

Aus dem
Institut für Zahnärztliche Prothetik,
Alterszahnmedizin und Funktionslehre
der

Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

Der Einfluss des Kronen-Wurzel-Verhältnisses auf die
maximale Belastbarkeit postendodontisch restaurierter
Oberkiefer-Schneidezähne nach Alterung

zur Erlangung des akademischen Grades

Doctor medicinae dentariae (Dr. med. dent.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

U f u k A d a l i

aus Berlin

Datum der Promotion: 13.12.2019

Meiner Familie gewidmet

Inhaltsverzeichnis	Seite
I. Zusammenfassung	6
II. Abstract	8
III. Einleitung	10
III.1 Der zerstörte Oberkiefer-Schneidezahn	10
III.2 Prognosebestimmende Faktoren für den Therapieerfolg eines postendodontisch restaurierten Zahns	11
III.2.1 Die Restzahnhartsubstanz	11
III.2.2 Die parodontalen Verhältnisse	12
III.2.2.1 Die effektive Kronen- und Wurzellänge und das Kronen-Wurzel-Verhältnis	13
III.2.3 Die postendodontische Restauration	15
III.2.3.1 Die indirekte Restauration	15
III.2.3.2 Der Wurzelkanalstift	15
III.2.3.3 Der Ferrule-Effekt	17
III.3 Die biologische Breite	18
III.4 Präprothetische Maßnahmen, die das Kronen-Wurzel-Verhältnis beeinflussen	20
III.4.1 Die chirurgische Kronenverlängerung	20
III.4.2 Die forcierte Extrusion	22
III.4.2.1 Die chirurgische Extrusion	22
III.4.2.2 Die kieferorthopädische Extrusion	23
III.4.3 Die Wurzelspitzenresektion	24
III.5 Implantate	25
IV. Problem- und Zielstellung	27
V. Material und Methode	29
V.1 Zahnauswahl	29
V.2 Zahnvermessung	29

V.3 Gruppencharakteristika und die Berechnung des Kronen-Wurzel-Verhältnisses	29
V.4 Gruppenvorbereitung	32
V.5 Endodontische Aufbereitung	33
V.6 Stiftsetzung und Aufbauherstellung	34
V.7 Stumpfpräparation	36
V.8 Einbetten der Proben	37
V.9 Herstellung der Kronen	39
V.10 Befestigung der Kronen	40
V.11 Vorbereitung der Implantatgruppe	42
V.12 Kausimulation	43
V.13 Bruchversuche	45
V.14 Frakturmusteranalyse	46
V.15 Statistik	46
VI. Ergebnisse	47
VI.1 Zahnvermessung	47
VI.2 Kronen-Wurzel-Verhältnis	48
VI.3 Versagensrate nach der Kausimulation	49
VI.4 Auswertung der maximalen Belastbarkeit	49
VI.5 Auswertung der Frakturmuster	51
VI.5.1 Frakturmusteranalyse	51
VI.5.2 Häufigkeitsverteilung der Frakturmuster innerhalb der Gruppen	53
VI.5.3 Darstellung der verschiedenen Frakturmuster	54
VI.6 Zusammenfassung der Ergebnisse	56
VII. Diskussion	57
VII.1 Diskussion der Methodik	57
VII.1.1 Zahnauswahl	57

VII.1.2 Gruppengröße und -zuweisung.....	58
VII.1.3 Wurzelkanalbehandlung und Stiftbettbohrung	58
VII.1.4 Wurzelkanalstift.....	59
VII.1.5 Stiftsetzung und Aufbau	60
VII.1.6 Kronenversorgung.....	61
VII.1.7 Einbetten der Proben	62
VII.1.8 Implantate	62
VII.1.9 Kausimulation.....	63
VII.1.10 Linearer Belastungstest	64
VII.2 Diskussion der Ergebnisse	65
VII.2.1 Das Kronen-Wurzel-Verhältnis.....	65
VII.2.2 Wurzelspitzenresektion und forcierte Extrusion	66
VII.2.3 Chirurgische Kronenverlängerung.....	68
VII.2.4 Implantate	71
VII.2.5 Frakturmusteranalyse	72
VIII. Schlussfolgerungen	74
IX. Literaturverzeichnis.....	76
X. Anhang.....	87
X.1 Abkürzungen	87
X.2 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	89
X.3 Materialliste	91
X.4 Eidesstattliche Versicherung	96
X.5 Lebenslauf	97
X.6 Publikationsliste	98
X.7 Danksagung	100

