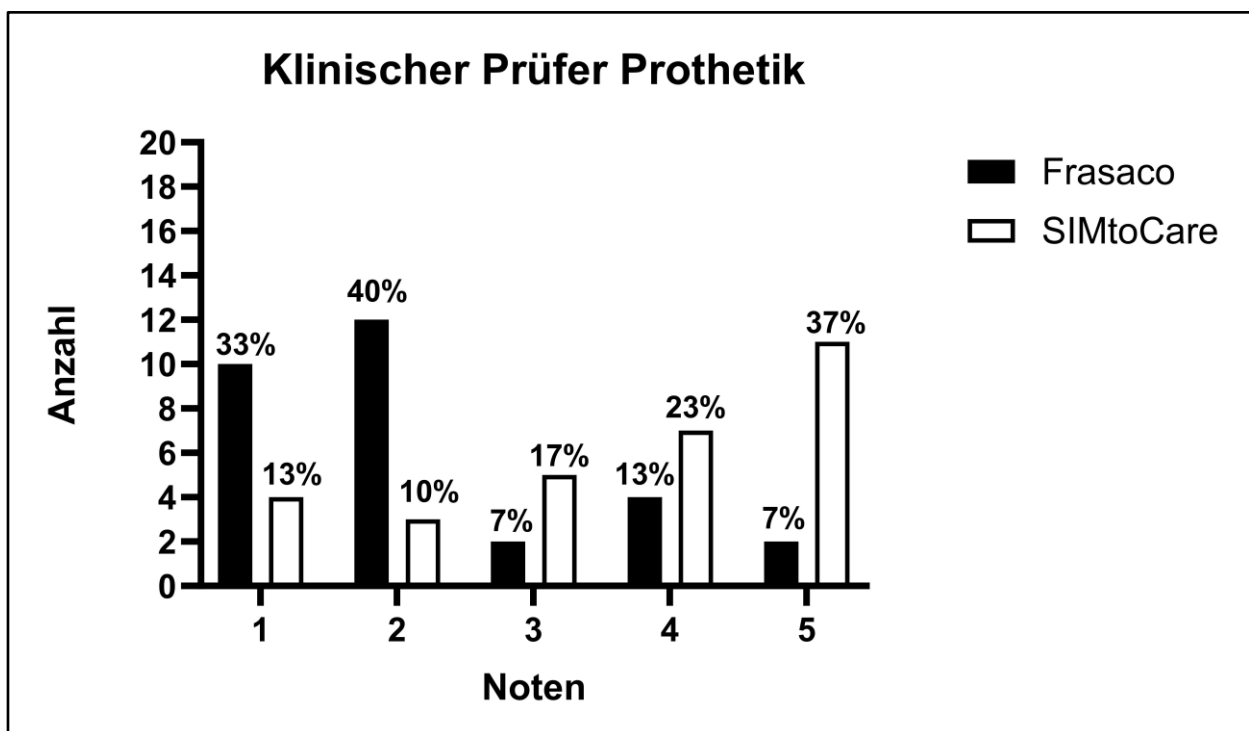


Abb. 34: Graphische Darstellung (Balkendiagramm) der vergebenen absoluten und relativen Notenhäufigkeit durch den klinischen Prüfer für die Teilnehmer/-innen der Frasaco- und SIMtoCare-Gruppe.

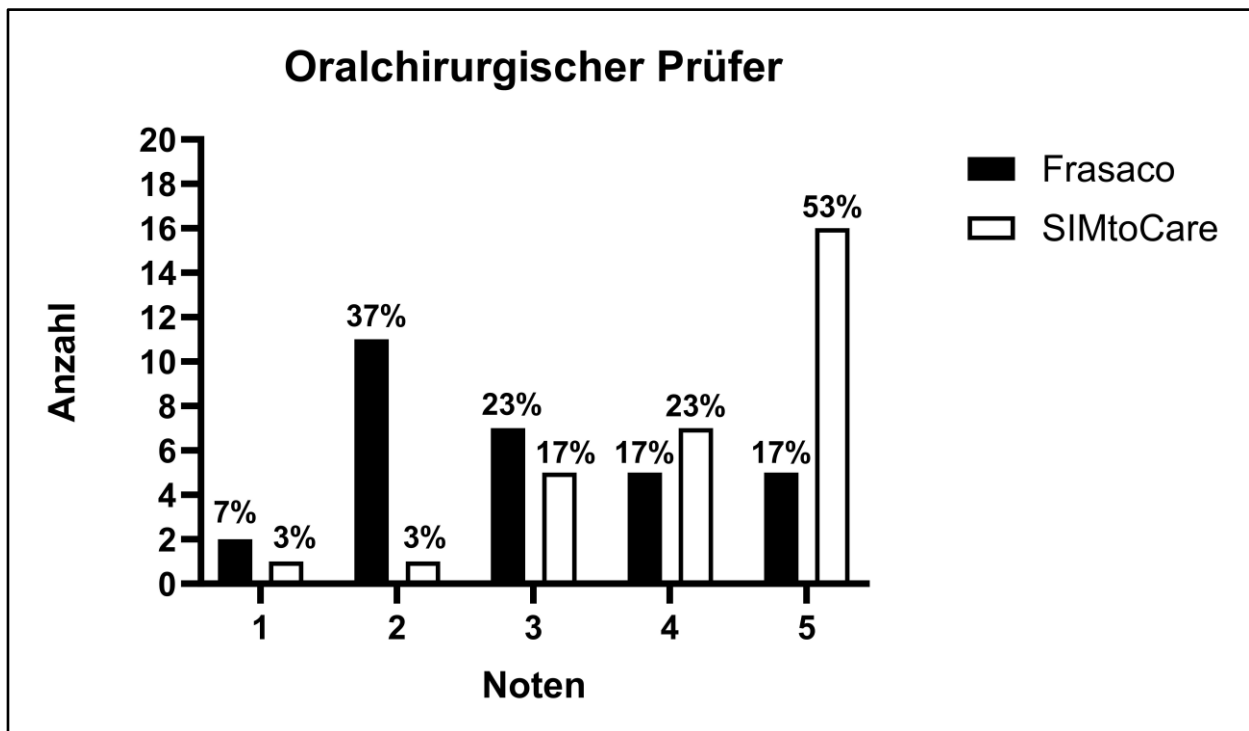


Abb. 35: Graphische Darstellung (Balkendiagramm) der vergebenen absoluten und relativen Notenhäufigkeit durch den oralchirurgischen Prüfer für die Teilnehmer/-innen der Frasco- und SIMtoCare-Gruppe.

Da bei der vorliegenden Notenverteilung nicht von einer Normalverteilung ausgegangen werden kann, wurde ein Mann-Whitney-U-Test durchgeführt, um zu überprüfen, ob sich die Noten der Teilnehmer/-innen der Frasco-Gruppe von den Noten der Teilnehmer/-innen der SIMtoCare-Gruppe für die jeweiligen Prüfer unterscheiden.

Bei diesem Test werden jedoch nicht die ursprünglichen Messwerte (hier: Noten) der jeweiligen Gruppen genutzt, sondern stattdessen ihre zugeordneten Ränge verwendet. Der Mann-Whitney-U-Test prüft, ob sich die Verteilung der Ränge der Noten in den beiden Gruppen (unabhängige Stichprobe) signifikant unterscheidet. Hierfür werden zunächst alle Noten, unabhängig ihrer Gruppenzugehörigkeit, vom kleinsten Wert aufsteigend aufgelistet, anschließend rangiert (kleinster Wert erhält Rang 1, etc.) und getrennt für jede Gruppe notiert. Im vorliegenden Fall gibt es somit die Ränge 1 bis 60. Falls es gleiche Noten (Bindungen) gibt, wird diesen der Durchschnitt der entsprechenden Rangzahlen zugewiesen. Schließlich werden für beide Gruppen die jeweiligen Rangsummen und mittleren Ränge gebildet (Tab. 2 bis 4). Mithilfe der Rangsummen der jeweiligen Gruppen kann anschließend die Teststatistik U berechnet werden (Tab. 2 bis 4). Folglich wird der berechnete U-Wert mit dem kritischen U-Wert

des gewählten Signifikanzniveaus ($\alpha = 5\%$) verglichen, der entweder aus Tabellen entnommen oder mithilfe von statistischer Software („PRISM 9“, GraphPad Software, Inc., Boston, MA, USA) automatisch berechnet werden kann. Falls der berechnete U-Wert größer ist als der kritische Wert, weist dies auf einen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen hin. Der p-Wert wird anschließend mit Hilfe dieser Ergebnisse berechnet (Tab. 2 bis 4). Die mittleren Ränge einer Gruppe können als eine Art zentrale Tendenz der Ränge in dieser Gruppe betrachtet werden. Sie werden daher zur Verdeutlichung der Verteilung der Ränge mit angegeben.

Bei einem angenommenen Signifikanzniveau $\alpha = 5\%$, wurde für den vorklinischen Prüfer eine signifikant bessere Benotung ($U = 187,5$; $p < 0,0001$) der Teilnehmer/-innen der Frasco-Gruppe ($M_{\text{Rang}} = 21,75$) im Vergleich zu den Teilnehmern/Teilnehmerinnen der SIMtoCare-Gruppe ($M_{\text{Rang}} = 39,25$) festgestellt. Durch die vorliegende Effektstärke ($r = 0,52$) ergibt sich zudem ein großer Effekt nach Cohen (Tab. 2, Abb. 36).

Tab. 2: Tabellarische Darstellung der Rangstatistik (Mittlerer Rang und Rangsumme) der Benotung der Frasco- (Fra) und SIMtoCare- (StC) Gruppe durch den vorklinischen Prüfer, zusammen mit dem berechneten U-Wert und dem zugehörigen p-Wert des Mann-Whitney-U-Tests zur Prüfung signifikanter Unterschiede in der Benotung der Teilnehmer/-innen beider Gruppen. Die Effektstärke (r) nach Cohen ist ebenfalls angegeben.

Rangstatistik				Mann-Whitney-U-Test		
	n	Mittlerer Rang (M_{Rang})	Rangsumme	U	exakter p-Wert	r
VK Fra	30	21,75	652,5	187,5	<0,0001	0,52
VK StC	30	39,25	1178			

Für den klinischen Prüfer wurde ebenfalls bei einem Signifikanzniveau $\alpha = 5\%$ eine signifikant bessere Benotung ($U = 216$; $p = 0,0003$) der Teilnehmer/-innen der Frasco-Gruppe ($M_{\text{Rang}} = 22,7$) im Vergleich zu den Teilnehmern/Teilnehmerinnen der SIMtoCare-Gruppe ($M_{\text{Rang}} = 38,3$) festgestellt. Es handelt sich hierbei um einen mittleren Effekt nach Cohen mit $r = 0,46$ (Tab. 3, Abb. 36).

Tab. 3: Tabellarische Darstellung der Rangstatistik (Mittlerer Rang und Rangsumme) der Benotung der Frasco- (Fra) und SIMtoCare- (StC) Gruppe durch den klinischen Prüfer zusammen mit dem berechneten U-Wert und dem zugehörigen p-Wert des Mann-Whitney-U-Tests zur Prüfung signifikanter Unterschiede in der Benotung der Teilnehmer/-innen beider Gruppen. Die Effektstärke (r) nach Cohen ist ebenfalls angegeben.

Rangstatistik				Mann-Whitney-U-Test		
	n	Mittlerer Rang (M_{Rang})	Rangsumme	U	exakter p-Wert	r
KL Fra	30	22,7	681	216	0,0003	0,46
KL StC	30	38,3	1149			

Letztlich konnte für den oralchirurgischen Prüfer bei einem Signifikanzniveau $\alpha = 5 \%$ ebenfalls eine signifikant bessere Benotung ($U = 211,5$; $p = 0,0002$) der Teilnehmer/-innen der Frasco-Gruppe ($M_{\text{Rang}} = 22,55$) im Vergleich zu den Teilnehmern/Teilnehmerinnen der SIMtoCare-Gruppe ($M_{\text{Rang}} = 38,45$) festgestellt werden. Es handelt sich zudem um einen mittleren Effekt nach Cohen mit $r = 0,47$ (Tab. 4, Abb. 36).

Tab. 4: Tabellarische Darstellung der Rangstatistik (Mittlerer Rang und Rangsumme) der Benotung der Frasco- (Fra) und SIMtoCare- (StC) Gruppe durch den oralchirurgischen Prüfer zusammen mit dem berechneten U-Wert und dem zugehörigen p-Wert des Mann-Whitney-U-Tests zur Prüfung signifikanter Unterschiede in der Benotung der Teilnehmer/-innen beider Gruppen. Die Effektstärke (r) nach Cohen ist ebenfalls angegeben.

Rangstatistik				Mann-Whitney-U-Test		
	n	Mittlerer Rang (M_{Rang})	Rangsumme	U	exakter p-Wert	r
OC Fra	30	22,55	676,5	211,5	0,0002	0,47
OC StC	30	38,45	1154			

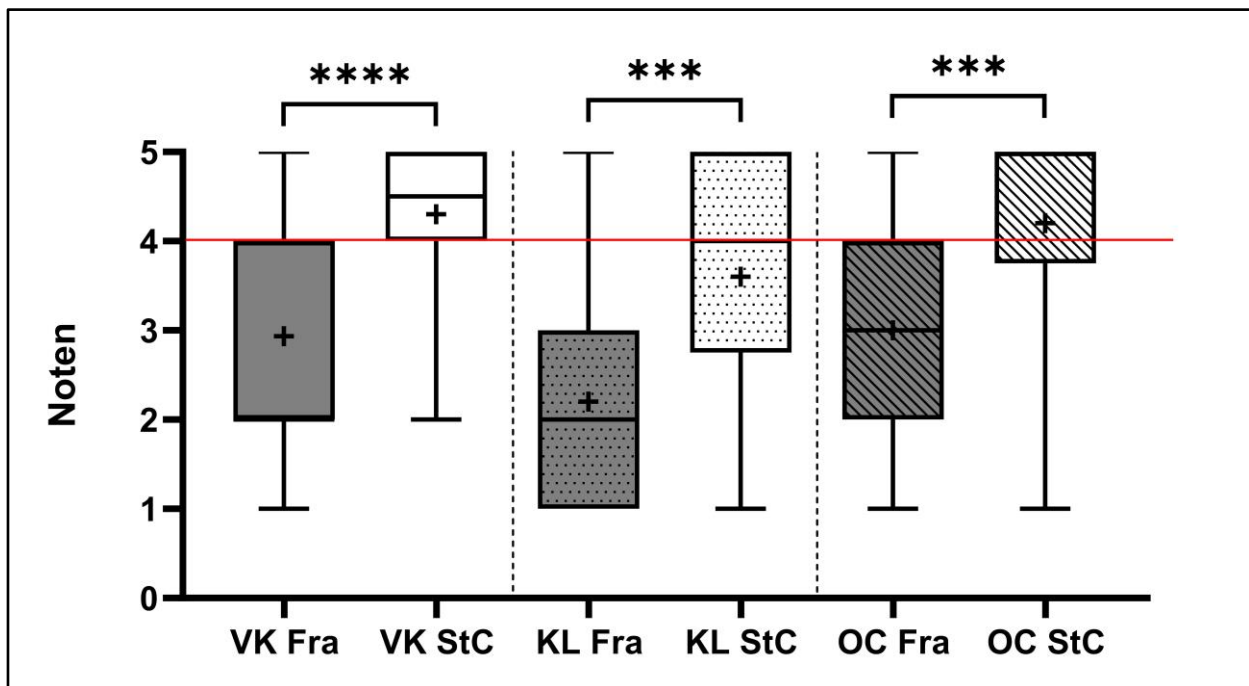


Abb. 36: Graphische Darstellung (Box-Plot-Diagramm) der Notenverteilungen der Leistungsüberprüfung durch die drei Prüfer (VK= Vorklinik Prothetik, KL= Klinik Prothetik, OC= Oralchirurgie) für die Teilnehmer/-innen der Frasaco- (Fra) und SIMtoCare- (StC) Gruppe. Das „+“ Symbol markiert für jede Gruppe und Prüfer den arithmetischen Mittelwert der Notenverteilung. Innerhalb des "Box"-Bereichs, der die mittleren 50 % aller Werte des Datensatzes enthält, wird der Medianwert für den jeweiligen Datensatz durch eine horizontale schwarze Linie dargestellt. Die horizontale rote Linie markiert wiederum die Bestehensgrenze. Der jeweilige Minimal- und Maximalwert wird durch den unteren und oberen „Whisker“ abgebildet. Die statistisch signifikanten Unterschiede der jeweiligen Gruppen werden in dieser Abbildung durch Asterisken „*“ visuell dargestellt. Hierbei zeigt die Anzahl der Asterisken an, welches Signifikanzniveau der p-Wert unterschreitet: $p < 0,050$ („*“), $p < 0,010$ („**“), $p < 0,001$ („***“) sowie $p < 0,0001$ („****“).

