

Aus der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
Direktorin: Univ.-Prof. Dr. Petra Gierthmühlen

Präparationsverhalten von Zahnärztinnen und Zahnärzten
bei Kronen- und Brückenversorgungen –
Auswertung von digitalen zahntechnischen 3D-Modelldatensätzen im
Vergleich mit der anhand eines Fragebogens empirisch ermittelten
Präparationsweise

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnmedizin
der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von
David Büscher
(2023)

Als Inauguraldissertation gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen
Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

gez.:

Dekan: Prof. Dr. med. Nikolaj Köcker

Erstgutachter: Prof. Dr. med. dent. Alfons Hugger

Zweitgutachterin: Prof. Dr. med. dent. Michelle Alicia Ommerborn

Für meine lieben Eltern Bärbel und Lothar und meine Ehefrau Parmida in Dankbarkeit

Zusammenfassung

Kronen- und Brückenversorgungen stellen grundlegende Versorgungsformen in der zahnärztlichen Prothetik dar. Ein wesentlicher Behandlungsschritt ist die Zahnpräparation durch den Zahnarzt. Hierbei wird zu Beginn die Zahnkrone durch Zahnhartsubstanzabtrag in ihrer Ausdehnung anatoform reduziert. Dieser Arbeitsschritt bildet in einer sich anschließenden komplexen Prozesskette die Basis, um den Zahn mittels geeigneter Materialien wieder zur gewünschten Kontur ergänzen zu können. Präparationsempfehlungen versuchen hierbei einerseits, den Anforderungen des gewählten Werkstoffs und andererseits der Zahnanatomie entsprechenden biologisch limitierenden Faktoren gerecht zu werden. Die Etablierung neuer Werkstoffe erfordert hierbei eine stetige materialspezifische Anpassung dieser Richtlinien.

Es stellte sich die Frage, ob geltende Anforderungen an diesen essenziellen Behandlungsschritt auf Seiten der Zahnärzteschaft adäquat internalisiert und praktiziert werden, um ein für den Patienten zufriedenstellendes und stabiles Ergebnis zu erzielen. Ferner sollte untersucht werden, inwieweit die Befragung unter den praktizierenden Zahnärztinnen und Zahnärzten von dem praktischen Vorgehen abweicht.

Hierzu erfolgten die Vermessung und Auswertung von innerhalb des digitalen Workflows angefallenen eingescannten Präparationen. N = 1002 digitalisierte Präparationen konnten aus fünf zahntechnischen Großlaboren akquiriert werden. Die anonymisierten Scans durften nicht älter als drei Jahre sein. Die vorliegenden STL-Datensätze wurden schließlich mithilfe der Dentalsoftware *Exocad* nach Parametern wie marginaler Präparationsbreite, Präparationswinkel und Abstand zum Zahnantagonisten dreidimensional vermessen. Außerdem wurde ein Fragebogen mithilfe des Umfragetools *SoSci-Survey* erstellt und an n = 9446 innerhalb Deutschlands tätige niedergelassene Zahnärztinnen und Zahnärzte per E-Mail versandt.

Es konnte eine Rücklauf von n = 406 Fragebögen erzielt werden. Der Fragenkatalog erfasste die im Praxisalltag bevorzugte Präparationsweise. Hierzu wurden neben Präparationsform, Präparationswinkel, verwendeten Instrumenten, Abformmethoden ebenfalls die Verwendung von CAD/CAM-Verfahren und 3D-Scan-Abformungen erfragt. Die Ergebnisse aus Fragebogen und Laborauswertung wurden jeweils mit den geltenden Standards aus Literatur und Industrie verglichen. Darüber hinaus sollten eventuelle Diskrepanzen zwischen Ergebnissen der Onlineumfrage und der Laborauswertung ermittelt werden.

Während beim okklusalen Mindestsubstanzabtrag die geforderten Mindestwerte größtenteils eingehalten wurden, zeigten sich bei der marginalen Präparationsbreite, der gewählten Präparationsform und dem Präparationswinkel deutliche Abweichungen von den Anforderungen. So wurde gerade bei Betrachtung keramischer Restaurationen tendenziell zu konisch und zu schmal präpariert. Ebenso wies ein relevanter Anteil von 39,0 % von n = 910 Präparationen ein als ungeeignet für Keramiken anzusehendes tangentiales marginales Randdesign als Hauptpräparationsform auf. Im Fragebogen hingegen gaben 71,2 % bis 90,4 % und so ein Großteil der n = 406 Zahnärztinnen und Zahnärzte ein in Hinblick auf Präparationsform und -winkel keramikkonformes Präparationsverhalten an. Insofern unterschied sich die persönliche Einschätzung signifikant ($p \leq 0,001$) von den Ergebnissen der Laborauswertung. Die Ergebnisse dieser Studie weisen auf eine verbesserungswürdige Umsetzung des Arbeitsschrittes der zahnärztlichen Präparation sowie eine fehlerhafte Selbsteinschätzung hierzu hin.

Summary

Crown and bridge restorations represent basic forms of care in dental prosthodontics. An essential treatment step is tooth preparation by the dentist. Initially, the tooth crown is reduced in its anatomical shape by removing hard tooth substance using suitable rotating instruments of the same shape. This work step forms the foundation in a subsequent complex process chain in order to be able to restore the tooth again prosthetically to the desired contour using suitable materials. Preparation recommendations try to meet the requirements of the selected material on the one hand and the biologically limiting factors corresponding to the tooth anatomy on the other. The establishment of new materials requires a constant material-specific adaptation of these guidelines.

The objective of this study was to investigate whether applicable requirements for this essential treatment step are adequately internalized and practiced by the dental profession to achieve a satisfactory and stable result for the patient. Furthermore, it was to be investigated to what extent the survey among practising dentists deviates from the practical procedure.

For this purpose, scanned preparations from the digital workflow were measured and evaluated. A total of $n = 1002$ digitised preparations were acquired from five large dental laboratories. These were not allowed to be older than three years. The available STL data sets were finally measured three-dimensionally using the Exocad dental software according to parameters such as marginal preparation width, preparation angle and distance to the tooth antagonist. In addition, a questionnaire was created using the survey tool SoSci-Survey and sent by e-mail to $n = 9446$ dentists practising in Germany.

A response rate of $n = 406$ questionnaires was achieved. With the help of the questionnaire, the preferred preparation method in daily practice was recorded. In addition to the preparation form, preparation angle, instruments used and impression methods, the use of CAD/CAM procedures and 3D scan impressions were also asked. The results from the questionnaire and the laboratory evaluation were compared with the applicable standards from literature and industry. In addition, any discrepancies between the results of the online survey and the laboratory evaluation were to be identified.

While the required minimum values for the occlusal minimum substance removal were largely complied with, the marginal preparation width, the selected preparation shape and the preparation angle showed significant deviations from the requirements. Especially when ceramic restorations were considered, the preparation tended to be too conical and too narrow. Similarly, a relevant proportion of 39.0% ($n = 910$) had a tangential marginal design as their main preparation shape, which was considered unsuitable for ceramics. In the questionnaire, on the other hand, a large proportion of 71.2 % - 90.4 % ($n = 406$) of dentists stated that their preparation behavior conformed to ceramics with regard to preparation shape and angle. In this respect, the personal assessment differs significantly ($p \leq 0.001$) from the results of the laboratory evaluation. The results of this study indicate that there is room for improvement in the implementation of the dental preparation step and that self-assessment of this step is incorrect.

Abkürzungsverzeichnis

CAD/CAM	Computer-aided manufacturing/Computer-aided design
CNC	Computer Numerical Controlled
DIN	Deutsches Institut für Normung
FDI	Fédération Dentaire Internationale
FZG	Frontzahngebiet
IBM	International Business Machines
ISO	Internationale Organisation für Normung
K	Keramische Vollkronen
KW	Konvergenzwinkel
M	Metallische Vollkronen
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NC	Numerical Controlled
PW	Präparationswinkel
SD	Standardabweichung
STL	Standard Tessellation Language
SZG	Seitenzahngebiet
VK	Keramische Verblendkrone
VM	Metallische Verblendkrone
dv	Zahnfläche: disto-vestibulär
v	Zahnfläche: vestibulär
mv	Zahnfläche: mesio-vestibulär
m	Zahnfläche: mesial
mo	Zahnfläche: mesio-oral
o	Zahnfläche: oral
do	Zahnfläche: disto-oral
d	Zahnfläche: distal

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Allgemeiner Überblick	1
1.2	Überkronung von Zähnen.....	2
1.2.1	Brückenzahnersatz	3
1.3	Die Zahnärztliche Präparation	4
1.3.1	Lage der Präparationsgrenze	4
1.3.2	Präparationsform.....	5
1.3.3	Tangentialpräparation	6
1.3.4	Stufenpräparation.....	6
1.3.5	Hohlkehlpräparation	7
1.3.6	Öffnungswinkel von Hohlkehle und Stufe	7
1.4	Geometrische Parameter zur Erfassung der Präparationsgestaltung	8
1.4.1	Marginaler und okklusaler Substanzabtrag.....	8
1.4.2	Präparationswinkel.....	9
1.5	Prozessqualität.....	11
1.5.1	ISO-Nummernsystem für rotierende Instrumente	13
1.6	Die Abformung	14
1.7	Dentale Werkstoffe in der Kronen- und Brückenprothetik	16
1.7.1	Metallische Restaurationen	16
1.7.2	Keramische Restaurationen	17
1.8	Die Prozesskette und Digitaler Workflow	19
1.8.1	Chairside	20
1.8.2	Labside	20
1.8.3	Zentralisiert	21
1.9	Präparationsrichtlinien	22
1.9.1	Literaturangaben	22
1.9.2	Herstellerangaben.....	25
1.9.3	Aktuelle Studienlage.....	28
1.10	Ziele der Arbeit.....	29
2	Material und Methoden.....	30
2.1	Ethikvotum	30
2.2	Laborauswertung von digitalisierten präparierten Zähnen	30
2.2.1	Einschlusskriterien – Laborauswertung	30
2.2.2	Auswertungszeitraum.....	31
2.2.3	Rekrutierung der Scans.....	31
2.2.4	Auswertungs-Software	33

2.2.5	Auswertungsbogen	34
2.2.6	Messung der okklusalen Schichtstärke.....	35
2.2.7	Ermittlung der Präparationsform und Präparationsbreite	36
2.2.8	Messung des Präparationswinkels	38
2.2.9	Messung des Öffnungswinkels der Hohlkehle oder Stufe.....	39
2.3	Fragebogen.....	40
2.3.1	Der Fragenkatalog	40
2.3.2	Einschlusskriterien – Fragebogen	43
2.3.3	Ermittlung der E-Mail-Adressen.....	43
2.3.4	Versand des Fragebogens	44
2.3.5	Statistische Analytik	44
3	Ergebnisse	46
3.1	Analyse der Laborauswertung.....	46
3.1.1	Eigenschaften der Stichprobe	46
3.1.2	Präparationsform.....	48
3.1.3	Präparationsbreite.....	51
3.1.4	Abstand zum Antagonisten.....	57
3.1.5	Konvergenzwinkel	60
3.1.6	Öffnungswinkel der Hohlkehle und Stufe.....	68
3.1.7	Unterschnitte.....	70
3.2	Analyse der Fragebogenauswertung.....	71
3.2.1	Eigenschaften der Stichprobe	71
3.2.2	Durchschnittlich benötigte Zeit pro präpariertem Zahn	74
3.2.3	Bevorzugte Präparationsform.....	77
3.2.4	Bevorzugter Präparationswinkel.....	78
3.2.5	Auswahl der Präparationsinstrumente und Instrumentenklassifizierung	82
3.2.6	Bevorzugte Abformverfahren.....	87
3.2.7	Nutzung von CAD/CAM-Verfahren	89
3.2.8	Bevorzugte Lage der Präparationsgrenze	91
3.3	Vergleich zwischen Labor- und Fragebogenauswertung	94
3.3.1	Präparationsdesign	94
3.3.2	Konvergenzwinkel	95
4	Diskussion.....	97
4.1	Methodenwahl.....	97
4.2	Diskussion der Dentallaborauswertung	97
4.2.1	Methodenkritik.....	97
4.2.2	Stichprobenumfang	99
4.2.3	Auswertungsverfahren	100

4.2.4	Diskussion der Präparationsform.....	102
4.2.5	Diskussion der okklusalen Schichtdicke	105
4.2.6	Diskussion der Präparationsbreite.....	106
4.2.7	Diskussion des Konvergenzwinkels und des Öffnungswinkels	108
4.2.8	Diskussion zum Vorhandensein von Unterschnitten.....	111
4.3	Diskussion der Umfrage	112
4.3.1	Methodenkritik.....	112
4.3.2	Diskussion der Rücklaufquote	114
4.3.3	Diskussion der Umfrageergebnisse.....	116
4.4	Schlussfolgerungen.....	123
5	Literatur- und Quellenverzeichnis	125
6	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	136

1 Einleitung

1.1 Allgemeiner Überblick

Bei der restaurativ-prothetischen Versorgung von Zähnen mit festsitzendem Zahnersatz handelt es sich um eine komplizierte und anspruchsvolle „Arbeits- und Werkstoffkette“. Die einzelnen zahnärztlichen und zahntechnischen Arbeitsschritte greifen hierbei wie Zahnräder ineinander (Balkenhol et al. 2005). Kleinste Abweichungen innerhalb dieser Prozesskette führen zu Fehlern, die sich im weiteren Verlauf potenzieren können und sich an anderer Stelle nicht mehr „kompensieren“ lassen (Meiners 1985, Wöstmann 2018).

Auch wenn das digitale Zeitalter Einzug in die Zahnheilkunde gehalten hat und im Zuge dessen innovative und komfortable technische Neuerungen zahlreiche Bereiche der zahnärztlichen Prothetik revolutioniert haben, so bildet dennoch zu Beginn eines jeden Behandlungsprojektes das Wissen um die technischen Anforderungen an die gewünschte Restaurationsform den Baustein, auf dem das weitere Vorgehen fußt.

Der präparierte Zahn bildet bei Kronen- und Brückenversorgungen hierbei das greifbare Fundament. Vereinfacht ausgedrückt wird hierbei im Rahmen der zahnärztlichen Präparation eine verkleinerte möglichst anatomisch entsprechende Version des Originalzahnes ohne unter sich gehende Bereiche geschaffen. Durch den hinzugewonnenen Platz wird der Zahn im zahntechnischen Labor durch entsprechende Materialien wieder zur „gewünschten Kontur“ ergänzt (Podhorsky und Wöstmann 2016). Vergegenwärtigt man sich, dass bei diesem „invasive[n] und irreversible[n] Behandlungsschritt“ (Beuer et al. 2011) bis zu 70 % der Zahnhartsubstanz eliminiert werden, gilt es umso mehr im Hinblick auf Patientensicherheit und Qualitätsmanagement strenge Standards anzulegen (Edelhoff und Sorensen 2002, Edelhoff und Kern 2003). *Kimmel* nennt im Zuge einer atraumatischen Präparationsweise zur Vermeidung "iatrogener Schäden" eine "ausreichende Objektkühlung, die einwandfreie Beschaffenheit und [den] optimale[n] Einsatz geeigneter Arbeitsmittel" (Kimmel et al. 1986). *Diedrichs und Khawaja* fassen die „Basisbausteine zur Qualitätssicherung“ folgendermaßen zusammen (Diedrichs und Khawaja 2015):

- o Biologisch orientierte Präparationstechnik
- o Professioneller Umgang mit geeigneten Instrumenten und Materialien
- o Rationelle Arbeitsgestaltung

Im Rahmen dessen beeinflussen prothetisch tätige Zahnärztinnen und Zahnärzte durch ihr Handeln das Behandlungsergebnis und tragen entscheidend zum Erfolg oder Misserfolg der Therapie bei. Eine „sachgerechte Präparationsgestaltung“ ist nicht nur im Hinblick auf das „Fließen der Werkstoffe [und] die Retention der Restauration“ (Kimmel 1997) von entscheidender Bedeutung, sondern auch hinsichtlich der Berücksichtigung von Materialeigenschaften der dentalen Werkstoffe.

Entsprechend gilt es, während der Präparation Richtlinien und Standards für ein qualitativ hochwertiges und zufriedenstellendes Ergebnis einzuhalten. Diese Richtlinien unterliegen im Rahmen der Materialweiterentwicklung dabei ebenfalls einem steten Wandel. Während früher eine möglichst starke Retention der späteren metallischen Krone oder Brücke auf dem Zahnstumpf ausschlaggebend war, erhielt mit Etablierung der Dentalkeramik Mitte des 20. Jahrhunderts ein neuer Werkstoff „Einzug“ in die prothetische Zahnmedizin. Damit gehen neue Materialanforderungen einher, die es zu berücksichtigen gilt (Arnetzl 2008).

Neben dem anatomischen und atraumatischen Beschleifen der Zähne spielt die Gestaltung der Präparation eine entscheidende Rolle. Präparationsform und quantifizierbare geometrische Parameter des Stumpfdesigns sollten einerseits den Anforderungen des gewünschten Materials Genüge tragen und einen sicheren Halt der prothetischen Versorgung

gewährleisten; andererseits sollten sie aber auch so minimalinvasiv wie möglich sein, um biologische Komplikationen zu vermeiden.

1.2 Überkronung von Zähnen

Übersteigt das Ausmaß der dentalen Schädigung die Möglichkeiten von direkten Füllungswerkstoffen oder müssen verloren gegangene Zähne vollständig ersetzt werden, so können mittels indirekter Restaurationen funktionelle, phonetische und ästhetische Beeinträchtigungen behoben werden (Balkenhol et al. 2005). Zu den indirekten Restaurationen zählen unter anderem Kronen und Brücken.

„Künstliche Kronen ersetzen [...] die ganze Zahnkrone selbst. Sie überdecken oder ersetzen den entsprechend vorbereiteten Zahnstumpf teilweise oder vollständig und sind angezeigt, wenn ein Zahn durch konservierende Maßnahmen [...] nicht mehr restauriert werden kann“ (Lehmann et al. 2009).

Gemäß *Lehmann et al.* erfüllen sie hierbei eine Ersatz-, Schutz-, Befestigungs- sowie eine ästhetische Funktion (Lehmann et al. 2009). Hauptindikation für die Überkronung von Zähnen ist ein vorliegender Defekt der Zahnhartsubstanz (Trauma, Karies, Attrition, Abrasion, Erosion). Weiterhin kann die mechanische Schwächung des Zahnes durch großflächige Füllungen, angeborene Zahnhartsubstanzdefekte (z.B. Amolegenese imperfecta) oder Zahnverfärbungen (avitale Zähne) eine Überkronung der Zahnkrone nötig machen. Stützzonenaufbau, Bisslageveränderungen sowie Formkorrekturen können bei Erwachsenen ebenfalls eine Indikation darstellen. Angrenzende Pfeilerzähne werden für die Aufnahme von Brückenpfeilern achsengerecht beschliffen, um verloren gegangene Zähne zu ersetzen (Strub et al. 2011).

Die zu überkronenden Zähne müssen – falls avital – endodontisch suffizient versorgt sein. Periapikale Entzündungen oder insuffiziente Wurzelkanalfüllungen stellen Kontraindikationen dar. Ebenfalls müssen vorhandene Gingivitiden oder Parodontopathien vor Überkronung behandelt werden. Aufgrund der vergrößerten Ausdehnung des Pulpenkavums mit konsekutiv erhöhter Wahrscheinlichkeit zur Devitalisierung des Zahnes ist die Überkronung bei Jugendlichen unter 18 Jahren primär kontraindiziert. Wurzelfrakturen und kariöse Zahnzerstörungen bis weit in die Wurzel hinein stellen ebenfalls Kontraindikationen dar. Ebenso sollte im Hinblick auf den Allgemeinzustand des Patienten bedacht werden, dass die teilweise mehrstündigen Behandlungen eine nicht zu unterschätzende Belastung darstellen können (Strub et al. 2011).

Es werden verschiedene Arten von Kronen unterschieden. Formal lassen sich Kronen in Ersatz-, Schutz- und Stütz- bzw. Verankerungskronen unterteilen. Praktisch erfüllen Kronen oder Brücken jedoch meist nicht nur eine, sondern mehrere Funktionen gleichzeitig (Beuer et al. 2011, Strub et al. 2011).

Abhängig vom Ausmaß der zu ersetzenden Zahnhartsubstanz lassen sich Kronen weiterhin in Hülsenkronen, Stiftkronen und Teilkronen einteilen. Während Stiftkronen, bei denen die klinische Zahnkrone im Wurzelkanal verankert wird, heute als obsolet gelten (Strub et al. 2011), müssen sich lediglich partielle Anteile der Zahnkrone umfassende Teilkronen heutzutage ebenfalls gegenüber immer leistungsfähigeren direkten Restaurationen (Füllungen) beweisen.

Hülsenkronen hingegen finden eine nach wie vor breite Anwendung in der zahnärztlichen Praxis. Sie definieren sich durch eine „vollständige Umfassung der klinischen Zahnkrone“. Innerhalb der Hülsenkronen erfolgt eine weitere materialabhängige Einteilung in Metall- und Nichtmetallhülsenkronen. Metallhülsenkronen werden - sofern sie komplett aus Metall bestehen - als Vollkronen bezeichnet. Mit Keramik oder Kunststoff verblendete Kronengerüste werden als Verblendkronen benannt. Verblendkronen wiederum lassen sich in teil- oder vollverblendet untergliedern (Strub et al. 2011).

Keramische Hülsenkronen lassen sich ebenfalls als monolithische Vollkronen oder Verblendkronen anfertigen. Verblendete Kronen bestehen hierbei üblicherweise aus einem Zirkoniumdioxid-Gerüst sowie einer Verblendung aus Silikatkeramik.

Eine weitere Gruppe umfasst die Doppelkronen, die nicht als Einzelkronenersatz, sondern in Kombination mit herausnehmbarem Zahnersatz als Verankerungselemente dienen (Strub et al. 2011).

1.2.1 Brückenzahnersatz

„Neben dem Ersatz verloren gegangener Zähne“ dienen Brücken der „Wiederherstellung von Kaufunktion, Phonetik und Ästhetik“ (Beuer et al. 2011). Die Restauration wird über festsitzende Brückenanker an den Pfeilerzähnen befestigt. Als Pfeiler können neben natürlichen Zähnen auch Implantate dienen (Augthun und Mundt 2008, Lehmann et al. 2009). Das Brückenzwischenglied (*Pontic*) verbindet beide Brückenanker miteinander und stellt das lückenfüllende Element dar. Die Gestaltung dieses Brückenzwischengliedes hat direkte Auswirkungen auf die Stabilität der Brückenkonstruktion. Eine Reduzierung der Höhe des Verbinders bzw. eine Verlängerung der Spannweite reduzieren die Stabilität maßgeblich (Strub et al. 2011). Die auftretenden Kaukräfte werden von den Brückenpfeilern aufgenommen (Lehmann et al. 2009).

Nach Lage der Brücke im Kiefer unterscheidet man zwischen Frontzahn- und Seitenzahnbrücken. Nach Anzahl der vorhandenen Brückenanker und Brückenglieder wird die Gliedrigkeit der Brückenkonstruktion festgelegt (zum Beispiel dreigliedrige, viergliedrige Brücken und so weiter). Nach Anzahl der Lücken zwischen zwei Pfeilerzähnen differenziert man zwischen ein-, zwei- und dreispannigen Brücken und so weiter. Beidseits von Pfeilerzähnen begrenzte Brücken werden als Endpfeilerbrücken bezeichnet. Während bei den einspannigen Endpfeilerbrücken keine „Unterbrechung“ zwischen den Endpfeilern vorhanden ist, wird die mehrspannige Endpfeilerbrücke durch weitere Pfeilerzähne getrennt. Bei den als statisch ungünstiger einzustufenden Freie- oder Extensionsbrücken „bildet das Brückenzwischenglied die mesiale oder distale Begrenzung der Brücke“ (Beuer et al. 2011).

In der Brückentechnik finden sich mit reinen Metallbrücken, kunststoffverblendeten oder keramisch verblendeten Metallbrücken, vollkeramischen sowie reinen Kunststoffbrücken ähnliche Materialien wie bei Kronen (Strub et al. 2011).

Brücken lassen sich ebenfalls nach Gestaltung des Brückenzwischengliedes klassifizieren. Je nach Ausdehnung des Verbinders in Bezug zur darunter liegenden Schleimhaut wird zwischen Schwebelücke, Tangentialbrücke, Spaltbrücke, Sattelbrücke und *Ovate Pontic* unterschieden. Bei ausreichender Schleimhautdicke liefert das Konzept des *Ovate Pontic* ein ästhetisch ansprechendes Ergebnis und kommt heutzutage häufig zur Anwendung. Das „eiförmige“ Brückenglied ähnelt durch seine Auflage auf der Schleimhaut einem natürlichen Zahn (Strub et al. 2011). Der darunter liegende Knochen soll zudem durch die Belastung erhalten bleiben.

Kontraindikationen für Brücken sind insbesondere zu lange Spannweiten. Das Ante'sche Gesetz jedoch, nach dem „die Summe der Wurzelhautoberfläche der zu ersetzenden Zähne [...] die Summe der Wurzelhautoberfläche der Pfeilerzähne nicht überschreiten“ (Pospiech 2002) darf, hält einer „evidenzbasierten Betrachtung“ heute nicht mehr stand und gilt als veraltet (Bartols und Brauer 2020). Besondere Vorsicht gilt ebenfalls bei der Extensionsbrücke, die eine starke Belastung für die angrenzenden Pfeilerzähne darstellt. Das extendierte Brückenglied sollte dabei eine Länge von maximal einer Prämalorenbreite nicht überschreiten (Strub et al. 2011).

1.3 Die Zahnärztliche Präparation

Zahnärztinnen und Zahnärzte schaffen mittels rotierender Instrumente unter Zahnhartsubstanzabtrag eine verkleinerte Form der anatomischen Ausgangssituation des zu überkronenden Zahnes ohne Unterschnitte. Diese Form soll anschließend der natürlichen Zahnform entsprechend wieder nachgebildet werden (Podhorsky und Wöstmann 2016). Um ein ästhetisch ansprechendes Ergebnis zu erhalten und den Anforderungen des gewünschten Materials gerecht zu werden, sollten Zahnärzte und Zahnärztinnen sich an vorgegebenen Richtlinien orientieren. Diese Richtlinien versuchen den Zahnstumpf anhand von qualitativen und quantitativen Parametern in seiner Geometrie zu erfassen und können an charakteristischen Stellen des Zahnstumpfes mittels geeigneter Messverfahren reproduziert werden. Folgende Parameter werden hierbei typischerweise erfasst: Design im Bereich des Präparationsrandes, marginale Präparationsbreite, Abstand zum Antagonisten, Präparationswinkel, Winkel der Hohlkehle oder Stufe und die Höhe der Präparation.

1.3.1 Lage der Präparationsgrenze

Abhängig von der Lage der Präparationsgrenze relativ zum Zahnfleischniveau erfolgt die Einteilung in supra-, äqui- und subgingival gelegene Präparationsgrenzen. Biologische und technische oder praktische Aspekte stehen dabei im Gegensatz zu ästhetischen Anforderungen an die Restauration.

Vorteile der supragingivalen Präparationsweise umfassen die Möglichkeit eines verbesserten Fehlermanagements durch erleichterte visuelle Kontrolle der Präparationsgrenze, Schonung des Gingivakomplexes durch atraumatische Präparationsweise, Vereinfachung der Abformung, leichtere Befestigung der Restauration, bessere Zugänglichkeit der Restaurationsränder zur Mundhygiene und erleichterte Kontrolle des Kronenrandes (Beuer et al. 2011, Podhorsky et al. 2015). Eine zu kurze Stumpfhöhe, subgingival extendierende Hartsubstanzdefekte sowie der Austausch von Restaurationen mit bereits erfolgter subgingivaler Präparation machen eine supragingivale Präparation hingegen unmöglich (Beuer et al. 2011). Gerade im Frontzahnggebiet ist zudem ein unterhalb des Zahnfleischniveaus zum Liegen kommender Restaurationsrand wünschenswert, um ästhetische Beeinträchtigungen zu vermeiden.

Unter Berücksichtigung der biologischen Breite und möglichst schonender Präparationsweise lässt sich die Präparationsgrenze zum Limbus alveolaris hin ausdehnen (Amiri-Jezeh et al. 2006). Ausgangssituation des Zahnes und Ausdehnung der kariösen Läsionen können die subgingivale Präparation nötig machen. Indiziert ist diese beispielweise auch bei metallischen Verblendkronen im ästhetischen Bereich (Beuer et al. 2011).

1.3.2 Präparationsform

Die Präparationsform definiert sich durch die charakteristische Zahnkontur am Übergang von präparierter zu unpräparierter Zahnoberfläche. Im zweidimensionalen Schnittbild lässt sich die jeweilige Form erkennen, wie in Abb. 1 schematisch dargestellt wird. Das gewünschte Design lässt sich bei sachgerechter Anwendung durch Auswahl des geeigneten formkongruenten Instruments realisieren. *Kimmel* beschreibt vier verschiedene Präparationsformen (Kimmel et al. 1986):

- Tangentialpräparation
- Hohlkehlnpräparation
- Stufe mit abgerundeter Innenkante
- Stufe mit Rand-Abschrägung

Dabei sollte die jeweilige Form werkstoffspezifisch unter Berücksichtigung der Eigenheiten des Materials sowie der vorliegenden anatomischen Ausgangssituation gewählt werden.

Dachrinnenförmige Präparationsformen mit marginal wieder ansteigenden Präparationsrändern stellen Präparationsfehler dar und sollten vermieden werden (Hajtó 2010). Die oben erwähnte Stufe mit Abschrägung wird im klinischen Alltag heute nur noch selten verwendet, denn sie erfordert einen messerscharf auslaufenden in der Regel metallischen Rand.

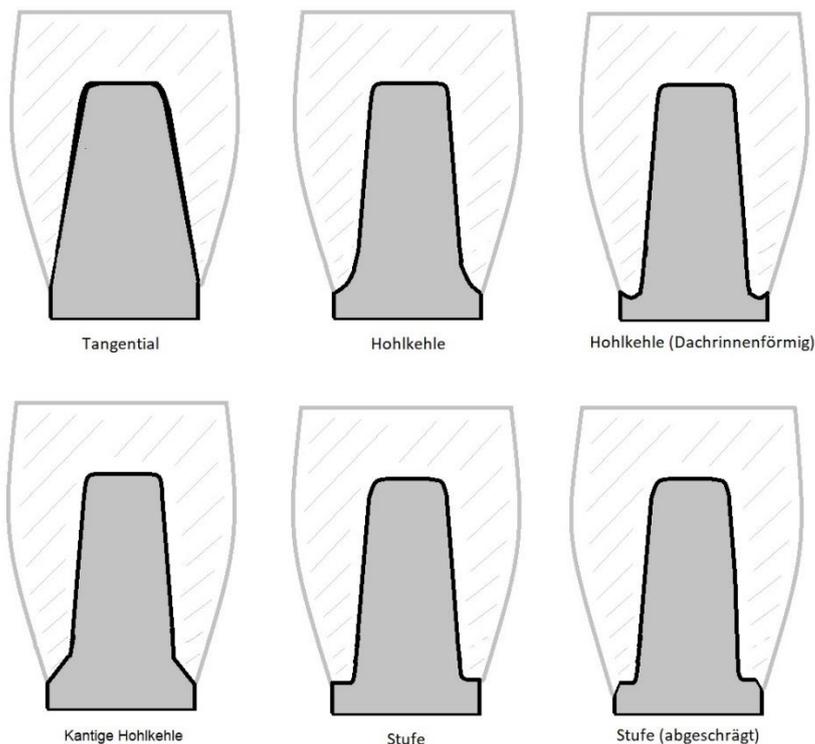


Abb. 1: Präparationsformen modifiziert nach Kimmel (1986)

1.3.3 Tangentialpräparation

Bei dieser Form der Präparation herrscht ein „stufenloser“ Übergang an der Grenze von präpariertem zu unpräpariertem Zahn (Albert 1971). Dem Vorteil der substanzschonenden Vorgehensweise durch den minimalen zervikalen Zahnhartsubstanzabtrag und die technisch einfache Ausführung (Beuer et al. 2011) steht die schlechte Erkennbarkeit der Präparationsgrenze gegenüber (Kimmel et al. 1986). Eine durch den Zahntechniker falsch festgelegte Präparationsgrenze mit Fehlpassung der späteren Restauration kann die Folge sein. Mangels ausreichendem Platzangebot im Bereich der Präparationsgrenze stellt diese Form für keramisch verblendete und Vollkeramikrestorationen keine geeignete Alternative dar (Strub et al. 2011). Unter physiologischer Kaubelastung erzeugte radiale Spannungen bei niedrigen Wandstärken am Kronenrand können die Frakturgefahr bei keramischen Materialien erhöhen (Lohbauer et al. 2018). Metallische Restaurationen hingegen erlauben einen dünn auslaufenden Kronenrand. Die Tangentialpräparation stellt hier eine Möglichkeit der Präparation dar (Ilie et al. 2018). Jedoch führt der kontinuierliche Übergang im zervikalen Randbereich zu einem Aufliegen der späteren Restauration, sodass es hier häufig zu einer „Überkonturierung“ kommt (Pieper 2004). Irritationen des umliegenden Gewebes und parodontale Beeinträchtigungen können die Folge sein (Wimmer 2009).

1.3.4 Stufenpräparation

Diese Form der Randgestaltung (s. Abb. 1) zeichnet sich durch eine deutliche Stufenbildung im Bereich der Präparationsgrenze aus. Präparationsgrenze und axiale Wand des Zahnstumpfes nehmen hierbei einen Winkel von circa 90° ein. Eine sich klar abzeichnende Präparationsgrenze erleichtert die weiteren zahntechnischen Arbeitsschritte (Kimmel et al. 1986). Eventuell verbleibende äußerliche Schmelzüberhänge gilt es zu vermeiden, da ein späteres Abplatzen durch einwirkende Kräfte eine Freilegung des Kronenrandes zur Folge hätte (Bader und Setz 1991). Je nach gewähltem Schleifinstrument kann die Innenkante abgerundet oder kantig verlaufen. Keramikkonform sollte jedoch stets eine abgerundete Innenkante angelegt werden. Ebenfalls besteht die Möglichkeit durch Abschrägung des Präparationsrandes einen Federrand zur Verbesserung des Randschlusses zu gestalten. Dadurch ist jedoch die Gefahr des Abbiegens oder Abplatzens der dünn auslaufenden Ränder erhöht (Kimmel et al. 1986). Die breite zervikale Stufe ermöglicht eine gute Kompensation der okklusal einwirkenden Kräfte (Beuer et al. 2008, Beuer et al. 2008, Schiefelbein 2015). Das Platzangebot im Bereich der Präparationsgrenze erlaubt die zahntechnische Modellation in ausreichender Schichtstärke (Pieper 2004). Demgegenüber steht nachteilig eine substanzfordernde Präparationsweise. So stellt das Risiko eines Vitalitätsverlustes des Zahnes durch direkte Eröffnung der Zahnpulpa eine nicht zu unterschätzende Komplikation dar. Die Ausdehnung der Pulpa oder übermäßige Irritation derselbigen bei Unterschreitung der nötigen Restdentinstärke - sehr häufig bei einer Verlagerung der Präparationsgrenze in den Wurzelbereich hinein vorkommend - bestimmen die Komplikationsrate maßgeblich mit. Die Stufe wird mit zylindrischen oder leicht konischen Instrumenten präpariert. Durch abgerundete Innenkanten der Stufe sollen „Spannungsspitzen“ vermieden werden (Beuer et al. 2011).

1.3.5 Hohlkehlnpräparation

Bei der Hohlkehle (s. Abb. 1) handelt es sich um eine „universell einsetzbar[e]“ (Beuer et al. 2011) Präparationsart für die „Vollkronentechnik“ (Edelhoff und Kern 2003). Im Schnittbild ergibt sich ein konkav verlaufender Übergang zur Präparationsgrenze hin. Der Winkel der Hohlkehle sollte zwischen beschliffener und unbeschliffener Zahnoberfläche circa 120° betragen (Schiefelbein 2015). Der Übergang gewährleistet ein gutes Fließverhalten in Hinblick auf Abformmaterialien, zahntechnische Materialien und Zemente (Kimmel et al. 1986, Pieper 2004). Die charakteristische Form bedingt im Vergleich zur Stufenpräparation zervikal einen geringeren Substanzabtrag, bietet bei ausreichender Breite aber dennoch genügend Spielraum, um materialspezifische Mindestschichtstärken im Bereich des Kronenrandes einzuhalten. Mittels „Durchmesser und Eindringtiefe des Präparationsinstrumentes“ lässt sich der Substanzabtrag gut steuern (Beuer et al. 2011). Die auftretenden okklusalen Kräfte können gut aufgenommen werden (Pospiech 2004, Schiefelbein 2015). Ein weiterer Vorteil liegt in der guten Abgrenzbarkeit der Präparationsrandes zwischen präparierter und unpräparierter Zahnoberfläche (Strub et al. 2011), wodurch das Risiko einer Überkonturierung der späteren Krone gesenkt wird. Eine Hohlkehle lässt sich mit einem torpedoförmigen Schleifkörper präparieren. Hierbei gilt es, das Schleifinstrument nicht weiter als bis zur Spitze im Zahn zu versenken. Andernfalls resultieren dachrinnenförmige Randbereiche (Strub et al. 2011). Die „fehlende[] zervikale[] Führung des Instrumentes“ macht diese Präparationsform technisch anspruchsvoller (Beuer et al. 2011). Zudem birgt die Präparationsweise bei subgingivalen Präparationen die Gefahr von Verletzungen des umliegenden Parodontiums durch das Schleifinstrument.

1.3.6 Öffnungswinkel von Hohlkehle und Stufe

Der Winkel zwischen marginaler Auflagefläche der Restauration und axialer Zahnfläche sollte unter Berücksichtigung einer keramikgerechten Präparation bei der Stufenpräparation 90° bis 110° und bei der Hohlkehlnpräparation 120° betragen (Ottl und Lauer 1996). Die Form der Hohlkehle und der Stufe mit abgerundeter Innenkannte führen dazu, dass „Vollkeramikkrone und Stumpfoberfläche nahezu senkrecht aufeinander“ liegen (Schiefelbein 2015), sodass bei Belastung der Restauration Zugspannungen zugunsten von Druckspannungen vermieden werden. Dies soll einen protektiven Effekt auf die Langlebigkeit der Restauration mit sich führen (Janda 2007, Kern et al. 2015, Schiefelbein 2015).

1.4 Geometrische Parameter zur Erfassung der Präparationsgestaltung

Mithilfe verschiedener Parameter kann die Form des präparierten Zahnes an repräsentativen Zahnflächen erfasst werden. Zu den in dieser Studie berücksichtigten Parametern zählen:

- Marginaler Substanzabtrag
- Okklusaler Substanzabtrag
- Präparationswinkel
- Unterschnitte
- Öffnungswinkel von Hohlkehle und Stufe

1.4.1 Marginaler und okklusaler Substanzabtrag

Hierbei handelt es sich um den Zahnhartsubstanzabtrag im Bereich der marginalen Präparationsgrenze sowie der okklusalen Kaufläche. Bei der okklusalen Präparation sollte eine Orientierung am Höcker-Fissuren-Relief des Zahnes erfolgen. Diese anatome Reduktion schafft die Voraussetzung einer „störungsfreien Okklusion mit adäquater Interkuspidationstiefe“ (Podhorsky und Wöstmann 2016). Mittels Tiefenmarkierern lassen sich zuvor Rillen in vordefinierter Tiefe im Zahnschmelz anlegen. Diese dienen der vorbereitenden Orientierungshilfe, um einen gleichmäßigen und ausreichenden Substanzabtrag zu erzielen. Der zirkuläre Substanzabtrag wird dann durch ein formkongruentes rotierendes Schleifkörperinstrument erzielt. Form und Ausführung des Arbeitsteils geben die entstehende marginale Präparationsform vor. In Kenntnis der verwendeten ISO-Größe kann die angestrebte Präparationsbreite näherungsweise erreicht werden. So weist ein torpedoförmiges Instrument mit der ISO-Größe 014 einen maximalen Durchmesser des Arbeitsteils von 1,4 mm auf. Versenkt man das parallel zur Zahnachse angelegte Instrument nun bis zur Instrumentenspitze - also der Hälfte der Durchmessers des Arbeitsteiles im Zahn - entspricht dies einer entstehenden Hohlkehle mit einer Präparationsbreite von 0,7 mm.

Wichtige Qualitätskriterien bei axialer und okklusaler Reduktion sind hierbei (Beuer et al. 2011):

- Vermeidung unter sich gehender Bereiche
- zirkulär eindeutig festlegbare Präparationsgrenze
- ausreichend Substanzabtrag
- Schonung der Nachbarzähne

Den geringsten Platzbedarf benötigen aufgrund ihrer materialspezifischen Eigenschaften Metallrestorationen. Keramiken erfordern aufgrund ihrer Anfälligkeit auf Zugbelastung und insgesamt spröderen Materialverhaltens eine breitere horizontale Abstützung. Verblendete Kronen setzen sich aus einem Gerüst und einer Verblendung zusammen und erfordern folglich den höchsten Substanzabtrag (Beuer et al. 2011). Eine ausreichend dicke Verblendschicht wird ebenfalls benötigt, um ein Durchschimmern der opaken oder metallfarbenen Gerüste zu vermeiden (Lohbauer et al. 2018).

1.4.2 Präparationswinkel

Wie in Abb. 2 veranschaulicht wird, bezeichnet der Präparationswinkel oder Konuswinkel definitionsgemäß den Winkel, „um den die Steigung der Präparation von der Kronenlängsachse abweicht“. Der Konvergenzwinkel - auch Kegelwinkel genannt - „beschreibt den Winkel zwischen zwei gegenüberliegenden Wänden, die, würde man sie verlängern, eine Kegelspitze bildeten“ (Erhatic und Blankenstein 2013).

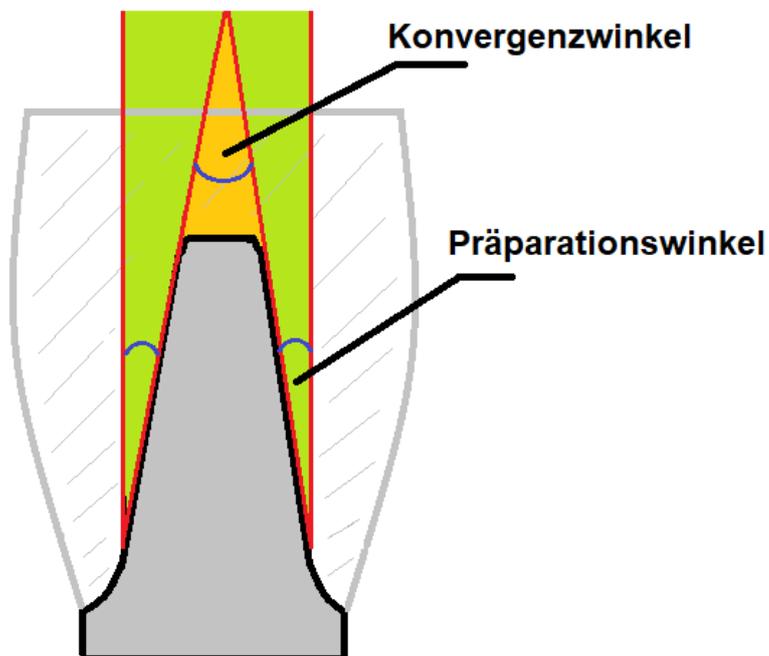


Abb. 2: **Präparationswinkel und Konvergenzwinkel** modifiziert nach Hajtó (2010)

Sowohl Konizität des verwendeten Instrumentes als auch Angulation des Werkzeugs relativ zur Zahnlängsachse durch die Behandelnden bestimmen den resultierenden Präparationswinkel. Zu parallel oder gar divergierend verlaufende Zahnflächen mit entstehenden Unterschnitten gilt es zu vermeiden. Ebenso erhöht ein zu groß gewählter Präparationswinkel das Risiko der pulpalen Schädigung.

Das Verhältnis zwischen Stumpfhöhe und Präparationswinkel hat starken Einfluss auf die Retention einer Krone. Die Retention oder Widerstandsform beschreibt „die Eigenschaft einer Präparation, der Entfernung einer Restauration entgegen ihrer Einschubrichtung entgegenzuwirken“ (Hajtó 2010). Der Graph in Abb. 3 stellt den Zusammenhang zwischen dem Konvergenzwinkel und der nötigen vertikalen Abzugskraft bei zementierten Kronen dar. Ab Konvergenzwinkeln von mehr als 10° kommt es zu einem relevanten Retentionsverlust (Podhorsky et al. 2015).

Der Gefahr eines Abkippens durch exzentrisch auf die Krone oder Brücke einwirkende Kräfte muss in der Präparationsform durch „hemmende Flächen“ entgegengewirkt werden. Hierbei liegen „rotationshemmende Flächen oberhalb des Punktes, an dem die Präparationsfläche die Tangente zur Kreisbahn bildet“. Demnach erfordern kurze Präparationsstümpfe für den „geometrischen Halt“ (Hajtó 2010) einer Krone einen kleineren Präparationswinkel während längere Präparationsstümpfe einen konischeren Winkel erlauben. Studien konnten zeigen, dass der geforderte Präparationswinkel von 3° bis 6° häufig überschritten wird (Hajtó 2010).

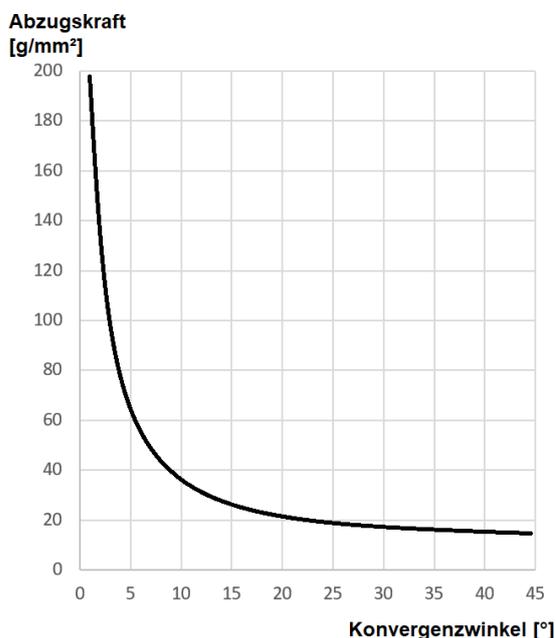


Abb. 3: Halt einer mit Phosphatzement zementierten Krone bei vertikalen Abzugskräften in Abhängigkeit vom Konvergenzwinkel modifiziert nach Hajtó (2010)

Podhorsky et al. empfehlen einen Präparationswinkel zwischen 5° und 10°. Bei kleineren Winkeln geben die Autoren negative Auswirkungen auf die CAD/CAM-Fertigungsprozesse zu bedenken, da die Scanner Schwierigkeiten haben, nahezu vertikal verlaufende Oberflächen korrekt zu erkennen. Ebenfalls nehme bei Winkeln < 5° die Dicke der Zementschicht ab, wodurch sich die Retention der Versorgung verschlechtert. Bei Winkeln > 10° hingegen nehme die Retention stark ab.

1.5 Prozessqualität

Die Pulpa stellt als „spezialisierte Form des Bindegewebes“ (Lehmann et al. 2009) beim vitalen Zahn einen biologisch limitierenden Faktor bei der Präparation dar. Abb. 4 veranschaulicht die anatomischen Verhältnisse. Die Präparation legt die Odontoblastenfortsätze frei und schafft eine „Wundfläche in vitalem Gewebe“ (Beuer et al. 2011). Die Anzahl und Weite der Dentinkanälchen nimmt im pulpanahen Bereich zu. Während sich pulpafern circa 16 000 Dentinkanälchen / mm² befinden, beläuft sich die Dichte pulpanah auf 64 000 Dentinkanälchen / mm² und differiert damit um den Faktor 4 (Marshall Jr 1993, Nicholson 2001). Ebenso nimmt deren Durchmesser von peripher durchschnittlich 0,8 µm auf zentral 2,5 µm zu (Garberoglio und Brännström 1976, Fechner 2008). *Kitamura et al.* stellten an präparierten Backenzähnen bei Ratten die Induktion von „Apoptosewellen“ und damit den Untergang von Odontoblasten fest (Kitamura et al. 2001). *Kerschbaum* konnte im Rahmen einer Studie bei 15 % der untersuchten Kronenversorgungen einen Vitalitätsverlust an präparierten Zähnen nach 10 Jahren Beobachtungsdauer nachweisen (Kerschbaum und Voß 1981) und leitete aufgrund des hohen Risikos eine strenge Indikationsstellung für die Überkronung von Zähnen ab (Kerschbaum 1998).

Die Ausdehnung der Pulpa variiert nach Alter. Junge Patientinnen und Patienten weisen weit auslaufende Pulpenhörner auf, wodurch das Risiko einer Eröffnung der Pulpa potenziert wird. Andererseits wird die Pulpa beim älteren Patienten infolge der stattfindenden sekundären und tertiären Dentinbildung von einer dickeren Schicht Dentin bedeckt (Podhorsky et al. 2015). Zum Schutz dieser Struktur sollte eine ausreichend dicke Restdentinstärke von mindestens 0,7 mm bis 2,0 mm je nach Literaturquelle (Lehmann et al. 2009, Podhorsky und Wöstmann 2016) beim Erwachsenen bestehen bleiben, um Irritationen oder gar Perforationen sowie die sich daraus ergebenden Komplikationen zu vermeiden. Ebenso können die während der Präparation auftretenden Druckänderungen innerhalb der Pulpa Entzündungsreaktionen auslösen. Das Restdentin soll die Pulpa zudem vor „chemischen, osmotischen und mikrobiellen Noxen“ schützen (Podhorsky und Wöstmann 2016). Gerade bei ohnehin schon schmalen Zähnen wie den unteren Inzisivi sollte aus den oben genannten Gründen die Indikation zur Überkronung streng gestellt werden (Podhorsky und Wöstmann 2016).

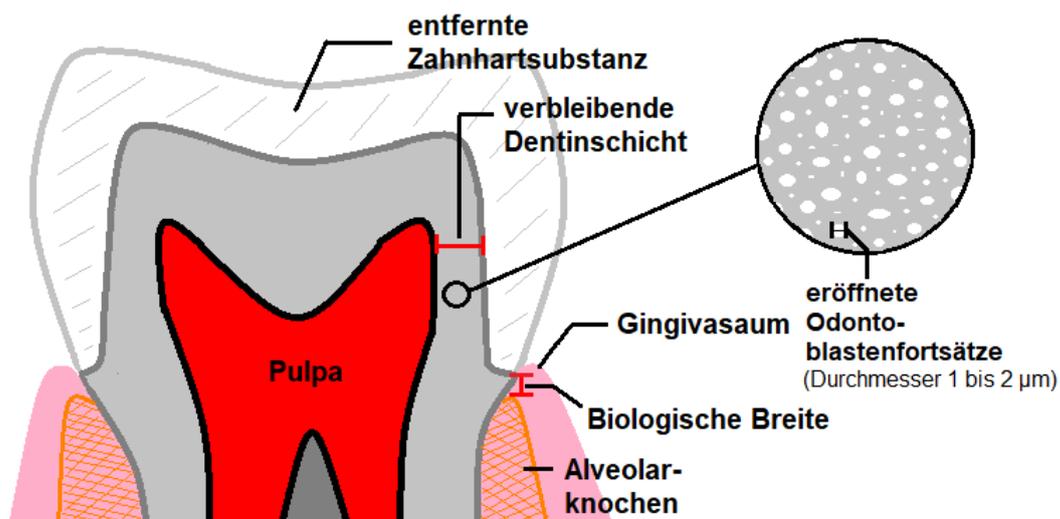


Abb. 4: Pulpa und biologische Breite als biologisch limitierende Faktoren modifiziert nach Lehmann (2009) und Arnetzl (2010)

Übermäßige Hitzeeinwirkung durch unzureichende Wasserspraykühlung, zu hohen Anpressdruck oder stumpfe Instrumente können eine thermische Schädigung begünstigen. Um derlei Schäden zu vermeiden, empfehlen *Diedrichs und Khawaja* das Instrument vor Ansetzen auf Touren zu bringen, mit einem Anpressdruck von 0,1 N bis 0,6 N intermittierend zu arbeiten und durch ein Dreistrahlkühlsystem an Winkelstück oder Turbine eine ausreichende Kühlwassermenge von circa 50 ml / min des Zahnes zu gewährleisten. Um zu hohe Winkelgeschwindigkeiten zu vermeiden, sollte der maximale Durchmesser des Arbeitsteils bei hochtourigem Arbeiten auf 1,6 mm begrenzt werden (*Diedrichs und Khawaja* 2015, *Podhorsky et al.* 2015). *Kim et al.* stellten unter ausreichender Objektkühlung und einer verbliebenen Restdentinstärke von 1 mm kaum Auswirkungen auf die pulpale Durchblutung von präparierten Hundezähnen fest. Wohingegen Präparationen ohne ausreichende Kühlung die Durchblutung um bis zu 90 % reduzierten (*Kim et al.* 1992).

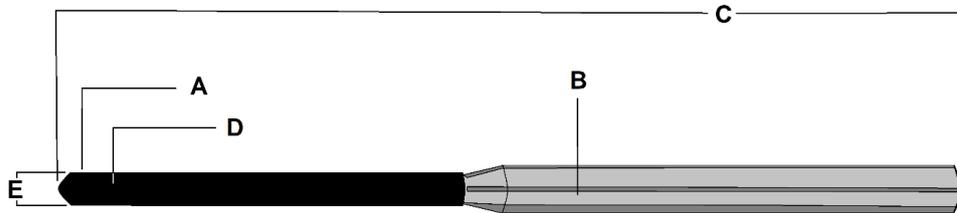
Einen weiteren einschränkenden Aspekt hinsichtlich der Verlagerung der Präparationsgrenze nach krestal stellt die biologische Breite dar. Diese definiert sich als „Komplex aus epithelalem und bindegewebigem Attachment apikal des Sulkus eines Zahnes“ (*Podhorsky und Wöstmann* 2016) und beschreibt den „physiologischen Mindestabstand der Schmelz-Zement-Grenze beziehungsweise des Kronenrandes vom Knochen“, welcher im physiologischen Zustand circa 3 mm beträgt (*Beuer et al.* 2011). Dehnt sich eine prothetische Restauration in diesen Bereich hinein aus, kommt es mit hoher Wahrscheinlichkeit zu parodontalen Entzündungserscheinungen (*Ingber et al.* 1977). Ursächlich ist der „unvermeidliche[] Spalt“ (*Podhorsky und Wöstmann* 2016) am Kronenrand, der sich zum natürlichen Zahnhartgewebe hin ergibt. Dieser bietet eine Prädilektionsstelle für Bakterien. Entzündliche Veränderungen mit konsekutiven Zahnfleischrezessionen führen in der Folge zu starken Beeinträchtigungen mit der Gefahr von Knochenabbau, wobei das Ausmaß der Entzündungsreaktion mit der Größe der marginalen Fehlpassung korreliert (*Beuer et al.* 2011, *Podhorsky und Wöstmann* 2016). Es empfiehlt sich daher präventiv einen Abstand von 2 mm bis 3 mm zum Alveolarknochen einzuhalten (*Beuer et al.* 2011, *Podhorsky et al.* 2015, *Podhorsky und Wöstmann* 2016). Der geschwungene Verlauf des Limbus alveolaris sollte bei der Präparation ebenso berücksichtigt werden, um die biologische Breite aufgrund der „Niveauunterschiede“ nicht zu verletzen (*Beuer et al.* 2011).

Dem gegenüber gestellt erfordern materialinhärente Eigenschaften des gewählten Werkstoffs Mindestanforderungen an das Präparationsdesign mit entsprechend unterschiedlich ausgeprägter invasiver Präparationsweise. Während die heute nur noch selten zur Anwendung kommenden rein metallischen Restaurationen mit ihrem hohen Maß an Duktilität eine minimalinvasivere Präparationsweise ermöglichen, fordern vollkeramische oder verblendete Restaurationen eine Anpassung der Präparation. Eine zu geringe Schichtstärke ist klassische Ursache für Frakturen der Keramik (*Belli et al.* 2016). *Quaas et al.* fordern ein „keramisches Denken“, da „keramische Werkstoffe [...] die unter hohen mechanischen Beanspruchungen auftretenden lokalen Spannungsspitzen nicht durch elastische und plastische Verformungen abbauen [können]“ (*Quaas et al.* 2006). Durch Hohlkehle und Stufe definierte Präparationsgrenzen, abgerundete Innenkanten und ausreichender Substanzabtrag spielen eine wichtige Rolle (*Quaas et al.* 2006).

Die Balance zwischen biologisch limitierenden Faktoren auf der einen Seite und materialspezifischen Anforderungen auf der anderen Seite stellen einen wesentlichen Faktor der Prozessqualität dar.