I. Zusammenfassung

Einleitung:

Zahnerhaltende Eingriffe, die das Kronen-Wurzel-Verhältnis (R_{CR}) beeinflussen, sollen eine Zahnextraktion verhindern. Die Evidenz zum Einfluss des sich ändernden R_{CR} infolge einer Wurzelspitzenresektion (WSR), einer forcierten Extrusion (FE) oder einer chirurgischen Kronenverlängerung (CKV) auf die Belastbarkeit eines postendodontisch restaurierten Oberkiefer-Schneidezahns ist gering. Die vorliegende In-vitro-Studie untersucht den biomechanischen Einfluss unterschiedlicher R_{CR} auf die Belastbarkeit von postendodontisch restaurierten Oberkiefer-Schneidezähnen.

Methodik:

48 mittlere Oberkiefer-Schneidezähne wurden in 4 Gruppen aufgeteilt. Die Kontroll (K)- sowie FE-Gruppe wurde 2 mm über der Schmelz-Zement-Grenze (SZG) dekapitiert. Die WSR-Gruppe wurde apikal um 2 mm gekürzt und analog zur K-Gruppe dekapitiert. Die CKV-Gruppe wurde auf Höhe der SZG dekapitiert. Alle Proben wurden postendodontisch restauriert. Als Kontrollgruppe wurde die Implantatrestitution (IMPL) untersucht (Bone-Level, $n = 12$, $\varnothing 4,1$ mm, $l = 12$ mm). Versorgt wurden diese mit Lithiumdisilikat-Abutments auf Titan-Klebebasen. Das R_{CR} wurde ermittelt. Alle Proben erhielten Lithiumdisilikat-Kronen, wurden beweglich eingebettet, einer Kausimulation unterzogen (1,2 Mio; 0-50 N; 1,6 Hz; 6000 thermische Zyklen bei 5° – 55° C; 2 min/Zyklus) und bis zum Bruch belastet. Die deskriptiven Daten für die Zahnbeweglichkeit und das R_{CR} wurden mit der einfaktoriellen ANOVA-Analyse verglichen. Die Überlebensraten nach der Kausimulation wurden mittels Log-rank-Test und die Bruchbelastbarkeiten der Gruppen mit dem Kruskal-Wallis- und dem Mann-Whitney-U-Test verglichen. Die Frakturmusteranalyse erfolgte mit dem Chi-Quadrat-Test.

Ergebnisse:

In den Gruppen K, WSR, FE und CKV versagte jeweils eine Probe, während in IMPL zwei Proben während der Kausimulation versagten. Die maximale Belastbarkeit der Gruppen unterschied sich signifikant voneinander ($p < 0,001$). F_{max} Median [N] (min / max):

K = 252 (204 / 542), WSR = 293 (243 / 443), FE = 263 (183 / 371), CKV = 195 (140 / 274), IMPL = 446 (370 / 539). Der paarweise Gruppenvergleich zeigte signifikante Unterschiede ($p \leq 0,002$) zwischen den zahnbasierenden Gruppen und IMPL; ebenso zwischen K und CKV ($p = 0,045$), WSR und CKV ($p = 0,001$) sowie FE und CKV ($p = 0,033$). Ein $R_{CR} > 1$ führte zu geringeren Bruchbelastungswerten als ein $R_{CR} < 1$. In der WSR-Gruppe trat signifikant häufig die mittlere Wurzelfraktur auf.

Schlussfolgerungen:

Um eine 2 mm hohe Dentinmanschette (Ferrule-Effekt) und die biologische Breite an einem tiefzerstörten Oberkiefer-Schneidezahn sicherzustellen, sollte eine FE durchgeführt werden. Eine WSR hat keinen negativen Einfluss auf die Biomechanik des Zahns. Eine CKV führt zum höchsten R_{CR} . Ein $R_{CR} < 1$ wirkt sich günstig auf die maximale Belastbarkeit aus. Implantatkronen halten großen Belastungen stand, sind aber anfällig für technische Komplikationen während der Gebrauchsphase.

II. Abstract

Objective:

The aim of this in vitro study is to investigate the biomechanical impact of procedures in the aesthetic zone that are intended to restore severely damaged teeth in order to avoid tooth extraction and aesthetically-challenging implant placement. There is no evidence concerning load capability of apical-root-resection (WSR), forced-eruption (FE) and surgical-crown-lengthening (CKV), respectively. Tooth- and implant-born (IMPL) restorations are compared using dynamic and subsequent linear loading (LL) simulation.

