

Aus der Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie  
(Prof. Dr. med. dent. A. Wiegand)  
im Zentrum Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde  
der Medizinischen Fakultät der Universität Göttingen

# **Klinische Performance von CAD/CAM- gefertigten Keramik-Teilrestaurationen – ein Vergleich zwischen Studierenden und Zahnärzten**

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades  
für Zahnheilkunde  
der Medizinischen Fakultät der  
Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von

**Clemens Lechte**

aus

Einbeck

Göttingen 2023

Dekan: Prof. Dr. med. W. Brück

### **Betreuungsausschuss**

Betreuerin: Prof. Dr. med. dent. A. Wiegand

Ko-Betreuer: Prof. Dr. med. dent. P. F. Meyer-Marcotty

### **Prüfungskommission**

Referentin: Prof. Dr. med. dent. A. Wiegand

Ko-Referent: Prof. Dr. med. dent. P. F. Meyer-Marcotty

Drittreferent: Prof. Dr. mult. T. Meyer

Datum der mündlichen Prüfung: 22.06.2023

Hiermit erkläre ich, die Dissertation mit dem Titel „Klinische Performance von CAD/CAM-gefertigten Keramik-Teilrestaurationen – ein Vergleich zwischen Studierenden und Zahnärzten“ eigenständig angefertigt und keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet zu haben.

Göttingen, den .....

.....

(Unterschrift)

Die Daten, auf denen die vorliegende Arbeit basiert, wurden publiziert:

**Lechte C**, Hausdörfer T, Kanzow P, Rödiger T, Wiegand A (2022): Clinical performance of CAD-CAM partial-coverage restorations: Experienced versus less-experienced operators. J Prosthet Dent, S0022-3913(22)00624-2

**Lechte C**, Hausdörfer T, Kanzow P, Rödiger T, Wiegand A: Klinische Performance von CAD/CAM-gefertigten Keramik-Teilrestorationen – ein Vergleich zwischen Studierenden und Zahnärzt\*innen. Abstractbuch der DGZ-Jahrestagung, Würzburg 2022

## Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>IV</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Restaurative Therapie von Zahnhartsubstanzdefekten.....	2
1.1.1 Ursachen.....	2
1.1.2 Therapieoptionen .....	3
1.2 Dentalkeramiken .....	5
1.2.1 Definition .....	5
1.2.2 Silikatkeramiken .....	6
1.2.3 Oxidkeramiken .....	8
1.2.4 Hybrid-/Verbundkeramiken.....	8
1.3 Klinisches Procedere zur Anfertigung keramischer Restaurationen.....	9
1.3.1 Präparation.....	9
1.3.2 Abformung.....	9
1.3.3 Konventionelle Herstellung.....	10
1.3.4 CAD/CAM-Verfahren.....	10
1.3.5 Adhäsive Befestigung.....	13
1.4 Restaurative Behandlung durch Studierende .....	13
1.5 Fragestellung .....	17
<b>2 Material und Methoden .....</b>	<b>18</b>
2.1 Ethikantrag.....	18
2.2 Patient*innenrekrutierung .....	18
2.3 Eingeschlossene Restaurationen .....	18
2.4 Klinische Untersuchung.....	19
2.5 Kalibrierung der Untersucherinnen .....	20
2.6 Bestandteile der klinischen Nachuntersuchung .....	20
2.6.1 Basisdaten der Restauration .....	20
2.6.2 Sensibilitätstest .....	20
2.6.3 Parodontaler und gingivaler Zustand.....	20
2.6.4 FDI-Kriterien.....	21
2.7 Statistische Methoden .....	23
2.7.1 Fallzahlberechnung .....	23
2.7.2 Statistische Auswertung .....	24
<b>3 Ergebnisse.....</b>	<b>25</b>
3.1 Kaplan-Meier-Kurven.....	26

---

3.1.1	Überlebensrate.....	26
3.1.2	Erfolgsrate.....	27
3.1.3	Potentielle Einflussfaktoren .....	28
3.2	Vergleich Studierende - Zahnärzt*innen .....	28
3.2.1	Überlebensrate.....	28
3.2.2	Erfolgsrate.....	29
3.2.3	FDI-Kriterien.....	30
3.2.4	Versagensursachen .....	32
3.3	Untersucherinnenübereinstimmung .....	32
<b>4</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>34</b>
4.1	Diskussion der Methode .....	34
4.1.1	Studiendesign .....	34
4.1.2	Patient*innenkollektiv .....	35
4.1.3	Bewertungskriterien.....	36
4.1.4	Untersucherinnenkalibrierung und Kalkulation der Übereinstimmung.....	37
4.2	Diskussion der Ergebnisse .....	37
4.2.1	Überleben und Erfolg von keramischen Teilrestorationen.....	37
4.2.2	Vergleich zwischen Studierenden und Zahnärzt*innen .....	39
4.2.3	Versagensursachen der Restaurationen .....	41
4.2.4	Potentielle Einflussfaktoren .....	44
4.3	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	45
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>47</b>
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>48</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: CAD/CAM-Workflow .....	11
Abbildung 1.2: Entwicklung des CEREC-Systems.....	12
Abbildung 3.1: Überlebensrate aller Restaurationen und Restaurationen unter Risiko.....	26
Abbildung 3.2: Erfolgsrate aller Restaurationen und Restaurationen unter Risiko .....	27
Abbildung 3.3: Überlebensrate der Restaurationen in Abhängigkeit von Behandlung durch Studierende oder Zahnärzt*innen.....	29
Abbildung 3.4: Erfolgsrate der Restaurationen in Abhängigkeit von Behandlung durch Studierende oder Zahnärzt*innen.....	30

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1: chemische Zusammensetzung von Hartporzellan und Dentalkeramik.....	6
Tabelle 1.2: Einteilung der Dentalkeramiken .....	6
Tabelle 2.1: Graduierung des PBI .....	21
Tabelle 2.2: Bewertung anhand FDI-Kriterien.....	22
Tabelle 3.1: Gruppenverteilung der eingeschlossenen Restaurationen .....	25
Tabelle 3.2: Univariate Effekte potentieller Einflussfaktoren auf Überleben und Erfolg der Restaurationen .....	28
Tabelle 3.3: Vergleich der FDI-Kriterien zwischen Studierenden und Zahnärzt*innen .....	31
Tabelle 3.4: Untersucherinnenübereinstimmung bei der Erhebung der FDI-Kriterien ..	33



## Abkürzungsverzeichnis

BEMA	Einheitlicher Bewertungsmaßstab für zahnärztliche Leistungen
CAD	<i>computer-aided design</i>
CAM	<i>computer-aided manufacturing</i>
CMD	craniomandibuläre Dysfunktion
COSMO	COVID-19 Snapshot Monitoring in Germany
COVID-19	<i>Coronavirus Disease 19</i>
DGZ	Deutsche Gesellschaft für Zahnerhaltung
DRKS	Deutsches Register Klinischer Studien
EFCD	European Federation of Conservative Dentistry
FDI	FDI World Dental Federation
GOZ	Gebührenordnung für Zahnärzte
ICC	Intraklassenkorrelation
mAFR	mittlere jährliche Verlustrate
MFT	Medizinischer Fakultätentag der Bundesrepublik Deutschland e.V.
NKLZ	nationaler kompetenzbasierter Lernzielkatalog Zahnmedizin
ORCA	European Organisation for Caries Research
PBI	modifizierter Papillen-Blutungs-Index
USPHS	United States Public Health Service

## 1 Einleitung

Größere Zahnhartsubstanzdefekte können mit keramischen Restaurationen versorgt werden. Die Versorgung mit einer keramischen Restauration (Inlay, Teilkrone oder Krone) erfordert eine Präparation des zu behandelnden Zahns, welche anschließend konventionell oder optisch abgeformt wird. Traditionell erfolgt in einem zahntechnischen Labor nach Modellerstellung dann die Herstellung der Restauration durch eine\*n Zahntechniker\*in. Die\*der Behandelnde übernimmt dann wieder die Schritte der Anpassung und Eingliederung an der\*dem Patient\*in. Im Gegensatz dazu liegt bei der Anwendung eines Chairside-Systems die Verantwortung aller Schritte bei der\*dem Behandelnden selbst: nach dem optisch-digitalen Einscannen der Präparation und aller relevanten Nachbarstrukturen mit einer Intraoralkamera erfolgt eine computergestützte Konstruktion (computer-aided design, CAD) sowie das Schleifen (computer-aided manufacturing, CAM) und ggfs. Brennen der keramischen Restauration direkt durch die\*den Behandelnde\*n. Nach Einpassen erfolgt unter absoluter Trockenlegung das adhäsive Zementieren mit Hilfe eines geeigneten Adhäsivsystems und Befestigungskomposits (Ender et al. 2011).

Für konventionell gefertigte keramische Einzelzahnrestaurationen (Inlays, Onlays, Teilkronen) aus Feldspat- bzw. Glaskeramik wurden in einer systematischen Übersichtsarbeit Überlebensraten von 92 % bzw. 95 % nach fünf Jahren und 91 % nach zehn Jahren berichtet (Morimoto et al. 2016). Für Zirkonoxidkronen werden Überlebensraten von 93,8 % nach fünf Jahren und für Kronen aus Lithiumdisilikat- oder leuzitverstärkter Keramik von 96,6 % nach fünf Jahren angegeben (Sailer et al. 2015; Sailer et al. 2016).

Im Vergleich dazu zeigen CAD/CAM-Einzelzahnrestaurationen etwas niedrigere Überlebensraten, die wahrscheinlich dem komplexen und techniksensitiveren Herstellungsprozess geschuldet sind (Rodrigues et al. 2019). Verschiedene Untersuchungen haben in diesem Zusammenhang gezeigt, wie die Behandlungserfahrung die Umsetzung verschiedener Behandlungsschritte, z. B. intraorale Abformung (Ahmed et al. 2021; Resende et al. 2021; Zarauz et al. 2021), computergestützte Konstruktion (Son und Lee 2020), Individualisierung der Restauration (Gold et al. 2020), Randgenauigkeit der Restauration (Baig et al. 2016) oder adhäsive Befestigung (Unlu et al. 2012; Shafiei et al. 2019), im CAD/CAM-Workflow beeinflusst. Weniger erfahrene Behandler\*innen brauchen in der Regel mehr Zeit und/oder Übung als erfahrene Behandler\*innen, um das gleiche Ergebnis zu erzielen. Entsprechend wäre es denkbar, dass die Behand-

lungserfahrung auch die klinische Performance von CAD/CAM-Restaurationen beeinflusst.

Im Kurs der Zahnerhaltungskunde II der Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie werden regelmäßig keramische Teilrestaurationen im CAD/CAM-Verfahren gefertigt. Die Studierenden führen die gesamte Behandlung einschließlich der CAD/CAM-Herstellung der Restauration selbstständig unter der Aufsicht von Zahnärzt\*innen durch. Verschiedene Studien haben gezeigt, dass durch Studierende angefertigte CAD/CAM-Restaurationen eine gute Überlebensrate aufweisen (Wrbas et al. 2007; Vogl et al. 2016; Scholz et al. 2021; Aziz et al. 2022). Bislang ist jedoch nicht untersucht, ob von Studierenden angefertigte Restauration eine ähnliche Qualität und Überlebensrate wie solche von Zahnärzt\*innen aufweisen.

Ziel dieser Arbeit ist die Nachuntersuchung der in den Studierendenkursen angefertigten CAD/CAM-Restaurationen aus Lithiumdisilikatkeramik hinsichtlich ihrer Überlebensrate und funktioneller, ästhetischer und biologischer Parameter und der Vergleich mit Restaurationen, die in demselben Zeitraum von Zahnärzt\*innen der Poliklinik hergestellt wurden. Als Nullhypothese wird definiert, dass von Studierenden gefertigte CAD/CAM Keramik-Restaurationen sich bezüglich der Überlebensrate sowie der funktionellen, ästhetischen und biologischen Erfolgsparameter nicht von denen approbierter Zahnärzt\*innen unterscheiden.

## **1.1 Restaurative Therapie von Zahnhartsubstanzdefekten**

### **1.1.1 Ursachen**

Große Zahnhartsubstanzdefekte, welche eine restaurative Versorgung unabdingbar machen, entstehen häufig auf Grund von Karies. Ebenso kann es notwendig sein, nicht-kariesbedingte Zahnhartsubstanzdefekte wie Abrasionen, Attritionen und Erosionen sowie Defekte auf Grund eines dentalen Traumas restaurativ zu versorgen.

Karies ist definiert als die Zerstörung von Zahnhartsubstanz durch bakterielle, saure Stoffwechselprodukte, die bei der Fermentierung von Kohlenhydraten entstehen (Selwitz et al. 2007). Es handelt sich dabei um eine nicht-übertragbare, ernährungsabhängige, multifaktorielle Erkrankung, beeinflusst durch biologische und psychosoziale Faktoren ebenso wie Verhaltens- und Umweltfaktoren (Machiulskiene et al. 2020). Karies kann abhängig von Läsionsgröße, Läsionsaktivität, Kavitation der Oberfläche und damit Pflegbarkeit sowie individuellem Kariesrisiko non- und mikro-invasiv, aber auch restaurativ therapiert werden. Eine restaurative und damit invasive Therapie ist vorran-

gig bei aktiven Läsionen mit kavittierter Oberfläche indiziert (Schwendicke et al. 2019; Splieth et al. 2020).

Zu den nicht kariös-bedingten Zahnhartsubstanzdefekten zählen neben den erosiven Zahnhartsubstanzdefekten auch Abrasionen und Attritionen (Warreth et al. 2020). Erosive Zahnhartsubstanzdefekte sind definiert als säurebedingter Zahnhartsubstanzverlust ohne Beteiligung von bakteriellen Stoffwechselprodukten, die durch mechanische Abnutzung verstärkt werden (Schlüter et al. 2020). Abrasionen beschreiben die Abnutzung von Zahnhartsubstanz durch Kontakt zu anderen Materialien, während Attritionen durch Zahn-zu-Zahn-Kontakte entstehen (Addy und Shellis 2006). Je nach Ausprägungsgrad des Zahnhartsubstanzverlustes kann ein Monitoring, aber auch eine direkte oder komplexere indirekte restaurative Therapie notwendig sein (Warreth et al. 2020). Eine restaurative Therapie ist dabei meist dann indiziert, wenn freiliegendes Dentin Hypersensibilitäten, einen Bisshöhenverlust oder ästhetische Einschränkungen verursacht (Kaidonis 2012).

Auch dentale Traumata können zu Zahnhartsubstanzverlust führen, welcher restaurativ therapiert werden muss (Bourguignon et al. 2020).

### **1.1.2 Therapieoptionen**

Als Materialien für die permanente direkte Restauration von Zahnhartsubstanzdefekten kommen insbesondere plastische Füllungsmaterialien in Betracht. Die erhöhte Nachfrage nach zahnfarbenen Restaurationen führt zur vermehrten Anwendung von Kompositen im Vergleich zu Amalgam (Worthington et al. 2021). Eine gemeinsame Konsensempfehlung der European Organisation for Caries Research (ORCA), der European Federation of Conservative Dentistry (EFCD) und der Deutschen Gesellschaft für Zahnerhaltung (DGZ) empfiehlt zur Restauration kavittierter Läsionen primär adhäsiv befestigte Füllungsmaterialien, während Amalgam eher unter Berücksichtigung der geltenden Richtlinien Situationen vorbehalten bleibt, in denen eine adäquate Adhäsivtechnik beispielsweise mangels Trockenlegung nicht angewendet werden kann (Schwendicke et al. 2020).

Direkte Kompositrestaurationen zeigen in zahlreichen Studien sehr gute klinische Überlebensraten. Heintze und Rousson (2012) konnten hier eine Erfolgsrate von 92 % über 10 Jahre für ein- und mehrflächige Restaurationen nachweisen. Opdam et al. (2014) zeigten in einer weiteren systematischen Übersichtsarbeit außerdem jährliche Verlustraten von 1,8 % nach fünf Jahren und 2,4 % nach zehn Jahren, wobei überwiegend Klasse-II-Restaurationen in die Meta-Analyse einbezogen wurden und die Anzahl der restaurierten Flächen einen signifikanten Risikofaktor darstellte. Eine andere Studie berichtet für Hybridkomposite eine jährliche Verlustrate von 1 bis 3 %, wobei mehrflä-

chige Restaurationen ein höheres Versagensrisiko aufweisen als einflächige Füllungen (Demarco et al. 2012). Komposite sind insgesamt wegen ihrer guten Ästhetik und guten klinischen Einsetzbarkeit das Material erster Wahl für direkte Restaurationen im Seitenzahnbereich (Demarco et al. 2012; Lynch et al. 2014). Verschiedene Studien konnten außerdem zeigen, dass Kompositmaterialien auch für die direkte Versorgung großer, höckereinbeziehender Zahnhartsubstanzdefekte geeignet sein können (Deliperi und Bardwell 2006; Scholtanus und Özcan 2014; Borgia et al. 2019). Im ersten Jahr nach Insertion dominiert als Grund für ein Versagen von Kompositrestaurationen die endodontische Komplikation, danach spielen Sekundärkaries und Restorationsfrakturen die größte Rolle (Opdam et al. 2014).

Als Indikationen für indirekte Restaurationen werden von Opdam et al. (2016) ausge dehnte Versorgungen zum Management von Okklusion und Vertikaldimension, Erfordernis einer optimalen Form und maximaler Ästhetik und auch ein zu hoher Schwierigkeitsgrad bei direkter Technik genannt. Endodontisch therapierte Zähne nehmen u.a. aufgrund ihres häufig sehr großen Zahnhartsubstanzverlusts und der damit einhergehenden Frakturanfälligkeit eine Sonderstellung ein (Bhuva et al. 2021). Diese können bei ein- bis zweiflächigen Defekten noch direkt versorgt, sollten darüber hinaus aber mit höckerüberkuppelnden indirekten Restaurationen versorgt werden (Suksaphar et al. 2018; Atlas et al. 2019; Chotvorrarak et al. 2021). Zusammenfassend sind indirekte, höckerüberkuppelnde Restaurationen immer dann indiziert, wenn Zähne strukturell kompromittiert sind. Dies gilt insbesondere für endodontisch therapierte Zähne (Schwendicke et al. 2020).

Als indirekte Versorgungsformen partieller Zahnhartsubstanzdefekte kommen sowohl die klassischen Gussrestaurationen aus Edelmetall oder Nicht-Edelmetall, als auch adhäsiv befestigte keramische Teilrestaurationen in Frage. Dabei wird die Ausführungsform maßgeblich von der intakten Restzahnartsubstanz bestimmt: Inlays ersetzen einen Teil der Kaufläche. Sobald die tragenden Höcker einbezogen werden, spricht man von einem Onlay und bei Einbezug aller Höcker von einem Overlay. Kommen hier noch eine oder mehrere Zahnwände hinzu, handelt es sich um eine Teilkrone, wobei die Übergänge zwischen den einzelnen Varianten als fließend zu betrachten sind (Ohlmann et al. 2017a).

Für Gussrestaurationen werden sehr gute Überlebensraten von 97,6 % nach fünf Jahren, 96,1 % nach zehn Jahren und 87,0 % nach 20 Jahren angegeben. Die Hauptursache für ein Versagen einer Goldrestauration ist Sekundärkaries, eine weitere häufige Ursache ist die Dezementierung (Studer et al. 2000). Auch eine Studie zur Lebensdauer von Goldinlays berichtet über hohe Überlebensraten von 97,0 % nach zehn Jahren und 94,1 % nach 20 Jahren (Bandlish und Mariatos 2009).

Trotz dieser exzellenten Eigenschaften von Gussrestorationen werden aufgrund der erhöhten Nachfrage nach zahnfarbenen und minimalinvasiveren Restaurationen keramische Teilrestorationen deutlich häufiger angefertigt (Makhija et al. 2016; Kanzow et al. 2019; Rauch et al. 2021). Auch keramischen Restaurationen zeigten in zahlreichen Studien gute klinische Ergebnisse: Für vollkeramische Onlays werden in einer systematischen Übersichtsarbeit Überlebensraten von 91 bis 100 % für Restaurationen mit einer Lebensdauer von zwei bis fünf Jahren und 71 bis 98,5 % für Restaurationen älter als fünf Jahre angegeben. Als Hauptgrund für Restaurationsversagen wird die Fraktur der Restauration gefolgt von der Dezementierung genannt (Abduo und Sambrook 2018). Eine weitere systematische Übersichtsarbeit gibt eine 5-Jahres-Überlebensrate von 97,8 % für Lithiumdisilikatkronen an, ohne allerdings hinsichtlich des Herstellungsverfahrens (konventionell oder CAD/CAM) zu unterscheiden (Pieger et al. 2014).

In einer klinischen prospektiven Split-mouth-Studie wurden gepresste und im CAD/CAM-Verfahren hergestellte keramische Teilkronen verglichen. Nach sieben Jahren ergab sich für die gepressten Restaurationen eine Überlebensrate von 100 %, für die CAD/CAM-Restaurationen 97 % (Guess et al. 2013). Bei einer Nachuntersuchung von 2328 CAD/CAM-Inlays und Onlays in einer privaten Praxis zeigten sich Überlebensraten von 97,4% nach fünf Jahren und 95,5 % nach neun Jahren. Es gab dabei keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich Zahntyp und Anzahl einbezogener Zahnflächen (Posselt und Kerschbaum 2003).

Beim Vergleich von Gold- und Keramikteilkronen zeigt sich nach fünfeinhalb Jahren kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Überlebensraten (Gold: 93,3 %, Keramik: 88,8 %), wobei Keramikteilkronen jedoch eine signifikante Verschlechterung der marginalen Adaptation aufwiesen (Federlin et al. 2010). Ein weiterer Vergleich nach sieben Jahren zeigt ebenfalls keinen signifikanten Unterschied zwischen den Überlebensraten (Gold:  $96 \pm 4$  %, Keramik:  $81 \pm 15$  %) und auch die United States Public Health Service (USPHS)-Kriterien waren nicht signifikant unterschiedlich (Wagner et al. 2003).

## 1.2 Dentalkeramiken

### 1.2.1 Definition

Keramiken werden als anorganische, nicht metallische Materialien, die über einen thermischen Prozess hergestellt werden, beschrieben (Lohbauer et al. 2018). Alle Keramiken vereinen spezifische Eigenschaften (Munz und Fett 1999): geringe thermische Leitfähigkeit, geringe Dichte, Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit, geringe Zugfestigkeit, Sprödigkeit und subkritisches Risswachstum. Keramische Massen werden im

Dreistoffsystem Tonmineralsubstanz-Feldspat-Quarz beschrieben, wobei sich klassische Dentalkeramiken auf Grund ihrer Zusammensetzung (Tabelle 1.1) im Feld des Leuzits befinden (Geis-Gerstorfer 1996).