3.1.2 Inter-Rater Reliabilitätsanalyse: Vergleich der Prüferbenotungen

Jeder Prüfer bewertete insgesamt verblindet und unabhängig 60 Präparationen (Teilnehmer/-innen Frasaco-Gruppe $n = 30$, Teilnehmer/-innen SIMtoCare-Gruppe $n = 30$). Hierbei vergab der vorklinische Prüfer aus dem Fachbereich der zahnärztlichen Prothetik im Median die Note 4 und der klinische Prüfer im Median die Note 3. Der oralchirurgische Prüfer vergab im Median die Note 4 (Tab. 5, Abb. 37).

Tab. 5: Tabellarische Darstellung von absoluter Notenhäufigkeit, Median, Mittelwert und Standardabweichung (SD) der Leistungsüberprüfung durch die drei Prüfer für alle Teilnehmer/-innen.

	Note 1	Note 2	Note 3	Note 4	Note 5	Median	Mittelwert $\pm$ SD
Vorklinik	1	16	9	13	21	4	$3,62 \pm 1,26$
Klinik	14	15	7	11	13	3	$2,90 \pm 1,50$
Oralchirurgie	3	12	12	12	21	4	$3,60 \pm 1,29$

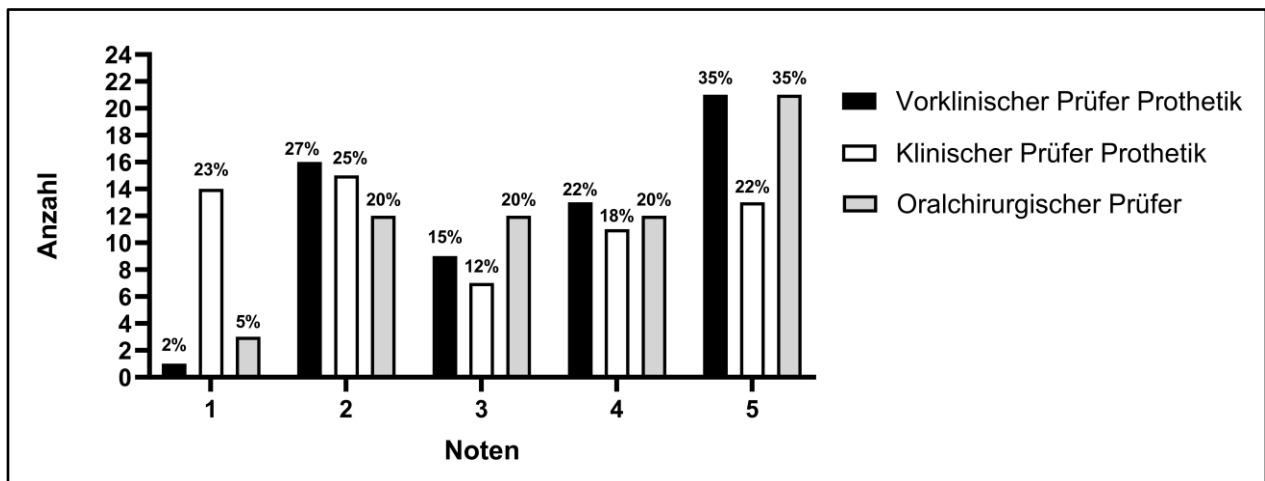


Abb. 37: Graphische Darstellung (Balkendiagramm) der vergebenen absoluten und relativen Notenhäufigkeit durch die drei Prüfer für alle Teilnehmer/-innen.

Da bei der vorliegenden Notenverteilung nicht von einer Normalverteilung ausgegangen werden kann, wurde zunächst ein Friedman-Test durchgeführt, um zu überprüfen, ob sich die jeweiligen Prüfer in ihrer Notenvergabe voneinander unterscheiden.

Bei diesem Test werden, wie bei dem zuvor beschriebenen Mann-Whitney-U-Test, nicht die ursprünglichen Messwerte (hier: Noten) der jeweiligen Gruppen genutzt, sondern stattdessen ihre zugeordneten Ränge verwendet. Der Friedman-Test prüft, ob sich die Verteilung der Ränge der Noten der jeweiligen Prüfer (abhängige Stichprobe) signifikant

voneinander unterscheiden. Anders als beim oben beschriebenen Mann-Whitney-U-Test werden die Noten eines jeden Teilnehmers unabhängig von den anderen Teilnehmern aufsteigend rangiert. Im vorliegenden Fall sind dies die Ränge 1 bis 3. Falls es gleiche Noten (Bindungen) gibt, wird diesen der Durchschnitt der entsprechenden Rangzahlen zugewiesen. Schließlich können für jeden Prüfer die jeweiligen Rangsummen und mittleren Ränge gebildet werden. Mithilfe der jeweiligen Rangsummen kann anschließend die von Friedman entwickelte Prüfgröße berechnet werden, wobei eine nachfolgende Korrektur für Bindungen erforderlich ist (Tab. 6). Folglich wird diese korrigierte Prüfgröße mit dem kritischen Wert entsprechend des gewählten Signifikanzniveaus ($\alpha = 5\%$) aus der Chi-Quadrat-Verteilungstabelle verglichen. Falls die berechnete korrigierte Prüfgröße größer ist als der kritische Wert, weist dies auf einen signifikanten Unterschied zwischen den Prüfern hin. Der p-Wert wird anschließend mit Hilfe dieser Ergebnisse berechnet (Tab. 6). Die mittleren Ränge eines Prüfers können als eine Art zentrale Tendenz der Ränge in dieser Gruppe betrachtet werden und werden daher zur Verdeutlichung der Verteilung der Ränge mit angegeben.

Bei einem angenommenen Signifikanzniveau $\alpha = 5\%$ konnte ein signifikanter Unterschied (Prüfgröße Friedman: 32,27; $p < 0,0001$) in der Notenvergabe der drei Prüfer (Vorklinischer Prüfer Prothetik $M_{\text{Rang}} = 2,25$; Klinischer Prüfer Prothetik $M_{\text{Rang}} = 1,54$; Oralchirurgischer Prüfer $M_{\text{Rang}} = 2,21$) festgestellt werden (Tab. 6). Das hierzu zusätzlich berechnete Fleiss' Kappa, ein Maß für die Inter-Rater-Übereinstimmung, zeigt mit $\kappa = 0,3$ nach Altman ebenfalls nur eine geringe Übereinstimmung (Tab. 6).

Tab. 6: Tabellarische Darstellung der Rangstatistik (Mittlerer Rang und Rangsumme) der Benotungen der drei Prüfer, zusammen mit der berechneten auf Bindungen korrigierten Prüfgröße und dem zugehörigen p-Wert des Friedman-Tests zur Prüfung signifikanter Unterschiede in der Benotung der Teilnehmer/-innen aller Gruppen. Das Fleiss' Kappa (κ) ist ebenfalls angegeben.

Rangstatistik				Friedman-Test		Fleiss' Kappa
	n	Mittlerer Rang (M_{Rang})	Rangsumme	Prüfgröße Friedman (korrigiert)	Asymptotischer p-Wert	κ
Vorklinik	60	2,25	135	32,27	0,0002	0,3
Klinik	60	1,54	92,5			
Oralchirurgie	60	2,21	132,5			

Die nachfolgend durchgeführte Post-hoc-Analyse (Dunn's Multiple Comparison Test) erlaubte eine gezielte Untersuchung auf statistisch signifikante Unterschiede in der Bewertung zweier Prüfer. Hierfür werden, wie bei dem zuvor beschriebenen Friedman-Test, die ursprünglichen Messwerte (Noten) sortiert, gerankt und die jeweiligen Rangsummen sowie mittleren Ränge der jeweiligen Prüfer berechnet (Tab. 6). Anschließend werden Paarvergleiche durchgeführt, bei denen zunächst die Differenz der mittleren Ränge der jeweils zu vergleichenden Gruppen als Teststatistik ermittelt werden (Tab. 7). Auf Grundlage dieser Teststatistik kann anschließend der z-Wert berechnet werden (Tab. 7). Dieser z-Wert wird abschließend mit dem kritischen Wert entsprechend des gewählten Signifikanzniveaus ($\alpha = 5\%$) aus der Standardnormalverteilungstabelle (z-Tabelle) verglichen. Falls der berechnete z-Wert größer ist als der kritische Wert, weist dies auf einen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen hin. Der p-Wert wird anschließend mit Hilfe dieser Ergebnisse berechnet und unter Berücksichtigung der Bonferroni-Korrektur für multiples Testen angepasst (Tab. 7).

Bei einem angenommenen Signifikanzniveau $\alpha = 5\%$ konnte eine signifikant bessere Benotung der Teilnehmer/-innen ($z = 3,88$; $p = 0,0003$ / $z = -3,65$; $p = 0,0009$) durch den klinischen Prüfer Prothetik ($M_{\text{Rang}} = 1,54$) im Vergleich zu dem vorklinischen Prüfer Prothetik ($M_{\text{Rang}} = 2,25$) und oralchirurgischen Prüfer ($M_{\text{Rang}} = 2,21$) festgestellt werden (Tab. 6 u. 7, Abb. 38). Hierbei handelte es sich jeweils um einen mittleren Effekt nach Cohen mit $r = 0,35$ sowie $r = 0,33$ (Tab. 7). Die Notenvergabe zwischen dem vor-

klinischen Prüfer Prothetik und dem oralchirurgischen Prüfer ($z = 0,23$; $p > 0,9999$) wies hingegen keine statistisch signifikanten Unterschiede auf (Tab. 7, Abb. 38).

Tab. 7: Tabellarische Darstellung des beim Dunn's Multiple Comparison Test errechneten Teststatistik und z-Wert für die Prüfung auf signifikante Unterschiede in der Benotung zwischen den drei jeweiligen Prüfern. Zusätzlich wurden die unkorrigierten p-Werte und die korrigierten p-Werte nach Bonferroni sowie die vorliegende Effektstärke (r) nach Cohen bei signifikanten Unterschieden angegeben.

Dunn's Multiple Comparison Test					
	Teststatistik	z-Wert	asymptotischer p-Wert (unkorrigiert)	Asymptotischer p-Wert (korrigiert)	r
VK vs. KL	0,71	3,88	0,0001	0,0003	0,35
VK vs. OC	0,04	0,23	0,8195	>0,9999	
KL vs. OC	-0,67	-3,65	0,0003	0,0009	0,33

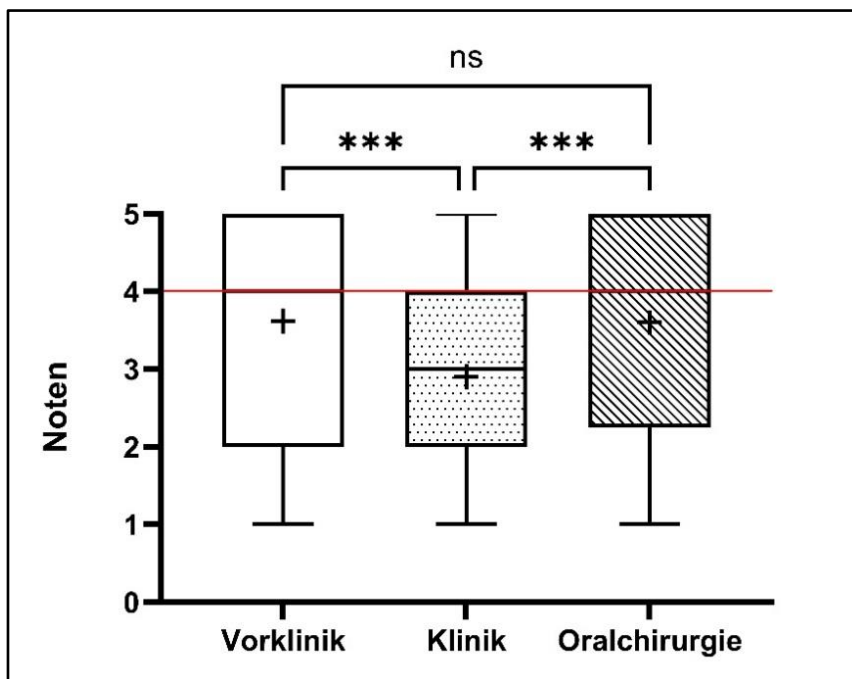


Abb. 38: Graphische Darstellung (Box-Plot-Diagramm) der Notenverteilungen der Leistungsüberprüfung durch die drei Prüfer. Das „+“ Symbol markiert für jeden Prüfer den arithmetischen Mittelwert der Notenverteilung. Die horizontale rote/schwarze Linie markieren wiederum die Bestehensgrenze/den Medianwert. Die statistisch signifikanten Unterschiede der jeweiligen Gruppen werden in dieser Abbildung durch Asterisken „*“ visuell dargestellt. Hierbei zeigt die Anzahl der Asterisken an, welches Signifikanzniveau der p-Wert unterschreitet: $p < 0,050$ („*“), $p < 0,010$ („**“), $p < 0,001$ („***“) sowie $p < 0,0001$ („****“). Die Bezeichnung „ns“ beschreibt nicht signifikante Unterschiede.