Methods:

Forty-eight maxillary incisors were divided into 4 groups for this study. The control (K)- and FE-group were both decoronated 2 millimeters above the cemento-enamel junction. The WSR-group received a 2 millimeter apical-root-resection and was decapitated analogously to the K-group. The CKV-group was decapitated at the level of the cemento-enamel junction. All samples were root canal treated and received adhesive core-and-post buildups. The IMPL-group consisted of bone-level implants ($n = 12$, $\varnothing 4.1$ mm, $l = 12$ mm) supplied with lithiumdisilicate-abutments on titanium-bases. Crown-root-ratios (R_{CR}) were calculated. Each sample was supplied with lithiumdisilicate-crowns and exposed to thermo-cycling and mechanical loading (TCML; 1.2 million cycles; 0-50 N; 6000 thermal cycles at 5° - 55° C, 2 min each), and subsequent LL until failure occurred. Log-rank, Kruskal-Wallis, Mann-Whitney-U, ANOVA and Chi-Square were used for the statistical calculations.

Results:

In each of the tooth based groups one sample returned failure during TCML. Fracture loads after subsequent LL differed significantly ($p < 0,001$) between groups, while implants showed the highest values at F_{max} median value [N] (min / max): K = 252 (204 / 542); WSR = 293 (243 / 443); FE = 263 (183 / 371); CKV = 195 (140 / 274); and IMPL = 446 (370 / 539). There were significant differences ($p \leq 0,002$) following a pair-wise comparison between tooth-based and implant-born

restorations (IMPL) as well as between K and CKV ($p = 0.045$), WSR and CKV ($p = 0.001$), and FE and CKV ($p = 0.033$). A $R_{CR} < 1$ increased load capability compared to $R_{CR} > 1$. The predominant failure mode in WSR was the root fracture.

Conclusion:

Forced-eruption appears to be preferable to ensure proper biological width and a ferrule to retain compromised teeth. Apical-root-resection has no adverse biomechanical impact. Surgical-crown-lengthening has the most negative effect on the R_{CR} . A root length larger than that of the crown ($R_{CR} < 1$) appears beneficial. Implant-born restorations are capable of resisting high loads, but mechanical failure of the restoration during subcritical loading may occur.

III. Einleitung

III.1 Der zerstörte Oberkiefer-Schneidezahn

Regelmäßig wird der Zahnarzt mit zerstörten permanenten Schneidezähnen konfrontiert. Dieser Zustand kann durch Primärkaries, also das erstmalige Auftreten einer Karies, oder durch Sekundärkaries, also das Auftreten einer Karies am Randbereich einer Restauration, verursacht werden. Ebenso können Erosionen, Abrasionen, Ermüdungsbrüche und Frakturen zu erheblichen Substanzdefekten führen, die einer Intervention bedürfen. Die Therapie eines zerstörten Zahns beinhaltet die funktionelle und ästhetische Rekonstruktion der verlorengegangenen Zahnhartsubstanz.

Falls durch eine komplizierte Kronen- und/oder Wurzelfraktur die Pulpa eröffnet wurde oder eine irreversible Pulpitis vorliegt, muss im Vorfeld der Restauration eine endodontische Behandlung (Synonym: Wurzelkanalbehandlung) stattfinden. Diese zahnerhaltende Maßnahme findet sich zu einem hohen Anteil (77,6 %–87 %) im permanenten Gebiss erwachsener Menschen wieder (Imfeld, 1991; Kabak & Abbott, 2005). Während der endodontischen Behandlung wird das Pulpagewebe entfernt, der Wurzelkanal erweitert, mechanisch und chemisch gereinigt, um die Mikroorganismenzahl zu senken, und abschließend bakteriendicht obliteriert (Hulsmann, Rummelin, & Schafers, 1997). Ausschlaggebende Faktoren für den Erfolg der Therapie sind (Ng, Mann, Rahbaran, Lewsey, & Gulabivala, 2007; Tabassum & Khan, 2016):

- Eine homogene und blasenfreie Wurzelfüllung, die maximal 2 mm über dem radiologischen Apex endet und nicht über die Wurzelspitze reicht.
- Die intra- sowie extrakanalikuläre Bakterienfreiheit.
- Die Aufbereitung und Reinigung aller vorhandenen Wurzelkanäle inklusive akzessorischer Kanäle.
- Die Aufbereitung der Kanäle ohne Stufenbildung, die Perforation der Wände oder die Verblockung des Wurzelkanals durch Instrumentenfragmente oder Dentin.
- Ein postendodontischer bakteriendichter Verschluss durch eine definitive Restauration.