Tabelle 1.1: chemische Zusammensetzung von Hartporzellan und Dentalkeramik (Feldspatkeramik) (Geis-Gerstorfer 1996)

	<b>Haushaltsporzellan</b>	<b>Dentalkeramik</b>
Feldspat	10-30 %	70-80 %
Quarz	15-35 %	10-30 %
Kaolin	40-70 %	0-3 %

Besonders interessant ist die Verwendung von Dentalkeramiken nicht nur wegen ihrer ästhetischen Eigenschaften, sondern vor allem auch wegen ihrer sehr guten Biokompatibilität (Rosentritt et al. 2018). Um die Vielzahl an dentalkeramischen Systemen und ihre Anwendung besser zu überblicken, hat sich eine Aufteilung anhand ihrer Zusammensetzung etabliert, welche in Tabelle 1.2 dargestellt ist.

Tabelle 1.2: Einteilung der Dentalkeramiken nach Zusammensetzung (Gracis et al. 2015; Lohbauer et al. 2018)

<b>Silikatkeramik</b>	<b>Oxidkeramik</b>	<b>Hybridkeramik</b>
Feldspat	Zirkonoxid	Resin-Nanokeramik
Leuzit	Aluminiumoxid	polymerinfiltrierte Keramik
Lithiumdisilikat/ zirkonoxidverstärktes Lithiumsilikat	Kombination Aluminiumoxid/ Zirkonoxid	glasinfiltrierte Keramik
Fluorapatit		

### 1.2.2 Silikatkeramiken

Silikatkeramiken werden auch als Glaskeramiken bezeichnet. Dies liegt darin begründet, dass bei ihrer Herstellung zunächst ein Rohling aus einer Glasschmelze erzeugt wird (Lohbauer et al. 2018). Ausgangsmaterialien hierfür können natürliche Rohstoffe (z.B. Quarz und Feldspat) sein oder Stoffe, mithilfe chemisch-technischer Prozesse hergestellt werden (Alkali- und Erdalkal karbonate, Aluminiumhydroxid, verschiedene andere Oxide) (Rosentritt et al. 2018). In weiteren Schritten wird dann eine Kristallbildung stimuliert, wobei hier je nach chemischer Zusammensetzung und Prozesspara-

metern unterschiedliche Kristallstrukturen und damit Silikatkeramiken mit unterschiedlichen Eigenschaften entstehen (Rosentritt et al. 2019a).

Die klassische Glaskeramik ist die Feldspatkeramik, wobei sich der Name aus dem verwendeten Rohstoff ableitet (Rosentritt et al. 2018). Vitablocs® Mark I und II (VITA Zahnfabrik H. Rauter GmbH & Co.KG, Bad Säckingen, Deutschland) sind solche Feldspatkeramiken und kamen in den Anfängen der chairside CAD/CAM-Fertigung von Keramik-Teilrestorationen trotz ihrer geringen Biegefestigkeit von nur ca. 100 MPa vielfach zum Einsatz (Bindl et al. 2003; Li et al. 2014). Feldspatkeramik kann auch in der Schlickertechnik verarbeitet werden und weist sehr gute ästhetische Eigenschaften auf, weshalb sich ihr Indikationsspektrum vorrangig auf den Einsatz als Verblendkeramik oder für die Herstellung von Veneers beschränkt (Lohbauer et al. 2018).

Bei den leuzitverstärkten Feldspatkeramiken liegt ein erhöhter Anteil an Leuzitkristallen vor, der für eine Steigerung der Festigkeit auf ca. 140 MPa sorgt. Bekanntester Vertreter der leuzitverstärkten Feldspatkeramiken ist das IPS Empress® der Firma Ivoclar Vivadent AG (Schaan, Liechtenstein), welches Ende der 80er Jahre als Presskeramik auf den Markt kam (Gehre und Kappert 2008). Diese Keramik ist seit 2006 als IPS Empress® CAD mit einer Biegefestigkeit von ca. 160 MPa zur Verarbeitung in CAD/CAM-Systemen verfügbar (Li et al. 2014).

Mit der Einführung der Lithiumdisilikatkeramik IPS Empress® 2 im Jahr 1998 wurden die mechanischen Eigenschaften der Silikatkeramiken mit Biegefestigkeiten bis 350 MPa deutlich verbessert. Als Weiterentwicklung dieses Systems kam die Lithiumdisilikatkeramik IPS e.max® der Firma Ivoclar Vivadent AG (Schaan, Liechtenstein) auf den Markt. Diese ist sowohl als Presskeramik als auch in vorkristallisiertem Zustand als CAD/CAM-Keramik verfügbar (Zarone et al. 2016). Eine Modifikation der Lithiumdisilikatkeramiken stellen die sogenannten zirkonoxidverstärkten Lithiumsilikatkeramiken dar. Diese enthalten ungefähr zehn Prozent Zirkondioxidkristalle in ihrer Matrix, was zur Ausbildung von deutlich kleineren Lithiumsilikatkristallen führt. Kommerziell verfügbar ist diese Keramik als VITA Suprinity® (VITA Zahnfabrik H. Rauter GmbH & Co.KG, Bad Säckingen, Deutschland) und als Celtra® Duo (Dentsply Sirona Deutschland GmbH, Bensheim, Deutschland) (da Silva et al. 2017).

Eine aktuelle systematische Übersichtsarbeit kommt zu dem Schluss, dass es keine signifikanten Unterschiede bei der mechanischen Belastbarkeit von zirkonoxidverstärkter Lithiumsilikatkeramik und Lithiumdisilikatkeramik für die CAD/CAM-Fertigung gibt (Zarone et al. 2021). Daher haben beide Materialien auch ein übereinstimmendes Indikationsspektrum von der keramischen Teilrestauration (Veneer, Inlay, Onlay, Teilkro-



ne), über Kronen bis hin zu dreigliedrigen Brücken bis zum Prämolarenbereich (Schmid et al. 2021).

Im März 2021 wurde von der Firma Dentsply Sirona Deutschland GmbH (Bensheim, Deutschland) mit CEREC Tessera™ eine weiterentwickelte Lithiumdisilikatkeramik auf den Markt gebracht. Diese enthält unter anderem Virgilit (Lithiumaluminiumsilikat) und soll gegenüber herkömmlichen Lithium-X-silikatkeramiken eine gesteigerte Biegefestigkeit und kürzere Brenndauer aufweisen (Kadlecová 2021). Eine aktuelle in vitro-Studie sieht keinen Unterschied hinsichtlich der Frakturanfälligkeit verglichen mit einer herkömmlichen Lithiumdisilikatkeramik (Rosentritt et al. 2022).

### 1.2.3 Oxidkeramiken

Populärster Vertreter der Oxidkeramiken ist heutzutage Zirkoniumdioxid, welches häufig als Zirkonoxid bezeichnet wird (Lohbauer et al. 2018). Zirkonoxid wird maschinell im CAD/CAM-Verfahren bearbeitet. Die gefräste Restauration unterliegt beim obligat folgenden Sintervorgang einer Schrumpfung von ca. 20 bis 30 % (Stawarczyk et al. 2016). Entscheidend für die Eigenschaften von Zirkonoxid ist die vorliegende Struktur des Kristallgitters: kubisch, tetragonal oder monoklin. Bei dentalem Zirkonoxid findet eine Stabilisierung in der tetragonalen oder kubisch-tetragonalen Phase durch Dotierung mit einem Oxid, oft mittels Yttriumoxid, statt. Der Anteil der tetragonalen und kubischen Phase am Gesamtgefüge unterscheidet auch die Generationen von Zirkonoxid. Vereinfacht lässt sich feststellen, dass je höher der Anteil der kubischen Phase ist, desto transluzenter, aber auch weniger biegefest ist das Zirkonoxid (Rosentritt et al. 2019b). Oxidkeramiken haben wegen ihrer hohen mechanischen Belastbarkeit je nach eingesetzter Generation ein sehr breites Indikationsspektrum vom Veneer bis zur Totalprothese und erlauben geringe Mindeststärken und damit eine minimalinvasive Präparation (Rosentritt et al. 2019c). Dabei wurden Oxidkeramiken im Laufe ihrer Entwicklung zunächst als Gerüstmaterial (Filser et al. 2001), mittlerweile aber auch vielfach als monolithische Restauration eingesetzt (Rosentritt et al. 2019b) .

### 1.2.4 Hybrid-/Verbundkeramiken

Zu den Hybrid-/Verbundkeramiken zählen neben den glasinfiltrierten Keramiken (Lohbauer et al. 2018) auch die Keramik-verstärkten Polymere. Diese lassen sich weiter nach der Methode untergliedern, mit der die Keramik in die Polymermatrix eingebracht wird (Duarte et al. 2016). Hier werden Resin-Nanokeramiken von polymerinfiltrierten Keramiken unterschieden, wobei beide Varianten mittels CAD/CAM-System verarbeitet und für Einzelzahnrestaurationen verwendet werden (Sonmez et al. 2018; Steinbrenner 2018).

## **1.3 Klinisches Procedere zur Anfertigung keramischer Restaurationen**

### **1.3.1 Präparation**

Nach Ahlers et al. (2009) ergeben sich für Keramik-Teilrestaurationen folgende Präparationsrichtlinien: runde Innenkanten, scharfe Ränder (90° zur Zahnhartsubstanz), 1,5 mm Mindestschichtstärke der Keramik, dentinadhäsive Aufbaufüllung, Dentinbegrenzung approximal bei absoluter Trockenlegung möglich. Die Begründung für diese Präparationsrichtlinien liegt sowohl im Herstellungsprozess der Restauration, als auch in den Materialeigenschaften der Keramik (Arnetzl und Arnetzl 2006). Insbesondere bei der Präparation von CAD/CAM-gefertigten Keramikrestaurationen müssen die durch das verwendete CAD/CAM-System vorgegebenen Limitationen wie Schleiferlänge und -durchmesser berücksichtigt werden (Ohlmann et al. 2017b). Eine systematische Übersichtsarbeit kommt zu dem Schluss, dass eine nicht-retentive Präparation zu einer besseren Passung von CAD/CAM-Teilrestaurationen führt als eine retentive Präparation. Dies ist darauf zurückzuführen, dass eine komplexe Präparationsgeometrie sowohl die Genauigkeit des Intraoralscans als auch des Schleifprozesses beeinträchtigen kann (Goujat et al. 2019).

### **1.3.2 Abformung**

Für die Herstellung einer Keramikrestauration muss die intraorale Situation in ein Modell überführt werden. Dies kann einerseits konventionell mittels verschiedener Abformtechniken oder auch digital erfolgen (Tsirogiannis et al. 2016). Digitale Modelle sind dann der Ausgangspunkt für die CAD/CAM-Herstellung einer indirekten Restauration (Giachetti et al. 2020). Dabei wird die dentale Situation der\*des Patient\*in einschließlich des oder der präparierten Zähne nur mit Hilfe eines dreidimensionalen, optischen Systems (Intraoralscanner) in ein digitales Modell überführt (Zimmermann und Mehl 2018). Die klassische Abformung mit Abformlöffeln und viskösen Massen entfällt, was den Komfort für die\*den Patient\*in deutlich erhöht und damit einer der größten Vorteile der digitalen Abformung ist (Cicciù et al. 2020). Zudem ist die digitale Abformung schneller als eine konventionelle Abformung (Yuzbasioglu et al. 2014), das Ergebnis der Abformung kann unmittelbar am Monitor beurteilt und bei Bedarf auch partiell korrigiert werden (Ahlholm et al. 2018). Jedoch zeigt eine aktuelle Studie, dass die Genauigkeit und die Geschwindigkeit der digitalen Abformung neben anderen Faktoren auch maßgeblich von der Erfahrung der ausführenden Person mit dem Scansystem beeinflusst wird (Ahmed et al. 2021; Resende et al. 2021; Zarauz et al. 2021).

### **1.3.3 Konventionelle Herstellung**

#### 1.3.3.1 Pressverfahren

Glaskeramiken können auch im Pressverfahren verarbeitet werden (Stawarczyk et al. 2010). Dabei werden die Restaurationen entweder konventionell aus Wachs modelliert oder im CAD/CAM-Verfahren aus einem ausbrennfähigen Wachs gefräst. Nach dem Einbetten der Modellation erfolgt dann der eigentliche Pressvorgang aus einem vorgefertigten Keramikpellet (von der Osten 2012). Es können dabei monolithische Restaurationen hergestellt werden, andererseits aber auch Gerüste, welche anschließend mit der Schlickertechnik überschichtet werden. Außerdem können beispielsweise auch Gerüste aus Zirkonoxidkeramik mit einer Presskeramik zur Verblendung überpresst werden (Rosentritt et al. 2018). Vorteile des Pressverfahrens sind die perfekte Rand- und Innenpassung der Restaurationen und die Möglichkeit, Keramiken unterschiedlicher Farben und Transluzenzen zu kombinieren (Gehre und Kappert 2008).

#### 1.3.3.2 Schicht- und Schlickerverfahren

Die Schicht- bzw. Schlickertechnik findet heute vor allem bei der Verblendung von metallischen oder keramischen Gerüsten oder bei der Herstellung von Veneers Anwendung. Dabei werden die keramischen Massen manuell entweder auf das Gerüst oder einen feuerfesten Stumpf geschichtet. Zum Einsatz kommen Glaskeramiken in Form von Pulver/Flüssigkeits- oder Pastensystemen mit hoher Transluzenz, aber geringer Biegefestigkeit (Rosentritt et al. 2018).

### **1.3.4 CAD/CAM-Verfahren**

Dentale CAD/CAM-Systeme wurden Anfang der 70er Jahre des 20. Jahrhunderts erstmals beschrieben (Duret und Preston 1991). Sie bestehen aus einer Digitalisierungseinheit (Intraoralscanner oder Modellscanner), einem Computer mit CAD/CAM-Software und einer Fertigungseinheit (z.B. Schleifeinheit) für den CAM-Prozess (Miyazaki et al. 2009; Zimmermann und Mehl 2018). Die Verfahrensschritte dieses Workflows (Abbildung 1.1) können grundsätzlich an unterschiedlichen Orten stattfinden, wonach man die digitale Prozesskette in der Zahnmedizin auch beschreiben kann: chairside und labside bzw. zentralisiert (Baroudi und Ibraheem 2015).

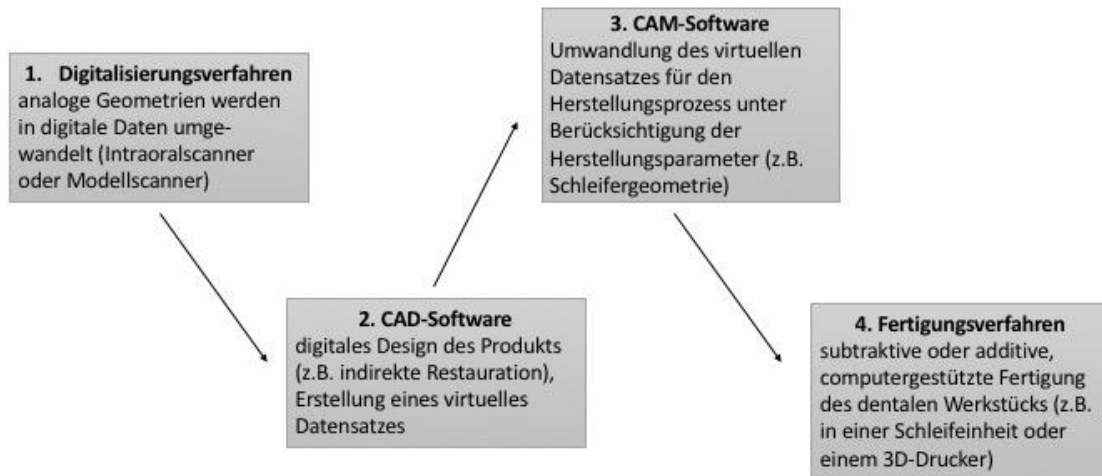


Abbildung 1.1: CAD/CAM-Workflow (Zimmermann und Mehl 2018)

#### 1.3.4.1 Chairside-Herstellung

Bei der Anwendung eines Chairside-CAD/CAM-Systems finden alle Arbeitsschritte zur Herstellung einer indirekten Restauration, sowohl die zahnärztlichen als auch die zahn-technischen, in der Praxis der\*des Behandelnden statt. Diese\*r übernimmt dabei, unterstützt von dem CAD/CAM-System, auch die vollständige zahntechnische Herstellung der indirekten Restauration. Dies ermöglicht der\*dem Behandelnden eine keramische Restauration in einer Sitzung zu präparieren, abzuformen und einzusetzen (Nassani et al. 2021). Heute sind neben dem bekannten CEREC-System (Dentsply Sirona Deutschland GmbH, Bensheim, Deutschland) auch zahlreiche weitere Systeme für einen Chairside-Workflow am Markt erhältlich (Zaruba und Mehl 2017).

Vorteile der Chairside-Anwendung vom CAD/CAM-Systemen können beispielsweise die Möglichkeit der Abformung und Darstellung in Echtzeit, die leichte und selektive Wiederholbarkeit, die Analyseoption von Präparation und Restauration, die Archivierbarkeit, Materialersparnis, die Patientenzufriedenheit und der Verzicht auf ein Provisorium sein. Nachteilig wirken sich dagegen die nötige Lernkurve, Probleme bei der Abformung der statischen und dynamischen Okklusion, Gebühren für Updates, hohe Anschaffungskosten und Einschränkung der Herstellung durch Instrumentendurchmesser, -körnigkeit und -geometrie aus (Zaruba und Mehl 2017).

### 1.3.4.2 Labside/zentralisierte Herstellung

Bei der labside bzw. zentralisierten Herstellung zahnärztlicher Restaurationen wird der CAD/CAM-Workflow entweder vollständig oder zumindest teilweise in ein zahntechnisches Labor und/oder ein industrielles Fräszentrum ausgelagert (Miyazaki et al. 2009; Zimmermann und Mehl 2018). So kann die Abformung entweder konventionell oder digital erfolgen, alle nachfolgenden Schritte der Prozesskette finden aber in jedem Fall im ausgelagerten Labor oder Fräszentrum statt (Keul et al. 2014). Vorteile der labside Herstellung sind ein größeres Material- und Indikationsspektrum und eine bessere Ressourcenausnutzung durch höhere Stückzahlen (Zimmermann und Mehl 2018).

### 1.3.4.3 CEREC-System

Der Begriff CEREC steht für „computer-assisted CERamic REConstruction“ und ist der Name eines CAD/CAM-Systems der Firma Dentsply Sirona Deutschland GmbH (Bensheim, Deutschland). Das System wurde an der Universität Zürich, Schweiz, entwickelt und dort wurde mit diesem System im September 1985 auch die erste chairside Versorgung mit einem Inlay durchgeführt (Mörmann 2006). Seitdem wurde das CEREC-System stetig weiterentwickelt und das Indikationsspektrum erweitert (Abbildung 1.2).

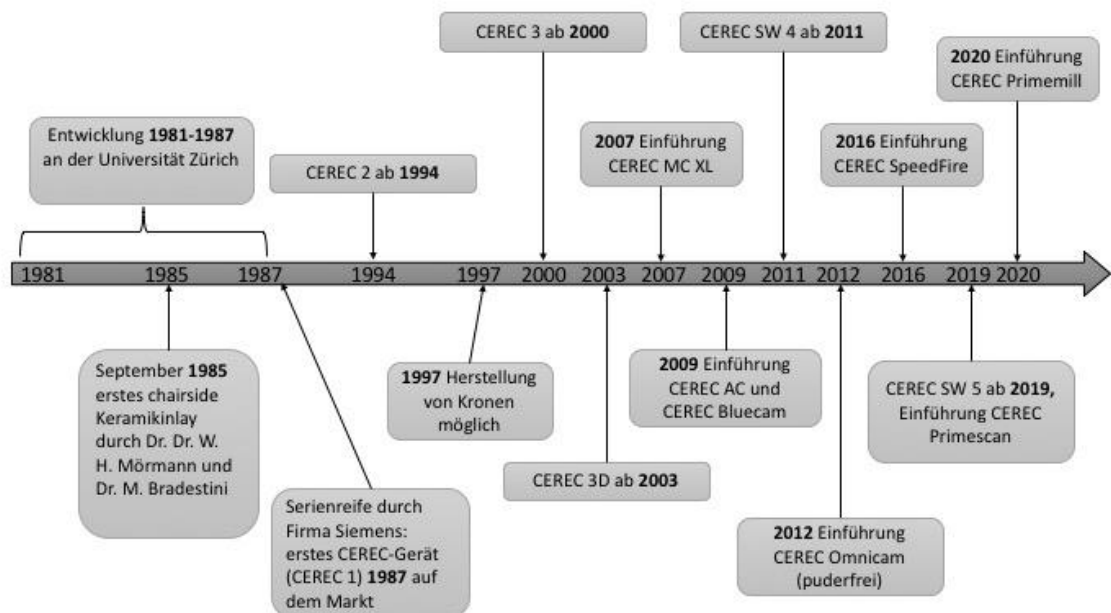


Abbildung 1.2: Entwicklung des CEREC-Systems (Mörmann 2006; Dentsply Sirona 2020)

Bei einer Umfrage in der Schweiz aus dem Jahr 2019 zum Thema digitale Technologien gaben 97 % der Praxen, die mit einem CAD/CAM-System ausgestattet sind, an, das CEREC-System zu verwenden (Mühlemann et al. 2019).

### 1.3.5 Adhäsive Befestigung

Sowohl die Materialauswahl als auch die Präparationsgeometrie machen es unabdingbar, keramische Teilrestorationen adhäsiv und damit kraftschlüssig an der verbliebenen Zahnhartsubstanz zu befestigen. Hierbei stabilisieren sich Zahn und Restauration gegenseitig (Mehl et al. 2004; Chirca et al. 2021), sodass auch Materialien mit geringeren Biegefestigkeiten eine für den Seitenzahnbereich ausreichende Stabilität erreichen. Außerdem bedingt auch die nicht-retentive, defektbezogene Präparation eine adhäsive Befestigung um eine ausreichende Retention zu erreichen, die sich dann nicht aus der Geometrie, sondern dem Verbund zwischen Zahnhartsubstanz und Restauration ergibt (Schmalz et al. 2007). Dieser Verbund kann entweder mithilfe eines klassischen Adhäsivsystems in Kombination mit einem Befestigungskomposit oder mit einem selbstadhäsiven Befestigungskomposit erreicht werden (Peutzfeldt et al. 2011). Bei den Adhäsivsystemen unterscheidet man nach Anwendungsmodus Etch-and-Rinse und Self-Etch Systeme. Eine Sonderstellung nehmen sogenannte Universaladhäsive ein, da diese in allen Anwendungsmodi appliziert werden können. Kombiniert werden muss ein solches Adhäsivsystem bei der Eingliederung von indirekten Restaurationen mit einem dual- oder lighthärtenden Befestigungskomposit (Sarr et al. 2010; van den Breemer et al. 2015; Scholz et al. 2021). Bei den selbstadhäsiven Befestigungskompositen wird die Funktion von Adhäsivsystem und Befestigungskomposit in einem Material kombiniert (Radovic et al. 2008).