1.5.1 ISO-Nummernsystem für rotierende Instrumente

Zur internationalen Normierung von rotierenden zahnärztlichen Instrumenten dient das ISO-Nummernsystem. Mithilfe eines Zahlencodes wird das jeweilige Instrument beschrieben. Abb. 5 skizziert die hierbei erfassten Eigenschaften: Werkstoff des Arbeitsteils (A), Schaftart und Gesamtlänge (B/C), Form und Ausführung (D) sowie größter Durchmesser des Arbeitsteils (E). Die Standards werden durch die ISO 6360 und DIN 13955 beschrieben (Bumann 2003).



- A: Werkstoff des Arbeitsteils
- B/C: Griff, Schaft, Gesamtlänge
- D: Form, Ausführung
- E: Iso-Größe

Abb. 5: Systematik des ISO-Nummernsystems für rotierende zahnärztliche Instrumente nach ISO 6360 modifiziert nach Hinkelmann (1993)

In Anbetracht des umfangreichen Angebots an unterschiedlichen Schleifkörpern, erlaubt dieses Klassifizierungssystem eine exakte Differenzierung und Auswahl der benötigten Instrumente unabhängig von Herstellerbezeichnungen und trägt mit zur Qualitätssicherung bei. Vorgefertigte Präparationssets liefern eine Zusammenstellung bevorzugt genutzter Instrumente.

1.6 Die Abformung

Da die Werkstoffe für die definitive prothetische Restauration nicht direkt im Mund der Patientinnen und Patienten verarbeitet werden können, bedürfen sie einer Erfassung der dreidimensionalen Situation zur extraoralen Weiterverarbeitung (Wöstmann 2018). Die Abformung steht mit am Anfang der Arbeitsschritte hin zur fertigen Restauration. Etwaige Fehler ziehen sich so durch den kompletten Herstellungsprozess und haben starke Auswirkungen auf die spätere Arbeit (Kulzer-GmbH 2019).

Neben den digitalen Abformmethoden gehört die konventionelle Abformung immer noch zum „Standardrepertoire“ (Kulzer-GmbH 2019) in der zahnärztlichen Praxis. Zur Herstellung präziser, indirekter Restauration ist eine Präzisionsabformung des präparierten Stumpfes nötig. Hierunter versteht man eine „detail- [und] dimensionstreue[] ‚Negativform‘ der dento-alveolären Hart- und Weichgewebsstrukturen“ (Balkenhol et al. 2005).

Als Materialien werden die vorwiegend aus der Gruppe der Elastomere stammenden A-Silikone und Polyether benutzt. Bei A-Silikonem handelt es sich um anorganische Siliziumverbindungen und polymere Kunststoffe. Sie sind temperaturunempfindlich, lösungsmittelresistent, biologisch gut verträglich, sehr dimensionstreu und wasserabweisend. Die aus Ethylenpolymer, Füllstoffen (SiO₂) und Weichmachern bestehenden Polyether zeichnen sich demgegenüber durch ausgeprägte Hydrophilie aus (Wöstmann 2018).

Naturgemäß ist es nicht möglich eine exakte Kopie des Originals zu erstellen. Ausgehend von der Abformung unterliegen alle Arbeitsschritte einer gewissen Variabilität aufgrund von „materialimmanente[n] und verfahrenstechnische[n] Einflussfaktoren“ (Hung et al. 1992, Wöstmann 1999, Balkenhol et al. 2005). Die als Indikator für die Passgenauigkeit einer Restauration herangezogene Randfuge sollte 100 µm dennoch nicht überschreiten und optimalerweise zwischen 20 µm und 30 µm betragen. Bei Nichteinhaltung drohen Komplikationen wie Sekundärkaries, Entzündungen der Pulpa oder Beeinträchtigungen des marginalen Parodonts (Spiekermann 1986, Fick 2003).

Bei den Abformverfahren unterscheidet man zwischen ein- und zweizeitigem Vorgehen (Wöstmann 2018). Die einzeitigen Verfahren lassen sich wiederum in einzeitig, einphasig und einzeitig zweiphasig unterteilen (Kulzer-GmbH 2019).

Beim einzeitigen, einphasigen Vorgehen (auch Ein- oder Monophasenabformung) erfolgt das Befüllen des konfektionierten oder individuellen Abformlöffels und das Umspritzen der Zähne gleichzeitig und mit identischem mittelviskösem Material. Die Technik eignet sich besonders für supragingivale Präparationsgrenzen (Wöstmann 2018, Kulzer-GmbH 2019).

Eine andere Variante stellt die Doppelmischabformung (einzeitig, zweiphasig) dar. Hierbei wird der Löffel mit einem Abformmaterial fester Konsistenz („*Heavy Body*“ oder auch „*Putty*“ genannt) befüllt, während die präparierten Stümpfe mit einer niedrigviskösen Abformmasse umspritzt werden – „*Medium Body*“ oder auch „*Light Body*“ genannt (Wöstmann 2018). Beide Materialien vermischen sich während des Abformvorgangs (Kulzer-GmbH 2019). Wird die dünnfließende Komponente lediglich als zweite Schicht auf das Löffelmaterial aufgetragen, spricht man von der „*Sandwichtechnik*“ (Kulzer-GmbH 2019).

Beim zweizeitigen Vorgehen (auch Korrekturabformung) wird zunächst eine Vorabformung mit einer „*Heavy Body*“-Abformmasse genommen. Im zweiten Schritt erfolgt dann die Präzisierung, indem im Bereich der sich im Abdruck befindlichen Negativform der Präparationsstümpfe die „*Light Body*“-Abformmasse appliziert wird und die Abformung erneut im Mund des Patienten positioniert wird. Um Verdrängungen der Erstabformmassen durch das dünnfließende Material zu vermeiden, müssen vor der Zweitabformung Unterschnitte und Interdentalsepten entfernt sowie Abflussrinnen geschaffen werden (Wöstmann 2018).

Vorteil des einzeitigen Vorgehens ist die schnellere und relativ einfache Durchführung, wodurch sich diese Methode als weniger fehleranfällig erweist. Bei subgingivalen Präparationen stößt diese Technik jedoch an ihre Grenzen. Da sich die Abformmaterialien in

der plastischen Phase befinden, erfolgt die Abformung weitestgehend drucklos und ein adäquater Staudruck während des Abformvorgangs kann nur schwerlich aufgebaut werden. Das Material wird nicht in die subgingivalen Sulkusbereiche gepresst (Wöstmann 2018, Kulzer-GmbH 2019). Eine mangelhafte Darstellung der Präparationsgrenze kann die Folge sein, sodass ein zweizeitiges Vorgehen hier eher indiziert ist.

Da konventionelle Abformmethoden sowohl für den Behandelnden als auch Patientinnen und Patienten „aufwändig, zeitraubend und [...] unangenehm sind“ (Strub et al. 2011) und zudem häufig unter mangelnder Qualität leiden (Luthardt 2004), drängen digitale Abformmethoden zunehmend auf den Markt. Dieses „Optische Verfahren“ (Zimmermann und Mehl 2018) beruht auf dem photoelektrischen Effekt (Hertz 1887). Der Behandelnde erfasst die relevanten Kieferbereiche mittels Handscanner. Die von einer Quelle ausgestrahlte Lichtmenge wird hierbei mittels Detektor *CCD-* oder *CMOS-Chips* („*Charge-coupled device*“ oder „*complementary metal-oxide-semiconductor*“ bzw. „*active pixel sensor*“) erfasst. Abhängig von der reflektierten Lichtmenge und Ladung können exakte Rückschlüsse auf „entsprechende Farb- und Intensitätsinformation[en]“ der Oberfläche vorgenommen werden (Boyle und Smith 1970, Zimmermann und Mehl 2018). Es resultiert ein digitalisiertes Modell des Kiefers. Die derzeit erhältlichen Intraoralscanner zeichnen sich zwar durch ein hohes Maß an Präzision aus, weisen aber gerade auch im Hinblick auf die Erfassung von subgingival gelegenen Präparationsflächen noch eine hohe Fehlerquote auf (Ferrari Cagidiaco et al. 2021).

1.7 Dentale Werkstoffe in der Kronen- und Brückenprothetik

Kronen und Brücken lassen sich aus verschiedenen Materialien herstellen. Ein steter Fortschritt im Bereich der verwendeten Dentalwerkstoffe liefert heute Materialien die „ästhetisch, [...] haltbar und darüber hinaus auch körperverträglich sind“ (Faltermeier 2008).

1.7.1 Metallische Restaurationen

Metalle und Nichtmetalle unterscheiden sich hauptsächlich durch ihren atomaren Bindungszustand. Während bei Nichtmetallen Ionenbindungen und kovalente Bindungen für den atomaren Zusammenhalt sorgen, zeichnen sich Metalle durch ihren metallischen Bindungscharakter aus (Strietzel 2018). Verantwortlich hierfür sind frei bewegliche Elektronen innerhalb des Metallgitters. Diese sorgen für die typischen Eigenschaften von Metallen: Metallischer Glanz, Farbe, Elastizität, hohe elektrische Leitfähigkeit, hohe Wärmeleitfähigkeit, plastische Verformbarkeit und Legierbarkeit (Strub et al. 2011).

Metalle in ihrer elementaren Form genügen nicht den zahnmedizinischen und physikalischen Anforderungen wie ausreichender Härte, Festigkeit oder geeignetem Wärmeausdehnungskoeffizienten. Um „gezielt Werkstoffeigenschaften zu fördern oder gar erst zu ermöglichen“ (Marxkors et al. 2008), bildet man daher Mischungen aus unterschiedlichen Komponenten. Dentallegierungen bestehen hierbei aus mindestens drei unterschiedlichen Metallen oder Nichtmetallen. Diese Gemische von Feststoffen in Feststoffen weisen modifizierte Eigenschaften auf. Es gibt circa 2000 unterschiedliche Dentallegierungen. Namensgebend für die jeweilige Legierung ist ihr Hauptbestandteil (Marxkors et al. 2008, Bundeszahnärztekammer und Kassenzahnärztliche-Bundesvereinigung 2009, Strietzel 2018).

Während edelmetallhaltige Legierungen auf Gold-, Palladium- oder Silberbasis Anwendung finden, stehen demgegenüber die edelmetallfreien (Synonym: Nichtedelmetall) Legierungen auf Kobalt-, Nickel-, Eisen-, Titan- oder Kupferbasis (Strietzel 2018).

Goldlegierungen finden aufgrund ihrer geringen Festigkeit und der hohen Materialkosten heute keine breite klinische Anwendung mehr. Silberbasislegierungen haben den Nachteil, dass sie sich aufgrund ihres hohen Wärmeausdehnungskoeffizienten nur schwer verblenden lassen. Eine preiswerte und mechanisch festere Alternative stellt die Palladiumbasis-Legierung dar. Sie kann für die Herstellung von Kronen- und Brückengerüsten verwendet werden (Strietzel 2018).

Unter den edelmetallfreien Legierungen sind die Kobaltbasis-Legierungen federführend im Rahmen der Kronen- und Brückentechnik. Hohe Festigkeitswerte erlauben eine dünnere Gestaltung der Gerüste und schaffen ausreichend Platz für die anschließende Verblendung (Strietzel 2018).

Zur Fertigung des dentalen Werkstücks kommen konventionelle, additive und subtraktive Verfahren zum Einsatz. Beim Metallguss wird mittels *Lost-wax*-Verfahren die zuvor in Wachs modellierte Arbeit in der Muffel eingebettet, ausgebrannt und die Schmelze des gewünschten Werkstoffs schließlich mittels Zentrifugalkraft, Vakuumdruck oder Druck in den so geschaffenen Hohlraum getrieben. Im *CAD-Cast*-Verfahren erfolgt das *Wax-up* digitalisiert, die anschließende Fertigung jedoch konventionell. Beim *CAD/CAM*-Verfahren erfolgen die Schritte von Modellation und Fertigung hingegen vollends computergesteuert. Hierbei wird wiederum zwischen additiven Verfahren wie dem Laser-Melting-Verfahren (SLM-Verfahren) und subtraktiven Fräsverfahren unterschieden (Zimmermann und Mehl 2018).

1.7.2 Keramische Restaurationen

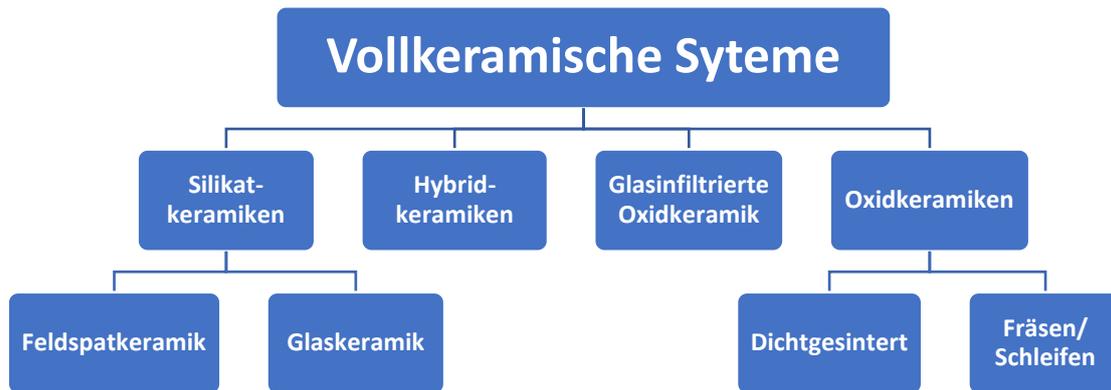


Abb. 6: Einteilung der verschiedenen Dentalkeramiken modifiziert nach Pospiech (2014)

Keramische Materialien können das natürliche Erscheinungsbild eines Zahnes hinsichtlich optischer Merkmale wie Farbe, Opazität, Opaleszenz und Transluzenz realistisch imitieren und sind in Bezug auf Festigkeit der Zahnhartsubstanz sehr ähnlich (Edelhoff und Kern 2003, Lohbauer et al. 2018). Definitionsgemäß umfasst diese Werkstoffgruppe alle „anorganisch, nichtmetallischen Materialien“ (Lohbauer et al. 2018). Im weiteren Sinne zeichnen sie sich durch eine Beständigkeit gegenüber Wasser, dem Verhältnis von amorpher zu kristalliner Phase und den Fertigungsprozess bei Temperaturen über 700 °C aus (Munz und Fett 2001, Lohbauer et al. 2018).

Zudem gelten sie gegenüber Metallen als biokompatibler (Marxkors et al. 2008), weisen aber als metallfreie Restaurationen „vergleichbare“ bis „verbesserte“ mechanische Eigenschaften auf (Taschner und Lohbauer 2016). Schwachpunkt ist die hohe Sprödigkeit, sodass bei Belastungsüberschreitung spontane Frakturen resultieren können (Taschner und Lohbauer 2016). „Auf tretende[] [...] Spannungsspitzen [können] nicht durch elastische und plastische [Verformbarkeit] kompensiert werden (Quaas et al. 2006). Während eine hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber Druckspannung besteht, reagieren Keramiken empfindlich auf Zug- und Biegebelastungen (Lohbauer et al. 2018).

Abb. 6 gibt einen Überblick über die aktuell verfügbaren Dentalkeramiken. Dentalkeramiken lassen sich anhand ihrer chemischen Kristallstruktur in Silikatkeramiken und Nichtsilikatkeramiken unterscheiden. Die Nichtsilikatkeramiken bezeichnet man auch als Oxidkeramiken. Daneben existiert noch die Gruppe der Hybrid- oder Verbundkeramiken (Rudolph und Luthardt 2008, Taschner und Lohbauer 2016).

Den überwiegenden Anteil der Dentalkeramiken bilden die Silikatkeramiken. Aufgebaut aus ihren Bestandteilen Siliziumoxid, Feldspat und Tonerde bestehen sie aus einer kristallinen Phase und einer Glasphase (Taschner und Lohbauer 2016). Zusätzliche Bestandteile wie Leuzit können zur „Festigkeitssteigerung“ beigefügt sein (Rudolph und Luthardt 2008). Dem ästhetisch ansprechenden transluzenten Materialverhalten im durchscheinenden Licht, steht nachteilig die erhöhte Anfälligkeit bei mechanischer und chemischer Belastung entgegen. Im Unterschied zu Oxidkeramiken (s. Abb. 5) lassen sie sich gut mit Flusssäure und Silanen konditionieren und bieten so die Möglichkeit eines adhäsiven Befestigungsverfahrens (Taschner und Lohbauer 2016).

Oxidkeramiken sind einphasig und vor allem aus einkomponentigen Metalloxiden wie Aluminium, Magnesium oder Zirkonium aufgebaut. Mangelnde mechanische Eigenschaften der Keramiken führten lange Zeit zu Komplikationen wie Gerüstbrüchen (Sailer et al. 2007, Pjetursson et al. 2012).

Die aufgrund der verbesserten Eigenschaften auch als „Hochleistungskeramiken“ (Rudolph und Luthardt 2008) bezeichneten keramischen Werkstoffe Aluminiumoxid oder Zirkoniumoxid (Al_2O_3 und ZrO_2) hingegen erlangen bei Sintertemperaturen von circa 1600 °C ein porenreduziertes Mikrogefüge und erreichen dadurch deutlich höhere Festigkeit und Bruchzähigkeit im Vergleich zu anderen Dentalkeramiken (Denry und Kelly 2008, Rudolph und Luthardt 2008).

Die als „Selbstheilungseffekt“ (Rudolph und Luthardt 2008) beschriebene Zähigkeitssteigerung von Yttrium-teilstabilisierter ZrO_2 -Keramik bewirkt bei unterschweligen Belastungen zwischen 200 N und 600 N eine energieverbrauchende Phasenumwandlung von der tetragonalen in die monokline Gitterstruktur und wirkt der Rissbildung, die durch Spannungen im Gefüge auftreten und mit einer Volumenzunahme von bis zu 5 % einhergehen, entgegen (Rudolph und Luthardt 2008, Taschner und Lohbauer 2016). Entwicklungen im Bereich der CAD/CAM-Technologie erlauben es heute, diese besonders harten „diamantähnliche[n]“ (Taschner und Lohbauer 2016) Werkstoffe suffizient zu verarbeiten und erweitern das Indikationsspektrum der Keramiken hin zu ausgedehnteren Brücken im druckbelasteten Seitenzahnbereich (Rudolph und Luthardt 2008, Taschner und Lohbauer 2016). Aus nur einem Werkstoff bestehende monolithische vollkeramische Restaurationen auf Zirkonoxid-Basis reduzieren das Risiko für Brüche und erlauben aufgrund von geringeren Mindestschichtstärken Zahnhartsubstanz sparendere Präparationen für vollkeramische Kronen (Edelhoff und Kern 2003, Rinke et al. 2013).

Die Verbundkeramiken stellen Hybride aufgebaut aus unterschiedlichen Phasen dar. Die porösen keramischen Gerüste werden von Nichtsilikaten oder Polymeren durchdrungen (Lohbauer et al. 2018).

Handelt es sich um Verblendkronen oder Brücken, so werden die gefertigten Gerüste für ein ästhetisch ansprechendes Ergebnis abschließend mittels Keramik oder Kunststoff verblendet. Es gilt die unterschiedlichen Werkstoffe in ihren mechanischen Eigenschaften möglichst gut aufeinander abzustimmen. Dem spröden Verformungsverhalten der Keramiken muss durch starre Gerüste mit hohem Elastizitätsmodul und Angleichung des Wärmeausdehnungskoeffizienten Rechnung getragen werden, um Zug- und Biegespannungen entgegenzuwirken und Abplatzungen zu verhindern. Die Keramik wird in mehreren Lagen geschichtet. Eine als Schlicker bezeichnete Keramikmasse dient als Grundierung auf dem Gerüst. Anschließend werden in weiteren Schichten Dentin- und Schneidemasse durch spezielle Einfärbung der Keramik nachempfunden. Jede Keramikschicht wird im Ofen bei 700 °C bis 1000 °C aufgebrannt (Sintern). Die Haftung zwischen beiden Werkstoffen erfolgt durch adhäsive, physikalische und chemische Kräfte (Lohbauer et al. 2018).

1.8 Die Prozesskette und Digitaler Workflow

Von der Planung bis zur definitiven Eingliederung der Krone oder Brücke sind eine Reihe von interprofessionellen Arbeitsschritten zu bewerkstelligen. Moderne digitalisierte Verfahren können sowohl Zahnärztinnen und Zahnärzten als auch Patientinnen und Patienten Behandlungsschritte erleichtern und verschaffen teilweise Zeitersparnis. So ist es heute möglich Präparation und Eingliederung der fertigen Restauration in derselben Sitzung zu bewerkstelligen. Abdrücke und Modelle werden digitalisiert. Moderne leistungsstarke Fräseinheiten eröffnen Wege zur Verarbeitung neuer Materialien.

Wesentliche Elemente des konventionellen Arbeitsablaufs von Präparation – Abdrucknahme – Modellerstellung – Aufwachsen – Einbetten – Gießen – Ausarbeiten – Eingliedern und Zementieren werden zunehmend durch einen „*Digitalen Workflow*“ ersetzt. Dieser Anglizismus beschreibt eine „digitale Prozesskette von aufeinander folgenden einzelnen Komponenten“ (Zimmermann und Mehl 2018). Die Arbeitsschritte innerhalb der Prozesskette bei der konventionellen und der CAD/CAM-gestützten Vorgehensweise werden in Abb. 7 dargestellt.

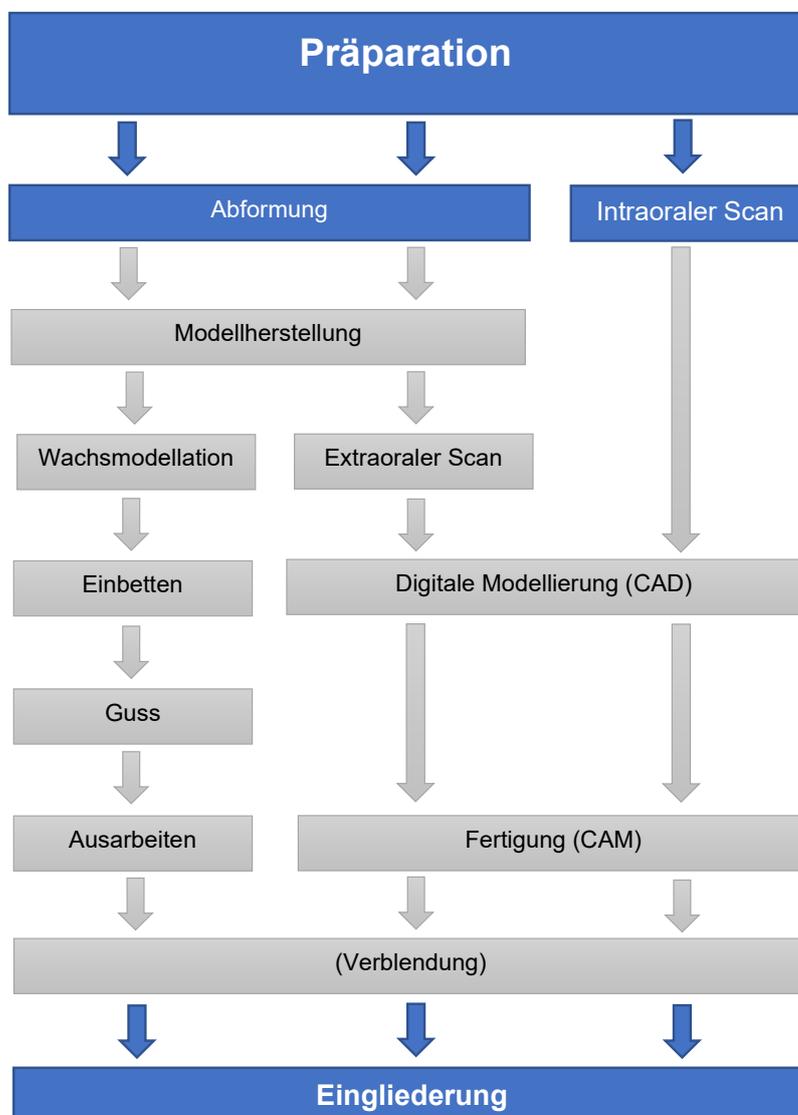


Abb. 7: Konventionelle Herstellung von prothetischen Restaurationen im Vergleich mit der CAD/CAM-Prozesskette / blau = zahnärztliche Arbeitsschritte; grau = Laborseitige Arbeitsschritte / modifiziert nach Quaas et al. (2006)

Grundprinzip dieses Vorgehens ist es, „dreidimensionale Oberflächen“ der Ausgangssituation mit geeigneten Mitteln zu digitalisieren, und das digitale Modell virtuell zu bearbeiten, um so anschließend das geplante Konstrukt mittels geeigneter Maschinen herzustellen (Zimmermann und Mehl 2018). Wesentliche Elemente werden als *CAD* und *CAM* zusammengefasst. Wobei *CAD* (*Computer Aided Design*) für das „rechenunterstützte Konstruieren von geometrischen Formen“ und *CAM* (*Computer Aided Manufacturing*) für die „rechenunterstützte Fertigung von geometrischen Formen“ steht (Marxkors et al. 2008, Zimmermann und Mehl 2018).

Stammte die Grundidee bereits aus den 1950er Jahren, basierend auf einer Zusammenarbeit zwischen der *United States Airforce* und dem *MIT*, so wurde der Begriff *CAD/CAM* erst 1972 durch die Firmen Lockheed und IBM geprägt (Redmond und Smith 2000, Weisberg 2008). Damals sollten anspruchsvolle technische Zeichnungen aus Gründen der Produktivitätsmaximierung computerbasiert angefertigt werden. Später erkannte man, dass die angefertigten Zeichnungen im nächsten Produktionsschritt als Blaupause für automatisiert arbeitende *NC*-Maschinen (*Numerical Controlled*) dienen können. Die Technologie stellt heute einen essenziellen Zweig innerhalb der modernen Industrie dar mit dem Ziel, aus einer „virtuellen Ausgangssituation mittels digitaler Berechnungsschritte [...] ein, reales, physisches Produkt anzufertigen“ (Zimmermann und Mehl 2018).

Bezogen auf die Zahnmedizin versteht man hierunter das computergestützte Anfertigen von „zahnärztlichen Werkstücken“ (Zimmermann und Mehl 2018). Im Zuge dessen haben sich drei verschiedene Verfahrensweisen in der Praxis etabliert. Man unterscheidet zwischen *chairside*, *labside* und *zentralisiert* basierten Konzepten.

1.8.1 Chairside

Beim *chairside*-Verfahren erfolgen sämtliche Arbeitsschritte von Abdrucknahme (Datenerfassung) bis zur Fertigung gewissermaßen am Zahnarztstuhl (Schiefelbein 2015). Nach Präparation des Zahnes oder der Zähne wird ein intraoraler Scan durchgeführt. Mithilfe von Algorithmen erfolgt im Anschluss die automatisierte *CAD*-Gestaltung. Die hiesige „*in-office*“-Schleifmaschine fertigt die Krone oder Brücke (Zimmermann und Mehl 2018). Neben dem Vorteil der Zeitersparnis, entfallen für Patientinnen und Patienten und Zahnärztin und Zahnarzt weitere materialfordernde Schritte wie Abdrucknahme und Provisoriumsphase (Liu und Essig 2008, Güth et al. 2009). Die Präparation kann zudem virtuell am Bildschirm visualisiert und analysiert werden (Güth et al. 2009, Güth et al. 2010, Schiefelbein 2015). Fehler können so vor Anfertigung der definitiven Restauration frühzeitig korrigiert werden. Demgegenüber stehen die hohen Anschaffungskosten für entsprechende *CAD/CAM*-Einheiten als wirtschaftlicher Faktor. Nachteilig ist zudem der Mangel an „Interventionsmöglichkeiten in Sonderfällen“ (Baldissara et al. 1998, Mehl et al. 2004).

1.8.2 Labside

Das *Labside*-Verfahren lagert die Konstruktionsschritte wie bei der konventionellen Herstellung in das zahntechnische Labor aus. Der präparierte Zahn kann ebenfalls intraoral gescannt werden und per Datensatz an das Labor überführt werden oder aber es erfolgt eine herkömmliche Abdrucknahme. Das ausgegossene Gipsmodell wird anschließend durch einen extraoralen Scanner digitalisiert.

Die Überführung von analog zu digital geschieht in zwei Schritten. Zunächst kommt es zur Datenerfassung. Während man früher taktile Verfahren nutzte, stehen auch hierfür heute moderne extraorale Scanner zur Verfügung (Zimmermann und Mehl 2018). Diese tasten das entsprechende Modell mit parallel angelegten Streifenmustern ab und können anschließend

durch Verzerrungen entlang dieser Strukturen, die Tiefe des zu erfassenden Objektes berechnen (Marxkors et al. 2008). Die resultierenden Oberflächeninformationen werden in einem dreidimensionalen Koordinatensystem als „Punktwolke“ erfasst. Dieser als „Abtastung“ oder „*Sampling*“ bezeichnete Vorgang liefert „virtuelle [und] diskontinuierliche [...] Geometriedaten“ des zu erfassenden Objektes (Zimmermann und Mehl 2018). In der nachfolgenden Datennachbearbeitung („*Postprocessing*“) wird in Annäherung an die tatsächlich zu beschreibende Oberfläche aus den vorliegenden Geometriedaten ein „kontinuierliche[s] Flächenmodell[]“ erzeugt (Zimmermann und Mehl 2018). Die Darstellung der Oberflächen erfolgt im dentalen Bereich meist als *STL*-Modell mittels Triangulation. Drei Eckpunkte innerhalb der Punktwolke werden verbunden und bilden jeweils ein Dreieck. Auf diese Weise lässt sich ein Netz aus Dreiecken über die Oberfläche des Körpers legen, um diesen plastisch zu erfassen. Beim „*Rendering*“ werden die Dreiecke je nach Belichtung mit entsprechenden Farb- und Grauwerten belegt. Schließlich liegt ein vernetztes virtuelles Modell der Ausgangssituation vor, welches auf dem Bildschirm perspektivisch zweidimensional betrachtet werden kann (Roscoe 1988, Marxkors et al. 2008, Zimmermann und Mehl 2018).

Messungen zur in vitro Genauigkeit der Scanverfahren ergaben bei direktem intraoralen Scan eine Abweichung gegenüber dem virtuellen Prüfmodell zwischen 18 µm und -17 µm, während bei konventioneller Abformung und extraoraler Digitalisierung Abweichungen zwischen 9 µm und -9 µm bestanden (Quaas et al. 2006). Die erreichte Präzision hinsichtlich Randschlussgenauigkeit steht dem konventionellen Fertigungsverfahren nicht nach (Lehmann et al. 2009).

Voraussetzung für eine präzise Kommunikation zwischen den Schnittstellen der einzelnen Komponenten innerhalb der Prozesskette ist, dass Informationen nicht „verändert“ werden und „ohne Qualitätsverluste [...] importiert und exportiert“ werden können (Zimmermann und Mehl 2018). Als digitales Trägermedium fungiert hierbei für gewöhnlich das Standarddateiformat *STL* (*Surface Tesselation Language*).

Die entsprechende Restauration wird dann durch eine *CNC*-gesteuerte (*Computer Numerical Controlled*) Fräs- und Schleifmaschine aus einem Rohling subtraktiv angefertigt. Als Materialien eignen sich neben Keramiken auch Legierungen und Kunststoffe oder Komposite (Marxkors et al. 2008).

1.8.3 Zentralisiert

Der zentralisierte Fertigungsprozess erfolgt zunächst identisch zum *labside* Vorgehen. Scan und Design der späteren Restauration erfolgen im Labor. Jedoch wird die zu fertigende Arbeit anschließend wiederum an ein externes Fräszentrum ausgelagert. Die Arbeiten können innerhalb dieser Fertigungszentren mittels effizient arbeitender Maschinen bei geringen Rüstzeiten angefertigt werden. Die Fertigung erfolgt subtraktiv mittels Schleif-/Fräsmaschine oder additiv. Es besteht eine breite Materialauswahl. Auf diese Weise kann kostengünstig unter Einhaltung hoher Qualitätsstandards gefertigt werden. Die Fertigstellung der Arbeit durch eine eventuelle Verblendung und Prüfung der Okklusion erfolgt schließlich wieder im zahntechnischen Labor (Schieffelbein 2015, Zimmermann und Mehl 2018).

1.9 Präparationsrichtlinien

Präparationsempfehlungen aus Lehrbüchern, wissenschaftlichen Artikeln und herstellerseitig veröffentlicht bieten materialspezifische Orientierungshilfen für Zahnärztinnen und Zahnärzte. Gerade im Bereich der Dentalkeramiken erfordern neue Materialien eine stetige Anpassung dieser Richtlinien.

1.9.1 Literaturangaben

Die Tabellen 1 bis 4 geben einen Überblick über sich in der Literatur befindlichen Präparationsempfehlungen. Hierbei wurde ein besonderes Augenmerk auf die empfohlenen Präparationsbreiten, Präparationswinkel und Präparationsformen gelegt.

Tabelle 1: **Präparationsempfehlungen aus der Literatur bezüglich der marginalen Präparationsbreite**

Autor (Erscheinungsjahr)	Präparationsempfehlung
Präparationsbreite (zirkulär)	
<i>Kimmel (1997)</i>	Keramikkronen: 1,0 mm bis 1,5 mm Metallkeramikkronen: 1,3 mm bis 1,7 mm
<i>Goodacre et al. (2001)</i>	Vollgusskronen: 0,3 mm
<i>Edelhoff und Kern (2003)</i>	Vollkeramik: 1,5 mm
<i>Quaas et al. (2006)</i>	Zirkonoxid: 0,6 mm
<i>Baltzer (2008)</i>	Durchgesinterte Oxidkeramik: 0,5 mm
<i>Rudolph und Luthardt (2008)</i>	Oxidkeramik: 0,4 mm bis 0,6 mm
<i>Lehmann (2009)</i>	Vollkeramik: 1,0 mm Metallkeramikkronen: 1,5 mm
<i>Hajtó (2010)</i>	Vollkeramik (ZrO ₂ und Glaskeramik): 1,0 mm
<i>Strub et al. (2011)</i>	Vollgusskronen: 0,8 mm Metallkeramikkronen: 1,2 mm Vollkeramik: 1,2 mm
<i>Beuer et al. (2011)</i>	Vollkeramik: 0,8 mm bis 1,5 mm (je nach Keramikfestigkeit) Keramische Verblendkronen: 0,8 mm Metallkronen: 0,8 mm
<i>Rinke et al. (2013)</i>	Zirkonoxidkeramik: 0,5 mm bis 0,7 mm
<i>Kern et al. (2015)</i>	Vollkeramik (ZrO ₂): 0,5 mm Zirkongerüst mit Verblendung: 1,2 mm
<i>Lohbauer et al. (2018)</i>	Zirkonoxidgerüste: 0,4 mm

Für metallische Restaurationen empfehlen Goodacre et al. einen zirkulären Mindestsubstanzauftrag von 0,3 mm (s. Tabelle 1). Beuer et al. fordern mit 0,8 mm einen höheren Zahnhartsubstanzauftrag (Goodacre et al. 2001, Beuer et al. 2011). Empfehlungen für den okklusalen Bereich liegen im Bereich zwischen 0,5 mm und 1,0 mm (Kimmel 1997, Beuer et al. 2011, Podhorsky et al. 2015).

Tabelle 2: Präparationsempfehlungen aus der Literatur bezüglich der okklusalen und inzisalen Präparationsbreite

Autor (Erscheinungsjahr)	Präparationsempfehlung
Präparationsbreite (okkusal / inzisal)	
<i>Kimmel (1997)</i>	Keramikkronen: 1,0 mm bis 1,5 mm Metallkeramikkronen: 1,3 mm bis 1,7 mm Metallkronen: 0,5 mm bis 1,0 mm
<i>Goodacre et al. (2001)</i>	Vollkeramik: 2,0 mm Metallkeramik: 2,0 mm Vollgusskronen: 0,5 mm bis 0,8 mm
<i>Edelhoff und Kern (2003)</i>	Vollkeramik: 2,0 mm
<i>Quaas et al. (2006)</i>	Zirkonoxid: 1,0 mm bis 1,2 mm
<i>Rudolph (2008)</i>	Oxidkeramik: 0,4 mm bis 0,6 mm
<i>Hajtó (2010)</i>	Vollkeramik (ZrO ₂ und Glaskeramik): 1,5 mm bis 2,0 mm
<i>Strub et al. (2011)</i>	Vollgusskronen: 1,2 mm Metallkeramikkronen: 1,5 mm Vollkeramik: 1,5 mm
<i>Rinke et al. (2013)</i>	Zirkonoxidkeramik: 0,6 mm bis 0,8 mm
<i>Kern et al. (2015)</i>	Vollkeramik (ZrO ₂): 1,5 mm bis 2,0 mm
<i>Podhorsky et al. (2015)</i>	Vollkeramik: 1,5 mm Metallkeramik: 1,5 mm Vollguss: 1,0 mm
<i>Beuer et al. (2011)</i>	Vollkeramikkronen: 1,5 mm (inzisal 1,5 mm bis 2,0 mm) Verblendkronen: 1,2 mm bis 1,5 mm (inzisal 1,5 mm bis 2,0 mm) Metallkronen: 1,0 mm
<i>Lohbauer et al. (2018)</i>	Zirkonoxidgerüste: 0,5 mm

Auf Seiten der Keramiken scheinen Literaturangaben zu zirkulären Schnitttiefen im Laufe der Jahre einen Wandel vollzogen zu haben. Forderte *Kimmel* 1997 für Vollkeramikrestorationen noch eine zirkuläre Abtragstiefe von 1,0 mm bis 1,5 mm, so genügen anderen Autoren in neueren Publikationen bereits Präparationsbreiten um 0,5 mm (*Kimmel* 1997, *Quaas et al.* 2006, *Baltzer* 2008, *Rudolph und Luthardt* 2008, *Lehmann et al.* 2009, *Hajtó* 2010, *Rinke et al.* 2013, *Kern et al.* 2015, *Belli et al.* 2016). Empfehlungen zu Schichtdicken im kaulasttragenden Bereich scheinen im Laufe der letzten Jahrzehnte jedoch konstant geblieben zu sein (s. Tabelle 2). Neuere Publikationen fordern in diesem Bereich immer noch einen Substanzabtrag zwischen 1,5 mm und 2,0 mm (*Hajtó* 2010, *Beuer et al.* 2011, *Kern und Keramik* 2015, *Podhorsky et al.* 2015).

Der vermehrte Platzbedarf für keramisch verblendete Restorationen mit Metall- oder Zirkonoxidgerüst findet in der Literatur mit empfohlenen Präparationsbreiten zwischen 1,0 mm und 1,5 mm zirkulär Berücksichtigung. Lediglich *Beuer et al.* genügt eine zirkuläre Schnitttiefe von 0,8 mm (*Beuer et al.* 2011). Die Werte im okklusalen und inzisalen Bereich liegen mit 1,2 mm bis 2,0 mm ebenfalls vergleichsweise höher.

Tabelle 3: Präparationsempfehlungen aus der Literatur bezüglich des Präparationswinkels

Autor (Erscheinungsjahr)	Präparationsempfehlung
Präparationswinkel	
<i>Kimmel (1997)</i>	3° bis 4°
<i>Goodacre et al. (2001)</i>	5° bis 10°
<i>Edelhoff und Kern (2003)</i>	Vollkeramik: 3° bis 5°
<i>Lehmann (2009)</i>	3° bis 6°
<i>Hajtó (2010)</i>	Vollkeramik: 3° bis 6° Gusskronen: 2°
<i>Kern et al. (2015)</i>	4° bis 6°
<i>Podhorsky et al. (2015)</i>	5° bis 10°
<i>Beuer et al. (2011)</i>	6°
<i>Lohbauer et al. (2018)</i>	5° bis 12°

Hinsichtlich des Präparationswinkels herrscht weitgehend Einigkeit (s. Tabelle 3). Ein Großteil der Autoren empfiehlt Winkel zwischen 3° und 6° für keramische Restaurationen (Kimmel 1997, Edelhoff und Kern 2003, Lehmann et al. 2009, Hajtó 2010, Beuer et al. 2011, Kern et al. 2015).

Bei der Gestaltung der Präparationsgrenze werden bei der Verwendung von Keramiken durchweg Hohlkehle- oder Stufenpräparationen mit abgerundeter Innenkante präferiert (s. Tabelle 4). Die Tangentialpräparation wird als kontraindiziert angesehen (Kimmel 1997, Baltzer 2008, Hajtó 2010, Lohbauer et al. 2018). Ebenso empfehlen einige Autoren explizit eine supra- bis isogingivale Lage der Präparationsgrenze (Goodacre et al. 2001, Baltzer 2008, Kern et al. 2015).

Tabelle 4: Präparationsempfehlungen aus der Literatur bezüglich Design und Lage der Präparationsgrenze

Autor (Erscheinungsjahr)	Präparationsempfehlung
Präparationsgrenze	
<i>Kimmel (1997)</i>	Hohlkehle: Metall- und Keramikverblendkronen abgerundete Stufe: Keramik- und Metallkeramikkkronen Tangential: Kontraindiziert für keramische Versorgungen
<i>Goodacre et al. (2001)</i>	supragingivale Lage Vollkeramik: Stufe oder Hohlkehle
<i>Edelhoff und Kern (2003)</i>	Vollkeramik: Hohlkehle
<i>Baltzer (2008)</i>	Keramik: Stufe; bei Schichtdicken < 1,5 mm Hohlkehle; Kontraindikation für Tangentialpräparation supra- bis epigingivale Lage der Präparationsgrenze
<i>Lehmann (2009)</i>	Vollkeramik: abgerundete Stufe oder Hohlkehle
<i>Hajtó (2010)</i>	Vollkeramik: Hohlkehle oder innen abgerundete Stufe (Tangential oder regenrinnenförmige Präparationen sind kontraindiziert)
<i>Rinke et al. (2013)</i>	Zirkonoxidkeramikkkronen: Hohlkehle oder Stufe (abgerundete Innenkante)
<i>Kern et al. (2015)</i>	Keramik: zirkuläre Hohlkehle oder Stufe mit abgerundeter Innenkante; supra- bis isogingivale Lage
<i>Lohbauer et al. (2018)</i>	Keramik: Hohlkehle oder Stufe (abgerundete Innenkante); Kontraindikation für Tangentialpräparation

1.9.2 Herstellerangaben

Beispielhafte Empfehlungen der Dentalfirmen *VITA Zahnfabrik* (Bad Säckingen, Deutschland), *Dentsply Sirona* (Charlotte, North Carolina, Vereinigte Staaten), *Ivoclar Vivadent* (Schaan, Liechtenstein) und *BEGO* (Bremen, Deutschland) stellen sich bezüglich der Präparationsbreite wie in Tabelle 5 aufgeführt dar:

Tabelle 5: **Präparationsempfehlungen beispielhafter Dentalfirmen – Präparationsbreite für keramische Werkstoffe (Zirkonoxidkeramik vollanatomisch oder verblendet)**

Firma (Erscheinungsjahr) / Dentalwerkstoff	Präparationsempfehlung
	Präparationsbreite (zirkulär)
<i>Firma Vita Zahnfabrik (2019)</i> Vita YZ®	(variiert nach Keramiktyp) – Kronen: vollanatomisch: 0,4 mm bis 0,7 mm keramisch verblendet: 1,1 mm bis 1,4 mm Vita YZ – Brücken: vollanatomisch – FZG: 0,5 mm bis 0,8 mm keramisch verblendet – FZG: 1,2 mm bis 1,5 mm vollanatomisch – SZG: 0,5 mm bis 1,0 mm keramisch verblendet – SZG: 1,2 mm bis 1,7 mm
<i>Firma Dentsply Sirona (2019)</i> Cercon®	vollverblendet: 1,0 mm vollanatomisch: 0,5 mm
<i>Firma Ivoclar Vivadent (2019)</i> IPS e.max® ZirCAD	Einzelzahnkronen (vollanatomisch): FZG 0,4 mm bis 0,8 mm SZG 0,6 mm bis 1,0 mm 3-gliedrige Brücken (vollanatomisch): FZG 0,4 mm bis 1,0 mm SZG 0,6 mm bis 1,0 mm
<i>Firma Bego (2020)</i> BEGO ZIRKON ST / BEGO ZIRKON ST MULTI	Bego Zirkon ST / Bego Zirkon ST Multi (vollanatomisch): Einzelkronen: 0,5 mm verblockte Kronen: 0,5 mm Brücken: FZG 0,5 mm bis 0,7 mm SZG 0,7 mm
	Präparationsbreite (okklusal/inzisal)
<i>Firma Vita Zahnfabrik (2019)</i> Vita YZ®	Vita YZ® (variiert nach Keramiktyp) – Kronen vollanatomisch: 0,5 mm bis 0,8 mm keramisch verblendet: 1,2 mm bis 1,5 mm Vita YZ – Brücken: vollanatomisch – FZG: 0,5 mm bis 1,0 mm keramisch verblendet – FZG: 1,2 mm bis 1,7 mm vollanatomisch – SZG: 0,6 mm bis 1,2 mm keramisch verblendet – SZG: 1,3 mm bis 1,9 mm
<i>Firma Dentsply Sirona (2019)</i> Cercon®	vollanatomisch: 0,5 mm bis 0,7 mm vollverblendet: FZG 2,0 mm SZG 1,5 mm
<i>Firma Ivoclar Vivadent (2019)</i> IPS e.max® ZirCAD	Einzelzahnkronen (vollanatomisch): FZG 0,4 mm bis 0,8 mm SZG 0,6 mm bis 1,0 mm 3-gliedrige Brücken (vollanatomisch): FZG 0,4 mm bis 1,0 mm SZG 0,6 mm bis 1,0 mm
<i>Firma Bego (2020)</i> BEGO ZIRKON ST / BEGO ZIRKON ST MULTI	Bego Zirkon ST / Bego Zirkon ST Multi (vollanatomisch): Einzelkronen: 0,5 mm verblockte Kronen: 0,5 mm Brücken: FZG 0,5 mm bis 0,7 mm SZG 0,7 mm

Bezüglich der Präparationsempfehlungen waren auf Seiten der Hersteller differenziertere Angaben vorzufinden. So wird bei den Firmen *Vita Zahnfabrik*, *Ivoclar Vivadent* und *Bego* sowohl zwischen Kronen und Brücken, als auch zwischen Lage des Zahns im Front- oder Seitenzahnggebiet unterschieden.

Unabhängig von Restaurationsform- und art fordern die Hersteller allesamt mm 0,4 bis 0,5 mm Mindestsubstanzabtrag für ihre Zirkonoxidkeramiken bei vollanatomischen Restaurationen. Im Seitenzahnggebiet wurden abhängig von der Versorgungsart teils minimal höhere Schnitttiefen von 0,6 mm bis 0,7 mm gefordert. Gleiches gilt für den okklusalen und inzisalen Mindestsubstanzabtrag. Die herstellerabhängig geforderten 0,4 mm bis 0,7 mm unterscheiden sich somit im okklusal-inzisalen Bereich deutlich von den in den in Lehrbüchern und wissenschaftlichen Artikeln vorgefundenen Empfehlungen.

Für vollverblendete Restaurationen fordert *Dentsply Sirona* 1,0 mm zirkulären Mindestsubstanzabtrag. *Vita Zahnfabrik* taxiert den zirkulären Platzbedarf für Kronen auf 1,1 mm und für Brücken auf 1,2 mm. Im okklusal / inzisalen Bereich liegen die Werte mit 1,2 mm bis 1,3 mm minimal höher. *Dentsply Sirona* fordert okklusal und inzisal 2,0 mm im Front- und 1,5 mm im Seitenzahnggebiet.

Empfehlungen für metallische Restaurationen der Firmen *BEGO* und *Wegold* (Wendelstein, Deutschland) werden in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: **Präparationsempfehlungen beispielhafter Dentalfirmen – Präparationsbreite für metallische Werkstoffe**

Firma (Erscheinungsjahr) / Dentalwerkstoff	Präparationsempfehlung
	Präparationsbreite (zirkulär)
<i>Wegold</i> (2019) Palladium-Basis-Legierung	Einzelkronen: 0,3 mm Brückenpfeiler: 0,5 mm
<i>Ivoclar-Vivadent</i> (2019) Co-Cr-Basis-Legierung	Einzelkronen: 0,3 mm Brückenpfeiler: 0,5 mm
	Präparationsbreite (okklusal / inzisal)
<i>Wegold</i> (2019) Palladium-Basis-Legierung	Einzelkronen: 0,3 mm Brückenpfeiler: 0,5 mm
<i>Ivoclar-Vivadent</i> (2019) Co-Cr-Basis-Legierung	Einzelkronen: 0,3 mm Brückenpfeiler: 0,5 mm

Übereinstimmend werden von beiden Firmen für Einzelkronen 0,3 mm und für Brückenpfeiler 0,5 mm Mindestabtragtiefe sowohl zirkulär als auch okklusal / inzisal gefordert.

Tabelle 7: **Präparationsempfehlungen beispielhafter Dentalfirmen – Präparationswinkel und Präparationsgrenze für keramische Werkstoffe (Zirkonoxidkeramik vollanatomisch oder verblendet)**

Firma (Erscheinungsjahr) / Dentalwerkstoff	Präparationsempfehlung	
	Präparations- winkel	Präparationsgrenze
<i>Firma Dentsply Sirona (2019)</i> Cercon®	4° bis 6°	Hohlkehle oder Stufe (innen abgerundet) Kontraindikation: Tangential
<i>Firma Ivoclar Vivadent (2019)</i> IPS e.max® ZirCAD	4° bis 8°	Stufen- oder Hohlkehlpräparation Öffnungswinkel Hohlkehle: 104° bis 128°
<i>Firma Bego (2020)</i> BEGO ZIRKON ST / BEGO ZIRKON ST MULTI	4° bis 6°	Bego Zirkon ST / Bego Zirkon ST Multi (vollanatomisch): Hohlkehl- oder Stufenpräparation Kontraindikation: Tangentialpräparation und Hohlkehlpräparationen mit Dachrinneneffekt

Die empfohlenen Präparationswinkel liegen im Bereich zwischen 4° und 8° und decken sich mit den Literaturangaben (s. Tabelle 7). Ebenfalls empfehlen die Firmen Hohlkehl- oder Stufenpräparationen mit abgerundeter Innenkante für Keramikversorgungen. Auch hier raten einige Hersteller vom Anlegen eines tangential verlaufenden Restaurationsrandes ab. Die Firma *Ivoclar* empfiehlt zudem einen Öffnungswinkel der Hohlkehle von umgerechnet 104° bis 128°.

1.9.3 Aktuelle Studienlage

Ältere Publikationen wie die Dissertation von *Hinkelmann* konnten im Rahmen einer Laborbefragung bei 38 % der präparierten Stümpfe eine Tangentialpräparation, bei 15 % eine Stufen- und bei 47 % eine Hohlkehlpräparation feststellen (Hinkelmann 1993). *Smith* bemaß - anhand durchgeführter Untersuchungen - den mittleren Konvergenzwinkel auf circa 20° bei Molarenpräparationen (Smith 1987).

Wimmer ermittelte bei $n = 218$ ausgewerteten Präparationen für unterschiedliche Versorgungsformen in 69,3 % der Fälle eine Hohlkehlpräparation. 18,8 % entfielen auf die Tangentialpräparation und 11,9 % auf die Stufenpräparation. In 31,2 % der Fälle wurde der interokklusale Mindestabstand von 1,0 mm unterschritten. Die durchschnittliche Präparationsbreite lag zwischen 0,4 und 0,5 mm. Die gemessenen Gesamtpräparationswinkel sind mit 23,5° (vestibulär / oral) und 20,4° (mesial / distal) als zu konisch anzusehen (Wimmer 2009).

Schiefelbein stellte bei $n = 52$ ausgewerteten vollkeramischen Frontzahnkronen mit einem durchschnittlichen Präparationswinkel von 16,14° ebenfalls eine konische Präparationsweise fest. Die durchschnittliche marginale Präparationstiefe betrug 0,53 mm (Schiefelbein 2015).

Podhorsky et al. beschreiben in ihrem *Review* durchschnittliche Präparationswinkel von 18,2° bis 23,9° im Praxisalltag, wobei im Unterkiefer im Durchschnitt flacher präpariert wurde als im Oberkiefer. Ebenso wiesen weiter distal gelegene Zähne konischere Winkel als mesial gelegene Zähne auf, während insgesamt in vestibulär-oraler Ausrichtung größere Präparationswinkel als in mesio-distaler Ausrichtung gemessen wurden (Podhorsky et al. 2015).

Al-Omari et al. konnten im Rahmen einer Studie bei Studentinnen und Studenten im letzten Studienjahr Konvergenzwinkel zwischen 22,4° und 25,3° messen. Die inzisale und okklusale Reduktion betrug 2,0 mm im Durchschnitt. Die durchschnittliche Präparationsbreite betrug je nach Fläche 0,66 mm bis 0,86 mm (Al-Omari und Al-Wahadni 2004).

Güth et al. konnten nach Auswertung von $n = 75$ für die Aufnahme von Vollkeramikronen präparierten linken oberen Molaren einen mittleren Konvergenzwinkel von 26,7° feststellen. Nur $n = 10$ Präparationen wiesen einen Konvergenzwinkel von 6° bis 15° auf. 31 % der Präparationen zeigten Unterschnitte. 30 % wiesen einen unzureichenden interokklusalen Abstand auf. Nur circa 25 % der Präparationen wiesen ein an allen Messstellen keramikgerechtes Randdesign auf (Güth et al. 2013).

1.10 Ziele der Arbeit

Kimmel beschrieb die Problematik unter anderem als eine Lücke zwischen Präparationstechnik in Theorie und Praxis bei Nichtbeachtung von „nationalem und internationale[n] Normen“ und stellte ein Defizit an kritischen Beiträgen über Präparationstechniken fest (Kimmel et al. 1986). Für *Hinkelmann* ergab sich in einer zu dieser ähnlich angelegten Studie 1993 ein signifikanter Widerspruch zwischen der Befragung von Zahnärztinnen und Zahnärzten mit der tatsächlichen Umsetzung im Praxisalltag. Sie schlussfolgerte, dass die aus Wissenschaft und Industrie „gesicherten Erkenntnisse [...] nur zum Teil von den Zahnärzten in der Arbeitspraxis umgesetzt [werden]“ und bemängelte ein deutliches „Wissensdefizit“ sowie ein „Verharren alter Präparationsgewohnheiten“ (Hinkelmann 1993). *Wimmer* stellte 2009 zwar fest, dass „die Form der klinisch präparierten Stümpfe im Vergleich zur Literatur [...] im Wesentlichen gut berücksichtigt [wird]“ konstatiert dennoch einen „gewissen Widerspruch zwischen der praktischen Durchführung der Präparation und den gemessenen Werten zur Lehrmeinung hinsichtlich Stufenbreiten und Gesamtpräparationswinkel“ (Wimmer 2009). *Schiefelbein* kommt in seiner 2015 veröffentlichten Dissertation durch Auswertung von in vivo und in vitro durchgeführten Frontzahnpräparationen für Vollkeramikronen zu dem Schluss, dass die „empfohlenen Präparationskriterien, bezogen auf Präparationswinkel und marginale Präparationstiefe, kaum eingehalten werden“ (Schiefelbein 2015).

Unter Berücksichtigung der sich seit einigen Jahren vollziehenden Digitalisierung in der Zahnmedizin, einhergehend mit der Etablierung immer leistungsfähigerer Restaurationsmaterialien stellt sich nun die Frage, ob eine Annäherung zwischen Präparationsempfehlungen und Umsetzung oder gar ein Paradigmenwechsel auf diesem Arbeitsfeld stattgefunden hat.

Hierauf aufbauend und im Wissen, dass ein auf Ökonomie getrimmter Praxisalltag von niedergelassenen Zahnärztinnen und Zahnärzten die Prozessqualität zunehmend mit beeinflusst, hat sich diese Arbeit zum Ziel gesetzt, sowohl das theoretische Wissen um die zahnärztliche Präparation innerhalb der Zahnärzteschaft als auch die technische Umsetzung dieses grundlegenden Behandlungsschrittes zu eruieren. In Abgleich mit den gängigen Präparationsempfehlungen sollten eventuelle Differenzen hierdurch aufgedeckt werden.

Mittels digitaler präziser Auswertungsmethoden sollten deskriptive und quantifizierbare Parameter wie die gewählte Präparationsform, die marginale Präparationstiefe, der Präparationswinkel oder die okklusale Schichtdicke des Präparationsstumpfes reproduzierbar in seiner geometrischen Gestalt erfassen und so der Untersuchung der formulierten Fragestellungen zugänglich machen.