Die endodontische Behandlung eines Zahns hat Erfolgsraten von 86 %–97 % (Elemam & Pretty, 2011; Meeuwissen & Eschen, 1983; Salehrabi & Rotstein, 2004). Jedoch liegt die Komplikationsrate endodontisch behandelte Zähne im Vergleich zu vitalen Zähnen

höher und wird durch verschiedene prognosebestimmende Faktoren beeinflusst (Adolphi, Zehnder, Bachmann, & Gohring, 2007; Heydecke & Peters, 2002; Pjetursson et al., 2004). Diese Faktoren werden im Folgenden aufgeführt.

III.2 Prognosebestimmende Faktoren für den Therapieerfolg eines postendodontisch restaurierten Zahns

III.2.1 Die Restzahnhartsubstanz

Das Ausmaß der noch vorhandenen Zahnhartsubstanz kann durch die Ausdehnung einer Karies oder durch den Frakturverlauf nach einem Zahntrauma variieren. Zu den zahnerhaltenden Maßnahmen, die die Zahnhartsubstanz zusätzlich reduzieren können, gehören: die Präparation der Trepanationsöffnung, die Aufbereitung des Wurzelkanals, die Stiftbettbohrung (Tang, Wu, & Smales, 2010) und die Präparation für eine indirekte Restauration, bei der bis zu 72 % der koronalen Zahnhartsubstanz verloren gehen kann (Edelhoff & Sorensen, 2002). Das fehlende koronale und radikuläre Dentin führt zu einer Strukturschwächung des Zahns und steigert signifikant das Misserfolgsrisiko (Schwartz & Robbins, 2004; Tang et al., 2010). Die alleinige Präparation eines endodontischen Zugangs an einem Frontzahn reduziert ebenso signifikant dessen Biegefestigkeit (Magne & Douglas, 2000). Die darauffolgende Wurzelkanalbehandlung führt durch die zusätzliche Reduktion der Zahnhartsubstanz zur weiteren Strukturschwächung und senkt die maximale Belastbarkeit um bis zu 30 % (Reeh, Messer, & Douglas, 1989; Trope & Ray, 1992; Wu, van der Sluis, & Wesselink, 2004). Betrifft der Zahnhartsubstanzverlust größere koronale Anteile und inkludiert die Randleisten, sinkt die Rigidität des Zahns um bis zu 63 % (Reeh et al., 1989). In einer In-vitro-Studie wurde die maximale Belastbarkeit von Oberkiefer-Schneidezähnen nach einer postendodontischen Restauration mit einem Wurzelkanalstift und einer Krone verglichen (Santos Pantaleon, Morrow, Cagna, Pameijer, & Garcia-Godoy, 2018). Die Autoren kamen zu dem Schluss, dass Zähne mit einer größeren Restzahnhartsubstanz unter der Krone einer größeren Belastung standhalten konnten, bevor es zu einer Dezementierung der Krone oder einer Fraktur des Zahns beziehungsweise des Stift-Stumpf-Aufbaus kam.

Aus der Literatur heraus wird deutlich, dass ein zentraler Parameter für den langfristigen Therapieerfolg eines zerstörten Zahns, der postendodontisch restauriert wurde, das

Ausmaß der noch vorhandenen koronalen und radikulären Zahnhartsubstanz ist (Bitter et al., 2009; Naumann, Blankenstein, & Barthel, 2006; Naumann, Koelpin, Beuer, & Meyer-Lueckel, 2012).