Wichtig bei der adhäsiven Befestigung keramischer Restaurationen ist neben der Auswahl eines geeigneten Befestigungsmaterials auch die materialspezifisch korrekte Konditionierung der Restauration. Bei einer Lithiumdisilikatrestauration erfolgt zunächst eine Ätzung der Restauration mit Flußsäure und anschließend eine Silanisierung der geätzten Oberfläche (Pisani-Proenca et al. 2006). Auch die Verwendung eines Keramikprimers, in dem beide Funktionen kombiniert werden, ist möglich (Vichi et al. 2021; Awad et al. 2022).

## 1.4 Restaurative Behandlung durch Studierende

Das Studium der Zahnheilkunde zielt darauf ab, mit der Approbation eine\*n berufsfertige\*n Zahnärzt\*in zu entlassen. Daher liegt ein Schwerpunkt der zahnärztlichen Ausbildung in dem Erlernen praktischer Fertigkeiten für den späteren Berufsalltag. Nach der von 1955 bis 2020 geltenden Approbationsordnung für Zahnärzte umfasst das Studium der Zahnheilkunde einen vorklinischen und einen klinischen Studienabschnitt von je fünf Semestern Dauer. Im vorklinischen Studienabschnitt werden praktische Fertigkeiten zunächst im Kurs der Technischen Propädeutik und darauf aufbau-

end in zwei Phantomkursen vermittelt. Im sechsten Semester werden praktische Fertigkeiten aus dem Bereich der Zahnerhaltungskunde am Phantommodell ebenfalls in einem Phantomkurs erlernt. Vom siebten bis zehnten Semester führen die Studierenden zahnärztliche Behandlungen unter Aufsicht an Patient\*innen selbstständig durch, wobei entweder vorrangig präventive, parodontologische und konservierende Behandlungsmaßnahmen oder prothetische Behandlungsmaßnahmen im Mittelpunkt stehen (Approbationsordnung für Zahnärzte 1955).

Der Nationale Kompetenzbasierte Lernzielkatalog Zahnmedizin (NKLZ) beschreibt das Absolvent\*innenprofil für Zahnärzt\*innen in Deutschland und definiert in diesem Zusammenhang verschiedene Kompetenzebenen als verfügbare Fähigkeiten und Fertigkeiten: 1. Faktenwissen, 2. Handlungs- und Begründungswissen, 3. Handlungskompetenz (a. unter Anleitung selbst durchführen und demonstrieren, b. selbstständig und situationsadäquat in Kenntnis der Konsequenzen durchführen). Im Kapitel Z 23a werden Lernziele beschrieben, die auf die Diagnose, Prävention und Therapie von Zahnhartsubstanzdefekten abzielen. Im Hinblick auf indirekte Restaurationen wird gefordert, dass der/die Absolvent\*in die für indirekte Versorgung notwendige Präparation unter Verwendung verschiedener Instrumente, Geräte und Hilfsmittel durchführen, die Präparation abformen und die Restauration den Materialeigenschaften entsprechend einsetzen kann (Kompetenzlevel 3a/b) (MFT Medizinischer Fakultätentag der Bundesrepublik Deutschland e.V. 2015).

In der Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie der Universitätsmedizin Göttingen findet zur Vorbereitung der Studierenden auf die Versorgung von Patient\*innen mit keramischen Teilrestaurationen ein praktisches Modul statt, welches gesamthaft 20 Stunden umfasst. Im Rahmen des Moduls erlernen die Studierenden den Umgang mit dem chairside CAD/CAM-System CEREC (Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland). Der gesamte Workflow wird von der Präparation, über die optisch-digitale Abformung, die Konstruktion (CAD), das Schleifen (CAM), das Bemalen und Brennen und das adhäsive Einsetzen anhand einer Teilkrone und eines dreiflächigen Inlays am Phantommodell geübt. Dabei wird analog zur Patient\*innenbehandlung jeder Teilschritt von einer\*inem Zahnärzt\*in überprüft und bei Bedarf Hilfestellung geleistet. Entsprechend dieses Workflows werden dann im laufenden Semester CAD/CAM-gefertigten Keramikteilrestaurationen an Patient\*innen hergestellt.

Die Behandlung von Patient\*innen durch Studierende unterliegt denselben Qualitätsanforderungen wie die Behandlung durch Zahnärzt\*innen. Daher werden in den klinischen studentischen Kursen alle Teilschritte einer Untersuchungs- oder Behandlungsmaßnahme engmaschig durch Zahnärzt\*innen kontrolliert und ggf. Korrekturen einge-

leitet. Trotzdem gibt es nur eine überschaubare Anzahl von Studien aus dem Bereich der restaurativen Zahnmedizin, die überprüft haben, ob die Qualitätsanforderungen erfüllt werden, also die Qualität der von Studierenden erbrachten Leistungen mittel- und langfristig vergleichbar zu denen von Zahnärzt\*innen ist. Restaurativen Behandlungsmaßnahmen kommt dabei eine besonders große Rolle zu, weil sie einen großen Teil der zahnärztlichen Tätigkeit in der Praxis ausmachen. So entfielen im Jahr 2020 beispielsweise 25,6 % der Punkte des „Einheitlichen Bewertungsmaßstab für zahnärztliche Leistungen“ (BEMA) im Bereich konservierend-chirurgische Behandlung auf Füllungen, Zahnersatz machte 20,3 % der Ausgaben für zahnärztliche Behandlungen der Primär- und Ersatzkassen aus, und im Bereich der Gebührenordnung für Zahnärzte (GOZ) entfielen 37,4 % des Gesamtvolumens auf konservierende und 8,7 % auf prothetische Leistungen (Kassenzahnärztliche Bundesvereinigung (KZBV) 2021). Daher wurde in dieser Studie eine Behandlungsmaßnahme aus dem Bereich der restaurativen Zahnmedizin untersucht.

Verschiedene Studien haben das Behandlungsergebnis von Studierende untersucht: So kommt eine Studie zu Stiftaufbauten durch Studierende zu dem Schluss, dass das Behandlungsergebnis in den meisten Fällen suffizient ist und nur 5-7 % der Stiftaufbauten eine Abweichung von der Kanalachse oder eine apikale Pathologie aufwiesen (Meshni et al. 2018). Untersuchungen zu Implantaten aus der Behandlung durch Studierende zeigen gute Überlebens- und Erfolgsraten (Daneshvar et al. 2016; Naito et al. 2020). Eine Studie zu direkten Kompositrestaurationen zeigt eine Überlebensrate von 95,1 % nach drei Jahren, wobei als Hauptursache für ein Restaurationsversagen Sekundärkaries angegeben wird (Al-Samhan et al. 2010). In einer anderen Studie wird eine Überlebensrate von 87 % nach fünf Jahren für Klasse I und II Restaurationen ermittelt (Opdam et al. 2004). In einer weiteren Untersuchung wurden Bissflügelröntgenaufnahmen nach der Insertion einer direkten Kompositfüllung im Studierendenkurs beurteilt und die Problemstellen der Restaurationen erfasst. Am häufigsten treten Überhänge und Fehlstellen auf, gefolgt von offenen Approximalkontakten und einer insuffizienten Form (AlOtaibi et al. 2020).

Allerdings gibt es auch einige Studien zur Behandlung durch Studierende, die aufzeigen, dass komplexere Behandlungsabläufe durchaus fehleranfällig sein können. So zeigt eine Meta-Analyse zur technischen Qualität von Wurzelkanalbehandlungen mit 48,75 % nur einen relativ geringen Anteil von Behandlungen mit akzeptabler Qualität (Ribeiro et al. 2018). Bei der Farbbestimmung in komplexen Fällen trafen nur 23 % der an der Untersuchung teilnehmenden Studierenden eine akzeptable Auswahl (Jaju et al. 2010).



Zum klinischen Erfolg von indirekten Restaurationen aus der Behandlung durch Studierende gibt es einige Studien, die gute Überlebensraten für derartige Versorgungen zeigen. Eine klinische Studie zur Langlebigkeit von laborgefertigten Presskeramikrestaurationen aus den Studierendenkursen zeigt eine Überlebensrate von 96,3 % und eine Erfolgsrate von 93,8 % nach 6,6 Jahren. Bei dieser Studie wurden Inlays, Teilkronen und Kronen aus einer gepressten Lithiumdisilikatkeramik (IPS e.max® Press, Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein) nachuntersucht (Fotiadou et al. 2021). Eine weitere Studie zur Langlebigkeit von Keramikteilrestaurationen aus demselben Material berichtet über eine Überlebensrate von 98,3 % und eine Erfolgsrate von 85 % nach drei Jahren (van den Breemer et al. 2019). Andere Autoren geben für Onlays aus Lithiumdisilikat aus der Studierendenbehandlung eine Überlebensrate von 96,3 % nach zwei Jahren und 91,5 % nach vier Jahren an (Archibald et al. 2018). Eine weitere retrospektive Studie zu laborgefertigten Keramikteilkronen (IPS Empress®, Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein), die von Studierenden präpariert und mithilfe eines lighthärtenden Restaurationskomposits eingesetzt wurden, zeigt eine Überlebensrate von 86 % und eine Erfolgsrate von 63,5 % nach fünf Jahren (Bühler et al. 2017). Für Zirkonoxidkronen aus der Studierendenbehandlung wird eine Überlebensrate von 89 % und eine Erfolgsrate von 80 % nach vier Jahren angegeben (Näpänkangas et al. 2015). Für VMK- und Vollgusskronen gibt eine weitere Studie eine Überlebensrate von 83,9 % nach vier Jahren an (Carey et al. 2021). Vergleichende Daten zwischen Versorgungen von Zahnärzt\*innen und Studierenden fehlen jedoch weitgehend.

Auch zu CAD/CAM-Keramikrestaurationen aus der Behandlung durch Studierende gibt es bereits klinische Daten. Für CEREC 3D Inlays aus einer Feldspatkeramik konnte eine Überlebensrate von 95 % nach drei Jahren nachgewiesen werden. Vor der Anfertigung der Inlays hatten die Studierenden bereits mindestens zwei Zähne für eine indirekte Restauration präpariert und wurden in einem zweitägigen Kurs in der Anwendung des CEREC-Systems geschult (Bernhart et al. 2009). Für Keramikteilkronen, welche mittels CEREC 3 ebenfalls aus einer Feldspatkeramik hergestellt wurden, wird in einer kontrollierten, prospektiven Split-Mouth Studie nach fünfeinhalb Jahren eine Überlebensrate von 88,8 % angegeben. Dabei kam keine direkte optisch-elektrische Abformung an der\*dem Patient\*in zum Einsatz, sondern es wurde zunächst konventionell abgeformt und ein Gipsmodell angefertigt, welches digitalisiert wurde (Federlin et al. 2010). Eine Studie zu CAD/CAM-gefertigten Lithiumdisilikatkronen, welche allerdings nicht durch die Studierenden mit dem CEREC-System in einem internen Labor hergestellt wurden, gibt nach sechs Jahren eine Überlebensrate von 93,0 % und eine Erfolgsrate von 86,4 % an (Aziz et al. 2022).

## 1.5 Fragestellung

Die bisherige Studienlage zeigt insgesamt ein heterogenes Bild der Behandlungsqualität durch Studierende. Insbesondere im Bereich der indirekten Keramikrestorationen konnten aber bisher durchaus zufriedenstellende Überlebensraten in der Studierendenbehandlung erreicht werden. Andererseits werden viele Teilschritte des Behandlungs- und Herstellungsprozesses bei einer CAD/CAM-Restauration von der Erfahrung der durchführenden Person beeinflusst. Zudem fehlt bislang ein direkter Vergleich im Bereich CAD/CAM-gefertigter Keramik-Teilrestorationen zwischen unerfahrenen (Studierenden) und erfahrenen Behandelnden (approbierte Zahnärzt\*innen) unter klinischen Bedingungen. Daher ist das Ziel dieser Arbeit die Nachuntersuchung der in den Studierendenkursen angefertigten CAD/CAM-gefertigten Keramik-Teilrestorationen hinsichtlich ihrer Überlebensrate, aber auch funktioneller, ästhetischer und biologischer Parameter und ein Vergleich mit Versorgungen, die in demselben Zeitraum von Zahnärzt\*innen der Poliklinik hergestellt wurden. Als Nullhypothese wird definiert, dass von Studierenden gefertigte CAD/CAM Keramik-Restaurationen sich bezüglich der Überlebensrate sowie der funktionellen, ästhetischen und biologischen Erfolgsparameter nicht von denen approbierter Zahnärzt\*innen unterscheiden.

## **2 Material und Methoden**

### **2.1 Ethikantrag**

Die Studie wurde von der Ethikkommission der Universitätsmedizin Göttingen genehmigt (2/7/18) und vorab beim Deutschen Register Klinischer Studien (DRKS) unter der DRKS-ID DRKS00016643 registriert.

### **2.2 Patient\*innenrekrutierung**

Die Patient\*innenrekrutierung erfolgte aus dem Patient\*innenpool der Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie der Universitätsmedizin Göttingen. Alle erwachsenen Patient\*innen, die zwischen 2011 und 2019 eine adhäsiv befestigte keramische Teilrestauration (Herstellung im CAD/CAM-Verfahren) in der Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie erhalten haben, wurden während der regulären Kontrolluntersuchungen für die Studienteilnahme angefragt. Ausschlusskriterien waren Schwangerschaft oder Stillzeit, eine nicht durchführbare zahnärztliche Behandlung aufgrund eines schlechten Allgemeinzustands sowie die Notwendigkeit einer antibiotischen Abdeckung für die zahnärztliche Untersuchung. Wenn sich die Patient\*innen zur Teilnahme an der Studie bereit erklärten, wurde entweder ein Termin zur Nachuntersuchung vereinbart oder diese erfolgte bereits in derselben Sitzung. Vor der Nachuntersuchung wurden die Patient\*innen umfänglich über Ablauf der Untersuchung sowie Zweck und Inhalt der Studie aufgeklärt. Die Patient\*innen willigten schriftlich in die Studienteilnahme ein. Als Aufwandsentschädigung für die Studienteilnahme erhielten die Patient\*innen eine kostenlose professionelle Zahnreinigung.

### **2.3 Eingeschlossene Restaurationen**

Alle in die Studie eingeschlossenen Zähne wurden analog den Richtlinien für die Präparation von Keramikrestaurationen präpariert (Ahlers et al. 2009). Die optisch-digitale Abformung der Präparation und aller relevanten Nachbarstrukturen erfolgte mit der CEREC Bluecam oder Omnicam (Denstply Sirona Deutschland GmbH, Bensheim, Deutschland). Das digitale Design (CAD) wurde in der CEREC Software 4.x (Denstply Sirona Deutschland GmbH, Bensheim, Deutschland) durchgeführt. Anschließend wurden die Restaurationen aus der Lithiumdisilikatkeramik IPS e.max<sup>®</sup> CAD (Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein) mithilfe der Schleifeinheit CEREC MC XL (Denstply

Sirona Deutschland GmbH, Bensheim, Deutschland) subtraktiv hergestellt (CAM). Nach Auftragen der Glasurmasse und bei Bedarf Individualisierung mit Keramikmal Farben erfolgte der kombinierte Kristallisations- und Glanzbrand (VACUMAT 6000M, VITA Zahnfabrik H. Rauter GmbH & Co KG, Bad Säckingen, Deutschland). Die Restaurationen wurden dann zunächst ohne Kofferdam mit rotierenden Diamantschleifern unter Wasserkühlung approximal angepasst. Nach Kontrolle von Farbe, Randpassung und Approximalkontakten erfolgte im nächsten Schritt die adhäsive Befestigung unter absoluter Trockenlegung. Hierfür wurde die Innenseite der Restauration zunächst für 20 Sekunden mit Flusssäure (Porcelain Etch, Ultradent Products GmbH, Köln, Deutschland) angeätzt und anschließend für 60 Sekunden silanisiert (Monobond Plus, Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein). Als Adhäsivsystem wurde entweder Syntac® Classic (Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein) im Etch-and-Rinse-Modus oder eines der beiden Universaladhäsive Adhese® Universal (Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein) oder Scotchbond™ Universal (3M Deutschland GmbH, Neuss, Deutschland) mit selektiver Schmelzätzung in Kombination mit einem dualhärtenden Befestigungskomposit (Variolink® II, Variolink® Esthetic DC, Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein; RelyX™ Ultimate, 3M Deutschland GmbH, Neuss, Deutschland) oder einem lighthärtenden Restaurationskomposit (Ceram.X®, Dentsply Sirona Deutschland GmbH, Bensheim, Deutschland; Venus®, Kulzer GmbH, Hanau, Deutschland) verwendet. Abschließend erfolgte das Anpassen der Okklusion mittels rotierender Feinkorndiamanten unter Wasserkühlung einschließlich Hochglanzpolitur mit Keramikpolierern.

## 2.4 Klinische Untersuchung

Die Beurteilung der Restaurationen erfolgte durch zwei geschulte zahnärztliche Mitarbeiterinnen der Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie. Die Untersucherinnen waren verblindet, das heißt, sie hatten die Restaurationen weder selbst angefertigt noch waren sie informiert, ob die Restauration von einer\* einem Studierenden oder einer\* einem Zahnarzt\*in hergestellt und inseriert wurde.

Der Kontakt der Untersucherinnen mit der\* dem Patient\*in beschränkte sich ausschließlich auf die Zeit der Untersuchung, um ein möglichst hohes Maß an Objektivität zu gewährleisten. Einblick in die Patient\*innenakte hatten die Untersucherinnen zu keinem Zeitpunkt, lediglich relevante Informationen zur Allgemeinanamnese sowie die zu untersuchenden Zähne wurden den Untersucherinnen vor Beginn der Nachuntersuchung mitgeteilt. Die Untersucherinnen nahmen die Untersuchung mit Hilfe von Lupenbrillen mit 3,2-facher Vergrößerung vor.

## **2.5 Kalibrierung der Untersucherinnen**

Beide an der Untersuchung beteiligten Mitarbeiterinnen der Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie (Untersucherin A und B) wurden im Vorfeld der Untersuchung anhand klinischer Bilder zu den verwendeten Kriterien kalibriert. Hierzu wurden zunächst die Bilder aus der Originalpublikation zu den modifizierten Kriterien der FDI World Dental Federation (FDI) herangezogen (Hickel et al. 2010). Darüber hinaus kamen Fotos von keramischen Teilkronen aus der Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie zum Einsatz. Die Inter-Untersucherinnenübereinstimmung wurde anhand von elf Restaurationen ermittelt.

## **2.6 Bestandteile der klinischen Nachuntersuchung**

### **2.6.1 Basisdaten der Restauration**

Zunächst wurden aus der Patient\*innenakte relevante Daten wie Alter und Geschlecht der\*des Patient\*in sowie Zahn, Restaurationstyp, Zementierungsverfahren, Einsetzdatum und Behandler\*in (Zahnärzt\*in/Studierende\*r) entnommen. Ebenfalls für die Auswertung wichtige Informationen wie eine vor Insertion der keramischen Teilrestauration durchgeführte endodontische Behandlung und alle nach Insertion notwendigen Interventionen wurden erfasst.

### **2.6.2 Sensibilitätstest**

An allen nicht endodontisch behandelten Zähnen wurde ein Sensibilitätstest mit Kältespray (HS-Kältespray, Henry Schein Dental Deutschland GmbH, Langen, Deutschland) und Schaumstoffpellet durchgeführt.

### **2.6.3 Parodontaler und gingivaler Zustand**

Die Erhebung der Sondierungstiefen erfolgte an sechs Messpunkten pro Zahn, wobei eine handelsübliche Parodontalsonde mit Millimeterskalierung, zum Beispiel Parodontometer North-Carolina XP23/UNC15 Gr.31 (Hu-Friedy Mfg. Co., LLC, Chicago, Illinois, Vereinigte Staaten von Amerika) verwendet wurde.

Der modifizierte Papillen-Blutungs-Index (PBI, Tabelle 2.1) nach Saxer und Mühlemann (1975) wurde erhoben, um das Ausmaß der gingivalen Entzündung zu detektieren.

Tabelle 2.1: Graduierung des PBI nach Saxer und Mühlemann (1975)

<b>Grad</b>	<b>Definition</b>
Grad 0	Keine Blutung
Grad 1	Auftreten eines Blutungspunktes
Grad 2	Auftreten mehrerer Blutungspunkte oder einer Blutlinie
Grad 3	Ausfüllen des interdentalen Dreiecks mit Blut
Grad 4	Profuse Blutung nach der Sondierung; Blut fließt über den Zahn oder die Gingiva

#### 2.6.4 FDI-Kriterien

Die Bewertung der Restaurationen erfolgte anhand der FDI-Kriterien (Hickel et al. 2010), wobei nur eine für CAD/CAM-gefertigte Keramikteilrestauration relevante Auswahl an Kriterien beurteilt wurde (Tabelle 2.2). Bei der Bewertung des Kriteriums „Kontaktpunkt“ wurde für mesial und distal jeweils ein eigener Score vergeben, sofern die Restauration den jeweiligen Approximalkontakt rekonstruierte. Berücksichtigt wurde dabei, ob anatomische Gegebenheiten wie die Zahnstellung bzw. fehlende Zähne das Herstellen eines Kontaktpunkts unmöglich machten. Die Überprüfung des Kontaktpunkts erfolgte mit handelsüblicher gewachster Zahnseide, beispielsweise ORAL-B Zahnseide Essential Floss (Procter & Gamble Germany GmbH & Co Operations oHG, Schwalbach am Taunus, Deutschland). Röntgenaufnahmen wurden nur dann beurteilt, wenn sie im Rahmen der allgemeinen zahnärztlichen Untersuchung mit rechtfertigender Indikation in der Nachuntersuchungssitzung angefertigt wurden. Rein aus Studienzwecken erfolgte keine Anfertigung von Röntgenbildern. Das Parodont des restaurierten Zahns wurde auf Basis der zuvor erhobenen Sondierungstiefen und Blutungsbefunde mit dem des spiegelbildlichen Zahns im gegenüberliegenden Quadranten verglichen. Sofern dieser nicht vorhanden war, wurde auf einen Nachbarzahn ausgewichen. Falls Restaurationen in einem oder mehreren Kriterien mit Score 4 oder schlechter bewertet wurden, wurden mit den Patient\*innen Folgetermine zur Beseitigung der Mängel bzw. zur Neuanfertigung der Restauration vereinbart.