3.2 Auswertung der Evaluationsbögen

3.2.1 Aussagen A bis G

Alle Studienteilnehmer/-innen wurden gebeten, einen Evaluationsbogen bezüglich ihrer Übungsmethode auszufüllen (Abb. 32). Die hierbei für die jeweilige Aussage und zu bewertende Gruppe resultierende Notenhäufigkeit, Median, Mittelwert und Standardabweichung kann Tabelle 8 entnommen werden. Da bei den vorliegenden Notenverteilungen nicht von einer Normalverteilung ausgegangen werden kann, wurde jeweils in den folgenden Abschnitten ein Mann-Whitney-U-Test durchgeführt, um zu überprüfen, ob sich die Noten der Teilnehmer/-innen der Frasco-Gruppe von den Noten der Teilnehmer/-innen der SIMtoCare-Gruppe für die jeweilige Aussage unterscheiden. Für eine detaillierte Erklärung des Mann-Whitney-U-Test siehe Kapitel 3.1.1. In den folgenden Seiten werden alle Aussagen im Detail dargestellt und ausgewertet.

Tab. 8: Tabellarische Darstellung von Notenhäufigkeit, Median, Mittelwert und Standardabweichung (SD) für die jeweilige Aussage A bis G des Evaluationsbogens durch die Teilnehmer/-innen der Frasco- (Fra) und SIMtoCare- (StC) Gruppe.

	Note 1	Note 2	Note 3	Note 4	Note 5	Median	Mittelwert ±SD
Aussage A: Fra	8	11	11	0	0	2	2,10 ± 0,80
Aussage A: StC	1	11	18	0	0	3	2,57 ± 0,57
Aussage B: Fra	0	0	6	10	14	4	4,27 ± 0,78
Aussage B: StC	0	1	13	9	7	4	3,73 ± 0,87
Aussage C: Fra	26	4	0	0	0	1	1,13 ± 0,35
Aussage C: StC	2	16	8	4	0	2	2,47 ± 0,82
Aussage D: Fra	24	5	1	0	0	1	1,23 ± 0,50
Aussage D: StC	1	3	9	7	10	4	3,73 ± 1,14
Aussage E: Fra	20	9	1	0	0	1	1,37 ± 0,56
Aussage E: StC	0	10	6	12	2	3	3,20 ± 1,00
Aussage F: Fra	7	14	4	4	1	2	2,27 ± 1,08
Aussage F: StC	0	1	6	4	19	5	4,37 ± 0,93
Aussage G: Fra	10	19	1	0	0	2	1,70 ± 0,54
Aussage G: StC	0	8	18	4	0	3	2,87 ± 0,63

Aussage A: „Die Bedienung der Präparations-/SIMtoCare-Einheit war intuitiv.“

Die Teilnehmer/-innen der Frasaco-Gruppe bewerteten diese Aussage im Median mit der Note 2 „stimme zu“ und die Teilnehmer/-innen der SIMtoCare-Gruppe mit der Note 3 „stimme weder zu, noch lehne ich ab“ (Tab. 8, Abb. 39).

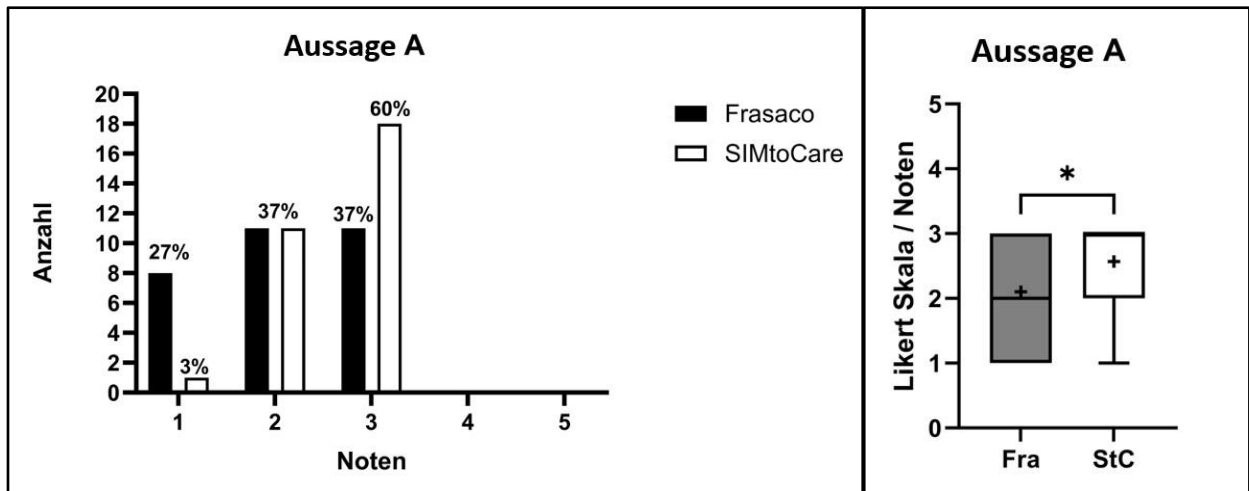


Abb. 39: Graphische Darstellung (Balkendiagramm links; Box-Plot-Diagramm rechts) der für Aussage A vergebenen absoluten und relativen Notenhäufigkeit durch die Teilnehmer/-innen der Frasaco- und SIMtoCare-Gruppe.

Bei einem angenommenen Signifikanzniveau $\alpha = 5\%$ wurde für Aussage A eine signifikant bessere Bewertung ($U = 306,5$; $p = 0,0209$) durch die Teilnehmer/-innen der Frasaco-Gruppe ($M_{\text{Rang}} = 25,72$) im Vergleich zu den Teilnehmern/Teilnehmerinnen der SIMtoCare-Gruppe ($M_{\text{Rang}} = 35,28$) festgestellt. Durch die vorliegende Effektstärke ($r = 0,3$) ergibt sich zudem ein mittlerer Effekt nach Cohen (Tab. 9).

Tab. 9: Tabellarische Darstellung der Rangstatistik (Mittlerer Rang und Rangsumme) der Bewertung von Aussage A durch die Frasaco- (Fra) und SIMtoCare- (StC) Gruppe, zusammen mit dem berechneten U-Wert und p-Wert des Mann-Whitney-U-Tests zur Prüfung auf signifikante Unterschiede in der Notenvergabe der Teilnehmer/-innen beider Gruppen. Die Effektstärke (r) nach Cohen ist ebenfalls angegeben.

Rangstatistik				Mann-Whitney-U-Test		
	n	Mittlerer Rang (M_{Rang})	Rangsumme	U	exakter p-Wert	r
Aussage A Fra	30	25,72	771,5	306,5	0,0209	0,3
Aussage A StC	30	35,28	1059			

Aussage B: „Die Bedienung der Präparations-/SIMtoCare-Einheit war kompliziert.“

Die Teilnehmer/-innen der Frasaco-Gruppe sowie der SIMtoCare-Gruppe bewerteten diese Aussage im Median jeweils mit der Note 4 „stimme nicht zu“ (Tab. 8, Abb. 40).

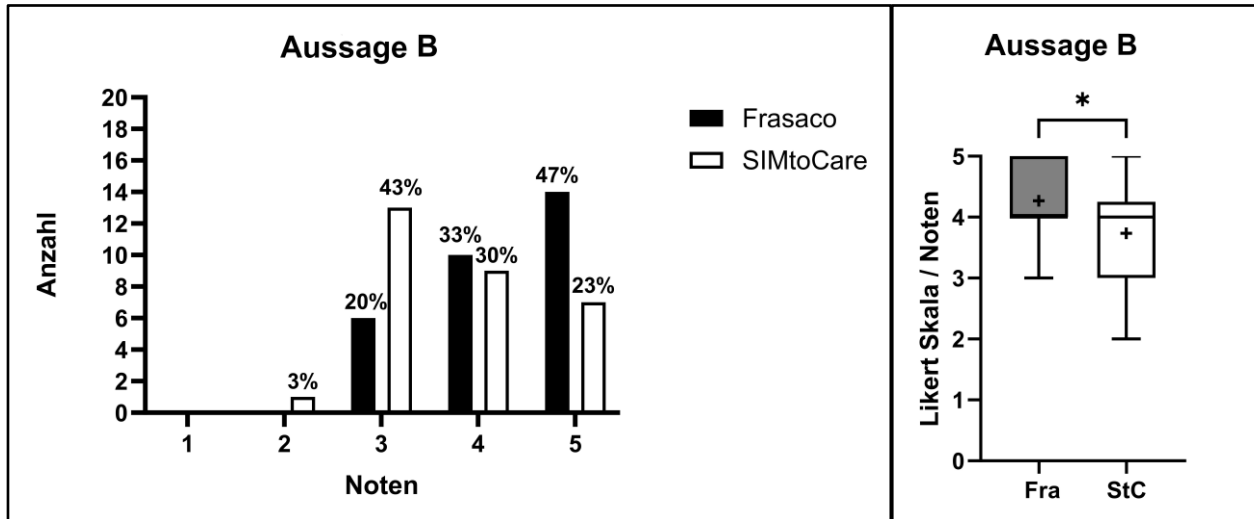


Abb. 40: Graphische Darstellung (Balkendiagramm links; Blox-Plot-Diagramm rechts) der für Aussage B vergebenen absoluten und relativen Notenhäufigkeit durch die Teilnehmer/-innen der Frasaco- und SIMtoCare-Gruppe.

Bei einem angenommenen Signifikanzniveau $\alpha = 5 \%$, wurde für Aussage B eine signifikant bessere Benotung ($U = 299$; $p = 0,0214$) durch die Teilnehmer/-innen der Frasaco-Gruppe ($M_{\text{Rang}} = 35,53$) im Vergleich zu den Teilnehmern/Teilnehmerinnen der SIMtoCare-Gruppe ($M_{\text{Rang}} = 25,47$) festgestellt. Durch die vorliegende Effektstärke ($r = 0,3$) ergibt sich zudem ein mittlerer Effekt nach Cohen (Tab. 10).

Tab. 10: Tabellarische Darstellung der Rangstatistik (Mittlerer Rang und Rangsumme) der Bewertung von Aussage B durch die Frasaco- (Fra) und SIMtoCare- (StC) Gruppe, zusammen mit dem berechneten U-Wert und p-Wert des Mann-Whitney-U-Tests zur Prüfung auf signifikante Unterschiede in der Notenvergabe der Teilnehmer/-innen beider Gruppen. Die Effektstärke (r) nach Cohen ist ebenfalls angegeben.

Rangstatistik				Mann-Whitney-U-Test		
	n	Mittlerer Rang (M_{Rang})	Rangsumme	U	exakter p-Wert	r
Aussage B Fra	30	35,53	1066	299	0,0214	0,3
Aussage B StC	30	25,47	764			

Aussage C: „Das Üben an der Präparations-/SIMtoCare-Einheit hat meine praktischen Fähigkeiten verbessert.“

Die Teilnehmer/-innen der Frasaco-Gruppe bewerteten diese Aussage im Median mit der Note 1 „stimme voll zu“ und die Teilnehmer/-innen der SIMtoCare-Gruppe mit der Note 2 „stimme zu“ (Tab. 8, Abb. 41).

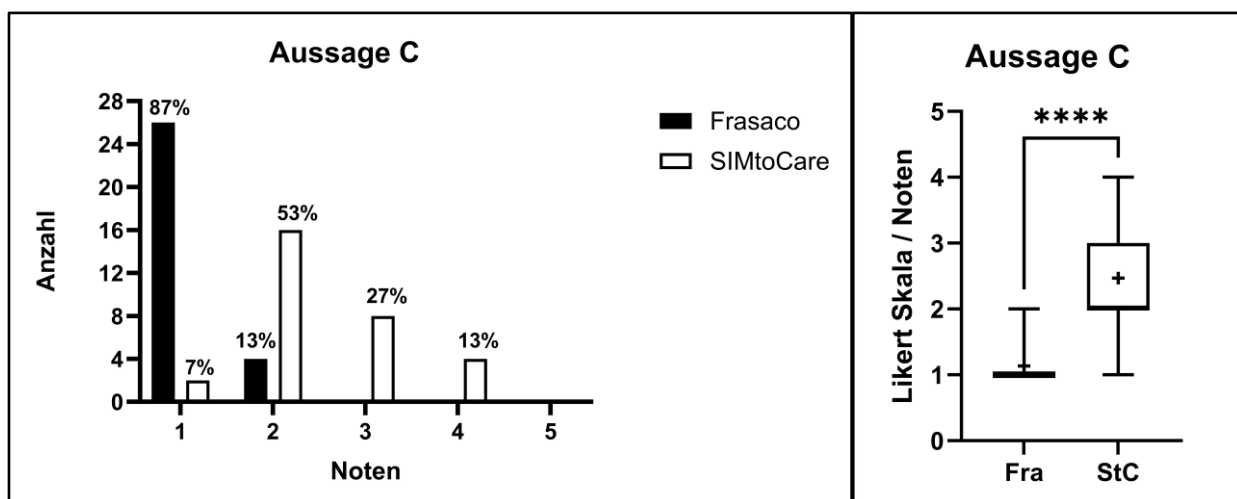


Abb. 41: Graphische Darstellung (Balkendiagramm links; Box-Plot-Diagramm rechts) der für Aussage C vergebenen absoluten und relativen Notenhäufigkeit durch die Teilnehmer/-innen der Frasaco- und SIMtoCare-Gruppe.

Bei einem angenommenen Signifikanzniveau $\alpha = 5 \%$, wurde für Aussage C eine signifikant bessere Benotung ($U = 66$; $p < 0,0001$) durch die Teilnehmer/-innen der Frasaco-Gruppe ($M_{\text{Rang}} = 17,7$) im Vergleich zu den Teilnehmern/Teilnehmerinnen der SIMtoCare-Gruppe ($M_{\text{Rang}} = 43,3$) festgestellt. Durch die vorliegende Effektstärke ($r = 0,79$) ergibt sich zudem ein großer Effekt nach Cohen (Tab. 11).

Tab. 11: Tabellarische Darstellung der Rangstatistik (Mittlerer Rang und Rangsumme) der Bewertung von Aussage C durch die Frasaco- (Fra) und SIMtoCare- (StC) Gruppe, zusammen mit dem berechneten U-Wert und p-Wert des Mann-Whitney-U-Tests zur Prüfung auf signifikante Unterschiede in der Notenvergabe der Teilnehmer/-innen beider Gruppen. Die Effektstärke (r) nach Cohen ist ebenfalls angegeben.

Rangstatistik				Mann-Whitney-U-Test		
	n	Mittlerer Rang (M_{Rang})	Rangsumme	U	exakter p-Wert	r
Aussage C Fra	30	17,7	531	66	<0,0001	0,79
Aussage C StC	30	43,3	1299			

Aussage D: „Ich würde gerne im Phantomkurs weiter mit dem hier verwendeten System üben wollen.“

Die Teilnehmer/-innen der Frasaco-Gruppe bewerteten diese Aussage im Median mit der Note 1 „stimme voll zu“ und die Teilnehmer/-innen der SIMtoCare-Gruppe mit der Note 4 „stimme nicht zu“ (Tab. 8, Abb. 42).