III.2.2 Die parodontalen Verhältnisse

Aus der fünften Deutschen Mundgesundheitsstudie (DMS) geht hervor, dass jeder zweite Erwachsene (51,6 %) im Alter von 35 bis 44 Jahren von einer parodontalen Erkrankung betroffen ist (Institut-der-Deutschen-Zahnärzte, 2016). Davon weisen 43,4 % einen Attachmentverlust von 3–4 mm und 8,2 % einen solchen von ≥ 5 mm auf. Bei den 65- bis 74-Jährigen liegt der Gesamtanteil der parodontal Erkrankten bei 64,6 %. Die moderate Parodontitis beläuft sich hier auf 44,8 % und die schwere auf 19,8 %. Bei den 75- bis 100-Jährigen verstärkt sich dieser Trend. Hier weisen neun von zehn Menschen eine moderate oder schwere Parodontitis auf. Die Einteilung in eine moderate und schwere Parodontitis wurde 2018 von einer neuen Klassifizierung abgelöst (Caton et al., 2018). In dieser wird die Parodontitis je nach Schweregrad in vier Stadien (Staging) und drei Progressionsgrade (Grading) eingeteilt.

Eine Verringerung des Knochen-Wurzel-Kontakts kommt nicht nur entzündungsbedingt durch eine Parodontitis, sondern auch durch übermäßige okklusale Kontakte oder durch eine nicht-axiale Belastung bei Parafunktionen zustande (Bergman, Lundquist, Sjogren, & Sundquist, 1989; Iqbal, Johansson, Akeel, Bergenholtz, & Omar, 2003). Das Parodontium spielt eine entscheidende Rolle in der Stressminimierung des Zahns. Dies zeigt sich dadurch, dass bei hohen statischen und dynamischen Belastungen am Zahn sich der Knochen-Wurzel-Kontakt verringert und zu einem erhöhten Lockerungsgrad und erweiterten Parodontalspalt führt (Ona & Wakabayashi, 2006). Dies wird als Stressminimierung angesehen, um das Frakturrisiko des Zahns zu reduzieren.

Attachmentverlust oder erhöhte Lockerungsgrade an endodontisch behandelten Zähnen gehören mit 32 % zu den zweithäufigsten Misserfolgen, während Kronenfrakturen mit 59,4 % dominieren (Vire, 1991). *In vitro* zeigt ein postendodontisch restaurierter oberer Schneidezahn bei einem 50%igen Attachmentverlust eine um 30 % geringere Belastbarkeit (Naumann, Rosentritt, Preuss, & Dietrich, 2006). Dies deckt sich mit weiteren Studien, die den Zusammenhang zwischen reduziertem Attachment des Zahns

und erhöhten Misserfolgsraten aufzeigen (Nyman & Lindhe, 1979; Sterzenbach, Tunjan, Rosentritt, & Naumann, 2014). Die Anzahl der Approximalkontakte hat zusätzlich einen Einfluss auf den Erfolg der Therapie (Caplan, Kolker, Rivera, & Walton, 2002). Durch Zahnverlust oder Zahnwanderungen können proximale Kontakte verloren gehen. Liegen weniger als zwei Approximalkontakte vor, steigt das Misserfolgsrisiko um das 3-Fache. Dies wird durch das Auffangen von okklusalen Kräften durch die Nachbarzähne erklärt.

Die aufgeführte Literatur veranschaulicht, dass die Belastbarkeit eines Zahns und somit der langfristige Erfolg maßgeblich vom Knochen-Wurzel-Kontakt beeinflusst wird. Durch pathologische oder physiologische Umbauvorgänge am Parodontium ändert sich der Knochen-Wurzel-Kontakt und somit die effektive Kronen- und Wurzellänge sowie das Kronen-Wurzel-Verhältnis.

III.2.2.1 Die effektive Kronen- und Wurzellänge und das Kronen-Wurzel-Verhältnis

Anatomisch wird die Zahnwurzel von der Zahnkrone durch die Schmelz-Zement-Grenze abgegrenzt. Da der Hebelarm am Zahn durch den marginalen Knochen bestimmt wird, muss dieser bei Belastungstests betrachtet werden. Die Autorengruppe um PENNY et al. unterscheiden die anatomische Kronen- und Wurzellänge von der klinischen Kronen- und Wurzellänge und beleuchten die Bedeutung für die prothetische Versorgbarkeit (Penny & Kraal, 1979). In den Studien von MENG et al. und GEGAUFF et al. wird anstelle der „klinischen“ Kronen- und Wurzellänge der Begriff „effektive“ Kronen- und Wurzellänge benutzt (Gegauff, 2000; Meng, Chen, Guang, Yip, & Smales, 2007). Die effektive Kronenlänge (L_K) bezeichnet den Teil des Zahns, der über dem krestalen Knochen liegt, während die effektive Wurzellänge (L_W) die Zahnabschnitte beinhaltet, die zwischen Apex und krestalem Knochen liegen (Abbildung 1). Die effektive Kronen- und Wurzellänge kann radiologisch bestimmt werden (Jepsen, 1963; Stramotas et al., 2000).