Tabelle 2.2: Bewertung anhand FDI-Kriterien (Hickel et al. 2010)

	<b>Eigenschaften</b>	<b>Score 1 :</b> <b>klinisch exzellent</b>	<b>Score 2:</b> <b>klinisch gut</b>	<b>Score 3:</b> <b>klinisch ausreichend</b>	<b>Score 4:</b> <b>Klinisch unzufrieden- stellend</b>	<b>Score 5:</b> <b>klinisch schlecht</b>
<b>Ästhetische Eigenschaften</b>						
1	Anatomische Form	Form ist ideal	leichte Abweichungen von der natürl. Form	Abweichung von natürl. Form, ästhetisch vertretbar	Form nicht akzeptabel, Korrektur notwendig	Schlechte Form, Verlust, Erneuerung notwendig
2	Farbe	Farbe passt zur Bezahnung, kein Unterschied bezüglich der Transluzenz und des Farbtons	kleiner Unterschied bezüglich der Transluzenz und des Farbtons	noch tolerierbarer Unterschied, kein negativer Einfluss auf Ästhetik	lokalisiert klinisch unbefriedigend der Farbton, kann repariert werden	inakzeptabler Farbunterschied, Erneuerung notwendig
<b>Funktionelle Eigenschaften</b>						
3	Materialfraktur und Retention <i>(falls zutreffend)</i>	keine Frakturen, Restauration ist retentiv	Haarriss erkennbar	≥2 Haarrisse, Chipping (nicht am Rand od. Appr.Kontakt)	Chipping am Rand od. Appr.Kontakt, Frakturen mit Verlust bis zur ½ Restauration	partieller od. kompletter Verlust
4	Marginale Adaptation <i>(falls zutreffend)</i>	keine Spalten, keine Verfärbungen	Spalt bis 150 µm, kleine Fraktur, polierbar	Spalt < 250 µm, kleinere marginale Frakturen/ Unebenheiten	Spalt > 250 µm, freiliegendes Dentin, Chipping am Rand, Schmelz- und Dentinfrakturen	Restauration gelockert, aber in situ, generalisierte große Randspalten
5	Kontaktpunkt	a: normaler Kontaktpunkt, Zahnseide 25 µm b: normale Kontur	a: etwas zu starker Kontakt b: leichte Konturdefizite	a: etwas zu schwach 50 µm, kein Hinweis auf Pathologie am Zahn und/oder Gingiva b: sichtbares Konturdefizit	a: zu schwach 100 µm, mögliche food impaction, b: inadäquate Kontur Reparatur mgl.	a: nicht vorhanden, food impaction, Gingivitis b: insuffiziente Kontur Erneuerung
6	Radiographie (wenn durchgeführt)	keine Auffälligkeiten	akzeptable Klebefuge, +/- Stufe bis 150 µm	Randspalt < 250 µm, neg. Stufe < 250 µm, schlechte Radioopazität des Materials	Randspalt > 250 µm, neg. Stufe > 250 µm, reparierbar	Sekundärkaries, große Spalten, Fraktur, Verlust, apikale Pathologie
7	Patientenzufriedenheit	sehr zufrieden	zufrieden	kleine Mängel	Wunsch nach Verbesserung	unzufrieden, Schmerz

<b>Biologische Eigenschaften</b>						
8	Postoperative Überempfindlichkeit/Vitalität	keine Hypersensitivität, normale Vitalität	leichte Hypersensitivität für bestimmte Zeit, normale Vitalität	moderate Hypersensitivität, verspätete, milde Sensitivität, keine subjektiven Beschwerden	intensiv, subjektive Beschwerden, negative Sensibilität, Behandlung notwendig	Endodontische Therapie und Erneuerung notwendig
9	Karies, Erosion, Abfraktion	keine Primär- oder Sekundärkaries	sehr kleine lokalisierte Demineralisation, Erosion, Abfraktion, keine Intervention notwendig	größere Areale mit Demineralisationen, Erosionen, Abrasionen, prävent. Behandlung	Karies mit Kavitation, Erosion mit Dentinbeteiligung, Abrasion bis Dentin	tiefe Sekundärkaries, freiliegendes Dentin, nicht reparierbar
10	Integrität/ Infraktur	komplett integriert	marginale Schmelzabplatzung < 150 µm, Haarriss < 150 µm im Schmelz	Schmelzabplatzung < 250 µm, Riss < 250 µm, multiple Risse	große Schmelzabplatzung, Spalt/Riss > 250 µm	Höcker- oder Zahnfraktur
11	Parodont (im Vergleich zu einem Referenzzahn)	keine Plaque, keine Entzündung, keine Taschen	etwas Plaque, keine Entzündung, keine Taschen	Plaquemenge, Abweichung um einen Grad von PBI (Baseline) Gingivablutung, Taschenbildung akzeptabel	Plaquemenge, Gingivablutung nicht akzeptabel, Taschentiefe wächst > 1mm, PBI>1 Grad Abweichung	akute Gingivitis oder Parodontitis

## 2.7 Statistische Methoden

### 2.7.1 Fallzahlberechnung

Initial war geplant, 119 Restaurationen in die Untersuchung einzuschließen (Power: 80 %,  $\alpha = 0,05$ , Kaplan-Meier-Statistik und Log Rank Tests). Die Fallzahlplanung erfolgte unter der Annahme einer mittleren 5-Jahres-Überlebensrate von 98,5 % für Restaurationen, welche von approbierten Zahnärzten eingegliedert wurden (Guess et al. 2009), und einer 5-Jahres-Überlebensrate von 86 % für Restaurationen, die von Studierenden im letzten Jahr ihrer klinischen Ausbildung angefertigt wurden (Bühler et al. 2017). Aufgrund der epidemischen Notlage von nationaler Tragweite konnte die geplante Fallzahl trotz Verlängerung des Rekrutierungszeitraums um zwei Jahre und des Untersuchungszeitraums um ein Jahr (Amendment zur Studie 2/7/18) nicht erreicht werden. Daher wurde die Studie nach Einschluss von 92 Restaurationen beendet.



### 2.7.2 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte mit der Software „R“ ([www.r-project.org](http://www.r-project.org); Version 4.2.0) mit den Paketen „survminer“ (Version 0.4.9), „survival“ (Version 3.3-1) und „irr“ (Version 0.84.1). Das Signifikanzniveau wurde auf  $p < 0,05$  festgelegt.

Die Kalkulation der Untersucherinnenübereinstimmung zwischen Untersucherin A und B erfolgte mittels Intraklassenkorrelation (ICC A,2) (McGraw und Wong 1996).

Die Daten der Restaurationen wurden zunächst pseudonymisiert erhoben und vor der statistischen Auswertung anonymisiert. Die Kalkulation der Überlebens- und Erfolgsraten erfolgte mit Kaplan-Meier-Statistik. Als Überleben einer Restauration wurde gewertet, wenn kein FDI-Kriterium mit einem Score von fünf bewertet wurde und sich die Restauration zum Nachuntersuchungszeitpunkt in situ befand. Eine Restauration wurde als Erfolg gewertet, wenn alle FDI-Kriterien mit einem Score von drei oder besser bewertet wurden. Der Vergleich der Kaplan-Meier-Kurven zwischen Studierenden und Zahnärzt\*innen erfolgte mit Log Rank Tests. Die mittlere jährliche Verlustrate wurde mit der Formel  $(1-y)^z = (1-x)$  berechnet, wobei „y“ die mittlere jährliche Verlustrate (mean annual failure rate: mAFR) und „x“ die Gesamtverlustrate nach „z“ Jahren darstellt (Opdam et al. 2010).

Potentielle Einflussfaktoren auf den Erfolg und das Überleben der Restaurationen wurden mit univariaten Cox-Regressions-Modellen bestimmt.

Der Vergleich der Scores der einzelnen FDI-Kriterien zwischen Studierenden und Zahnärzt\*innen erfolgte mit Mann-Whitney-U-Tests und nachfolgender Bonferroni-Holm-Korrektur für multiples Testen.

### 3 Ergebnisse

Die Nachuntersuchung der Restaurationen fand in den Jahren 2019 bis 2022 statt. Dabei konnten 92 Restaurationen (42 Prämolaren, 50 Molaren) bei 74 Patient\*innen in die Auswertung eingeschlossen werden. Der mittlere Nachbeobachtungszeitraum lag bei  $4,04 \pm 1,55$  Jahren (min: 1,95; max: 8,28). Von den eingeschlossenen Restaurationen befanden sich 83 Restaurationen in situ, neun waren zum Zeitpunkt der Untersuchung bereits ersetzt. Die Geschlechterverteilung der Patient\*innen war nahezu ausgeglichen (weiblich: 39; männlich: 35), das Durchschnittsalter zum Nachuntersuchungszeitpunkt betrug  $55,73 \pm 13,25$  Jahre (24,10 bis 83,90 Jahre). Die Verteilung der Restaurationen auf die einzelnen Gruppen ist in Tabelle 3.1 dargestellt.

Tabelle 3.1: Anzahl der Restaurationen, Versorgungsart, Zahntyp, verwendetes Adhäsivsystem sowie Befestigungskomposit bei Restaurationen, die durch Studierende bzw. durch Zahnärzt\*innen eingesetzt wurden

		gesamt	Studierende	Zahnärzt*innen
Anzahl Restaurationen		92	65	27
Versorgungsart	Inlays	11	9	2
	Teilkronen	81	56	25
Zahntyp	Prämolaren	42	25	17
	Molaren	50	40	10
Adhäsivsystem	Syntac® Classic/ Heliobond	83	64	19
	Adhese® Universal	8	1	7
	Scotchbond™ Universal	1	0	1
Befestigungskomposit	dualhärtendes Befestigungskomposit	85	59	26
	lichthärtendes Restaurationskomposit	7	6	1

### 3.1 Kaplan-Meier-Kurven

#### 3.1.1 Überlebensrate

Gesamthaft ergab sich eine Überlebensrate von 94,6 % (95 % KI [90,0-99,3 %]) nach zwei Jahren und 87,5 % (95 % KI [79,9-95,9 %]) nach vier Jahren sowie eine mittlere jährliche Verlustrate (mAFR) von 2,8 % bzw. 3,3 % (Abbildung 3.1).

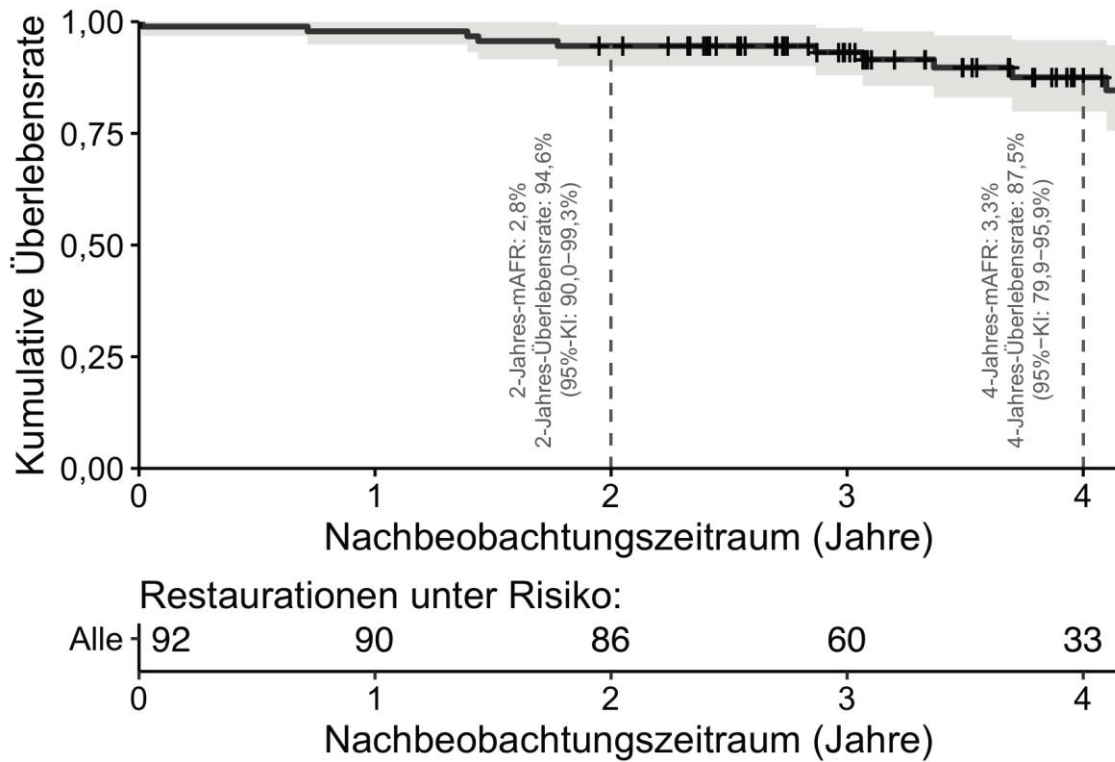


Abbildung 3.1: Überlebensrate aller Restaurierungen (Überleben: Restauration in situ und kein FDI-Kriterium Score fünf) und Restaurierungen unter Risiko

### 3.1.2 Erfolgsrate

Die Erfolgsrate lag nach zwei Jahren bei 91,3 % (95% KI [85,7-97,2%]) und nach vier Jahren bei 80,7 % (95 % KI [72,0-90,4 %]) mit einer mittleren jährlichen Verlustrate (mAFR) von 4,4 % bzw. 5,2 % (Abbildung 3.2).

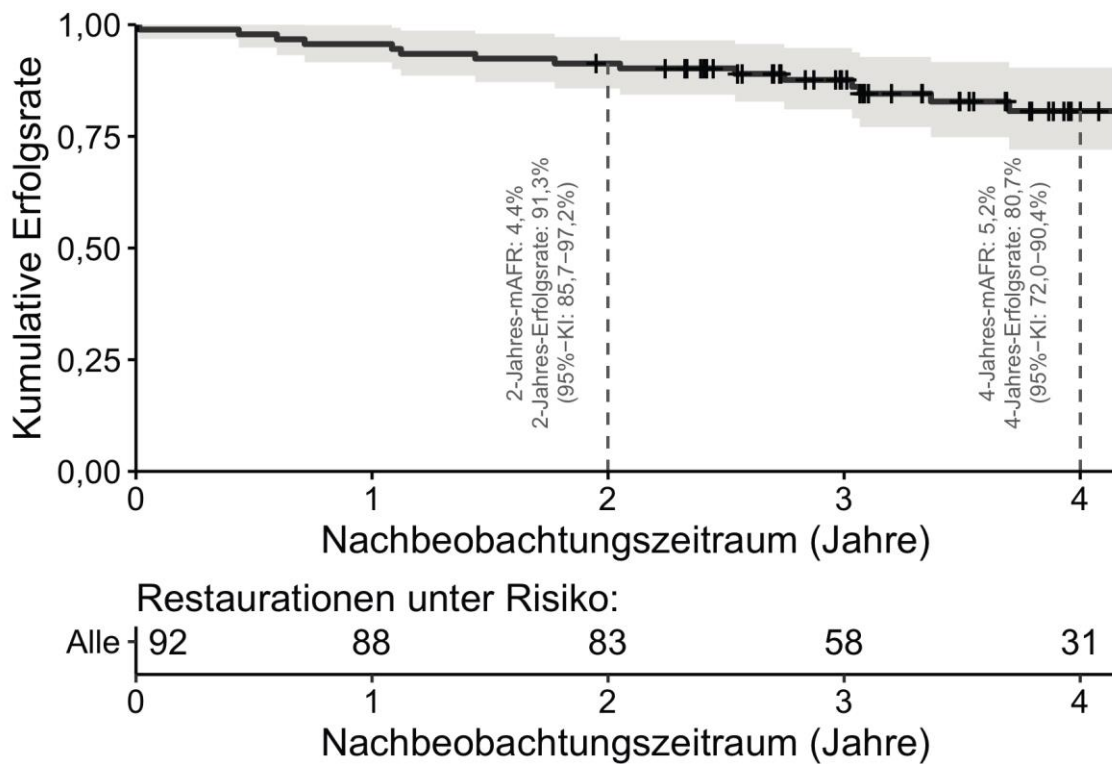


Abbildung 3.2: Erfolgsrate aller Restaurationen (Erfolg: Restauration in situ und alle FDI-Kriterien Score drei und besser) und Restaurationen unter Risiko

### 3.1.3 Potentielle Einflussfaktoren

Es konnte kein signifikanter Effekt von Geschlecht, Alter, Zahntyp und einer endodontischen Behandlung vor Restauration des betroffenen Zahnes mit einer CAD/CAM-Restauration auf das Überleben oder den Erfolg der Restaurationen festgestellt werden (Tabelle 3.2).

Tabelle 3.2: Univariate Effekte (p-Werte der Cox-Regressions-Modelle) potentieller Einflussfaktoren auf Überleben und Erfolg der Restaurationen

Faktor	Überleben	Erfolg
Geschlecht	0,159	0,672
Alter	0,542	0,987
Zahntyp	0,999	0,594
Endodontische Behandlung vor Insertion der Restauration	0,514	0,412

## 3.2 Vergleich Studierende - Zahnärzt\*innen

### 3.2.1 Überlebensrate

Die 2-Jahres-Überlebensrate für die Gruppe der Zahnärzt\*innen betrug 96,3 % (95 % KI [89,4-100 %]). Bei den Studierenden lag die 2-Jahres-Überlebensrate bei 93,8 % (95 % KI [88,2-99,9 %]). Die mAFR nach zwei Jahren lag für Restaurationen, die durch Zahnärzt\*innen angefertigt wurden, bei 1,9 % und für Restaurationen von Studierenden bei 3,1 %. Nach vier Jahren lag die Überlebensrate für die Restaurationen von Zahnärzt\*innen bei 88,3 % (95 % KI [73,3-100 %]) mit einer mAFR von 3,1 % und für die Versorgungen von Studierenden bei 87,3 % (95 % KI [78,7-96,8 %]) mit einer mAFR von 3,3 % (Abbildung 3.3). Damit ergab sich im Vergleich mit Log-Rank-Tests kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Überlebensraten ( $p=0,525$ ).

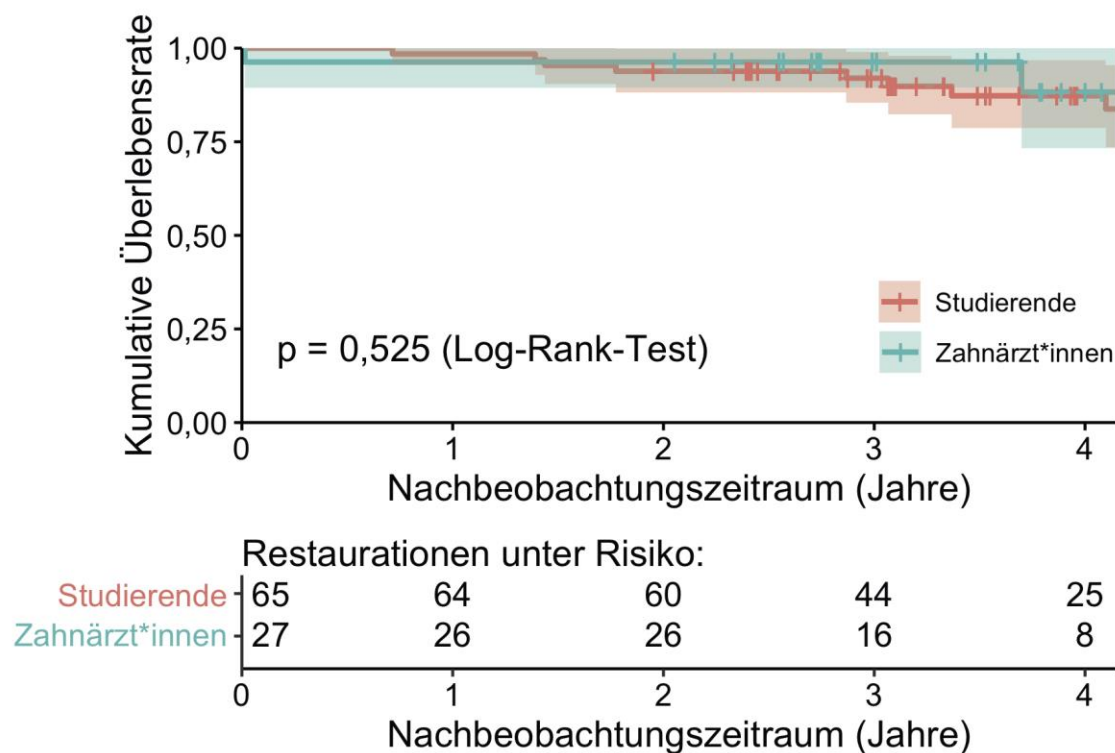


Abbildung 3.3: Überlebensrate der Restaurationen in Abhängigkeit von Behandlung durch Studierende oder Zahnärzt\*innen

### 3.2.2 Erfolgsrate

Für die Restaurationen der Zahnärzt\*innen ergab sich eine Erfolgsrate von 92,6 % (95 % KI [83,2-100 %]) und für Restaurationen der Studierenden von 90,8 % (95 % KI [84,0-98,1 %]) nach zwei Jahren. Die mittlere jährliche Verlustrate über zwei Jahre lag bei 3,8 % (Restaurationen von Zahnärzt\*innen) und 4,7 % (Restaurationen von Studierenden). Nach vier Jahren lag die Erfolgsrate für die Restaurationen der Zahnärzt\*innen bei 76,1 % (95 % KI [58,7-98,5 %]) mit einer mAFR von 6,6 % und für die Restaurationen der Studierenden bei 82,4 % (95 % KI [72,8-93,2 %]) mit einer mAFR von 4,7 % (Abbildung 3.4). Auch hinsichtlich der Erfolgsraten gab es keinen signifikanten Unterschied zwischen den Restaurationen von Studierenden und Zahnärzt\*innen ( $p=0,778$ ).

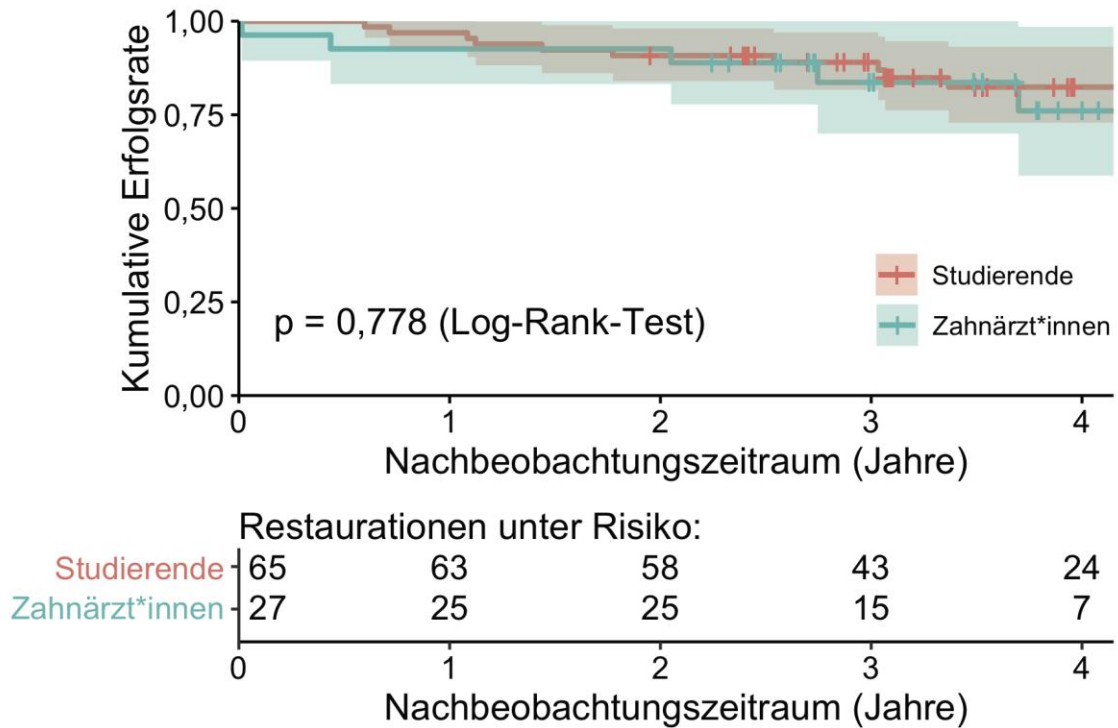


Abbildung 3.4: Erfolgsrate der Restaurationen in Abhängigkeit von Behandlung durch Studierende oder Zahnärzt\*innen

### 3.2.3 FDI-Kriterien

Die einzelnen ästhetischen, funktionellen und biologischen Parameter konnten für 83 der insgesamt 92 untersuchten Restaurationen erhoben werden, da sich neun Restaurationen zum Nachuntersuchungszeitpunkt nicht mehr in situ befanden. Der Vergleich der einzelnen Parameter erfolgte mit Mann-Whitney-U-Tests, deren Ergebnisse in Tabelle 3.3 dargestellt sind. Für keine der erhobenen FDI-Kriterien konnte ein signifikanter Unterschied zwischen Restaurationen von Zahnärzt\*innen und Studierenden festgestellt werden.