Zudem sollte eine möglichst repräsentative Befragung innerhalb der Zahnärzteschaft nähere Einblicke in die Präparationsgewohnheiten im Praxisalltag ermöglichen. Die Erfragung von materialabhängig bevorzugter Präparationsform oder bevorzugtem Präparationswinkel sollte eine direkte Korrelation zwischen Befragung und Präparationsauswertung ermöglichen. Nicht im Labor erfassbare Kriterien wie die Lage der Präparationsgrenze in Bezug auf das Zahnfleischniveau, die bevorzugt verwendeten Präparationsinstrumente oder auch die gewählte Abformmethode sollten das Bild mithilfe des Fragebogens komplettieren.

Auf Grundlage der Ergebnisse könnten so - falls nötig - Präparationsrichtlinien angepasst werden. Gegebenenfalls ließen sich zudem bereits früh im Zahnmedizinstudium wichtige Weichenstellungen in Bezug auf die Lehre vollziehen, um ein für den Patienten und Behandler qualitativ hochwertiges Ergebnis zu erzielen.

2 Material und Methoden

Zum Vergleich zwischen praktischem Vorgehen und theoretischen Angaben der Zahnärzteschaft in Bezug auf die zahnärztliche Präparationstechnik wurde sowohl eine klinisch retrospektive Querschnittsstudie durch Auswertung von präparierten Zähnen als auch eine deutschlandweite Querschnittserhebung durch Auswertung eines Onlinefragebogens durchgeführt. In diesem Rahmen bezog die Studie sich auf restaurative Kronen- und Brückenversorgungen unterschiedlicher Materialien. Durch Vergleich der Studienergebnisse sollte untersucht werden, inwieweit die theoretischen Vorgaben von der praktischen Umsetzung differieren.

2.1 Ethikvotum

Die klinische Studie wurde gemäß den Vorgaben der medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf angemeldet. Die entsprechende Studiennummer lautet 5898R. Für die Studie besteht ein positives Ethikvotum vom 15.08.2017.

2.2 Laborauswertung von digitalisierten präparierten Zähnen

Grundlage der klinisch retrospektiven Studie waren aus der Prozesskette der digitalen Fertigung anfallende Scans zahnärztlich präparierter Zähne. Diese wurden von Zahntechniklaboren zur Verfügung gestellt. Insgesamt wurden n = 1002 Scans nach einem standardisierten Verfahren ausgewertet.

2.2.1 Einschlusskriterien – Laborauswertung

In die Studie wurden für die Aufnahme von Kronen und Brückenanker Kronen präparierte Zahnstümpfe eingeschlossen. Folgende Materialtypen wurden für die Auswertung berücksichtigt:

- Metallversorgung (M) z.B. Kobalt-Basis-Legierung
- Keramikversorgung (K) z.B. Zirkonoxid
- Metallversorgung – Keramisch verblendet (VM)
- Keramikgerüstversorgung – Keramisch verblendet (VK)

Die auszuwertenden Scans durften maximal drei Jahre alt sein und sollten von innerhalb Deutschlands tätigen niedergelassenen Zahnärztinnen und Zahnärzten präpariert worden sein.

2.2.2 Auswertungszeitraum

Die benötigten Scans wurden im Zeitintervall von Februar 2018 bis Dezember 2020 rekrutiert. Unter Berücksichtigung der Einschlusskriterien ergab sich hieraus ein maximaler Zeitraum von Februar 2015 bis Dezember 2020 für das Konstruktionsdatum der zugrundeliegenden laborseitigen Arbeitsaufträge.

2.2.3 Rekrutierung der Scans

Zur Rekrutierung der digitalisierten Scans wurden fünf voneinander unabhängige zahntechnische Großlabore innerhalb Nordrhein-Westfalens herangezogen. Aus Datenschutzgründen wurde auf eine namentliche Nennung der einzelnen Labore im Folgenden verzichtet. Die Größe der Labore gemessen an der Mitarbeiterzahl schwankte zwischen 10 und 50 Mitarbeitern. Je größer der entsprechende zugrundeliegende Kundenstamm an Zahnärztinnen und Zahnärzten, desto mehr Scans wurden vom jeweiligen Labor bezogen. Eine Aufklärung und Einwilligung hinsichtlich Studiendurchführung und Datenschutz sowie Widerrufsrecht erfolgte vorab anhand eines einheitlichen Aufklärungsbogens durch den Eigentümer des jeweiligen Labors.

Die von den Zahnärztinnen oder Zahnärzten präparierten, abgeformten und in Gips ausgegossenen Arbeiten werden im Zahntechniklabor mittels 3D-Scanner erfasst und in einen digitalen Datensatz überführt. Der Datensatz dient dem Zahntechniker anschließend als Sägeschnittmodell auf dem mit entsprechender Software die digitale Modellation der späteren Restauration erfolgt. Dieser Arbeitsschritt entspricht der analogen Wachsmodellation im Labor. Der auf diese Weise konstruierte Datensatz wird anschließend maschinell und automatisiert per Fräsmaschine gefertigt.

Innerhalb dieses digitalen Workflows wurde auf digitalisierte Sägeschnittmodelle und Gegenkiefermodelle zurückgegriffen. Die digitalisierten Modelle stellten sich wie in Abb. 8 ersichtlich dar.

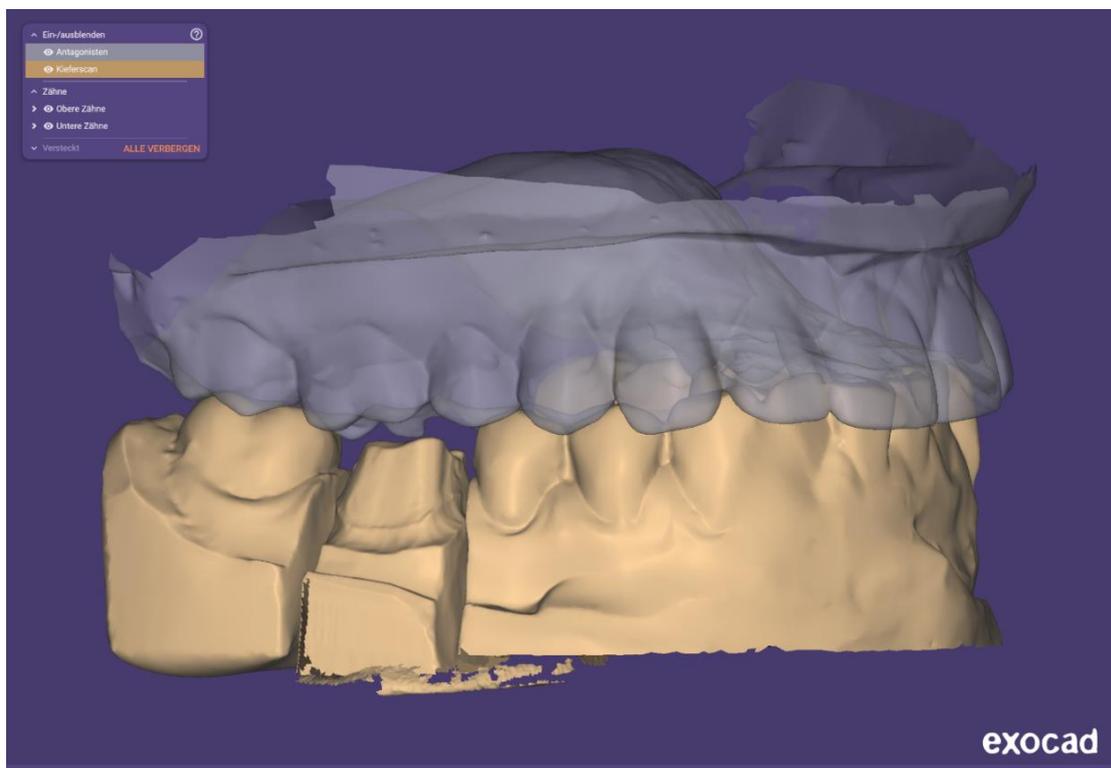


Abb. 8: **Sägeschnitt- und Gegenkiefermodell in Okklusion** (Screenshot Exocad Version 3.0 Galway – Eigene Abbildung)

Die entsprechenden Dateien werden auch nach Fertigung der Arbeit durch die Labore aufbewahrt und können gezielt aufgerufen werden. Die Datensätze setzen sich pro auszuwertendem Zahnstumpf aus einem Paket von zwei eigenständigen Dateien zusammen. Diese bestanden aus dem eingescannten Sägeschnittmodell des auszuwertenden Zahnes sowie dem eingescannten Modell des Gegenkiefers.

Pro Versorgungsform sollte jeweils nur eine Präparation derselben Zahnärztin oder des desselben Zahnarztes ausgewertet werden. Hieraus ergab sich eine maximale Anzahl von vier Scans pro Behandelndem, sofern die Zahnärztinnen oder Zahnärzte beim jeweiligen Labor im Untersuchungsintervall mindestens eine Arbeit je Materialtyp (M, K, VK, VM) in Auftrag gegeben hatten.

Zur Anonymisierung der Daten wurde der Ordner mit den darin enthaltenen Scans in aufsteigender Reihenfolge nummeriert. Versorgungsform und zu verwendendes Material der jeweiligen Arbeit sollten anschließend aus dem Ordnernamen hervorgehen. Die Namensgebung erfolgte entsprechend nach folgendem Schema: „[Scan-Nummer][Versorgungsform][Material][Zahn]“.

- Scan-Nummer: Nummerierung in aufsteigender Reihenfolge beginnend bei 1
- Versorgungsform:
 - „Kr“ für Krone
 - „Br“ für Brücke
- verwendetes Material:
 - „K“ für Keramik
 - „VK“ für Keramisch verblendetes Keramikgerüst
 - „M“ für Nichtedelmetall
 - „VM“ für keramisch verblendetes Nichtedelmetall
- Zahn/Zähne auf dem/denen die Restauration/en gefertigt wird/werden

So wurde beispielsweise der Scan einer vollanatomischen monolithischen Brücke aus Zirkonoxidkeramik mit den Pfeilerzähnen 24 und 26, welcher als erster Scan im Labor ausgesucht wurde, folgendermaßen bezeichnet: „1KZirkonBr24bis26“. Auf diese Weise konnte nach Anonymisierung der Daten weder Bezug zum Behandelnden noch zur Patientin oder zum Patienten genommen werden.

Befanden sich innerhalb eines Sägeschnittmodells mehrere Versorgungen desselben Typs oder handelte es sich um eine Brücke, so wurde per Zufallsgenerator entschieden, welcher Präparationsstumpf für die Auswertung herangezogen wurde. Hierzu wurde die „ZUFALLSBEREICH-Funktion“ der Software *Microsoft Excel Version 2019* (Microsoft, Washington, USA) genutzt. Die Anzahl der in Frage kommenden Präparationsstümpfe innerhalb des Arbeitsauftrages stellte hierbei den Maximalwert des Zufallsgenerators dar. Anhand des Ergebnisses konnte anschließend entsprechend dem FDI-Zahnschema ausgehend von dem am weitesten distal gelegenen präparierten Zahn des Quadranten mit der niedrigsten Nummerierung der auszuwertende Zahnstumpf abgezählt werden.

Die zahntechnischen Labore verwendeten für das CAD/CAM-Fertigungsverfahren sowohl die Dentalsoftware *3Shape Dental System* (3shape, Kopenhagen, Dänemark) als auch die Dentalsoftware *Exocad DentalCAD* (exocad Group GmbH, Darmstadt, Deutschland). Die Auswahl der Scans innerhalb der Labore erfolgte entsprechend mit diesen Programmen. Die Datensätze wurden zur weiteren Bearbeitung in das STL-Format konvertiert und auf eine externe Festplatte exportiert.

2.2.4 Auswertungs-Software

Zur Realisierung der Auswertung wurde eine zeitlich nicht limitierte Demo-Version der Dental-Software *Exocad* (Version 3.0 Galway) genutzt. Diese wurde über den Dental-Onlinehandel „*dentoo*“ (PayFactory GmbH, Metzingen, Deutschland) erworben. Mithilfe der Software ließen sich die für die Studie nötigen Winkelmessungen im dreidimensionalen Raum sowie die Darstellung von Schnittebenen durch dreidimensionale Objekte in *STL*-Datensätzen realisieren. Die *STL*-Datensätze beinhalteten die exakten Raumkoordinaten von Sägeschnittmodell und Gegenkiefermodell. Die Modelle wurden automatisch durch die Software zusammengeführt. Die resultierende räumliche Zuordnung von Ober- und Unterkiefer entsprach der analogen okkludierenden Situation im Artikulator.

2.2.5 Auswertungsbogen

Zur Erfassung der zu erhebenden Daten wurde mithilfe von *Excel* ein einheitlicher Auswertungsbogen entworfen. Jeder ausgewertete Präparationsstumpf wurde einem Auswertungsbogen zugeordnet und jede Excel-Arbeitsmappe war wiederum einem Labor zugeordnet. Der verwendete Auswertungsbogen ist in Abb. 9 ersichtlich. Anhand des Auswertungsbogens wurden folgende Merkmale erfasst:

- Zahn-Nummer: entspricht der anonymisierten Scannummer
- Zahn: ausgewählter Zahn entsprechend dem FDI-Schema
- Versorgungsform
- Material
- Präparationsart
- Abstand zum Antagonisten
- Präparationsbreite
- Präparationswinkel
- Winkel der Stufe oder Hohlkehle
- unter sich gehende Bereiche

Zahn-Nummer:		Zahn:		Versorgungsform:		Material:		Präparationsart:	
Präparationsbreite	Durchschnitt (vestibulär)	Durchschnitt (gesamt)	Präparationswinkel	Durchschnitt	Stellheit der Stufe	Durchschnitt (gesamt)			
	0,00	0,00		0,00°		0,00			
disto-vestibulär			vestibulär		vestibulär				
vestibulär									
mesio-vestibulär									
mesial			mesial		mesial				
	Durchschnitt (oral)								
	0,00								
mesio-oral			oral		oral				
oral									
disto-oral									
distal			distal		distal				
Abstand zum Antagonisten									
Zufallsgenerator	/								
Start									
Ende									
Ergebnis	0								

Abb. 9: Auswertungsbogen (Excel)

Durchschnittswerte konnten anschließend automatisch per Formel berechnet werden. Sämtliche Ergebnisse wurden auf zwei Nachkommastellen genau gerundet.

2.2.6 Messung der okklusalen Schichtstärke

Ein Maß für die Schichtdicke der späteren Restauration im Bereich der Kaufläche stellt der vertikale Abstand zwischen der Okklusalfäche des präparierten Zahnstumpfes und der Kaufläche des direkten Antagonisten dar. Zur Messung dieses interokklusalen Abstandes wurde mithilfe von *Exocad* zunächst eine bei vestibulärer Betrachtung des Zahnes sagittal verlaufende Schnittebene durch den präparierten Zahn aufgespannt. Die Umrisse der Okklusalfächen beider gegenüberliegender Zähne wurden nun in einer zweidimensionalen Schnittansicht abgebildet. Die Schnittebene wurde anschließend so lange parallelverschoben bis der schmalste Abstand beider gegenüberliegender Kauflächen aufgefunden wurde. Dieser Wert wurde mithilfe der Software vermessen und als minimaler interokklusaler Abstand herangezogen. Die schematische Ermittlung des interokklusalen Abstandes und die Umsetzung in der Software sind in Abb. 10 zu sehen.

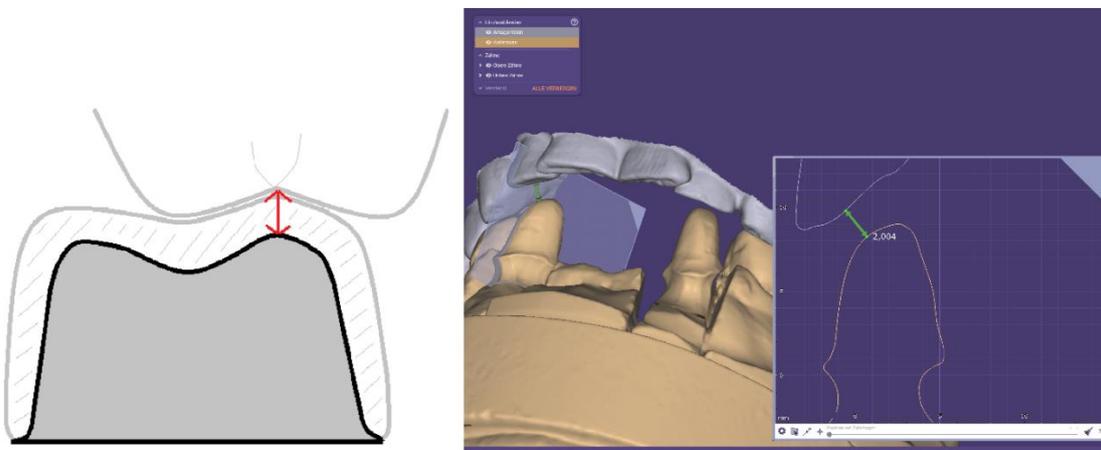


Abb. 10: **Schematische Ermittlung des interokklusalen Abstandes (links) und Umsetzung in der Auswertungssoftware** (rechts: Screenshot Exocad Version 3.0 Galway – eigene Abbildung)

Waren sowohl auszuwertender Stumpf als auch Antagonist präpariert, so wurde der ermittelte Abstand halbiert. War kein Antagonist vorhanden oder lag kein auszuwertender Scan des Antagonisten vor, so wurde der entsprechende Wert als fehlend notiert.

2.2.7 Ermittlung der Präparationsform und Präparationsbreite

Abb. 11 zeigt die die okklusale Aufsicht auf den auszuwertenden Zahn. Jeder Zahn wurde in acht verschiedene Flächen unterteilt.

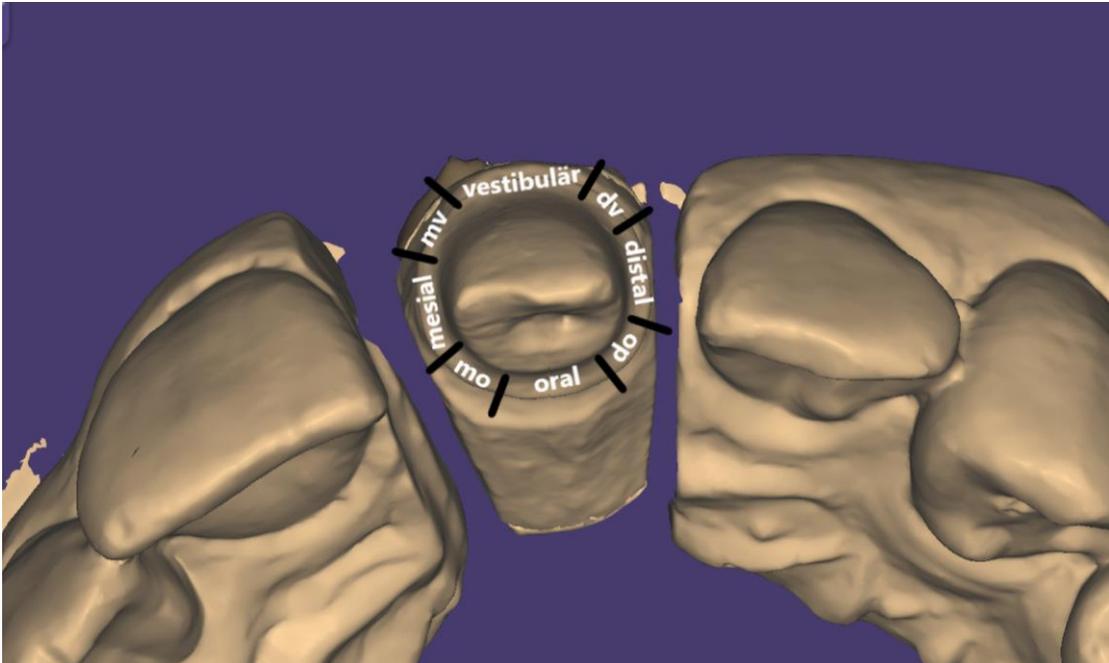


Abb. 11: **Einteilung der Zahnflächen** – mv: mesiovestibulär / dv: distovestibulär / mo: mesiooral / mv: mesiovestibulär (Screenshot Exocad Version 3.0 Galway – eigene Abbildung)

Zur Messung der Hohlkehrl- bzw. Stufenbreite wurde der Zahn zunächst in seiner okklusalen Aufsicht so eingestellt, dass er in seiner gesamten Zirkumferenz gleichmäßig eingesehen werden konnte. Anschließend wurde an jeder zu messenden Zahnfläche die jeweils schmalste Präparationsbreite aufgesucht.

In okklusaler/inzisaler Aufsicht auf die jeweilige Zahnfläche wurde daraufhin eine parallel zur Zahnlongsachse verlaufende Schnittebene aufgespannt. Die Umriss des präparierten Zahnes im Bereich der marginalen Präparationsgrenze wurden so in einer zweidimensionalen Schnittansicht dargestellt. Entsprechend der daraus ersichtlichen charakteristischen marginalen Präparationsgestaltung konnte eine Klassifizierung der Präparationsform vorgenommen werden.

Im Falle einer Tangentialpräparation lag ein stufenloser Übergang zwischen präpariertem und unpräpariertem Zahn vor. Folglich entfiel hier eine Messung der Präparationsbreite. Sofern keine Tangentialpräparation vorlag, wurde nachfolgend die Präparationsbreite ermittelt.

Zur Ermittlung der Präparationsbreite wurde innerhalb der Schnittbildansicht zunächst eine Tangente an die entsprechende seitliche Zahnfläche des präparierten Zahnes angelegt. Zervikal konnte so der exakte Übergang in die Hohlkehle oder Stufe bestimmt werden. Ausgehend von diesem Punkt wurde orthogonal zur Zahnlongsachse die Distanz bis zur Präparationsgrenze ausgemessen und als Wert für die Präparationsbreite herangezogen. Das Vorgehen ist in Abb. 12 dargestellt.

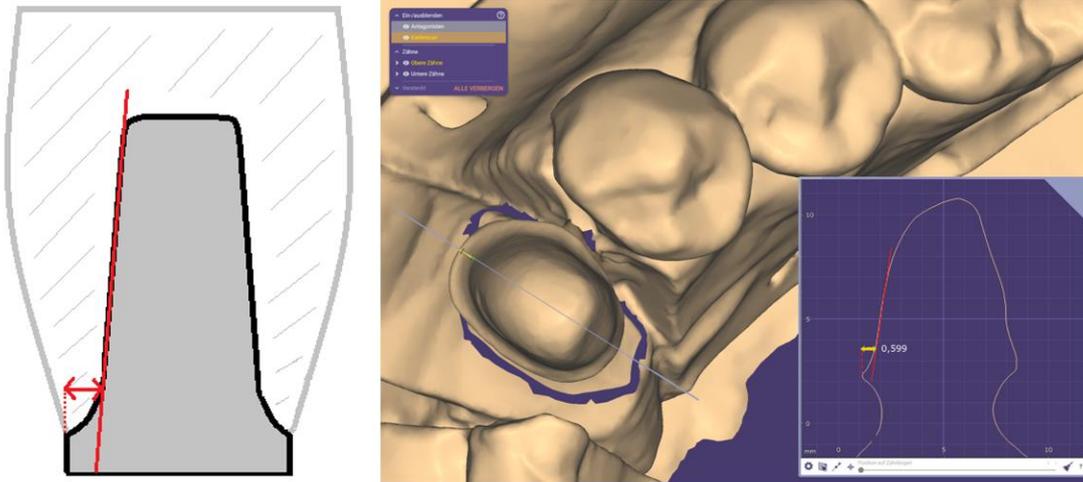


Abb. 12: **Schematische Ermittlung der Präparationsbreite mit angelegter Tangente (links) und Umsetzung in der Auswertungssoftware** / als Tangente dienen Gitternetzlinien nach entsprechender Rotation des Zahnes (rechts: Screenshot Exocad Version 3.0 Galway – eigene Abbildung)

Die größte Breite, die nicht mehr als Tangentialpräparation angesehen wurde, betrug 0,15 mm. Zahnflächen mit zervikal unter sich gehenden Bereichen wurden gesondert erfasst.

2.2.8 Messung des Präparationswinkels

Zur Messung des Präparationswinkels wurde die gleiche Schnittebene wie zur Messung der Präparationsbreite herangezogen. Die Messung wurde an folgenden Stellen durchgeführt:

- o vestibulär
- o mesial
- o oral
- o distal

Je größer Präparationswinkel und Konvergenzwinkel desto flacher verlaufen die jeweiligen Zahnflächen und je kleiner der Präparationswinkel und Konvergenzwinkel, desto steiler verlaufen sie. Bei 0° ergibt sich eine parallel zur Zahnachse verlaufende Zahnfläche. Präparationswinkel kleiner als 0° entsprechen einer unter sich gehenden Präparation mit entsprechend divergierender Zahnfläche.

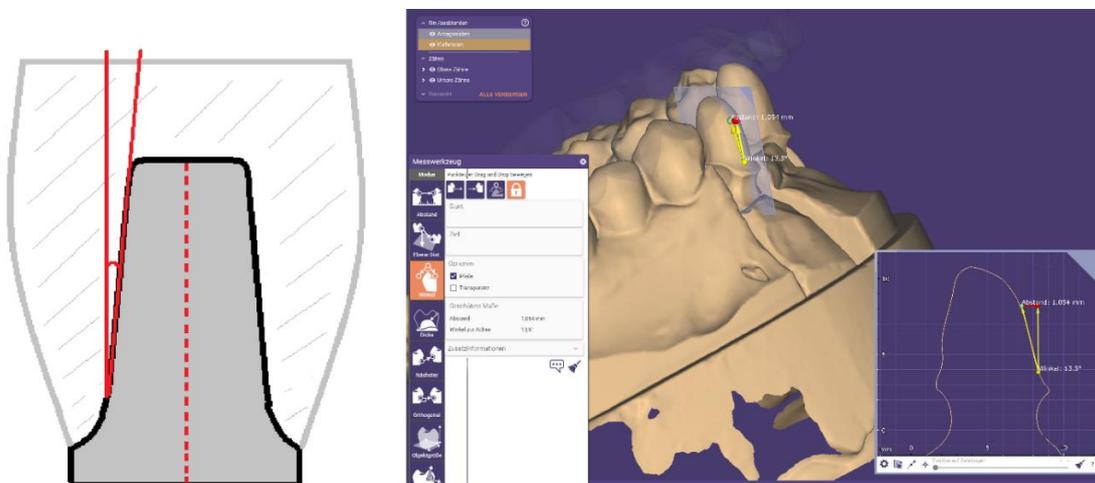


Abb. 13: **Schematische Ermittlung des Präparationswinkels (links) und Umsetzung in der Auswertungssoftware** (rechts: Exocad Version 3.0 Galway – eigene Abbildung)

Nach Konstruktion der Geraden - wie in Abb. 13 schematisch dargestellt - konnte der Winkel in *Exocad* automatisch bestimmt werden.

War die präparierte Zahnoberfläche zu „unruhig“, sodass sich keine durchgängige Tangente anlegen ließ, wurde als Tangente eine Ausgleichsgerade über die Zahnoberfläche gelegt. Okklusale Abschrägungen wurden bei der Messung nicht berücksichtigt.

Im Falle einer von der Zahnängsachse divergierend verlaufenden Präparation wurde der gemessene Winkel entsprechend mit einem negativen Vorzeichen versehen.

Der Konvergenzwinkel wurde durch Addition der beiden einander gegenüberliegenden Präparationswinkel ermittelt. Flächen mit negativen Präparationswinkeln wurden als Präparationsfehler gewertet und aus der weiteren Auswertung herausgenommen.

2.2.9 Messung des Öffnungswinkels der Hohlkehle oder Stufe

Der Öffnungswinkel der Hohlkehle oder Stufe entspricht dem Winkel zwischen seitlicher Zahnfläche und Übergang von präparierter zu unpräparierter Zahnoberfläche. Der Winkel ließ sich ebenfalls durch Konstruktion der entsprechenden Tangenten in der Schnittbildansicht ermitteln. Die Vorgehensweise wird in Abb. 14 skizziert.

Der Winkel wurde an folgenden Zahnflächen ermittelt:

- o vestibulär
- o mesial
- o oral
- o distal

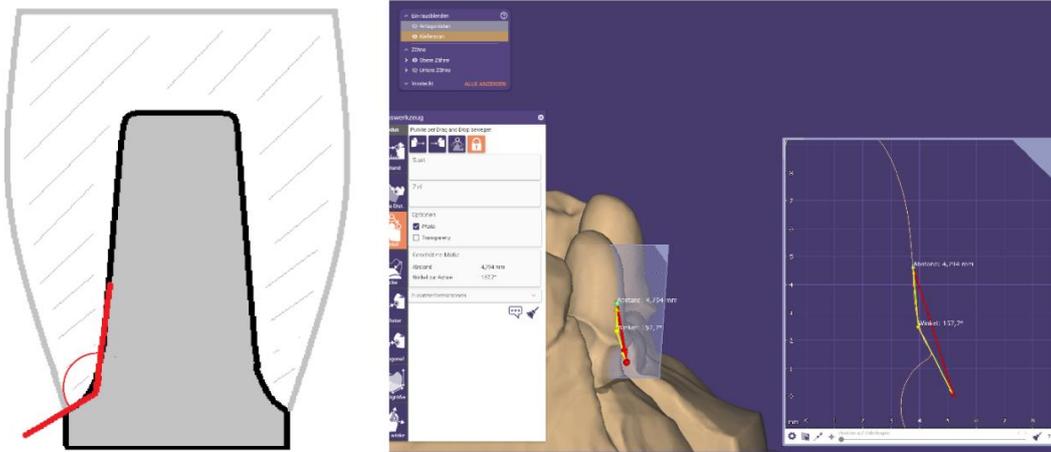


Abb. 14: Schematische Ermittlung des Öffnungswinkel von Hohlkehle bzw. Stufe (links) und Umsetzung in der Auswertungssoftware (Software Exocad Version 3.0 Galway – eigene Abbildung)

2.3 Fragebogen

Der Onlinefragebogen wurde mithilfe des browserbasierten Umfragetools „Sosci-Survey“ (SoSci Survey GmbH, München, Deutschland) erstellt. Im Rahmen von universitärer nicht kommerzieller Forschung war das Umfragetool kostenfrei verfügbar. Mithilfe der Software ließen sich Befragungsprojekte erstellen, versenden und auswerten. Die Erstellung des Fragebogens geschah durch Zusammenfügen vorgefertigter Fragemodule. Aus verschiedenen Fragetypen wurde ein Fragenkatalog entworfen. Ziel war es, einen Überblick über die Präparationsweise im Praxisalltag zu erhalten. Die Speicherung des Projekts erfolgte auf den Servern der Betreiberfirma.

Während einer vorgeschalteten Pretest-Phase ging es zunächst darum, Fehler, Ungenauigkeiten sowie Unverständlichkeiten im Fragebogen aufzufinden. Dieser Vorgang sollte die Validität der später erhobenen Daten sichern.

Der Pretest erfolgte zunächst online an zehn ausgewählten Zahnärztinnen und Zahnärzten. Das Aufrufen des Fragebogens erfolgte über einen entsprechenden Link. Die Befragten hatten die Möglichkeit beim Ausfüllen des Fragebogens Anmerkungen an entsprechenden Stellen zu hinterlegen, sodass diese vom Administrator eingesehen werden konnten und entsprechend bearbeitet wurden.

Zudem erfolgte ein „Face-to-Face“-Pretest an n = 10 Probandinnen und Probanden ohne relevantes zahnmedizinisches Vorwissen.

2.3.1 Der Fragenkatalog

Der finale Fragebogen setzte sich aus folgenden Items und Antwortmöglichkeiten zusammen:

- o Geschlecht
 - männlich
 - weiblich
- o Tätigkeitsdauer
 - < 10 Jahre
 - 10 bis 20 Jahre
 - 20 bis 30 Jahre
 - > 30 Jahre
- o Benötigte Zeit pro präpariertem Zahn
 - < 10 Min.
 - 10 bis 15 Min.
 - 15 bis 20 Min.
 - 20 bis 25 Min.
 - > 25 Min.
- o Präparationsform jeweils für die Versorgungsformen K, M, VK, VM
 - Hohlkehle
 - Stufe
 - Tangential
 - „Sonstige“
- o Präparationswinkel jeweils für metallische und keramische Hülsenkronen
 - 0° (parallel)
 - > 0° bis < 6°

- > 6° bis < 15°
- > 15° bis < 25°
- > 25°
- o Instrumente jeweils für die Versorgungsformen K, M, VK, VM
 - Kugel (ISO-Form 001)
 - Knospe (ISO-Form 277)
 - Konisch, Kante rund (ISO-Form 553)
 - Konisch, Kante scharf (ISO-Form 172)
 - Walze, Kante rund (ISO-Form 158)
 - Walze, Kante eckig (ISO-Form 113)
 - Torpedo (ISO-Form 290)
 - Freitexteingabe
- o Zuordnung der Präparationsinstrumente anhand des DIN-ISO-Nummernsystems (ISO 6360)
 - Benutze ich
 - Kenne ich, benutze ich aber nicht
 - Kenne ich nicht
- o Auswahl der Präparationsinstrumente
 - anhand von vorgefertigten Präparationssets
 - anhand von Erfahrungswerten
 - anhand des DIN-ISO-Nummernsystems zur Klassifizierung von Präparationsinstrumenten
- o Verwendete Abformmethoden
 - Einphasenabformung
 - Doppelmischabformung
 - Korrekturabformung
 - 3D-Scan-Verfahren
- o Nutzung von CAD/CAM-Verfahren
- o Lage der Präparationsgrenze im Frontzahngebiet
 - supragingival
 - äquigingival
 - subgingival
- o Lage der Präparationsgrenze im Seitenzahngebiet
 - supragingival
 - äquigingival
 - subgingival

Abb. 15 zeigt exemplarisch eine Seite des Fragebogens.

25% ausgefüllt

1. Wieviel Zeit benötigen Sie im Durchschnitt pro präpariertem Zahn?
(Bitte ankreuzen)

< 10 Min. 10 bis 15 Min. 15 bis 20 Min. 20 bis 25 Min. > 25 Min.

2. Welche Präparationstechnik benutzen Sie für welche Versorgungsform? - Vollkeramikkrone (z.B. Zirkonoxidkeramik)
(Bitte anklicken)

<p>Hohlkehle</p>	<p>Stufe</p>	<p>Tangential</p>	Sonstiges
------------------	--------------	-------------------	-----------

3. Welche Präparationstechnik benutzen Sie für welche Versorgungsform? - Metallische Vollgusskrone
(Bitte anklicken)

<p>Hohlkehle</p>	<p>Stufe</p>	<p>Tangential</p>	Sonstiges
------------------	--------------	-------------------	-----------

4. Welche Präparationstechnik benutzen Sie für welche Versorgungsform? - Keramisch verblendete Metallkrone
(Bitte anklicken)

<p>Hohlkehle</p>	<p>Stufe</p>	<p>Tangential</p>	Sonstiges
------------------	--------------	-------------------	-----------

Abb. 15: Auszug aus dem Online-Fragebogen (Erstellung des Fragebogens mittels SoSci-Survey)

2.3.2 Einschlusskriterien – Fragebogen

In die Befragung eingeschlossen wurden innerhalb der Bundesrepublik Deutschland tätige niedergelassene approbierte Zahnärztinnen und Zahnärzte. Fachzahnärztinnen und Fachzahnärzte wie Kieferorthopädinnen und Kieferorthopäden oder Oralchirurginnen und Oralchirurgen wurden von der Befragung ausgeschlossen.

2.3.3 Ermittlung der E-Mail-Adressen

Ziel war es, eine möglichst hohe flächendeckende Anzahl an E-Mail-Adressen von Zahnärztinnen und Zahnärzten deutschlandweit zu erhalten. Die Ermittlung Adressen erfolgte getrennt nach Bundesländern. Hierfür wurden Online-Branchenbücher sowie die Zahnarztsuch-Funktion der Internetauftritte der jeweiligen Zahnärztekammern herangezogen.

Da ein einzelnes Aufsuchen und Kopieren jeder Emailadresse zu zeitaufwendig gewesen wäre, wurden frei zur Verfügung stehende Erweiterungen des Browsers „*Google Chrome*“ (Google LLC, Vereinigte Staaten, Kalifornien) genutzt. Mithilfe von „*Email Hunter*“ (Version 0.2), „*Email-Drop*“ (Version 1.9) und „*Email Extractor*“ (Version 4.21) konnten aus jeweils im Browser geöffneten Internetseiten E-Mail-Adressen automatisch extrahiert werden. Die Tools durchsuchten dabei den Quelltext der jeweiligen Internetseite.

Für ein systematisches Vorgehen bei der Suche wurden die Städte der jeweiligen Bundesländer nach Einwohnerzahl (auf Grundlage des Zensus von 2011) in absteigender Reihenfolge sortiert. Anschließend wurden die entsprechenden Städte der Reihe nach mithilfe der oben genannten Auskunftsseiten durchsucht. Es wurden alle Städte des jeweiligen Bundeslandes bis zu einer Einwohnerzahl von $n = 50\,000$ herangezogen. Die ermittelten E-Mail-Adressen wurden in eine Exceltabelle nach Bundesländern sortiert gesammelt.

Sofern möglich, wurde bei der Suche nach allgemein Zahnärztlich praktizierenden Zahnärztinnen und Zahnärzten gefiltert. Da diese Option nicht auf jeder Auskunftseite zur Verfügung stand und die Filterfunktion erfahrungsgemäß nicht immer exakt funktionierte, wurden nach Anlegen der Adressliste in Excel nach folgenden Schlagwörtern gesucht: „*kfo*“, „*spange*“, „*ortho*“, „*mkg*“, „*chirurgie*“. E-Mail-Adressen mit entsprechenden Bestandteilen wurden gelöscht. Diese Vorgehensweise sollte einen Ausschluss von Fachzahnärztinnen und Fachzahnärzten bewirken.

Insgesamt wurden auf diese Weise $n = 9446$ E-Mailadressen ermittelt.

2.3.4 Versand des Fragebogens

Ein entsprechendes Anschreiben an die Zahnärzteschaft mit dem enthaltenden Link zum Fragebogen wurde ebenso mithilfe des Befragungstools *SoSci-Survey* durchgeführt.

Hierzu wurde die zuvor in Excel erstellte Adressliste in den Verteiler importiert. Anschließend erfolgte nach Freigabe der Versand des Anschreibens inklusive des Teilnahmelinks zum Fragebogen. Da der Versand auf maximal $n = 5000$ E-Mails täglich durch die Software limitiert war, erfolgte der Versand an drei aufeinanderfolgenden Werktagen.

Das Befragungsprojekt war im Zeitraum vom 16.02.2021 bis zum 16.04.2021 über den Teilnahmelink aufrufbar.

Die Ergebnisse der Befragung konnten als Datensatz heruntergeladen werden und der weiteren statistischen Auswertung zugänglich gemacht werden.

2.3.5 Statistische Analytik

Die statistische Analyse wurde unter Anleitung von Jakob Smigierski (M. Sc. Statistik) und kontinuierlichem Austausch zwischen Frau Dr. Diedrichs und David Büscher durchgeführt. Als Statistiksoftware wurde *IBM SPSS Statistics Version 27* (IBM, New York, USA) genutzt.

Die *Excel*-Datensätze aus der Laborauswertung wurden in *SPSS* importiert.

Im Rahmen der deskriptiven Statistik wurden für die metrischen Variablen der gemessenen Präparationsbreiten und Winkel Mittelwerte, Mediane, Standardabweichungen, Spannweiten, Korrelation sowie Maximal- und Minimalwerte berechnet.

Zur Ermittlung der Korrelation zwischen zwei ordinal skalierten Variablen wurde der Korrelationskoeffizient nach Spearman genutzt. So wurde für die Fragebogenauswertung die Stärke des Zusammenhangs zwischen den Variablen „Zeit pro präpariertem Zahn“ und „Tätigkeitsdauer“, „Bevorzugter Präparationswinkel“ und „Tätigkeitsdauer“ sowie „Nutzung von 3D-Scan-Verfahren“ und „Tätigkeitsdauer“ mithilfe dieses Effektmaßes quantifiziert.

Die Interferenzstatistik erfolgte zum Signifikanzniveau von $p < 0,05$. Es wurden hierbei nicht-parametrische Tests angewendet. Nicht-parametrische Verfahren treffen „keine Aussagen über einzelne Parameter der Grundgesamtheitsverteilung“ (Büning und Trenkler 2013), sondern bewerten unter bestimmten Grundannahmen Aussagen oder Hypothesen.

Es kamen der Binomialtest, Chi-Quadrat-Test, Kruskal-Wallis-Test mit anschließendem Dunn-Test, Mann-Whitney-U-Test und Wilcoxon-Vorzeichen-Test zur Anwendung.

Zum „Vergleich eines Anteils mit einem festen Wert“ innerhalb einer Stichprobe wurde der nicht-parametrische Binomialtest verwendet (Hilgers et al. 2019). Auf diese Weise wurden statistisch signifikante Unterschiede der berücksichtigten Versorgungsformen K, M, VK und VM im Hinblick auf die relativen Häufigkeiten der Hauptpräparationsformen sowie Unterschiede der ermittelten Parameter Präparationsform und Präparationswinkel im direkten Vergleich zwischen Labor- und Fragebogenauswertung ermittelt. Ebenso konnte so die Repräsentativität des Fragebogens bezüglich der Geschlechterverteilung abgeschätzt werden.

Um den Zusammenhang zwischen kategoriellen Variablen zu testen, wurde der Chi²-Unabhängigkeitstest genutzt. So wurden folgende Zusammenhänge zwischen Variablen auf statistische Signifikanz geprüft: Lage des Zahnes im Front- oder Seitenzahnggebiet und

Vorliegen einer Tangentialpräparation, Vorliegen unter sich gehender Bereiche und Lage des Zahnes, Präparationsform und Versorgungsform sowie Geschlecht und Benutzung von CAD/CAM-Verfahren. Ferner wurden das Frageitem zum bevorzugten genutzten Auswahlverfahren der Präparationsinstrumente auf diese Weise auf statistisch signifikante Unterschiede in der Häufigkeitsverteilung der einzelnen Antwortkategorien untersucht.

Signifikante Unterschiede zwischen nominal verteilten Variablen mit binärem Ausprägungsmuster und ordinal verteilten Variablen wurden mithilfe des nicht-parametrischen Mann-Whitney-U-Tests ermittelt. Innerhalb der Fragebogenauswertung wurden so geschlechterspezifische Unterschiede im Hinblick auf den Präparationswinkel und Präparationsdauer untersucht. Ebenso wurden statistisch signifikante Unterschiede zwischen Präparationswinkel und der Versorgungsform sowie Tätigkeitsdauer und Abformverfahren respektive Nutzung von CAD/CAM geprüft. Der Test eignete sich ebenso zum Vergleich metrisch skaliertes, nicht normalverteilter Variablen zwischen zwei Gruppen. Die Versorgungsarten Krone und Brücke wurden diesbezüglich auf statistisch signifikante Unterschiede bezüglich der Parameter Abstand zum Antagonisten, Präparationsbreite und Konvergenzwinkel hin geprüft. Außerdem wurden Front- und Seitenzähne auf Unterschiede in der Präparationsbreite, die vier Versorgungsformen auf Unterschiede bezüglich des Konvergenzwinkels und die Präparationsformen Hohlkehle und Stufe auf Differenzen bezüglich der gemessenen Öffnungswinkel hin untersucht.

Der Einstichproben-Wilcoxon-Test dient dem Vergleich einer metrisch nicht normalverteilten Variable mit einem bestimmten Referenzwert. Die Parameter interokklusaler Abstand, Präparationsbreite, Konvergenz- und Öffnungswinkel wurde auf diese Weise mit den Literatur- und Herstellerangaben auf statistisch signifikante Abweichungen hin überprüft.

Mithilfe des Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtests lassen sich zwei abhängige Stichproben auf die Verteilung bestimmter Merkmale hin überprüfen (Hilgers et al. 2019). Die absoluten Häufigkeiten der Ausprägungen der nominal skalierten Variable „Abformmethode“ wurden so auf statistische signifikante Unterschiede hin geprüft. Ferner wurden statistisch signifikante Unterschiede in der Größe des Konvergenzwinkel in Abhängigkeit von der Lage des Zahnes ermittelt.

Mithilfe des Kruskal-Wallis-Tests lassen sich „die Unterschiede zwischen drei oder mehr unabhängig voneinander untersuchten Gruppen an einer einzelnen, nicht normalverteilten kontinuierlichen Variable bewerte[n]“ (McKight und Najab 2010). Folgende Zusammenhänge ließen sich auf diese Weise auf statistische Signifikanz prüfen: Nutzung von 3D-Scan-Verfahren als Abformmethode und bevorzugte Lage der Präparationsgrenze sowie Unterschiede der Präparationsbreiten, Konvergenzwinkel und Öffnungswinkel abhängig von der Versorgungsform oder der betrachteten Zahnfläche. Im Falle eines signifikanten Unterschiedes wurde anschließend der paarweise Vergleich mithilfe des Dunn-Tests vorgenommen.

3 Ergebnisse

3.1 Analyse der Laborauswertung

3.1.1 Eigenschaften der Stichprobe

Auswertungszeitraum

Die benötigten Scans wurden im Zeitintervall von Februar 2018 bis Dezember 2020 rekrutiert. Unter Berücksichtigung der Einschlusskriterien ergab sich ein maximaler Zeitraum von Februar 2015 bis Dezember 2020 für das Konstruktionsdatum der zugrundeliegenden laborseitigen Arbeitsaufträge.

Gesamtverteilungen

In die Laborauswertung flossen insgesamt $n = 1002$ digitalisierte Kronenpräparationen ein. Diese wurden aus fünf unterschiedlichen Dentallaboren akquiriert.

Die Gesamtzahl der Scans teilte sich in $n = 525$ Präparationen für festsitzende Einzelkronen und $n = 477$ Präparationen für festsitzende Brückenversorgungen auf. Hierbei stellte sich die Aufteilung der ausgewerteten Präparationen auf die Zähne wie in Abb. 16 ersichtlich dar:

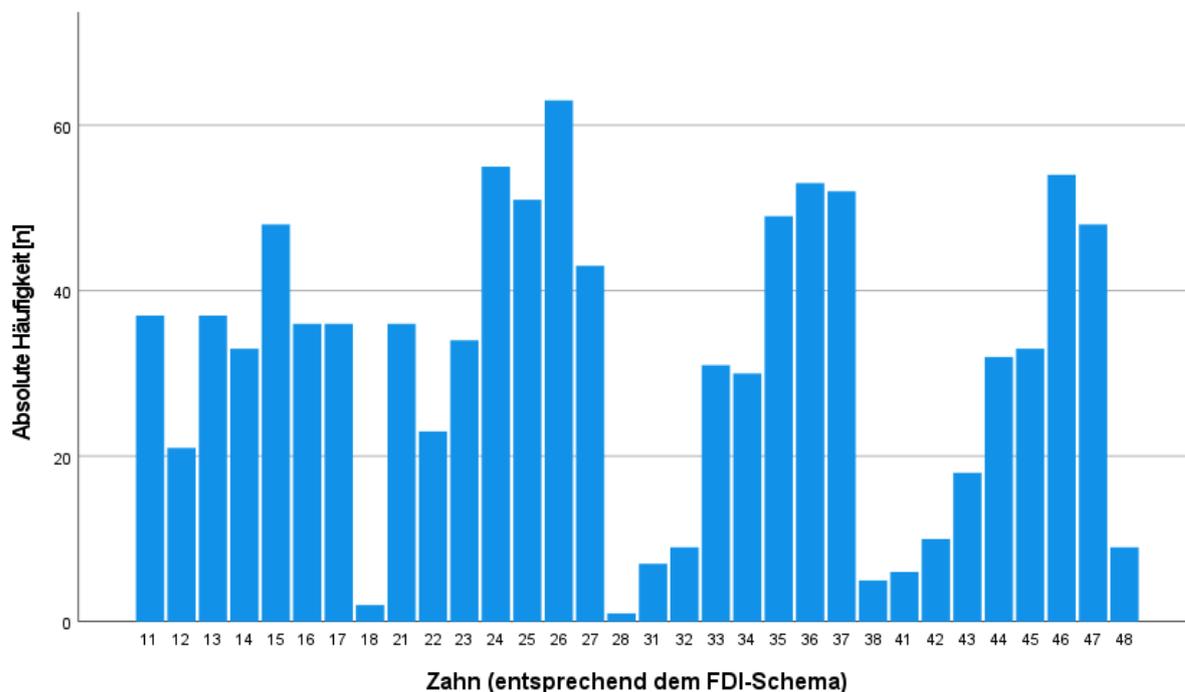


Abb. 16: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Aufteilung der ausgewerteten Präparationen auf die einzelnen Zähne ($n = 1002$)

Demnach entfiel ein vergleichsweise hoher Anteil der zufällig ausgewählten Zähne auf den Bereich der Prämolaren und Molaren. Am häufigsten wurde Zahn 26 ausgewertet. Untere Frontzähne sowie Weisheitszähne wurden relativ selten ausgewertet.

Die Aufteilung der Präparationen auf die jeweilige Versorgungsform wird in Abb. 17 dargestellt:

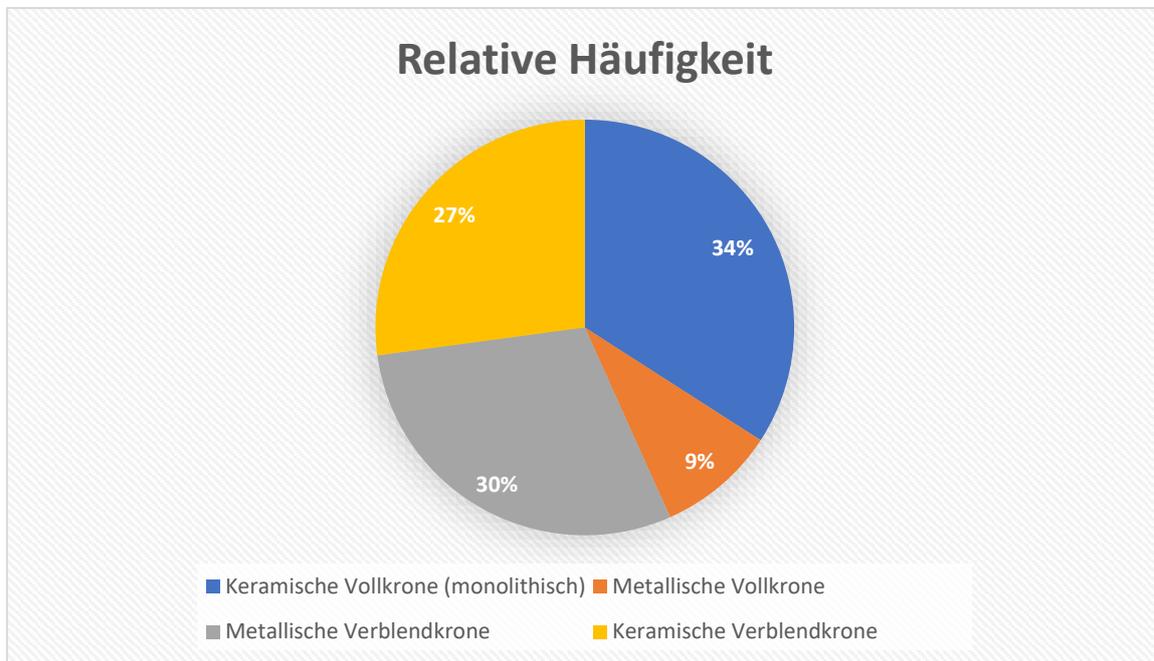


Abb. 17: **Deskriptive Statistik (Kreisdiagramm) – Aufteilung der ausgewerteten Präparationen auf die berücksichtigten Versorgungsformen** (n = 1002)

Mit einem Anteil von 34,1 % wurden Vollkeramikrestaurationen am häufigsten berücksichtigt. Verblendete Versorgungsformen machten zusammengerechnet einen Anteil von 56,6 % aus. Mit 9,3 % kamen Metallrestaurationen eher selten vor.

3.1.2 Präparationsform

Bei unterschiedlicher Präparationsform an den acht auszuwertenden Zahnflächen je Zahn, wurde die Form, welche an der überwiegenden Anzahl von Zahnflächen vorkam, als dominierende Präparationsform gewählt. Für den Fall, dass keine alleinig dominierende Präparationsform vorlag, wurden mehrere Präparationsformen für diesen Zahn gewertet.

Bei Betrachtung aller ausgewerteten Präparationen war in 59,0 % der Fälle die Hohlkehle dominierende Präparationsform. In 40,1 % lag eine Tangentialpräparation vor. Eine Stufenpräparation lag nur bei 0,9 % aller Fälle als Hauptpräparationsform vor.

Insgesamt konnte die Hohlkehle an $n = 4411$ Zahnflächen festgestellt werden. 5,8 % dieser Hohlkehlen wiesen einen kantigen Übergang im Bereich der Präparationsgrenze auf. 0,3 % wurden dachrinnenförmig präpariert (s. Abb. 1). $n = 232$ ausgewertete Zahnflächen wurden als Stufe präpariert. Davon wurden 7,3 % ($n = 17$) mit einem abgeschrägten Rand versehen. $n = 3373$ präparierte Zahnflächen wiesen ein tangentiales Randdesign auf.

Differenziert man die Präparationsformen nach der Versorgungsform, so stellt sich die Verteilung wie in Abb. 18 ersichtlich dar. Für die Versorgungsformen keramische Vollkrone, keramische Verblendkrone und metallische Verblendkrone wurde die Hohlkehle als Hauptpräparationsform mit relativen Häufigkeiten zwischen 54,3 % und 65,0 % jeweils am häufigsten verwendet. Für metallische Vollkronen hingegen wurde die Tangentialpräparation mit 2,0 Prozentpunkten Differenz zur Hohlkehelpräparation am häufigsten benutzt. Die Stufe kam als Hauptpräparationsform nur sehr selten vor. Im Vergleich hierzu konnte sie mit 1,4 % am häufigsten bei VK Restaurationen festgestellt werden.

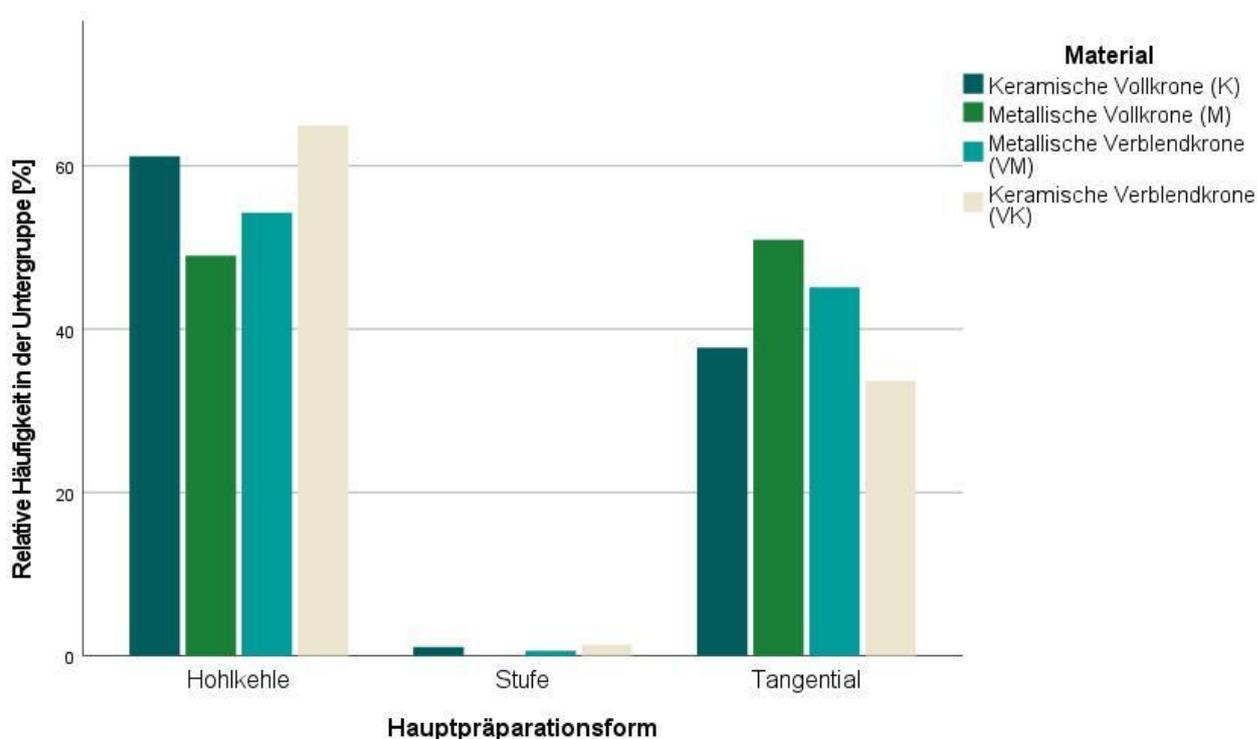


Abb. 18: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Relative Häufigkeitsverteilung der Hauptpräparationsformen bei unterschiedlichen Materialgruppen ($n = 1095$)

Um zu testen, ob die Präparationsformen Hohlkehle oder Stufe bei den untersuchten Versorgungsformen signifikant häufiger oder seltener gebraucht wurden als die Tangentialpräparation, wurde der Binomialtest verwendet.