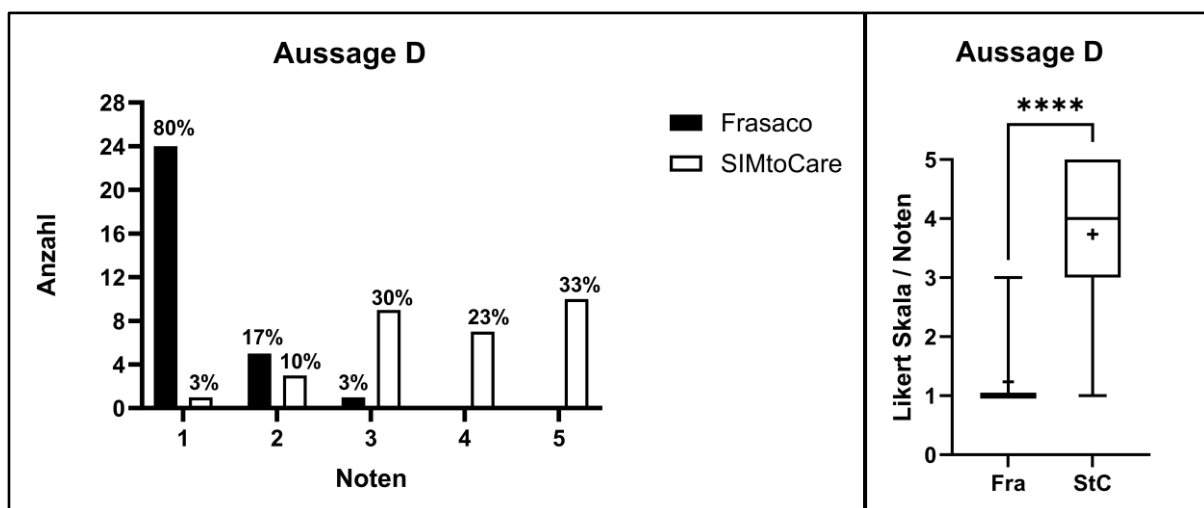


Abb. 42: Graphische Darstellung (Balkendiagramm links; Box-Plot-Diagramm rechts) der für Aussage D vergebenen absoluten und relativen Notenhäufigkeit durch die Teilnehmer/-innen der Frasaco- und SIMtoCare-Gruppe.

Bei einem angenommenen Signifikanzniveau $\alpha = 5\%$, wurde für Aussage D eine signifikant bessere Benotung ($U = 33$; $p < 0,0001$) durch die Teilnehmer/-innen der Frasaco-Gruppe ($M_{\text{Rang}} = 16,6$) im Vergleich zu den Teilnehmern/Teilnehmerinnen der SIMtoCare-Gruppe ($M_{\text{Rang}} = 44,4$) festgestellt. Durch die vorliegende Effektstärke ($r = 0,83$) ergibt sich zudem ein großer Effekt nach Cohen (Tab. 12).

Tab. 12: Tabellarische Darstellung der Rangstatistik (Mittlerer Rang und Rangsumme) der Bewertung von Aussage D durch die Frasaco- (Fra) und SIMtoCare- (StC) Gruppe, zusammen mit dem berechneten U-Wert und p-Wert des Mann-Whitney-U-Tests zur Prüfung auf signifikante Unterschiede in der Notenvergabe der Teilnehmer/-innen beider Gruppen. Die Effektstärke (r) nach Cohen ist ebenfalls angegeben.

Rangstatistik				Mann-Whitney-U-Test		
	n	Mittlerer Rang (M_{Rang})	Rangsumme	U	exakter p-Wert	r
Aussage D Fra	30	16,6	498	33	<0,0001	0,83
Aussage D StC	30	44,4	1332			

Aussage E: „Das verwendete Übungssystem hat mich gut auf das Präparationstestat vorbereitet.“

Die Teilnehmer/-innen der Frasaco-Gruppe bewerteten diese Aussage im Median mit der Note 1 „stimme voll zu“ und die Teilnehmer/-innen der SIMtoCare-Gruppe mit der Note 3 „stimme weder zu noch lehne ich ab“ (Tab. 8, Abb. 43).

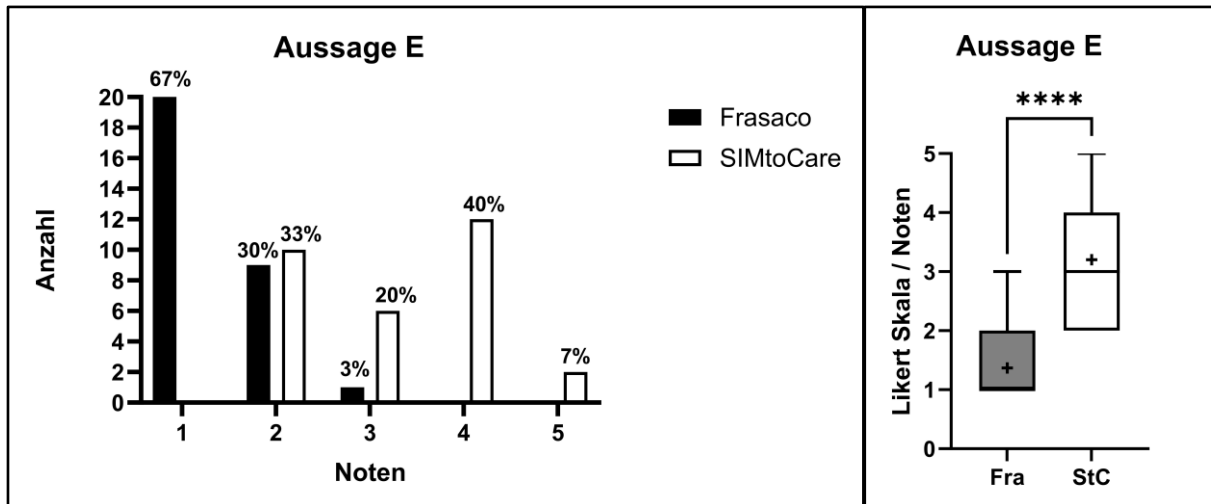


Abb. 43: Graphische Darstellung (Balkendiagramm links; Box-Plot-Diagramm rechts) der für Aussage E vergebenen absoluten und relativen Notenhäufigkeit durch die Teilnehmer/-innen der Frasaco- und SIMtoCare-Gruppe.

Bei einem angenommenen Signifikanzniveau $\alpha = 5 \%$, wurde für Aussage E eine signifikant bessere Benotung ($U = 58$; $p < 0,0001$) durch die Teilnehmer/-innen der Frasaco-Gruppe ($M_{\text{Rang}} = 17,43$) im Vergleich zu den Teilnehmern/Teilnehmerinnen der SIMtoCare-Gruppe ($M_{\text{Rang}} = 43,57$) festgestellt. Durch die vorliegende Effektstärke ($r = 0,78$) ergibt sich zudem ein großer Effekt nach Cohen (Tab. 13).

Tab. 13: Tabellarische Darstellung der Rangstatistik (Mittlerer Rang und Rangsumme) der Bewertung von Aussage E durch die Frasaco- (Fra) und SIMtoCare- (StC) Gruppe, zusammen mit dem berechneten U-Wert und p-Wert des Mann-Whitney-U-Tests zur Prüfung auf signifikante Unterschiede in der Notenvergabe der Teilnehmer/-innen beider Gruppen. Die Effektstärke (r) nach Cohen ist ebenfalls angegeben.

Rangstatistik				Mann-Whitney-U-Test		
	n	Mittlerer Rang (M_{Rang})	Rangsumme	U	exakter p-Wert	r
Aussage E Fra	30	17,43	523	58	<0,0001	0,78
Aussage E StC	30	43,57	1307			

Aussage F: „Mit dem Übungsverfahren sehe ich mich nach ausreichender Übung in der Lage, einen Zahn am Patienten sicher präparieren zu können.“

Die Teilnehmer/-innen der Frasaco-Gruppe bewerteten diese Aussage im Median mit der Note 2 „stimme zu“ und die Teilnehmer/-innen der SIMtoCare-Gruppe mit der Note 5 „stimme überhaupt nicht zu“ (Tab. 8, Abb. 44).

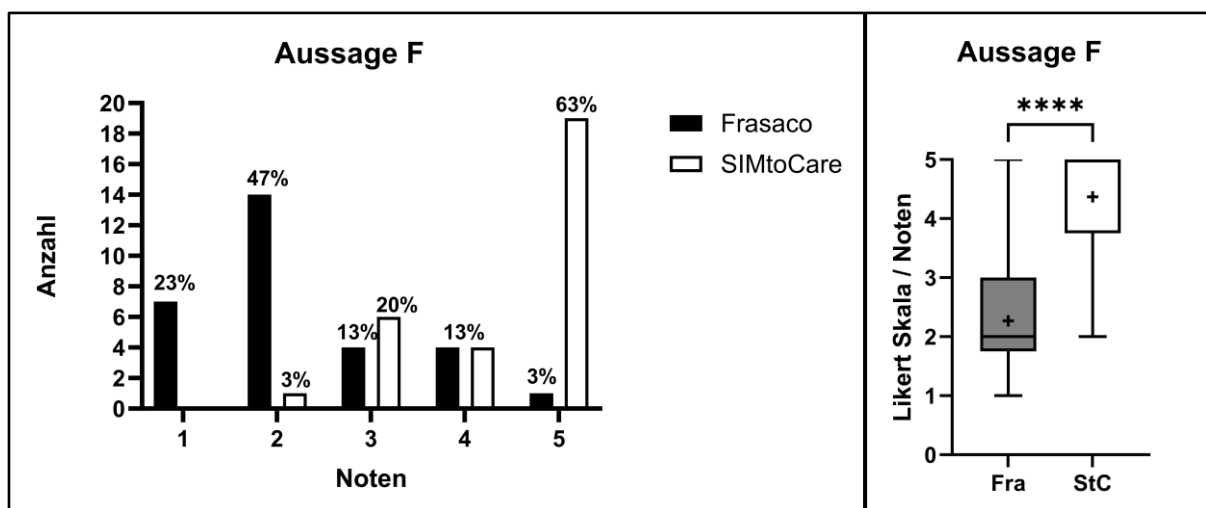


Abb. 44: Graphische Darstellung (Balkendiagramm links; Box-Plot-Diagramm rechts) der für Aussage F vergebenen absoluten und relativen Notenhäufigkeit durch die Teilnehmer/-innen der Frasaco- und SIMtoCare-Gruppe.

Bei einem angenommenen Signifikanzniveau $\alpha = 5 \%$, wurde für Aussage F eine signifikant bessere Benotung ($U = 79,5$; $p < 0,0001$) durch die Teilnehmer/-innen der Frasaco-Gruppe ($M_{\text{Rang}} = 18,15$) im Vergleich zu den Teilnehmern/Teilnehmerinnen der SIMtoCare-Gruppe ($M_{\text{Rang}} = 42,85$) festgestellt. Durch die vorliegende Effektstärke ($r = 0,73$) ergibt sich zudem ein großer Effekt nach Cohen (Tab. 14).

Tab. 14: Tabellarische Darstellung der Rangstatistik (Mittlerer Rang und Rangsumme) der Bewertung von Aussage F durch die Frasaco- (Fra) und SIMtoCare- (StC) Gruppe, zusammen mit dem berechneten U-Wert und p-Wert des Mann-Whitney-U-Tests zur Prüfung auf signifikante Unterschiede in der Notenvergabe der Teilnehmer/-innen beider Gruppen. Die Effektstärke (r) nach Cohen ist ebenfalls angegeben.

Rangstatistik				Mann-Whitney-U-Test		
	n	Mittlerer Rang (M_{Rang})	Rangsumme	U	exakter p-Wert	r
Aussage F Fra	30	18,15	544,5	79,5	<0,0001	0,73
Aussage F StC	30	42,85	1286			

Aussage G: „Bitte bewerten Sie das jeweilige Übungsverfahren.“

Die Teilnehmer/-innen der Frasaco-Gruppe bewerteten diese Aussage im Median mit der Note 2 „stimme zu“ und die Teilnehmer/-innen der SIMtoCare-Gruppe mit der Note 3 „stimme weder zu noch lehne ich ab“ (Tab. 8, Abb. 45).

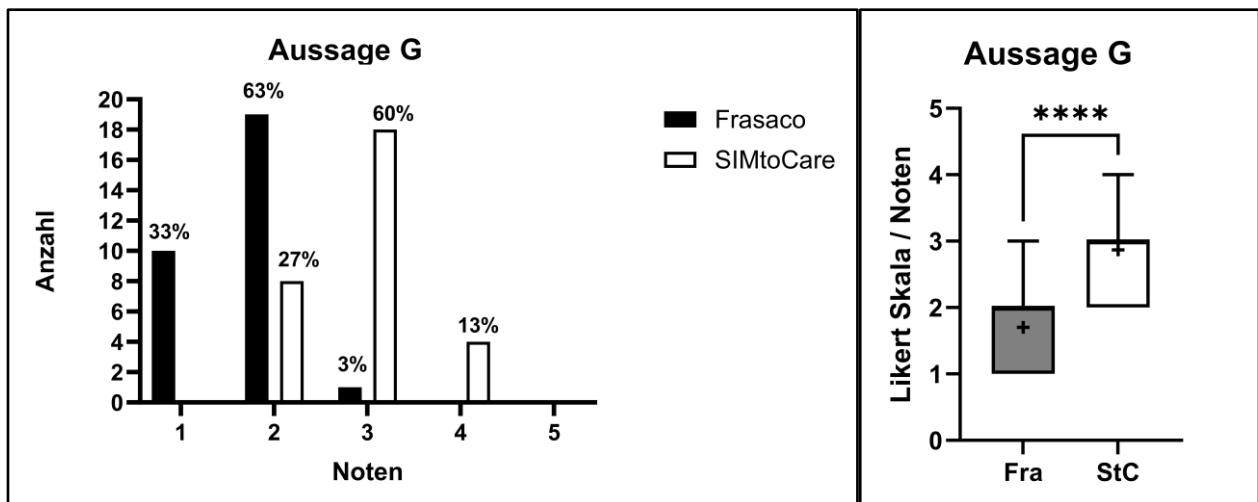


Abb. 45: Graphische Darstellung (Balkendiagramm links; Box-Plot-Diagramm rechts) der für Aussage G vergebenen absoluten und relativen Notenhäufigkeit durch die Teilnehmer/-innen der Frasaco- und SIMtoCare-Gruppe.

Bei einem angenommenen Signifikanzniveau $\alpha = 5\%$, wurde für Aussage G eine signifikant bessere Benotung ($U = 93$; $p < 0,0001$) durch die Teilnehmer/-innen der Frasaco-Gruppe ($M_{\text{Rang}} = 18,6$) im Vergleich zu den Teilnehmern/Teilnehmerinnen der SIMtoCare-Gruppe ($M_{\text{Rang}} = 42,4$) festgestellt. Durch die vorliegende Effektstärke ($r = 0,73$) ergibt sich zudem ein großer Effekt nach Cohen (Tab. 15).

Tab. 15: Tabellarische Darstellung der Rangstatistik (Mittlerer Rang und Rangsumme) der Bewertung von Aussage G durch die Frasaco- (Fra) und SIMtoCare- (StC) Gruppe, zusammen mit dem berechneten U-Wert und p-Wert des Mann-Whitney-U-Tests zur Prüfung auf signifikante Unterschiede in der Notenvergabe der Teilnehmer/-innen beider Gruppen. Die Effektstärke (r) nach Cohen ist ebenfalls angegeben.