Tabelle 3.3: Vergleich der FDI-Kriterien zwischen Studierenden und Zahnärzt\*innen

Eigen-schaften	Parameter	Studierende						Zahnärzt*innen						p-Wert	p <sub>adj.</sub>
		N	1	2	3	4	5	N	1	2	3	4	5		
Ästhetisch	Anatomische Form	57	32	23	2	0	0	26	12	14	0	0	0	0,504	n.s.
	Farbe	57	30	22	5	0	0	26	8	16	1	1	0	0,111	n.s.
Funktionell	Materialfraktur und Retention	57	55	2	0	0	0	26	24	0	1	1	0	0,390	n.s.
	Marginale Adaptation	57	24	30	2	1	0	26	14	11	0	1	0	0,335	n.s.
	Kontaktpunkt mesial	51 <sup>a</sup>	47	2	2	0	0	25 <sup>a</sup>	23	0	2	0	0	0,953	n.s.
	Kontaktpunkt distal	40 <sup>b</sup>	34	4	1	1	0	21 <sup>b</sup>	15	1	4	0	1	0,158	n.s.
	Radiographie	11 <sup>c</sup>	10	0	0	1	0	2 <sup>c</sup>	1	0	1	0	0	0,272	n.s.
	Patientenzufriedenheit	57	46	11	0	0	0	26	22	4	0	0	0	0,675	n.s.
Biologisch	Postoperative Überempfindlichkeit	45 <sup>d</sup>	42	1	0	1	1	20 <sup>d</sup>	20	0	0	0	0	0,249	n.s.
	Karies, Erosion, Abfraktion	57	57	0	0	0	0	26	26	0	0	0	0	1,000	n.s.
	Integrität, Infraktur	57	46	10	0	1	0	26	22	4	0	0	0	0,654	n.s.
	Parodont	56 <sup>e</sup>	47	4	5	0	0	26	25	1	0	0	0	0,110	n.s.

a: der mesiale Kontaktpunkt konnte nicht beurteilt werden, sofern die Restauration die mesiale Zahnseite nicht rekonstruierte oder der Kontaktpunkt wegen anatomischer Besonderheiten nicht hergestellt werden konnte

b: der distale Kontaktpunkt konnte nicht beurteilt werden, sofern die Restauration die distale Zahnseite nicht rekonstruierte, der Kontaktpunkt wegen anatomischer Besonderheiten nicht hergestellt werden konnte oder es sich um den endständigen Zahn handelte

c: Röntgenbilder wurden gemäß Ethikvotum nicht zu Studienzwecken durchgeführt, sodass nur Röntgenbilder für Zähne mit einer anderen rechtfertigenden Indikation vorlagen

d: bei bereits vor Insertion der Restauration endodontisch behandelten Zähnen konnte keine postoperative Überempfindlichkeit auftreten

e: mangels Referenzzahn konnte das Parodont nicht adäquat beurteilt werden



### 3.2.4 Versagensursachen

Insgesamt elf Restaurationen wurden mit Score 5 bewertet ( $n = 2$ ) oder waren zum Nachuntersuchungszeitpunkt bereits ersetzt ( $n = 9$ ). Als Gründe für das Versagen dieser Restaurationen konnte in der Gruppe der Studierenden fünfmal ein Debonding ( $n = 5$ ), zwei endodontische Komplikationen ( $n = 2$ ), einmal Sekundärkaries ( $n = 1$ ) und ein nicht reparierbares Chipping ( $n = 1$ ) festgestellt werden. Demgegenüber traten in der Gruppe der Zahnärzt\*innen ein Debonding ( $n = 1$ ) und ein nicht reparierbarer, insuffizienter Approximalkontakt ( $n = 1$ ) auf.

## 3.3 Untersucherinnenübereinstimmung

Hinsichtlich der Entscheidung, ob eine Restauration als Überleben (Score 4 und besser) oder Erfolg (Score 3 und besser) klassifiziert wurde, zeigten Untersucherin A und B eine perfekte Übereinstimmung ( $ICC = 1$ , Tabelle 3.4).

Bei der Einteilung der erhobenen Parameter in die Untergruppen ästhetische, funktionelle und biologische Kriterien (Hickel et al. 2010) und dem genauen Vergleich der vergebenen Scores der verschiedenen Untersucherinnen mittels Intraklassenkorrelation zeigte sich eine moderate bis gute Übereinstimmung. Wurde diese Auswertung auf die einzelnen Parameter verfeinert, ergab sich eine heterogene Verteilung zwischen geringer und perfekter Übereinstimmung (Cicchetti 1994). Die einzelnen Ergebnisse der Intraklassenkorrelation sind in Tabelle 3.4 dargestellt.

Tabelle 3.4: Untersucherinnenübereinstimmung (Intraklassenkorrelation) bei der Erhebung der FDI-Kriterien

<b>Parameter</b>	<b>ICC (Überleben/ Erfolg)</b>	<b>ICC (ästhetische, funktionelle, biolo- gische Parameter)</b>	<b>ICC (einzelne Parameter)</b>
Anatomische Form	1,000	0,795	0,400
Farbe	1,000		0,835
Materialfraktur und Retention	1,000	0,623	1,000
Marginale Adaptation	1,000		0,444
Kontaktpunkt mesial	1,000		1,000
Kontaktpunkt distal	1,000		0,000
Radiographie	1,000		1,000
Patientenzufriedenheit	1,000		1,000
Postoperative Überempfindlichkeit	1,000		0,449
Karies, Erosion, Abfraktion	1,000	0,000	
Integrität, Infraktur	1,000	0,500	
Parodont	1,000	0,630	

## 4 Diskussion

### 4.1 Diskussion der Methode

#### 4.1.1 Studiendesign

Wie alle retrospektiven Untersuchungen unterliegt auch diese Arbeit wegen ihres Studiendesigns gewissen Einschränkungen und die Ergebnisse müssen zurückhaltender als die von prospektiven, kontrollierten, randomisierten Studien beurteilt werden (Talari und Goyal 2020). Dennoch wird auch in zahlreichen anderen Untersuchungen zu Keramikrestorationen ein retrospektives Studiendesign verwendet: So wurden von denen in eine systematische Übersicht eingeschlossenen Restorationen 42 % in einer retrospektiven Studie bewertet (Alves de Carvalho et al. 2018).

Aus Datenschutzgründen und mangels vorheriger Einwilligung zur Kontaktaufnahme durften Patient\*innen weder telefonisch noch postalisch zur Teilnahme an der Nachuntersuchung kontaktiert werden. Daher konnten nur die Patient\*innen in die vorliegende Untersuchung eingeschlossen werden, die sich entweder regelmäßig im Recall der Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie befanden oder sich anlassbezogen, ggfs. auch aufgrund eines Problems an der zu beurteilenden Restauration (sog. anlassbezogene Konsultationen), vorstellten. Die durch Studierende behandelten Patient\*innen befinden sich häufig nur für die Versorgung mit der Restauration in der Behandlung durch die Poliklinik und nehmen nicht oder nicht regelmäßig an den regelmäßigen Kontrolluntersuchungen (Recall) teil. Dadurch ist eine Verzerrung der Studienpopulation in zwei unterschiedliche Richtungen vorstellbar: Zum einen könnte unterstellt werden, dass Recall-Patient\*innen wegen einer besseren Mundhygiene und der engmaschigen zahnärztlichen Kontrolle weniger biologische Komplikationen aufweisen als der Durchschnitt der Bevölkerung. Es gibt jedoch nach den Ergebnissen einer systematischen Übersichtsarbeit keine Evidenz für ein vermehrtes Auftreten von Karies bei vergleichsweise langen Recallintervallen (Fee et al. 2020). Zum anderen wurden möglicherweise auch gerade die Patient\*innen angefragt und eingeschlossen, die sich aufgrund eines Mangels oder Versagens der Restauration in der Poliklinik vorstellten.

Eine weitere Einschränkung retrospektiver Untersuchungen ist der sogenannte „Recall-Bias“. Dieser beschreibt, dass einige Informationen mangels Dokumentation nur durch die Aussagen der\*des Patient\*in gewonnen werden können und die Validität dieser

Aussagen zumindest fraglich ist (Coughlin 1990). Dieser kommt bei der Nachuntersuchung beispielsweise bei der Erhebung des FDI-Kriteriums postoperative Hypersensibilität zum Tragen, da hier mangels ausreichender Aktdokumentation häufig auch auf die Aussagen der Patient\*innen zurückgegriffen werden musste.

#### **4.1.2 Patient\*innenkollektiv**

Während des Nachuntersuchungszeitraums dieser Studie kam es auf Grund der Coronavirus Disease 19 (COVID-19)-Pandemie zu deutlichen Einschränkungen bei der elektiven, ambulanten Behandlung von Patient\*innen im Rahmen der pandemischen Lage von nationaler Tragweite. Da eine Rekrutierung der Studienteilnehmer\*innen laut Ethikvotum nur während der regulären Termine möglich war (siehe 4.1.1), führte die pandemiebedingte Reduzierung der Patient\*innenkontakte dazu, dass weniger Teilnehmende angefragt und somit die initial geplante Fallzahl trotz einer Verlängerung des Nachuntersuchungszeitraums nicht erreicht werden konnte. Dies betraf nicht nur Universitätszahnkliniken sondern auch freie Praxen, von denen in einer Umfrage fast zwei Drittel angaben, während des ersten Lockdowns weniger als 50 % der Auslastung im Vergleich zu vor der Pandemie gehabt zu haben (Wolf et al. 2021). Eine Datenauswertung des COSMO-Projekts (COVID-19 Snapshot Monitoring in Germany) aus dem Juli 2020 zeigt, dass 22 % der Teilnehmer\*innen der Online-Umfrage einen Zahnarztbesuch wegen der COVID-19-Pandemie verschoben haben (Hajek et al. 2021). Eine systematische Übersichtsarbeit fasst den Einfluss der COVID-19-Pandemie auf klinische Studien zusammen und arbeitet unter anderem heraus, dass es in zahlreichen klinischen Nachuntersuchungen zu Problemen bei der Rekrutierung von Probanden kam (Sathian et al. 2020).

Das Durchschnittsalter und das mediane Alter der in die vorliegende Arbeit eingeschlossenen Patient\*innen entspricht in etwa dem von anderen Studien zu Keramikrestorationen (Roggendorf et al. 2012; Aziz et al. 2019; Fotiadou et al. 2021). Die Geschlechterverteilung war insgesamt nahezu ausgeglichen und es wurden keine Ausschlusskriterien bezüglich Alter oder hinsichtlich des versorgten Zahns berücksichtigt, sodass von einer repräsentativen Stichprobe ausgegangen werden kann. Hinsichtlich des versorgten Zahntyps und des Befestigungskomposits war die Verteilung in den beiden Gruppen (Studierende vs. Zahnärzt\*innen) relativ ähnlich. Größere Unterschiede zeigten sich vielmehr beim verwendeten Adhäsivsystem, da in der Gruppe der Studierende nur bei einer Restauration (Anteil 1,5 %) ein Universaladhäsiv zum Einsatz kam, während in der Gruppe der Zahnärzt\*innen bei acht Restaurationen (Anteil 29,6 %) ein solches Adhäsivsystem verwendet wurde. Auch beim versorgten Zahntyp gab es Verteilungsunterschiede zwischen beiden Gruppen, auch wenn hier gezeigt werden

konnte, dass der Zahntyp keinen signifikanten Einfluss auf Überleben und Erfolg der Restaurationen hatte ( $p=0,999$  bzw.  $p=0,594$ ). Der Anteil an Molaren lag mit 61,5 % in der Gruppe der Studierenden wesentlich höher als in der Gruppe der Zahnärzt\*innen mit 37 %. Die in einigen Punkten heterogene Gruppenverteilung ist eine Limitation dieser Studie, ergibt sich jedoch aus dem retrospektiven Studiendesign.

#### 4.1.3 Bewertungskriterien

Die Beurteilung dentaler Restaurationen kann mit (modifizierten) USPHS- und FDI-Kriterien erfolgen (Ryge und Snyder 1973; Ryge 1980; Hickel et al. 2007; Hickel et al. 2010). Angelehnt an die USPHS-Kriterien wurden auch die Bewertungskriterien der California Dental Association (CDA) in einigen Untersuchungen verwendet (California Dental Association 1995; Jokstad et al. 2001). Die geringe Sensitivität der USPHS-Kriterien gegenüber frühzeitigen Veränderungen an Restaurationen sowie die schlechte Vergleichbarkeit unterschiedlicher Studien wegen individueller Modifikationen der USPHS-Kriterien führten zur Entwicklung der FDI-Kriterien im Jahr 2007 (Hickel et al. 2007). Diese wurden nach den Erfahrungen aus der Anwendung in verschiedenen Studien im Jahr 2010 modifiziert. Daraus resultieren die heutigen 16 Bewertungskriterien, die ästhetische, funktionelle und biologische Eigenschaften beschreiben, welche jeweils mit einem Score zwischen 1 und 5 bewertet werden (Hickel et al. 2010). Die FDI-Kriterien wurden schon in ihrer ersten Fassung von der Generalversammlung der World Dental Federation als Standardkriterien für klinische Untersuchungen von Restaurationen festgelegt, wobei nicht bei jeder Studie alle Kriterien nachuntersucht werden, sondern vielmehr eine Auswahl anhand des Untersuchungsziels getroffen werden soll (Hickel et al. 2010). Eine Übersichtsarbeit evaluiert die FDI-Kriterien für den Bereich der direkten Restaurationen und vergleicht diese mit den USPHS-Kriterien. Im Durchschnitt werden in klinischen Studien 8,5 der 16 FDI-Kriterien verwendet, wobei sich deren Anwendung als praktikabel, sensitiv und passend zu den heutigen Anforderungen darstellt und eine Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Studien ermöglicht. Daher ist auch der Anteil der Studien, die die FDI-Kriterien verwenden, von 2010 bis 2016 von 4,5 % auf 50 % gestiegen (Marquillier et al. 2018). Auch in dieser Studie wurden daher die FDI-Kriterien zur Bewertung der Keramik-Teilrestaurationen herangezogen.

In einigen jüngeren Studien zur klinischen Bewertung von Keramikrestaurationen wurde zudem eine ähnliche Auswahl der FDI-Kriterien zur Bewertung der Restaurationen verwendet, zusätzlich wird zum Teil auch die Beschaffenheit der Restaurationsoberfläche, das Vorhandensein von (Rand-)verfärbungen, die angrenzende Schleimhaut oder die allgemeine Mundgesundheit beurteilt (Bühler et al. 2017; Fotiadou et al. 2021).

Dadurch wird ein Vergleich zwischen diesen Untersuchungen und den Ergebnissen dieser Arbeit ermöglicht. Darüber hinaus wäre dann auch eine zusammenfassende Auswertung in Metaanalysen denkbar. In anderen Arbeiten wurden modifizierte USPHS-Kriterien verwendet (Archibald et al. 2018; Rinke et al. 2021), was einen Vergleich erschwert. In einer systematische Übersichtsarbeit zu CAD/CAM-Restaurationen wurden in 17 von 29 eingeschlossenen Studien die USPHS-Kriterien, in neun Studien die der California Dental Association und in drei Studien eigene Kriterien verwendet (Alves de Carvalho et al. 2018).

#### **4.1.4 Untersucherinnenkalibrierung und Kalkulation der Übereinstimmung**

Bei den Untersucherinnen handelte es sich um sowohl klinisch als auch wissenschaftlich erfahrene Zahnärztinnen mit über 15 Jahren Berufserfahrung, die unter anderem auch Restaurationen im Rahmen des zahnärztlichen Staatsexamens beurteilen. Die Kalibrierung der Untersucherinnen erfolgte auf Grundlage intraoraler Fotos von keramischen Teilrestaurationen, da bereits die Bewertung von Restaurationen anhand von Fotos eine anwendbare Methode zur Diagnostik darstellt (Signori et al. 2018).

Eine sehr gute Untersucherinnenübereinstimmung zeigt sich in der vorliegenden Untersuchung dann, wenn bezüglich Überleben und Erfolg der Restauration klassifiziert wurde. Dies wird bereits in der Originalpublikation zu den FDI-Kriterien vorgeschlagen, wobei entweder Score 1 und 2 oder Score 1 bis 3 zusammengefasst werden können (Hickel et al. 2010).

Die bei einigen Kriterien unter Berücksichtigung der einzelnen Scores als schwach bewertete Untersucherinnenübereinstimmung kommt bereits dann zu Stande, wenn nur bei einem Bruchteil der gemeinsam bewerteten Restaurationen eine Abweichung von mehr als einem Score vorliegt und alle anderen Restaurationen übereinstimmend bewertet wurden. Daher kann die Untersucherinnenübereinstimmung auch bei diesen Kriterien als nicht so schlecht eingeschätzt werden, wie die statistischen Daten zunächst vermuten lassen.

## **4.2 Diskussion der Ergebnisse**

### **4.2.1 Überleben und Erfolg von keramischen Teilrestaurationen**

Die in der vorliegenden Arbeit ermittelten Überlebens- und Erfolgsraten CAD/CAM-gefertigter Keramik-Teilrestaurationen fallen tendenziell geringer aus als für CAD/CAM-gefertigte Keramik-Teilrestaurationen in der Literatur beschrieben, wobei hier Überlebensraten von 86,9 % bis 99,3 % in einem Nachbeobachtungszeitraum von 4 bis 27

Jahren angegeben werden (Martin und Jedyakiewicz 1999; Posselt und Kerschbaum 2003; Fasbinder 2006; Reiss 2006; Zimmer et al. 2008; Wittneben et al. 2009; Arnetzl und Arnetzl 2012; Roggendorf et al. 2012; Nejatidanesh et al. 2015; Otto 2017; Alves de Carvalho et al. 2018; Rinke et al. 2021). Eine systematische Übersicht und Metaanalyse schlüsselt die Gesamtüberlebensrate für CAD/CAM-Restaurationen von 87,5 % nach fünf Jahren weiter nach verwendetem CAD/CAM-System und nach Versorgungsart auf. Für den Vergleich mit den vorliegenden Ergebnissen können die 5-Jahres-Überlebensraten von Restaurationen mit dem CEREC-System der verschiedenen Generationen herangezogen werden, die 89,2 % bis 93,2 % betragen. Eine Aufteilung nach Versorgungstyp erfolgt nicht für die unterschiedlichen CAD/CAM-Systeme, sondern nur für alle eingeschlossenen Restaurationen, wobei sich eine 5-Jahres-Überlebensrate von 90,9 % für Inlays und Onlays ergibt (Alves de Carvalho et al. 2018). In einer weiteren Metaanalyse zu keramischen Inlays und Onlays wird eine Überlebensrate von 95 % nach fünf Jahren für Feldspat- und Glaskeramiken angegeben, wobei nicht nach Herstellungsverfahren (konventionell oder digital) unterschieden wurde (Morimoto et al. 2016).

Eine klinische Studie zur Langlebigkeit von Lithiumdisilikat-Keramikrestaurationen aus den Studierendenkursen der Ludwig-Maximilians-Universität München zeigte eine Überlebensrate von 96,3 % und eine Erfolgsrate von 93,8 % nach 6,6 Jahren. Bei dieser Studie wurden jedoch keine chairside CAD/CAM-Restaurationen, sondern laborgefertigte Inlays, Teilkronen und Kronen aus dem Material IPS e.max<sup>®</sup> Press nachuntersucht (Fotiadou et al. 2021). Eine weitere Studie zu laborgefertigten Keramikrestaurationen aus Leuzitkeramik, die von Studierenden angefertigt wurden, zeigt eine Überlebensrate von 86 % nach fünf Jahren und eine Erfolgsrate von 63,5 % (Bühler et al. 2017). Für mit dem CEREC-System von Studierenden hergestellte Vollkronen aus der Lithiumdisilikatkeramik IPS e.max<sup>®</sup> CAD ergaben sich nach vier Jahren eine Überlebensrate von 95 % und eine Erfolgsrate von 92,3 % (Aziz et al. 2019). Eine Überlebensrate von 96,3 % nach zwei Jahren und 91,5 % nach vier Jahren konnte in einer weiteren retrospektiven Studie für Lithiumdisilikat-Keramikonlays von Studierenden nachgewiesen werden, wobei ein Großteil der eingeschlossenen Restaurationen laborgefertigt wurde (Archibald et al. 2018).

Mit einer Überlebensrate von 87,3 % und einer Erfolgsrate von 82,4 % nach vier Jahren liegen sowohl die Versorgungsarten aus der Studierendenbehandlung als auch mit einer Überlebensrate von 88,3 % und einer Erfolgsrate von 76,1 % nach vier Jahren die Versorgungsarten von Zahnärzt\*innen unter den oben angegebenen Werten. Auch die kumulativen Überlebens- und Erfolgsraten sind schlechter als in vergleichbaren Studien beschrieben. Allerdings muss beachtet werden, dass eine Vergleichbarkeit nur

bedingt gegeben ist, da sich die Angaben aus der Literatur oft entweder auf andere Materialien, Versorgungsformen (Inlays, Teilkronen, Kronen) oder Herstellungsmethoden beziehen.