Für keramische Vollkronen zeigte sich, dass die Hohlkehle als Präparationsform signifikant häufiger benutzt wurde als die Tangentialpräparation ($p = 0,001$). Die Stufenpräparation wurde signifikant seltener angewendet als die Tangentialpräparation ($p \leq 0,001$). 60,3 % der für die spätere Versorgung mit einer keramischen Vollkrone vorgesehenen ausgewerteten präparierten Zahnflächen ($n = 2736$) wiesen eine Hohlkehle oder Stufe als Präparationsform auf, 39,7 % wiesen tangential präparierte Zahnflächen auf. $N = 25$ (7,3 %) der $n = 342$ Präparationen für keramische Vollkronen wurden an allen acht ausgewerteten Zahnflächen rein tangential präpariert.

Für metallische Verblendkronen wurde die Hohlkehlpäparation nicht signifikant häufiger verwendet als die Tangentialpräparation ($p = 0,907$). Die Stufenpräparation wurde signifikant seltener genutzt als die Tangentialpräparation ($p \leq 0,001$). 53,3 % der für metallische Verblendkronen präparierten Zahnflächen ($n = 2368$) wiesen innerhalb der Studie ein hohlkehle- oder stufenförmiges Randdesign auf. 46,7 % wiesen Tangentialpräparationen auf, wobei $n = 38$ (12,8 %) der $n = 296$ Metallkeramikrestaurationen rein tangential präpariert wurden.

Für keramische Verblendkronen wurde die Präparationsform der Hohlkehle signifikant häufiger verwendet als die Tangentialpräparation ($p \leq 0,001$). Die Stufenpräparation wurde signifikant seltener verwendet als die Tangentialpräparation ($p \leq 0,001$). 63 % aller für diese Versorgungsform präparierten Zahnflächen ($n = 2176$) wurden als Hohlkehle oder Stufe klassifiziert, 37 % als Tangentialpräparation. Hierbei wurden $n = 21$ (7,7 %) der $n = 272$ VK Versorgungen rein tangential präpariert.

Fasst man die drei keramischen Materialgruppen K, VK und VM zusammen, so wiesen 41,2 % der für keramische Versorgungen präparierten Zahnflächen ($n = 7280$) ein tangentiales Randdesign auf. Bei 39,0 % ($n = 910$) der ausgewerteten keramischen Präparationen zeigte sich die Tangentialpräparation als Hauptpräparationsform. 82,4 % dieser Präparationen wiesen an mindestens einer berücksichtigten Zahnfläche eine Tangentialpräparation auf und 9,2 % ($n = 910$) an allen acht ausgewerteten Zahnflächen.

Zur Klärung der Frage, ob für reine Metallversorgungungen gleich häufig Hohlkehle- und Tangentialpräparationen ermittelt wurden, wurde ebenfalls der Binomialtest verwendet. Der Test ergab einen p-Wert von $p = 0,211$. Demnach bestand bei Metallversorgungungen kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Häufigkeit von Tangential- oder Hohlkehlpäparationen. 49,3 % der für reine Metallversorgungungen präparierten Zahnflächen ($n = 736$) zeigten ein hohlkehle- oder stufenförmiges Randdesign. 50,7 % wiesen eine Tangentialpräparation auf. Von den $n = 92$ ausgewerteten metallischen Restaurationen wiesen $n = 12$ (11,0 %) reine Tangentialpräparationen auf.

Abb. 19 zeigt die relative Häufigkeitsverteilung der drei Präparationsformen in Abhängigkeit von der Lage des Zahnes im Front- oder Seitenzahnggebiet. Die Hohlkehle wurde im Frontzahnggebiet in 69,1 % der Fälle als Hauptpräparationsform festgestellt. Im Seitenzahnggebiet wurde diese Form der Präparation in nur 55,4 % der Fälle angewandt. Die Tangentialpräparation hingegen wurde im Frontzahnggebiet mit 30,2 % und im Seitenzahnggebiet mit einem Anteil von 43,6 % festgestellt.

Daher wurde geprüft, ob die Tangentialpräparation statistisch signifikant häufiger im Seitenzahn- als im Frontzahnggebiet beobachtet werden konnte. Der Chi²-Unabhängigkeitstest ergab hierzu einen p-Wert von $p \leq 0,001$. Folglich bestand ein signifikanter Unterschied zwischen Front- und Seitenzahnggebiet, wobei im Seitenzahnggebiet signifikant häufiger tangential präpariert wurde als im Frontzahnggebiet.

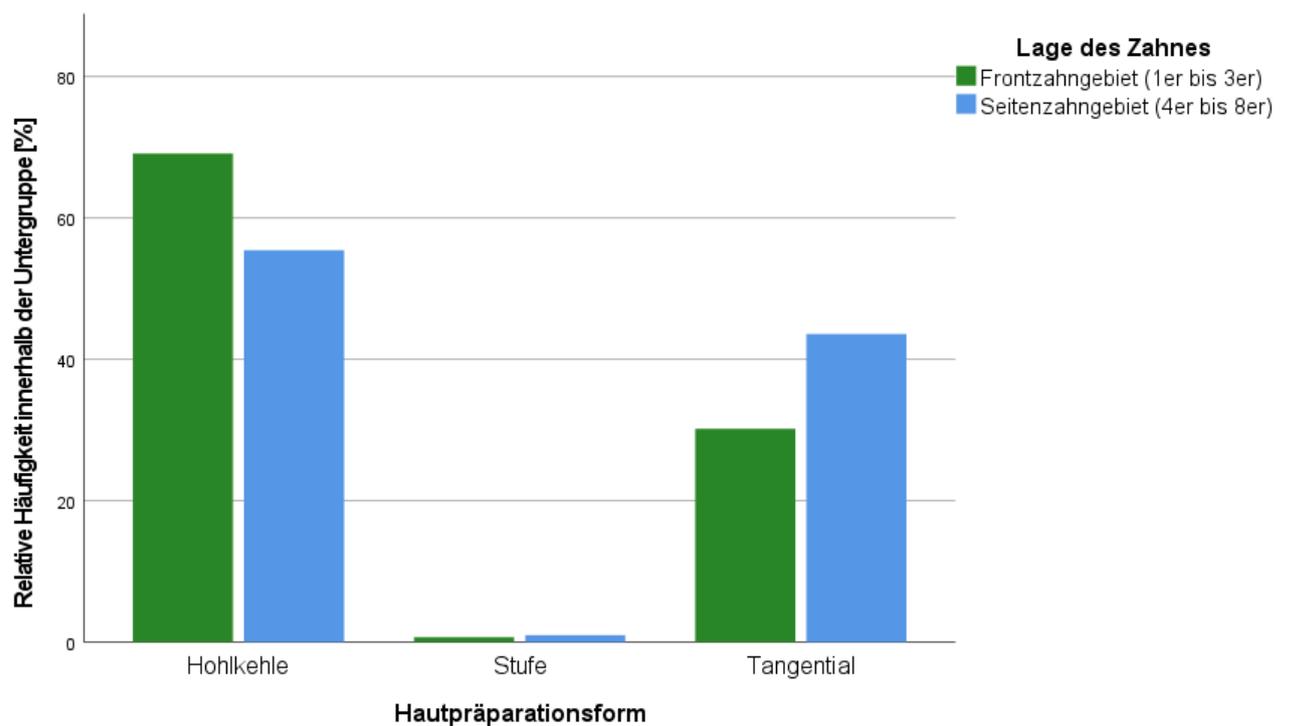


Abb. 19: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Relative Häufigkeiten der Präparationsformen gruppiert nach Front- und Seitenzahnggebiet (n = 1002)

3.1.3 Präparationsbreite

Unterschiede zwischen den Versorgungsarten

Zunächst wurden die Versorgungsarten Krone und Brücke auf Unterschiede im Hinblick auf die Variablen okklusaler Abstand, Präparationsbreite sowie Konvergenzwinkel mithilfe des Mann-Whitney-U-Tests untersucht.

Hierbei resultierte, dass sich der Abstand zum Antagonisten und die Präparationsbreite nicht signifikant zwischen Kronen- und Brückenversorgungen unterschieden. Beim Konvergenzwinkel hingegen konnte ein signifikanter Unterschied konstatiert werden.

Im Folgenden wurden daher bei der Analyse des Abstandes zum Antagonisten und der Präparationsbreite Kronen und Brücken als eine Grundgesamtheit betrachtet, wohingegen die Analyse des Konvergenzwinkels getrennt nach Krone und Brücke erfolgte.

Präparationsbreite differenziert nach Zahnfläche

Für die Analyse der Hohlkehl- und Stufenbreite wurden $n = 906$ Zähne herangezogen, die an mindestens einer Zahnfläche eine entsprechende Präparationsform aufwiesen. Die durchschnittliche Präparationsbreite betrug hierbei $0,54$ mm, wobei das Minimum bei $0,15$ mm und das Maximum bei $4,08$ mm lagen. Unter Berücksichtigung der Standardabweichung von $0,23$ mm befanden sich ein Großteil der Präparationen im Bereich zwischen $0,31$ mm und $0,77$ mm.

Die Boxplots in Abb. 20 veranschaulichen die Präparationsbreiten der gemessenen Hohlkehl- und Stufenbreiten abhängig von der Zahnfläche.

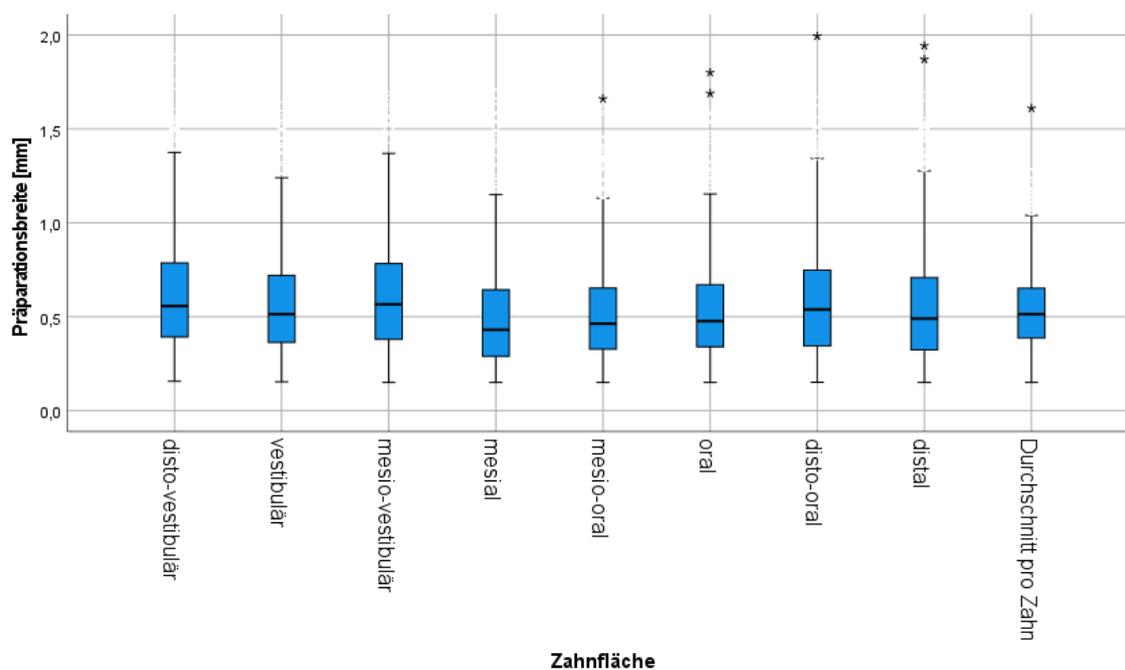


Abb. 20: Deskriptive Statistik (Boxplot) – Hohlkehl- und Stufenbreite unterteilt nach Zahnfläche ($n = 906$)

Tabelle 8 liefert hierzu ergänzend den Mittelwert, Median und die Standardabweichung. Demnach wies die mesiale Zahnfläche mit einem Median von 0,43 mm und einem Mittelwert von 0,50 mm die geringste durchschnittliche Präparationsbreite auf. Die höchsten durchschnittlichen Werte wiesen die mesio-vestibuläre Zahnfläche mit einem Median von 0,57 mm und einem Mittelwert von 0,61 mm sowie die disto-vestibuläre Zahnfläche mit einem Mittelwert von 0,62 mm und einem Median vom 0,56 mm auf.

Tabelle 8: Deskriptive Statistik – Mittelwert, Median und Standardabweichung der Präparationsbreite untergliedert nach Zahnfläche

Zahnfläche	Mittelwert [mm]	Median [mm]	Standardabweichung [mm]
<i>disto-vestibulär</i> (n = 618)	0,62	0,56	0,31
<i>vestibulär</i> (n = 660)	0,57	0,51	0,27
<i>mesio-vestibulär</i> (n = 652)	0,61	0,57	0,30
<i>mesial</i> (n = 542)	0,50	0,43	0,28
<i>mesio-oral</i> (n = 520)	0,53	0,46	0,27
<i>oral</i> (n = 551)	0,53	0,48	0,28
<i>disto-oral</i> (n = 524)	0,59	0,54	0,31
<i>distal</i> (n = 562)	0,55	0,49	0,31

Statistisch signifikante Unterschiede der Präparationsbreite in Abhängigkeit von der betrachteten Zahnfläche, wurden mithilfe des Kruskal-Wallis-Tests untersucht. Es erfolgte hier der Vergleich einer metrischen nicht normalverteilten Variable (Präparationsbreite) zwischen acht verschiedenen Gruppen (Zahnflächen). Der p-Wert ergab sich zu $p \leq 0,001$. Folglich unterschieden sich die durchschnittlichen Präparationsbreiten signifikant zwischen den acht Zahnflächen.

Zur Differenzierung zwischen welchen konkreten Gruppen der Unterschied bestand, wurde zusätzlich ein Dunn-Test durchgeführt. Hierbei wurden die acht Zahnseiten jeweils paarweise miteinander verglichen. Das Ergebnis wird in Tabelle 9 dargestellt:

Tabelle 9: Interferenzstatistik – Präparationsbreite: Dunn-Test zum paarweisen Vergleich der Zahnflächen; signifikante Ergebnisse zum Niveau $p < 0,05$ sind farblich hervorgehoben (n = 906)

	disto- vestibulär (dv)	vestibulär (v)	mesio- vestibulär (mv)	mesial (m)	mesio- oral (mo)	oral (o)	disto- oral (do)
v	2.27 (p = 0,324)						
mv	0.38 (p = 1,000)	-1.89 (p = 0,819)					
m	6.19 (p ≤ 0,001)	3.92 (p ≤ 0,001)	5.82 (p ≤ 0,001)				
mo	4.57 (p ≤ 0,001)	2.30 (p = 0,303)	4.19 (p ≤ 0,001)	-1.63 (p = 1,000)			
o	4.09 (p = 0,001)	1.82 (p = 0,971)	3.71 (p = 0,003)	-2.11 (p = 0,492)	-0.48 (p = 1,000)		
do	1.88 (p = 0,847)	-0.39 (p = 1,000)	1.50 (p = 1,000)	-4.32 (p ≤ 0,001)	-2.69 (p = 0,100)	-2.21 (p = 0,379)	
d	3.71 (p = 0,003)	1.44 (p = 1,000)	3.33 (p = 0,012)	-2.48 (p = 0,184)	-0.85 (p = 1,000)	-0.37 (p =1,000)	1,84 (p = 0,927)

Jede Tabellenzelle stellt hierbei einen Paarvergleich dar. Der obere Wert innerhalb jeder Tabellenzelle gibt den z-Wert an. Dieser stellt eine Vorstufe zur Berechnung des p-Wertes dar und gibt die Richtung des Unterschiedes im jeweiligen Paarvergleich an. So ist bei positivem z-Wert die in der ersten Tabellenspalte stehende Zahnfläche größer. Bei negativem z-Wert hingegen ist die in der ersten Tabellenspalte stehende Zahnfläche größer. Folglich sind die Präparationsbreiten der Zahnflächen dv, v und mv signifikant größer im Vergleich mit der Zahnfläche m. Die Zahnflächen dv und mv sind signifikant größer als die Zahnflächen mo und o. Die Zahnfläche m ist signifikant kleiner als die Zahnfläche do und die Zahnflächen dv und mv sind signifikant größer als die Zahnfläche d.

Präparationsbreite der Hohlkehle und Stufe differenziert nach Versorgungsform

Abb. 21 veranschaulicht graphisch die durchschnittliche Präparationsbreite im Bereich der marginalen Präparationsgrenze unterteilt nach den einzelnen Versorgungsformen.

Die mittlere Breite der Hohlkehle oder Stufe bei vollkeramischen Restaurationen betrug 0,54 mm. Der Median lag bei 0,52 mm. Die Standardabweichung betrug 0,2 mm. 0,15 mm markieren den kleinsten gemessenen Wert und 1,26 mm den größten gemessenen Wert.

Die kleinsten Breiten wurden mit durchschnittlich 0,51 mm für metallische Vollkronen (Median = 0,51 mm; Standardabweichung = 0,21 mm; Minimum = 0,15 mm; Maximum = 1,09 mm) und metallkeramische Restaurationen (Median = 0,46 mm; Standardabweichung = 0,28 mm; Minimum = 0,18 mm; Maximum = 4,08 mm) gemessen.

Keramisch verblendete Restaurationen mit Keramikgerüst wiesen mit 0,57 mm die breiteste marginale Präparationstiefe auf (Median = 0,56 mm; Standardabweichung = 0,21 mm; Minimum = 0,15 mm; Maximum = 1,61 mm).

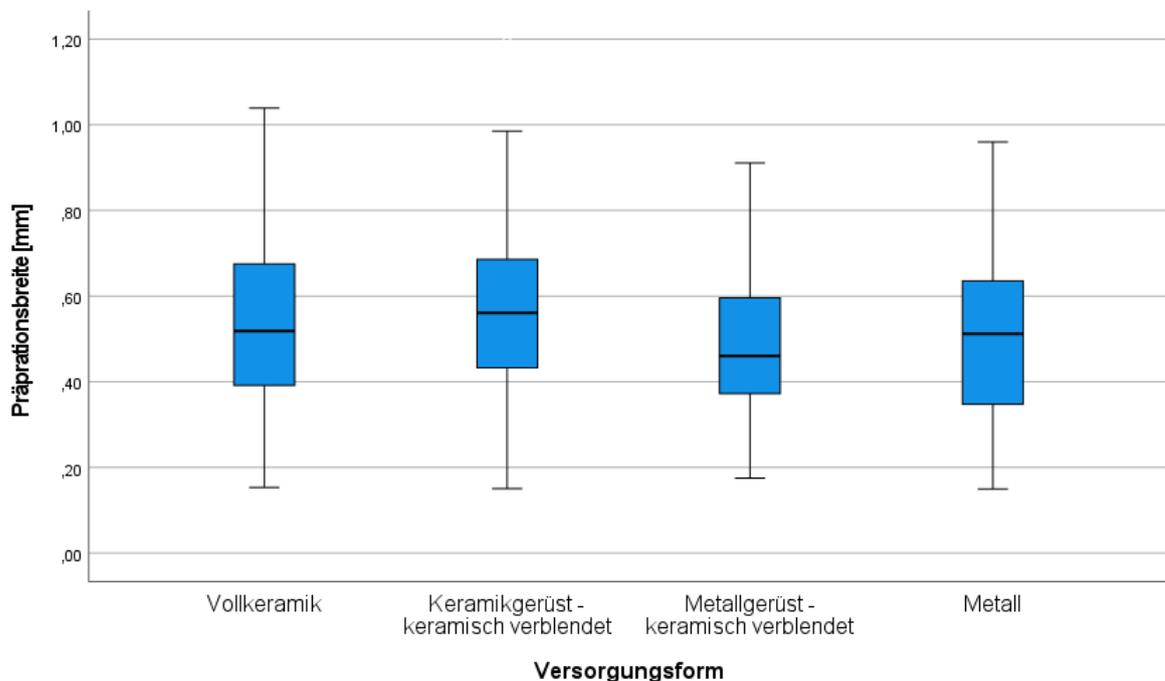


Abb. 21: Deskriptive Statistik (Boxplot) – Ermittelte Präparationsbreiten der Präparationsformen Hohlkehle und Stufe nach Versorgungsformen (n = 906)

Um zu testen, ob signifikante Unterschiede bezogen auf die Präparationsbreite zwischen den einzelnen Versorgungsformen bestanden, wurde der Kruskal-Wallis-Test verwendet. Der Test ergab einen p-Wert von $p \leq 0,001$. Die durchschnittlich ermittelte Präparationsbreite unterschied sich hochsignifikant zwischen den unterschiedlichen Materialien. Mit einem anschließenden Dunn-Test wurde ermittelt, zwischen welchen der Gruppen die signifikanten Unterschiede bestanden. Es zeigte sich hierbei, dass bei Vollkeramikrestaurationen die Präparationsbreite signifikant höher als bei Metallkeramikrestaurationen war. Bei keramisch verblendeten Restaurationen mit Keramikgerüst war die Präparationsbreite ebenfalls signifikant höher als bei Metallkeramikrestorationen.

Vergleich der ermittelten Präparationsbreite mit den Präparationsempfehlungen

Zur Klärung der Frage, inwiefern die ermittelten durchschnittlichen Präparationsbreiten statistisch signifikant von den Präparationsempfehlungen abwichen, wurde der Einstichproben-Wilcoxon-Test verwendet.

Für Vollkeramikrestaurationen (Referenzwert = 0,5 mm) ergab der Test einen p-Wert von $p = 0,003$ bei einer medianen Präparationsbreite von 0.52 mm. Die Durchschnittswerte waren signifikant höher als die Präparationsempfehlungen. Für die Versorgungsform K wiesen 52,06 % aller ausgewerteten Präparationsflächen für die Präparationsform Hohlkehle oder Stufe eine Breite $\geq 0,5$ mm auf.

Für Metallrestaurationen (Referenzwert = 0,5 mm) ergab der Test einen p-Wert von $p = 0,979$ mit einem Median von 0.51 mm. Folglich bestand hier keine signifikante Abweichung der Durchschnittswerte von den Präparationsempfehlungen. Für die Versorgungsform M wiesen 51,80 % aller ausgewerteten Präparationsflächen für die Präparationsform Hohlkehle oder Stufe eine Breite $\geq 0,5$ mm auf.

Für Metallkeramikrestaurationen (Referenzwert = 0,8 mm) resultierte ein p-Wert von $p \leq 0,001$, wobei der Median der Präparationsbreite bei 0,46 mm lag. Die Durchschnittswerte waren folglich signifikant niedriger als die Präparationsempfehlungen. Für die Versorgungsform VM wiesen 14,85 % aller ausgewerteten Präparationsflächen für die Präparationsform Hohlkehle oder Stufe eine Breite $\geq 0,8$ mm auf.

Für keramisch verblendete Restaurationen mit Keramikgerüst (Referenzwert = 1,2 mm) ergab sich ein p-Wert von $p \leq 0,001$ bei einem Median von 0,56 mm. Die Durchschnittswerte in der Stichprobe waren auch hier signifikant niedriger als die Präparationsempfehlungen. Für die Versorgungsform VK wiesen 4,02 % aller ausgewerteten Präparationsflächen für die Präparationsform Hohlkehle oder Stufe eine Breite $\geq 1,2$ mm auf.

Präparationsbreite der Hohlkehle und Stufe differenziert nach Lage der Zähne

Abb. 22 zeigt die Breite der Hohlkehle oder Stufe abhängig von der Lage des Zahnes im Front- oder im Seitenzahnggebiet. Im Frontzahnggebiet ergab die Analyse einen Mittelwert von 0,52 mm mit einem Median von 0,49 mm. Die Standardabweichung betrug 0,17 mm. Im Seitenzahnggebiet ergab sich ein Mittelwert von 0,54 mm. Der Median betrug 0,51 mm und die Standardabweichung 0,25 mm.

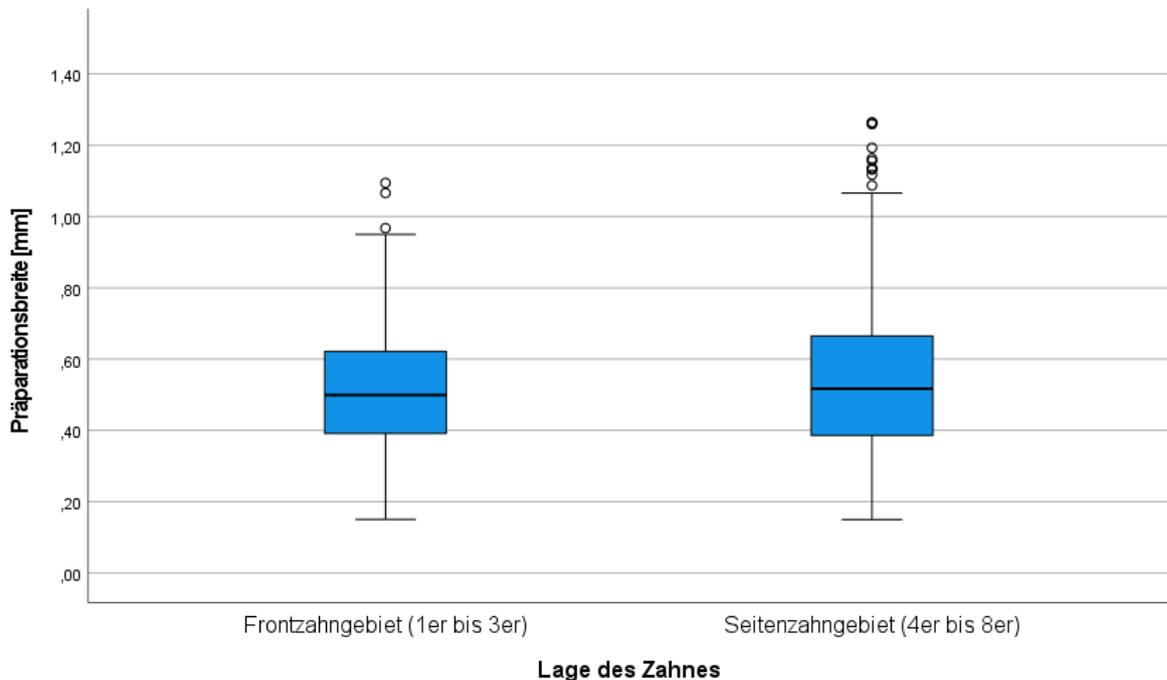


Abb. 22: Deskriptive Statistik (Boxplot) – Breite der Hohlkehle- oder Stufenpräparation unterteilt nach Lage des Zahnes im Front- oder Seitenzahnggebiet (Frontzahnggebiet n = 246; Seitenzahnggebiet n = 660)

Zur Klärung der Frage, ob ein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Präparationsbreite im Front- und Seitenzahnggebiet bestand, wurde der Mann-Whitney-U-Test verwendet. Der p-Wert ergab sich zu $p = 0,344$. Hieraus ließ sich ableiten, dass die Lage des Zahnes im Front- oder Seitenzahnbereich im Rahmen der Auswertung keinen signifikanten Einfluss auf die Präparationsbreite hatte.

3.1.4 Abstand zum Antagonisten

In die Auswertung wurden n = 799 Präparationsstümpfe einbezogen. Bei den übrigen n = 203 Fällen lag kein direkter Zahnantagonist vor. Diese Fälle wurden in der Analyse nicht berücksichtigt.

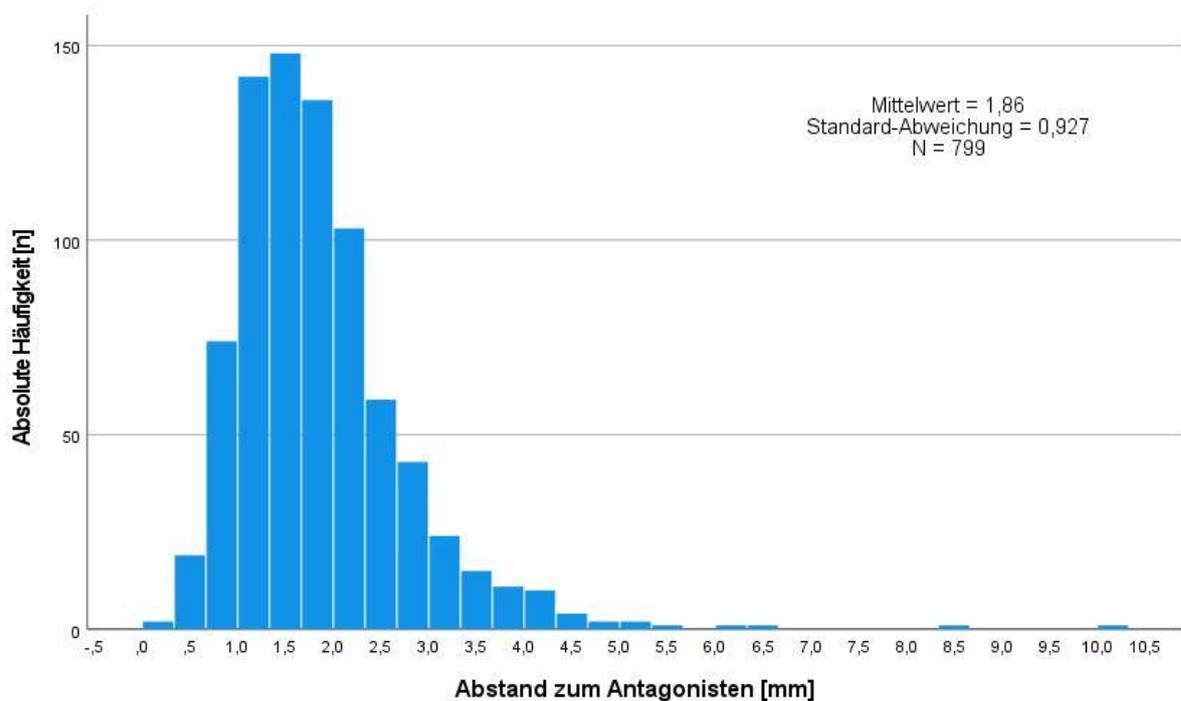


Abb. 23: **Deskriptive Statistik (Histogramm) – Häufigkeitsverteilung der gemessenen interokklusalen Abstände** (n = 799)

Abb. 23 zeigt die Häufigkeitsverteilung der gemessenen Abstände. Der Mittelwert lag bei 1,86 mm bei einer Standardabweichung von 0,93 mm. Rund 68 % der gemessenen Werte befanden sich folglich im Intervall zwischen 0,93 mm und 2,79 mm. Der Median betrug 1,69 mm.

Tabelle 10 differenziert die gemessenen Abstände zum Antagonisten innerhalb der jeweiligen Versorgungsform. Die verblendeten Versorgungen wiesen durchschnittlich größere interokklusale Abstände im Vergleich aller unverblendeten monolithischen Keramiken oder Metallrestorationen auf. Der größte Abstand wurde mit 10,0 mm bei einer Metallkeramikversorgung gemessen.

Tabelle 10: Deskriptive Statistik – Interokklusaler Abstand untergliedert nach Versorgungsform

Versorgungsform	Minimalwert [mm]	Maximalwert [mm]	Mittelwert [mm]
<i>Keramische Vollkrone (n = 314)</i>	0,44	6,46	1,73
<i>Metallische Vollkrone (n = 78)</i>	0,17	3,93	1,53
<i>Keramische Verblendkrone (n = 212)</i>	0,00	6,30	1,95
<i>Metallische Verblendkrone (n = 195)</i>	0,40	10,00	2,09

In Tabelle 11 werden die gemessenen Werte getrennt nach Front- und Seitenzahngebiet betrachtet. Im Frontzahngebiet wurden mit durchschnittlich 2,10 mm größere Abstände gegenüber dem Seitenzahngebiet mit 1,77 mm gemessen. Zudem wurde im Frontzahngebiet der größte Abstand zum Antagonisten mit 10,0 mm und der kleinste mit 0,00 mm bestimmt.

Tabelle 11: Deskriptive Statistik – Interokklusaler Abstand untergliedert nach Lage des Zahnes

Lage der Zähne	Minimalwert [mm]	Maximalwert [mm]	Mittelwert [mm]
<i>Frontzahngebiet (n = 210)</i>	0,00	10,00	2,10
<i>Seitenzahngebiet (n = 589)</i>	0,17	5,40	1,77

Vergleich mit den Präparationsempfehlungen

Im Folgenden wurden die ermittelten Durchschnittswerte mit den gängigen Präparationsempfehlungen verglichen. Auch hier wurde zur Signifikanztestung der Einstichproben-Wilcoxon-Test verwendet.

Für keramische sowie metallische Vollkronen wurden die erhobenen Werte mit dem Referenzwert 1,0 mm verglichen. Der Test ergab für Vollkeramikversorgungen einen p-Wert von $p \leq 0,001$, wobei der Abstand zum Antagonisten im Median 1,54 mm betrug. 89,2 % der Präparationen für Vollkeramikrestaurationen wiesen einen okklusalen Abstand von $\geq 1,0$ mm auf.

Für rein metallische Versorgungen resultierte ein p-Wert von $p \leq 0,001$, wobei der Abstand zum Antagonisten im Median 1,55 mm betrug. Anteilsmäßig lagen 78,2 % der metallischen Restaurationen bei einem Abstand von $\geq 1,0$ mm.

Für verblendete Restaurationen wurden die erhobenen Werte mit dem Referenzwert 1,5 mm verglichen. Hierbei ergab der Test für keramisch verblendete Metallversorgungen einen p-Wert von $p \leq 0,001$ mit einem Median von 1,98 mm. Anteilsmäßig wiesen 68,2 % der Präparationen einen Abstand $\geq 1,5$ mm auf.

Für keramisch verblendete Keramikversorgungen ergab der Test ebenfalls einen p-Wert von $p \leq 0,001$, wobei der Median bei 1,80 mm lag. Hier betrug der Anteil von Präparationen, welche eine Breite $\geq 1,5$ mm aufwiesen, 67,5 %.

Zusammenfassend lässt sich also festhalten, dass für jede Versorgungsform die gemessenen Werte signifikant höher lagen als die vorgegebenen Mindestwerte.

3.1.5 Konvergenzwinkel

Da es sich bei Präparationswinkeln $< 0^\circ$ - also divergierend verlaufenden Zahnflächen - um fehlerhaft präparierte Zähne handelte, wurden die entsprechenden Zahnflächen in der weiteren Analyse bezüglich des Konvergenzwinkels nicht weiter berücksichtigt. Tabelle 12 stellt die Gesamtanzahl von $n = 112$ Fällen mit negativem Präparationswinkel - sortiert nach der Lage des Zahnes - dar. Demnach kamen negative Präparationswinkel vermehrt im Seitenzahnggebiet vor. Es zeigte sich dort eine Häufung vor allem im oralen, mesialen und distalen Bereich. Die geringste Anzahl an negativen Präparationen innerhalb der betrachteten Gruppe fand sich sowohl im Front- als auch im Seitenzahnggebiet an den vestibulären Zahnflächen.

Tabelle 12: **Deskriptive Statistik – Anzahl von Präparationswinkeln $< 0^\circ$ unterteilt nach Zahnfläche und Lage des Zahnes** ($n = 112$)

Zahnfläche	Frontzahnggebiet (1er bis 3er)	Seitenzahnggebiet (4er bis 8er)
<i>vestibulär</i>	1	7
<i>oral</i>	9	35
<i>mesial</i>	5	31
<i>distal</i>	4	20

Insgesamt $n = 36$ Zähne wurden parallel präpariert. Beide gegenüberliegende Präparationswinkel wurden hierbei mit einem Winkel von 0° gemessen. $N = 12$ der parallel präparierten Zähne lagen im Front- und $n = 24$ Zähne im Seitenzahnggebiet. Auch diese Fälle wurden für die weitere Analyse ausgeschlossen, da keine Konvergenz der einander gegenüberliegenden Flächen vorlag.

Weitere $n = 5$ Fälle wurden ausgeschlossen, weil sie stark abweichende Werte von größer als 90° aufwiesen und auf fehlerhafte Listeneinträge zurückzuführen waren.

Unter oben genannten Ausschlusskriterien blieben für die vestibulo-orale Analyse des KW $n = 940$ gültige Präparationen übrig, respektive $n = 912$ gültige Präparationen für die Auswertung des KW in mesio-distaler Dimension.

Der KW in vestibulo-oraler Dimension betrug insgesamt durchschnittlich $25,73^\circ$ ($SD = 12,30^\circ$). Das Minimum lag bei $1,80^\circ$ und das Maximum bei $78,90^\circ$. Der Median betrug $23,85^\circ$.

In mesio-distaler Dimension wurden mit $23,56^\circ$ durchschnittlich ein etwas kleinerer KW gemessen ($SD = 14,24^\circ$). Das Minimum lag bei $1,20^\circ$ und das Maximum bei $81,30^\circ$. Der Median betrug $20,10^\circ$.

Abb. 24 stellt unter Ausschluss der oben genannten Fälle die Verteilung der gemessenen Konvergenzwinkel in vestibulo-oraler Dimension dar. Hierbei wurde sowohl zwischen der Versorgungsform als auch der Lage des präparierten Zahnes unterschieden.

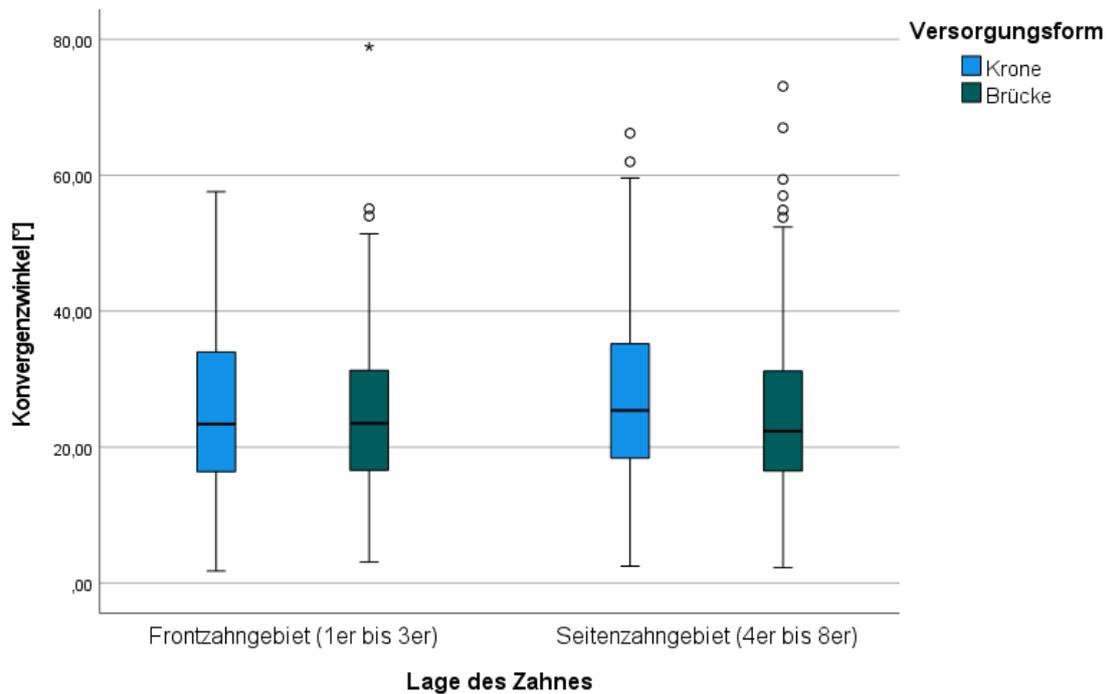


Abb. 24: Deskriptive Statistik (Boxplot) – KW in vestibulo-oraler Dimension für n = 940 Kronen und Brückenanker getrennt nach Front- und Seitenzahnbereich (unter Ausschluss von negativen Präparationswinkeln und parallel präparierten Zähnen)

Tabelle 13 enthält ergänzend die deskriptive Statistik. Demnach bestand mit einer Mittelwertdifferenz von 2,62° der größte Unterschied zwischen Kronen und Brücken im Seitenzahngebiet. Den kleinsten durchschnittlichen KW wiesen Brücken im Seitenzahngebiet mit 24,52° auf. Der größte KW wurde bei Kronen im Seitenzahngebiet mit 27,14° dokumentiert.

Tabelle 13: Deskriptive Statistik – Konvergenzwinkel in vestibulo-oraler Dimension (n = 940)

Lage / Versorgungsform		Mittelwert [°]	Median [°]	Standardabweichung [°]
Frontzahngebiet	Krone	25,15	23,30	12,45
	Brücke	24,95	23,50	12,07
Seitenzahngebiet	Krone	27,14	25,40	12,68
	Brücke	24,52	22,35	11,73

Analog hierzu erfolgte die Analyse des KW in mesio-distaler Dimension. Dies wird in Abb. 25 veranschaulicht.

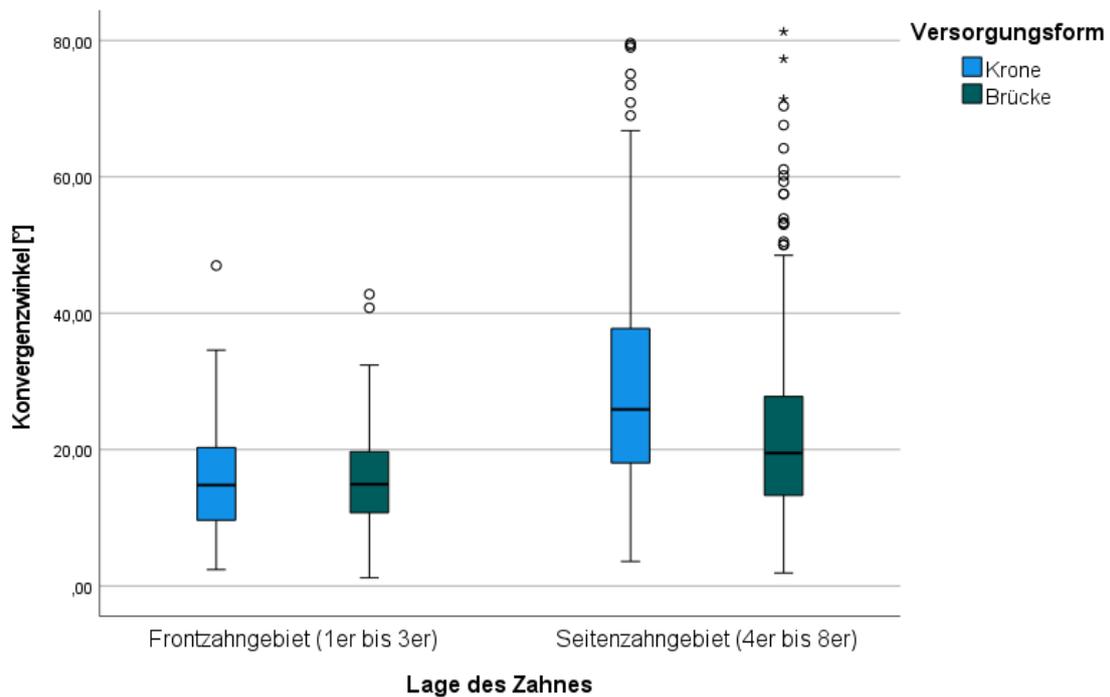


Abb. 25: Deskriptive Statistik (Boxplot) – KW in mesio-distaler Dimension für n = 912 Kronen und Brückenanker getrennt nach Front- und Seitenzahnbereich (unter Ausschluss von negativen Präparationswinkeln und parallel präparierten Zähnen)

Tabelle 14 ist hierzu ergänzend zu entnehmen, dass der größte durchschnittliche KW in mesio-distaler Dimension mit 29,40° bei Kronen im Seitenzahnggebiet bestand. Brücken im Seitenzahnbereich wiesen durchschnittlich mit 22,71° einen kleineren KW auf. Auch hier besteht mit einer Mittelwertdifferenz von 6,69° der größte Unterschied zwischen Kronen und Brücken im Seitenzahnggebiet. Im Frontzahnbereich wurden gegenüber dem Seitenzahnbereich hingegen durchschnittlich kleinere KW gemessen. Den kleinsten KW wiesen Brücken im Frontzahnbereich mit 15,59° auf, während Kronen im Frontzahnbereich mit 15,87° einen nahezu gleich großen KW zeigten.

Tabelle 14: Deskriptive Statistik – Konvergenzwinkel in mesio-distaler Dimension (n = 912)

Lage / Versorgungsform		Mittelwert [°]	Median [°]	Standardabweichung [°]
Frontzahnggebiet	Krone	15,87	14,70	8,29
	Brücke	15,59	14,90	7,57
Seitenzahnggebiet	Krone	29,40	25,90	15,64
	Brücke	22,71	19,45	13,73

Vergleicht man die gemessenen KW in vestibulo-oraler und in mesio-distaler Dimension miteinander, so ist festzustellen, dass gerade im Frontzahnbereich in mesio-distaler Dimension kleinere KW gemessen wurden. Die durchschnittlichen KW unterschieden sich hier um 7 bis 14° von den übrigen KW.

Um zu prüfen, ob dieser Unterschied signifikant ist, wurde der Wilcoxon-Test angewendet. Dieser wurde getrennt für Kronen und Brücken vorgenommen. Sowohl für Kronen- als auch Brückenversorgungen lieferte der Test ein signifikantes Ergebnis ($p \leq 0,001$). Es lag also für beide Versorgungsformen ein signifikanter Unterschied vor. So war der KW in mesio-distaler Dimension im Frontzahngebiet signifikant kleiner als in vestibulo-oraler Dimension. Dies galt ebenso für den Vergleich des KW in mesio-distaler Dimension zwischen Front- und Seitenzahngebiet. Auch hier ergab sich zum Signifikanzniveau von $p \leq 0,001$ ein signifikanter Unterschied, derart dass bei Kronen und Brücken im Frontzahnbereich durchschnittlich ein kleinerer KW gemessen wurde im Vergleich zum Seitenzahnbereich.

Konvergenzwinkel differenziert nach Versorgungsform

Tabelle 15 stellt die deskriptive Statistik zur Analyse des Konvergenzwinkels in Abhängigkeit von Material und Versorgungsform dar. Die gemessenen Durchschnittswerte variierten in einer Spanne zwischen minimal 18,57° für keramisch verblendete Brückenversorgungen mit Metallgerüst und maximal 31,39° für rein metallische Kronenversorgungen. Mit Ausnahme von keramisch verblendeten Restaurationen mit Metallgerüst wurden über alle Auswertungen hinweg konischere Konvergenzwinkel bei Kronenversorgungen im Vergleich zu Brückenversorgungen gemessen. Die Differenz schwankte zwischen minimal 1,19° bei keramisch verblendeten Restaurationen mit Keramikgerüst und maximal 6,63° bei metallischen Restaurationen.

Tabelle 15: Deskriptive Statistik – Konvergenzwinkel differenziert nach Material und Versorgungsart

Dimension	Material / Versorgungsform		Mittelwert [°]	Median [°]	Standardabweichung [°]
vestibulo-oral (n = 940)	K	Krone	27,95	25,20	13,00
		Brücke	26,24	23,25	11,72
	VK	Krone	25,01	24,20	11,64
		Brücke	23,82	20,90	11,83
	VM	Krone	23,65	21,80	11,94
		Brücke	24,13	22,50	12,12
	M	Krone	30,12	28,10	12,88
		Brücke	27,77	30,20	9,63
mesio-distal (n = 912)	K	Krone	29,34	25,90	15,43
		Brücke	22,77	19,45	14,21
	VK	Krone	23,61	20,60	14,55
		Brücke	19,98	16,90	12,18
	VM	Krone	20,09	17,60	12,48
		Brücke	18,57	16,15	11,68
	M	Krone	31,39	27,10	17,05
		Brücke	24,76	25,35	10,45

Legende 1: K = Keramische Vollkronen | M = Metallische Vollkronen | VK = Keramische Verblendkronen | VM = Metallische Verblendkronen

Zur Untersuchung, ob es sich hierbei um signifikante Unterschiede handelte, wurde der Mann-Whitney-U-Test vorgenommen.

Für den vestibulo-orale KW resultierte ein p-Wert von $p = 0,009$. Die beiden Versorgungsarten unterschieden sich folglich signifikant hinsichtlich des KW in vestibulo-orale Dimension, dahingehend dass der KW bei Kronen signifikant größer war als bei Brücken. Gleiches galt für den mesio-distale KW ($p \leq 0,001$).

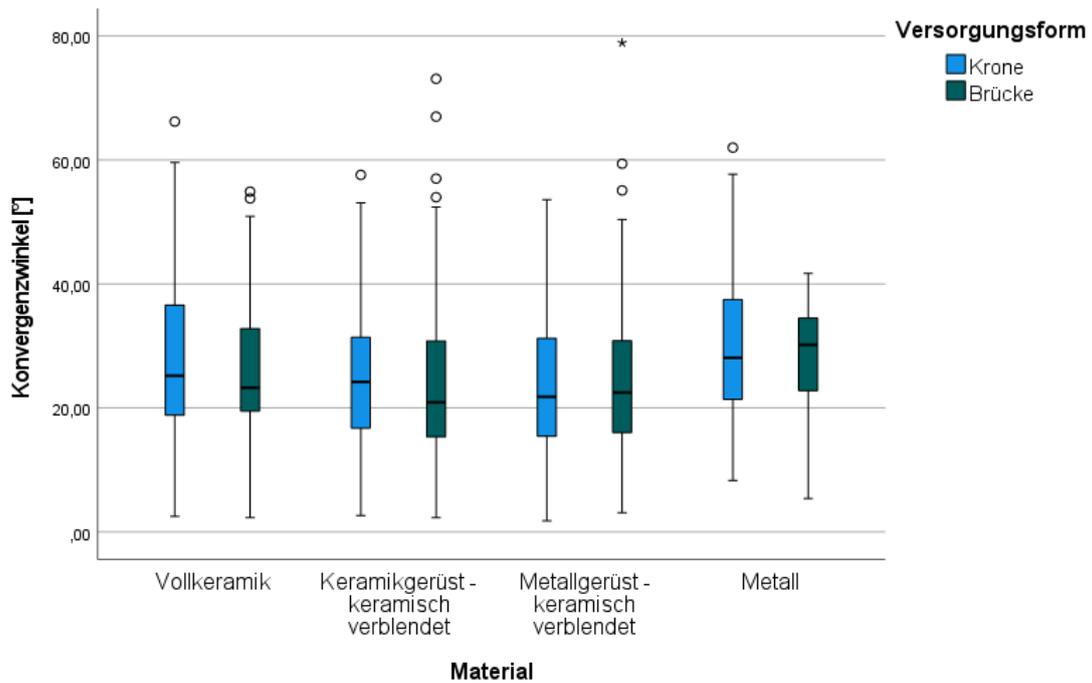


Abb. 26: Deskriptive Statistik (Boxplot) – Vestibulo-oraler Konvergenzwinkel in Abhängigkeit von Material gruppiert nach Versorgungsform (n = 940)

Ergänzend zu Tabelle 15 stellt Abb. 26 die materialspezifischen Unterschiede im Hinblick auf den KW in vestibulo-oraler Dimension dar. So lieferte die Messung für VK- und VM-Versorgungen mit Ausnahme von vollkeramischen Brücken durchschnittlich kleinere KW in vestibulo-oraler Dimension. Der konischste KW wurde für rein metallische Kronenrestorationen mit durchschnittlich 30,12° gemessen. Den kleinsten KW wiesen VM Kronen mit 23,65° auf.

Abb. 27 stellt den Sachverhalt in mesio-distaler Dimension dar. Auch hier galt, dass mit Ausnahme von vollkeramischen Brücken durchwegs kleinere KW bei den verblendeten Restauration im direkten Vergleich mit K und M gemessen wurden. Den größten KW wiesen M Kronen mit 31,39° auf. VM Brücken wiesen hingegen mit 18,57° den kleinsten KW auf.

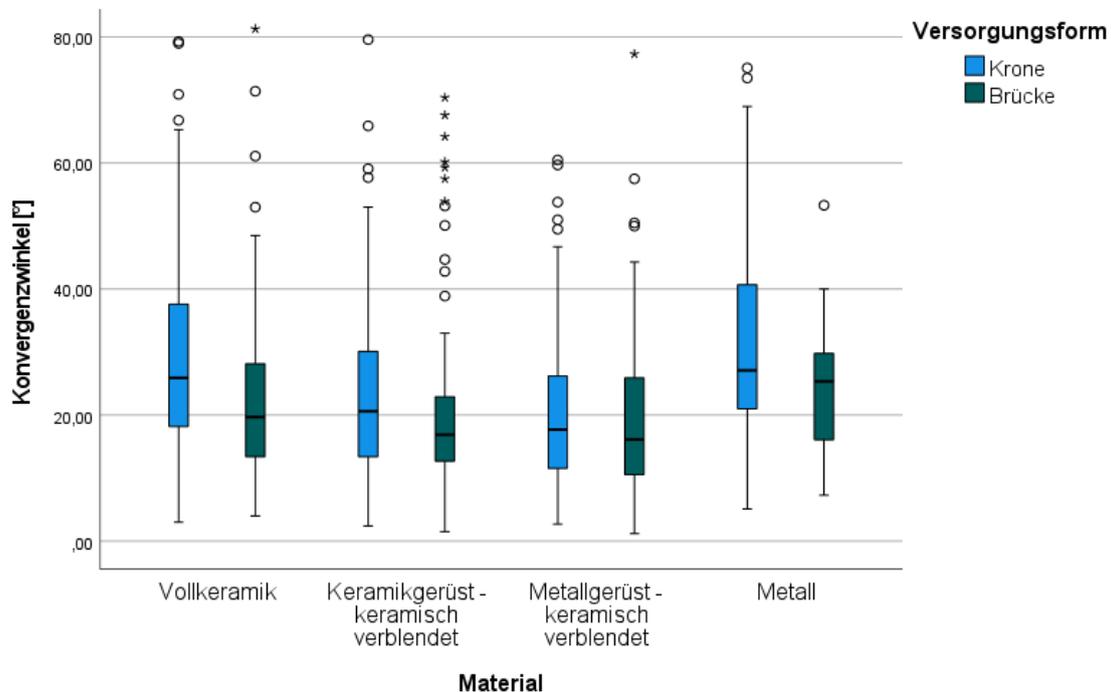


Abb. 27: Deskriptive Statistik (Boxplot) – Mesio-distaler KW in Abhängigkeit von Material gruppiert nach Versorgungsform (n = 940)

Zur Prüfung, ob die materialabhängigen Unterschiede des KW einer Signifikanz unterliegen, kam der Kruskal-Wallis-Test zur Anwendung. Im Falle einer Signifikanz im Rahmen des Kruskal-Wallis-Tests wurde anschließend ein paarweiser Dunn-Tests zum Vergleich der Gruppen untereinander durchgeführt. Die Testung wurde getrennt für Kronen und Brücken durchgeführt.

Für Kronen zeigte sich eine signifikante Differenz in vestibulo-oraler Dimension zwischen den verschiedenen Materialien ($p = 0,002$). Der paarweise Vergleich ergab, dass nur der Unterschied zwischen VM und K sowie zwischen VM und M signifikant war, wobei der KW in beiden Fällen bei VM-Restaurationen signifikant niedriger war.

Für den KW in mesio-distaler Dimension bei Kronen zeigte sich ebenfalls ein signifikanter Unterschied ($p \leq 0,001$). Auch hier wichen die vier Materialien signifikant voneinander ab. Der paarweise Vergleich zeigte erneut, dass der KW bei VM signifikant niedriger war als bei K und bei M.

Die Analyse des KW von Brückenversorgungen in vestibulo-oraler ergab mit $p = 0,079$ eine nicht-signifikante Differenz zwischen den Materialien.

Bei Brückenversorgungen in mesio-distaler Dimension ergab sich hingegen ein signifikanter Unterschied ($p = 0,010$). Der paarweise Vergleich ergab, dass nur bei VM der KW signifikant niedriger war als bei M.

Abschließend wurde getestet, ob die gemessenen Konvergenzwinkel statistisch signifikant von den Präparationsempfehlungen – einem maximalen Konvergenzwinkel von 12° – abweichen. Um zu testen, ob sich die durchschnittlich ermittelten Konvergenzwinkel vom Referenz-Winkel 12° unterscheiden, wurde der Einstichproben-Wilcoxon-Test benutzt. Die Analyse erfolgte getrennt nach Lage des Zahnes, mesio-distaler oder vestibulo-oraler Dimension des Konvergenzwinkels, Versorgungsform und Versorgungsart. Die Ergebnisse werden in Tabelle 16 dargestellt. Die Spalte „p-Wert“ gibt an, ob der innerhalb der Studie ermittelte Konvergenzwinkel jeder Untergruppe signifikant vom Referenzwert abweicht. Fast alle gemessenen durchschnittlichen KW wichen demnach signifikant von den als Obergrenze vorgegebenen 12° ab ($p \leq 0,001$). Ausnahmen hiervon bildeten metallische Verblendkronen (VM). Die gemessenen Werte wichen hier in mesio-distaler Dimension im Frontzahnbereich nicht signifikant von den vorgegebenen 12° ab ($p = 0,151$; Median = 13,30°; SD = 7,75°). Auch die Messungen zu metallischen Vollkronen- und brücken im Frontzahnbereich ergaben nicht-signifikante Ergebnisse.