Rangstatistik				Mann-Whitney-U-Test		
	n	Mittlerer Rang (M_{Rang})	Rangsumme	U	exakter p-Wert	r
Aussage G Fra	30	18,6	558	93	<0,0001	0,73
Aussage G StC	30	42,4	1272			

3.2.2 Frage H

Frage H: „Gibt es etwas, was Sie verbessern würden?“

Die Beantwortung dieser Frage wurde in Form eines optionalen Freitextes angeboten. Dementsprechend wurde sie nicht, wie die zuvor aufgelisteten Fragen, von allen Studienteilnehmern/Studienteilnehmerinnen beantwortet. Die für die SIMtoCare- dargelegten Kritikpunkte und Verbesserungsvorschläge sowie deren absolute Häufigkeit werden in Tabelle 16 dargelegt.

Tab. 16: Tabellarische Darstellung der für die SIMtoCare-Gruppe dargelegten Kritikpunkte und Verbesserungsvorschläge sowie deren absoluten Häufigkeiten.

Kritikpunkte/Verbesserungsvorschläge SIMtoCare	Absolute Häufigkeit
Das virtuelle Modell sollte sich nicht um 360° drehen können.	10
Die Drehzahl muss anpassbar sein.	7
Aussetzer des Systems während der Nutzung: eingefrorener Bildschirm und „Löcher“ in den Zähnen.	6
Oberkiefer und Wangen müssen mit dargestellt werden, um eine realistischere Situation zu simulieren.	4
Das Licht ist unrealistisch.	2
Die Auflösung des Displays sollte höher sein.	2
Das Finieren der virtuellen Zähne ist nicht möglich.	1
Man kann zu stark reinzoomen.	1

4. Diskussion

4.1 Bewertung der Methodik

In der vorliegenden Arbeit wurde die Effektivität des digitalen Präparationssimulators „Dente“ der Firma SIMtoCARE (Vreeland, Niederlande) im Vergleich zur klassischen Präparation am Phantomschädel untersucht. Hierfür wurden zunächst 60 Studienteilnehmer/-innen in zwei Übungsgruppen aufgeteilt. Nach einer Übungszeit von 28 Stunden an ihren jeweiligen Übungssystemen absolvierten sie eine Leistungsüberprüfung in Form eines Präparationstestates, das von jeweils drei unabhängigen Prüfern bewertet wurde. Die Ergebnisse wurden anschließend miteinander verglichen.

Mit einer Fallzahl von 30 Personen pro Gruppe wird unter der Annahme eines mittleren Effekts ($r = 0,4$) bei einem Signifikanzniveau von 5 % bei Verwendung des Mann-Whitney-U-Tests zum Vergleich zweier Gruppen eine Power von mindestens 80 % erreicht. Die Fallzahlberechnung beinhaltet keine Korrektur für multiples Testen.

Ungeachtet ihrer bereits ausreichenden Größe hätte die Teilnehmeranzahl pro Gruppe ($n = 30$) nicht höher gewählt werden können. Einerseits beschränkten die notwendigen Anforderungen der Studienteilnehmer/-innen (siehe Kapitel 2.1) bereits im Vorfeld die Teilnehmeranzahl. Andererseits führte die limitierte Anzahl der verfügbaren HVRS-Simulatoren (6 Geräte), der daraus resultierende höhere Zeitaufwand, um allen Teilnehmern/Teilnehmerinnen 28 Übungsstunden zu ermöglichen, sowie der zeitlich begrenzte Rahmen für die Nutzung der Geräte (nur in den Semesterferien), dazu, dass nicht mehr Teilnehmer/-innen an dieser Studie teilnehmen konnten.

Die für die Studienteilnehmer/-innen verfügbare Übungszeit von 28 Stunden zur Schulung und Verbesserung ihrer praktischen Fähigkeiten in der Zahnpräparation ist positiv hervorzuheben. Vergleichbare Studien wiesen einen Zeitraum von 1,5 bis 6,5 Stunden auf (Philip et al., 2023; Stoilov et al., 2021). Durch diese Herangehensweise konnte ein routinierter Umgang mit den zwei zu vergleichenden Systemen erreicht werden. Dies führte zu einer Optimierung des Lernprozesses, da sich die Teilnehmer/-innen nun nicht mehr auf die Bedienung der Einheit selbst, sondern auf die eigentliche Aufgabe das Präparieren konzentrieren konnten. Somit wurde die Aussagekraft der

Ergebnisse gesteigert, da sie ausschließlich die erworbenen Präparationsfähigkeiten repräsentierten und nicht durch den anfänglich oft unerfahrenen Umgang mit den Geräten verfälscht wurden.

Durch die abschließende einheitliche Leistungsüberprüfung am Phantomschädel waren die Teilnehmer/-innen der SIMtoCare-Gruppe im Nachteil, da die Prüfungsumgebung für sie ungewohnter war als für jene, die bereits die gesamte Übungszeit am Phantomschädel verbracht hatten. Die Auswertung der Aussage E im abschließenden Evaluationsbogen der Studie bestätigte diese Hypothese: 97 % der Teilnehmer/-innen der Frasaco-Gruppe empfanden ihre Übungsmethode als eine gute Vorbereitung auf das Präparationstestat im Vergleich zu den 33 % der Teilnehmer/-innen der SIMtoCare-Übungsgruppe (Abb. 43, Tab. 13).

Die Studie wurde jedoch bewusst mit einer einheitlichen Leistungsüberprüfung am Phantomschädel geplant, da auch die praktischen Prüfungen in der Lehre weiterhin in dieser Form stattfinden. Somit entsprach die in der Studie gestaltete Prüfungssituation den realen Prüfungsbedingungen während des Studiums.

4.2 Bewertung der Ergebnisse

Ein Vergleich der Inter-Rater Reliabilität zeigt, dass sich die Bewertungen des vor-klinischen Prüfers Prothetik (VK) und des oralchirurgischen Prüfers (OC) nicht signifikant unterscheiden. Der klinische Prüfer Prothetik (KL) hat im Vergleich zu den anderen zwei Prüfern signifikant besser bewertet (Tab. 5 bis 7; Abb. 37 u. 38).

Diese Beobachtung steht einerseits im Widerspruch zu den üblichen Erwartungen, da man annehmen könnte, dass der oralchirurgische Prüfer aufgrund seines begrenzten Kontakts mit der Durchführung und Bewertung von Zahnpräparationen eigentlich von den anderen Prüfern abweichen sollte. Andererseits könnte genau diese Unerfahrenheit in der Bewertung von Zahnpräparationen zu einer gesteigerten Anspruchshaltung und einer hohen Erwartung an Präzision führen. Die letztendlich signifikant bessere Bewertung des klinischen Prüfers Prothetik lässt sich damit erklären, dass trotz der Erfahrung der zu betreuenden Studierenden die Präparationen im Rahmen der klinischen Patientenbehandlung aufgrund anspruchsvollerer Ausgangssituationen mögli-

cherweise nicht mehr den Idealvorstellungen einer Modellpräparation entsprechen können. Dies könnte dazu führen, dass der klinische Prüfer etwas nachsichtiger bewertet, was wiederum zu leicht verbesserten Noten führen könnte.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie unterstützen die in der Literatur oft bemängelte subjektive, inkonsistente und nicht objektive Bewertung durch menschliche Bewerter (Kournetas et al., 2004; Lenherr und Marinello, 2014; Mays und Levine, 2014; Mays et al., 2016; Renne et al., 2013; Schepke et al., 2020). Standardisierte, klar formulierte Bewertungsbögen, umfassende Erfahrung in der zu beurteilenden Tätigkeit sowie regelmäßige Diskussionsrunden, in denen die Prüfer ihre Bewertungen vergleichen und diskutieren (Kalibrierung der Prüfer), können dazu beitragen, die Zuverlässigkeit der Bewertungen zwischen verschiedenen Beurteilenden zu verbessern (Atkinson und Murray, 1987). Jedoch ist es wichtig zu betonen, dass trotz dieser Maßnahmen zur Verbesserung der Zuverlässigkeit der Bewertungen nie eine vollständige Übereinstimmung der Prüfer gewährleistet werden kann. Beispielsweise könnten unterschiedliche Interpretationen der Bewertungskriterien oder individuelle Präferenzen trotz klarer Richtlinien bestehen bleiben. Darüber hinaus ist die Wirksamkeit der regelmäßigen Diskussionsrunden stark von der Offenheit und Bereitschaft der Prüfer abhängig, ihre Bewertungen zu reflektieren und gegebenenfalls anzupassen. Die Implementierung von digitaler Evaluationssoftware in der Bewertung von Zahnpräparationen („PrepCheck 5“ der Firma Dentsply Sirona (Bensheim, Deutschland), „Dental Teacher 4.0“ der Firma KaVo Dental (Biberach, Deutschland) und „Romexis Compare“ der Firma Planmeca (Helsinki, Finnland)) würde eine objektivere Bewertung in Vergleich zu menschlichen Prüfern darstellen (Kournetas et al., 2004; Lenherr und Marinello, 2014; Mays und Levine, 2014; Mays et al., 2016; Renne et al., 2013; Schepke et al., 2020) und eine bessere Inter-Rater Reliabilität gewährleisten.

Dennoch ist diese Beobachtung in der Auswertung der Ergebnisse vernachlässigbar. Die nachsichtigere Bewertung des klinischen Prüfers Prothetik im Vergleich zu den anderen Prüfern impliziert nicht, dass mangelhafte Präparationen ebenso gut gewertet werden wie zufriedenstellende Präparationen (Abb. 37). Der nachweisbare Unterschied in den Benotungen der Teilnehmer/-innen der beiden Gruppen bleibt weiterhin bestehen.

Die Ergebnisse des Notenvergleichs der Teilnehmer/-innen der Frasaco- und SIMtoCare-Gruppe bestätigen die oben genannte Hypothese: Alle Prüfer bewerteten die Präparationen der Teilnehmer/-innen der Frasaco-Gruppe signifikant besser als jene der SIMtoCare-Gruppe (Tab. 2 bis 4, Abb. 36). Die jeweiligen Notenhäufigkeiten (Abb. 33 bis 35) sowie die auffälligen Unterschiede in den Notenmedianwerten (Tab. 1) unterstreichen die Bedeutsamkeit dieser Unterschiede: Im Median wurden die Teilnehmer/-innen der SIMtoCare-Gruppe von den drei Prüfern (VK/KL/OC) mit den Noten 4,5/4/5 (Tab. 1) bewertet, während die Studienteilnehmer/-innen der Frasaco-Gruppe im Median die Noten 2/2/3 erhielten.

Diese Resultate legen nahe, dass Teilnehmer/-innen, die konventionell am Phantomkopf mit Dentalmodellen das Präparieren von Vollgusskronen an Zähnen üben, nach 28 Übungsstunden überlegenere Präparationsfähigkeiten aufweisen als diejenigen, die den virtuellen Präparationssimulator „Dente“ der Firma SIMtoCARE (Vreeland, Niederlande) nutzen. Infolgedessen erscheint das Präparieren von Vollgusskronen am Phantomkopf zurzeit als effizientere Schulungsmethode im Vergleich zur Arbeit an der SIMtoCare-Einheit.

Die vorliegenden Ergebnisse stehen im Widerspruch zu den in der Literatur vorhandenen Erkenntnissen über HVRS-Simulatoren, die das Training an jenen Simulatoren als gleich effektiv (Dwisaptarini et al., 2018; Philip et al., 2023; San Diego et al., 2022; Suebnukarn et al., 2011; Vincent et al., 2020) beziehungsweise sogar als effektiver (Farag und Hashem, 2021; Murbay et al., 2020) einordnen.

Hervorzuheben ist jedoch, dass in den zuvor genannten Studien ausschließlich zahn-erhaltende Eingriffe wie Kariesexkavation, Kavitätenpräparation und das Präparieren von Trepanationsöffnungen untersucht wurden. Der höhere Komplexitätsgrad einer Vollkronenpräparation im Vergleich zu den zuvor genannten zahnerhaltenden Eingriffen stellt eine zusätzliche Herausforderung dar und könnte eine mögliche Erklärung für diese unterschiedlichen Studienergebnisse sein. Zudem waren die Übungszeiten der Teilnehmer/-innen in den vorherigen Studien erheblich kürzer, was zu einer begrenzten Möglichkeit der ausführlichen Auseinandersetzung und Anwendung mit den zu vergleichenden Systemen führte. In einer derart kurzen Übungszeit können sich die

potenziell unterschiedlich stark verbesserten Präparationsfähigkeiten der Studierenden nur in begrenztem Maße zeigen. Dies könnte erklären, weshalb die Präparationsfähigkeiten der Teilnehmer/-innen in vorangegangenen Studien anfangs als vergleichbar erschienen, während in den nun vorliegenden Ergebnissen der tatsächliche Unterschied in der Effektivität der Systeme bei einer längeren Nutzungsdauer sichtbar wird.

Die Auswertung der Evaluationsbögen verdeutlicht die Unterschiede zwischen den beiden untersuchten Systemen. Das subjektive Empfinden der Teilnehmer/-innen bezüglich ihrer Übungsmethode wurde mithilfe von sieben zu bewertenden Aussagen (A bis G) erfasst. Zusätzlich konnten Verbesserungsvorschläge in Form eines optionalen Freitextes niedergeschrieben werden (Frage H).

Zunächst empfanden die Teilnehmer/-innen das Arbeiten an der SIMtoCare-Einheit als weniger intuitiv im Vergleich zu den Teilnehmenden der Frasaco-Gruppe (Aussage A) (Abb. 39, Tab. 9). Dies wird ebenfalls durch das Ergebnis der zu bewertenden Aussage B „Die Bedienung der Präparations-/SIMtoCare-Einheit war kompliziert.“ bestätigt, bei der eine signifikant bessere Benotung durch die Teilnehmer/-innen der Frasaco-Gruppe im Vergleich zu den Probanden und Probandinnen der SIMtoCare-Gruppe vorlag (Abb. 40, Tab. 10). Trotz des Unterschieds in den Bewertungen lässt sich jedoch anhand der Notenhäufigkeiten feststellen, dass die vermeintliche Komplexität der SIMtoCare-Einheit nicht eindeutig ist. Im direkten Vergleich mit der Phantomschädel-Einheit erscheint die Nutzung der SIMtoCare-Einheit zwar als weniger intuitiv und komplizierter, wird jedoch von den Teilnehmern und Teilnehmerinnen nicht als undurchsichtig oder besonders komplex wahrgenommen (Abb. 39 u. 40, Tab 9 u. 10). Darüber hinaus empfanden die Studienteilnehmer der Frasaco-Gruppe im Vergleich zu den Studienteilnehmern der SIMtoCare-Gruppe eine ausgeprägtere Verbesserung ihrer praktischen Fähigkeiten (Aussage C) (Abb. 41, Tab. 11). Bei genauerer Betrachtung der Bewertung fällt jedoch auf, dass trotz dieser Differenzen eine insgesamt positive Entwicklung (60 % positiv, 27 % neutral, 13 % negativ) der praktischen Fähigkeiten in der subjektiven Wahrnehmung der Teilnehmer/-innen der SIMtoCare-Gruppe festzustellen ist.