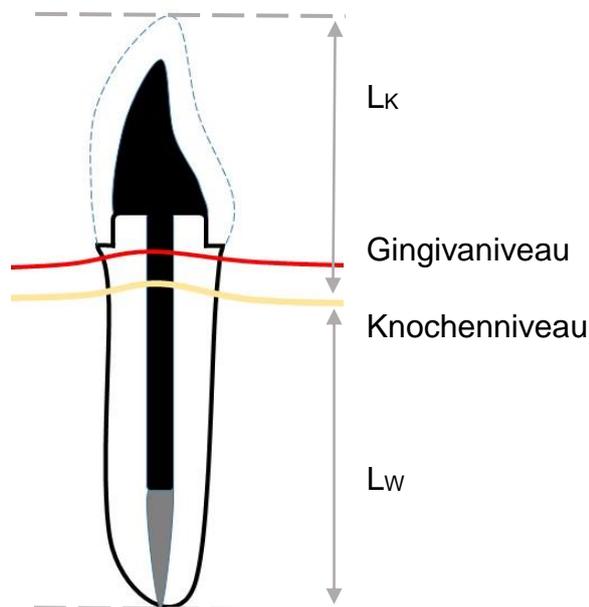


Abbildung 1: Das Verhältnis von L_K zu L_W ergibt das Kronen-Wurzel-Verhältnis (R_{CR}):

$$L_K \div L_W = R_{CR}.$$

Das Kronen-Wurzel-Verhältnis eines Zahns beeinflusst zudem seine eigene Überlebenswahrscheinlichkeit: In einer klinischen Langzeitstudie wurden 856 Pfeilerzähne untersucht, an denen klammerverankerte Prothesen befestigt waren (Tada et al., 2015). Diese teilte man in 5 Risikogruppen ein, die sich durch ihr Kronen-Wurzel-Verhältnis unterschieden. Die Zahnverlustrate nach 7 Jahren lag in den Gruppen mit einem Kronen-Wurzel-Verhältnis von $\geq 1,5$ signifikant höher als in den Vergleichsgruppen mit geringeren Kronen-Wurzel-Verhältnissen. In einer weiteren klinischen Langzeitstudie wird beschrieben, dass das höchste Frakturrisiko für einen Zahn durch ein ungünstiges Kronen-Wurzel-Verhältnis von $\geq 1,5$ verursacht wird, gefolgt von einer endodontischen Behandlung und erhöhten Sondierungswerten (Tada, Ikebe, Matsuda, & Maeda, 2013). Bei 100 Parodontitis-Patienten wurde trotz Therapie eine schlechte Prognose für den Zahnerhalt beschrieben, wenn das Kronen-Wurzel-Verhältnis „ungünstig“ war (McGuire & Nunn, 1996). In einer Literaturübersicht wird das Kronen-Wurzel-Verhältnis als „günstig“ definiert, wenn es < 1 ist, als „problematisch“, wenn es 1 beträgt, und als „ungünstig“, sobald es > 1 ist (Avila et al., 2009).

Bislang ist in der Literatur der Einfluss des Kronen-Wurzel-Verhältnisses auf die maximale Belastbarkeit von Oberkiefer-Schneidezähnen nach postendodontischer Restauration nicht quantifiziert worden.

III.2.3 Die postendodontische Restauration

III.2.3.1 Die indirekte Restauration

Um ein erneutes Eindringen von Mikroorganismen oder deren Stoffwechselprodukten in den Wurzelkanal zu verhindern, wird zusätzlich zu der vollständigen und suffizienten Wurzelkanalfüllung ein bakteriendichter koronaler Verschluss benötigt. Ist dieser nicht gegeben, kann es durch eine Randspaltbildung zu einer Reinfektion des Wurzelkanals kommen, die in wenigen Tagen zu einer bakteriellen Infektion des periapikalen Gewebes führen kann (koronales Leakage) (Lin, Skribner, & Gaengler, 1992; Swanson & Madison, 1987). Durch die Reinfektion sinkt die Erfolgsrate einer endodontischen Behandlung nach 10 Jahren auf 59 %, was eine Revision der Wurzelkanalbehandlung erfordert (Meeuwissen & Eschen, 1983; Saunders & Saunders, 1994). Um dieses Risiko zu senken und koronales Leakage zu verhindern, ist ein bakteriendichter Verschluss durch eine definitive Restauration notwendig.