Tabelle 16: Interferenzstatistik – Einstichproben-Wilcoxon-Test zur Prüfung der Konvergenzwinkel gegen den Referenzwert 12° (nicht-signifikante Ergebnisse grünlich hervorgehoben)

Dimension		Material / VF		p-Wert	p-Wert	Material / VF		Dimension	
FZ	vestibulo-oral (n = 255)	K	Krone	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	Krone	K	vestibulo-oral (n = 685)	SZ
			Brücke	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	Brücke			
		VK	Krone	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	Krone	VK		
			Brücke	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	Brücke			
		VM	Krone	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	Krone	VM		
			Brücke	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	Brücke			
		M	Krone	0,109	$\leq 0,001$	Krone	M		
			Brücke	0,317	$\leq 0,001$	Brücke			
FZ	mesio-distal (n = 250)	K	Krone	0,017	$\leq 0,001$	Krone	K	mesio-distal (n = 662)	SZ
			Brücke	0,006	$\leq 0,001$	Brücke			
		VK	Krone	0,002	$\leq 0,001$	Krone	VK		
			Brücke	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	Brücke			
		VM	Krone	0,151	$\leq 0,001$	Krone	VM		
			Brücke	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	Brücke			
		M	Krone	0,285	$\leq 0,001$	Krone	M		
			Brücke	0,317	$\leq 0,001$	Brücke			

Legende 2: FZ = Frontzahngebiet | SZ = Seitenzahngebiet | K = Keramische Vollkronen | M = Metallische Vollkronen | VK = Keramische Verblendkronen | VM = Metallische Verblendkronen

3.1.6 Öffnungswinkel der Hohlkehle und Stufe

Für die Hohlkehle wurden dachrinnenförmige Präparationen (n = 5) zuvor aus der weiteren Analyse des Öffnungswinkels ausgeschlossen. Die Auswertung wird in Tabelle 17 dargestellt. Die Messungen der Hohlkehle an den unterschiedlichen Zahnflächen lagen mit einer maximalen Differenz der Mittelwerte von 0,76° sehr nah beieinander. Insgesamt wiesen die ausgewerteten Hohlkehlpräparationen durchschnittlich einen Winkel von 152,26° auf.

Die Spannweite zwischen den ermittelten Mittelwerten war auf Seiten der Stufenpräparation mit 9,99° größer. Der kleinste Durchschnittswinkel wurde mesial mit 111,77° berechnet. Den größten durchschnittlichen Öffnungswinkel für Stufenpräparationen hingegen wies die vestibuläre Zahnfläche mit 121,76° auf. Über alle Zahnflächen hinweg konnte hier ein Durchschnittswinkel von 117,45° bestimmt werden.

Tabelle 17: Deskriptive Statistik – Öffnungswinkel der Hohlkehle und Stufe

Präparationsform	Zahnfläche	Mittelwert [°]	Median [°]	Standardabweichung [°]
Hohlkehle	<i>vestibulär (n = 631)</i>	152,54	154,60	12,11
	<i>oral (n = 523)</i>	152,66	154,10	13,66
	<i>mesial (n = 501)</i>	151,90	154,40	12,98
	<i>distal (n = 513)</i>	151,94	155,00	12,72
Stufe	<i>vestibulär (n = 23)</i>	121,76	122,00	13,25
	<i>oral (n = 17)</i>	115,71	118,60	14,50
	<i>mesial (n = 22)</i>	111,77	111,55	17,92
	<i>distal (n = 31)</i>	120,57	123,30	15,53

Zur Prüfung, ob der Öffnungswinkel signifikant von den Präparationsempfehlungen abwich wurde der Einstichproben-Wilcoxon-Test angewendet. Die Analyse wird in Tabelle 18 dargestellt:

Tabelle 18: Interferenzstatistik – Einstichproben-Wilcoxon-Test zur Prüfung der jeweiligen Öffnungswinkel gegen den Referenzwert 140° für Hohlkehle und 110° für Stufe

Präparationsform	Zahnfläche	p-Wert
Hohlkehle	vestibulär (n = 631)	≤ 0,001
	oral (n = 523)	≤ 0,001
	mesial (n = 501)	≤ 0,001
	distal (n = 513)	≤ 0,001
Stufe	vestibulär (n = 23)	≤ 0,001
	oral (n = 17)	0,142
	mesial (n = 22)	0,709
	distal (n = 31)	≤ 0,001

Für die Hohlkehle konnten an allen vier berücksichtigten Zahnflächen signifikante Abweichungen des Öffnungswinkels der Hohlkehle vom oberen Referenzwert 140° festgestellt werden ($p \leq 0,001$).

Für den Öffnungswinkel der Stufenpräparation konnten sowohl an den vestibulären als auch an den distalen Zahnflächen signifikante Abweichungen vom geforderten Referenzwert von 110° ermittelt werden ($p \leq 0,001$). An der oralen ($p = 0,1429$) und mesialen ($p = 0,709$) Zahnfläche hingegen konnten keine signifikanten Abweichungen festgestellt werden.

3.1.7 Unterschnitte

Abb. 28 stellt den prozentualen Anteil unter sich gehender Bereiche gruppiert nach Zahnfläche und Lage des Zahnes dar. Sowohl im Front- als auch im Seitenzahnbereich wiesen die orale und disto-orale Zahnfläche die höchsten Anteile von Unterschnitten auf. Den geringsten Anteil wiesen die drei vestibulären Zahnflächen auf.

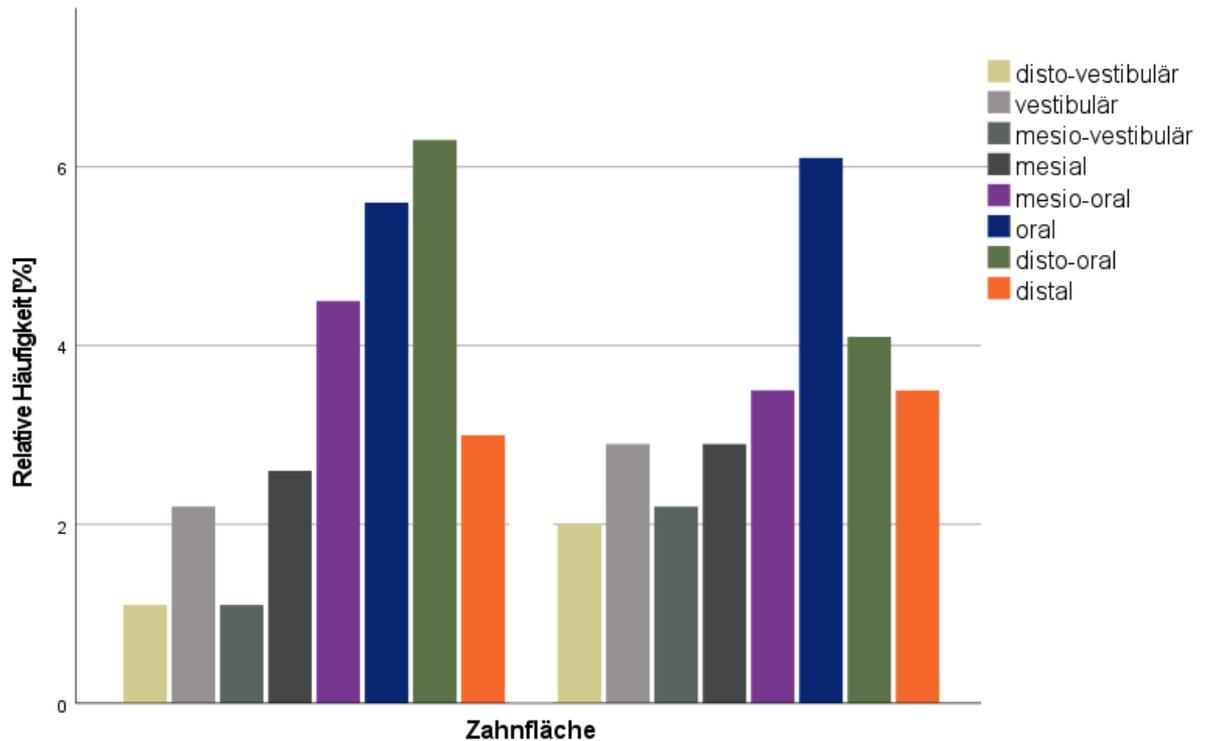


Abb. 28: **Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Relative Häufigkeitsverteilung „unter sich gehender“ Bereiche** (links: Frontzahnbereich n = 269, rechts: Seitenzahnbereich n = 733)

Im Folgenden wurde untersucht, ob sich das Vorkommen von Unterschnitten abhängig von der Zahnfläche statistisch signifikant unterschied. Hierfür wurde auf Grund des Messniveaus der Chi²-Unabhängigkeitstest genutzt. Der Test resultierte in einem p-Wert von $p \leq 0,001$. Demzufolge unterschieden sich die Zahnflächen signifikant hinsichtlich des Vorkommens von Unterschnitten.

3.2 Analyse der Fragebogenauswertung

3.2.1 Eigenschaften der Stichprobe

Regionale Aufteilung der angeschriebenen Zahnärztinnen und Zahnärzte

Es wurden insgesamt $n = 9446$ E-Mail-Adressen aus den $n = 16$ verschiedenen Bundesländern der Bundesrepublik Deutschland rekrutiert. Die regionale prozentuale Aufteilung der angeschriebenen Zahnärztinnen und Zahnärzte wird in Abb. 29 veranschaulicht.

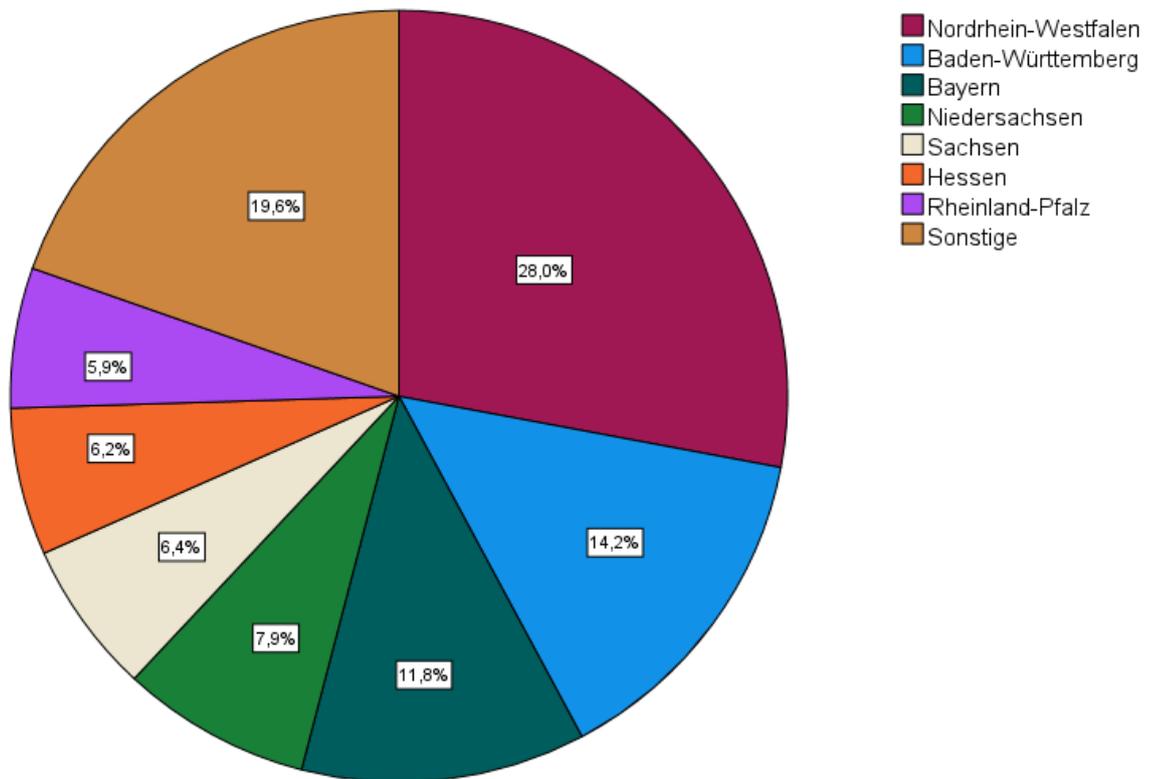


Abb. 29: Deskriptive Statistik (Kreisdiagramm) – Prozentuale Aufteilung der rekrutierten E-Mail-Adressen auf die einzelnen Bundesländer ($n = 9446$)

Aus den bevölkerungsreichsten Bundesländern Nordrhein-Westfalen, Baden-Württemberg, Bayern und Niedersachsen konnten demnach jeweils auch die meisten Adressen ermittelt werden. Kleinere Bundesländer wie Bremen, Saarland oder Mecklenburg-Vorpommern sind im Diagramm unter der Kategorie „Sonstige“ zusammengefasst und machten einen vergleichsweise geringeren Anteil der rekrutierten Adressen aus.

Befragungszeitraum

Das Befragungsprojekt war im Zeitraum vom 16.02. bis zum 16.04.2021 über den im Anschreiben enthaltenen Teilnahmelink aufrufbar.

Rücklaufquote

Insgesamt lagen am Ende des Befragungszeitraums $n = 406$ komplett ausgefüllte Fragebögen als Datensatz vor. Bei $n = 9446$ versendeten Einladungen, entspricht dies einer Rücklaufquote von 4,30 %. Da die Befragung komplett anonymisiert erfolgte, können keine Aussagen über regionale Rücklaufquoten gemacht werden.

Geschlechterverteilung und Repräsentativität

Von den $n = 406$ Befragten wurde das Geschlecht „männlich“ von $n = 281$ Teilnehmenden und das Geschlecht „weiblich“ von $n = 125$ Teilnehmenden gewählt.

Laut den offiziellen Daten der Bundeszahnärztekammer aus dem Jahr 2019 waren insgesamt $n = 43\,594$ niedergelassene Zahnärztinnen und Zahnärzte in der Bundesrepublik Deutschland tätig (Bundeszahnärztekammer 2021). Die Geschlechterverteilung stellte sich wie folgt dar:

- $n = 26\,750$ männliche niedergelassene Zahnärzte (61,4 %)
- $n = 16\,844$ weibliche niedergelassene Zahnärztinnen (38,6 %)

In der hier untersuchten Stichprobe gaben 69,2% der Teilnehmenden an männlich zu sein. Um zu testen, ob der Männeranteil signifikant höher war als der Referenzwert, wurde ein Einstichproben-Binomialtest vorgenommen. Der Test ergab einen p-Wert von $p = 0,001$. Da der Wert kleiner als 0,05 ist, verfügte die Stichprobe über einen signifikant höheren Männeranteil. Die Befragung kann also hinsichtlich der Geschlechterverteilung als nicht-repräsentativ bezeichnet werden.

Tätigkeitsdauer der Befragten

Bei der Befragung zur Tätigkeitsdauer der Befragten konnte zwischen vier unterschiedlichen Zeitspannen gewählt werden. Die absolute Häufigkeitsverteilung wird in Abb. 30 dargestellt. Demnach wiesen 35,0 % der Zahnärztinnen und Zahnärzte eine Tätigkeitsdauer zwischen 20 und 30 Jahren auf. Befragte mit mehr als 30 Jahren Tätigkeitsdauer stellten mit 29,3 % die zweitgrößte Gruppe dar. Den geringsten Anteil machten Teilnehmende mit einer Tätigkeitsdauer von weniger als 10 Jahren aus.

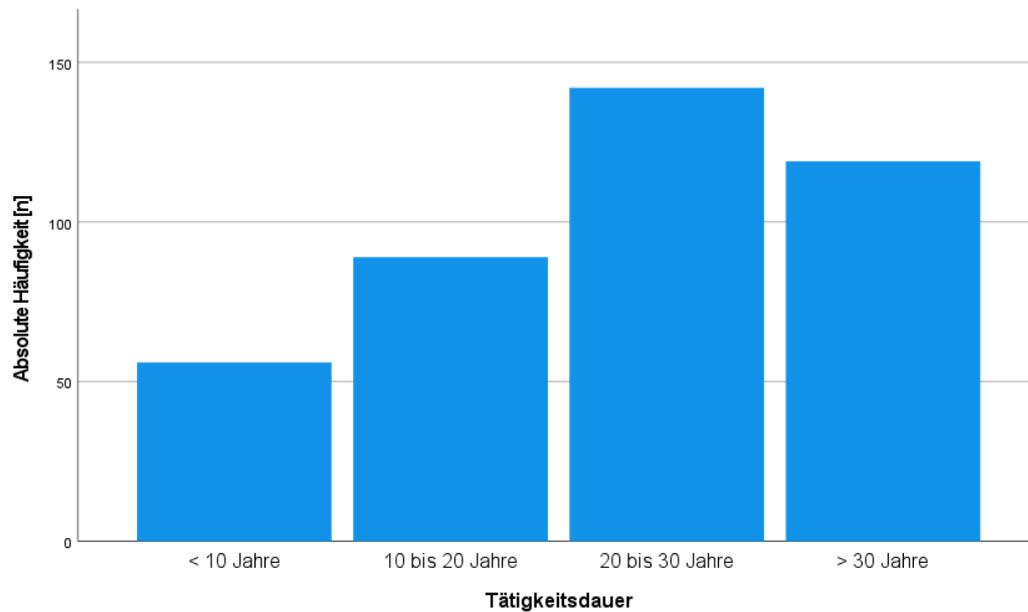


Abb. 30: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Absolute Häufigkeitsverteilung der Tätigkeitsdauer der Teilnehmenden (n = 406)

3.2.2 Durchschnittlich benötigte Zeit pro präpariertem Zahn

Zur Einschätzung welchen Zeitaufwand die Zahnärztinnen und Zahnärzte pro präpariertem Zahn kalkulierten, wurde nach der durchschnittlich benötigten Arbeitszeit pro präpariertem Zahn gefragt. Es sollte eine Auswahl aus fünf vorgeschlagenen Zeitintervallen getroffen werden. Abb. 31 ist zu entnehmen, dass 40,6 % der Befragten angaben, 10 bis 15 Minuten Zeit pro präpariertem Zahn zu benötigen. 27,8 % der Teilnehmenden gaben eine Zeitspanne von 15 bis 20 Minuten an. Weniger als 10 Minuten Zeit gaben nur 14,5 % der Befragten an. Insgesamt gaben 17,2 % der Befragten an, mehr als 20 Minuten pro Zahnpräparation zu benötigen.

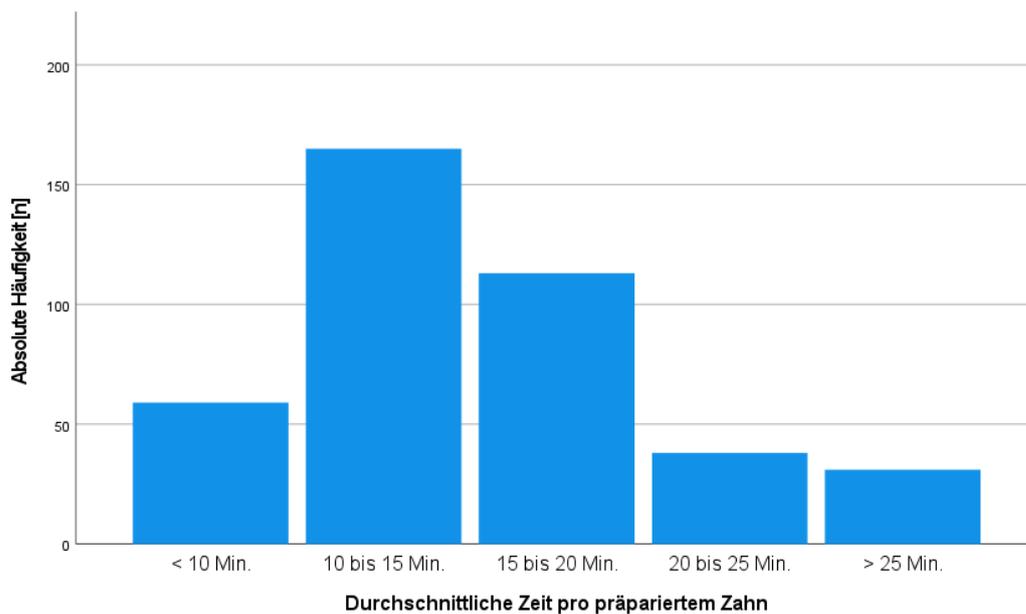


Abb. 31: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Absolute Häufigkeitsverteilung der angegebenen durchschnittlich benötigten Arbeitszeit pro Präparationsstumpf (n = 406)

Abb. 32 stellt die Beantwortung dieses Frage-Items gruppiert nach der zuvor angegebenen Tätigkeitsdauer dar. Die prozentuale Verteilung innerhalb der betrachteten Kategorien stellte sich als relativ homogen dar. Ausreißer sind bei einer Zeitangabe von < 10 Minuten sowie > 25 Minuten zu verzeichnen. So gaben überproportional viele derjenigen mit einer Tätigkeitsdauer von 10 bis 20 Jahren an < 10 Minuten Arbeitszeit pro präpariertem Zahn zu benötigen und überproportional wenige derjenigen mit einer Tätigkeitsdauer von 20 bis 30 Jahren mehr als 25 Minuten Zeit zu benötigen.

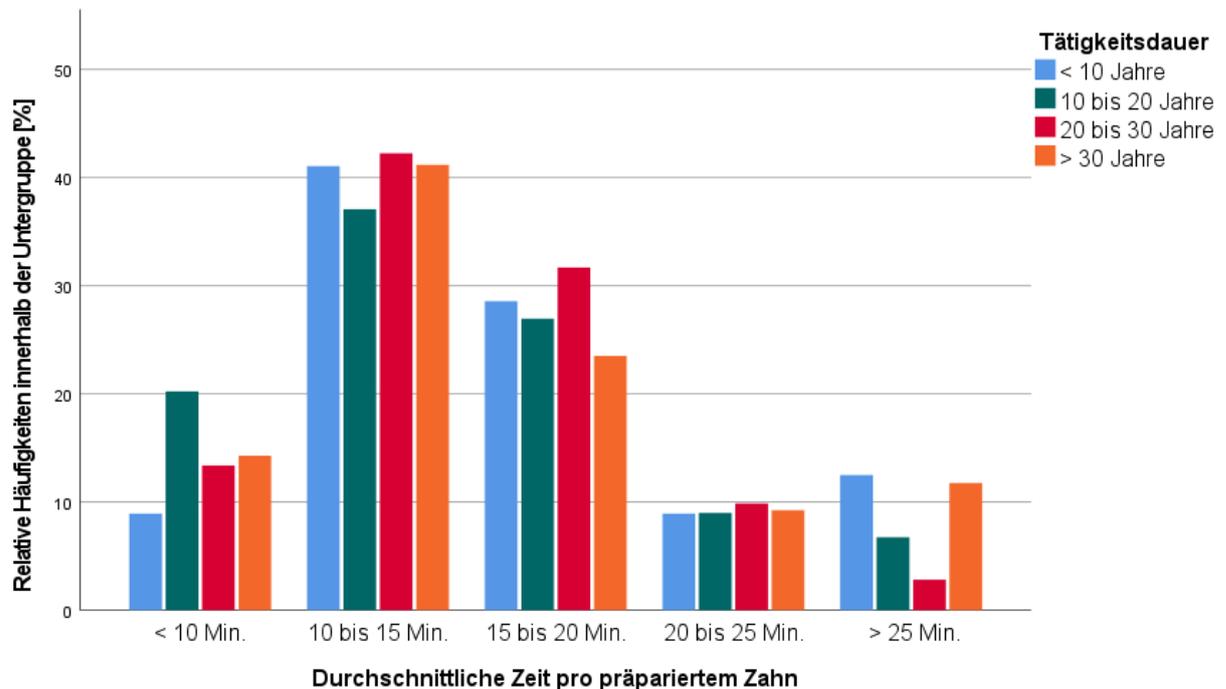


Abb. 32: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Relative Häufigkeitsverteilung der durchschnittlich benötigten Zeit pro präpariertem Zahn gruppiert nach Tätigkeitsdauer (n = 406)

Im Folgenden sollte geprüft werden, ob eine statistisch signifikante Korrelation zwischen Tätigkeitsdauer und angegebener Zeit bestand. Um den Zusammenhang zu überprüfen, wurde der Korrelationskoeffizient nach Spearman bestimmt. Der Korrelationskoeffizient ergab sich zu $r = 0,00$ mit einem p-Wert von $p = 0,942$. Da der p-Wert über 0,05 lag, bestand zwischen den beiden Variablen keine signifikante Korrelation. Da zudem der Korrelationskoeffizient $r = 0,00$ betrug, waren beide Variablen vollständig unkorreliert. Es ließ sich folglich kein Zusammenhang zwischen angegebener Tätigkeitsdauer und angegebener Arbeitszeit pro präpariertem Zahn feststellen.

Analog erfolgte eine Differenzierung nach dem angegebenen Geschlecht. Die Ergebnisse werden in Abb. 33 veranschaulicht. Zahnärztinnen sind demnach sowohl in der Gruppe < 10 Minuten unterrepräsentiert als auch in den Gruppen > 20 Minuten jeweils überrepräsentiert.

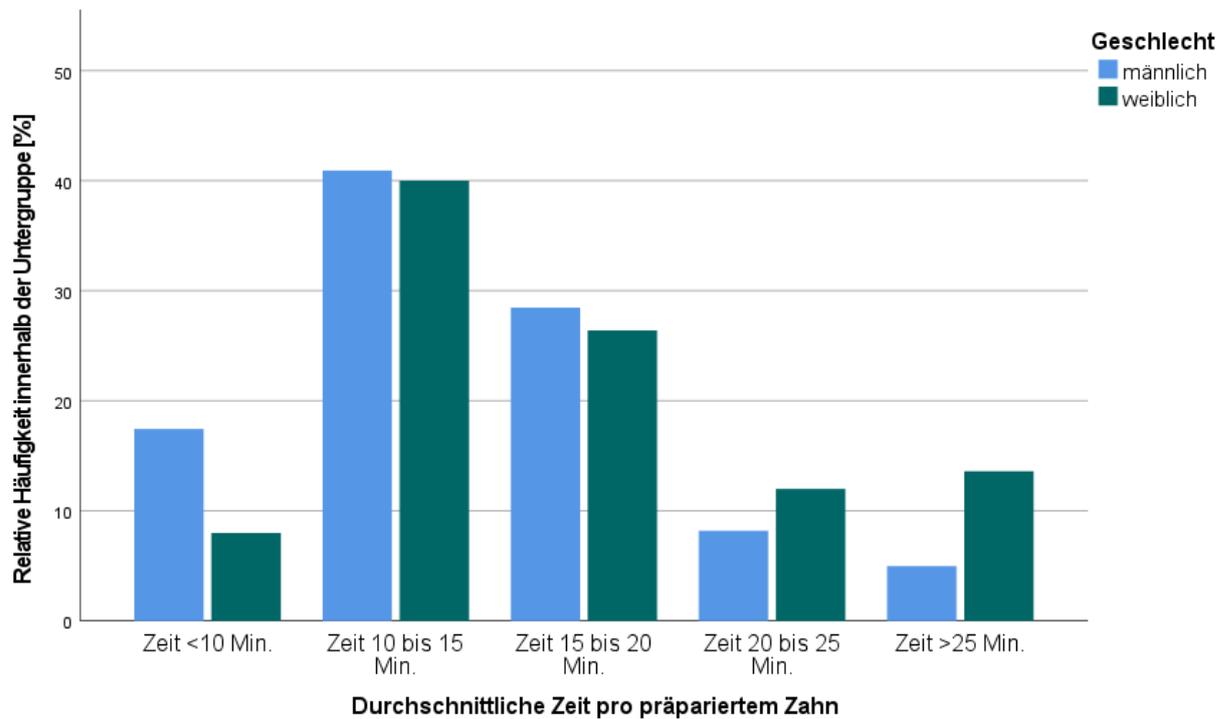


Abb. 33: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Relative Häufigkeitsverteilung der durchschnittlich benötigten Zeit pro präpariertem Zahn gruppiert nach Geschlecht (n = 406)

Es sollte ebenfalls geprüft werden, inwiefern sich hieraus eine Korrelation ableiten lässt. Zur Testung wurde der Mann-Whitney-U-Test als Analyseverfahren verwendet. Der Test ergab einen p-Wert von $p = 0,002$. Da der Wert unter 0,05 lag, bestand ein signifikanter Unterschied zwischen Männern und Frauen, wobei die angegebene Bearbeitungszeit der Frauen signifikant höher als die der Männer war.

3.2.3 Bevorzugte Präparationsform

Die Befragung nach der bevorzugt gewählten Präparationsform wurde für die Materialien K, M, VK, VM getrennt erhoben. Hierbei konnte für jedes Frage-Item zwischen den Präparationsformen Hohlkehle, Stufe und Tangential sowie der Ausweichoption „Sonstige“ gewählt werden. Die Hohlkehle wurde für jedes Material mit Abstand am häufigsten gewählt. Wie Tabelle 19 zu entnehmen ist, lagen die relativen Häufigkeiten zwischen 71,4 % und 90,4 %.

Die Stufenpräparation wurde von rund einem Viertel der Befragten für die Versorgungsformen K und VK gewählt. Die Tangentialpräparation sowie die Ausweichoption „Sonstige“ machten mit maximal 2,2 % den geringsten Anteil aus. Eine Ausnahme bildeten metallische Restaurationen. Hier gaben 14,3 % der Befragten an, tangential zu präparieren.

Tabelle 19: **Deskriptive Statistik – Relative Häufigkeiten der materialabhängig bevorzugt gewählten Präparationsform** (n = 406)

Material	Hohlkehle [%]	Stufe [%]	Tangential [%]	Sonstige [%]
<i>Vollkeramik</i>	73,6	23,4	1,5	1,5
<i>Keramikgerüst – keramisch verblendet</i>	71,4	25,4	1,0	2,2
<i>Metallgerüst – keramisch verblendet</i>	90,4	5,9	2,0	1,7
<i>Metall</i>	82,0	2,0	14,3	1,7

Die beschriebenen Unterschiede wurden anschließend mithilfe des Chi²-Unabhängigkeitstests auf statistische Signifikanz geprüft. Der Test resultierte in einem p-Wert von $p \leq 0,001$. Demzufolge unterschieden sich die Materialien signifikant hinsichtlich der Verteilung der bevorzugt gewählten Präparationsform.

3.2.4 Bevorzugter Präparationswinkel

Zur Untersuchung des präferierten Präparationswinkels sollten die Teilnehmenden den bevorzugt verwendeten Präparationswinkel getrennt für keramische und metallische Restaurationen angeben. Es wurden die Winkel 0° , $> 0^\circ$ bis 6° , $> 6^\circ$ bis 15° , $> 15^\circ$ bis 25° und $> 25^\circ$ vorgegeben. Abb. 34 und Abb. 35 veranschaulichen die Häufigkeitsverteilung der gewählten Präparationswinkel.

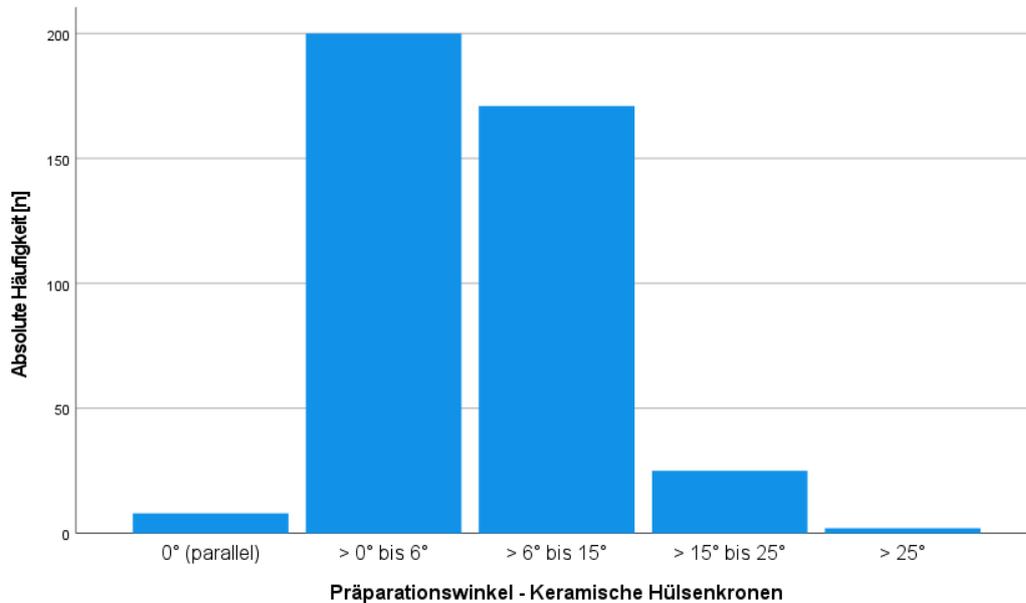


Abb. 34: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Absolute Häufigkeiten des gewählten Präparationswinkels für keramische Hülsenkronen ($n = 406$)

Bei keramischen Hülsenkronen wurde mit 49,2 % zu einem überwiegenden Anteil ein bevorzugter Präparationswinkel im Bereich zwischen 0° und 6° sowie mit 42,1 % zwischen 6° und 15° angegeben. 8,7 % der Befragten entschieden sich für die übrigen Winkelbereiche. Am seltensten wurde mit einer Häufigkeit von 0,5 % ein Winkel von mehr als 25° gewählt.

Bei wie in Abb. 35 ersichtlichen metallischen Hülsenkronen wurde der Winkelbereich von 0° bis 6° hingegen mit Abstand am häufigsten gewählt (71,2 %). Ein Präparationswinkel zwischen 6° und 15° wurde hier nur in 24,1 % der Fälle ausgesucht. Die übrigen Winkelbereiche wurden auch hier mit 4,7 % vergleichsweise selten gewählt.

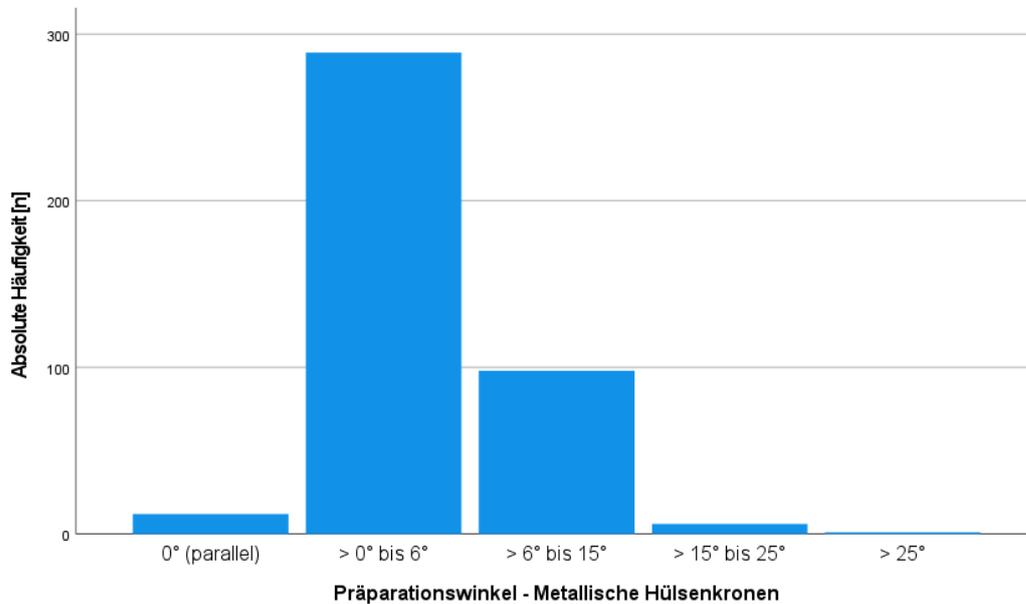


Abb. 35: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Absolute Häufigkeiten des gewählten Präparationswinkels für metallische Hülsenkronen (n = 406)

Um zu prüfen, ob sich die beiden Materialien hinsichtlich des Winkels signifikant unterschieden, wurde der Mann-Whitney-U-Test als Analyseverfahren durchgeführt. Der Test ergab einen p-Wert von $p \leq 0,001$. Beide Materialien unterschieden sich folglich signifikant hinsichtlich des bevorzugten Winkels.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bei keramischen Restaurationen signifikant höhere Winkel gewählt wurden als bei metallischen Restaurationen. Insbesondere wurden bei Keramik deutlich häufiger ein Präparationswinkel zwischen 6° und 15° und bei Metall häufiger ein Präparationswinkel zwischen 0° und 6° angegeben.

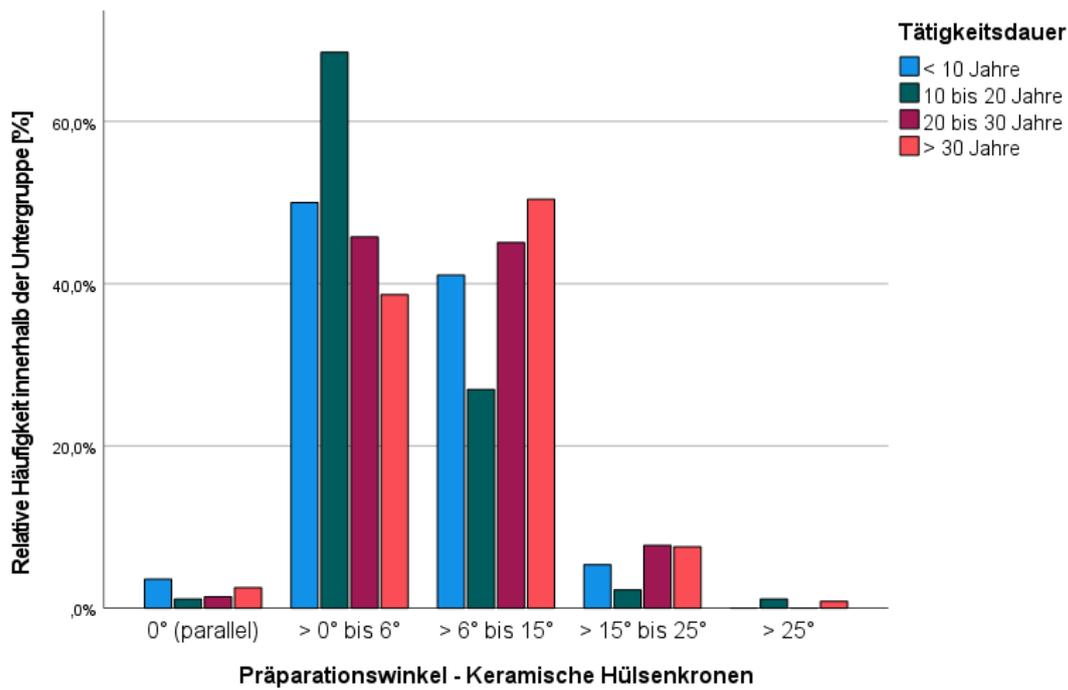


Abb. 36: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Relative Häufigkeiten des gewählten Präparationswinkels für keramische Hülsenkronen gruppiert nach Tätigkeitsdauer (n = 406)

Abb. 36 und Abb. 37 gruppieren die bevorzugt gewählten Präparationswinkel abhängig von der zuvor gewählten Tätigkeitsdauer der Teilnehmenden. Es zeigte sich bei Betrachtung der Winkel zwischen > 0° und 6° sowie > 6° und 15°, dass kleinere Präparationswinkel sowohl bei Betrachtung der keramischen als auch der metallischen Restaurationen bevorzugt von Teilnehmenden mit geringerer Tätigkeitsdauer gewählt wurden, während größere Präparationswinkel eher von Teilnehmenden mit höherer Tätigkeitsdauer gewählt wurden.

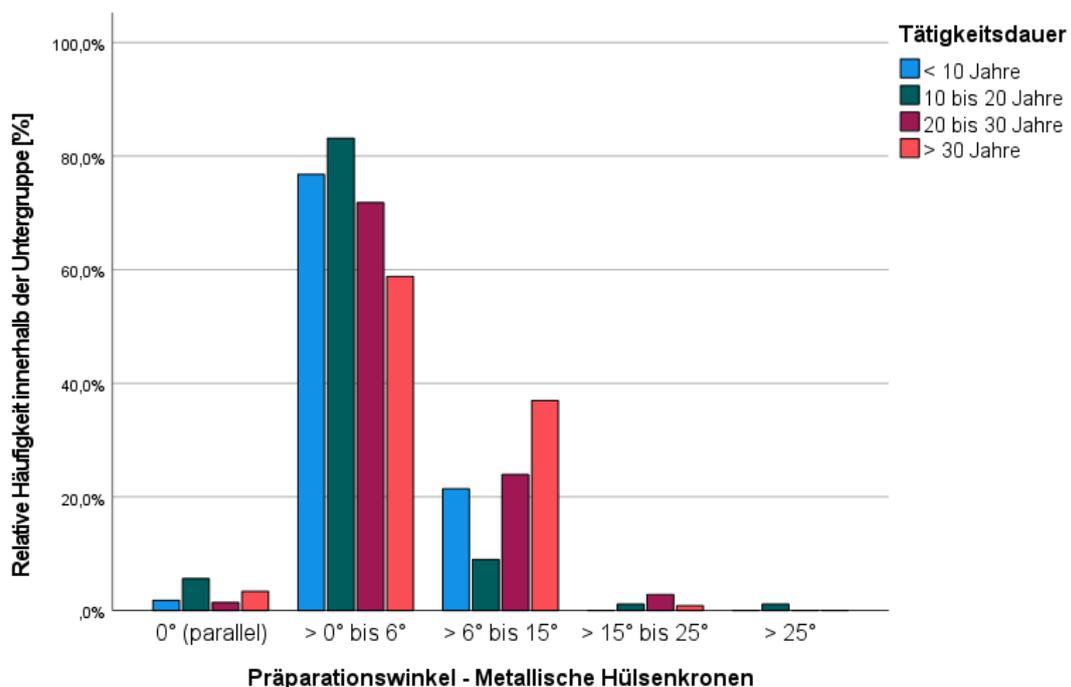


Abb. 37: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Relative Häufigkeiten des gewählten Präparationswinkels für metallische Hülsenkronen gruppiert nach Tätigkeitsdauer (n = 406)

Diese Beobachtung wurde anschließend auf Signifikanz geprüft. Hierzu wurde der Korrelationskoeffizient nach Spearman bestimmt.

Für Metall ergab sich dieser zu $r = 0,20$, mit einem p-Wert von $p \leq 0,001$. Es lag also eine signifikante, positive Korrelation zwischen Tätigkeitsdauer und bevorzugt gewähltem Präparationswinkel vor. Zahnärztinnen und Zahnärzte mit längerer Tätigkeitsdauer wählten folglich signifikant häufiger den höheren Winkel von 6 bis 15° .

Für Keramik ergab sich mit $r = 0,16$ und einem p-Wert von $p = 0,002$ ebenfalls eine signifikante positive Korrelation. Auch hier bevorzugten Teilnehmende mit steigender Tätigkeitsdauer eher den größeren Winkel.

Die ermittelten Korrelationen sind mit einem r-Wert $< 0,30$ jedoch als schwacher Zusammenhang zu interpretieren.

Ein Einfluss des Geschlechts auf den bevorzugt gewählten Präparationswinkel wurde mittels Mann-Whitney-U-Test ermittelt. Dieser ergab für Metall einen p-Wert von $p = 0,201$ und für Keramik einen p-Wert von $p = 0,790$. Da beide p-Werte deutlich über dem Wert 0,05 lagen, hatte das Geschlecht in der Befragung keinen signifikanten Einfluss auf den gewählten Präparationswinkel.

3.2.5 Auswahl der Präparationsinstrumente und Instrumentenklassifizierung

Bei der Frage zur bevorzugten Auswahl der Präparationsinstrumente konnten die Befragten eine Mehrfachauswahl zwischen drei Antwortmöglichkeiten („anhand von vorgefertigten Präparationssets“, „anhand von eigenen Erfahrungswerten“, „anhand des DIN-ISO-Nummernsystems zur Klassifizierung vom Präparationsinstrumenten“) treffen. Die Frage wurde von 100 % der Teilnehmenden (n = 406) beantwortet.

Es zeigte sich, dass mit 90,6 % ein Großteil der Befragten die Auswahl anhand von eigenen Erfahrungswerten traf. Vorgefertigte Präparationssets nutzten laut der Umfrage nur 22,4 %. Eine Minderheit von 8,4 % gab an das DIN-ISO-Nummernsystem (ISO 6360) zur Auswahl der Präparationsinstrumente zu nutzen.

Die Ergebnisse wurden anschließend auf Signifikanz geprüft. Um die Häufigkeit der Auswahl nach Erfahrungswerten mit den beiden anderen Variablen (DIN-ISO-Nummernsystem sowie vorgefertigte Präparationssets) zu vergleichen, kam der Chi²-Unabhängigkeitstest zum Einsatz. Der Test ergab für den Vergleich mit DIN-ISO-Nummernsystem $p \leq 0,001$ und für den Vergleich mit vorgefertigten Präparationssets $p \leq 0,001$. Demzufolge wurde die Auswahl signifikant häufiger anhand eigener Erfahrungswerte vorgenommen als anhand der beiden anderen Alternativen.

Die Frage zur Instrumentenklassifizierung sollte einen genaueren Überblick über die Geläufigkeit des DIN-ISO-Nummernsystems (ISO 6360) geben. Hier konnte ebenfalls eine von drei Antwortmöglichkeiten gewählt werden („Benutze ich“, „Kenne ich, benutze ich aber nicht“, „Kenne ich nicht“).

Die Frage wurde ebenfalls von n = 406 Teilnehmenden beantwortet. Mit 48,3 % gab ein Großteil der Befragten an, das DIN-ISO-Nummernsystem (ISO 6360) zwar zu kennen, aber nicht zu benutzen. 32,5 % der Befragten gaben an das DIN-ISO-Nummernsystem nicht zu kennen. 19,2 % gaben an, dieses im Praxisalltag zu benutzen.

Bevorzugt genutzte Schleifkörper

Um einen Überblick über die bevorzugt genutzten Präparationsinstrumente zu erhalten, konnten die Teilnehmenden aus einer Liste vorgeschlagener Standard-Schleifkörper eine Mehrfachauswahl treffen. Die Schleifkörper waren jeweils mittels Namen, Skizze und DIN-ISO-Nummer beschrieben.

Ferner bestand die Möglichkeit, die Auswechoption „keine Angabe“ zu treffen sowie eine Freitexteingabe zu tätigen. Es wurde zwischen den Materialien Metall, Keramik und Metallkeramik unterschieden.

Wie Abb. 38 zu entnehmen ist, wurde von den Teilnehmenden mit 68,7 % das Instrument Knospe (ISO-Form 277) am häufigsten für Keramikrestaurationen benutzt. Das Instrument Torpedo (ISO-Form 290) wurde mit 53,7 % am zweithäufigsten gewählt. Die Instrumente Walze mit abgerundeter Kante (ISO-Form 158) mit 49,5 % sowie Konus mit abgerundeter Kante (ISO-Form 553) mit 37,4 % machten ebenfalls einen relevanten Anteil aus.

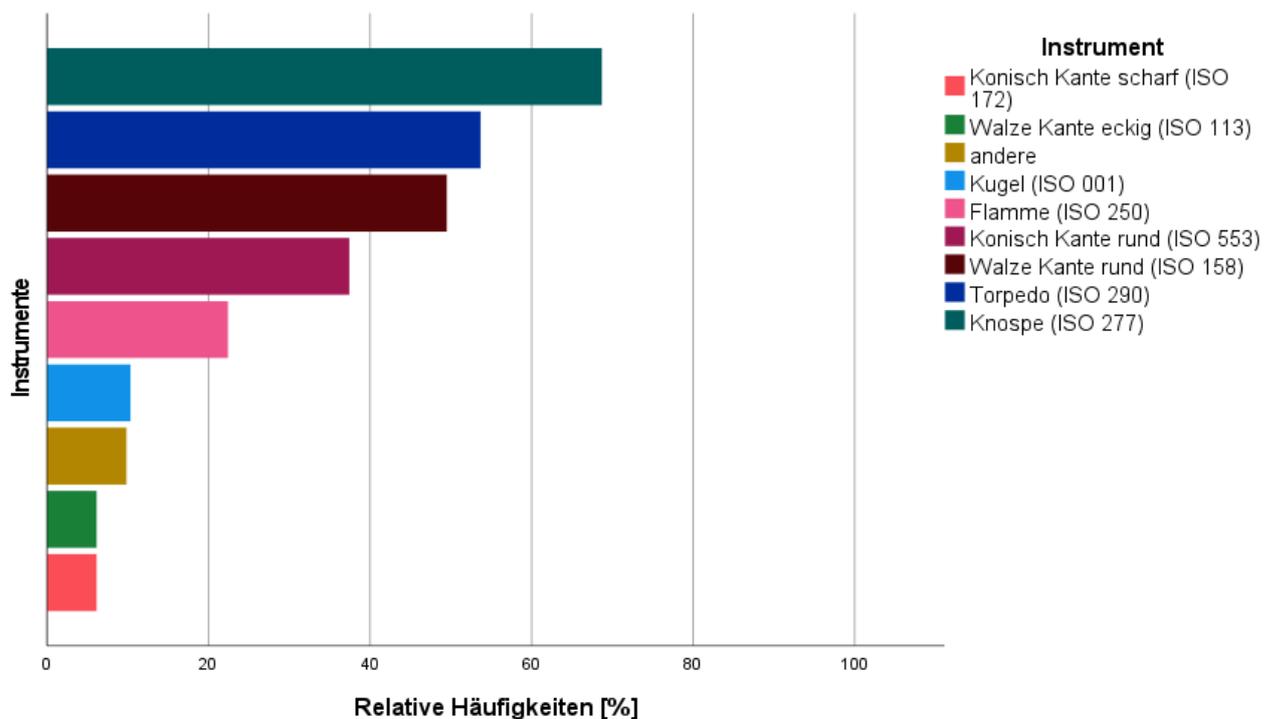


Abb. 38: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Relative Häufigkeiten bevorzugt genutzter Präparationsinstrumente für keramische Restaurationen (n = 406)

Abb. 39 zeigt die Verteilung für metallische Restaurationen. Auch hier machten die Instrumente Torpedo (ISO-Form 290) mit 74,6 % und Knospe (ISO-Form 277) mit 65,3 % die am häufigsten gewählten Instrumente aus. Die Instrumente Flamme (ISO-Form 250) mit 29,1 %, Konus mit abgerundeter Kante (ISO-Form 553) mit 25,9 % sowie Walze mit abgerundeter Kante (ISO-Form 158) mit 24,9 % wurden im Vergleich seltener gewählt.

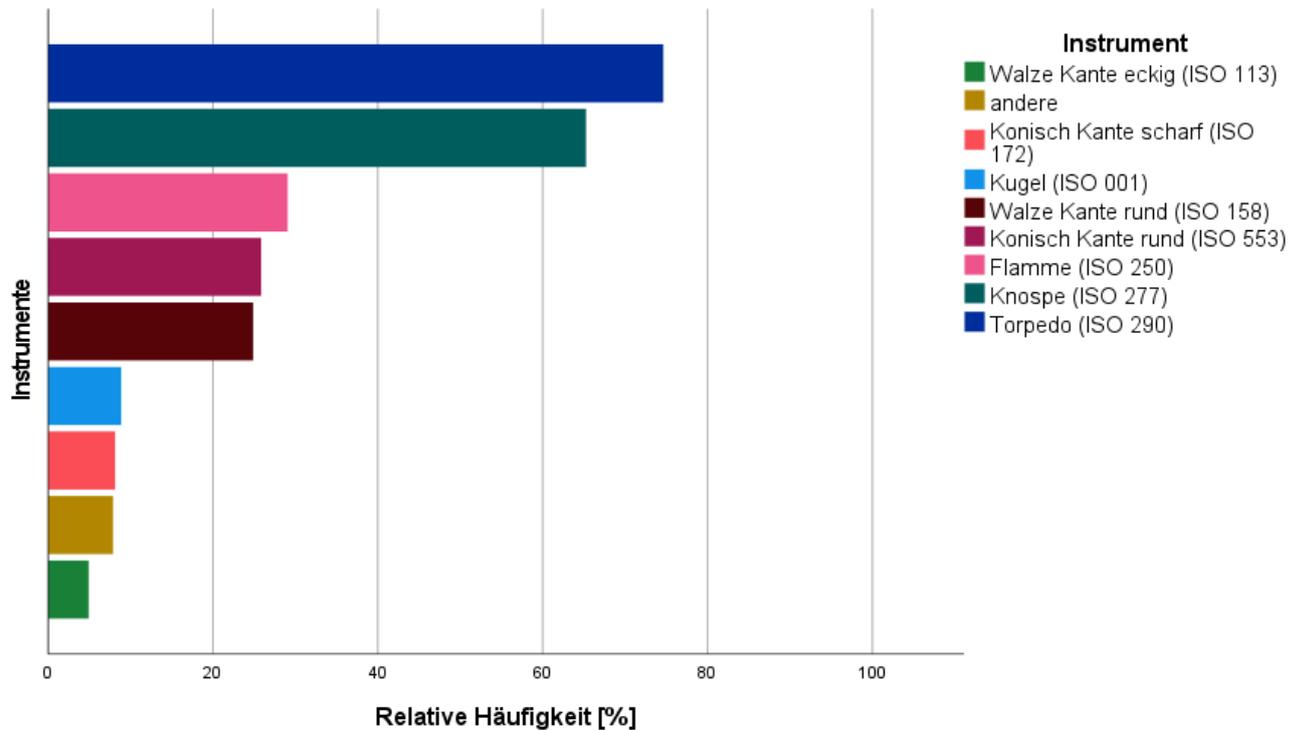


Abb. 39: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Relative Häufigkeiten bevorzugt genutzter Präparationsinstrumente für metallische Restaurationen (n = 406)

Ein ähnliches Bild zeigte sich bei Betrachtung der bevorzugt gewählten Instrumente für metallkeramische Versorgungen. Abb. 40 veranschaulicht, dass hier abermals die Instrumente Torpedo (ISO-Form 290) und Knospe (ISO-Form 277) mit 73,7 % sowie 67,2 % am häufigsten gewählt wurden. Die Schleifkörper Walze Kante rund (ISO-Form 158), Konus Kante rund (ISO-Form 553) und Flamme (ISO-Form 250) wurden auch hier mit Prozentwerten zwischen 23,2 % und 34,0 % insgesamt seltener gewählt.

Die Instrumente Walze mit eckiger Kante (ISO-Form 113), Konus mit scharfer Kante (ISO-Form 172) und Kugel (ISO-Form 001) wurden jeweils nur von weniger als 10 % der Befragten gewählt und machten damit einen geringen Anteil aus.