Dennoch fühlen sich 76 % der Teilnehmenden der SIMtoCare-Gruppe, auch nach ausreichender Übung an diesem System, keineswegs in der Lage, einen Zahn am

Patienten sicher präparieren zu können (Aussage F). 70 % der Teilnehmenden der Frasaco-Gruppe sehen sich hingegen in der Zukunft befähigt, dies erfolgreich umzusetzen (Abb. 44, Tab. 14). Die ebenfalls deutlich negative Bewertung der Aussage D „Ich würde gerne im Phantomkurs weiter mit dem hier verwendeten System üben wollen.“ durch die Teilnehmer/-innen der SIMtoCare-Gruppe (56 % wählten die Noten 4 und 5 „stimme nicht zu/stimme überhaupt nicht zu“) im Vergleich zu der positiven Beantwortung durch die Teilnehmer/-innen der Frasaco-Gruppe (97 % wählten die Noten 1 und 2 „stimme voll zu/stimme zu“) unterstreicht die unterschiedlichen Perspektiven und Einstellungen der beiden Gruppen in Bezug auf die erworbenen und zu erwerbenden Fähigkeiten sowie das Vertrauen in die Anwendung des Systems (Abb. 42, Tab. 12). Dies wird durch die abschließende Benotung des jeweils verwendeten Systems (Aussage G) erneut bekräftigt, da die SIMtoCare-Einheit im Median (Note 3) im Vergleich zum Phantomschädel (Note 2) erneut, wenn auch nicht so eindeutig, schlechter bewertet wird (Abb. 45, Tab. 15).

Zafar et al. (2020) kamen in ihrer Studie zu ähnlichen Ergebnissen. Sie untersuchten das subjektive Empfinden Studierender die Pulpotomien und Kronenpräparationen sowohl an einem HVRS-System (Simodont der Firma Nissin Dental (Kyoto, Japan)) als auch konventionell am Dentalmodell durchführten. 56 % der Teilnehmer/-innen stimmten zu, dass der verwendete HVRS-Simulator ihr Verständnis für Pulpotomien und Kronenpräparationen verbesserte. Allerdings fühlten sich die Teilnehmer/-innen im Allgemeinen wohler, den Phantomschädel mit Dentalmodell im Vergleich zum HVRS-Simulator zu verwenden.

Die in dieser Studie grundlegend schlechtere Bewertung des SIMtoCare Systems durch die Studierenden kann auf verschiedene Ursachen zurückgeführt werden: In erster Linie empfanden die Teilnehmer/-innen, dass das SIMtoCare-System noch nicht ausreichend der „Goldstandard-Situation“ am Phantomschädel, der weiterhin bestehenden Prüfungssituation, entspricht. Die virtuell dargestellten Dentalmodelle ließen sich durch den/die Nutzer/-in um 360° drehen und ermöglichten dem/der Anwender/-in somit Perspektiven, die nicht der realen Situation entsprachen. Die Nicht-Darstellung des jeweiligen Gegenkiefers und der Wangen während der Präparation sowie die Möglichkeit einer zu

starken Vergrößerung, trugen zusätzlich dazu bei, dass der Bewegungsspielraum des jeweils zu bewegendes Winkelstücks und die Detailsichtbarkeit als weniger wirklichkeitsnah wahrgenommen wurden. Zudem empfanden einige Studierende die digitalen Lichtverhältnisse und die Entstehung von Schatten als unrealistisch, was zu einer Verfälschung eines realitätsgetreuen Arbeitsbildes führen kann.

Darüber hinaus bemängelten die Teilnehmer/-innen einige Fehler in der Anwendung des SIMtoCare-Systems. Zunächst war die Drehzahl des digitalen Winkelstücks nicht anpassbar, es lief konstant auf 60.000 U/min, was ein Finieren der virtuellen Zähne unmöglich machte. Dies hatte zur Folge, dass das Trainieren dieser essenziellen Aufgabe des Präparierens beeinträchtigt wurde. Eine finierte Oberfläche und präzise Präparationsgrenze sind entscheidend für einen späteren nahtlosen Übergang von Zahn zur Krone. Darüber hinaus kam es während der Nutzung des Systems teilweise zu technischen Komplikationen: Diese führten entweder zu einem eingefrorenen Bildschirm oder zu Defiziten in der Integrität („Löcher“) der virtuellen Zähne. In beiden Fällen war ein Neustart des Systems erforderlich, ohne dass dabei der Fortschritt gespeichert wurde.

Folglich leidete das Vertrauen der Nutzer/-innen in das System immens, was sich in den negativen Bewertungen der Aussage D „Ich würde gerne im Phantomkurs weiter mit dem hier verwendeten System üben wollen.“, Aussage E „Das verwendete Übungssystem hat mich gut auf das Präparationsteststat vorbereitet.“ und Aussage F „Mit dem Übungsverfahren sehe ich mich nach ausreichender Übung in der Lage einen Zahn am Patienten sicher präparieren zu können.“ durch die Teilnehmenden der SIMtoCare Gruppe zeigte (Abb. 42 bis 44; Tab. 12 bis 14).

4.3 Fazit

Obwohl das Training an HVRS-Simulatoren in vergangenen Studien als gleich effektiv (Dwisaptarini et al., 2018; Philip et al., 2023; San Diego et al., 2022; Suebnukarn et al., 2011; Vincent et al., 2020r) beziehungsweise sogar als effektiver (Farag und Hashem, 2021; Murbay et al., 2020) eingeordnet wurde, zeigen die Ergebnisse der vorliegenden Studie eindeutig, dass sowohl das subjektive Empfinden als auch die objektive Leistung

der Teilnehmer/-innen in Hinblick auf eine Vollguss-Kronenpräparation zugunsten der Arbeit am Phantomschädel mit Dentalmodellen sprechen.

Das Training einer Vollguss-Kronenpräparation am virtuellen Präparationssimulator (HVRs-System), wie dem „Dente“-Simulator, ist aufgrund der Ergebnisse dieser Studie dem klassischen Üben am Phantommodell nicht ebenbürtig, sondern unterlegen. Zurzeit kann es somit das Training am Phantomkopf nicht vollständig ersetzen.

Dennoch legt diese Studie nahe, dass eine ergänzende Implementierung dieses Systems in die bisher vorliegende Lehre als sinnvoll erachtet werden kann.

Trotz der nachweislichen Unterlegenheit beim Üben von Vollguss-Kronenpräparationen am „Dente“-Simulator (SIMtoCARE, Vreeland, Niederlande) im Vergleich zum Üben am Phantomschädel mit Dentalmodellen konnte eine positive Entwicklung der praktischen Fähigkeiten in der subjektiven Wahrnehmung der Teilnehmer/-innen der SIMtoCare-Gruppe festgestellt werden (Abb. 41, Tab. 11). Das Üben am „Dente“-Simulator führte somit dennoch zu einer subjektiv empfundenen Verbesserung der Präparationsfähigkeiten (Hand-Augen-Koordination), was die Aufnahme in die Ausbildung rechtfertigen könnte. Frei zugängliche Simulationszentren, bestehend aus SIMtoCare-Einheiten, könnten einerseits Studierenden ohne jegliche Präparationserfahrung eine Möglichkeit bieten, bereits vor Beginn entsprechender Kurse ihre Präparationsfähigkeiten (Hand-Augen-Koordination) zu schulen. Andererseits könnte es Studierenden mit Wunsch nach mehr Übungszeit außerhalb der regulären Kurszeit zusätzliche Übungsstunden für Präparationen ermöglichen. Zudem besteht die Möglichkeit, Probepräparationen an der SIMtoCare-Einheit durch das Importieren eines Intraoralscans durchzuführen, was für Studierende im klinischen Studienabschnitt eine Alternative zur Präparation am Gipsmodell darstellen kann.

Unter Berücksichtigung der neuen ZApprO und der damit einhergehenden Kürzung der offiziell verfügbaren Lern- und Übungszeit, wäre dies jedoch nur durch die Ergänzung einer Selbstevaluationssoftware (siehe Kapitel 1.5) zur autonomen, objektiven Bewertung der Präparationen in das bestehende SIMtoCare-System möglich.

Eine generelle Optimierung des SIMtoCare-Systems ist dennoch dringend angeraten, um einerseits die Präparationserfahrung realistischer und allumfassender zu gestalten und andererseits die Stabilität und Zuverlässigkeit während des Übungsprozesses zu gewährleisten. So könnte das zurzeit fehlende Vertrauen in das System gestärkt werden und ein unterbrechungsfreies sowie motivierendes Training ermöglicht werden. Eine enge Zusammenarbeit zwischen Entwicklern, Lehrenden und Studierenden ist hierbei entscheidend, um die erforderlichen Verbesserungen erfolgreich umsetzen zu können.

Sollten die zuvor erwähnten Verbesserungen umgesetzt werden und eine Selbst-evaluationssoftware in das SIMtoCare-System integriert werden, ist von einer erheblichen Effektivitätssteigerung des SIMtoCare-Systems auszugehen.

Möglicherweise ist das SIMtoCare-System nach diesen Anpassungen der traditionellen Präparationsübung am Phantomkopf ebenbürtig und könnte somit vollständig in den zahnärztlich-prothetischen Lehrbetrieb integriert werden. Studierende hätten dann die Möglichkeit, in der offiziell verfügbaren Lern- und Übungszeit gleichermaßen mit beiden Systemen zu arbeiten, um sich effektiv auf die Abschlussprüfung am Phantomschädel mit Dentalmodellen vorzubereiten. Auf diese Weise könnte das angestrebte verbesserte Betreuungsverhältnis und eine „moderne“ Lehre gemäß der neuen ZApprO gewährleistet werden. In zukünftigen Studien müsste dennoch überprüft werden, ob diese Verbesserungen und Ergänzungen auch tatsächlich zu der angestrebten Effektivitätssteigerung führen.

5. Zusammenfassung

Im Zuge der fortschreitenden Digitalisierung der Zahnmedizin wurden in den letzten Jahren „Haptic Virtual Reality Simulation Devices“ (HVRS-Systeme), wie der „Dente“-Simulator (SIMtoCARE, Vreeland, Niederlande), entwickelt, die eine virtuelle Präparation von Zähnen ermöglichen. Angesichts der neuen Approbationsordnung für Zahnärzte (ZApprO), welche die Lern- und Übungszeit verkürzt und moderne Lehrmethoden betont, sollte geprüft werden, ob das Training an virtuellen Präparationssimulatoren der konventionellen Präparationsübung am Phantommodell ebenbürtig ist und inwieweit die „Dente“-Simulatoren in die vorklinische prothetische Ausbildung integriert werden können.

Dazu wurden 60 Zahnmedizinische Studierende mit geringer Präparationserfahrung gleichmäßig in eine Frasaco- und eine SIMtoCare-Gruppe aufgeteilt. Sie erhielten 28 Übungsstunden, um mit dem jeweiligen System ihre Präparationsfähigkeiten für eine Vollguss-Kronenversorgung an Zahn 36 zu verbessern. Die im Rahmen eines abschließenden Präparationstests präparierten Zähne wurden von drei Oberärzten nach zuvor klar definierten Kriterien blind bewertet. Zudem wurden die Studierenden gebeten, einen Bewertungsbogen bezüglich ihres subjektiven Empfindens in Bezug auf ihre Übungsmethode auszufüllen.

Die Ergebnisse zeigten, dass Teilnehmer der konventionellen Methode signifikant bessere Präparationen durchführten. Die SIMtoCare-Gruppe empfand das Arbeiten als weniger intuitiv und komplizierter, wenngleich nicht als undurchsichtig oder besonders komplex. Obwohl die Teilnehmenden der SIMtoCare-Gruppe den subjektiven Eindruck der Verbesserung ihrer praktischen Fähigkeiten hatten, äußerten nur 13 % die Absicht, gerne weiter mit dem System üben zu wollen. 76 % der SIMtoCare-Gruppe fühlten sich zudem nach ausreichender Übung nicht in der Lage, einen Zahn am Patienten sicher zu präparieren, während 70 % der Frasaco-Gruppe sich dazu befähigt fühlten. Die schlechtere Benotung und das mangelnde Vertrauen in das SIMtoCare-System lassen sich auf die mangelnde Realitätsnähe und technische Fehler in der Anwendung zurückführen.

Zusammenfassend ist das Training am „Dente“-Simulator der klassischen Methode nicht ebenbürtig, sondern unterlegen und kann das Training am Phantomkopf derzeit nicht

vollständig ersetzen. Eine Optimierung des SIMtoCare-Systems und die Integration einer Selbstevaluationssoftware könnten jedoch die Effektivität steigern. Ob dies zu einer Gleichwertigkeit beider Systeme führt, ist in zukünftigen Studien zu untersuchen.

6. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Phantomkopf mit eingespannten Dentalmodellen und hautähnlicher Gummimaske der Firma Frasaco (Tettnang, Deutschland)	10
Abb. 2:	Phantomkopf mit eingespannten Dentalmodellen, Torso und hautähnlicher Gummimaske der Firma Frasaco (Tettnang, Deutschland)	11
Abb. 3:	Darstellung von Kunststoffzähnen der Firma Frasaco (Tettnang, Deutschland) mit unterschiedlich harter Schmelz- und Dentinschicht sowie einer artifiziellen gewebeähnlichen Pulpa (links) sowie einem klassischen Modellzahn aus Duroplast (rechts)	12
Abb. 4:	Darstellung einer CEREC Primescan AC-Einheit der Firma Dentsply Sirona (Bensheim, Deutschland) bestehend aus Touchbildschirm (1), Touchpad (2), Intraoralscanner: hier CEREC Primescan (3) und mobiler Computereinheit (4)	15
Abb. 5:	Darstellung der Bestandteile des „Romexis Compare“-Systems der Firma Planmeca (Helsinki, Finnland).	16
Abb. 6:	Übersicht über die Bestandteile des „Dental Teacher 4.0“-Systems im Bild links: Desktopscanner der Firma Smartoptics (1), Universalmodellhalter (2), 2 USB-Sticks mit „Dental Teacher 4.0“-Software und Lizenz (3), Workstation (4). Bild rechts: KaVo-Modellhalter für das KaVo-Pinsystem der KaVo-Studienmodelle (1), Universalmodellhalter (2) und Kalibrierungskörper (3)	16
Abb. 7:	Darstellung der Überlagerung einer eingescannten Studentenpräparation des Zahnes 36 mit der jeweiligen Meisterpräparation in der „PrepCheck 5“-Software (siehe Pfeil).	17
Abb. 8:	Darstellung eines Vergleichs der studentischen Präparation mit der hinterlegten Meisterpräparation in der „Dental Teacher 4.0“-Software.	18
Abb. 9:	Darstellung eines Vergleichs der studentischen Präparation mit der hinterlegten Meisterpräparation in der „Romexis Compare“-Software.	18