Einen Erklärungsansatz für die geringeren Überlebens- und Erfolgsraten in der vorliegenden Studie stellt die durch die Pandemie beeinflusste Rekrutierung der Patient\*innen dar. Im Einschlusszeitraum von 2011 bis 2019 wurden in der Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie mindestens 400 CAD/CAM-gefertigte Keramik-Teilrestaurationen angefertigt und inseriert, wovon jedoch nur weniger als ein Viertel in die Nachuntersuchung eingeschlossen werden konnten, da die Rekrutierung wie bereits diskutiert durch die COVID-19-Pandemie beeinträchtigt wurde. Unter pandemischen Bedingungen stellten sich in der Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie deutlich weniger Patient\*innen zu regulären Kontrolluntersuchungen vor, die Anzahl der anlassbezogenen Konsultationen blieb jedoch gleich. Dadurch stieg im Rekrutierungszeitraum das Verhältnis von anlassbezogenen Konsultationen zu regulären Kontrollen, was möglicherweise dazu geführt hat, dass überproportional viele Patient\*innen mit Problemen an der nachzuuntersuchenden Restauration eingeschlossen wurden und die Überlebens- und Erfolgsraten damit negativ beeinflusst wurden. Eine Untersuchung zum Einfluss der COVID-19-Pandemie für eine andere Universitätszahnklinik zeigt, dass die Patient\*innen während des Lockdowns keine regulären Recalltermine wahrgenommen haben (Walter et al. 2021). Auch die Datenauswertung des COSMO-Projekts (COVID-19 Snapshot Monitoring in Germany) bestätigt eine Veränderung im Verhältnis zwischen regulären Terminen und anlassbezogenen Konsultationen (Hajek et al. 2021).

#### **4.2.2 Vergleich zwischen Studierenden und Zahnärzt\*innen**

Hinsichtlich der Überlebensrate der CAD/CAM-gefertigten Keramik-Teilrestaurationen konnte in der vorliegenden Untersuchung kein signifikanter Unterschied zwischen Studierenden und Zahnärzt\*innen nachgewiesen werden. Ein signifikanter Unterschied im Hinblick auf die Erfolgsrate oder die ästhetischen, funktionellen und biologischen Eigenschaften konnte ebenfalls nicht gezeigt werden, weshalb die formulierte Nullhypothese angenommen werden kann. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Qualität der Behandlung durch Studierende im Bereich der CAD/CAM-gefertigten Keramikteilrestaurationen als gleichwertig zu der von approbierten Zahnärzt\*innen anzusehen ist. Ein direkter Vergleich zwischen den Restaurationen von Studierenden und Zahnärzt\*innen wurde bisher nur in wenigen Untersuchungen durchgeführt. Eine Studie der Universität Marburg zu gepressten Keramikteilrestaurationen aus der leuzit-verstärkten Feldspatkeramik IPS Empress® zeigt eine Gesamtüberlebensrate von 81,1 % nach



knapp sieben Jahren. Die Überlebensrate der Restaurationen war zwischen Studierenden und Zahnärzt\*innen nicht signifikant unterschiedlich. Die Erfolgsraten oder weitere klinische Parameter wurden nicht verglichen (Stoll et al. 2007). Zu beachten ist dabei, dass die laborseitige Herstellung der Versorgung nicht durch den jeweiligen Behandelnden erfolgte, während in der vorliegenden Arbeit auch der gesamte CAD/CAM-Prozess von der\*dem Behandelnden vorgenommen wurde. Insofern stehen die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit im Widerspruch zu Ergebnissen vorheriger Studien, die einige der Einzelschritte des CAD/CAM-Workflows untersucht haben. Beispielsweise konnte für die optisch-digitale Abformung gezeigt werden, dass die Scans von unerfahrenen Behandelnden weniger genau waren (Resende et al. 2021). Die computergestützte Konstruktion und auch die Individualisierung der Restauration mit Malfarben kann von erfahrenen Nutzer\*innen deutlich schneller durchgeführt werden (Gold et al. 2020; Son und Lee 2020). Die Ausführungsgeschwindigkeit dieser Schritte kann im klinischen Alltag entscheidend sein, um auch unter einem gewissen Zeitdruck suffiziente Restaurationen herzustellen. Auch die Politur von monolithischen Zirkonoxidkronen durch Studierende wies tendenziell eine geringere Qualität verglichen mit Zahnärzt\*innen und Zahntechniker\*innen auf (Kozmacs et al. 2017).

Alle Teilschritte einer Behandlung müssen in den Studierendenkursen durch die Kursassistent\*innen kontrolliert werden und es muss ggfs. Hilfestellung geleistet werden, um eine ausreichende Qualität der Behandlung und damit Patient\*innensicherheit zu gewährleisten. Wie umfangreich diese Hilfestellung ausfallen muss, ist für jede\*n Studierende\*n individuell unterschiedlich und konnte in dieser retrospektiven Studie nicht nachvollzogen werden. Einige Teilschritte der Behandlung lassen sich auch, sofern sie fehlerhaft ausgeführt werden, durch die\*den betreuende\*n Kursassistent\*in korrigieren oder optimieren, ggfs. auch mehrfach. Hierzu zählt beispielsweise die Präparation der Zähne für eine keramische Teilrestauration. Eine systematische Übersichtsarbeit zu vollkeramischen Onlays fand einen Einfluss des Präparationsdesigns auf die klinische Überlebensrate solcher Restaurationen, wobei vor allem ein zu geringer Substanzabtrag später zu einer Keramikfraktur führen kann (Abduo und Sambrook 2018). Aufgrund der direkten Kontrollmöglichkeit durch das CAD/CAM-System bezüglich der Mindestschichtstärke der verwendeten Keramik kann die Präparation sofort korrigiert und erneut optisch abgeformt werden, sodass dieser Fehler nicht aufgetreten sein dürfte. Außerdem wurde von den Studierenden regelhaft eine Probepreparation sowohl am Phantommodell als auch an einem Gipsmodell der realen Patientensituation durchgeführt, um die Präparation vorab zu simulieren und mögliche Fehler zu vermeiden. Auch beim CAD/CAM-Verfahren ist die Prozessqualität relativ gut durch das

jeweilige Zwischenergebnis beurteilbar, und bei Bedarf ist jeder Zwischenschritt mit mehr oder weniger großem Aufwand auch wiederholbar.

Anders verhält es sich beim Schritt der adhäsiven Befestigung: Hier wird das Ergebnis beurteilt, möglicherweise können aber bei den Zwischenschritten der Konditionierung von Zahn und/oder Restauration Fehler auftreten, die den adhäsiven Verbund beeinträchtigen und ein späteres Debonding zur Folge haben. Da in der vorliegenden Arbeit vergleichsweise viele Debondings in der Gruppe der Studierenden beobachtet werden konnten, kann angenommen werden, dass Probleme bei der adhäsiven Befestigung dafür ursächlich sind.

### **4.2.3 Versagensursachen der Restaurationen**

Während in der Gruppe der Zahnärzt\*innen lediglich zwei Restaurationen versagten, kam es in der Gruppe der Studierenden bei fünf von insgesamt neun versagten Restaurationen zu einem Debonding. Ein Versagen des adhäsiven Verbunds, auch wenn dies nicht näher klassifiziert werden kann, muss also als Hauptversagensgrund für Restaurationen in der Gruppe der Studierenden angesehen werden. Dies steht nicht unbedingt im Einklang mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen zu Keramikrestaurationen, bei denen zwar auch ein Debonding vorkommt, aber eine Keramikfraktur die am häufigsten auftretende technische Komplikation ist (Araujo et al. 2016; Irusa et al. 2020).

Keramikfrakturen werden aufgrund der Materialeigenschaften von Keramiken begünstigt durch falsches Präparationsdesign wie beispielsweise scharfe Innenkanten oder zu geringer Substanzabtrag (Arnetz und Arnetz 2006; Ahlers et al. 2009). Wie bereits beschrieben, lässt sich die Präparation jedoch mit Hilfe des Intraoralscans sehr gut kontrollieren und auch bis zur optimalen Gestaltung korrigieren, was auch den vergleichsweise geringen Anteil an Keramikfrakturen in dieser Untersuchung erklären kann. Als maßgeblicher patientenbezogener Einflussfaktor für eine erhöhte Verlustrate von Keramikrestaurationen durch Frakturen wird in der Literatur Bruxismus angegeben (van Dijken und Hasselrot 2010). Daher wird bei jedem Patienten der Poliklinik vor der Versorgung mit einer indirekten Restauration ein CMD-Kurzbefund und im Studierendenkurs auch der Funktionsbefund der Deutschen Gesellschaft für Funktionsdiagnostik und -therapie durchgeführt, um eine behandlungsbedürftige craniomandibuläre Dysfunktion (CMD) auszuschließen. Funktionelle Fehlbelastungen der Restaurationen als Versagensursache können damit überwiegend ausgeschlossen werden.

Die vergleichsweise hohe Anzahl an Debondings als Versagensursache in der Gruppe der Studierende lässt sich mit Blick auf die Ausführungsqualität der adhäsiven Befesti-

gung durch Behandelnde mit wenig klinischer Erfahrung erklären. Frankenberger et al. (2009) zeigten in einer klinischen Studie zu adhäsiv befestigten Keramikinlays, dass ein erfahrener Behandler signifikant bessere Überlebensraten keramischer Teilrestaurationen erzielen kann als ein unerfahrener Behandler. Begründet wird dies damit, dass der Erfolg dieser Restaurationen eher von der Ausführungsqualität der techniksensitiven adhäsiven Befestigung als von den verwendeten Materialien abhängt. Dies steht im Einklang mit anderen Untersuchungen zu Adhäsivsystemen, die zeigen, dass die Variable Behandelnde\*r entscheidender für die Haftkraft ist als das Material (Jacobsen et al. 2003) und dass die Haftkraft von Adhäsivsystemen signifikant von der Erfahrung der\*des Behandelnden im Umgang mit dem jeweiligen System beeinflusst wird (Unlu et al. 2012). Auch der Erfolg von Aufbaufüllungen war in einer randomisierten, kontrollierten Untersuchung abhängig von der Erfahrung der\*des Behandler\*in (Zenthöfer et al. 2022).

Ein Vergleich hinsichtlich frühen Versagens von Komposit gegenüber Amalgam bei der Behandlung durch Studierende zeigt innerhalb der Limitationen der Untersuchung eine zehnfach höhere Versagensrate für Komposit, vor allem auch als Versagen des adhäsiven Verbunds. Die Autoren führen dies auf die zahlreichen möglichen Fehlerquellen bei der Anwendung eines Adhäsivsystems zurück (Overton und Sullivan 2012). Eine weitere Untersuchung zu Kompositrestaurationen aus der Behandlung durch Studierende gibt als Hauptgrund für ein Restorationsversagen ein Debonding an und erklärt dies ebenfalls mit der geringen Erfahrung der Studierenden im Umgang mit Adhäsivsystemen (de Moura et al. 2011). Mit dieser Annahme lassen sich auch die Debondings der Restaurationen aus dem Studierendenkurs in dieser Studie erklären. Die selbstständige, fehlerfreie Anwendung des überwiegend verwendeten Adhäsivsystems Syntac® Classic (Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein) in Verbindung mit dem Bondingagent Heliobond (Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein), das bei korrekter Anwendung hinsichtlich der Haftkraft durchaus als Goldstandard gesehen werden kann (Frankenberger et al. 2011), könnte die Studierenden wahrscheinlich auf Grund der vielen Einzelschritte und Produktkomponenten vor Probleme stellen. Andererseits haben die Studierenden zum Zeitpunkt der Anfertigung der CAD/CAM-Teilrestauration schon ca. 30 Kompositrestaurationen unter Verwendung eines Adhäsivsystems angefertigt. Dabei kommt in der Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie jedoch mit OptiBond™ FL (Kerr Hawe SA, Bioggio, Schweiz) ein anderes Adhäsivsystem mit weniger Komponenten zum Einsatz. Möglicherweise führt dies zu Unsicherheiten bei der adhäsiven Befestigung von indirekten Restaurationen. Dennoch zeigen die nicht signifikant unterschiedlichen Erfolgs- und Überlebensraten zwischen

Zahnärzt\*innen und Studierenden, dass eine ausreichende Sicherheit bei der adhäsiven Befestigung besteht, um klinisch akzeptable Ergebnisse zu erzielen.

Auch eine insuffiziente Lichthärtung des Heliobonds kann den adhäsiven Verbund schwächen. Gemäß der Herstellervorgaben erfolgte die Aushärtung des Adhäsivsystems erst durch die Keramik gemeinsam mit dem dualhärtenden Befestigungskomposit. Hier ist wegen des zusätzlichen Energieverlustes durch die Keramik eine besonders sorgfältige und vor allem zeitlich genügende Belichtung notwendig, die durch die Studierenden ggfs. nicht erreicht wurde. Dabei sind nicht nur Belichtungszeit, sondern auch Abstand und Winkel für eine suffiziente Polymerisation ausschlaggebend (Krämer et al. 2008). Dass eine optimale Anwendung der Polymerisationslampen durchaus problematisch sein kann, zeigen einige Untersuchungen, bei denen die Lichthärtung durch Studierende erst mit Hilfe besonderer Trainingsmethoden deutlich verbessert werden konnte (Federlin und Price 2013; Suliman et al. 2020). Im Gegensatz zu Heliobond kann Adhese® Universal (Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein) wegen der geringeren Filmdicke unmittelbar lichtgehärtet werden, sodass bei der Polymerisation weniger Probleme auftreten sollten. Um hier einen Effekt nachweisen zu können, wurden in der vorliegenden Arbeit jedoch zu wenig Restaurationen eingeschlossen, die mit einem Universaladhäsiv befestigt wurden.

Die Restaurationen aus dem Studierendenkurs wurden überwiegend mit Variolink® Esthetic DC (Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein) in Kombination mit dem Adhäsivsystem Syntac® Classic adhäsiv befestigt. Um den oben beschriebenen komplexen Behandlungsablauf zu vereinfachen, könnte sich für das Einsetzen auch ein selbstadhäsiver Kompositzement wie RelyX™ Unicem (3M ESPE, St. Paul, MN, USA) anbieten, was in der Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie regelmäßig bei der Befestigung von keramischen Vollkronen zum Einsatz kommt.

Zahlreiche Untersuchungen vergleichen die Anwendung dieser in ihrer Handhabung sehr unterschiedlichen Systeme. In einer klinischen Studie konnte lediglich ein Unterschied in Bezug auf die Integrität der verbliebenen Zahnhartsubstanz und des Restaurationsrands beim Vergleich von RelyX™ Unicem zu Syntac® Classic/Variolink® nach zwei Jahren Beobachtungsdauer gezeigt werden. Bei allen anderen klinischen Parametern gab es keinen signifikanten Unterschied (Taschner et al. 2012). Frankenberger et al. (2008) wiesen in einer in-vitro Studie für Syntac® Classic/Variolink® II im Vergleich zu RelyX™ Unicem mehr spaltfreie Restaurationsränder im Schmelzbereich nach. Für dentinbegrenzte Ränder ergab sich kein Unterschied. Hierzu passen auch die Ergebnisse einer weiteren Untersuchung, in der sich in-vitro zwar eine ähnliche Haftkraft von RelyX™ Unicem und Syntac® Classic/Variolink® II auf Dentin, jedoch nicht

auf Schmelz ergab. RelyX™ Unicem zeigte hier signifikant geringere Haftwerte (Abo-Hamar et al. 2005). Auch an der Lithiumdisilikatkeramik selbst konnte in einer in-vitro Studie eine signifikant höhere Haftkraft für konventionelle Kompositzemente als für selbstadhäsive Kompositzemente nachgewiesen werden (Roy et al. 2017). In einer prospektiven Untersuchung zu verschiedenen Befestigungsmethoden von CAD/CAM-gefertigten Keramikteilrestaurationen im Studierendenkurs zeigten mit selbstadhäsivem Kompositzement befestigte Restaurationen eine signifikant schlechtere Überlebensrate (75,6 % nach 18 Monaten, 69 % nach 39 Monaten) als solche, die mit einer Kombination aus Universaladhäsiv und Komposit mit (97,8 % nach 18 Monaten und 96 % nach 39 Monaten) und ohne (95,6 % nach 18 Monaten und 88 % nach 39 Monaten) selektive Schmelzätzung eingesetzt wurden. Daher scheint die Verwendung von selbstadhäsiven Kompositzementen in Verbindung mit Keramikteilrestaurationen keine valide Behandlungsoption zu sein (Vogl et al. 2016; Scholz et al. 2021).

Einen weiteren Einfluss auf die Haftung an der präparierten Zahnhartsubstanz hat die Kontamination mit provisorischem Zement im Zuge der Versorgung mit einem Provisorium (Frankenberger et al. 2007). Bei der vorliegenden Untersuchung wurde nicht erfasst, ob eine Restauration in einer Sitzung präpariert und eingesetzt wurde oder ob zunächst eine provisorische Versorgung erfolgte. Möglicherweise wurde wegen der geringeren Behandlungsgeschwindigkeit in der Gruppe der Studierenden häufiger auf ein Provisorium zurückgegriffen, was einen möglichen Erklärungsansatz für die unterschiedlichen Versagensmuster in beiden Gruppen liefern kann. Um den Einfluss des provisorischen Zementes zu verringern, könnte sowohl in den Studierendenkursen als auch in der Behandlung von Zahnärzt\*innen der Poliklinik zukünftig ein sogenanntes „immediate dentin sealing“ erfolgen, was bedeutet, dass das nach Präparation freiliegende Dentin unmittelbar mit einem Dentinadhäsiv versiegelt wird (Pashley et al. 1992; Helvey 2011). Die Vorteile dieser Dentinversiegelung in Hinblick auf die Qualität der adhäsiven Befestigung und die Vermeidung von Hypersensibilitäten werden in einer aktuellen Literaturübersicht zusammengefasst (Samartzi et al. 2021).

#### **4.2.4 Potentielle Einflussfaktoren**

Keiner der potentiellen Einflussfaktoren hatte in dieser Studie einen signifikanten Einfluss auf das Überleben und den Erfolg der CAD/CAM-gefertigten Keramikteilrestaurationen. Dies steht hinsichtlich des Faktors Zahntyp im Einklang mit den Ergebnissen einer systematischen Übersichtsarbeit, die ebenfalls zu dem Ergebnis gekommen ist, dass der Zahntyp keinen Einfluss auf die Verlustraten von Keramikteilrestaurationen hat. Allerdings gibt die Übersichtsarbeit ein signifikant höheres Risiko für ein Versagen von Restaurationen auf endodontisch behandelten im Vergleich zu vitalen Zähnen an

(Morimoto et al. 2016). Auch in einer retrospektiven Studie zu Keramikonlays hatte der Zahntyp keinen Einfluss auf den Score der bewerteten USPHS-Kriterien (Archibald et al. 2018). In einer prospektiven Untersuchung zu Teilkronen aus zirkonoxidverstärkter Lithiumsilikatkeramik zeigte sich zwar auch kein signifikanter Einfluss des Zahntyps auf die Überlebensrate der Restaurationen, jedoch wurde die Erfolgsrate signifikant vom Zahntyp beeinflusst (Rinke et al. 2021). Wie in der vorliegenden Arbeit hatte auch in einer Untersuchung zu Lithiumdisilikatrestaurationen aus der Behandlung durch Studierende keiner der untersuchten Einflussfaktoren wie beispielsweise Geschlecht, Zahntyp und das Vorliegen einer endodontischen Therapie vor Versorgung mit der Restauration einen Einfluss auf Überleben und Erfolg (Fotiadou et al. 2021).

### 4.3 Schlussfolgerungen und Ausblick

Mit dem CEREC-System gefertigte Keramik-Teilrestaurationen sind eine valide Behandlungsoption von ausgeprägten Zahnhartsubstanzdefekten, auch wenn einige Restaurationen verhältnismäßig früh – wahrscheinlich durch einen mangelhaften adhäsiven Verbund - verloren gegangen sind.

Nun müssen Langzeitdaten zeigen, ob auch nach einer längeren Liegedauer keine Unterschiede zwischen den Restaurationen von Studierenden und Zahnärzt\*innen bestehen. Außerdem wäre eine Folgearbeit wünschenswert, die beleuchtet, ob insbesondere im Studierendenkurs durch die Vereinfachung der adhäsiven Befestigung eine Verbesserung hinsichtlich der Lebensdauer des adhäsiven Verbunds und damit der Überlebensrate der Restaurationen erreicht werden konnte. Zu berücksichtigen ist außerdem, dass in der vorliegenden Arbeit nur der Versagensgrund „Debonding“, nicht aber die genaue Art des adhäsiven Versagens erfasst wurde. Eine genauere Unterscheidung zwischen adhäsivem und kohäsivem Versagen und eine Erfassung, ob das adhäsive Versagen an der Grenzfläche Zahn/Befestigungsmaterial oder Befestigungsmaterial/Keramik aufgetreten ist, wäre hilfreich, um potenzielle Fehlerquellen bei der adhäsiven Befestigung genauer zu identifizieren.

Zudem unterliegt das Studium der Zahnheilkunde an deutschen Universitäten mit der neuen Approbationsordnung für Zahnärzte und Zahnärztinnen einem strukturellen Wandel. Mit dem Wintersemester 2021/2022 haben die Studierenden im ersten Semester begonnen, nach diesen neuen gesetzlichen Vorgaben zu studieren (Approbationsordnung für Zahnärzte und Zahnärztinnen 2019). Dabei wird es wichtig sein, Studierende schon zu Beginn ihrer Ausbildung mit modernen CAD/CAM-Verfahren vertraut zu machen. Dies bestätigt eine Umfrage an der Universität Gießen zur Implementierung digitaler Lehrinhalte in den vorklinischen Studienabschnitt. Konkret wurden die

Studierenden zu zwei jeweils zweitägigen Modulen zur digitalen Präparationsanalyse und zum CAD/CAM-Workflow befragt und gaben ein überwiegend positives Feedback. Allerdings stellte sich auch heraus, dass der Umgang mit dem Intraoralscanner und der CAD-Software die Studierenden durchaus vor Schwierigkeiten stellte. Trotzdem konnten sich 96,8 % der Studierenden aus dem Modul zum CAD/CAM-Workflow vorstellen, einen Intraoralscanner bei der späteren zahnärztlichen Tätigkeit zu verwenden (Schlenz et al. 2020). Der Erfolg dieser Module zeigt, dass eine Verlagerung des Übungsmoduls zu CAD/CAM-Restaurationen an der Universitätsmedizin Göttingen, welches dem zweiten Modul der Studie von Schlenz et al. (2020) sehr ähnelt, momentan aber erst zum Ende der klinischen Ausbildung durchgeführt wird, beispielsweise in das Phantomjahr durchaus sinnvoll sein könnte.

Dadurch könnten die im Phantomjahr erworbenen Kenntnissen zu adhäsiv befestigten CAD/CAM-Keramikrestaurationen in den integrierten Behandlungskursen im weiteren Studienverlauf bei der Patient\*innenbehandlung ausgebaut werden. Es könnte sich außerdem als sinnvoll erweisen, das adhäsive Einsetzen inklusive der Konditionierung von Zahn und Restauration nur unter der permanenten Supervision der Studierenden durch eine\*n Zahnärzt\*in durchführen zu lassen. Im Hinblick auf die in der neuen Approbationsordnung angepasste Betreuungsrelation zwischen Kursassistent\*in und Studierenden erscheint dieses Vorgehen durchaus als realistisch.

Außerdem sollte ein modernes Studium der Zahnheilkunde heutigen Absolvent\*innen einen sicheren Umgang mit dentalen Technologien vermitteln, sodass Hemmungen durch ungenügende Ausbildung im CAD/CAM-Bereich, wie sie in Umfragen beschrieben werden (Tran et al. 2016), abgebaut werden. Dadurch kann dem erwarteten Zuwachs bei der Verwendung von chairside CAD/CAM-Systemen in der eigenen zahnärztlichen Praxis schon während der universitären Ausbildung Rechnung getragen werden.