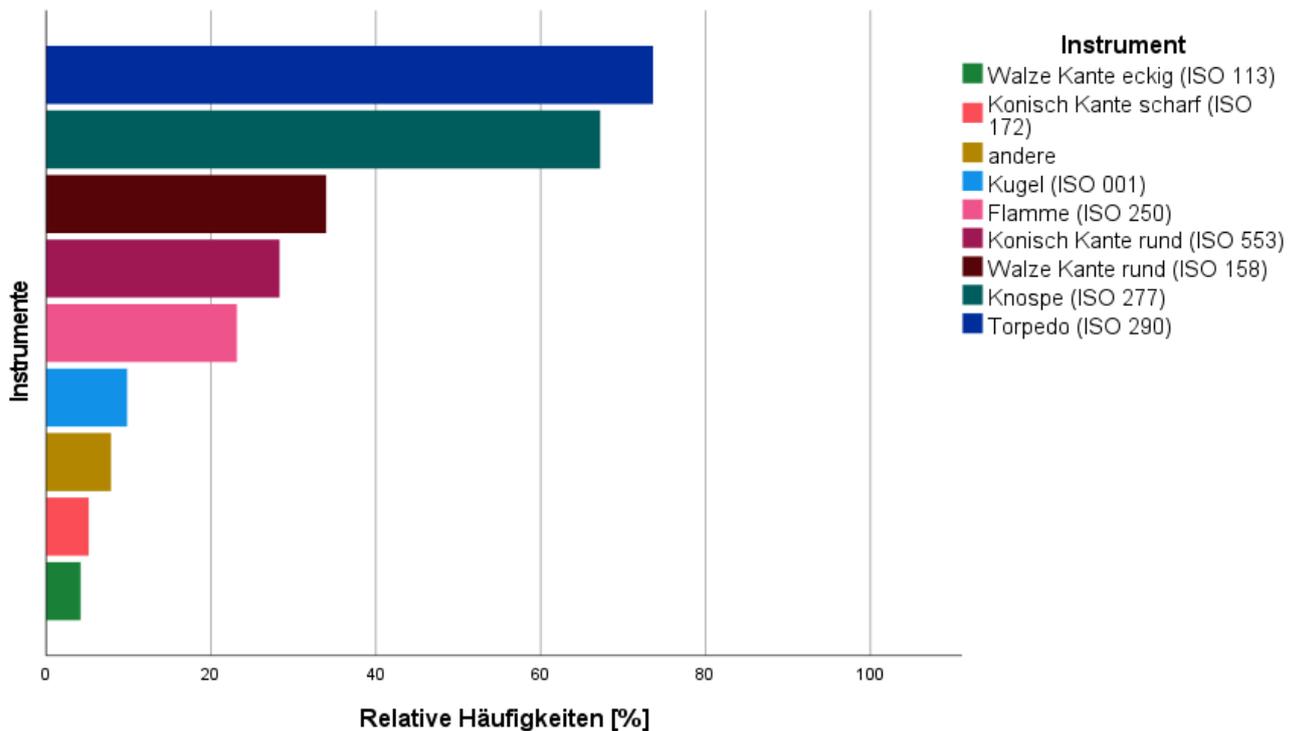


Abb. 40: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Relative Häufigkeiten bevorzugt genutzter Präparationsinstrumente für metallkeramische Restaurationen (n = 406)

Die Antwortmöglichkeit „keine Angabe“ wurde nie ausgewählt. Bei den Freitextangaben wurden folgende Schleifkörper über alle Materialien hinweg gehäuft angegeben:

- Abgerundeter Konus mit Führungsdorn (n = 2)
- Separier-Instrument (n = 14)
- Zylinder mit abgeschrägter Spitze (Marxkors) (n = 7)
- Rhombus (n = 3)
- Safe-Präp Diamant (n = 3)
- Tiefenmarkierer (n = 3)

Betrachtet man die gewählten Instrumente in Abhängigkeit von der zuvor getroffenen Auswahl der bevorzugten Präparationsform, so zeigte sich folgender Zusammenhang: über alle Materialien hinweg wurde - abgesehen vom knospenförmigen Schleifkörper - am häufigsten ein der gewählten Präparationsform formkongruentes Instrument präferiert.

Wurde die Hohlkehlpräparation zuvor als bevorzugt angewandte Präparationsform gewählt, so wurde anschließend von den Befragten das formkongruente Instrument Torpedo (ISO-Form

290) im Bereich zwischen 25,2 % und 31,8 % über alle Materialien hinweg am häufigsten für die marginale Präparation gewählt.

Entsprechendes gilt ebenfalls für die Stufenpräparation. Hier wurde der Schleifkörper Walze mit abgerundeter Kante (ISO-Form 158) mit Werten zwischen 25,2 % und 27,8 % am häufigsten gewählt.

Bei Auswahl der Tangentialpräparation wurde die Flamme (ISO-Form 250) mit einer Häufigkeit zwischen 23,5 % und 26,3 % ausgesucht. Die einzige Ausnahme zeigte die Verteilung der Instrumente bei metallischen Restaurationen. Hier wurde der nicht formkongruente Torpedo mit 24,3 % etwas häufiger als die Flamme mit 20,1 % gewählt.

3.2.6 Bevorzugte Abformverfahren

Hinsichtlich bevorzugt genutzter Abformmethoden konnte zwischen vier verschiedenen Techniken gewählt werden. Hierbei sollten die Zahnärztinnen und Zahnärzte die Häufigkeit der Nutzung jedes Verfahrens durch die Auswahlkategorien „häufig“, „selten“ oder „gar nicht“ aufzeigen. Abb. 41 zeigt die prozentuale Verteilung der „häufig“ genutzten Abformverfahren. N = 3 Teilnehmende beantworteten die Frage nicht.

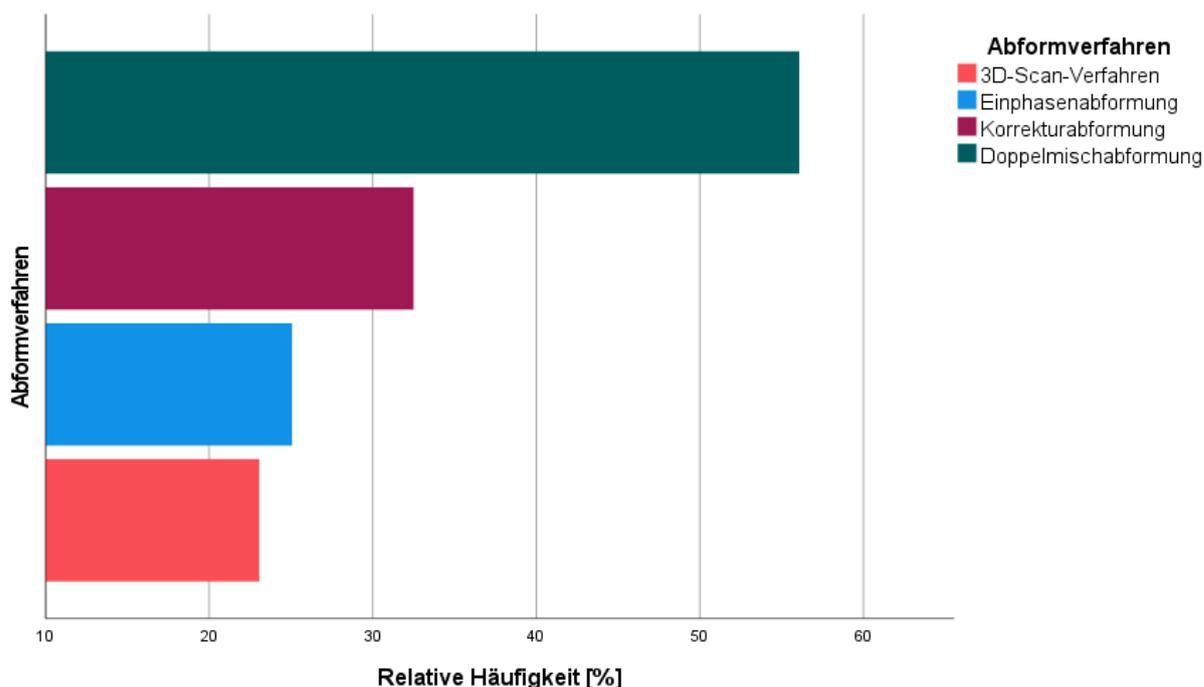


Abb. 41: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Relative Verteilung der Antwortmöglichkeit „häufig“ bezüglich des bevorzugt genutzten Abformverfahrens (n = 403)

Demnach wurde die Doppelmischabformung mit einem Anteil von 56,1 % der Befragten am häufigsten genutzt. Die Korrekturabformung mit 32,5 % sowie die Einphasenabformung mit 25,1 % wurden vergleichsweise seltener genutzt. Am seltensten wurde eine häufige Nutzung bei 3D-Scan-Verfahren von 23,1 % der Befragten ausgewählt. Für 3D-Scan-Verfahren wurde von 73,6 % ebenso am häufigsten die Antwortmöglichkeit „gar nicht“ gewählt.

Die Ergebnisse wurden mithilfe des Wilcoxon-Vorzeichen-Tests auf Signifikanz geprüft. Der Vergleich von Doppelmischabformung mit Korrekturabformung ergab $p \leq 0,001$, mit Einphasenabformung $p \leq 0,001$ und mit 3D-Scan-Verfahren ebenfalls $p \leq 0,001$. Somit wurde die Doppelmischabformung signifikant häufiger verwendet als alle der drei anderen Methoden.

Abb. 42 zeigt die relativen Häufigkeiten der Nutzung von 3D-Scan-Verfahren innerhalb jeder Tätigkeitsdauer-Untergruppe. Die Gruppe derjenigen mit einer Tätigkeitsdauer von > 30 Jahren nutzte die Abformmethode 3D-Scan-Verfahren demnach am seltensten. Unter 20 % gaben an, dieses Verfahren „häufig“ zu nutzen. Dagegen gaben über 60 % aus dieser Untergruppe an, 3D-Scan-Verfahren „gar nicht“ zu nutzen. Die Teilnehmenden in der Gruppe mit einer Tätigkeitsdauer von < 30 Jahren führten zu rund einem Drittel an, 3D-Scan-Verfahren „häufig“ zu nutzen.

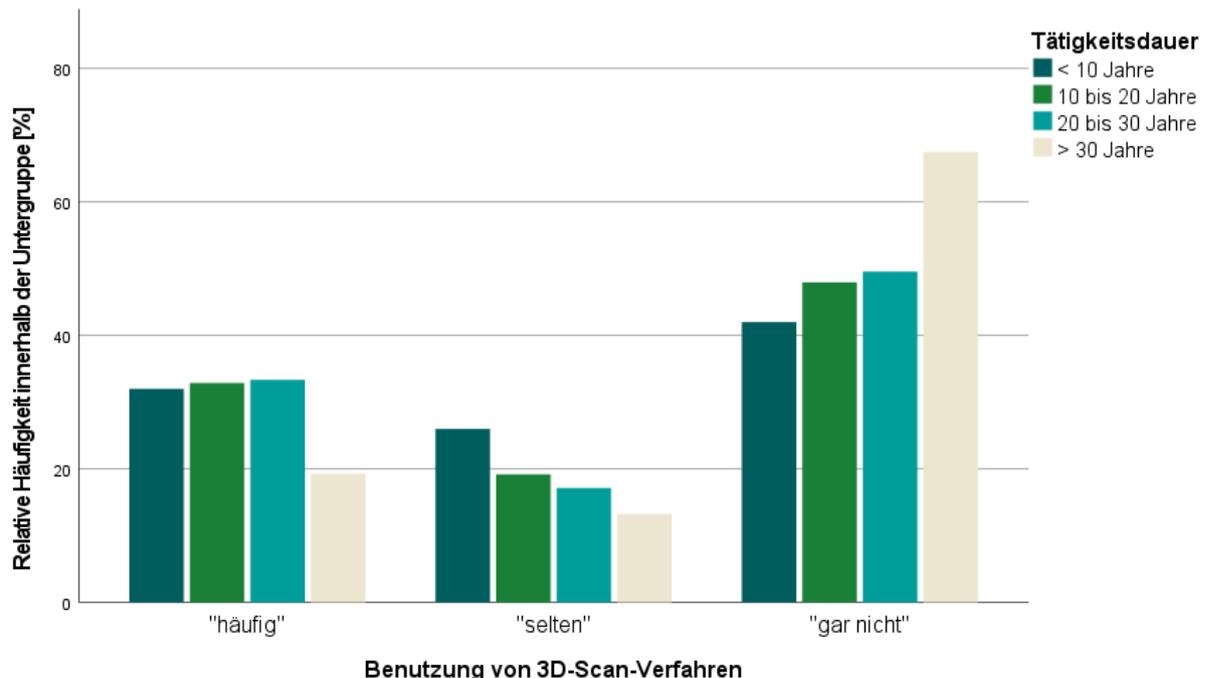


Abb. 42: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Relative Häufigkeiten bezüglich der Nutzung von 3D-Scan-Verfahren als Abformmethode gruppiert nach Tätigkeitsdauer (n = 317)

Um zu überprüfen ob hierbei eine Korrelation zwischen Häufigkeit der Nutzung des Abformverfahrens und der Tätigkeitsdauer bestand, wurde der Korrelationskoeffizient nach Spearman bestimmt. Es ergab sich ein Korrelationskoeffizient von $r = -0,15$ ($p = 0,006$). Eine signifikante negative Korrelation ergab sich hinsichtlich der zunehmenden Tätigkeitsdauer der Teilnehmenden und der selteneren Nutzung des 3D-Scan-Verfahrens. Umgekehrt ausgedrückt: Das 3D-Scan-Verfahren wurde eher von Ärzten mit kürzerer Tätigkeitsdauer genutzt.

Betrachtet man die Gruppe derjenigen, welche angegeben hatten, 3D-Scan-Verfahren „häufig“ zu nutzen (n = 71), gesondert im Hinblick auf die alternativ genutzten Abformverfahren, so zeigte sich hier eine ähnliche Rangfolge der genutzten Abformmethoden. Die Doppelmischabformung wurde von 57,5 % der Gruppe als „häufig“ gewählt. Die Korrekturabformung sowie die Einphasenabformung machten mit 33,8 % respektive 22,5 % einen geringeren Anteil aus.

3.2.7 Nutzung von CAD/CAM-Verfahren

Laut Umfrage gaben 75,6 % der Befragten an CAD/CAM-Verfahren für die Laborfertigung von Kronen und Brücken zu nutzen. 24,4 % verneinten diese Frage (n = 406).

Abb. 43 kategorisiert die Beantwortung der Frage nach der Tätigkeitsdauer der Befragten. Es wurde die prozentuale Verteilung innerhalb jeder Gruppe angegeben. Relativ selten wurde die Nutzung von CAD/CAM-Verfahren in der Gruppe Tätigkeitsdauer < 10 Jahre angeführt. Hier gaben lediglich 66,1 % der Befragten aus der Gruppe an, das Verfahren zu nutzen. In der Gruppe 10 bis 20 Jahre wurde die Frage mit 83,1 % hingegen am häufigsten bejaht.

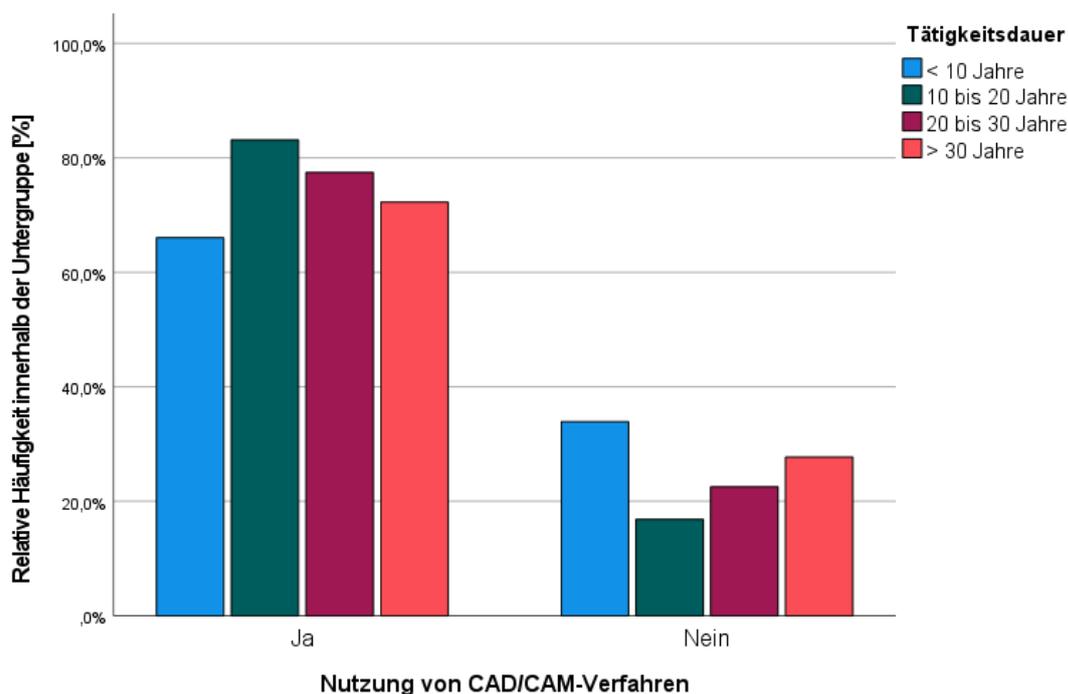


Abb. 43: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Relative Häufigkeiten bezüglich der Antwortmöglichkeiten zur Nutzung von CAD/CAM-Verfahren gruppiert nach Tätigkeitsdauer (n = 406)

Es wurde im Folgenden geprüft, ob innerhalb der Befragung eine statistisch signifikante Korrelation zwischen der Tätigkeitsdauer und der Angabe über die Nutzung von CAD/CAM-Verfahren bestand. Als Analyseverfahren wurde der Mann-Whitney-U-Test genutzt. Der Test ergab einen p-Wert von $p = 0,767$. Da der Wert deutlich über 0,05 war, bestand keine signifikante Korrelation zwischen der Tätigkeitsdauer und der Verwendung von CAD/CAM-Verfahren.

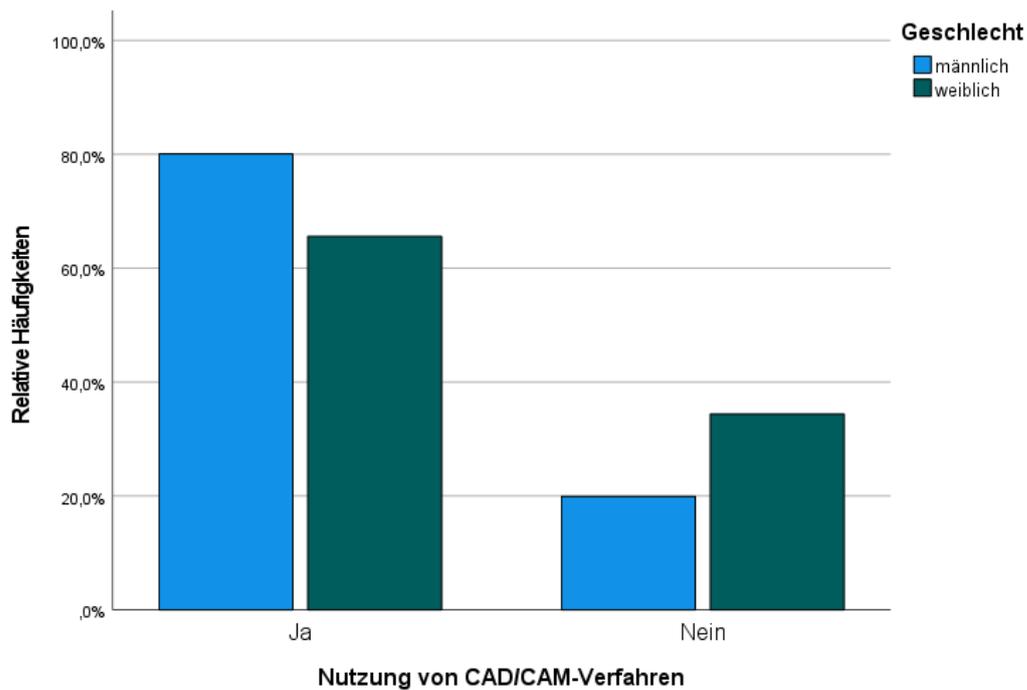


Abb. 44: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Relative Häufigkeiten bezüglich der Antwortmöglichkeiten zur Nutzung von CAD/CAM-Verfahren gruppiert nach Geschlecht (n = 406)

Abb. 44 gruppiert die Beantwortung der Frage nach dem Geschlecht. Hierbei zeigte sich, dass mit 80,1 % ein höherer Anteil innerhalb der männlichen Gruppe die Frage bejaht hatte - verglichen mit 65,6 % seitens der weiblichen Gruppe. Mittels Chi²-Unabhängigkeitstest sollte geprüft werden, ob ein signifikanter geschlechterspezifischer Unterschied hinsichtlich der Beantwortung der Frage bestand. Der Test ergab einen p-Wert von $p = 0,002$. Es bestand also innerhalb der Umfrage ein signifikanter Unterschied: danach wurde die Nutzung von CAD/CAM-Verfahren signifikant häufiger von männlichen Zahnärzten gewählt.

Bei isolierter Betrachtung der CAD/CAM-Verfahren nutzenden Gruppe (n = 307) in Bezug auf die bevorzugt genutzten Abformverfahren, erfolgte die Auswertung getrennt zwischen konventionellen Abformmethoden und 3D-Scan-Verfahren. Hierbei gaben 28,3 % der Befragten an, das 3D-Scan-Verfahren „häufig“ zu nutzen. Die konventionellen Abformungen hingegen wurden von 70,4 % mit „häufig“ angegeben.

In der nicht CAD/CAM-Verfahren nutzenden Gruppe wurden 3D-Scan-Verfahren lediglich von 6,2 % der Befragten als häufig genutztes Abformverfahren angegeben. Die Differenz zwischen beiden Gruppen hinsichtlich der Nutzung von 3D-Scan-Verfahren betrug folglich 22,1 %.

3.2.8 Bevorzugte Lage der Präparationsgrenze

Bezüglich der bevorzugt genutzten Lage der Präparationsgrenze wurde zwischen den Kategorien Front- und Seitenzahnggebiet unterschieden. Es standen als Antwortoptionen jeweils die supra-, äqui- oder subgingivale Lage zur Auswahl. Mehrfachauswahlen waren nicht erlaubt. Tabelle 20 zeigt die prozentualen Verteilungen der Antwortmöglichkeiten:

Tabelle 20: Deskriptive Statistik – Relative Häufigkeiten bezüglich der Frage nach der bevorzugt genutzten Lage der Präparationsgrenze im Front- und Seitenzahnggebiet (n = 406)

Präparationsgrenze	Frontzahnggebiet [%]	Seitenzahnggebiet [%]
<i>supragingival</i>	4,2	18,0
<i>äquigingival</i>	37,7	61,8
<i>subgingival</i>	58,1	20,2

Im Frontzahnggebiet gab mit 58,1 % ein Großteil der Befragten an, die Präparationsgrenze bevorzugt in den subgingivalen Bereich zu legen. Etwas mehr als ein Drittel wählte die äquigingivale Präparationsgrenze. Eine supragingivale Lage der Präparationsgrenze wurde in der Befragung kaum gewählt (4,2 %).

Im Seitenzahnggebiet machte die äquigingivale Lage der Präparationsgrenze den Hauptteil mit 61,8 % aus. Die subgingivale sowie die supragingivale Lage wurden jeweils nur von rund einem Fünftel der Befragten als bevorzugte Lage der Präparationsgrenze gewählt.

Zur Prüfung, ob es sich hierbei um signifikante Ergebnisse handelte, wurde zum Vergleich der kategoriellen Variablen der Chi²-Unabhängigkeitstest genutzt. Der Test ergab einen p-Wert von $p \leq 0,001$. Somit unterschied sich die Lage der Präparationsgrenze signifikant zwischen Front- und Seitenzahnggebiet. Im Frontzahnggebiet wurde häufiger eine subgingivale Lage der Präparationsgrenze und im Seitenzahnggebiet häufiger eine supra- bzw. äquigingivale Lage der Präparationsgrenze angegeben.

Die Balkendiagramme in Abb. 45 und Abb. 46 zeigen die Verteilung der als „häufig“ angewandten angegebenen Abformverfahren in Abhängigkeit von der bevorzugt genutzten Lage der Präparationsgrenze. In drei Fällen wurde keine der vorgegeben Abformmethoden als „häufig“ markiert.

Für das Frontzahnggebiet galt: In jeder Gruppe machte die Doppelmischabformung mit rund 40 % die am häufigsten genutzte Abformmethode aus. Die Einphasenabformung wurde mit 28 % am häufigsten bei supragingivaler Präparationsgrenze im Frontzahnggebiet gewählt. Die Korrekturabformung wurde ebenfalls mit 28 % in der supragingivalen Gruppe präferiert; wurde aber auch von rund einem Viertel innerhalb der subgingivalen Gruppe bevorzugt. 3D-Scan-Verfahren wurden am häufigsten in der äquigingivalen Gruppe mit 20,3 % gewählt.

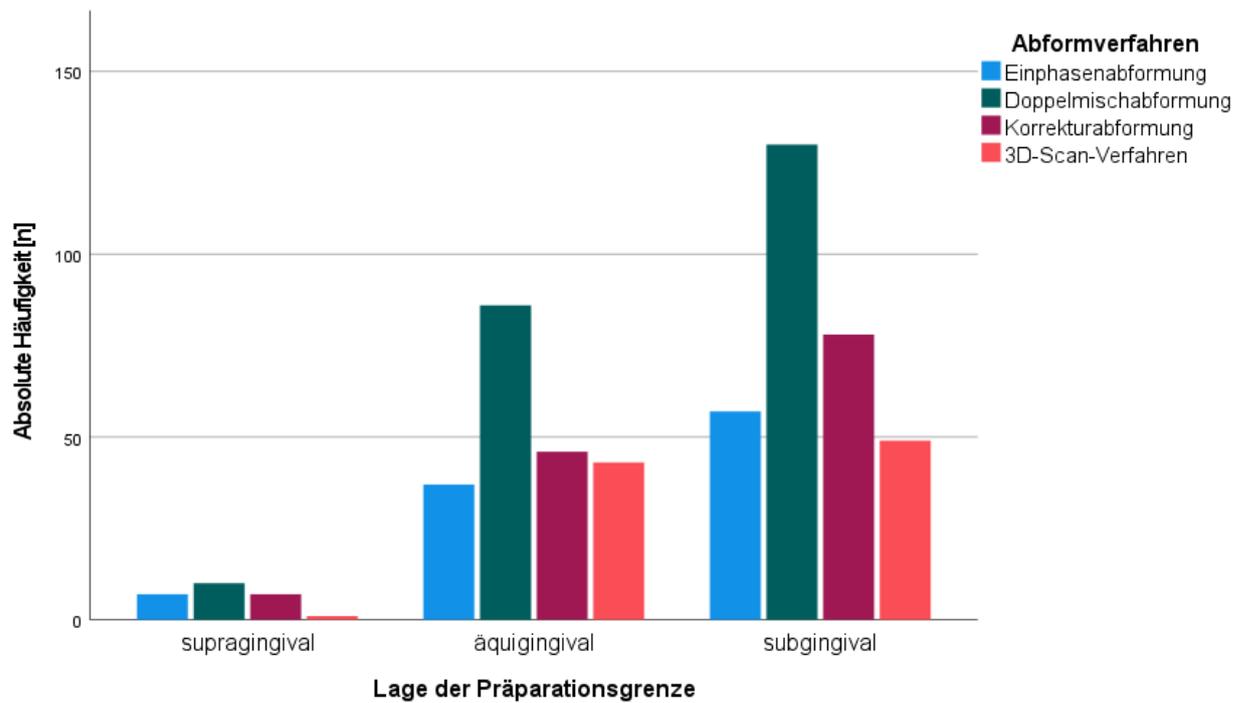


Abb. 45: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Bevorzugt gewählte Lage der Präparationsgrenze im FZG gruppiert nach dem bevorzugt gewählten Abformverfahren (n = 403)

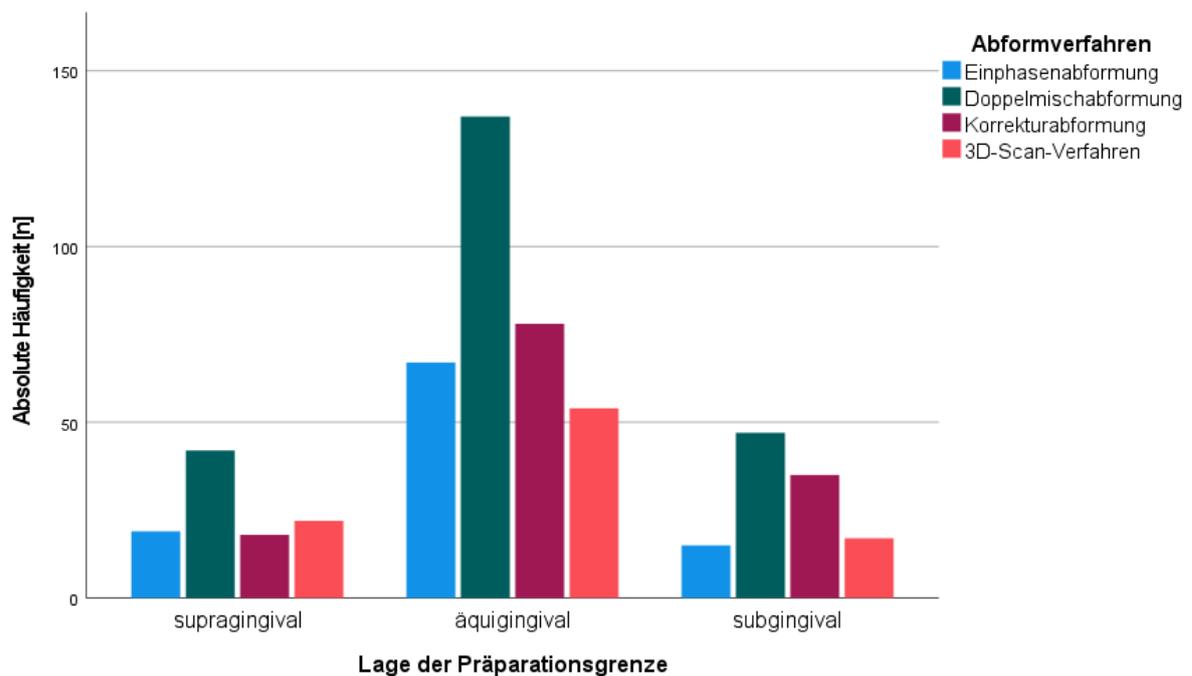


Abb. 46: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Bevorzugt gewählte Lage der Präparationsgrenze im SZG gruppiert nach dem bevorzugt gewählten Abformverfahren (n = 403)

Ein ähnliches Bild zeigte sich bei Betrachtung des Seitenzahnggebietes. Auch hier machte die Doppelmischabformung mit jeweils rund 40 % die bevorzugt genutzte Abformmethode aus. Die Korrekturabformung wurde mit 30,7 % bei subgingivaler Lage der Präparationsgrenze im Seitenzahnggebiet bevorzugt. Die Einphasenabformung wurde ähnlich wie im Frontzahnggebiet anteilmäßig am häufigsten bei supra- und äquigingivaler Lage der Präparationsgrenze gewählt. 3D-Scan-Verfahren wurden relativ zu den übrigen Abformverfahren mit 21,8 % am häufigsten bei supragingivaler Lage im Seitenzahnggebiet gewählt.

Weiterhin wurde getestet ob ein signifikanter Zusammenhang zwischen „häufiger“ Nutzung der Abformmethode 3D-Scan-Verfahren und der Bevorzugung einer supra- bis äquigingivalen Lage der Präparationsgrenze bestand. Um zu testen, ob die Variablen signifikant korrelierten, wurde der Kruskal-Wallis-Test herangezogen. Der Test wurde sowohl für das Front- als auch für das Seitenzahnggebiet durchgeführt. Für das Frontzahnggebiet resultierte ein p-Wert von $p = 0,263$ und für das Seitenzahnggebiet ein p-Wert von $p = 0,338$. Da beide p-Werte größer als 0,05 waren, bestand kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Verwendung des 3D-Verfahrens und der Lage der Präparationsgrenze.

3.3 Vergleich zwischen Labor- und Fragebogenauswertung

Abschließend wurden Labor- und Fragebogenauswertung verglichen. Hierbei wurden die Parameter Präparationsdesign und KW untersucht.

3.3.1 Präparationsdesign

Es wurde zunächst die Frage untersucht, ob ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen der im Fragebogen angegebenen bevorzugten Präparationsform und der im Labor ermittelten Präparationsform im Hinblick auf die Materialien K, M, VK, VM bestand.

Im Fragebogen wurde für alle vier Materialien mit großer Mehrheit die Hohlkehle als bevorzugte Präparationsform angegeben. Für das Material Keramik war die Hohlkehle mit 73,6 % die bevorzugte Methode. Bei den Materialien Metall belief sich der relative Anteil auf 82,0%, bei Metall mit Keramikverblendung auf 90,4 % und bei Keramik mit Keramikverblendung auf 71,4%.

Um zu vergleichen, ob die entsprechenden Prozentzahlen im Labordatensatz signifikant von den im Umfragedatensatz ermittelten Prozentzahlen abwichen, wurde der Binomialtest angewandt.

Daraus ergaben sich folgende Ergebnisse:

- Keramik: Es wurde zu 58,5 % die Hohlkehle als Präparationsform verwendet. Dieser Wert ist signifikant niedriger als im Umfragedatensatz ($p \leq 0,001$).
- Metall: Es wurde zu 43,5 % die Hohlkehle als Präparationsform verwendet. Dieser Wert ist signifikant niedriger ($p \leq 0,001$) als im Umfragedatensatz ($p \leq 0,001$).
- Metallgerüst mit Keramikverblendung: Es wurde zu 49,3 % die Hohlkehle als Präparationsform verwendet. Dieser Wert ist signifikant niedriger als im Umfragedatensatz angegeben ($p \leq 0,001$).
- Keramikgerüst mit Keramikverblendung: Es wurde zu 62,5 % die Hohlkehle als Präparationsform verwendet. Dieser Anteil war erneut signifikant niedriger als der Anteil im Umfragedatensatz ($p \leq 0,001$).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die bevorzugte Präparationsform der Hohlkehle in der Praxis somit deutlich seltener angewandt wurde als man es gemäß der Umfrageergebnisse erwarten würde.

3.3.2 Konvergenzwinkel

Zum Vergleich zwischen gemessenem KW und dem bevorzugt angegebenen KW wurde die Auswertung getrennt nach den vier unterschiedlichen Materialien vorgenommen. Ebenso wurde zwischen Kronen- und Brückenversorgungen unterschieden, da sich hier zuvor ein signifikanter Unterschied zwischen den Versorgungsformen hinsichtlich des Konvergenzwinkels bei der Laborauswertung ergeben hatte.

Im Fragebogen wurde für metallische Hülsenkronen in 71,2 % der Fälle ein Präparationswinkel zwischen 0 bis 6° angegeben. Für keramische Hülsenkronen wurde mit 49,3 % ebenfalls in der Mehrheit der Fälle ein Präparationswinkel von 0 bis 6° angegeben.

Um zu untersuchen, ob diese Angaben signifikant von den im Labordatensatz verwendeten Konvergenzwinkeln abwichen, wurde der Binomialtest angewandt. Hierbei ist zu beachten, dass der Konvergenzwinkel im Labordatensatzes dem zweifachen Präparationswinkel aus dem Umfragedatensatz entsprach. Zudem wurden fehlerhafte präparierte Zähne mit negativem Präparationswinkel zuvor ausgeschlossen.

Tabelle 21 fasst die Ergebnisse des Binomialtestes zusammen. Es wurde geprüft, ob der im Fragebogen bevorzugt gewählte KW von 0° bis 12° sich in seiner Auftretenswahrscheinlichkeit signifikant von der Auftretenswahrscheinlichkeit in der jeweiligen untersuchten Laborstichprobe unterschied.

Tabelle 21: Interferenzstatistik – Ergebnisse des Binomialtestes zum Vergleich Fragebogen- und Laborauswertung in Bezug auf den Konvergenzwinkel 0° bis 12°

Versorgungsform	Material	Konvergenzwinkel	Auftretenswahrscheinlichkeit Fragebogen [%]	Auftretenswahrscheinlichkeit Laborauswertung [%]	p-Wert
Krone	Keramik	vo (n = 435)	71,2	12,0	≤ 0,001
		md (n = 434)	71,2	19,4	≤ 0,001
	Metall	vo (n = 61)	49,3	6,6	≤ 0,001
		md (n = 62)	49,3	12,9	≤ 0,001
Brücke	Keramik	vo (n = 429)	71,2	12,4	≤ 0,001
		md (n = 419)	71,2	26,0	≤ 0,001
	Metall	vo (n = 26)	49,3	15,4	≤ 0,001
		md (n = 25)	49,3	12,0	≤ 0,001

Den Ergebnissen ist zu entnehmen, dass sich die Auftretenswahrscheinlichkeit sämtlicher betrachteter KW der Laborauswertung signifikant ($p \leq 0,001$) von den Ergebnissen der Umfrage unterschieden. In der Umfrage wurde der Winkel von 0 bis 12° mit einer Häufigkeit zwischen 49,3 % für Keramikrestorationen und 71,2 % für metallische Restorationen angegeben. Die im Labor vermessenen Zähne wiesen hingegen je nach betrachtetem Material den entsprechenden Winkel nur in minimal 6,6 % bis maximal 26,0 % der Fälle auf.

Insgesamt wurden also die im Umfragedatensatz bevorzugten Winkel im Labordatensatz sehr viel seltener verwendet als in der Umfrage angegeben. Im Labordatensatz wurden größere Winkel verwendet als im Bereich zwischen 0° bis 12°. So liegt im Labordatensatz der Durchschnitt des vestibulär-oralen KW bei 25,41° (n = 952) und der des mesial-distalen KW bei 22,86° (n = 940).

4 Diskussion

4.1 Methodenwahl

In dieser Studie wurde die Präparationsweise von Zahnärztinnen und Zahnärzten anhand von digitalen Präparationsscans und einer Umfrage untersucht. Zu diesem Zweck wurden sowohl eine retrospektive Studie als auch eine Querschnittsstudie durchgeführt.

4.2 Diskussion der Dentallaboraauswertung

4.2.1 Methodenkritik

In der Laborauswertung wurden natürliche für die Aufnahme von Kronen- und Brückenversorgungen präparierte Zähne berücksichtigt. Teleskoparbeiten oder Hybridversorgungen wurden nicht eingeschlossen. Ebenso beschränkten sich die ausgewerteten Versorgungsarten auf Keramik-, Metall- sowie keramisch verblendete Restaurationen. Hierfür wurde ausschließlich auf digitalisierte Präparationen zurückgegriffen. Ähnliche zuvor durchgeführte Studien wie die von *Schiefelbein* und *Güth et al.* griffen methodisch ebenfalls auf die Auswertung von digitalen STL-Datensätzen zurück. Die Autoren schrieben dem Verfahren eine gute Eignung und Reproduzierbarkeit zu (*Güth et al. 2013*, *Schiefelbein 2015*).

Zur Rekrutierung der Scans wurde mit fünf Großlaboren innerhalb Nordrhein-Westfalens zusammengearbeitet. Die Präparationsscans stammten hierbei von niedergelassenen Zahnärztinnen und Zahnärzten.

Die Auswahl der Scans sollte randomisiert durch die Mitarbeiter des Labors nach dem auf Seite 33 angegebenen Anonymisierungsverfahren. Um ein repräsentatives, möglichst unverzerrtes Ergebnis zu erhalten, galt es eine möglichst hohe Anzahl unterschiedlicher Zahnärztinnen und Zahnärzte den rekrutierten Scans zugrunde zu legen. Dazu sollte zur Vermeidung von Doppelauswertungen pro Behandelndem jeweils nur eine Versorgungsform je berücksichtigten Materialtyp herangezogen werden. Praktisch erwies sich diese Herangehensweise als äußerst zeitaufwendig und nur bedingt durch die Mitarbeitenden der Dentallabore leistbar. Lediglich ein Labor führte die randomisierte Auswahl der Scans komplett eigenständig durch. In den übrigen Fällen wurden die Rekrutierung und Anonymisierung der Scans durch den Doktoranden selbst vor Ort am PC-Arbeitsplatz durchgeführt.

Abhängig von der genutzten Dental-Software konnten die Vorgaben zur Auswahl der Scans unterschiedlich genau umgesetzt werden. Die Dentalsoftware *Exocad* ermöglichte durch Sortierung der Arbeitsaufträge nach Behandelnden eine zufriedenstellende Umsetzung des beschriebenen Procederes. Die verschiedenen Versorgungen der Zahnärztinnen oder Zahnärzte wurden anschließend - der chronologischen Sortierung der Software folgend ausgewählt - bis man sofern vorhanden auf maximal vier verschiedene Versorgungen desselben Zahnarztes gekommen ist. Die ebenfalls teilweise in den Dentallaboren verwendete Software *3shape* hingegen ließ keine Behandler-abhängige Sortierung zu. Um dennoch die Anzahl an Mehrfachauswertungen so gering wie möglich zu halten, wurden aus dem Daten-Pool aller im ausgewählten Zeitraum zur Verfügung stehenden Arbeitsaufträge die Scans der Präparationen randomisiert ausgewählt. Mehrere Auswertungen von unterschiedlichen

Präparationen desselben Zahnarztes oder derselben Zahnärztin ließen sich auf diese Weise höchstwahrscheinlich jedoch nicht gänzlich vermeiden.

Eine Schwierigkeit stellte ebenso eine vereinheitlichende Festlegung der Präparationsempfehlungen dar, um so die gemessenen Werte gegenüber Referenzwerten einordnen zu können. Die Angaben aus Lehrbüchern und Herstellerangaben sind teilweise heterogen.

Bezüglich der Präparationsform wird einheitlich ein Hohlkehl- oder Stufenpräparation mit abgerundeter Innenkante für Keramiken angeraten. Tangentialpräparationen gelten für keramische Materialien als kontraindiziert. Ebenso fällt ein Großteil der empfohlenen Präparationswinkel in den Bereich zwischen 3° bis 6°.

Anders verhält es sich hingegen bei Betrachtung der Mindestabtragstiefen. Die Angaben zu empfohlenen Wandstärken differieren abhängig von der eingesetzten Zirkonoxidkeramik und geplanten Restaurationsform. Die Empfehlungen der Hersteller waren zum Teil sehr viel detaillierter. So gaben Hersteller wie *Ivoclar* für ihre Zirkonoxid-Keramiken der *ZirCAD*-Reihe (*Ivoclar vivadent IPS e.max ZirCAD*) je nach Keramiktyp, Lokalisation und Versorgungsart teils Mindestwandstärken von nur 0,4 mm bis 0,6 mm sowohl okklusal / inzisal als auch marginal an (Firma-Ivoclar-Vivadent 2019). Empfehlungen der Firma *VITA* zur Präparationsbreite unterschieden sich stärker. Je nach Keramiktyp der Reihe *VITA YZ* werden Mindestschichtstärken von 0,4 mm bis 1,2 mm gefordert (Firma-Vita-Zahnfabrik 2019).

Die aus den Literaturangaben ermittelten Präparationstiefen für Zirkonoxidkeramiken liegen je nach Quelle für die zirkuläre Präparation zwischen minimal 0,4 mm bis maximal 1,5 mm (Edelhoff und Kern 2003, Rudolph und Luthardt 2008). Im okklusal / inzisalen Bereich werden teils mindestens 2,0 mm gefordert (Goodacre et al. 2001, Edelhoff und Kern 2003). Betrachtet man ausschließlich aktuellere Fachliteratur, so scheint sich jedoch – einhergehend mit den stabileren Zirkonoxidkeramiken – die minimalinvasivere Präparationsweise auch in den Empfehlungen stellenweise niedergeschlagen zu haben. Hier werden ebenfalls, in Übereinstimmung mit den Herstellerangaben, als unterer Grenzwert teils marginale Präparationsbreiten von 0,5 mm als ausreichend angesehen (Kern et al. 2015). Im Bereich der okklusalen / inzisalen Zahnflächen werden jedoch auch in aktuelleren Quellen nach wie vor mindestens 1,5 mm Schnitttiefe gefordert (Kern et al. 2015, Podhorsky et al. 2015).

Bezüglich vollverblendeter Restaurationen zeigte sich, dass vereinzelt nicht mehr zwischen keramisch verblendeten Metall- und keramisch verblendeten Keramikrestaurationen unterschieden wurde. So sprechen *Beuer et al.* lediglich von „Verblendkronen“ (Beuer et al. 2011). In Anbetracht der Tatsache, dass sich die in Lehrbüchern geforderten Wandstärken von Zirkonoxidgerüsten mit 0,4 mm (Lohbauer et al. 2018) heutzutage kaum noch von Metallgerüsten unterscheiden, ist eine Unterscheidung bei Präparationsbreiten wohlmöglich ohnehin obsolet. Teilweise blieb indes unklar ob die empfohlenen Mindeststärken nur für das Gerüst oder für die Summation aus Gerüst und Verblendung galten. *Kern et al.* empfehlen in ihrem Leitfaden marginale Präparationsbreiten von 1,2 mm für verblendete Zirkongerüste und liegen damit in einem ähnlichen Bereich wie die herstellerseitig empfohlenen 1,0 mm bis 1,2 mm. Im okklusal / inzisalen Bereich werden Schichtdicken von 1,2 mm bis 2,0 mm empfohlen (Beuer et al. 2011, Kern et al. 2015, Firma-Dentsply-Sirona-Lab 2019, Firma-Vita-Zahnfabrik 2019). Ähnliche Werte wurden für metallkeramische Restaurationen vorgefunden.

Für Metallversorgungen wurden herstellerseitig sowohl zirkulär als auch im kaulasttragenden Zahnbereich Mindestschichtstärken von 0,3 mm bis 0,5 mm gefordert. Empfehlungen für reine Metallversorgungen waren in der Literatur seltener anzufinden und lagen zwischen 0,3 mm und 0,8 mm zirkulär sowie 0,5 mm bis 1,0 mm okklusal (Kimmel 1997, Goodacre et al. 2001, Beuer et al. 2011, Podhorsky et al. 2015, Firma-Ivoclar-Vivadent 2019, Firma-Wegold 2019)

Die Fülle unterschiedlicher Angaben macht es schwierig einen Gesamtüberblick zu erlangen. Aktuelle vereinheitlichende Leitlinien sind nicht verfügbar. Die bei der statistischen Analyse festgelegten Referenzwerte für die Mindestabtragstiefen sind folglich nicht als ultimativ anzusehen. Vielmehr stellen sie einen Kompromiss aus Literatur- und Herstellerangaben dar.

4.2.2 Stichprobenumfang

Insgesamt flossen $n = 1002$ digitalisierte Präparationen in die Auswertung ein. Diese gliederten sich in $n = 525$ Kronen- und $n = 477$ Brückenversorgungen auf. Das Konstruktionsdatum der Arbeitsaufträge durfte hierbei maximal drei Jahre zurückliegen.

Keramische Versorgungen machten den höchsten Anteil aller ausgewerteten Präparationsscans aus. Es wurden $n = 342$ für die Aufnahme von keramischen Vollkronen präparierte Zähne ausgewertet. Hierunter entfielen fast ausschließlich Zirkonoxidkeramikversorgungen. In lediglich $n = 3$ Fällen wurde eine Lithium-Disilikat-Glaskeramik-Versorgung ausgewertet. Metallische Verblendkronen machten mit $n = 296$ und keramische Verblendkronen mit $n = 272$ ausgewerteten Präparationen zwei näherungsweise gleich große Anteile aus. Auf metallische Vollkronen entfiel mit $n = 92$ Auswertungen der geringste Anteil. Die Messungen zu Metallversorgungen im Frontzahnbereich stützten sich auf lediglich $n = 3$ ausgewertete metallische Vollkronen und $n = 1$ ausgewertete Brücke im Frontzahnbereich. Der geringe Stichprobenumfang in dieser Untergruppe lässt sich trivial dem mitteleuropäischen Ästhetikempfinden zuordnen.

Verglichen mit ähnlichen zuvor durchgeführten Studien ist dieser Stichprobenumfang als hoch einzuschätzen. *Hinkelmann* stützte ihre Ergebnisse zwar auf $n = 970$ Kronen- und Brückenpräparationen, jedoch wurden die Präparationen hier nicht eigenständig vermessen. Die Ergebnisse resultierten aus $n = 51$ ausgefüllten Fragebögen, welche damals von $n = 14$ unterschiedlichen Dentallaboren ausgefüllt wurden. *Wimmer* untersuchte $n = 218$ präparierte Zähne an $n = 100$ unterschiedlichen Modellen. Die untersuchten Modelle stammten jedoch lediglich von $n = 16$ unterschiedlichen Zahnärzten, weshalb hier von Verzerrungen durch Mehrfachauswertungen desselben Behandelnden auszugehen ist. *Schiefelbeins* Datensatz umfasste $n = 79$ präparierte Zähne, wobei hier auch $n = 27$ in vitro-Präparationen mit einfließen. In diese Studie flossen jedoch ausschließlich vollkeramische Frontzahnkronen des Zahnes 21 ein. *Güth et al.* analysierten $n = 75$ Datensätze von für die Aufnahme von Zirkonoxidkeramikronen präparierten oberen rechten ersten Molaren (*Hinkelmann 1993, Wimmer 2009, Güth et al. 2013, Schiefelbein 2015*).

4.2.3 Auswertungsverfahren

Bei den für diese Auswertung zugrunde liegenden Modellen handelte es sich um Sägeschnittmodelle. Es wurde der Ist-Zustand von Objekten analysiert, die Zwischenprodukte einer bereits stattgefundenen Prozesskette darstellten. Jeder zuvor durchgeführte Arbeitsschritt bot hierbei die Gefahr von potenziellen Fehlerquellen unterschiedlicher Gewichtung, die zu Verzerrungen der nachfolgenden Messungen geführt haben konnten. Die Hauptfehlerquelle in der Überführung der anatomischen Ausgangssituation aus dem Patientenmund hin zu einem digitalisierten Präparationsmodell dürfte hierbei vermutlich in potenziellen Mängeln beim Abformvorgang oder der Modellherstellung gelegen haben. Die sich heutzutage auf dem Markt befindlichen und in den Laboren eingesetzten Modellscanner weisen Messgenauigkeiten von $< 10 \mu\text{m}$ (Quaas et al. 2006). Durch den Digitalisierungsprozess der Zahnstümpfe auftretende Ungenauigkeiten sind demnach als vernachlässigbar gering einzustufen. Erwähnenswert ist jedoch auch die zuvor stattgefundenene Festlegung und Unterkehlung der Präparationsgrenze durch Zahntechnikerinnen und Zahntechniker. Es kann bei diesem laborseitigen Arbeitsschritt folglich zu fehlerhaft festgelegten Präparationsgrenzen oder auch versehentlichen Manipulationen der marginalen Präparationsgrenzen durch die Fräse des Handstücks bei Freilegung der Präparationsgrenze gekommen sein. Der Einfluss derartiger Fehlerquellen und mögliche Auswirkungen auf die nachfolgenden in dieser Studie durchgeführten Messungen sollen daher nicht unerwähnt bleiben. Es konnte zudem kein Rückschluss auf die relative Lage der Präparationsgrenze bezüglich des Zahnfleischniveaus – also eine Klassifikation nach supra-, äqui- oder subgingivaler Lage der Präparationsgrenze – erfolgen.

Ebenso lag keine Information darüber vor, ob es sich bei den jeweils untersuchten Restaurationen um eine Erstversorgung oder die vollständige oder teilweise Neuherstellung einer bereits vorhandenen festsitzenden Restauration handelte. Bei Wiederholungsversorgungen besteht naturgemäß ein kleinerer Spielraum, eine ideale Präparation durchzuführen.

Die Dentalsoftware *Exocad* diente als Auswertungssoftware für die angestrebte Vermessung der Präparationsstümpfe. Die Beschränkung auf eine rein digitale Durchführung der Laborauswertung ermöglichte quantitativ eine hohe Gesamtanzahl an ausgewerteten Präparationen. Zeitaufwendige Arbeitsschritte wie Modellherstellung und apparative Messaufbauten entfielen. Qualitativ lieferte *Exocad* mit auf zwei Nachkommastellen genau gerundeten Ergebnissen bei den Messungen im Millimeter- oder Gradbereich ebenfalls eine für die Zwecke dieser Studie als zufriedenstellend anzusehende Genauigkeit. Die Software bot mit den zweidimensionalen Schnittbildansichten zudem eine hilfreiche Visualisierungsmöglichkeit, um die nötigen Messungen durchzuführen. Mithilfe der Orientierung an Gitternetzlinien und der freien Verschiebbarkeit der Zahnquerschnitte innerhalb dieser Ansichten konnte eine Standardisierung und damit Reproduzierbarkeit der Messvorgänge ermöglicht werden. Ferner konnten die teils nicht auf Anhieb erkennbaren Übergänge von Hohlkehle oder Stufe in die axiale Zahnfläche und damit die Präparationsbreite durch das Anlegen von Tangenten auf diese Weise exakt definiert werden.

Anatomische Ausgangssituation, Lage des Zahnes, Sichtverhältnisse und Erfahrung des Behandelnden stellen unter anderem sich auf die Prozessqualität auswirkende Variablen bei der zahnärztlichen Präparation dar und zeichnen diesen anspruchsvollen Arbeitsschritt aus. Dem geschuldet unterlagen die vorliegenden Präparationen qualitativ einem hohen Maß an interindividueller Variabilität. Geometrisch gesehen bildete der beschliffene Zahn meist also kein homogenes zylinder- oder kegelförmiges Gebilde. Vielmehr setzte sich jeder auszuwertende Zahn aus einer Vielzahl von Flächen unterschiedlicher Neigungswinkel und

Präparationstiefen zusammen. Ziel war es also die Geometrie des Präparationsstumpfes näherungsweise an charakteristischen Zahnflächen zu erfassen.

Um repräsentative und reproduzierbare Messergebnisse zu erhalten, wurde jeder Zahn zuvor in acht unterschiedliche Zahnflächen unterteilt. Dabei stellten die geringste marginale Präparationsbreite und damit geringste Schichtdicke die limitierenden Faktoren für die spätere Restauration dar. Aufgrund der Inhomogenität der Präparationsbreite wurde die bei okklusaler Aufsicht als am kleinsten erscheinende Breite innerhalb der Begrenzungen der auszuwertenden Zahnfläche gewählt. Hier kann es perspektivisch bedingt zu geringfügigen Fehleinschätzungen gekommen sein.

Die Messung des Präparationswinkels richtet sich nach dem Verlauf der Zahnachse. Diese Achse ist eine gedachte Linie und kann nur näherungsweise bestimmt werden. Präparationsvorgänge, die sich nicht an der Zahnanatomie orientieren, können die Zahnachse verfälschen. Da der einzelne Präparationsstumpf in der Schnittbildansicht frei rotiert werden konnte, hing hiervon auch die Größe des anschließend gemessenen Präparationswinkels ab. Die Ausrichtung des auszuwertenden Zahnes unterlag daher einer gewissen Variabilität. Die Betrachtung des einzelnen Präparationswinkels hatte somit eine eingeschränkte Aussagekraft: er war stark von der zuvor vorgenommenen Rotation des Zahnes in der zweidimensionalen Schnittbildansicht abhängig. Die beiden gegenüberliegenden Präparationswinkel verhalten sich jedoch invers zueinander und summieren sich unabhängig von der zuvor vorgenommenen Rotation stets zum gleichen Konvergenzwinkel. Beispielsweise kann ein „zu konisch präparierter Winkel im distalen Bereich durch eine entsprechende Steilheit mesial ausgeglichen werden“. Man sollte zur Einschätzung der Konizität daher stets den Konvergenzwinkel betrachten (Erhatič und Blankenstein 2013). Das primäre Augenmerk wurde daher in dieser Studie auf den Konvergenzwinkel gelegt.

Ebenso waren die Übergänge zwischen den verschiedenen Präparationsformen teilweise fließend. Die Klassifikation unterlag somit in einigen Fällen einem subjektivem Ermessensspielraum. Zu dünn auslaufende hohlkehlförmige Präparationen mit Präparationsbreiten von kleiner als 0,15 mm wurden als Tangentialpräparationen gewertet. Fehlerhaft präparierte dachrinnenförmige Präparationsränder wurden als solche gesondert klassifiziert.

4.2.4 Diskussion der Präparationsform

Die Stufenpräparation stellte in der Studie als Hauptpräparationsform eine Rarität dar. Ihre Häufigkeit lag über alle ausgewerteten Zähne hinweg bei unter 1 % (n = 10 von n = 1002). Diese Zahl ist im Kontext der bisher vorliegenden Studien als niedrig einzuschätzen. In der 1993 von *Hinkelmann* durchgeführten Befragung der Dentallabore wurde die Stufenpräparation mit einer relativen Häufigkeit von 15 % angegeben (n = 970). *Wimmer* konnte bei 11,9 % der ausgewerteten Präparationen (n = 218) und *Schiefelbein* bei rund 9 % (n = 57) der in vivo untersuchten vollkeramischen Frontzahnkronen eine Stufenpräparation feststellen (Hinkelmann 1993, Wimmer 2009, Schiefelbein 2015). Auf Grundlage der Messergebnisse dieser Untersuchung scheint sich bei chronologischer Betrachtung der Studienergebnisse somit ein Trend weg von der Stufenpräparation hin zu einer steilen Hohlkehle abzuzeichnen.

Den weitaus größeren Anteil der Hauptpräparationsformen machten mit 59 % Hohlkehle- (n = 646 von n = 1002) und mit 40 % Tangentialpräparationen aus (n = 439 von n = 1002). Untergliedert man diese Häufigkeitsverteilung weiter in die einzelnen Materialien, so konnte für K und VK Restaurationen die Hohlkehle als Hauptpräparationsform signifikant am häufigsten nachgewiesen werden (K = 61 %; VK = 65 %). Für MV Restaurationen hingegen bestand kein signifikanter Unterschied zwischen Tangential- und Hohlkehlepräparationen (p = 0,907; Hohlkehle = 54 %; Tangential = 45 %). Metallische Restaurationen wiesen annähernd gleich häufig die beiden Präparationsformen auf (Hohlkehle = 49 %; Metall = 51 %).