- Abb. 10:** Darstellung einer Schnittebene der überlagerten Meisterpräparation (grün) mit der studentischen Präparation (blau) in der „PrepCheck 5“-Software 19
- Abb. 11:** Darstellung einer Seitenansicht des präparierten Zahns mit Überlagerung des Originalzahns in Hellblau in der „Dental Teacher 4.0“-Software (links) sowie Darstellung der Analysefunktion „Präparationswinkel einblenden“ (rechts). 19
- Abb. 12:** Darstellung der Analysefunktion „Präparationswinkel“ in der „Romexis Compare“-Software. 20
- Abb. 13:** Darstellung einer „DentSim“-Einheit bestehend aus einer CCD-Infrarot-Kamera, die der Aufnahme der Behandlungsschritte des Anwenders dient (1), einem Bildschirm mit „DentSim“-Benutzeroberfläche (2) und einem Phantomkopf mit Dentalmodellen (3) 21
- Abb. 14:** Darstellung der Benutzeroberfläche des „DentSim“-Systems. 23
- Abb. 15:** Darstellung des „Dente“-Simulators der Firma SIMtoCare mit 4k 3D-Display (1), Tablet (2), Phantomkopf mit Dentalmodellen (3), Fußpedal (4) sowie einem Winkelstück (5) und einem Griff für einen zahnärztlichen Spiegel (6). 25
- Abb. 16:** Übersicht der möglichen Übungsmodule für den/die Nutzer/-in des „Dente“-Simulators der Firma SIMtoCARE. 26
- Abb. 17:** Darstellung der Benutzeroberfläche der „SIMtoCARE“-Lernsoftware, nach ausgewähltem Übungsmodul sowie ausgewählten zahnärztlichen Instrumenten und Diamanten (links). Ausschnitt der möglichen Auswahl der zahnärztlichen Instrumente (rechts). 27
- Abb. 18:** Darstellung des virtuellen Unterkiefer-Dentalmodells und dem ausgewählten virtuellen Winkelstück mit Präparationsdiamant, die auf dem 3D-Display abgebildet werden. 28
- Abb. 19:** Darstellung eines importierten Intraoralscans eines Unterkiefers. Der/die Nutzer/-in präpariert den Zahn 46 virtuell mithilfe eines Winkelstücks und eines Spiegels. 29
- Abb. 20:** Darstellung des Flyers zur Akquirierung der Studienteilnehmer/-innen. 34

- Abb. 21:** Darstellung der in der Studie verwendeten Dentalmodelle ANKA-4V der Firma Frasco (Tettang, Deutschland) (links), die mit 28 Zähnen bestückt sind. Diese Zähne sind jedoch nicht verschraubt, sondern mit dem Frasco-Klicksystem befestigt. Rechts ist das verwendete Schnellaufwinkelstück Expertmatic LUX E25L der Firma KaVo Dental (Biberach, Deutschland) abgebildet. 35
- Abb. 22:** Darstellung der zur Verwendung empfohlenen Diamanten. 36
- Abb. 23:** Darstellung des Phantomarbeitsplatzes mit LED-Behandlungsleuchte (1), LED-Arbeitslicht für zahntechnische Arbeiten (2), Wasser- und Luftpüster (3), Mikromotor und Winkelstück (4), Phantomkopf mit Halterung und bereits angelegter Gummimaske (5), Absaugschläuche (6), Luftpüster und Handstück für zahntechnische Arbeiten (7), Kniepedal zur Drehzahlanpassung des Handstücks (8) sowie Fußpedal zur Drehzahlanpassung des Winkelstücks (9). 37
- Abb. 24:** Darstellung einer Meisterpräparation des Zahnes 36 mit angestrebtem Präparationswinkel zwischen 4 - 6°. 38
- Abb. 25:** Darstellung einer Meisterpräparation des Zahnes 36 mit idealem zirkulärem Substanzabtrag von 0,5 mm 38
- Abb. 26:** Darstellung einer Meisterpräparation des Zahnes 36 mit funktioneller Abschrägung im 45°-Winkel. 39
- Abb. 27:** Zeitplan der durchgeführten Studie mit jeweils 28 Übungsstunden pro Gruppe und Präparationstestat nach jeweiligem Übungsblock. 41
- Abb. 28:** Darstellung der zahlreichen Auswahlmöglichkeiten des/der Nutzers/Nutzerin bezüglich Winkelstück, Präparationsdiamant und Spiegel, wobei die Nutzung des Schnellaufwinkelstücks „High speed Electric“, der Diamanten „Torpedo 1,2 mm Fine“, „Torpedo 1,2 mm Course“ und „Football 1,8 mm Fine“ sowie des Spiegels „Mirror N4 22 mm“ empfohlen wurde. 42
- Abb. 29:** Darstellung des ausgewählten empfohlenen Winkelstücks, des Diamanten und des Spiegels (oben). Besonderes Augenmerk soll auf die mittige Anzeige des bereits reduzierten Dentinanteils für den Zahn

36 gelegt werden. Unten ist der „Submit“ Button dargestellt mit dem das Endergebnis dem Lehrpersonal hochgeladen werden kann.	43
Abb. 30: Darstellung des Bewertungsbogens der jeweiligen Oberärzte für die Präparationen der Studienteilnehmer.	45
Abb. 31: Darstellung der Punktgewichtung der einzelnen Bewertungsmöglichkeiten und Zusammenhang zwischen Gesamtpunktzahl und Endnote.	46
Abb. 32: Evaluationsbogen der Teilnehmer/-innen zur Bewertung ihrer Übungsmethode.	47
Abb. 33: Graphische Darstellung (Balkendiagramm) der vergebenen absoluten und relativen Notenhäufigkeit durch den vorklinischen Prüfer für die Teilnehmer/-innen der Frasaco- und SIMtoCare-Gruppe.	50
Abb. 34: Graphische Darstellung (Balkendiagramm) der vergebenen absoluten und relativen Notenhäufigkeit durch den klinischen Prüfer für die Teilnehmer/-innen der Frasaco- und SIMtoCare-Gruppe.	50
Abb. 35: Graphische Darstellung (Balkendiagramm) der vergebenen absoluten und relativen Notenhäufigkeit durch den oralchirurgischen Prüfer für die Teilnehmer/-innen der Frasaco- und SIMtoCare-Gruppe.	51
Abb. 36: Graphische Darstellung (Box-Plot-Diagramm) der Notenverteilungen der Leistungsüberprüfung durch die drei Prüfer (VK= Vorklinik Prothetik, KL= Klinik Prothetik, OC= Oralchirurgie) für die Teilnehmer/-innen der Frasaco- (Fra) und SIMtoCare- (StC) Gruppe.	54
Abb. 37: Graphische Darstellung (Balkendiagramm) der vergebenen absoluten und relativen Notenhäufigkeit durch die drei Prüfer für alle Teilnehmer/-innen.	55
Abb. 38: Graphische Darstellung (Box-Plot-Diagramm) der Notenverteilungen der Leistungsüberprüfung durch die drei Prüfer.	58
Abb. 39: Graphische Darstellung (Balkendiagramm links; Box-Plot-Diagramm rechts) der für Aussage A vergebenen absoluten und relativen Notenhäufigkeit durch die Teilnehmer/-innen der Frasaco- und SIMtoCare-Gruppe.	60

- Abb. 40:** Graphische Darstellung (Balkendiagramm links; Blox-Plot-Diagramm rechts) der für Aussage B vergebenen absoluten und relativen Notenhäufigkeit durch die Teilnehmer/-innen der Frasaco- und SIMtoCare-Gruppe. 61
- Abb. 41:** Graphische Darstellung (Balkendiagramm links; Box-Plot-Diagramm rechts) der für Aussage C vergebenen absoluten und relativen Notenhäufigkeit durch die Teilnehmer/-innen der Frasaco- und SIMtoCare-Gruppe. 62
- Abb. 42:** Graphische Darstellung (Balkendiagramm links; Box-Plot-Diagramm rechts) der für Aussage D vergebenen absoluten und relativen Notenhäufigkeit durch die Teilnehmer/-innen der Frasaco- und SIMtoCare-Gruppe. 63
- Abb. 43:** Graphische Darstellung (Balkendiagramm links; Box-Plot-Diagramm rechts) der für Aussage E vergebenen absoluten und relativen Notenhäufigkeit durch die Teilnehmer/-innen der Frasaco- und SIMtoCare-Gruppe. 64
- Abb. 44:** Graphische Darstellung (Balkendiagramm links; Box-Plot-Diagramm rechts) der für Aussage F vergebenen absoluten und relativen Notenhäufigkeit durch die Teilnehmer/-innen der Frasaco- und SIMtoCare-Gruppe. 65
- Abb. 45:** Graphische Darstellung (Balkendiagramm links; Box-Plot-Diagramm rechts) der für Aussage G vergebenen absoluten und relativen Notenhäufigkeit durch die Teilnehmer/-innen der Frasaco- und SIMtoCare-Gruppe. 66

7. Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Tabellarische Darstellung von absoluter Notenhäufigkeit, Median, Mittelwert und Standardabweichung (SD) der Leistungsüberprüfung durch die drei Prüfer (VK = Vorklinik Prothetik, KL = Klinik Prothetik, OC = Oralchirurgie) für die jeweiligen Teilnehmer/-innen der Frasaco- und SIMtoCare- (StC) Gruppe.	49
Tab. 2:	Tabellarische Darstellung der Rangstatistik (Mittlerer Rang und Rangsumme) der Benotung der Frasaco- (Fra) und SIMtoCare- (StC) Gruppe durch den vorklinischen Prüfer, zusammen mit dem berechneten U-Wert und dem zugehörigen p-Wert des Mann-Whitney-U-Tests zur Prüfung signifikanter Unterschiede in der Benotung der Teilnehmer/-innen beider Gruppen. Die Effektstärke (r) nach Cohen ist ebenfalls angegeben.	52
Tab. 3:	Tabellarische Darstellung der Rangstatistik (Mittlerer Rang und Rangsumme) der Benotung der Frasaco- (Fra) und SIMtoCare- (StC) Gruppe durch den klinischen Prüfer zusammen mit dem berechneten U-Wert und dem zugehörigen p-Wert des Mann-Whitney-U-Tests zur Prüfung signifikanter Unterschiede in der Benotung der Teilnehmer/-innen beider Gruppen. Die Effektstärke (r) nach Cohen ist ebenfalls angegeben.	53
Tab. 4:	Tabellarische Darstellung der Rangstatistik (Mittlerer Rang und Rangsumme) der Benotung der Frasaco- (Fra) und SIMtoCare- (StC) Gruppe durch den oralchirurgischen Prüfer zusammen mit dem berechneten U-Wert und dem zugehörigen p-Wert des Mann-Whitney-U-Tests zur Prüfung signifikanter Unterschiede in der Benotung der Teilnehmer/-innen beider Gruppen. Die Effektstärke (r) nach Cohen ist ebenfalls angegeben.	53
Tab. 5:	Tabellarische Darstellung von absoluter Notenhäufigkeit, Median, Mittelwert und Standardabweichung (SD) der Leistungsüberprüfung durch die drei Prüfer für alle Teilnehmer/-innen.	55

- Tab. 6:** Tabellarische Darstellung der Rangstatistik (Mittlerer Rang und Rangsumme) der Benotungen der drei Prüfer, zusammen mit der berechneten auf Bindungen korrigierten Prüfgröße und dem zugehörigen p-Wert des Friedman-Tests zur Prüfung signifikanter Unterschiede in der Benotung der Teilnehmer/-innen aller Gruppen. Das Fleiss' Kappa (κ) ist ebenfalls angegeben. 57
- Tab. 7:** Tabellarische Darstellung des beim Dunn's Multiple Comparison Test errechneten Teststatistik und z-Wert für die Prüfung auf signifikante Unterschiede in der Benotung zwischen den drei jeweiligen Prüfern. Zusätzlich wurden die unkorrigierten p-Werte und die korrigierten p-Werte nach Bonferroni sowie die vorliegende Effektstärke (r) nach Cohen bei signifikanten Unterschieden angegeben. 58
- Tab. 8:** Tabellarische Darstellung von Notenhäufigkeit, Median, Mittelwert und Standardabweichung (SD) für die jeweilige Aussage A bis G des Evaluationsbogens durch die Teilnehmer/-innen der Frasaco- (Fra) und SIMtoCare- (StC) Gruppe. 59
- Tab. 9:** Tabellarische Darstellung der Rangstatistik (Mittlerer Rang und Rangsumme) der Bewertung von Aussage A durch die Frasaco- (Fra) und SIMtoCare- (StC) Gruppe, zusammen mit dem berechneten U-Wert und p-Wert des Mann-Whitney-U-Tests zur Prüfung auf signifikante Unterschiede in der Notenvergabe der Teilnehmer/-innen beider Gruppen. Die Effektstärke (r) nach Cohen ist ebenfalls angegeben. 60
- Tab. 10:** Tabellarische Darstellung der Rangstatistik (Mittlerer Rang und Rangsumme) der Bewertung von Aussage B durch die Frasaco- (Fra) und SIMtoCare- (StC) Gruppe, zusammen mit dem berechneten U-Wert und p-Wert des Mann-Whitney-U-Tests zur Prüfung auf signifikante Unterschiede in der Notenvergabe der Teilnehmer/-innen beider Gruppen. Die Effektstärke (r) nach Cohen ist ebenfalls angegeben. 61
- Tab. 11:** Tabellarische Darstellung der Rangstatistik (Mittlerer Rang und Rangsumme) der Bewertung von Aussage C durch die Frasaco- (Fra)

und SIMtoCare- (StC) Gruppe, zusammen mit dem berechneten U-Wert und p-Wert des Mann-Whitney-U-Tests zur Prüfung auf signifikante Unterschiede in der Notenvergabe der Teilnehmer/-innen beider Gruppen. Die Effektstärke (r) nach Cohen ist ebenfalls angegeben.

62

Tab. 12: Tabellarische Darstellung der Rangstatistik (Mittlerer Rang und Rangsumme) der Bewertung von Aussage D durch die Frasaco- (Fra) und SIMtoCare- (StC) Gruppe, zusammen mit dem berechneten U-Wert und p-Wert des Mann-Whitney-U-Tests zur Prüfung auf signifikante Unterschiede in der Notenvergabe der Teilnehmer/-innen beider Gruppen. Die Effektstärke (r) nach Cohen ist ebenfalls angegeben.

63

Tab. 13: Tabellarische Darstellung der Rangstatistik (Mittlerer Rang und Rangsumme) der Bewertung von Aussage E durch die Frasaco- (Fra) und SIMtoCare- (StC) Gruppe, zusammen mit dem berechneten U-Wert und p-Wert des Mann-Whitney-U-Tests zur Prüfung auf signifikante Unterschiede in der Notenvergabe der Teilnehmer/-innen beider Gruppen. Die Effektstärke (r) nach Cohen ist ebenfalls angegeben.

64

Tab. 14: Tabellarische Darstellung der Rangstatistik (Mittlerer Rang und Rangsumme) der Bewertung von Aussage F durch die Frasaco- (Fra) und SIMtoCare- (StC) Gruppe, zusammen mit dem berechneten U-Wert und p-Wert des Mann-Whitney-U-Tests zur Prüfung auf signifikante Unterschiede in der Notenvergabe der Teilnehmer/-innen beider Gruppen. Die Effektstärke (r) nach Cohen ist ebenfalls angegeben.

65

Tab. 15: Tabellarische Darstellung der Rangstatistik (Mittlerer Rang und Rangsumme) der Bewertung von Aussage G durch die Frasaco- (Fra) und SIMtoCare- (StC) Gruppe, zusammen mit dem berechneten U-Wert und p-Wert des Mann-Whitney-U-Tests zur Prüfung auf signifikante Unterschiede in der Notenvergabe der Teilnehmer/-innen

beider Gruppen. Die Effektstärke (r) nach Cohen ist ebenfalls angegeben.