## 5 Zusammenfassung

Der Herstellungsprozess von keramischen CAD/CAM-Restaurationen gilt als komplex und techniksensitiv. Für verschiedene Behandlungsschritte des CAD/CAM-Workflows konnte bereits gezeigt werden, dass ihre Umsetzung u.a. von der Behandlungserfahrung abhängig ist. Ziel dieser klinisch retrospektiven Arbeit war es daher, keramische Teilrestaurationen hinsichtlich ihrer Überlebens- und Erfolgsraten sowie funktioneller, ästhetischer und biologischer Parameter zu untersuchen und die Restaurationen von Studierenden und Zahnärzt\*innen zu vergleichen. Dazu wurden in die vorliegende Studie Patient\*innen eingeschlossen, die zwischen 2011 und 2019 mit adhäsiv befestigten, CAD/CAM-gefertigten Lithiumdisilikatkeramik-Teilrestaurationen versorgt wurden. Die klinische Nachuntersuchung erfolgte durch zwei kalibrierte Untersucherinnen mittels einer Auswahl der FDI-Kriterien. Die Überlebens- und Erfolgsraten wurden mit Kaplan-Meier-Statistik berechnet und mittels Log-Rank-Tests sowie univariater Cox-Regressionsmodelle verglichen. Die FDI-Kriterien wurden mit Mann-Whitney-U-Tests zwischen Studierenden und Zahnärzt\*innen verglichen ( $p < 0,05$ ). Insgesamt wurden 92 Restaurationen (Studierende:  $n = 65$ , Zahnärzt\*innen:  $n = 27$ ) bei 74 Patient\*innen in die Untersuchung eingeschlossen. Bezogen auf alle Restaurationen ergaben sich Überlebens- bzw. Erfolgsraten von 94,6% bzw. 91,3% nach zwei Jahren und von 87,5% bzw. 80,7% nach vier Jahren. Im Vergleich zwischen Studierenden und Zahnärzt\*innen waren die Überlebensraten weder nach zwei Jahren (Studierende: 93,8 %, mAFR: 3,1 %; Zahnärzt\*innen: 96,3 %, mAFR: 1,9 %), noch nach vier Jahren (Studierende: 87,3 %, mAFR: 3,3 %; Zahnärzt\*innen: 88,3 %, mAFR: 3,1 %) signifikant unterschiedlich ( $p = 0,525$ ). Ebenso waren die Erfolgsraten weder nach zwei Jahren (Studierende: 90,8 %, mAFR: 4,7 %; Zahnärzt\*innen: 92,6 %, mAFR: 3,8 %), noch nach vier Jahren (Studierende: 82,4 %, mAFR: 4,7 %; Zahnärzt\*innen: 76,1 %, mAFR: 6,6 %) signifikant unterschiedlich ( $p = 0,778$ ). Auch hinsichtlich der FDI-Kriterien konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den Restaurationen von Studierenden und Zahnärzt\*innen gezeigt werden. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass CAD/CAM-gefertigte Keramik-Teilrestaurationen aus der Behandlung durch Studierende eine valide Therapieoption darstellen, da hinsichtlich der Überlebens- und Erfolgsraten sowie ästhetischer, funktioneller und biologischer Parameter kein Unterschied zur Behandlung durch Zahnärzt\*innen festgestellt werden konnte.



## 6 Literaturverzeichnis

Abduo J, Sambrook RJ (2018): Longevity of ceramic onlays: A systematic review. *J Esthet Restor Dent* 30, 193–215

Abo-Hamar SE, Hiller K-A, Jung H, Federlin M, Friedl K-H, Schmalz G (2005): Bond strength of a new universal self-adhesive resin luting cement to dentin and enamel. *Clin Oral Investig* 9, 161–167

Addy M, Shellis RP (2006): Interaction between Attrition, Abrasion and Erosion in Tooth Wear. *Monogr Oral Sci* 20, 17–31

Ahlers MO, Mörig G, Blunck U, Hajtó J, Pröbster L, Frankenberger R (2009): Guidelines for the preparation of CAD/CAM ceramic inlays and partial crowns. *Int J Comput Dent* 12, 309–325

Ahholm P, Sipilä K, Vallittu P, Jakonen M, Kotiranta U (2018): Digital Versus Conventional Impressions in Fixed Prosthodontics: A Review. *J Prosthodont* 27, 35–41

Ahmed KE, Peres KG, Peres MA, Evans JL, Quaranta A, Burrow MF (2021): Operators matter - An assessment of the expectations, perceptions, and performance of dentists, postgraduate students, and dental prosthetist students using intraoral scanning. *J Dent* 105, 103572

AlOtaibi G, Aldakheel R, Alhussein H, Alrowili S (2020): Outcomes of Class II composite restorations placed by dental students: An observational study. *Saudi J Oral Sci* 7, 52

Al-Samhan A, Al-Enezi H, Alomari Q (2010): Clinical Evaluation of Posterior Resin Composite Restorations Placed by Dental Students of Kuwait University. *Med Princ Pract* 19, 299–304

Alves de Carvalho IF, Santos Marques TM, Araújo FM, Azevedo LF, Donato H, Correia A (2018): Clinical Performance of CAD/CAM Tooth-Supported Ceramic Restorations: A Systematic Review. *Int J Periodontics Restorative Dent* 38, e68–e78

Approbationsordnung für Zahnärzte 1955: Approbationsordnung für Zahnärzte (ZÄPrO) vom 26.01.1955 in der im Bundesgesetzblatt Teil III, Gliederungsnummer 2123-2, veröffentlichten bereinigten Fassung, zuletzt geändert durch Artikel 11 des Gesetzes vom 15. August 2019 (BGBl. I S. 1307)

Approbationsordnung für Zahnärzte und Zahnärztinnen 2019: Approbationsordnung für Zahnärzte und Zahnärztinnen (ZÄPrO) vom 8. Juli 2019 (BGBl. I S. 933), zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 22. September 2021 (BGBl. I S. 4335)

- Araujo NS, Moda MD, Silva EA, Zavanelli AC, Mazaro JVQ, Pellizzer EP (2016): Survival of all-ceramic restorations after a minimum follow-up of five years: A systematic review. *Quintessence Int* 47, 395–405
- Archibald JJ, Santos GC, Moraes Coelho Santos MJ (2018): Retrospective clinical evaluation of ceramic onlays placed by dental students. *J Prosthet Dent* 119, 743-748.e1
- Arnetzl GV, Arnetzl G (2006): Design of preparations for all-ceramic inlay materials. *Int J Comput Dent* 9, 289–298
- Arnetzl GV, Arnetzl G (2012): Reliability of nonretentive all-ceramic CAD/CAM overlays. *Int J Comput Dent* 15, 185–197
- Atlas A, Grandini S, Martignoni M (2019): Evidence-based treatment planning for the restoration of endodontically treated single teeth: importance of coronal seal, post vs no post, and indirect vs direct restoration. *Quintessence Int* 50, 772–781
- Awad MM, Alhalabi F, Alotaibi N, Alzamil F, Binalrimal S, Alrahlah A, Ahmed MH (2022): A systematic review and meta-analysis of bond strength studies associated with self-etching primer and HF acid etching of dental glass-ceramics. *Int J Adhes Adhes* 118, 103216
- Aziz A, El-Mowafy O, Tenenbaum HC, Lawrence HP, Shokati B (2019): Clinical performance of chairside monolithic lithium disilicate glass-ceramic CAD-CAM crowns. *J Esthet Restor Dent* 31, 613–619
- Aziz AM, El-Mowafy O, Tenenbaum HC, Lawrence HP (2022): Clinical performance of CAD-CAM crowns provided by predoctoral students at the University of Toronto. *J Prosthet Dent* 127, 729–736
- Baig MR, Gonzalez MAG, Abu Kasim NH, Abu Kassim NL, Farook MS (2016): Effect of operators' experience and cement space on the marginal fit of an in-office digitally produced monolithic ceramic crown system. *Quintessence Int* 47, 181–191
- Bandlish LK, Mariatos G (2009): Long-term survivals of „direct-wax“ cast gold onlays: a retrospective study in a general dental practice. *Br Dent J* 207, 111–115
- Baroudi K, Ibraheem S (2015): Assessment of Chair-side Computer-Aided Design and Computer-Aided Manufacturing Restorations: A Review of the Literature. *J Int Oral Health* 7, 96–104
- Bernhart J, Schulze D, Wrbas K-T (2009): Evaluation of the clinical success of Cerec 3D inlays. *Int J Comput Dent* 12, 265–277
- Bhuva B, Giovarruscio M, Rahim N, Bitter K, Mannocci F (2021): The restoration of root filled teeth: a review of the clinical literature. *Int Endod J* 54, 509–535
- Bindl A, Lüthy H, Mörmann WH (2003): Fracture load of CAD/CAM-generated slot-inlay FPDs. *Int J Prosthodont* 16, 653–660

- Borgia E, Baron R, Borgia JL (2019): Quality and Survival of Direct Light-Activated Composite Resin Restorations in Posterior Teeth: A 5- to 20-Year Retrospective Longitudinal Study. *J Prosthodont* 28, e195–e203
- Bourguignon C, Cohenca N, Lauridsen E, Flores MT, O'Connell AC, Day PF, Tsilingaridis G, Abbott PV, Fouad AF, Hicks L, et al. (2020): International Association of Dental Traumatology guidelines for the management of traumatic dental injuries: 1. Fractures and luxations. *Dent Traumatol* 36, 314–330
- Bühler J, Naef MA, Amato M, Krastl G, Weiger R, Zitzmann NU (2017): Partial Ceramic Crowns Prepared by Dental Students: Clinical Performance Up to Five Years. *J Dent Educ* 81, 732–743
- California Dental Association: Quality evaluation for dental care: guidelines for the assessment of clinical quality and professional performance. California Dental Association, Sacramento, Calif. 1995
- Carey C, Din ND, Lamb J, Wright H, Robb ND, Abuzar M (2021): Survival of Single-Unit Porcelain-Fused-to-Metal (PFM) and Metal Crowns Placed by Students at an Australian University Dental Clinic over a Five-Year Period. *Dent J* 9, 60
- Chirca O, Biclesanu C, Florescu A, Stoia DI, Pangica AM, Burcea A, Vasilescu M, Antoniac IV (2021): Adhesive-Ceramic Interface Behavior in Dental Restorations. FEM Study and SEM Investigation. *Materials* 14, 5048
- Chotvorarak K, Suksaphar W, Banomyong D (2021): Retrospective study of fracture survival in endodontically treated molars: the effect of single-unit crowns versus direct-resin composite restorations. *Restor Dent Endod* 46, e29
- Cicchetti D (1994): Guidelines, Criteria, and Rules of Thumb for Evaluating Normed and Standardized Assessment Instrument in Psychology. *Psychol Assess* 6, 284–290
- Cicciù M, Fiorillo L, D'Amico C, Gambino D, Amantia EM, Laino L, Crimi S, Campagna P, Bianchi A, Herford AS, Cervino G (2020): 3D Digital Impression Systems Compared with Traditional Techniques in Dentistry: A Recent Data Systematic Review. *Materials (Basel)* 13, 1982
- Coughlin SS (1990): Recall bias in epidemiologic studies. *J Clin Epidemiol* 43, 87–91
- da Silva LH, de Lima E, Miranda RBP, Favero SS, Lohbauer U, Cesar PF (2017): Dental ceramics: a review of new materials and processing methods. *Braz Oral Res* 31(suppl), e58
- Daneshvar S, Periodontics M, Matthews D, Michuad P-L, Ghiabi E (2016): Success and Survival Rates of Dental Implants Restored at an Undergraduate Dental Clinic: A 13-Year Retrospective Study with a Mean Follow-up of 5.8 Years. *Int J Oral Maxillofac Implants* 31, 870–875
- de Moura FRR, Romano AR, Lund RG, Piva E, Rodrigues Júnior SA, Demarco FF (2011): Three-year clinical performance of composite restorations placed by undergraduate dental students. *Braz Dent J* 22, 111–116

- Deliperi S, Bardwell DN (2006): Clinical Evaluation of Direct Cuspal Coverage with Posterior Composite Resin Restorations. *J Esthet Restor Dent* 18, 256–265
- Demarco FF, Corrêa MB, Cenci MS, Moraes RR, Opdam NJM (2012): Longevity of posterior composite restorations: not only a matter of materials. *Dent Mater* 28, 87–101
- Dentsply Sirona (2020): CEREC History 35 Years of Innovation in Digital Dentistry. <https://assets.dentsplysirona.com/newsroom/cad-cam/en/CER-Press-image-CEREC-history.jpg>; abgerufen am 06.10.2021
- Duarte S, Sartori N, Phark J-H (2016): Ceramic-Reinforced Polymers: CAD/CAM Hybrid Restorative Materials. *Curr Oral Health Rep* 3, 198–202
- Duret F, Preston JD (1991): CAD/CAM imaging in dentistry. *Curr Opin Dent* 1, 150–154
- Ender A, Mehl A, Wolf D, Bindl A (2011): CEREC Basiswissen 4.0 ein klinischer Leitfaden. Sirona Dental Systems GmbH in Kooperation mit der Universität Zürich (Hrsg.). [https://www.zzm.uzh.ch/dam/jcr:281602ad-8e77-4478-8958-2bd64585953a/CEREC\\_Basiswissen\\_v4-00.pdf](https://www.zzm.uzh.ch/dam/jcr:281602ad-8e77-4478-8958-2bd64585953a/CEREC_Basiswissen_v4-00.pdf); abgerufen am 01.05.2018
- Fasbinder DJ (2006): Clinical performance of chairside CAD/CAM restorations. *J Am Dent Assoc* 137, 22S-31S
- Federlin M, Price R (2013): Improving Light-Curing Instruction in Dental School. *J Dent Educ* 77, 764–772
- Federlin M, Hiller K-A, Schmalz G (2010): Controlled, prospective clinical split-mouth study of cast gold vs. ceramic partial crowns: 5.5 year results. *Am J Dent* 23, 161–167
- Fee PA, Riley P, Worthington HV, Clarkson JE, Boyers D, Beirne PV (2020): Recall intervals for oral health in primary care patients. *Cochrane Database Syst Rev* 2020, CD004346
- Filser F, Kocher P, Weibel F, Lüthy H, Schärer P, Gauckler LJ (2001): Reliability and strength of all-ceramic dental restorations fabricated by direct ceramic machining (DCM). *Int J Comput Dent* 4, 89–106
- Fotiadou C, Manhart J, Diegritz C, Folwaczny M, Hickel R, Frasher I (2021): Longevity of lithium disilicate indirect restorations in posterior teeth prepared by undergraduate students: A retrospective study up to 8.5 years. *J Dent* 105, 103569
- Frankenberger R, Lohbauer U, Taschner M, Petschelt A, Nikolaenko SA (2007): Adhesive luting revisited: influence of adhesive, temporary cement, cavity cleaning, and curing mode on internal dentin bond strength. *J Adhes Dent* 9 Suppl 2, 269–273
- Frankenberger R, Lohbauer U, Schaible RB, Nikolaenko SA, Naumann M (2008): Luting of ceramic inlays in vitro: Marginal quality of self-etch and etch-and-rinse adhesives versus self-etch cements. *Dent Mater* 24, 185–191
- Frankenberger R, Reinelt C, Petschelt A, Krämer N (2009): Operator vs. material influence on clinical outcome of bonded ceramic inlays. *Dent Mater* 25, 960–968

- Frankenberger R, Krämer N, Appelt A, Lohbauer U, Naumann M, Roggendorf MJ (2011): Chairside vs. labside ceramic inlays: Effect of temporary restoration and adhesive luting on enamel cracks and marginal integrity. *Dent Mater* 27, 892–898
- Gehre G, Kappert HF: Presstechnische Fertigung. In: Kappert HF, Eichner K (Hrsg.): Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. 6., vollst. überarb. u. erw. Auflage; Georg Thieme Verlag, Stuttgart 2008, 281–286
- Geis-Gerstorfer J: Vom Rohstoff zur Dentalkeramik. In: Kappert HF (Hrsg.): Vollkeramik: Werkstoffkunde - Zahntechnik - klinische Erfahrung. Quintessenz Verlag 1996, 43–54
- Giachetti L, Sarti C, Cinelli F, Russo DS (2020): Accuracy of Digital Impressions in Fixed Prosthodontics: A Systematic Review of Clinical Studies. *Int J Prosthodont* 33, 192–201
- Gold D, Hahnel SF, Schierz O, Rauch A (2020): Practicability of a chairside approach for characterizing CAD/CAM resin-based composites. *J Oral Sci* 62, 430–434
- Goujat A, Abouelleil H, Colon P, Jeannin C, Pradelle N, Seux D, Grosogeat B (2019): Marginal and internal fit of CAD-CAM inlay/onlay restorations: A systematic review of in vitro studies. *J Prosthet Dent* 121, 590-597.e3
- Gracis S, Thompson VP, Ferencz JL, Silva NRFA, Bonfante EA (2015): A new classification system for all-ceramic and ceramic-like restorative materials. *Int J Prosthodont* 28, 227–235
- Guess PC, Strub JR, Steinhart N, Wolkewitz M, Stappert CFJ (2009): All-ceramic partial coverage restorations--midterm results of a 5-year prospective clinical splitmouth study. *J Dent* 37, 627–637
- Guess PC, Selz CF, Steinhart Y-N, Stampf S, Strub JR (2013): Prospective clinical split-mouth study of pressed and CAD/CAM all-ceramic partial-coverage restorations: 7-year results. *Int J Prosthodont* 26, 21–25
- Hajek A, De Bock F, Huebl L, Kretzler B, König H-H (2021): Postponed Dental Visits during the COVID-19 Pandemic and their Correlates. Evidence from the Nationally Representative COVID-19 Snapshot Monitoring in Germany (COSMO). *Healthcare (Basel)* 9, 50
- Heintze SD, Rousson V (2012): Clinical effectiveness of direct class II restorations - a meta-analysis. *J Adhes Dent* 14, 407–431
- Helvey GA (2011): Adhesive dentistry: the development of immediate dentin sealing/selective etching bonding technique. *Compend Contin Educ Dent* 32, 22, 24–32, 34

- Hickel R, Roulet J-F, Bayne S, Heintze S, Mjör I, Peters M, Rousson V, Randall R, Schmalz G, Tyas M, Vanherle G (2007): Recommendations for conducting controlled clinical studies of dental restorative materials. Science Committee Project 2/98--FDI World Dental Federation study design (Part I) and criteria for evaluation (Part II) of direct and indirect restorations including onlays and partial crowns. *J Adhes Dent* 9 Suppl 1, 121–47
- Hickel R, Peschke A, Tyas M, Mjör I, Bayne S, Peters M, Hiller K-A, Randall R, Vanherle G, Heintze SD (2010): FDI World Dental Federation: clinical criteria for the evaluation of direct and indirect restorations-update and clinical examples. *Clin Oral Investig* 14, 349–366
- Irusa K, Al-rawi B, Donovan T, Alraheam IA (2020): Survival of Cast Gold and Ceramic Onlays Placed in a School of Dentistry: A Retrospective Study. *J Prosthodont* 29, 693–698
- Jacobsen T, Söderholm K-JM, Yang M, Watson TF (2003): Effect of composition and complexity of dentin-bonding agents on operator variability – analysis of gap formation using confocal microscopy. *Eur J Oral Sci* 111, 523–528
- Jaju RA, Nagai S, Karimbux N, Da Silva JD (2010): Evaluating Tooth Color Matching Ability of Dental Students. *J Dent Educ* 74, 1002–1010
- Jokstad A, Bayne S, Blunck U, Tyas M, Wilson N (2001): Quality of dental restoration. FDI Commission Project 2-95. *Int Dent J* 51, 117–158
- Kadlecová O (2021): CEREC Tessera Chairside Workflow and Processing. Institute of Digital Dentistry. <https://instituteofdigitaldentistry.com/cad-cam/cerec-tessera-dentsply-sirona-response-to-e-max-cad/>; abgerufen am 09.10.2021
- Kaidonis JA (2012): Oral diagnosis and treatment planning: part 4. Non-cariou tooth surface loss and assessment of risk. *Br Dent J* 213, 155–161
- Kanzow P, Biermann J, Wiegand A (2019): Questionnaire Survey on the Management of Erosive Tooth Wear. *Oral Health Prev Dent* 17, 227–234
- Kassenzahnärztliche Bundesvereinigung (KZBV) (Hrsg.): Jahrbuch 2021 - Statistische Basisdaten zur vertragszahnärztlichen Versorgung einschließlich GOZ-Analyse. Kassenzahnärztliche Bundesvereinigung, Köln 2021
- Keul C, Stawarczyk B, Erdelt K-J, Beuer F, Edelhoff D, Güth J-F (2014): Fit of 4-unit FDPs made of zirconia and CoCr-alloy after chairside and labside digitalization – A laboratory study. *Dent Mater* 30, 400–407
- Kozmacs C, Hollmann B, Arnold WH, Naumova E, Piwowarczyk A (2017): Polishing of Monolithic Zirconia Crowns-Results of Different Dental Practitioner Groups. *Dent J* 5, E30
- Krämer N, Lohbauer U, Garcia-Godoy F, Frankenberger R (2008): Light curing of resin-based composites in the LED era. *Am J Dent* 21, 135–142