Hinkelmann bezifferte den Anteil an Hohlkehlepräparation in ihrer Studie auf 47 %, während 38 % der betrachteten Zähne Tangentialpräparationen aufwiesen. *Wimmer* kam unabhängig von der betrachteten Versorgungsform auf einen Anteil von rund 19 % tangential präparierter Zähne und rund 69 % Hohlkehlepräparationen. Kritisch anzumerken bei besagter Studie ist jedoch, dass lediglich die vestibuläre Zahnfläche als ausschlaggebendes Kriterium zur Festlegung der Präparationsform herangezogen wurde, wodurch das Gesamtergebnis ungenau sein könnte. *Schiefelbein* bemaß den Anteil an Hohlkehlepräparation über alle Zahnflächen hinweg nach Auswertung der vollkeramischen Frontzahnkronen auf circa 82 %, während die Tangentialpräparation mit rund 6 % sehr viel seltener vorkam. Die von *Güth et al.* ausgewerteten Präparationen für Vollkeramikrestaurationen zeigten in 62 % der Fälle ein Hohlkehldesign (n = 75). 21 % wiesen eine Tangential- und 16 % eine Stufenpräparation auf (Hinkelmann 1993, Wimmer 2009, Güth et al. 2013, Schiefelbein 2015).

Im direkten Vergleich mit den beiden letztgenannten Studien stellt sich die Verteilung des Präparationsdesigns der in dieser Studie n = 342 ausgewerteten Vollkeramikversorgungen gänzlich anders dar. Hier fanden sich zu rund 61 % Hohlkehlepräparationen und 38 % tangential präparierte Zähne. Dieser Unterschied lässt sich vermutlich teilweise zumindest durch die bei *Schiefelbein* durchgeführten reinen Betrachtung von Restaurationen im Frontzahnbereich und damit einhergehenden einfacheren Präparationsbedingungen erklären.

Betrachtet man die für rein keramische und keramisch verblendete Restaurationen (n = 910) präparierten Zahnflächen gebündelt, so lässt sich bemängeln, dass mit 41,2 % der n = 7280 ausgewerteten Zahnflächen ein hoher Anteil ein tangenciales und damit nicht keramikkonformes Randedesign aufwies. Knapp ein Zehntel dieser Versorgungsformen wurde gar rein tangential präpariert.

Die in Literatur und Industrie vorgegebenen Empfehlungen bezüglich des Designs im Bereich der marginalen Präparationsgrenze sind weitestgehend eindeutig. Autoren und Hersteller fordern für ein ausreichend hohes Maß an Stabilität im Bereich der marginalen Präparationsgrenze und suffiziente Aufnahme der Kaukräfte eine Hohlkehle- oder Stufenpräparation mit abgerundeter Innenkante (Baltzer 2008, Kern et al. 2015, Podhorsky et

al. 2015, Firma-Dentsply-Sirona-Lab 2019, Firma-Bego 2020). Vergleicht man die ermittelten Präparationsformen hiermit, so weicht ein relevanter Anteil der in der Studie ausgewerteten Präparationen für keramische Restaurationen von diesen Empfehlungen ab. In Anbetracht der Tatsache, dass Tangentialpräparationen zu dünn auslaufenden frakturgefährdeten Kronenrändern und Überkonturierungen im Bereich der marginalen Präparationsgrenze mit konsekutiven parodontalhygienischen Komplikationen führen, stellt dies einen verbesserungswürdigen Zustand dar. *Sailer et al.* berichten in ihrem systematischen Review von Abplatzungen der Verblendkeramiken als häufigste „technische Komplikation“ bei keramischen Verblendkeramiken. So ermittelten sie eine durchschnittliche 5-Jahres-Komplikationsrate von 13,6 %. Wobei metallische Verblendkronen in dieser Studie eine signifikant höhere Überlebensrate ($p \leq 0,001$) zeigten, da sie unter einem geringeren Risiko für Verblendfrakturen und Retentionsverlust im *Follow-up* litten (Sailer et al. 2007, Sailer et al. 2015). *Güth et al.* konnten in ihrer Studie nur in rund einem Viertel der $n = 75$ ausgewerteten Vollkeramikpräparationen ein „keramikkonformes Randdesign“ feststellen (Güth et al. 2013).

In dieser Studie muss hingegen festgehalten werden, dass materialabhängig zwischen 39,7 % bis 46,7 % der für die Aufnahme von K, VK oder VM präparierten Zähne Tangentialpräparationen als Hauptpräparationsform aufwiesen und damit nicht keramikkonform präpariert wurden. Für VM Versorgungen konnte mit $n = 38$ der $n = 296$ für dieses Material ausgewerteten Präparationen der höchste Anteil an ausschließlich tangential präparierten Zähnen nachgewiesen werden.

Die ermittelten Häufigkeitsverteilungen bezüglich der Verteilung von Hohlkehl- und Tangentialpräparationen liegen also eher in einer Größenordnung mit den schon 1993 von *Hinkelmann* publizierten durch die Dentallabore ermittelten Werte. Der von *Wimmer* und *Schiefelbein* sehr viel niedrigere Anteil an Tangentialpräparationen konnte in dieser Studie nicht bestätigt werden (Hinkelmann 1993, Wimmer 2009, Schiefelbein 2015). Die Lage des Zahnes und damit schwierige Präparationsbedingungen im Seitenzahnbereich scheinen ebenso Auswirkungen auf die vorliegende Präparationsform gehabt zu haben. Es wurde ein signifikant häufigeres Vorkommen der technisch einfacher auszuführenden Tangentialpräparation im Seitenzahngebiet festgestellt ($p \leq 0,001$). So lagen in 43,6 % der ausgewerteten Seitenzähne Tangentialpräparationen vor, wohingegen diese Präparationsform im Frontzahngebiet lediglich einen Anteil von 30,2 % ausmachte. Andersherum verhält es sich bei Betrachtung der technisch anspruchsvolleren Hohlkehlpräparation. Hier lagen bei 69,1 % aller ausgewerteten Frontzähne Hohlkehlpräparationen vor, während der Anteil im visuell schlechter einsehbareren Seitenzahngebiet bei lediglich 55,4 % lag ($n = 1002$).

Einige klinische Studien beschreiben neben den betrachteten herkömmlichen Präparationsdesigns eine weitere als biologisch orientiert bezeichnete vertikale Präparationsform. Diese ähnelt der Tangentialpräparation, nur das präparierte und unpräparierte marginale Zahnanteile komplett nahtlos ineinander übergehen. Es ist keine Präparationsgrenze mehr erkennbar und es findet keine horizontale Abstützung der Restauration mehr wie bei einer Hohlkehle oder Stufe statt. Die Präparationsgrenze wird variabel durch das Zahntechniklabor anhand des Zahnfleischverlaufs festgelegt. Das Design wird von den Autoren als technisch einfach auszuführen und substanzschonend beschrieben (Loi und Di Felice 2013). Zudem soll durch Angulation des Präparationsinstrumentes innerhalb des gingivalen Sulkus das umgebende Epithel angefrischt und das darunter liegende Bindegewebe freigelegt werden. Die hierdurch stattfindende „rotierende Kürettage“ soll ebenfalls zu einer parodontalen Stabilisierung der späteren Restauration führen und Rezessionen vorbeugen (Serra-Pastor et al. 2021). *Agustín-Panadero et al.* konnten nach Auswertung von $n = 72$ auf diese Weise präparierte Zahnkronen nach zweijährigem *Follow-up* eine Überlebensrate von 100 % feststellen. Zudem konnten sie bei guter Mundhygiene an allen Zähnen eine „gingivale Verdickung“ und eine Stabilisierung des parodontalen Gewebes

beobachten (Agustín-Panadero et al. 2018). *Serra-Pastor et al.* bestätigen diese Ergebnisse in einer durchgeführten sechsjährigen Beobachtungsstudie. Die Zirkonoxidkeramik-Einzelkronen zeigten eine 97,2-prozentige Überlebenswahrscheinlichkeit. Ebenso konnten „verbesserte Plaque-Indizes, stabile Sondierungstiefen, erhöhte Gingivadicke und stabile Gingivaränder“ festgestellt werden (Serra-Pastor et al. 2021). Fraglich bleibt, inwieweit die zum Großteil um eine Forschergruppe entstandenen Untersuchungen der Universität Valencia unter idealisierten Bedingungen stattgefunden haben und der *Hawthorne-Effekt* (Beobachter-Effekt) zu einem besonders guten Mundhygiene-Verhalten der Probandinnen und Probanden geführt haben könnte mit positiver Auswirkung auf den Outcome.

In der Literatur lassen sich ebenso vereinzelt Studien vorfinden, welche die Überlegenheit der Hohlkehhl- und Stufenpräparationen bei keramischen Versorgungen in Frage stellen. So konnten *Clausen et al.* zumindest bei Kronen aus Leuzit verstärkter oder Lithium-Disilikat-Glaskeramik keinen signifikanten Einfluss des Präparationsdesigns auf die Bruchfestigkeit feststellen (Clausen et al. 2010). *Beuer et al.* maßen die höchste Bruchlast von 0,4 mm dicken Zirkonoxidkeramikappen bei rein okklusal ansetzendem vertikalem Kraftvektor mit 2286 N zwar bei Stufenpräparationen. Jedoch wies die Tangentialpräparationen in diesem Versuchsaufbau mit 2041 N eine um teils mehr als 400 N größere Bruchlast gegenüber hohlkehlförmigen Designs auf (Beuer et al. 2008). Auch *Podhorsky et al.* konnten in Zusammenschau ihrer durchgeführten Metaanalyse keine eindeutige Überlegenheit einer Präparationsform ausmachen (Podhorsky et al. 2015). Letztgenannte Studien bieten perspektivisch gesehen Anlass weitergehende Forschung auf diesem Gebiet zu betreiben und gängige Präparationskonzepte hinsichtlich der empfohlenen Präparationsform gegebenenfalls anzupassen.

4.2.5 Diskussion der okklusalen Schichtdicke

Die Auswertung der gemessenen okklusalen Schichtdicken lieferte einen Median von 1,69 mm und einen Durchschnittswert von 1,86 mm (n = 799). Es konnte gezeigt werden, dass die gemessenen Abstände zum Antagonisten für jede untersuchte Versorgungsform durchschnittlich signifikant höher lagen als es in den Präparationsempfehlungen gefordert wurde ($p \leq 0,001$).

Dem erhöhten Platzbedarf für keramische verblendete Restaurationen scheint bei Betrachtung der Durchschnittswerte Rechnung getragen worden zu sein. So lagen die Durchschnittswerte für VK und VM Restaurationen um 0,22 bis 0,56 mm höher als die Durchschnittswerte für K und M Restaurationen (Mittelwerte K = 1,73 mm mit n = 314; M = 1,53 mm mit n = 78; VK = 1,95 mm mit n = 212; VM = 2,09 mm mit n = 195).

Einschränkend bleibt indes festzuhalten, dass mit 32,5 % bei VK Restaurationen und mit 31,8 % bei VM Restaurationen ein relevanter Anteil an Präparationen die geforderten Mindestschichtdicken von 1,5 mm unterschritt.

Für vollkeramische und metallische Restaurationen wurde in den Präparationsempfehlungen ein geringerer okklusaler Mindestsubstanzauftrag von nur 1,0 mm gefordert. Nach Auswertung der vollkeramischen und metallischen Restaurationen erfüllte ein Anteil von 10,8 % respektive 21,8 % diesen Referenzwert nicht. Bei metallischen Restaurationen sollten allerdings auch geringere Schichtdicken als akzeptabel gelten. *Goodacre et al.* nennen hier 0,5 bis 0,8 mm minimalen okklusalen Auftrag (*Goodacre et al. 2001*). Die Firma *Bego* gibt sogar als absolutes Minimum für ihre Dentallegierung *Wirobond® C+* 0,3 mm Wandstärke nach Ausarbeitung der Restauration an (*Firma-Bego 2018*).

Die Lage des Zahnes im FZG oder SZG hatte ebenfalls einen Einfluss auf die gemessene okklusale Reduktion. So betrugen die im Seitenzahnggebiet (n = 589) gemessenen Abstände durchschnittlich 0,33 mm weniger verglichen mit dem Frontzahnggebiet (n = 210; FZG = 2,10 mm; SZG = 1,77 mm). Durch eingeschränkte Sichtverhältnisse erschwerte Präparationsbedingungen könnten auch hier eine Rolle gespielt haben.

Die von *Güth et al.* vermessenen oberen linken Molaren wiesen nach Präparation für Vollkeramikkrone nur in n = 3 von n = 75 Fällen (4 %) einen interokklusalen Abstand von $\leq 1,0$ mm auf. Die von *Al-Omari et al.* angegebene durchschnittliche inzisale oder okklusale Reduktion lag mit 2,0 mm in einem ähnlichen Bereich wie die in dieser Studie durchschnittlichen 1,89 mm (n = 157) (*Al-Omari und Al-Wahadni 2004, Güth et al. 2013*).

In der von *Wimmer* durchgeführten Studie erfolgte ebenfalls eine material- und lagespezifische Auswertung des interokklusalen Abstandes. Die gemessenen Durchschnittswerte lagen mit 0,99 mm für metallische Vollkronen (n = 42), 1,36 mm für Vollkeramikkrone (n = 39) und 1,38 mm für Metallkeramikkrone (n = 137) insgesamt niedriger als die hier ermittelten Werte. Dennoch scheint der vermehrte Platzbedarf bei keramischen Restaurationen von den Behandelnden auch hier berücksichtigt worden zu sein. Ein anderes Bild – verglichen mit den in dieser Studie gemessenen Werten – zeigte sich hingegen nach Differenzierung zwischen Front- und Seitenzahnggebiet. Sich im Seitenzahnggebiet befindliche Zähne wurden in *Wimmers* Studie mit 1,33 mm (n = 133) ähnlich stark okkusal reduziert wie Frontzähne mit durchschnittlich 1,26 mm (n = 69) (*Wimmer 2009*).

4.2.6 Diskussion der Präparationsbreite

Eine Untergliederung der ermittelten Präparationstiefen in die acht ausgewerteten Zahnflächen, lieferte Durchschnittswerte von minimal 0,50 mm bis maximal 0,62 mm (n = 906). Diese Spannweite von lediglich 0,12 mm bezüglich der Durchschnittswerte ist als relativ gering einzuschätzen. Präparationsbreiten < 0,15 mm wurden als Tangentialpräparationen klassifiziert und flossen nicht in die Berechnung der Präparationsbreiten ein.

Im direkten Vergleich mit den einander gegenüberliegenden Flächen wurde distal (n = 563) um durchschnittlich 0,05 mm breiter präpariert. Vestibulär (n = 660) wurde ebenfalls um 0,04 mm breiter präpariert als oral (n = 553). Die Übergänge mesio-vestibulär (n = 653) mit 0,61 mm, disto-vestibulär (n = 618) mit 0,62 mm und disto-oral (n = 524) mit 0,59 mm wurden insgesamt durchschnittlich am breitesten präpariert. Der Vergleich zwischen einzelnen Zahnflächen lieferte signifikante Unterschiede. So wiesen vor allem die mesiale, orale, distale und mesio-orale Zahnfläche im direkten Paarvergleich mit den durchschnittlichen Präparationsbreiten der übrigen Zahnflächen zum Teil signifikant niedrigere Breiten auf. Auch hier könnte ein Grund für die kleinere Präparationsbreite die schwierigeren Präparationsbedingungen durch indirekte Sicht, wie sie beispielsweise im Unterkiefer im Seitenzahnbereich vorkommen, gewesen sein.

Die Unterscheidung in Front- und Seitenzahngebiet lieferte im Hinblick auf die gemessenen Präparationstiefen keinen signifikanten Unterschied ($p = 0,344$).

Die Messungen von *Wimmer* wiesen für die vestibuläre (n = 177) und orale (n = 143) Präparationsbreite mit durchschnittlich 0,5 mm ähnliche Werte auf. Während mesial (n = 141) und distal (n = 147) mit 0,4 mm etwas schmalere Werte ermittelt wurden. Bei *Schiefelbein* zeigten die für in vivo-Präparationen ermittelten Messergebnisse mit Werten im Bereich zwischen 0,46 mm bukkal und 0,61 mm distal ebenfalls eine ähnliche Größenordnung auf (*Wimmer 2009, Schiefelbein 2015*).

Eine materialabhängige Analyse der gemessenen Präparationsbreiten konnte signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Versorgungsformen aufzeigen ($p \leq 0,001$). Anhand der Messungen wurde keine Tendenz zur eindeutig breiteren Präparationsweise bei vollkeramischen oder keramisch verblendeten Restaurationen festgestellt. Die gemessenen Präparationsbreiten unterschieden sich geringfügig. Sie differierten materialabhängig bezüglich des Medians zwischen Werten von 0,46 mm bis 0,56 mm und bezüglich des Mittelwertes zwischen 0,51 mm und 0,57 mm. VK Restaurationen wiesen mit 0,57 mm die breiteste marginale Schnitttiefe auf.

Für vollkeramische Restaurationen konnte mit einem Median von 0,52 mm eine signifikante Überschreitung der geforderten Mindestpräparationsbreite von 0,5 mm festgestellt werden (n = 317; $p = 0,003$). Jedoch lag mit 47,94 % bei knapp der Hälfte aller ausgewerteten Präparationsflächen eine Unterschreitung der geforderten Mindeststärke vor. Die n = 39 von *Wimmer* ausgewerteten Vollkeramikronen lagen mit einer durchschnittlichen minimalen Breite von 0,55 mm mesial und einer maximalen Breite von 0,74 mm oral ebenfalls über der geforderten Präparationstiefe von 0,5 mm (*Wimmer 2009*).

Für rein metallische Restaurationen wurde mit einem Median von 0,51 mm keine signifikante Abweichung von den geforderten 0,5 mm festgestellt (n = 80; $p = 0,979$). Die knappe Mehrheit der ausgewerteten Präparationsflächen erfüllte den vorgegebenen Referenzwert. 48,2 % aller ausgewerteten Präparationsflächen hingegen erfüllten die Mindestschichtstärke nicht. Die n = 42 von *Wimmer* vermessenen Präparationsstümpfe wiesen je nach Zahnfläche mit durchschnittlich 0,38 mm bis 0,53 mm insgesamt kleinere Werte auf (*Wimmer 2009*).

Gravierender fällt das Ergebnis bei Betrachtung der keramisch verblendeten Restaurationen aus. Die Kombinationen aus Gerüst und Verblendung benötigen naturgemäß breitere Präparationstiefen, um ausreichend Platz für die Modellation zu schaffen. Für VM Restaurationen erfüllten nur 14,85 % der ausgewerteten Präparationsflächen die geforderten 0,8 mm Mindestschichtstärke. Die Werte unterschritten signifikant die geforderte Mindestschichtstärke (n = 258; Median = 0,46 mm; $p \leq 0,001$). Für VK Restaurationen erfüllten sogar nur 4,02 % die geforderten 1,2 mm Mindestschichtstärke. Auch hier lag eine signifikante Unterschreitung des Referenzwertes vor (n = 251; Median = 0,56 mm; $p \leq 0,001$). Bei *Wimmer* lagen die gemessenen Werte für Metallkeramikkrone mit 0,37 mm bis 0,48 mm ebenso deutlich unter den geforderten Mindestschichtstärken (*Wimmer* 2009).

Es scheint also gerade bei den verblendeten Restaurationen keine Berücksichtigung des Mehrbedarfs an Material stattgefunden zu haben. Dies ist insofern problematisch, als dass die daraus resultierende „unzureichende anatomische Gerüstmodellation“ (*Rinke et al.* 2013) das Risiko für Frakturen der Verblendkeramiken oder Abplatzungen im Kronenrandbereich potenziert (*Guess et al.* 2013). *Rinke et al.* sehen ein erhöhtes *Chipping*-Risiko (Verblendkeramikfrakturen) vor allem im Molarenbereich. Um den „technischen Komplikationsraten“ durch Gerüstfrakturen beizukommen, halten sie daher eine „ausgeprägte anatomische Gerüstmodellation“ mit entsprechenden Präparationsbreiten für umso wichtiger (*Rinke et al.* 2013, *Lohbauer et al.* 2018). Auch *Laumbacher et al.* führen in ihrem Review Verblendkeramikfrakturen als „häufigste technische Komplikation“ an und bemängeln gleichzeitig den Mangel an klinischen Studien in diesem Themenfeld (*Laumbacher et al.* 2021).

Kritisch bleibt ebenso anzumerken, dass in dieser Studie fast ausschließlich Zirkonoxidversorgungen untersucht wurden. Diese besonders stabile Keramik hat im Vergleich zu Glaskeramiken beste mechanische Eigenschaften und erfordert eine weniger hohe marginale Präparationsbreite.

4.2.7 Diskussion des Konvergenzwinkels und des Öffnungswinkels

Der Gesamtkonvergenzwinkel war mit $25,73^\circ$ in vestibulo-oraler Dimension ($n = 940$) durchschnittlich um $2,17^\circ$ größer als in mesio-distaler Dimension ($n = 912$). Die Standardabweichungen von $12,3^\circ$ (vestibulär-oral) und $14,4^\circ$ (mesial-distal) zeigten eine breite Streuung um diese Mittelwerte.

Die Analyse erfolgte getrennt nach Kronen und Brücken sowie der Lage des Zahnes im Front- oder Seitenzahnggebiet. Hierbei wiesen Kronen im direkten Vergleich mit Brücken in jeder Kategorie – ausgenommen keramisch verblendete Versorgungen in vestibulo-oraler Dimension – höhere KW auf. Besonders hoch fiel diese Differenz mit $6,69^\circ$ in mesio-distaler Dimension im SZG aus. Hier wiesen Brücken ($n = 285$) einen durchschnittlichen KW von $22,71^\circ$ und Kronen ($n = 379$) einen durchschnittlichen KW von $29,40^\circ$ auf. Diese durchweg höheren KW bei Kronen verwundern, sollte doch zunächst angenommen werden, dass bei Brückenversorgungen zwecks gemeinsamer Einschubrichtung der Restauration eine konischere Präparationsweise erforderlich werden würde. Diese Annahme konnte durch die resultierenden Messergebnisse dieser Studie nicht gestützt werden. Bei der Präparation von Brückenversorgungen scheint von den Behandelnden auf kleinere Präparationswinkel geachtet worden zu sein.

Den kleinsten Wert wiesen KW in mesio-distaler Dimension im FZG sowohl für Kronen ($n = 104$) als auch Brücken ($n = 147$) auf. Die gemessenen Werte unterschieden sich um minimal 7° bis zu maximal 14° von den übrigen KW und waren damit signifikant kleiner als die übrigen ermittelten KW ($p \leq 0,001$). Eine Erklärung könnte die leichtere visuelle Beurteilbarkeit des Präparationswinkels im direkt einsehbaren Frontzahnggebiet sowohl mesial als auch distal liefern. Im SZG sowie zur Beurteilung des vestibulären und oralen Präparationswinkels kann die Abschätzung des Winkels nur durch indirekte Sicht über den zahnärztlichen Spiegel erfolgen. Zudem fällt es dem menschlichen Auge schwer auf kurze Distanzen Neigungen korrekt einzuschätzen. Besonders bei den nur noch einige Millimeter Stumpfhöhe messenden Zähnen ist es schwierig die geforderten Präparationswinkel umzusetzen, „weil es dem menschlichen Auge nahezu unmöglich [ist], dies von einer parallelwandigen Präparation zu unterscheiden“ (Smith 1987, Erhatič und Blankenstein 2013). Dies erschwert die genaue Abschätzung und liefert eine mögliche Erklärung für die konischere Präparationsweise.

Wimmer konnte nach $n = 215$ vermessenen Gipsstümpfen einen Gesamtpräparationswinkel von $23,54^\circ$ in vestibulo-oraler und $20,37^\circ$ in mesio-distaler Richtung ermitteln. Auch hier wies der durchschnittliche mesio-distale KW im FZG mit $18,04^\circ$ einen deutlich niedrigeren Wert auf (FZG KW vestibulär-oral = $25,73^\circ$; SZG KW vestibulär-oral = $22,52^\circ$; SZG KW mesial-distal = $21,51^\circ$). Negative Präparationswinkel oder parallel präparierte Zahnflächen wurden hier jedoch nicht aus der Wertung ausgeschlossen. Dies könnte die im Vergleich zu dieser Studie insgesamt etwas kleiner ausfallenden Durchschnittswinkel erklären. Bei *Schiefelbein* variierten die gemessenen KW der Frontzahnkronen zwischen $19,41^\circ$ in vestibulo-oraler Dimension und $12,86^\circ$ in mesio-distaler Dimension. Die Werte fallen hier zwar insgesamt niedriger als in dieser Studie aus, jedoch zeigte sich auch hier in mesio-distaler Dimension ein deutlich niedrigerer Wert im FZG verglichen mit dem SZG. *Güth et al.* maßen einen durchschnittlichen KW von $26,7^\circ$ und lagen damit nah an den in dieser Studie ermittelten Gesamtkonvergenzwinkeln. *Erhatič et al.* gaben an, dass die gemessenen Konvergenzwinkel um bis zu 11° vom geforderten Maximalwert abwichen (*Wimmer* 2009, *Erhatič und Blankenstein* 2013, *Güth et al.* 2013, *Schiefelbein* 2015).

Podhorsky et al. stellten nach Auswertung diverser Studien Mittelwerte zwischen $18,2^\circ$ und $23,9^\circ$ fest. Sie fanden distal größerer Präparationswinkel als mesial vor. Zudem wiesen die vestibulär-oralen KW größere Winkel als die mesial-distalen KW auf (*Podhorsky et al.* 2015).

Eine Auftrennung der ermittelten Konvergenzwinkel nach Material und Versorgungsform lieferte mit 18,57° in mesio-distaler Dimension die kleinsten KW für VM Brücken (n = 160). Den höchsten Wert wiesen metallische Kronen in mesio-distaler Dimension mit 31,39° (n = 61) auf.

Im Vergleich mit den in den Präparationsempfehlungen geforderten maximalen 12° KW überschritten die ermittelten Durchschnitte diesen Wert signifikant ($p = 0,017$ bis $p \leq 0,001$). Für metallische Kronen- und Brücken-Versorgungen im FZG und SZG und Metallkeramik-Kronen im FZG konnten zwar keine signifikanten Abweichungen festgestellt werden, die Ergebnisse lagen aber auch hier mit Mittelwerten zwischen 20,09° und 31,39° weit entfernt von den maximal akzeptablen 12° ($p = 0,317$ bis $p = 0,109$).

Ein gänzlich den Präparationsempfehlungen entsprechenden KW zwischen 4° und 12° sowohl in vestibulo-oraler als auch mesio-distaler Richtung konnte nur ein Bruchteil aller ausgewerteter Präparationen aufweisen. Im FZG erfüllten dies lediglich n = 4 Kronen und n = 8 Brücken. Im SZG betrug dieser Anteil auf n = 6 Kronen und n = 13 Brücken. Dies entspricht einem relativen Anteil von 3,1 % an allen ausgewerteten Präparationen.

Erhatic et al. schreiben dem Präparationswinkel das wichtigste Kriterium für eine suffiziente Retention zu. Bemängeln aber gleichzeitig eine in „Lehrbüchern [und] wissenschaftlichen Journalen [...] erstaunliche Uneinheitlichkeit hinsichtlich der Definition dieses Winkels“ (Erhatic und Blankenstein 2013). Die Termini Kegel-, Konus-, Präparations- und Konvergenzwinkel tauchen allesamt in diesem Kontext auf und können leicht zu Missverständnissen führen, sofern die Begriffe nicht scharf voneinander abgegrenzt werden. So kann es bei Fehlinterpretationen von Präparationsempfehlungen fälschlicherweise zur Verdopplung des geforderten Winkels kommen. Die Begriffe Konvergenzwinkel- und Kegelwinkel stellen Synonyme dar. Sie sind doppelt so groß wie die gleichbedeutenden Begriffe Präparations- und Konuswinkel (Erhatic und Blankenstein 2013).

Ferner bemängeln *Erhatic et al.* basierend auf der aktuellen Studienlage, dass die „Realisierung eines Konvergenzwinkels [...] von 12° nahezu unmöglich ist“ (Erhatic und Blankenstein 2013). Die erhöhten KW könnten jedoch ebenso Mittel zum Zweck darstellen, um Unterschnitte bei der Präparation sicherer zu vermeiden. So stellte *Mack* fest, dass das menschliche Auge erst ab Winkeln > 12° diese visuell bedingt sicher ausschließen kann (Mack 1980, Erhatic und Blankenstein 2013).

Nichtsdestotrotz steigert die vorliegende substanzfordernde Vorgehensweise das Risiko für Komplikationen wie Irritation und Apoptose des sensiblen pulpalen Gewebes mit konsekutiv nötiger endodontischer Behandlung. Mit steigendem Präparationswinkel und damit erhöhter Neigung sinkt die Restdentinstärke und die Anzahl der freigelegten Odontoblastenfortsätze steigt. Aufgrund der zylindrischen Form der Dentinkanälchen steigt ebenso deren Durchmesser von 1 bis 2 μm mit sinkendem pulpaalem Abstand (Mjör 2009). Die bei der Präparation entstandenen Wundflächen an den Odontoblastenfortsätzen steigern somit bei sinkender Restdentinstärke das Risiko für Verletzungen der Pulpa und die Gefahr für inflammatorische Folgeprozesse.

Ebenso steigt das Risiko für eine direkte Eröffnung der Pulpa. *Laumbacher et al.* nennen in ihrer systematischen Übersichtsarbeit neben Karies und Zahnfrakturen endodontische Komplikationen als wichtige Beeinträchtigung nach Zahnpräparation (Laumbacher et al. 2021). *Rinke et al.* konnten bereits bei einem Präparationswinkel zwischen 4° und 6° eine 7-Jahres-Inzidenz von 8,6 % für endodontische Behandlungen nach Präparation von vitalen Zähnen bei Zirkonoxidkeramik-Einzelkronen feststellen. Die Autoren führten dieses erhöhte „Risiko biologischer Komplikationen“ auf das „aggressivere[] Präparationsdesign“ durch die konischere Präparationsweise zurück (Rinke et al. 2015).

Anzumerken bleibt zudem, dass die in dieser Studie ausgewerteten vollkeramischen Kronen zu 99 % aus monolithischen ZrO₂-Kronen oder ZrO₂-Gerüsten bestanden. Diese erlauben auch eine für die Pulpa schonendere Befestigung mit konventionellen Zementen. Die ebenfalls in der Anwendung weit verbreiteten Glaskeramiken hingegen setzen zumeist eine adhäsive Befestigung der späteren Restauration voraus. *El-Kholany et al.* beobachteten in vitro eine „nachteilige Wirkung [von Dentaladhäsiven] auf die Odontoblasten“. *Chen et al.* untersuchten die Auswirkungen des in dentalen Bonding-Systemen vorkommenden wichtigen Bestandteils 2-Hydroxyethylmethacrylat auf die Pulpazellen. Dieses wird bei Konditionierung des Zahnes in ungehärtetem Zustand vom Dentin in Richtung Pulpa gespült. Diesem Stoff ausgesetzte pulpale Zellen zeigten in vitro typische Apoptosezeichen. Die Autoren empfehlen eine ausreichende Dentindicke einzuhalten, um die Konzentration von 2-Hydroxyethylmethacrylat auf die Pulpazellen so gering wie möglich zu halten (Chen et al. 2021). Ebenso scheint die zur Aushärtung der adhäsiven Verbundsysteme nötige hochenergetische UV-Lichthärtung Auswirkungen auf die Struktur des pulpanahen Dentins und die Mikrozirkulation innerhalb der Pulpa zu haben. *Soares et al.* wiesen auf eine um bis zu 3,5 °C erhöhte Temperatur innerhalb der Pulpa sowie eine Verformung des umgebenden Dentins nach Lichthärtung der Adhäsive hin (Soares et al. 2018). Die Effekte dieser „zytotoxischen“ Stoffe (El-Kholany et al. 2012) dürften bei zunehmend pulpanaher Präparation durch zu groß angesetzte Präparationswinkel ebenfalls stärker ins Gewicht fallen.

Die in dieser Studie ermittelten hohen Konvergenzwinkel führen zu einer mangelnden Retention der Restaurationen bei Befestigung mit konventionellen Zementen. Studien schätzen die Verlustrate keramischer Kronen aufgrund von ungenügender Retention auf 3,3 % über 5 Jahre (Sailer et al. 2007). Dies kann bei ZrO₂-Keramiken durch eine adhäsive Zementierung ausgeglichen werden. In der Folge ist das Risiko für die oben beschriebenen biologischen Komplikationen der Zahnpulpa jedoch erhöht. Es liegt folglich die Vermutung nahe, dass ein Großteil der ZrO₂-Keramikkronen allein aufgrund eines zu groß gewählten Präparationswinkels adhäsiv befestigt werden müssen. Insofern stellt sich die Frage, ob in Anbetracht der gemessenen hohen Winkel ein ausreichendes Maß an Problembewusstsein bezüglich der Folgen dieser Präparationsweise im Hinblick auf Folgeschäden der Zahnpulpa im Praxisalltag herrscht.

Zur Analyse der Öffnungswinkel wurden die vier Zahnflächen vestibulär, oral, mesial und distal herangezogen. An der vestibulären Zahnfläche kamen mit n = 631 mit Abstand die meisten Hohlkehlspräparationen vor (oral n = 523; mesial n = 501; distal n = 513). Die ermittelten Mittelwerte lagen allesamt sehr nah beieinander (vestibulär = 152,54°; oral = 152,66°; mesial = 151,90°; distal = 151,94°).

Aufgrund des insgesamt geringen Vorkommens der Stufenpräparation, stützte sich die Analyse des Öffnungswinkels hier auf einen sehr viel geringeren Stichprobenumfang. Distal wurden mit einer Anzahl n = 31 die meisten Stufenpräparationen ermittelt (vestibulär n = 23; oral n = 17; mesial n = 22). Die einzelnen Durchschnittswerte lagen mit einer Spannweite von circa 10° hier weiter auseinander (vestibulär = 121,76°; oral = 115,71; mesial = 111,77°; distal = 120,57°).

Die Analyse des Öffnungswinkels der Hohlkehle und Stufe lieferte bis auf die orale und mesiale Stufe signifikante Abweichungen von den geforderten 140° für Hohlkehle- und 110° für Stufenpräparationen ($p \leq 0,001$).

Da der Öffnungswinkel auch abhängig vom Neigungswinkel der sich anschließenden Zahnfläche ist, hat die insgesamt vorherrschende konische Präparationsweise vermutlich zu den erhöhten Öffnungswinkeln mit beigetragen.

4.2.8 Diskussion zum Vorhandensein von Unterschnitten

Betrachtet man die Häufigkeit von Unterschnitten untergliedert nach Zahnflächen, so zeigte sich, dass Unterschnitte am häufigsten im Frontzahnbereich an mesio-oralen, oralen und disto-oralen Zahnflächen sowie im Seitenzahnbereich an oralen und disto-oralen Zahnflächen mit relativen Häufigkeiten von jeweils 4 bis 6 % vorkamen (n = 1002). Die aufgrund der indirekten Sicht technisch anspruchsvollere Präparation in diesen Bereichen könnte eine Erklärung für die Häufung unter sich gehender Bereiche durch zu starke Angulation des Instruments an diesen Zahnflächen liefern. *Schiefelbein* stieß bei Auswertung der keramischen Frontzahnkronen in 21 % der ausgewerteten in vivo-Präparationen auf Unterschnitte. Diese wurden hier jedoch durch eine spezielle Funktion („Automatische Festlegung der Einschubrichtung“) des verwendeten Auswertungsprogramms *LAVA Design Software* (3M Deutschland GmbH, Deutschland, Neuss) ermittelt, welches Unterschnitte vermutlich sehr viel genauer ermitteln konnte als die hier durchgeführte rein optische Einschätzung durch den Auswertenden (*Schiefelbein* 2015).

Im Rahmen der Laborauswertung lässt sich als zusammenfassend festhalten, dass bezogen auf die okklusale Schichtdicken, die Vorgaben gut umgesetzt wurden. Bezüglich Präparationsform, Konvergenzwinkel und Präparationsbreiten aber erhebliche Mängel festgestellt werden konnten. *Güth et al.* mutmaßten bezogen auf Vollkeramikronen, dass Zahnärztinnen und Zahnärzte Probleme hätten die Präparationsvorgaben adäquat umzusetzen und erhoben Zweifel, ob „wissenschaftlich fundierte klinische Empfehlungen es auch in die klinische Anwendung schaffen“. In ihrer Auswertung erfüllte keine Präparation alle Mindestvoraussetzungen für Präparationsform, interokklusale Abstand, Präparationswinkel, Stumpfhöhe und Unterschnitte. Direkte Kontrollen durch CAD/CAM-basierte Techniken, könnten zukünftig zu einer Verbesserung der Präparationsergebnisse beitragen (*Güth et al.* 2013).

4.3 Diskussion der Umfrage

4.3.1 Methodenkritik

Bei der Befragung handelte es sich um eine geschlossene Befragung. Die Gruppen von Teilnehmenden wurde auf innerhalb Deutschlands tätige niedergelassene Zahnärztinnen und Zahnärzte limitiert. Die Befragung richtete sich bewusst nur an die im Praxisalltag prothetisch tätige Zahnärzteschaft, um möglichst aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Um die Ergebnisse nicht zu verzerren, sollten Zahnärztinnen und Zahnärzte mit Facharztweiterbildungen und damit Schwerpunkten abseits der zahnärztlichen Prothetik, nicht an der Befragung teilnehmen. Universitäre Einrichtungen sollten ebenfalls nicht Teil der Befragung sein. Dem wurde versucht durch Selektion der E-Mail-Adressen beizukommen.

Die Befragung wurde mittels Online-Fragebogen durchgeführt. Hierzu diente die für akademische Zwecke frei zur Verfügung stehende Plattform *SoSci Survey*. Die durchschnittliche Bearbeitungsdauer des Fragebogens wurde im Vorfeld auf fünf bis zehn Minuten taxiert. Der Fragebogen setzte sich inklusive Informationsblatt und Datenschutzerklärung aus neun unterschiedlichen thematisch geordneten Fragebogenblättern zusammen. Fragen-Items zur Präparationsform, zum Präparationswinkel und zu den Präparationsinstrumenten wurden durch Grafiken veranschaulicht. Der Fragebogenfortschritt wurde bei Voranschreiten prozentual dargestellt. Eine „motivierende Ansprache der Zielgruppe sowie eine angemessene Gestaltung des Fragebogens“ sollten sich positiv auf die Rücklaufquote auswirken (Gusy und Marcus 2012).

Gusy et al. nennen eine Reihe von Vorteilen der Methode von Online-Fragebögen gegenüber herkömmlichen „*Paper-Pencil-Befragungen*“. So lässt sich das Befragungsprojekt durch eine ökonomischere Durchführung kosten- und zeiteffizient gestalten. Durch die anwenderfreundlichen Onlinetools lassen sich die Projekte mit „geringem Aufwand kostengünstig[] und schnell [erheben]“ (Pötschke 2009, Gusy und Marcus 2012). Die Frage-Items können durch Bildeffekte graphisch unterlegt werden. Entfallende Druck- und postalische Versandvorgänge sparen Kosten ein und bieten ökologische Vorteile. Durch die dezentrale serverbasierte Lagerung des Befragungsprojektes ist die Befragung für die Teilnehmenden jederzeit und überall innerhalb des Befragungszeitraumes abrufbar. Auf diese Weise kann „eine große Anzahl an zu Befragenden [...] in kurzer Zeit angesprochen werden“ (Zerr 2001, Gusy und Marcus 2012). Zudem entfallen aufwendige und fehleranfällige Übertragungsschritte sowie Verzerrungen durch die Person des Befragenden (*Interviewereffekte*). Die Daten sind direkt elektronisch verfügbar und auswertbar. Laut *Pötschke* trage das bei dieser Methode höher empfundene Maß an Anonymität ebenso zu einer ehrlicheren Beantwortung der Fragen bei (Pötschke 2009).

Als nachteilig bei dieser Befragungsform sind zunächst die zwingend notwendigen „technische[n] Anforderungen“ zu nennen (Gusy und Marcus 2012). Ein Computer mit aktivem Internetzugang und E-Mail-Account bildete die Voraussetzung zur Teilnahme. Zwar darf man davon ausgehen, dass eine überwiegende Mehrheit der zum Zeitpunkt der Befragung tätigen niedergelassenen Zahnärztinnen und Zahnärzte diese Bedingungen erfüllten, dennoch wird ein relevanter Anteil der Grundgesamtheit durch diese Form der Befragung von vornherein ausgeschlossen. Dieser Anteil war in der vorliegenden Studie vermutlich in den höheren Altersklassen angesiedelt oder setzte sich aus Gruppen mit Vorbehalten gegenüber modernen Kommunikationstechnologien zusammen. Auch wird ein generelles Misstrauen gegenüber externen unbekanntem E-Mail-Absendern sich negativ auf die Rücklaufquote ausgewirkt haben. Ebenso bleibt fraglich welcher Anteil der versendeten E-Mails mit Anschreiben und

Teilnahmelink automatisch durch die Spam-Mail-Funktion des E-Mail-Programms aussortiert wurde, sodass diese erst gar nicht den Adressaten erreichen konnten.

Die Generierung einer ausreichend hohen Anzahl an E-Mail-Adresse erwies sich als äußerst aufwendig und war abhängig von den jeweiligen Onlinesuchportalen der Landeszahnärztekammern. Da die Hinterlegung der E-Mail-Adressen auf freiwilliger Basis erfolgt, war diese Information nur bei einem insgesamt kleineren Anteil aller aufgeführten Zahnärztinnen und Zahnärzte gegeben. Zudem war das Funktionieren des beschriebenen Extrahierungsprozesses der Adressen abhängig von der Aufmachung des jeweiligen Suchportals der Zahnärztekammer. Jede Kammer hatte hierfür ein individuelles Webdesign und eine eigenständige Systematik bei der Erfassung der Kontaktdaten der Zahnärztinnen und Zahnärzte. Voraussetzung für das Funktionieren der standardisierten E-Mail-Adressen-Erfassung war die listenförmige Darstellung des Suchergebnisses. Im Bundesland Brandenburg etwa wurde das Suchergebnis rein kartographisch dargestellt. Eine automatische Adresserfassung war hier nicht möglich. Die Landeszahnärztekammer Bayern hinterlegte generell keine Mailadressen. Um dennoch eine relevante Anzahl an Adressen aus entsprechenden Bundesländern zu ermitteln, wurde auf die Online-Branchenbücher *Gelbe Seiten* und *DasTelefonbuch* zurückgegriffen (DTM Deutsche Tele Medien GmbH, Frankfurt am Main, Deutschland). Ebenso kann ein Versand an, und damit eine Teilnahme sich außerhalb der Zielgruppe befindlicher Fachzahnärztinnen und Fachzahnärzte nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

Es bleibt festzuhalten, dass die im Rahmen der Möglichkeiten generierte Anzahl an Adressen mit $n = 9446$ als äußerst hoch einzuschätzen ist. Die Rücklaufquote fiel mit 4,60 % jedoch vergleichsweise niedrig aus. Ferner hatten mehr als $n = 30\,000$ innerhalb Deutschlands tätige niedergelassene Zahnärztinnen und Zahnärzte mangels Erfassung der E-Mail-Adresse keine Möglichkeit an der Befragung teilzunehmen. Wodurch hier von einem Selektionsbias auszugehen ist.

Mehrfachteilnahmen über denselben Einladungslink waren bewusst zulässig. In Praxen mit mehreren Behandelnden, bestand so die Möglichkeit, dass der Fragebogen von sämtlichen in der Praxis tätigen Behandelnden ausgefüllt werden konnte. Dies führte aber auch zu der theoretischen Möglichkeit der Mehrfachbearbeitung desselben Fragebogens durch dieselbe Person und damit zu Verzerrungen der Ergebnisse. Der hierfür nötige Zeitaufwand und der bewusste Verzicht auf Anreize wie Gewinnspiele oder ähnliches dürften das Risiko hierfür jedoch geringgehalten haben.

Durch die vollständige Anonymisierung der Daten bestand ein ausreichend hohes Maß an Datenschutz für die Befragten.

4.3.2 Diskussion der Rücklaufquote

Gemäß den übermittelten Daten der Bundeszahnärztekammer aus dem Jahr 2019 setzte sich die Gesamtpopulation aus $n = 43\,594$ Zahnärztinnen und Zahnärzten zusammen. Aus dieser Grundgesamtheit wurden Fachzahnärzte und Fachzahnärztinnen für Oralchirurgie und Kieferorthopädie bereits herausgerechnet. Nach Generierung der Adressliste umfasste die realisierte Nettostichprobe gemessen an den erfassten E-Mail-Adressen $n = 9446$ Teilnehmende. Dies entspricht einem relativen Anteil von 21,67 % gemessen an der Grundgesamtheit.

Mossig gibt zur Berechnung des „minimal erforderliche[n] Stichprobenumfang[s] für eine endliche Grundgesamtheit“ folgende Formel an (Mossig 2012):

$$n \geq \frac{N}{1 + \frac{(N-1) \cdot \varepsilon^2}{z^2 \cdot P \cdot Q}}$$

mit

n = minimal erforderlicher Stichprobenumfang

N = Grundgesamtheit

ε = tolerierter Fehler (für 5 % = 0,05)

z = Sicherheitswahrscheinlichkeit mit $D(z)$ = zentrale Wahrscheinlichkeit (99 % $\rightarrow D(z) = 0,99$
 $\rightarrow z = 2,575$)

P = tatsächlicher Mittelwert der Grundgesamtheit bzw. prozentualer Anteilswert an der Grundgesamtheit

$Q = 1 - P$

Nach Einsetzen der entsprechenden Werte in die Formel ergibt sich:

$$n \geq \frac{43\,594}{1 + \frac{(43\,593 - 1) \cdot 0,05^2}{2,575^2 \cdot 0,5 \cdot 0,5}} \geq 659,47$$

Die Stichprobe hätte also mindestens aus $n = 659$ ausgefüllten Fragebögen bestehen müssen, um bei einer Grundgesamtheit von 43 594 Zahnärztinnen und Zahnärzten mit einer „Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95 % um nicht mehr als 5 Prozentpunkte [...] vom tatsächlichen Ergebniswert der Grundgesamtheit [abzuweichen]“ (Mossig 2012).

Insgesamt lagen nach Abschluss des zweimonatigen Befragungszeitraums $n = 406$ vollständig ausgefüllte Fragebögen zur Auswertung vor. Bei $n = 9446$ versendeten Fragebögen lag die Ausschöpfungsquote mit 4,60 % somit niedrig. Unter Einbeziehung des oben ermittelten Wertes ist also von einer eingeschränkten Aussagekraft der ermittelten Ergebnisse auszugehen.

Postalisch durchgeführte Befragungen unter Zahnärztinnen und Zahnärzten erzielten höhere Rücklaufquoten. *Christel* führte eine Befragung zu „zahnmedizinische[n] Kenntnisse[n] und moralischen Positionen“ durch und erreichte einen Rücklauf von 48,5 % bei n = 600 versendeten Fragebögen (Christel 2019). *Hinkelmann* kam in ihrer 1993 durchgeführten Befragung auf eine Rücklaufquote von 13,4 % bei n = 1782 postalisch versendeten Fragebögen (Hinkelmann 1993).

Ramm konnte bereits 2013 in der Dokumentation des „Deutschen Studierendensurveys“ eine „Abwärtsentwicklung“ der Beteiligungsquoten unter Studierenden von 40 % aus den 1980er Jahren auf bis zu 18,6 % im Jahr 2013 feststellen und spricht von einem „globale[n] Phänomen“ in Bezug auf Umfragen (Ramm 2014). Auch *Gusy et al.* bemängelten in der Analyse der unter n = 9000 Studierenden der Freien Universität Berlin durchgeführten Online-Befragung zum Thema „<GiS> Gesundheit im Studium“ eine mit 7,7 % ähnlich zu der vorliegenden Studie niedrigen Rücklaufquote (Gusy und Marcus 2012). Den Autoren nach zur urteilen führten eine „stetig wachsende Zahl an internetbasierten Befragungen [zu] zunehmend schwierigeren Bedingungen bei der Stichprobengewinnung“ (Gusy und Marcus 2012). *Ramm* nennt als weitere „Gründe [...] objektiv[] oder subjektiv empfundene[n] Mangel an Zeit“ sowie „mangelnde Aufklärung über den Stellenwert von Umfragen“. Auch „weitere Verhinderungsfaktoren“ wie „wahrgenommene Beliebigkeit“ oder datenschutztechnische Bedenken scheinen eine Rolle zu spielen (Ramm 2014).

Bei einer in dieser Studie vorliegenden niedrigen Rücklaufquote stellt sich dennoch die Frage, ob – trotz der beschriebenen Relativierungen – ein ausreichend vorhandenes Problembewusstsein hinsichtlich des in dieser Studie aufgegriffenen Themas innerhalb der Zahnärzteschaft existiert.

4.3.3 Diskussion der Umfrageergebnisse

Geschlecht

Laut Umfrageergebnissen betrug der Anteil männlicher Teilnehmer 69,2 % bei $n = 406$ Teilnehmenden. Die Bundeszahnärztekammer gab hingegen einen Anteil von 61,4 % tätiger Zahnärzte innerhalb Deutschlands an. Die Studie kann also in Hinblick auf dieses Merkmal als nicht repräsentativ betrachtet werden.

Tätigkeitsdauer

Teilnehmende mit einer Tätigkeitsdauer von > 20 Jahren stellten zusammengenommen rund zwei Drittel der Gesamtanzahl ($n = 406$). Dies kann auf ein vermehrtes Interesse für die untersuchte Problematik bei Zahnärztinnen und Zahnärzten mit längerer Berufserfahrung hindeuten. Andererseits kann es sein, dass die an die Praxis-E-Mail-Adresse gesendeten Einladungsschreiben in den aller meisten Fällen allein von den Praxisinhabern gesichtet und ausgefüllt wurden und diese eher Gruppen mit höherer Tätigkeitsdauer angehören.

Präparationsdauer

Rund 41 % der Befragten gaben an durchschnittlich 10 bis 15 Minuten Zeit pro präpariertem Zahn zu benötigen ($n = 406$). Weitere rund 15 % gaben sogar an weniger als 10 Minuten zu benötigen. Mehr als die Hälfte aller Befragten gaben somit ein als kurz einzustufendes Zeitintervall für diesen Arbeitsschritt an. Eine Zeit von 20 Minuten und länger wurde hingegen mit rund 17 % nur von einem kleineren Anteil der Befragten als Antwortmöglichkeit gewählt.

Eine statistisch signifikante Korrelation zwischen der Tätigkeitsdauer und der angegebenen benötigten Zeit konnte nicht nachgewiesen werden ($p = 0,942$).

Die Korrelation zwischen Geschlecht und der angegebenen Zeit, zeigte hingegen einen signifikanten Unterschied. Hier war die angegebene Zeit der Zahnärztinnen signifikant höher ($p = 0,002$). Am auffälligsten sind die Unterschiede in den Gruppen „ < 10 Minuten“ und „ > 25 Minuten“. Die Zeitangabe „ < 10 Minuten“ wählten bezogen auf alle männlichen Teilnehmer 17,44 %, während dieser Anteil bei den Zahnärztinnen lediglich bei 8 % lag. Gegensätzlich verhält es sich in der Gruppe „ > 25 Minuten“. Hier betrug der Anteil von Zahnärzten rund 5 % bezogen auf alle teilnehmenden Zahnärzte gegenüber 13,6 % auf Seiten der Zahnärztinnen. Allgemeine geschlechterspezifische Unterschiede wie eine realistischere Selbsteinschätzung auf Seiten der Zahnärztinnen oder aber auch eine sorgfältigere Art des Arbeitens könnten diskutiert werden.

Präparationsform

Betrachtet man die Ergebnisse zum Frage-Item „Präparationsform“ so zeigte sich über die Materialien K, VK, VM und M hinweg eine klare Dominanz der Hohlkehle als bevorzugt eingesetzte Präparationsform. Mit Werten zwischen 71,4 % für VK und 90,4 % für VM setzte sie sich klar von den beiden anderen Präparationsformen Stufe und Tangential ab (n = 406).

Die Stufe machte mit jeweils rund einem Viertel ebenfalls einen relevanten Anteil unter den Versorgungsformen K und VK aus. Die Tangentialpräparation wurde für keramische Restaurationen hingegen mit maximal 2,0 % nur sehr selten gewählt. Allein bei metallischen Restaurationen ergab sich, dass rund 14 % der Befragten bevorzugt tangential präparieren.

Die von den Befragten gemachten Angaben, decken sich mit den allgemeinen Präparationsempfehlungen. Daher kann davon ausgegangen werden, dass unter den Teilnehmenden Kenntnis über die klare Empfehlung von Hohlkehl- und Stufenpräparationen für keramische Restaurationen bestand.

Hinkelmann konnte in ihrer 1993 durchgeführten Umfrage teilweise ähnliche Ergebnisse feststellen. Innerhalb der n = 240 Teilnehmenden großen Stichprobe wurde die Hohlkehle für Metallkronen von 82 % und für Metallkeramikronen von 92,4 % der Befragten als am häufigsten verwendete Präparationsform angegeben. Ein anderer Trend zeichnet sich bei Betrachtung der Keramikronen ab. Hier dominierte damals noch klar die Stufenpräparation mit einem Anteil von 59,6 %, während die Hohlkehle nur von 46,4 % gewählt wurde. Die aktuellen Daten sprechen also dafür, dass eine Abkehr der Stufenpräparation zugunsten der Hohlkehlpräparation stattgefunden hat (Hinkelmann 1993).

Präparationswinkel

Nach Analyse des Frage-Items zum Präparationswinkel zeigte sich, dass die überwiegende Mehrheit der Befragten Präparationswinkel zwischen 0° und 15° bevorzugte.

Auf Seiten der keramischen Hülsenkronen fiel der Winkelbereich > 0° bis 6° mit einem Anteil von circa 49 % (n = 406) nur gering höher aus als der Winkelbereich > 6° bis 15° mit circa 42 % (n = 406). Bei metallischen Hülsenkronen zeigte sich hingegen eine deutliche Dominanz des Winkelbereichs > 0° bis 6° mit einem Anteil von circa 71 % gegenüber circa 24 % für den Winkelbereich > 6° bis 15°. Von den Teilnehmenden wurde folglich tendenziell ein kleinerer Präparationswinkel für metallische Hülsenkronen bevorzugt. Dieser Unterschied ist signifikant ($p \leq 0,001$).

Die ermittelten Ergebnisse ließen zudem auf einen schwachen Zusammenhang zwischen der Wahl des Präparationswinkels und der Tätigkeitsdauer schließen. So wurden höhere Präparationswinkel für metallische ($r = 0,20$; $p \leq 0,001$) und keramische Hülsenkronen ($r = 0,16$; $p = 0,002$) eher von Befragten mit einer höheren Tätigkeitsdauer gewählt. Auch wenn dieser Zusammenhang aufgrund des r-Wertes als schwach zu interpretieren ist, so könnte dies ein Hinweis darauf sein, dass früher bevorzugt größere Präparationswinkel gelehrt und empfohlen wurden.

Ein Zusammenhang zwischen Präparationswinkel und dem angegebenen Geschlecht konnte nicht festgestellt werden.

Es bleibt ferner zu konstatieren, dass bezogen auf keramische Versorgungsformen 51 % der Befragten und bezogen auf metallische Versorgungsformen 29 % der Befragten nicht den Empfehlungen bezüglich des vorgegebenen Präparationswinkels von maximal 6° folgen. Sie gaben an entweder einen zu konischen oder parallelen Präparationswinkel zu bevorzugen. Zu

flache Winkel erhöhen das Risiko die Pulpa zu irritieren oder gar zu perforieren. Zudem weist ein zu konisch präparierter Zahn mehr mögliche „Abzugsrichtungen“ auf, wodurch das Risiko einer Dezementierung steigt (Hajtó 2010).

Präparationsinstrumente

Der Umfrage nach zur urteilen wurden die Präparationsinstrumente von einer umfassenden Mehrheit von rund 91 % anhand von „eigenen Erfahrungswerten“ signifikant am häufigsten gewählt (n = 406; p ≤ 0,001). Nur circa 22 % gaben an, vorgefertigte Präparationssets zu nutzen. Das DIN-ISO-Nummernsystem (ISO 6360) zur Instrumentenklassifikation wurde immerhin von rund 8 % der Befragten genutzt.

Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zur Folgefrage nach der Geläufigkeit des DIN-Klassifikationssystems. Gemäß den Antworten der Befragten wurde dies von einem höheren Anteil von 19 % gebraucht. Rund einem Drittel war es gänzlich unbekannt. Etwa die Hälfte gab an, dieses zwar zu kennen, nicht aber in der Praxis zu nutzen. Auf Grundlage dieser Befragung lässt sich also festhalten, dass weder die Präparationssets noch das DIN-Klassifikationssystem eine wesentliche Rolle im Instrumenten-Management der Praxen spielen. Die Zahnärzteschaft scheint hier eher auf die eigenen Erfahrungen zu vertrauen.