66

Tab. 16: Tabellarische Darstellung der für die SIMtoCare-Gruppe dargelegten Kritikpunkte und Verbesserungsvorschläge sowie deren absoluten Häufigkeiten.

67

8. Literaturverzeichnis

Aliaga I, Pedrera-Canal M, Vera V, Rico Martín S, Garcia Barbero E, Leal-Hernández O, Moran JM. Preclinical assessment methodology using a dental simulator during dental students' first and third years. J Oral Sci 2020; 62: 119–121

Atkinson D, Murray M. Improving Interrater Reliability. Conference on College Composition and Communication 1987; 38

Bakker D, Lagerweij M, Wesselink, Paul, Vervoor, Marjoke. Transfer of manual dexterity skills acquired on the Simodont, a dental haptic trainer with a virtual environment, to reality: a pilot study. Bio Algorithms Med Syst 2010; 6: 21–24

Buchanan JA. Experience with virtual reality-based technology in teaching restorative dental procedures. J Dent Educ 2004; 68: 1258–1265

Buchanan RN. Problems related to the use of human subjects in clinical evaluation/responsibility for follow-up care. J Dent Educ 1991; 55: 797–801

Dentsply Sirona, 2021: prepCheck 5 Vergleich mit der Masterpräparation in der Analysephase (de). https://www.youtube.com/watch?v=XY-PFkn6LQA&list=PLDZOLTDcHkCpv8Uy4PJIW_QYy_3ant7WV&index=3 (Zugriffsdatum: 28.05.2023)

Dentsply Sirona, 2024: CEREC Primescan | Dentsply Sirona. <https://www.dentsplysirona.com/en-nz/categories/cerec/cerec-primescan.html> (Zugriffsdatum: 27.08.2024)

Dr. Samuel Elhadad - Image Navigation, 2024: Product Images - Image Navigation. <https://image-navigation.com/home-page/dentsim/product-images/> (Zugriffsdatum: 27.08.2024)

Dwisaptarini AP, Suebnukarn S, Rhienmora P, Haddawy P, Koontongkaew S. Effectiveness of the Multilayered Caries Model and Visuo-tactile Virtual Reality Simulator

for Minimally Invasive Caries Removal: A Randomized Controlled Trial. *Oper Dent* 2018; 43: E110-E118

Fager P-J, Wowern P von. The use of haptics in medical applications. *Int J Med Robot* 2004; 1: 36–42

Farag A, Hashem D. Impact of the Haptic Virtual Reality Simulator on Dental Students' Psychomotor Skills in Preclinical Operative Dentistry. *Clin Pract* 2021; 12: 17–26

Feeney L, Reynolds PA, Eaton KA, Harper J. A description of the new technologies used in transforming dental education. *Br Dent J* 2008; 204: 19–28

Frasaco GmbH, 2020: [frasaco_Lieferprogramm_2020-german_flipbook](https://www.frasaco.de/kataloge/Lieferprogramm_2020_de/#0).
https://www.frasaco.de/kataloge/Lieferprogramm_2020_de/#0 (Zugriffsdatum: 17.05.2023)

Gluch JI, Stewart CL, Buchanan JA, Hammrich PL. Virtual reality technology in preclinical laboratory: differential student responses based on learning styles. *J Dent Educ* 1999; 63: 58

Gottlieb R, Vervoorn JM, Buchanan J. Simulation in Dentistry and Oral Health. In: Levine AI, DeMaria S, Schwartz AD, Sim AJ, Hrsg. *The Comprehensive Textbook of Healthcare Simulation*. New York, NY: Springer New York, 2013: 329–340

Hamil LM, Mennito AS, Renné WG, Vuthiganon J. Dental Students' Opinions of Preparation Assessment with E4D Compare Software Versus Traditional Methods. *J Dent Educ* 2014; 78: 1424–1431

Helmreich RL. On error management: lessons from aviation. *BMJ* 2000; 320: 781–785

Hey J, Schweyen R, Kupfer P, Beuer F. Influence of preparation design on the quality of tooth preparation in preclinical dental education. *J Dent Sci* 2017; 12: 27–32

Jasinevicius TR, Landers M, Nelson S, Urbankova A. An Evaluation of Two Dental Simulation Systems: Virtual Reality versus Contemporary Non-Computer-Assisted. *J Dent Educ* 2004; 68: 1151–1162

Jayanthi T. Process Simulation of Nuclear Power Plant Using Latest Techniques. ISSS 2007; 51

Kavo Dental GmbH, 2021: GA_DentalTeacher_20211008_02_de.
https://kavo.widen.net/content/fjtkjaxatq/pdf/GA_Dental-Teacher_20211008_02_de.pdf?u=pj169z (Zugriffsdatum: 01.06.2023)

Kerres M, Preußler A. Mediendidaktik. In: Meister D, Gross F von, Sander U, Hrsg. Enzyklopädie Erziehungswissenschaft Online. Weinheim: Beltz Juventa, 2012: 1-17

Kikuchi H, Ikeda M, Araki K. Evaluation of a Virtual Reality Simulation System for Porcelain Fused to Metal Crown Preparation at Tokyo Medical and Dental University. J Dent Educ 2013; 77: 782–792

Kitagawa M, Dokko D, Okamura AM, Yuh DD. Effect of sensory substitution on suture-manipulation forces for robotic surgical systems. J Thorac Cardiovasc Surg 2005; 129: 151–158

Kournetas N, Jaeger B, Axmann D, Groten M, Lachmann S, Weber H, Geis-Gerstorfer J. Assessing the reliability of a digital preparation assistant system used in dental education. J Dent Educ 2004; 68: 1228–1234

Krischel M, Nebe J. Die Professionalisierung der Zahnmedizin in Deutschland. Vom Zahnbrecher zum Spezialisten für Mundgesundheit. Zahnärztl Mitt 2022; 112: 656–661

Kwon SR, Restrepo-Kennedy N, Dawson DV, Hernandez M, Denehy G, Blanchette D, Gratton DG, Aquilino SA, Armstrong SR. Dental anatomy grading: comparison between conventional visual and a novel digital assessment technique. J Dent Educ 2014a; 78: 1655–1662

Kwon SR, Restrepo-Kennedy N, Dawson DV, Hernandez M, Denehy G, Blanchette D, Gratton DG, Aquilino SA, Armstrong SR. Dental Anatomy Grading: Comparison Between Conventional Visual and a Novel Digital Assessment Technique. J Dent Educ 2014b; 78: 1655–1662

Langer I, Schewe S, Haedecke C, Puppe F, Rheinhardt T. Learning at the computer: evaluation of an intelligent tutoring system. *Eur J Med Res* 1998; 3: 119–126

LeBlanc VR, Urbankova A, Hadavi F, Lichtenthal RM. A Preliminary Study in Using Virtual Reality to Train Dental Students. *J Dent Educ* 2004; 68: 378–383

Lele A. Virtual reality and its military utility. *J Ambient Intell Human Comput* 2013; 4: 17–26

Lenherr P, Marinello CP. prepCheck computergestützte objektive Beurteilung von Zahnpräparationen im Simulationslabor. *Swiss Dent J* 2014; 124: 1085–1092

Leung AL-S, Yeung C, Chu S, Wong AW-Y, Yu OY, Chu C-H. Use of Computer Simulation in Dental Training with Special Reference to Simodont. *Dent J (Basel)* 2021; 9: 125

Mays KA, Crisp HA, Vos P. Utilizing CAD/CAM to Measure Total Occlusal Convergence of Preclinical Dental Students' Crown Preparations. *J Dent Educ* 2016; 80: 100–107

Mays KA, Levine E. Dental Students' Self-Assessment of Operative Preparations Using CAD/CAM: A Preliminary Analysis. *J Dent Educ* 2014; 78: 1673–1680

Murbay S, Neelakantan P, Chang JWW, Yeung S. 'Evaluation of the introduction of a dental virtual simulator on the performance of undergraduate dental students in the pre-clinical operative dentistry course'. *Eur J Dent Educ* 2020; 24: 5–16

Nagy ZA, Simon B, Tóth Z, Vág J. Evaluating the efficiency of the Dental Teacher system as a digital preclinical teaching tool. *Eur J Dent Educ* 2018; 22: e619-e623

Philip N, Ali K, Duggal M, Daas H, Nazzal H. Effectiveness and Student Perceptions of Haptic Virtual Reality Simulation Training as an Instructional Tool in Pre-Clinical Paediatric Dentistry: A Pilot Pedagogical Study. *Int J Environ Res Public Health* 2023; 20

Planmeca, 2024: Digitales Unterrichtskonzept. <https://www.planmeca.com/de/ihre-losungen/zahnmedizinische-lehranstalten/digitales-unterrichtskonzept/> (Zugriffsdatum: 07.09.2024)

Plasschaert AJ, Cailleteau JG, Verdonschot EH. The effect of a multimedia interactive tutorial on learning endodontic problem-solving. *Eur J Dent Educ* 1997; 1: 66–69

Preston JD. Computers in Dental Education. *Journal of the California Dental Association* 1997; 25: 729–733

Renne WG, McGill ST, Mennito AS, Wolf BJ, Marlow NM, Shaftman S, Holmes JR. E4D compare software: an alternative to faculty grading in dental education. *J Dent Educ* 2013; 77: 168–175

Robles-De-La-Torre G. The Importance of the Sense of Touch in Virtual and Real Environments. *IEEE Multimedia* 2006; 13: 24–30

Rosenberg H, Grad HA, Matear DW. The effectiveness of computer-aided, self-instructional programs in dental education: a systematic review of the literature. *J Dent Educ* 2003; 67: 524–532

San Diego JP, Newton TJ, Sagoo AK, Aston T-A, Banerjee A, Quinn BFA, Cox MJ. Learning Clinical Skills Using Haptic vs. Phantom Head Dental Chair Simulators in Removal of Artificial Caries: Cluster-Randomized Trials with Two Cohorts' Cavity Preparation. *Dent J (Basel)* 2022; 10

Schepke U, van Wulfften Palthe ME, Meisberger EW, Kerdijk W, Cune MS, Blok B. Digital assessment of a retentive full crown preparation-An evaluation of prepCheck in an undergraduate pre-clinical teaching environment. *Eur J Dent Educ* 2020; 24: 407–424

Stewart DL, Gluch JI, Hammrich PL, Buchanan JA. Virtual reality technology versus traditional preclinical lab: perceptions of first-year dental students. *J Dent Educ* 1999; 63: 74

Stoilov M, Trebess L, Klemmer M, Stark H, Enkling N, Kraus D. Comparison of Digital Self-Assessment Systems and Faculty Feedback for Tooth Preparation in a Preclinical Simulation. *Int J Environ Res Public Health* 2021; 18

Ström P, Hedman L, Särnå L, Kjellin A, Wredmark T, Felländer-Tsai L. Early exposure to haptic feedback enhances performance in surgical simulator training: a prospective randomized crossover study in surgical residents. *Surg Endosc* 2006; 20: 1383–1388

Suebnuakarn S, Hataidechadusadee R, Suwannasri N, Suprasert N, Rhienmora P, Haddawy P. Access cavity preparation training using haptic virtual reality and microcomputed tomography tooth models. *Int Endod J* 2011; 44: 983–989

Tanzawa T, Futaki K, Kurabayashi H, Goto K, Yoshihama Y, Hasegawa T, Yamamoto M, Inoue M, Miyazaki T, Maki K. Medical emergency education using a robot patient in a dental setting. *Eur J Dent Educ* 2013; 17: e114-9

Vincent M, Joseph D, Amory C, Paoli N, Ambrosini P, Mortier É, Tran N. Contribution of Haptic Simulation to Analogic Training Environment in Restorative Dentistry. *J Dent Educ* 2020; 84: 367–376

Welk A, Splieth C, Rosin M, Kordass B, Meyer G. DentSim - a future teaching option for dentists. *Int J Comput Dent* 2004; 7: 123–130

Welk A, Splieth C, Seyer D, Rosin M, Siemer M, Meyer G. German dental faculty attitudes towards computer-assisted simulation systems correlated with personal and professional profiles. *Eur J Dent Educ* 2006; 10: 87–95

Wolgin M, Grabowski S, Elhadad S, Frank W, Kielbassa AM. Comparison of a prepCheck-supported self-assessment concept with conventional faculty supervision in a pre-clinical simulation environment. *Eur J Dent Educ* 2018; 22: e522-e529

Zafar S, Lai Y, Sexton C, Siddiqi A. Virtual Reality as a novel educational tool in pre-clinical paediatric dentistry training: Students' perceptions. *Int J Paediatr Dent* 2020; 30: 791–797

Zheng J, Cao X, Lin Y, Zhang J, Feng X. An introduction of DentSim in pre-clinical dental training and practice. *Shanghai Kou Qiang Yi Xue* 2014; 23: 749–754

Zitzmann NU, Matthisson L, Ohla H, Joda T. Digital Undergraduate Education in Dentistry: A Systematic Review. *Int J Environ Res Public Health* 2020; 17: 3269

9. Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich zunächst bei all denjenigen bedanken, die die Realisierung dieser Promotionsarbeit ermöglicht und mich während ihrer Anfertigung unterstützt haben.

Herrn Prof. Dr. Helmut Stark danke ich für die Möglichkeit, dieses Forschungsthema vertiefend bearbeiten zu können. Darüber hinaus danke ich Ihm für seine wertvolle fachliche Unterstützung während des gesamten Prozesses.

Meinen aufrichtigen Dank möchte ich Herrn Dr. Milan Stoilov, meiner Betreuungsperson, für seine herausragende Unterstützung im Rahmen meiner Promotionsarbeit aussprechen. Sein Vertrauen, seine Expertise und seine stetige Erreichbarkeit, gepaart mit der sofortigen Beantwortung meiner Fragen und unterstützendem Feedback, haben die Fertigstellung dieser Arbeit maßgeblich beeinflusst. Zudem bedanke ich mich für die Möglichkeit, die vorklinischen Räumlichkeiten und Materialien unter seiner Leitung genutzt haben zu dürfen.

Bei der Firma SIMtoCare, insbesondere Herrn Tom De Jong Boers, bedanke ich mich für die Unterstützung während meiner Versuche und für die Beantwortung zahlreicher spezifischer Fragen zum „Dente“-Simulator.

Bei den Firmen Dentsply Sirona, Frasaco GmbH, Image Navigation, Kavo Dental GmbH sowie Planmeca bedanke ich mich für die Bereitstellung und Nutzungserlaubnis der verwendeten Bilder.

Ein weiterer großer Dank gilt meiner Freundin Leonie für die umfassende Unterstützung und das jederzeitige Korrekturlesen.

Schließlich bedanke ich mich bei meinen Eltern und Großeltern für Ihre unermüdliche und bedingungslose Hilfe über mein gesamtes Leben hinweg. Ihr beständiges

Engagement und ihre wertvollen Ratschläge haben sich als fundamentale Stütze erwiesen, die es mir ermöglichte, meine akademischen Ziele zu erreichen.