- Li RWK, Chow TW, Matinlinna JP (2014): Ceramic dental biomaterials and CAD/CAM technology: State of the art. *J Prosthodont Res* 58, 208–216
- Lohbauer U, Belli R, Wendler M: Keramische Materialien. In: Rosentritt M, Ilie N, Lohbauer U (Hrsg.): *Werkstoffkunde in der Zahnmedizin*. 1. Auflage; Georg Thieme Verlag, Stuttgart 2018, 239–309
- Lynch CD, Opdam NJ, Hickel R, Brunton PA, Gurgan S, Kakaboura A, Shearer AC, Vanherle G, Wilson NHF (2014): Guidance on posterior resin composites: Academy of Operative Dentistry - European Section. *J Dent* 42, 377–383
- Machiulskiene V, Campus G, Carvalho JC, Dige I, Ekstrand KR, Jablonski-Momeni A, Maltz M, Manton DJ, Martignon S, Martinez-Mier EA, et al. (2020): Terminology of Dental Caries and Dental Caries Management: Consensus Report of a Workshop Organized by ORCA and Cariology Research Group of IADR. *Caries Res* 54, 7–14
- Makhija SK, Lawson NC, Gilbert GH, Litaker MS, McClelland JA, Louis DR, Gordan VV, Pihlstrom DJ, Meyerowitz C, Mungia R, et al. (2016): Dentist material selection for single-unit crowns: Findings from the National Dental Practice-Based Research Network. *J Dent* 55, 40–47
- Marquillier T, Doméjean S, Le Clerc J, Chemla F, Gritsch K, Maurin J-C, Millet P, Péard M, Grosogeat B, Dursun E (2018): The use of FDI criteria in clinical trials on direct dental restorations: A scoping review. *J Dent* 68, 1–9
- Martin N, Jedyakiewicz NM (1999): Clinical performance of CEREC ceramic inlays: a systematic review. *Dent Mater* 15, 54–61
- McGraw KO, Wong SP (1996): Forming inferences about some intraclass correlation coefficients. *Psychol Methods* 1, 30–46
- Mehl A, Kunzelmann K-H, Folwaczny M, Hickel R (2004): Stabilization effects of CAD/CAM ceramic restorations in extended MOD cavities. *J Adhes Dent* 6, 239–245
- Meshni AA, Al Moaleem MM, Mattoo KA, Halboub E, Alharisi SM, Shatifi AE, Al Amriee SA, Ghazali NA (2018): Radiographic Evaluation of Post-core Restorations fabricated by Dental Students at Jazan University. *J Contemp Dent Pract* 19, 66–72
- MFT Medizinischer Fakultätentag der Bundesrepublik Deutschland e.V. (Hrsg.) (2015): Nationaler Kompetenzbasierter Lernzielkatalog Zahnmedizin (NKLZ). [http://www.nklz.de/files/nklz\\_katalog\\_final\\_20151204.pdf](http://www.nklz.de/files/nklz_katalog_final_20151204.pdf); abgerufen am 07.12.2021
- Miyazaki T, Hotta Y, Kunii J, Kuriyama S, Tamaki Y (2009): A review of dental CAD/CAM: current status and future perspectives from 20 years of experience. *Dent Mater J* 28, 44–56
- Morimoto S, Rebello de Sampaio FBW, Braga MM, Sesma N, Özcan M (2016): Survival Rate of Resin and Ceramic Inlays, Onlays, and Overlays: A Systematic Review and Meta-analysis. *J Dent Res* 95, 985–994

- Mörmann WH (2006): The evolution of the CEREC system. *J Am Dent Assoc* 1939 137 Suppl, 7S-13S
- Mühlemann S, Sandrini G, Ioannidis A, Jung RE, Hämmerle CHF (2019): The use of digital technologies in dental practices in Switzerland: a cross-sectional survey. *Swiss Dent J* 129, 700–707
- Munz D, Fett T: *Ceramics: Mechanical Properties, Failure Behaviour, Materials Selection*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 1999
- Naito M, Lung K, Linke B (2020): Retrospective Analysis of the Survival of Dental Implants Placed by Dental Students: A 10-Year Chart Review. *J Can Dent Assoc* 86, k11
- Näpänkangas R, Pihlaja J, Raustia A (2015): Outcome of zirconia single crowns made by predoctoral dental students: A clinical retrospective study after 2 to 6 years of clinical service. *J Prosthet Dent* 113, 289–294
- Nassani MZ, Ibraheem S, Shamsy E, Darwish M, Faden A, Kujan O (2021): A Survey of Dentists' Perception of Chair-Side CAD/CAM Technology. *Healthc Basel Switz* 9, 68
- Nejatidanesh F, Amjadi M, Akouchekian M, Savabi O (2015): Clinical performance of CEREC AC Bluecam conservative ceramic restorations after five years--A retrospective study. *J Dent* 43, 1076–1082
- Ohlmann B, Rues S, Rammelsberg P (2017a): Die Teilkrone – Teil 1: Metallische Werkstoffe. *ZWR* 126, 101–106
- Ohlmann B, Rues S, Rammelsberg P (2017b): Die Teilkrone – Teil 2: Keramische Werkstoffe. *ZWR* 126, 150–156
- Opdam NJM, Loomans BAC, Roeters FJM, Bronkhorst EM (2004): Five-year clinical performance of posterior resin composite restorations placed by dental students. *J Dent* 32, 379–383
- Opdam NJM, Bronkhorst EM, Loomans BAC, Huysmans M-CDNJM (2010): 12-year Survival of Composite vs. Amalgam Restorations. *J Dent Res* 89, 1063–1067
- Opdam NJM, van de Sande FH, Bronkhorst E, Cenci MS, Bottenberg P, Pallesen U, Gaengler P, Lindberg A, Huysmans MCDNJM, van Dijken JW (2014): Longevity of Posterior Composite Restorations. *J Dent Res* 93, 943–949
- Opdam NJM, Frankenberger R, Magne P (2016): From 'Direct Versus Indirect' Toward an Integrated Restorative Concept in the Posterior Dentition. *Oper Dent* 41, S27–S34
- Otto T (2017): Up to 27-years clinical long-term results of chairside Cerec 1 CAD/CAM inlays and onlays. *Int J Comput Dent* 20, 315–329
- Overton J d., Sullivan DJ (2012): Early Failure of Class II Resin Composite Versus Class II Amalgam Restorations Placed by Dental Students. *J Dent Educ* 76, 338–340
- Pashley EL, Comer RW, Simpson MD, Horner JA, Pashley DH, Caughman WF (1992): Dentin permeability: sealing the dentin in crown preparations. *Oper Dent* 17, 13–20



- Peutzfeldt A, Sahafi A, Flury S (2011): Bonding of Restorative Materials to Dentin With Various Luting Agents. *Oper Dent* 36, 266–273
- Pieger S, Salman A, Bidra AS (2014): Clinical outcomes of lithium disilicate single crowns and partial fixed dental prostheses: A systematic review. *J Prosthet Dent* 112, 22–30
- Pisani-Proenca J, Erhardt MCG, Valandro LF, Gutierrez-Aceves G, Bolanos-Carmona MV, Del Castillo-Salmeron R, Bottino MA (2006): Influence of ceramic surface conditioning and resin cements on microtensile bond strength to a glass ceramic. *J Prosthet Dent* 96, 412–417
- Posselt A, Kerschbaum T (2003): Longevity of 2328 chairside Cerec inlays and onlays. *Int J Comput Dent* 6, 231–248
- Radovic I, Monticelli F, Goracci C, Vulicevic ZR, Ferrari M (2008): Self-adhesive resin cements: a literature review. *J Adhes Dent* 10, 251–258
- Rauch A, Schrock A, Schierz O, Hahnel S (2021): Material selection for tooth-supported single crowns—a survey among dentists in Germany. *Clin Oral Investig* 25, 283–293
- Reiss B (2006): Clinical results of Cerec inlays in a dental practice over a period of 18 years. *Int J Comput Dent* 9, 11–22
- Resende CCD, Barbosa TAQ, Moura GF, Tavares LDN, Rizzante FAP, George FM, Neves FDD, Mendonça G (2021): Influence of operator experience, scanner type, and scan size on 3D scans. *J Prosthet Dent* 125, 294–299
- Ribeiro DM, Réus JC, Felipe WT, Pacheco-Pereira C, Dutra KL, Santos JN, Porporatti AL, De Luca Canto G (2018): Technical quality of root canal treatment performed by undergraduate students using hand instrumentation: a meta-analysis. *Int Endod J* 51, 269–283
- Rinke S, Zuck T, Hausdörfer T, Leha A, Wassmann T, Ziebolz D (2021): Prospective clinical evaluation of chairside-fabricated zirconia-reinforced lithium silicate ceramic partial crowns—5-year results. *Clin Oral Investig* 26, 1593–1603
- Rodrigues SB, Franken P, Celeste RK, Leitune VCB, Collares FM (2019): CAD/CAM or conventional ceramic materials restorations longevity: a systematic review and meta-analysis. *J Prosthodont Res* 63, 389–395
- Roggendorf MJ, Kunzi B, Ebert J, Roggendorf HC, Frankenberger R, Reich SM (2012): Seven-year clinical performance of CEREC-2 all-ceramic CAD/CAM restorations placed within deeply destroyed teeth. *Clin Oral Investig* 16, 1413–1424
- Rosentritt M, Kieschnick A, Hahnel S, Stawarczyk B: *Werkstoffkunde-Kompodium Dentale Keramiken*. Annett Kieschnick Dentale Fachkommunikation, Berlin 2018
- Rosentritt M, Kieschnick A, Stawarczyk B (2019a): Dentale Glaskeramiken. *Kleine Werkstoffkunde für Zahnärzte - Teil 2. Zahnärztliche Mitteilungen* 109, 314–317

- Rosentritt M, Kieschnick A, Stawarczyk B (2019b): Zirkonoxide. Kleine Werkstoffkunde für Zahnärzte - Teil 3. Zahnärztliche Mitteilungen 109, 448–451
- Rosentritt M, Kieschnick A, Stawarczyk B (2019c): Zahnfarbene Werkstoffe im Vergleich. Kleine Werkstoffkunde für Zahnärzte - Teil 4. Zahnärztliche Mitteilungen 109, 624–628
- Rosentritt M, Schmid A, Huber C, Strasser T (2022): In Vitro Mastication Simulation and Wear Test of Virgilite and Advanced Lithium Disilicate Ceramics. Int J Prosthodont (im Druck)
- Roy AK, Mohan D, Sunith M, Mandokar RB, Suprasidh S, Rajan S (2017): Comparison of Shear Bond Strengths of Conventional Resin Cement and Self-adhesive Resin Cement bonded to Lithium Disilicate: An in vitro Study. J Contemp Dent Pract 18, 881–886
- Ryge G (1980): Clinical criteria. Int Dent J 30, 347–358
- Ryge G, Snyder M (1973): Evaluating the Clinical Quality of Restorations. J Am Dent Assoc 87, 369–377
- Sailer I, Makarov NA, Thoma DS, Zwahlen M, Pjetursson BE (2015): All-ceramic or metal-ceramic tooth-supported fixed dental prostheses (FDPs)? A systematic review of the survival and complication rates. Part I: Single crowns (SCs). Dent Mater 31, 603–623
- Sailer I, Makarov NA, Thoma DS, Zwahlen M, Pjetursson BE (2016): Corrigendum to „All-ceramic or metal-ceramic tooth-supported fixed dental prostheses (FDPs)? A systematic review of the survival and complication rates. Part I: Single crowns (SCs)“ [Dental Materials 31 (6) (2015) 603-623]. Dent Mater 32, e389–e390
- Samartzi T-K, Papalexopoulos D, Sarafianou A, Kourtis S (2021): Immediate Dentin Sealing: A Literature Review. Clin Cosmet Investig Dent 13, 233–256
- Sarr M, Mine A, De Munck J, Cardoso MV, Kane AW, Vreven J, Van Meerbeek B, Van Landuyt KL (2010): Immediate bonding effectiveness of contemporary composite cements to dentin. Clin Oral Investig 14, 569–577
- Sathian B, Asim M, Banerjee I, Pizarro AB, Roy B, van Teijlingen ER, do Nascimento IJB, Alhamad HK (2020): Impact of COVID-19 on clinical trials and clinical research: A systematic review. Nepal J Epidemiol 10, 878–887
- Saxer UP, Mühlemann HR (1975): Motivation und Aufklärung. SSO Schweiz Monats-schr Zahnheilkd 85, 905–919
- Schlenz MA, Michel K, Wegner K, Schmidt A, Rehmann P, Wöstmann B (2020): Undergraduate dental students' perspective on the implementation of digital dentistry in the preclinical curriculum: a questionnaire survey. BMC Oral Health 20, 78

- Schlüter N, Amaechi BT, Bartlett D, Buzalaf MAR, Carvalho TS, Ganss C, Hara AT, Huysmans M-CDNJM, Lussi A, Moazzez R, et al. (2020): Terminology of Erosive Tooth Wear: Consensus Report of a Workshop Organized by the ORCA and the Cariology Research Group of the IADR. *Caries Res* 54, 2–6
- Schmalz G, Geurtsen W, Haller B, Federlin M (2007): Zahnfarbene Restaurationen aus Keramik: Inlays, Teilkronen und Veneers Gemeinsame Stellungnahme der Deutschen Gesellschaft für Zahnerhaltung (DGZ) und der Deutschen Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (DGZMK). *Dtsch Zahnärztl Z* 62, 612–615
- Schmid A, Behr M, Wulff J, Schneider-Feyrer S, Beierlein G, Strasser T (2021): Current technological processing and uses of silicate ceramics. *DZZ international* 3, 143–147
- Scholtanus JD, Özcan M (2014): Clinical longevity of extensive direct composite restorations in amalgam replacement: Up to 3.5 years follow-up. *J Dent* 42, 1404–1410
- Scholz KJ, Tabenski IM, Vogl V, Cieplik F, Schmalz G, Buchalla W, Hiller K-A, Federlin M (2021): Randomized clinical split-mouth study on the performance of CAD/CAM-partial ceramic crowns luted with a self-adhesive resin cement or a universal adhesive and a conventional resin cement after 39 months. *J Dent* 115, 103837
- Schwendicke F, Splieth C, Breschi L, Banerjee A, Fontana M, Paris S, Burrow MF, Crombie F, Page LF, Gatón-Hernández P, et al. (2019): When to intervene in the caries process? An expert Delphi consensus statement. *Clin Oral Investig* 23, 3691–3703
- Schwendicke F, Splieth CH, Bottenberg P, Breschi L, Campus G, Domejean S, Ekstrand K, Giacaman RA, Haak R, Hannig M, et al. (2020): How to intervene in the caries process in adults: proximal and secondary caries? An EFCD-ORCA-DGZ expert Delphi consensus statement. *Clin Oral Investig* 24, 3315–3321
- Selwitz RH, Ismail AI, Pitts NB (2007): Dental caries. *The Lancet* 369, 51–59
- Shafiei F, Fattah Z, Barati S (2019): Effect of operator skill on the dentin bonding ability of a self-adhesive resin cement after different adhesive treatments. *Gen Dent* 67, e1–e6
- Signori C, Collares K, Cumerlato CBF, Correa MB, Opdam NJM, Cenci MS (2018): Validation of assessment of intraoral digital photography for evaluation of dental restorations in clinical research. *J Dent* 71, 54–60
- Son K, Lee K-B (2020): Prediction of learning curves of 2 dental CAD software programs, part 2: Differences in learning effects by type of dental personnel. *J Prosthet Dent* 123, 747–752
- Sonmez N, Gultekin P, Turp V, Akgungor G, Sen D, Mijiritsky E (2018): Evaluation of five CAD/CAM materials by microstructural characterization and mechanical tests: a comparative in vitro study. *BMC Oral Health* 18, 5
- Splieth CH, Kanzow P, Wiegand A, Schmoeckel J, Jablonski-Momeni A (2020): How to intervene in the caries process: proximal caries in adolescents and adults—a systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Investig* 24, 1623–1636

- Stawarczyk B, Ramel C, Sapina B, Hämmerle CHF (2010): Ein Patient - mehrere Möglichkeiten. *Dent Dialogue* 11, 46–72
- Stawarczyk B, Keul C, Eichberger M, Figge D, Edelhoff D, Lümke N (2016): Werkstoffkunde-Update: Zirkonoxid und seine Generationen - von verblendet bis monolithisch. *Quintessenz Zahntech* 42, 740–765
- Steinbrenner H (2018): Multichromatic and highly translucent hybrid ceramic Vita Enamic. *Int J Comput Dent* 21, 239–250
- Stoll R, Cappel I, Jablonski-Momeni A, Pieper K, Stachniss V (2007): Survival of Inlays and Partial Crowns Made of IPS Empress After a 10-year Observation Period and in Relation to Various Treatment Parameters. *Oper Dent* 32, 556–563
- Studer SP, Wettstein F, Lehner C, Zullo TG, Schärer P (2000): Long-term survival estimates of cast gold inlays and onlays with their analysis of failures. *J Oral Rehabil* 27, 461–472
- Suksaphar W, Banomyong D, Jirathanyanatt T, Ngoenwiwatkul Y (2018): Survival Rates from Fracture of Endodontically Treated Premolars Restored with Full-coverage Crowns or Direct Resin Composite Restorations: A Retrospective Study. *J Endod* 44, 233–238
- Suliman AA, Abdo AA, Elmasmari HA (2020): Training and experience effect on light-curing efficiency by dental practitioners. *J Dent Educ* 84, 652–659
- Talari K, Goyal M (2020): Retrospective studies - Utility and caveats. *J R Coll Physicians Edinb* 50, 398–402
- Taschner M, Krämer N, Lohbauer U, Pelka M, Breschi L, Petschelt A, Frankenberger R (2012): Leucite-reinforced glass ceramic inlays luted with self-adhesive resin cement: A 2-year in vivo study. *Dent Mater* 28, 535–540
- Tran D, Nesbit M, Petridis H (2016): Survey of UK dentists regarding the use of CAD/CAM technology. *Br Dent J* 221, 639–644
- Tsirogiannis P, Reissmann DR, Heydecke G (2016): Evaluation of the marginal fit of single-unit, complete-coverage ceramic restorations fabricated after digital and conventional impressions: A systematic review and meta-analysis. *J Prosthet Dent* 116, 328-335.e2
- Unlu N, Gunal S, Ulker M, Ozer F, Blatz MB (2012): Influence of operator experience on in vitro bond strength of dentin adhesives. *J Adhes Dent* 14, 223–227
- van den Breemer CRG, Gresnigt MMM, Cune MS (2015): Cementation of Glass-Ceramic Posterior Restorations: A Systematic Review. *Biomed Res Int* 2015, 148954
- van den Breemer CRG, Cune MS, Özcan M, Naves LZ, Kerdijk W, Gresnigt MMM (2019): Randomized clinical trial on the survival of lithium disilicate posterior partial restorations bonded using immediate or delayed dentin sealing after 3 years of function. *J Dent* 85, 1–10

- van Dijken JWV, Hasselrot L (2010): A prospective 15-year evaluation of extensive dentin–enamel-bonded pressed ceramic coverages. *Dent Mater* 26, 929–939
- Vichi A, Fabian Fonzar R, Carrabba M, Louca C, Scotti N, Mazzitelli C, Breschi L, Goracci C (2021): Comparison between Hydrofluoric Acid and Single-Component Primer as Conditioners on Resin Cement Adhesion to Lithium Silicate and Lithium Disilicate Glass Ceramics. *Materials (Basel)* 14, 6776
- Vogl V, Hiller K-A, Buchalla W, Federlin M, Schmalz G (2016): Controlled, prospective, randomized, clinical split-mouth evaluation of partial ceramic crowns luted with a new, universal adhesive system/resin cement: results after 18 months. *Clin Oral Investig* 20, 2481–2492
- von der Osten P (2012): Presskeramik erhält durch CAD / CAM neue Impulse – Zahn-technischer Richtungswechsel – digitale Vorbereitung für analoges Finale. *ZWR* 121, 518–518
- Wagner J, Hiller K-A, Schmalz G (2003): Long-term clinical performance and longevity of gold alloy vs ceramic partial crowns. *Clin Oral Investig* 7, 80–85
- Walter E, von Bronk L, Hickel R, Huth KC (2021): Impact of COVID-19 on Dental Care during a National Lockdown: A Retrospective Observational Study. *Int J Environ Res Public Health* 18, 7963
- Warreth A, Abuhijleh E, Almaghribi MA, Mahwal G, Ashawish A (2020): Tooth surface loss: A review of literature. *Saudi Dent J* 32, 53–60
- Wittneben J-G, Wright RF, Weber H-P, Gallucci GO (2009): A systematic review of the clinical performance of CAD/CAM single-tooth restorations. *Int J Prosthodont* 22, 466–471
- Wolf TG, Deschner J, Schrader H, Bührens P, Kaps-Richter G, Cagetti MG, Campus G (2021): Dental Workload Reduction during First SARS-CoV-2/COVID-19 Lockdown in Germany: A Cross-Sectional Survey. *Int J Environ Res Public Health* 18, 3164
- Worthington HV, Khangura S, Seal K, Mierzwinski-Urban M, Veitz-Keenan A, Sahrman P, Schmidlin PR, Davis D, Ihezor-Ejiofor Z, Rasines Alcaraz MG (2021): Direct composite resin fillings versus amalgam fillings for permanent posterior teeth. *Cochrane Database Syst Rev* 8, CD005620
- Wrbas K-T, Hein N, Schirrmeister JF, Altenburger MJ, Hellwig E (2007): Two-year clinical evaluation of Cerec 3D ceramic inlays inserted by undergraduate dental students. *Quintessence Int* 38, 575–581
- Yuzbasioglu E, Kurt H, Turunc R, Bilir H (2014): Comparison of digital and conventional impression techniques: evaluation of patients' perception, treatment comfort, effectiveness and clinical outcomes. *BMC Oral Health* 14, 10
- Zarauz C, Sailer I, Pitta J, Robles-Medina M, Hussein AA, Pradíes G (2021): Influence of age and scanning system on the learning curve of experienced and novel intraoral scanner operators: A multi-centric clinical trial. *J Dent* 115, 103860

- Zarone F, Ferrari M, Mangano FG, Leone R, Sorrentino R (2016): "Digitally Oriented Materials": Focus on Lithium Disilicate Ceramics. *Int J Dent* 2016, 9840594
- Zarone F, Ruggiero G, Leone R, Breschi L, Leuci S, Sorrentino R (2021): Zirconia-reinforced lithium silicate (ZLS) mechanical and biological properties: A literature review. *J Dent* 109, 103661
- Zaruba M, Mehl A (2017): Chairside systems: a current review. *Int J Comput Dent* 20, 123–149
- Zenthöfer A, Bermejo JL, Bömicke W, Frese C, Gülmez R, Rammelsberg P, Ohlmann B (2022): Early failures when using three different adhesively retained core build-up materials-a randomized controlled trial. *Clin Oral Investig* 26, 1927–1936
- Zimmer S, Göhlich O, Rüttermann S, Lang H, Raab WH-M, Barthel CR (2008): Long-term Survival of Cerec Restorations: A 10-year Study. *Oper Dent* 33, 484–487
- Zimmermann M, Mehl A: CAD/CAM-Technologie. In: Rosentritt M, Ilie N, Lohbauer U (Hrsg.): *Werkstoffkunde in der Zahnmedizin*. 1. Auflage; Georg Thieme Verlag, Stuttgart 2018, 425–446

## **Danksagung**

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr. med. dent. Annette Wiegand, Direktorin der Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie, Universitätsmedizin Göttingen, für die Überlassung des Dissertationsthemas und die herausragende Betreuung und Unterstützung bei der Anfertigung dieser Dissertation.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. med. dent. Philipp Franz Meyer-Marcotty, Direktor der Poliklinik für Kieferorthopädie, Universitätsmedizin Göttingen, für die hilfreichen Anregungen während der Progress-Reports.

Außerdem möchte ich mich bei meinen Kolleg\*innen der Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie, Universitätsmedizin Göttingen für ihre großartige Unterstützung bei dieser Forschungsarbeit bedanken: bei Herrn Dr. med. dent. Tim Hausdörfer für die Koordination der Studie und die kontinuierliche Betreuung und Motivation bei der Durchführung des Promotionsprojekts; bei Frau Prof. Dr. med. dent. Tina Rödiger für ihren Einsatz bei der Nachuntersuchung der Patient\*innen und bei Herrn PD Dr. Dr. med. dent. Philipp Kanzow für die große Hilfe bei der statistischen Auswertung.