Das Präparationsinstrument bildet die Schnittstelle zwischen Behandelndem und Zahnoberfläche. Nur in Kenntnis von Durchmesser, Körnung und Form desselbigen lässt sich die Zahnhartsubstanz qualitätsorientiert und sicher bearbeiten. Die Fülle der sich auf dem Markt befindlichen Formen und Ausführungen der Dentalinstrumente erschwert es bei der Präparation stets das passende Instrument auszuwählen. Das aus neun Ziffern bestehende DIN-Klassifikationssystem erscheint zunächst komplex und umständlich. Insofern verwundert die im Fragenbogen mangelnde Resonanz hierfür nicht. Im Zuge des Qualitätsmanagements ist es aber unumgänglich, ein präzises System zur Schleifkörperauswahl im Praxisalltag zu etablieren. Die sich auf Grundlage des Fragebogens ergebenden Defizite im Instrumenten-Management werfen die Frage auf, ob ein ausreichendes Problembewusstsein für dieses Thema besteht und sollten daher zukünftig genauer betrachtet werden.

Die am häufigsten als bevorzugt genutztes Präparationsinstrument gewählten Schleifkörper stellten die Knospe und der Torpedo dar. Die Knospe (ISO-Form 277) wurde von rund 65 % bis 69 % und der Torpedo (ISO-Form 290) materialabhängig von rund 53 % bis knapp 75 % der Befragten gewählt (n = 406). Es ist davon auszugehen, dass die Knospe hierbei vor allem in ihrer Funktion zur okklusalen Reduktion gewählt wurde. Dahinter rangierten die Walze mit abgerundeter Kante (ISO-Form 158), der Konus mit abgerundeter Kante (ISO-Form 553 und 585) und die Flamme (ISO-Form 250).

Die weitere Analyse ergab, dass die Wahl des Schleifkörpers hierbei im Einklang mit der zuvor getroffenen Auswahl der bevorzugt genutzten Präparationsform stand. So gaben die Befragten an – sofern vorher Hohlkehle präferiert wurde – vor allem den Torpedo zu nutzen. Wurde die Stufe hingegen bevorzugt, so wurde vor allem die Walze mit abgerundeter Kante gewählt. Bei der Tangentialpräparation wurde die Flamme favorisiert. Es wurde somit vermehrt jeweils ein dem marginalen Präparationsdesign und der aktuellen Lehrmeinung entsprechender formkongruenter Schleifkörper gewählt.

In Zusammenschau der Ergebnisse kann diskutiert werden, ob die Benutzung von parallelwandigen torpedoförmigen Instrumenten zum Anlegen einer Hohlkehle einen technisch zu anspruchsvollen Arbeitsschritt darstellt. Da die Spitze des Arbeitsteils beim Torpedo nur bis zum halben Durchmesser versenkt wird, fehlt eine stabile Abstützung beim zirkumferenten marginalen Zahnhartsubstanzabtrag. Die gemessenen unzureichend breiten Hohlkehlen

deuten darauf hin, dass der Torpedo nicht wie vorgesehen bis zum halben Durchmesser des Arbeitsteils im Zahn versenkt wird. Die hohen Konvergenzwinkel lassen zudem Rückschlüsse auf eine starke Angulation des Präparationsinstrumentes zu. Der bei subgingivaler Präparation im gingivalen Sulkus überstehende Anteil des Torpedos führt durch Abkippen der Instrumentenspitze auf diese Weise zu einer zusätzlichen Traumatisierung des umgebenden Gewebes. Vor diesem Hintergrund stellt die Nutzung eines Konus mit abgerundeter Kante eine sinnvolle Alternative dar. Bei zur Zahnachse parallelem Ansetzen wird der Präparationswinkel automatisch durch die Steigung des Schleifkörpers vorgegeben. Zudem kann der Konus im Bereich der Präparationsgrenze vollständig versenkt werden. Auf diese Weise kann das Instrument bei der Präparation stabil geführt werden. Zusätzlich wird durch die atraumatische Präparationsweise das umliegende gingivale Attachement geschont. Die im Rahmen dieser Studie vorliegenden Ergebnisse deuten indes auf eine aktuell insgesamt noch seltenere Nutzung von konischen Präparationsinstrumenten hin.

Vergleiche mit den Ergebnissen aus *Hinkelmanns* Umfrage sind nur bedingt möglich, da in beiden Erhebungen nicht das identische Arsenal an Schleifkörpern zur Auswahl stand. Bei *Hinkelmann* konnte zwischen den Instrumenten Kugel, Birne, Torpedo, Zylinder (Kante rund), Zylinder, Kegel und Zylinder (rund) gewählt werden. Hier gaben mit circa 40 % und rund 39 % der Befragten an, einen abgerundeten Zylinder (ISO-Form 157) bzw. einen Torpedo (ISO-Form 289 und 290) für die Präparation von Keramikronen zu nutzen (n = 240). Ein Fünftel gab an hierfür den kantigen Zylinder (ISO-Form 110) und rund ein Drittel den runden Zylinder (ISO-Form 142) zu nutzen. Zur Präparation von Metallkronen gaben 70,7 % der Befragten an einen Torpedo zu gebrauchen, für Metallkeramikronen lag diese Zahl bei 69,3 % der Befragten (Hinkelmann 1993).

Abformverfahren

In Hinblick auf bevorzugt genutzte Abformverfahren stellte die Doppelmischabformung das Verfahren der Wahl da. Mehr als 56 % der Befragten gaben an, dieses „häufig“ einzusetzen. Die Doppelmischabformung stellte somit das signifikant häufigste Abformverfahren gegenüber den anderen Methoden innerhalb der Befragung dar ($p \leq 0,001$). Korrekturabformungen wurden demnach nur von knapp einem Drittel der Teilnehmenden „häufig“ angewendet, 3D-Scan-Verfahren und Einphasenabformungen jeweils nur von rund einem Viertel der Befragten.

3D-Scan-Verfahren scheinen sich unter den Teilnehmenden noch nicht durchgesetzt zu haben. Fast drei Viertel gaben an, das 3D-Scan-Verfahren „gar nicht“ zu nutzen. Eine nähere Aufschlüsselung des Antwortverhaltens zu dieser Abformmethode in Abhängigkeit von der Tätigkeitsdauer ergab jedoch eine schwach negative Korrelation. 3D-Scan-Verfahren wurden häufiger von Zahnärztinnen und Zahnärzten mit kürzerer Tätigkeitsdauer genutzt ($r = -0,15$; $p = 0,006$). Dieser Sachverhalt lässt sich unter Umständen durch eine größere Aufgeschlossenheit und Selbstverständlichkeit der jüngeren Generationen praktizierender Zahnärztinnen und Zahnärzte im Umgang mit digitalen zahntechnischen Technologien erklären.

Nutzung von CAD/CAM-Verfahren

Mehr als drei Viertel der Befragten gaben an CAD/CAM-Verfahren zur Herstellung von Zahnersatz zu nutzen (n = 406). Eine signifikante Korrelation zwischen der Tätigkeitsdauer und der Nutzung von CAD/CAM-Verfahren konnte nicht festgestellt werden ($p = 0,767$). Das Geschlecht hatte hingegen scheinbar einen signifikanten Einfluss auf das Antwortverhalten. Ein signifikant erhöhter Anteil von rund 80 % innerhalb der Männergruppe gab an CAD/CAM-Verfahren zu gebrauchen verglichen mit lediglich circa 66 % innerhalb der Frauengruppe ($p = 0,002$).

Ebenso scheint es einen Zusammenhang zwischen dem Gebrauch von CAD/CAM-Verfahren und der Nutzung von 3D-Scan-Verfahren als Abformmethode unter den Befragten gegeben zu haben. Circa 28 % der Befragten in der CAD/CAM-nutzenden Gruppe (n = 307) gaben an, 3D-Scan-Verfahren „häufig“ einzusetzen. In der nicht CAD/CAM-nutzenden Gruppe (n = 99) wurde angegeben zu circa 6 % 3D-Scan-Verfahren „häufig“ zu nutzen. Letzteres weist auf inkonsistentes Antwortverhalten hin.

Bevorzugte Lage der Präparationsgrenze

Die Analyse der bevorzugt gewählten Präparationsgrenze ergab unter den Teilnehmenden die klare Präferenz einer äqui- bis subgingivalen Lage der Präparationsgrenze insbesondere im FZG.

So gaben circa 58 % der Teilnehmenden an, eine subgingivale Lage der Präparationsgrenze im FZG zu wählen. Eine äquigingivale Lage wurde nur von etwas mehr als einem Drittel angestrebt, wohingegen mit circa 4 % die wenigsten eine supragingivale Lage präferierten (n = 406).

Im ästhetisch weniger anspruchsvollen SZG wurde mit rund 62 % hingegen eine äquigingivale Lage der Restaurationsränder bevorzugt. Circa ein Fünftel gaben jeweils an, hier vorwiegend supra- oder subgingival zu präparieren.

Podhorsky et al. fordern eine Bevorzugung der supragingivalen Präparation, um das parodontale Gewebe zu schonen. Den Autoren nach gehen die zwangsweise auftretenden geringen Fehlpassungen an den Restaurationsrändern mit parodontalen Entzündungen einher. Ein weiterer Vorteil in der supragingivalen Lage läge zudem in einer leichteren Abdrucknahme und Beurteilung der Randgenauigkeit (Podhorsky et al. 2015).

Den Antworten nach zu urteilen wird die Lage der Präparationsgrenze von den Befragten also in ästhetischen anspruchsvollen Bereichen lieber subgingival gehalten; dies erfolgt vermutlich, um ästhetisch störende Restaurationsränder zu verbergen. Parodontal hygienischen Aspekte dürften demnach eine geringere Bedeutung zukommen. Fraglich bleibt, inwieweit bei subgingivaler Lage der Präparationsgrenze Rücksicht auf die biologische Breite genommen wird.

Diskussion des Vergleichs Labor-/Fragebogenauswertung

Die direkte Korrelation zwischen Labor- und Fragebogenauswertung beschränkte sich auf die Parameter Präparationsform und Konvergenzwinkel. Bei der Fragebogenzusammenstellung wurde ein wesentlicher Fokus auf den möglichst übersichtlichen Umfang des Fragebogens gelegt. Hierbei handelte es sich um einen Balanceakt zwischen Informationsgewinn durch das Einfügen von Fragen und mangelnder Aussagekraft durch zu geringere Rücklaufquoten aufgrund eines zu hohen Fragebogenumfangs. So werden deutlich steigende *Drop-Out-Raten* (Abbruchraten) bereits ab einer Bearbeitungszeit von 15 Minuten beschrieben (Ramm 2014). Weitere interessante Aspekte wie die Erfragung von marginalen Präparationsbreiten oder okklusalen Abständen unter den Zahnärztinnen und Zahnärzten hätten zwar weitere direkte Vergleiche ermöglicht, mit hoher Wahrscheinlichkeit aber durch die starke Zunahme der Bearbeitungsdauer des Fragebogens ebenfalls zu einer weiteren Reduzierung der ohnehin schon moderaten Rücklaufquote geführt und die Aussagekraft weiter geschmälert. Weitere Studien könnten daher in Zukunft diese Aspekte näher beleuchten.

Nichtsdestotrotz zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen der Fragebogenauswertung und der Laborauswertung in Bezug auf die Parameter Präparationsform und Konvergenzwinkel. Die Auftretenshäufigkeit der Präparationsformen stimmten nicht mit dem anhand der Fragebogenauswertung zu erwartenden Häufigkeiten überein. Über alle Materialien hinweg zeigten die im Fragebogen bevorzugt gewählte Präparationsform der Hohlkehle in der Laborauswertung signifikant niedrigere Auftretenshäufigkeiten ($p \leq 0,001$). Am deutlichsten fielt der Unterschied bei Betrachtung der Metallversorgungen aus. Hier differierten die Angaben zwischen Labor und Fragebogen um nahezu 40 % (Hohlkehle Labor = 43,5 %; Hohlkehle Umfrage = 82,0 %). Da sich für Metallversorgungen jedoch prinzipiell jede der drei Präparationsformen eignet, hat diese Diskrepanz keine große klinische Relevanz.

Als problematischer erwies sich der beschriebene Sachverhalt bei Betrachtung der keramischen Versorgungen. Nur ein äußerst geringer Anteil von 1 % bis 2 % der Teilnehmenden gab abhängig von der Versorgungsform an, bevorzugt tangential bei keramischen Versorgungen zu präparieren. Diese Angaben deckten sich auch hier nicht mit den Ergebnissen der Laborauswertung. So wurden bei K Versorgungen in rund 38 % der Fälle ($n = 314$), für VM in 45 % der Fälle ($n = 195$) und für VK in rund 34 % ($n = 212$) Tangentialpräparationen als Hauptpräparationsform konstatiert. Führt man sich vor Augen, dass in den gängigen Präparationsempfehlungen die Tangentialpräparation explizit als kontraindiziert gilt, stellt dies einen nicht akzeptablen Zustand dar.

Noch größere Diskrepanzen zeigten sich bei der Korrelation zum Parameter KW. Die Angaben aus dem Fragebogen und die Ergebnisse der Laborauswertung unterschieden sich auch hier signifikant voneinander ($p \leq 0,001$).

Für metallische Hülsenkronen gaben mehr als zwei Drittel der Befragten und für keramische Hülsenkronen knapp die Hälfte der Befragten an, den empfohlenen Konvergenzwinkel von $> 0^\circ$ bis 12° zu beherzigen. Sowohl die zugrunde liegenden Messergebnisse für Kronen als auch für Brücken lagen unabhängig vom betrachteten Material fernab von diesen Umfrageergebnissen.

Am nächsten an den Angaben aus dem Fragebogen lag der vestibulo-orale KW für metallische Brücken. Hier lag die Differenz zwischen Labor- und Fragebogenauswertung bei rund 34 Prozentpunkten (Fragebogen = 49,3 %; Labor = 15,4°). Am stärksten differierten die Angaben hingegen bei keramischen Kronen (Fragebogen = 71,2 %; Labor = 12,0 %) und Brücken (Fragebogen = 71,2 %; Labor = 12,4 %). Die Differenz betrug hier jeweils rund 59 Prozentpunkte.

Es bleibt also in einer überwiegenden Mehrheit der Fälle eine zu konische Präparationsweise zu bemängeln. In Bezug auf keramische Versorgungsformen scheint der korrekte Präparationswinkel zumindest theoretisch verinnerlicht worden zu sein. Etwa die Hälfte gab an, für metallische Hülsenkronen einen zu großen Winkel zu benutzen.

Trotz der geringen Rücklaufquote wäre aufgrund des sich klar abzeichnenden Trends zugunsten der Hohlkehle als bevorzugt genutzte Präparationsform und bezüglich des Konvergenzwinkels auch bei einer höheren Rücklaufquote ein ähnlich eindeutiges Ergebnis zu erwarten. Verschiedene Ansätze könnten Erklärungsversuche für diese Diskrepanz liefern. So könnte es sein, dass Zahnärztinnen und Zahnärzte, welche an der Umfrage teilgenommen haben, dem Thema der zahnärztlichen Präparation ohnehin eine erhöhte Relevanz zukommen lassen und sich demzufolge auch in ihrer Präparationstechnik näher an geltenden Standards orientieren. Dies hätte dann zu einem verzerrten Antwortverhalten gegenüber der Grundgesamtheit geführt. Läge dieser Selektionsbias nicht vor, so müsste man davon ausgehen, dass die Zahnärztinnen und Zahnärzte zwar zu einem Großteil die theoretischen Kenntnisse bezüglich korrekter Präparationsform und Präparationswinkel besitzen, diese aber nicht adäquat in der Praxis umsetzen.

4.4 Schlussfolgerungen

Die beschriebenen Arbeitsergebnisse lassen folgende Schlussfolgerungen zu:

- eine überwiegende Einhaltung der okklusalen Schichtdicken
- eine überwiegende Nichteinhaltung der geforderten Präparationsformen
- eine überwiegende Nichteinhaltung der marginalen Präparationsbreiten vor allem für keramisch verblendete Restaurationen
- einen zu groß gewählten Präparationswinkel und damit negative Effekte auf die Retention der Restauration sowie Erhöhung des Risikos pulpaler Schädigungen
- eine Diskrepanz in der Befragung der Zahnärztinnen und Zahnärzte und den tatsächlich gemessenen Werten, also Unterschiede in der Selbsteinschätzung und tatsächlichen Ausführung der Präparation

Eine Schwierigkeit in der Recherche zu dieser Studie stellte auch die Festlegung auf einen gemeinsamen Nenner bei der Vielzahl an unterschiedlichen Präparationsempfehlungen dar. Gerade im Bereich der Dentalkeramiken gibt es eine Fülle an unterschiedlichen Unterformen, die jeweils unterschiedliche Mindestschichtdicken erfordern. Jeder Hersteller gibt wiederum unterschiedliche Präparationsempfehlungen an. Für den Konvergenzwinkel und die Präparationsform lagen weitgehend einheitliche Empfehlungen vor. Gerade im Bereich der nötigen Präparationsbreiten ist es hingegen kaum möglich, den Überblick zu behalten. Die sich in Lehrbüchern befindlichen Präparationsempfehlungen hinken den aktuellen Leitfäden der Hersteller stellenweise hinterher und entsprechen nicht der tatsächlichen Vorgehensweise. Aktuelle Studien stellen die Relevanz der Präparationsform und -tiefe im Bereich der marginalen Restaurationsgrenze indes in Frage und orientieren sich an einem stufenlosen Übergang zwischen präparierter und unpräparierter Zahnfläche. Mithilfe breit angelegter Untersuchungen sollten neue Erkenntnisse in dieser Fragestellung angestrebt werden.

Stellt die evidenzbasierte Medizin heutzutage bereits in vielen Fachdisziplinen eine der obersten Maxime des ärztlichen Handelns dar, so sollten auch auf dem Gebiet der zahnärztlichen Präparationstechnik ebenfalls eine die aktuelle Datenlage zusammenfassende Leitlinie durch die Fachgesellschaften angestrebt werden. Auf diese Weise kann eine übersichtliche und universell zugängliche Orientierungshilfe für prothetisch tätige Zahnärztinnen und Zahnärzte geschaffen werden.

Nichtsdestotrotz muss auch die Zahnärzteschaft eigenverantwortlich in die Pflicht genommen werden. Auf Grundlage der Studienergebnisse lässt sich schlussfolgern, dass tendenziell kein Mangel an Wissen um die korrekte Präparationstechnik besteht, sondern eher die technische Ausführung Verbesserungspotenzial bietet.

Die zahnärztliche Präparation stellt hierbei einen medizinischen Eingriff mit entsprechenden Risiken für Patientinnen und Patienten dar. Die Abwägung zwischen Schaden und Nutzen muss stets gewahrt bleiben. Zu konische Präparationen stellen eine unnötige Gefährdung der Zahnvitalität dar. Unsachgemäße Präparationsformen und eine Nichteinhaltung der nötigen Präparationstiefen wirken sich negativ auf die Langlebigkeit der Restaurationen aus. Im Zuge eines angemessenen Qualitätsmanagements sollte das Wissen um diese Richtlinien den Grundpfeiler für die Präparation darstellen. Die zunehmende Etablierung moderner Scansysteme könnte zukünftig mithilfe von Echtzeit-Modellen die rein visuelle Kontrolle virtuell unterstützen und die Prozessqualität weiter erhöhen. Dreidimensional navigiertes Präparieren könnte mithilfe der heutigen technischen Standards ebenfalls zukünftig realisierbar werden und die Präparationstechnik vereinfachen. Mangelhafte Umsetzungen dieses Arbeitsschrittes hingegen führen zum unnötigen frühzeitigen Verlust der Versorgungen und werden langfristig gesehen unter ethischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten zum Bumerang für die Praktizierenden.

Auf Grundlage dessen sollten – perspektivisch gesehen – Anpassungen der zahnärztlichen Präparationsweise angestrebt werden. Essenziell sind hierbei eine breitere marginale Präparation und die Verwendung geeigneter Präparationsdesigns mit Vermeidung von Tangentialpräparationen im Bereich der marginalen Präparationsgrenze bei keramischen Restaurationen. Der Präparationswinkel sollte für eine ausreichende Restdentinstärke hierbei nur so konisch wie nötig gewählt werden. Ein reflektierter Umgang mit den Arbeitsmitteln vor allem in Bezug auf die Auswahl und den Einsatz der Präparationsinstrumente erscheint hierfür erforderlich. Nur so lassen sich sowohl für Behandelnde als auch für Patientinnen und Patienten sichere, langfristig erfolgreiche und somit nachhaltigere Arbeitsergebnisse erzielen.

5 Literatur- und Quellenverzeichnis

Agustín-Panadero R, Serra-Pastor B, Fons-Font A, Solá-Ruiz M. Prospective clinical study of zirconia full-coverage restorations on teeth prepared with biologically oriented preparation technique on gingival health: results after two-year follow-up. *Oper Dent*, 2018, 43. 482-487.

Al-Omari WM, Al-Wahadni AM. Convergence angle, occlusal reduction, and finish line depth of full-crown preparations made by dental students. *Quintessence Int*, 2004, 35. 287-293.

Albert HM. Spaltbreiten und Tiefen bei Amalgam-und Gussfüllungen. *Dtsch Zahnärztl Z*, 1971, 26. 672-676.

Amiri-Jezeh M, Rateitschak E, Weiger R, Walter C. The impact of the margin of restorations on periodontal health - a review. *Schweiz Monatsschr Zahnmed*, 2006, 116. 606-613.

Arnetzl G. Präparationstechnik für die Vollkeramik - Die Materialbeschaffenheit als Grundlage für die Präparationsform. *ZMK*, 2008, 24. 284-292.

Augthun M, Mundt T. Implantatprothetische Konzepte zur Ergänzung der verkürzten Zahnreihe. *Dtsch Zahnärztl Z*, 2008, 63.

Bader F, Setz J. Benetzbarkeit und Wiedergabegenauigkeit von Abformmassen. *Dtsch Zahnärztl Z*, 1991, 44. 346-348.

Baldissara P, Comin G, Martone F, Scotti R. Comparative study of the marginal microleakage of six cements in fixed provisional crowns. *J Prosthet Dent*, 1998, 80. 417-422.

Balkenhol M, Rehmann P, Siemer A, Ferger P, Wöstmann B. Die Präzisionsabformung: materialimmanente und verfahrenstechnische Einflussfaktoren - Teil 1: Dimensionstreue. *ZWR - Dtsch Zahnärzteblatt*, 2005, 114. 43-47.

Baltzer A. All-ceramic single-tooth restorations: choosing the material to match the preparation—preparing the tooth to match the material. *Int J Comput Dent*, 2008, 11. 241-256.

Bartols A, Brauer HU. Das Ante'sche Gesetz. ZWR - Dtsch Zahnärzteblatt, 2020, 129. 572-572.

Belli R, Petschelt A, Hofner B, Hajtó J, Scherrer S, Lohbauer U. Fracture rates and lifetime estimations of CAD/CAM all-ceramic restorations. J Dent Res, 2016, 95. 67-73.

Beuer F, Aggstaller H, Edelhoff D, Gernet W. Effect of preparation design on the fracture resistance of zirconia crown copings. Dent Mater J, 2008, 27. 362-367.

Beuer F, Biffar R, Klinke T, Körber E, Kordaß B, Mack F, Mundt T, Ohlmann B, Pospiech P, Rammelsberg P, Renk A, Richter E-J, Schmitter M, Schwenzer N, Setz J, Stark H, Walter M, Weber H. Zahnärztliche Prothetik, 4. Aufl. Thieme Verlag Stuttgart, 2011. 36-66.

Beuer F, Edelhoff D, Gernet W. Effect of preparation angles on the precision of zirconia crown copings fabricated by CAD/CAM system. Dent Mater J, 2008, 27. 814-820.

Boyle WS, Smith GE. Charge coupled semiconductor devices. Bell Syst Tech J, 1970, 49. 578-593.

Bumann A. Klinik-und Praxisführer Zahnmedizin, 1. Aufl. Georg Thieme Verlag Stuttgart, 2003. 39.

Bundeszahnärztekammer. 2021. statistik@bzaek.de

Bundeszahnärztekammer, Kassenzahnärztliche-Bundesvereinigung. Das Dental Vademekum - 10. Ausgabe. Deutscher Zahnärzte Verlag Köln, 2009. 721-863.

Büning H, Trenkler G. Nichtparametrische statistische Methoden. De Gruyter Berlin, 2013. 1.

Chen R-S, Lee M-S, Hu Y-J, Hu C-Y, Tseng W-Y. The effects of low-dose 2-hydroxyethyl methacrylate on apoptosis and survival in human dental pulp cells. J Formos Med Assoc, 2021, 120. 1332-1339.

Christel AHJ. Zahnmedizinethische Kenntnisse und moralische Positionen von Zahnärzten/-innen aus Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen. Med Diss Halle-Wittenberg, 2019.

Clausen JO, Abou Tara M, Kern M. Dynamic fatigue and fracture resistance of non-retentive all-ceramic full-coverage molar restorations. Influence of ceramic material and preparation design. Dent Mater, 2010, 26. 533-538.

Denry I, Kelly JR. State of the art of zirconia for dental applications. Dent Mater J, 2008, 24. 299-307.

Diedrichs G, Khawaja B. Präparation in der rekonstruktiven Zahnmedizin – gezieltes Qualitätsmanagement für mehr Erfolg. ZMK, 2015, 31. 630-637.

DTM. Das Telefonbuch. Deutsche Tele Medien GmbH, 2021.
<https://www.dastelefonbuch.de/>, letzter Zugriff 31.10.2021

DTM. Gelbe Seiten. Deutsche Tele Medien GmbH, 2021.
<https://www.gelbeseiten.de/>, letzter Zugriff 31.10.2021

Edelhoff D, Kern M. Vollkeramik von A bis Z für Praktiker. ZWR - Dtsch Zahnärzteblatt, 2003, 112. 276-281.

Edelhoff D, Sorensen JA. Tooth structure removal associated with various preparation designs for posterior teeth. Int J Periodontics Restor Dent, 2002, 22. 241-249.

El-Kholany NR, Abielhassan MH, Elembaby AE, Maria OM. Apoptotic effect of different self-etch dental adhesives on odontoblasts in cell cultures. Arch Oral Biol, 2012, 57. 775-783.

Erhatič J, Blankenstein F. Der Stumpfpräparationswinkel für konventionelle Zementierung – Definition und Realisierbarkeit. Dtsch Zahnärztl Z, 2013, 68. 170-176.

Faltermeier A. Werkstoffe in der Zahnmedizin. In Medizintechnik Life Science Engineering, Hrsg Wintermantel E, Ha S, 4. Aufl. Springer Berlin Heidelberg, 2008. 1467-1489.

Fechner K. Die Haftkraft selbstkonditionierender Dentinhaftvermittler in Abhängigkeit unterschiedlicher Perfusionsmedien. Med Diss Sachsen-Anhalt, 2008.

Ferrari Cagidiaco E, Zarone F, Discepoli N, Joda T, Ferrari M. Analysis of The Reproducibility of Subgingival Vertical Margins Using Intraoral Optical Scanning (IOS): A Randomized Controlled Pilot Trial. J Clin Med, 2021, 10. 941.

Fick K. Marginaler Randspalt und innere Passung von CAM-gefrästen Kronengerüsten bei unterschiedlichem Präparationswinkel. Med Diss München, 2003.

Firma-Bego. Gebrauchsanweisung: Wirobond© C+. BEGO Bremer Goldschlägerei Wilh. Herbst GmbH & Co. KG, 2018.
https://www.bego.com/fileadmin/user_downloads/Mediathek/Medical/Werkstoffe/Wirobond-C_plus/de_19129_0004_ga_de.pdf, letzter Zugriff 01.11.2021

Firma-Bego. Verarbeitungshinweise: BEGO ZIRKON ST / BEGO ZIRKON ST MULTI. BEGO Medical GmbH, 2020.
https://www.bego.com/fileadmin/user_downloads/Mediathek/Medical/Keramik/BEGO_Zirkon/DE/ST/me_800393_0002_vh_de.pdf, letzter Zugriff 31.10.2021

Firma-Dentsply-Sirona-Lab. Cercon® Zirkonoxid: Kompendium - Klinischer Leitfaden. DeguDent GmbH, 2019.
https://assets.dentsplysirona.com/dentsply/pim/de_DE/Prosthetics/CAD_CAM_materials/Materials/Zirconia/PR_Cercon_Klinischer_Leitfaden_DE_03_2019.pdf, letzter Zugriff 31.10.2021

Firma-Ivoclar-Vivadent. Flow Chart IPS e.max ZirCAD. Ivoclar Vivadent AG 2019.
https://www.ivoclarvivadent.com/de_DE/downloadcenter/?dc=de&lang=de#search-text=zircad&details=8405, letzter Zugriff 15.12.2021

Firma-Ivoclar-Vivadent. Gebrauchsinformation - d.Sign©30. Ivoclar Vivadent AG, 2019.
https://www.ivoclarvivadent.com/de_DE/downloadcenter/?dc=de&lang=de#search-text=alloy%20d.sign30&details=4897, letzter Zugriff 15.12.2021

Firma-Vita-Zahnfabrik. VITA YZ® SOLUTIONS: Verarbeitungsanleitung. VITA Zahnfabrik H. Rauter GmbH & Co.KG, 2019. https://mam.vita-zahnfabrik.com/portal/ecms_mdb_download.php?id=84712&sprache=de&fallback=&cls_session_id=&neuste_version=1 letzter Zugriff 30.10.2021

Firma-Wegold. Dentallegierung Wegold N2 Verarbeitungsanleitung. Wegold Edelmetalle GmbH, 2019.
https://www.wegold.de/?option=com_edocman&task=document.viewdoc&id=727, letzter Zugriff 15.12.2021

Garberoglio R, Brännström M. Scanning electron microscopic investigation of human dentinal tubules. Arch Oral Biol, 1976, 21. 355-362.

Goodacre CJ, Campagni WV, Aquilino SA. Tooth preparations for complete crowns: An art form based on scientific principles. J Prosthet Dent, 2001, 85. 363-376.

Guess PC, Bonfante EA, Silva NR. Effect of core design and veneering technique on damage and reliability of Y-TZP-supported crowns. Dent Mater J, 2013, 29. 307-316.

Gusy B, Marcus K. Online-Befragungen: Eine Alternative zu paper-pencil Befragungen in der Gesundheitsberichterstattung bei Studierenden? Schriftenreihe des AB Public Health: Prävention und psychosoziale Gesundheitsforschung Nr. 01/P12, Freie Universität Berlin, 2012.

Güth J, Beuer F, Brandl S, Ramberger M, Schweiger J, Edelhoff D. Computer Aided Impressioning - The future of impression taking. Digital Dental News, 2010, 4. 32-44.

Güth J, Edelhoff D, Beuer F, Ramberger M, Schweiger J. Intraorale digitale Erfassung – der logische Einstieg in die CAD/CAM-Fertigungskette. Quintessenz Zahntech, 2009, 35. 1156-1166.

Güth J, Wallbach J, Stimmelmayer M, Gernet W, Beuer F, Edelhoff D. Computer-aided evaluation of preparations for CAD/CAM - fabricated all-ceramic crowns. Clin Oral Investig, 2013, 17. 1389-1395.

Hajtó J. Gesichtspunkte zur Präparation von CAD/CAM-gefertigten Restaurationen. ZMK, 2010, 26. 14-18.

Hajtó J. Retention und Widerstandsform bei zementierten Kronen und Brücken. ZMK, 2010, 26. 572-579.

Hertz H. Ueber einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die electriche Entladung. Ann Phys, 1887, 267. 983-1000.

Hilgers R-D, Heussen N, Stanzel S. Statistischer Test. In Lexikon der Medizinischen Laboratoriumsdiagnostik, Hrsg Gressner AM, Arndt T, 3. Aufl. Springer Berlin Heidelberg, 2019. 2271-2272.

Hinkelmann B. Zahnärztliche Präparationstechnik: die Diskrepanz zwischen wissenschaftlichen Erkenntnissen, industriellen Gegebenheiten und den Realitäten der zahnärztlichen Arbeitspraxis. Med Diss Mainz, 1993.

Hung SH, Purk JH, Tira DE, Eick JD. Accuracy of one-step versus two-step putty wash addition silicone impression technique. J Prosthet Dent, 1992, 67. 583-589.

Ilie N, Lohbauer U, Rosentritt M. Einführung. In Werkstoffkunde in der Zahnmedizin, Hrsg Ilie N, Lohbauer U, Rosentritt M, 1. Aufl. Georg Thieme Verlag Stuttgart, 2018. 17-19.

Ingber JS, Rose LF, Coslet JG. The "biologic width" – a concept in periodontics and restorative dentistry. Alpha Omegan, 1977, 70. 62-65.

Janda R. Vollkeramik: Zusammensetzung, Eigenschaften, Anwendung, Wertung. Quintessenz, 2007, 33. 46-60.

Kern M, Keramik A. Was hat sich langfristig bewährt, was noch nicht? ZWR - Dtsch Zahnärzteblatt, 2015, 124. 292-298.

Kern M, Kohal R, Mehl A, Pospiech P, Frankenberger R, Reiss B, Wiedhahn K, Kunzelmann K. Vollkeramik auf einen Blick: Leitfaden zur Indikation, Werkstoffauswahl, Vorbereitung und Eingliederung von vollkeramischen Restaurationen, 6. überarbeitete Aufl. Arbeitsgemeinschaft für Keramik in der Zahnheilkunde Malsch, 2015. 54-81.

Kerschbaum T. Das Risiko des Vitalitätsverlustes nach einer Überkronung. DGZMK-Statement, 1998, 2. 83.

Kerschbaum T, Voß R. Die praktische Bewährung von Krone und Inlay. Dtsch Zahnärztl Z, 1981, 36. 243.

Kim S, Dörscher-Kim J, Liu M, Grayson A. Functional alterations in pulpal microcirculation in response to various dental procedures and materials. Proc Finn Dent Soc, 1992, 88. 65-71.

Kimmel K. Kavitäten- und Kronenpräparation mit rotierenden und oszillierenden Instrumenten, 1. Aufl. Dental Echo Verlag GmbH Koblenz, 1997. 10-13.

Kimmel K, Büchs H, Eibofner E. Zahnärztliche Präparationstechnik: ein Leitfaden für die zahnmedizinische Fachwelt, 1. Aufl. Hüthig Heidelberg, 1986. 17-79.

Kitamura C, Kimura K, Nakayama T, Toyoshima K, Terashita M. Primary and secondary induction of apoptosis in odontoblasts after cavity preparation of rat molars. J Dent Res, 2001, 80. 1530-1534.

Kulzer-GmbH. Tipps & Tricks Einzeitige Abformtechniken. Kulzer-GmbH, 2019. https://www.kulzer.de/media/webmedia_local/downloads_new/flexitime_1/flexitime_14/Tipps_Tricks_Guide_Flexitime_einzeitige_Abformung.pdf, letzter Zugriff 27.10.2021

Laumbacher H, Strasser T, Knüttel H, Rosentritt M. Long-term clinical performance and complications of zirconia-based tooth- and implant-supported fixed prosthodontic restorations: A summary of systematic reviews. J Dent, 2021, 111. 103723.

Lehmann KM, Hellwig E, Wenz H-J. Zahnärztliche Propädeutik - Einführung in die Zahnheilkunde, 11. Aufl. Deutscher Zahnärzte Verlag Köln, 2009. 43-45, 185-222, 259-275.

Liu P-R, Essig ME. Panorama of dental CAD/CAM restorative systems. Compend contin educ dent 2008, 29. 482-488.

Lohbauer U, Belli R, Wendler M. Keramische Materialien. In Werkstoffkunde in der Zahnmedizin, Hrsg Ilie N, Lohbauer U, Rosentritt M, 1. Aufl. Georg Thieme Verlag Stuttgart, 2018. 239-306.

Loi I, Di Felice A. Biologically oriented preparation technique (BOPT): a new approach for prosthetic restoration of periodontically healthy teeth. Eur J Esthet Dent, 2013, 8. 10-23.

Luthardt RG. Die Genauigkeit zahnärztlicher Abformungen für festsitzenden Zahnersatz. Dtsch Zahnärztl Z, 2004, 59. 372-380.

Mack PJ. A theoretical and clinical investigation into the taper achieved on crown and inlay preparations. J Oral Rehabil, 1980, 7. 255-265.

Marshall Jr GW. Dentin: microstructure and characterization. Quintessence Int, 1993, 24. 606-617.

Marxkors R, Geis-Gerstorfer J, Meiners H. Taschenbuch der zahnärztlichen Werkstoffkunde: vom Defekt zur Restauration; mit 11 Tabellen, 6. Aufl. Deutscher Ärzteverlag Köln, 2008. 48-181.

McKight PE, Najab J. Kruskal-wallis test. In The corsini encyclopedia of psychology, Hrsg Weiner IB, Craighead WE, 4. Aufl. John Wiley & Sons, 2010. 1.

Mehl A, Kunzelmann K-H, Folwaczny M, Hickel R. Stabilization effects of CAD/CAM ceramic restorations in extended MOD cavities. J Adhes Dent, 2004, 6. 239-245.

Meiners H. Prophylaxe und Werkstoffkunde. Zahnärztl Welt, 1985, 94. 792-798.

Mjör IA. Dentin permeability: the basis for understanding pulp reactions and adhesive technology. Braz Dent J, 2009, 20. 3-16.

Mossig I. Stichproben, Stichprobenauswahlverfahren und Berechnung des minimal erforderlichen Stichprobenumfangs, Beiträge zur Wirtschaftsgeographie und Regionalentwicklung. Universität Bremen, Institut für Geographie, 2012.

Munz D, Fett T. Ceramics: Mechanical Properties, Failure Behaviour, Materials Selection, 1. Aufl. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2001. 1-7.

Nicholson J. Biological considerations. In Fundamentals of operative dentistry. A contemporary approach, Hrsg Summit JB, Robins JW, Schwartz RS, dos Santo J. Quintessence Publishing Co Chicago, 2001. 1-25.

Ottl P, Lauer H. Präparationstechnik für metallkeramische und vollkeramische Restaurationen. Quintessenz, 1996, 47. 623-640.

Pieper M. Vergleich vier verschiedener Schleifkörper und Darstellung der Zusammenhänge zwischen Präparationsform und Passgenauigkeit von Kronen. Med Diss Gießen, 2004.

Pjetursson BE, Thoma D, Jung R. A systematic review of the survival and complication rates of implant-supported fixed dental prostheses (FDPs) after a mean observation period of at least 5 years. Clin Oral Implants Res, 2012, 23. 22-38.

Podhorsky A, Rehmann P, Wöstmann B. Tooth preparation for full-coverage restorations - a literature review. Clin Oral Investig, 2015, 19. 959-968.

Podhorsky A, Wöstmann B. Präparation zur Aufnahme von Vollkronen. Zahnmedizin up2date, 2016, 10. 155-169.

Pospiech P. Die prophylaktisch orientierte Versorgung mit Teilprothesen, 1. Aufl. Georg Thieme Verlag Stuttgart, 2002. 148.

Pospiech P. Keramik - Vollkeramik: Reine Vertrauenssache Ein Kompendium für die keramikgerechte Anwendung vollkeramischer Systeme in der Zahnmedizin. Firma 3M Espe, 2004. <https://multimedia.3m.com/mws/media/598797O/lava-keramik-vollkeramik-kompendium.pdf>, letzter Zugriff 14.04.2022.

Pötschke M. Potentiale von Online-Befragungen: Erfahrungen aus der Hochschulforschung. In Sozialforschung im Internet, Hrsg Jakob N, Schoen H, Zerback T. VS Verlag für Sozialwissenschaften Wiesbaden, 2009. 75-89.

Quaas S, Weber A, Luthardt RG. Die Anwendung dentaler CAD/CAM-Verfahren in der Praxis. ZWR - Dtsch Zahnärzteblatt, 2006, 115. 504-514.

Ramm M. Response, Stichprobe und Repräsentativität: Zwei Dokumentationen zum Deutschen Studierendensurvey (DSS). In Hefte zur Bildungs- und Hochschulforschung / AG Hochschulforschung. Universität Konstanz, 2014. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:352-0-262244>, letzter Zugriff 14.04.2022

Redmond KC, Smith TM. From whirlwind to MITRE: The R&D story of the SAGE air defense computer. MIT Press Ltd Cambridge, 2000. 5-31.

Rinke S, Lange K, Roediger M, Gersdorff N. Risk factors for technical and biological complications with zirconia single crowns. Clin Oral Investig, 2015, 19. 1999-2006.

Rinke S, Schäfer S, Rödiger M. Zirkonoxidkeramik in der zahnärztlichen Prothetik – eine Standortbestimmung 2013. Zahnmedizin up2date, 2013, 7. 199-221.

Roscoe L. Stereolithography interface specification. America-3D Systems Inc, 1988, 27. 10.

Rudolph H, Luthardt RG. Vollkeramische Restaurationen. Zahnmedizin up2date, 2008, 2. 411-427.

Sailer I, Makarov NA, Thoma DS, Zwahlen M, Pjetursson BE. 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, 2015, 31. 603-623.

Sailer I, Pjetursson BE, Zwahlen M. A systematic review of the survival and complication rates of all-ceramic and metal-ceramic reconstructions after an observation period of at least 3 years. Part II: Fixed dental prostheses. Clin Oral Implants Res, 2007, 18. 86-96.

Schiefelbein R. Untersuchung zur Umsetzung von Richtlinien zur Präparation CAD/CAM-generierter vollkeramischer Frontzahnkronen. Med Diss München, 2015.

Serra-Pastor B, Bustamante-Hernández N, Fons-Font A, Fernanda Solá-Ruíz M, Revilla-León M, Agustín-Panadero R. Periodontal behavior and patient satisfaction of anterior teeth restored with single zirconia crowns using a biologically oriented preparation technique: A 6-year prospective clinical study. J Clin Med, 2021, 10. 3482.

Smith BG. Zahnärztliche Therapie mit Kronen und Brücken, 1. Aufl. Deutscher Ärzte-Verlag Köln, 1987. 46-48.

Soares C, Ferreira M, Bicalho A, de Paula Rodrigues M, Braga S, Versluis A. Effect of light activation of pulp-capping materials and resin composite on dentin deformation and the pulp temperature change. Oper Dent, 2018, 43. 71-80.

Spiekermann H. Zur marginalen Paßform von Kronen und Brücken. Dtsch Zahnärztl Z, 1986, 41. 1015-1019.

Strietzel R. Metalle. In Werkstoffkunde in der Zahnmedizin, Hrsg Ilie N, Lohbauer U, Rosentritt M, 1. Aufl. Georg Thieme Verlag Stuttgart, 2018. 311-348.

Strub JR, Kern M, Türp JC, Witkowski S, Heydecke G, Wolfart S. Curriculum Prothetik: Band 2, 4. überarbeitete Aufl. Quintessenz Verlag Berlin, 2011. 23, 245-272, 349-385.

Taschner M, Lohbauer U. Keramikwerkstoffe in der restaurativen Zahnmedizin. Zahnmedizin up2date, 2016, 10. 233-249.

Weisberg DE. The Engineering Design Revolution - The People, Companies and Computer Systems That Changed Forever the Practice of Engineering. Cyon research corporation Englewood, 2008. 13-2.

Wimmer A-M. Experimentelle Untersuchungen zur Form praxisüblicher Kronenstumpfpräparationen. Med Diss Halle-Wittenberg, 2009.

Wöstmann B. Die Abformung präparierter Zahnhartsubstanz. Zahnärztl Mitt, 1999, 89. 1216-1225.

Wöstmann B. Abformmaterialien. In Werkstoffkunde in der Zahnmedizin, Hrsg Ilie N, Lohbauer U, Rosentritt M, 1. Aufl. Georg Thieme Verlag Stuttgart, 2018. 23-51.

Zerr K. Online-Marktforschung - Theoretische Grundlagen und praktische Erfahrungen, 2. Aufl. Springer Verlag Wiesbaden, 2001. 7-26.

Zimmermann M, Mehl A. CAD/CAM-Technologie. In Werkstoffkunde in der Zahnmedizin, Hrsg Ilie N, Lohbauer U, Rosentritt M, 1. Aufl. Georg Thieme Verlag Stuttgart, 2018. 425-444.

6 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abb. 1: Präparationsformen modifiziert nach Kimmel (1986)	5
Abb. 2: Präparationswinkel und Konvergenzwinkel modifiziert nach Hajtó (2010)	9
Abb. 3: Halt einer mit Phosphatzement zementierten Krone bei vertikalen Abzugskräften in Abhängigkeit vom Konvergenzwinkel modifiziert nach Hajtó (2010) .	10
Abb. 4: Pulpa und biologische Breite als biologisch limitierende Faktoren modifiziert nach Lehmann (2009) und Arnetzl (2010)	11
Abb. 5: Systematik des ISO-Nummernsystems für rotierende zahnärztliche Instrumente nach ISO 6360 modifiziert nach Hinkelmann (1993)	13
Abb. 6: Einteilung der verschiedenen Dentalkeramiken modifiziert nach Pospiech (2014)	17
Abb. 7: Konventionelle Herstellung von prothetischen Restaurationen im Vergleich mit der CAD/CAM-Prozesskette / blau = zahnärztliche Arbeitsschritte; grau = Laborseitige Arbeitsschritte / modifiziert nach Quaas et al. (2006)	19
Abb. 8: Sägeschnitt- und Gegenkiefermodell in Okklusion (Screenshot Exocad Version 3.0 Galway – Eigene Abbildung)	32
Abb. 9: Auswertungsbogen (Excel)	34
Abb. 10: Schematische Ermittlung des interokklusalen Abstandes (links) und Umsetzung in der Auswertungssoftware (rechts: Screenshot Exocad Version 3.0 Galway – eigene Abbildung).....	35
Abb. 11: Einteilung der Zahnflächen – mv: mesiovestibulär / dv: distovestibulär / mo: mesiooral / mv: mesiovestibulär (Screenshot Exocad Version 3.0 Galway – eigene Abbildung)	36
Abb. 12: Schematische Ermittlung der Präparationsbreite mit angelegter Tangente (links) und Umsetzung in der Auswertungssoftware / als Tangente dienen Gitternetzlinien nach entsprechender Rotation des Zahnes (rechts: Screenshot Exocad Version 3.0 Galway – eigene Abbildung)	37
Abb. 13: Schematische Ermittlung des Präparationswinkels (links) und Umsetzung in der Auswertungssoftware (rechts: Exocad Version 3.0 Galway – eigene Abbildung).....	38
Abb. 14: Schematische Ermittlung des Öffnungswinkel von Hohlkehle bzw. Stufe (links) und Umsetzung in der Auswertungssoftware (Software Exocad Version 3.0 Galway – eigene Abbildung)	39
Abb. 15: Auszug aus dem Online-Fragebogen (Erstellung des Fragebogens mittels SoSci-Survey).....	42
Abb. 16: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Aufteilung der ausgewerteten Präparationen auf die einzelnen Zähne (n = 1002)	46
Abb. 17: Deskriptive Statistik (Kreisdiagramm) – Aufteilung der ausgewerteten Präparationen auf die berücksichtigten Versorgungsformen (n = 1002)	47
Abb. 18: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Relative Häufigkeitsverteilung der Hauptpräparationsformen bei unterschiedlichen Materialgruppen (n = 1095)	48
Abb. 19: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Relative Häufigkeiten der Präparationsformen gruppiert nach Front- und Seitenzahnggebiet (n = 1002)	50
Abb. 20: Deskriptive Statistik (Boxplot) – Hohlkehl- und Stufenbreite unterteilt nach Zahnfläche (n = 906)	51
Abb. 21: Deskriptive Statistik (Boxplot) – Ermittelte Präparationsbreiten der Präparationsformen Hohlkehle und Stufe nach Versorgungsformen (n = 906)	54
Abb. 22: Deskriptive Statistik (Boxplot) – Breite der Hohlkehl- oder Stufenpräparation unterteilt nach Lage des Zahnes im Front- oder Seitenzahnggebiet (Frontzahnggebiet n = 246; Seitenzahnggebiet n = 660)	56
Abb. 23: Deskriptive Statistik (Histogramm) – Häufigkeitsverteilung der gemessenen interokklusalen Abstände (n = 799)	57

Abb. 24: Deskriptive Statistik (Boxplot) – KW in vestibulo-oraler Dimension für n = 940 Kronen und Brückenanker getrennt nach Front- und Seitenzahnbereich (unter Ausschluss von negativen Präparationswinkeln und parallel präparierten Zähnen)	61
Abb. 25: Deskriptive Statistik (Boxplot) – KW in mesio-distaler Dimension für n = 912 Kronen und Brückenanker getrennt nach Front- und Seitenzahnbereich (unter Ausschluss von negativen Präparationswinkeln und parallel präparierten Zähnen)	62
Abb. 26: Deskriptive Statistik (Boxplot) – Vestibulo-oraler Konvergenzwinkel in Abhängigkeit von Material gruppiert nach Versorgungsform (n = 940)	65
Abb. 27: Deskriptive Statistik (Boxplot) – Mesio-distaler KW in Abhängigkeit von Material gruppiert nach Versorgungsform (n = 940)	66
Abb. 28: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Relative Häufigkeitsverteilung „unter sich gehender“ Bereiche (links: Frontzahnbereich n = 269, rechts: Seitenzahnbereich n = 733)	70
Abb. 29: Deskriptive Statistik (Kreisdiagramm) – Prozentuale Aufteilung der rekrutierten E-Mail-Adressen auf die einzelnen Bundesländer (n = 9446)	71
Abb. 30: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Absolute Häufigkeitsverteilung der Tätigkeitsdauer der Teilnehmenden (n = 406)	73
Abb. 31: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Absolute Häufigkeitsverteilung der angegeben durchschnittlich benötigten Arbeitszeit pro Präparationsstumpf (n = 406)	74
Abb. 32: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Relative Häufigkeitsverteilung der durchschnittlich benötigten Zeit pro präpariertem Zahn gruppiert nach Tätigkeitsdauer (n = 406)	75
Abb. 33: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Relative Häufigkeitsverteilung der durchschnittlich benötigten Zeit pro präpariertem Zahn gruppiert nach Geschlecht (n = 406)	76
Abb. 34: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Absolute Häufigkeiten des gewählten Präparationswinkels für keramische Hülsenkronen (n = 406)	78
Abb. 35: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Absolute Häufigkeiten des gewählten Präparationswinkels für metallische Hülsenkronen (n = 406)	79
Abb. 36: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Relative Häufigkeiten des gewählten Präparationswinkels für keramische Hülsenkronen gruppiert nach Tätigkeitsdauer (n = 406)	80
Abb. 37: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Relative Häufigkeiten des gewählten Präparationswinkels für metallische Hülsenkronen gruppiert nach Tätigkeitsdauer (n = 406)	80
Abb. 38: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Relative Häufigkeiten bevorzugt genutzter Präparationsinstrumente für keramische Restaurationen (n = 406)	83
Abb. 39: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Relative Häufigkeiten bevorzugt genutzter Präparationsinstrumente für metallische Restaurationen (n = 406)	84
Abb. 40: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Relative Häufigkeiten bevorzugt genutzter Präparationsinstrumente für metallkeramische Restaurationen (n = 406)	85
Abb. 41: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Relative Verteilung der Antwortmöglichkeit „häufig“ bezüglich des bevorzugt genutzten Abformverfahrens (n = 403)	87
Abb. 42: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Relative Häufigkeiten bezüglich der Nutzung von 3D-Scan-Verfahren als Abformmethode gruppiert nach Tätigkeitsdauer (n = 317)	88
Abb. 43: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Relative Häufigkeiten bezüglich der Antwortmöglichkeiten zur Nutzung von CAD/CAM-Verfahren gruppiert nach Tätigkeitsdauer (n = 406)	89
Abb. 44: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Relative Häufigkeiten bezüglich der Antwortmöglichkeiten zur Nutzung von CAD/CAM-Verfahren gruppiert nach Geschlecht (n = 406)	90

Abb. 45: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Bevorzugt gewählte Lage der Präparationsgrenze im FZG gruppiert nach dem bevorzugt gewählten Abformverfahren (n = 403)	92
Abb. 46: Deskriptive Statistik (Balkendiagramm) – Bevorzugt gewählte Lage der Präparationsgrenze im SZG gruppiert nach dem bevorzugt gewählten Abformverfahren (n = 403)	92
Tabelle 1: Präparationsempfehlungen aus der Literatur bezüglich der marginalen Präparationsbreite	22
Tabelle 2: Präparationsempfehlungen aus der Literatur bezüglich der okklusalen und inzisalen Präparationsbreite	23
Tabelle 3: Präparationsempfehlungen aus der Literatur bezüglich des Präparationswinkels	24
Tabelle 4: Präparationsempfehlungen aus der Literatur bezüglich Design und Lage der Präparationsgrenze	24
Tabelle 5: Präparationsempfehlungen beispielhafter Dentalfirmen – Präparationsbreite für keramische Werkstoffe (Zirkonoxidkeramik vollanatomisch oder verblendet)	25
Tabelle 6: Präparationsempfehlungen beispielhafter Dentalfirmen – Präparationsbreite für metallische Werkstoffe	26
Tabelle 7: Präparationsempfehlungen beispielhafter Dentalfirmen – Präparationswinkel und Präparationsgrenze für keramische Werkstoffe (Zirkonoxidkeramik vollanatomisch oder verblendet)	27
Tabelle 8: Deskriptive Statistik – Mittelwert, Median und Standardabweichung der Präparationsbreite untergliedert nach Zahnfläche	52
Tabelle 9: Interferenzstatistik – Präparationsbreite: Dunn-Test zum paarweisen Vergleich der Zahnflächen; signifikante Ergebnisse zum Niveau $p < 0,05$ sind farblich hervorgehoben (n = 906)	53
Tabelle 10: Deskriptive Statistik – Interokklusaler Abstand untergliedert nach Versorgungsform	58
Tabelle 11: Deskriptive Statistik – Interokklusaler Abstand untergliedert nach Lage des Zahnes	58
Tabelle 12: Deskriptive Statistik – Anzahl von Präparationswinkeln $< 0^\circ$ unterteilt nach Zahnfläche und Lage des Zahnes (n = 112)	60
Tabelle 13: Deskriptive Statistik – Konvergenzwinkel in vesitbulo-oraler Dimension (n = 940)	61
Tabelle 14: Deskriptive Statistik – Konvergenzwinkel in mesio-distaler Dimension (n = 912)	62
Tabelle 15: Deskriptive Statistik – Konvergenzwinkel differenziert nach Material und Versorgungsart	64
Tabelle 16: Interferenzstatistik – Einstichproben-Wilcoxon-Test zur Prüfung der Konvergenzwinkel gegen den Referenzwert 12° (nicht-signifikante Ergebnisse gräulich hervorgehoben)	67
Tabelle 17: Deskriptive Statistik – Öffnungswinkel der Hohlkehle und Stufe	68
Tabelle 18: Interferenzstatistik – Einstichproben-Wilcoxon-Test zur Prüfung der jeweiligen Öffnungswinkel gegen den Referenzwert 140° für Hohlkehle und 110° für Stufe	69
Tabelle 19: Deskriptive Statistik – Relative Häufigkeiten der materialabhängig bevorzugt gewählten Präparationsform (n = 406)	77
Tabelle 20: Deskriptive Statistik – Relative Häufigkeiten bezüglich der Frage nach der bevorzugt genutzten Lage der Präparationsgrenze im Front- und Seitenzahnggebiet (n = 406)	91

Tabelle 21: Interferenzstatistik – Ergebnisse des Binomialtestes zum Vergleich Fragebogen- und Laborauswertung in Bezug auf den Konvergenzwinkel 0° bis 12° ... 95

Danksagung

Dank gebührt in erste Linie meinen liebevollen Eltern Bärbel und Lothar, die immer für mich da waren und ohne die ich diesen Weg so nicht hätte beschreiten können. Darüber hinaus danke ich meiner wunderbaren Ehefrau Parmida. Als treue Gefährtin der letzten Jahre stand sie mir unentwegt motivierend zur Seite und war mir eine Stütze.

Dank gilt ebenso meinem Doktorvater Professor Hugger für die Realisierung dieser Arbeit.

Des Weiteren danke ich den an dieser Studie beteiligten zahntechnischen Laboren für die Unterstützung und Bereitstellung der digitalen Modelle.

Besonders herzlicher Dank gilt abschließend meiner Betreuerin Frau Dr. Diedrichs für die Idee zu dieser Studie. Stets stand sie mir mit bedingungsloser Unterstützung zur Seite und war mir sowohl fachlich als auch menschlich ein Vorbild. Ihre Expertise, welche sie in unsere zahlreichen Gespräche und Diskussionen hat einfließen lassen, weiß ich sehr zu schätzen.