Während kleinere Zahnhartsubstanzdefekte zuverlässig und kostengünstig adhäsiv mit Kunststoff restauriert werden können (Demarco et al., 2015), kann die Restauration eines tiefzerstörten Zahns, bei dem über 50 % der koronalen Zahnhartsubstanz fehlen, mit einer indirekten Restauration das Misserfolgsrisiko senken (Aquilino & Caplan, 2002; Naumann, Preuss, & Frankenberger, 2006). Laut einer klinischen Studie besitzen endodontisch behandelte Zähne, die nicht mit einer Krone versorgt werden, ein 6-fach höheres Misserfolgsrisiko (Aquilino & Caplan, 2002). Die Überkronung eines tiefzerstörten Zahns kann daher im Rahmen der postendodontischen Restauration als frakturprophylaktische Maßnahme angesehen werden. Steht jedoch für die adhäsive Verankerung des Stumpfaufbaus vor der Kronenversorgung nicht genügend Adhäsivfläche zur Verfügung, ist für die Aufbauretention die Insertion eines Wurzelkanalstifts indiziert (Schwartz & Robbins, 2004).

III.2.3.2 Der Wurzelkanalstift

Der Stumpfaufbau ersetzt die fehlende Zahnhartsubstanz, dient als Retentionsfläche für die indirekte Restauration und ist an dem restlichen Zahnhartgewebe adhäsiv befestigt. Um eine Retentionssteigerung für den Stumpfaufbau zu erzielen, wird im Rahmen der postendodontischen Restauration ein Wurzelkanalstift inseriert. Die Erforschung und

Entwicklung der Wurzelkanalstifte führte zu verschiedenen Generationen, Formen, Typen und Materialien. In der jüngsten (3.) Generation dominieren glasfaserverstärkte Kompositstifte (Synonym: Glasfaserstifte), die aus Glasfasern bestehen, die in einer Bis-GMA- oder Epoxidharzmatrix eingebettet sind (Baba, Golden, & Goodacre, 2009; Goracci & Ferrari, 2011). Glasfaserstifte besitzen ein ähnliches Elastizitätsmodul (30-40 GPa) wie das sie umgebende Dentin (ca. 15 GPa) (King & Setchell, 1990). Diese Eigenschaft soll auftretende Kaukräfte gleichmäßig auf die Wurzel verteilen und das Risiko einer Wurzelfraktur senken (Asmussen, Peutzfeldt, & Heitmann, 1999; Nakamura et al., 2006).

Die Erforschung neuer adhäsiver, direkter Restaurationsmaterialien führt in der Wissenschaft zu einer Diskussion über die Stiftindikation. Die bisherigen Empfehlungen lauten, dass bei einer koronalen Restzahnhartsubstanz von $\geq 50\%$ oder bei ≥ 2 residualen Kavitätenwänden auf eine Stiftinsertion verzichtet werden kann (Aurelio, Fraga, Rippe, & Valandro, 2015; Zhu, Dong, He, Pan, & Tang, 2015). Bei größeren Zahnhartsubstanzdefekten, bei der weniger als 50% der koronalen Restzahnhartsubstanz oder ≤ 1 residuale Kavitätenwand steht, wird eine Retentionssteigerung des Stumpfaufbaus durch das Setzen eines Wurzelkanalstifts erreicht (Ferrari, Cagidiaco, Grandini, De Sanctis, & Goracci, 2007; Goodacre & Spolnik, 1994; Peroz, Blankenstein, Lange, & Naumann, 2005; Robbins, 1990).

Jedoch ist die wissenschaftliche Datenlage zur Stiftindikation heterogen. In einer retrospektiven klinischen Studie lag die Überlebensrate von 526 mit Glasfaserstiften und Keramikronen versorgten oberen Frontzähnen nach 5,3 Jahren bei $98,5\%$ (Signore et al., 2009). In einer prospektiven klinischen Studie mit einem Beobachtungszeitraum von zwei Jahren stellte sich heraus, dass bei Prämolaren mit noch einer residualen Kavitätenwand das Frakturrisiko durch das Setzen eines Glasfaserstifts von 30% auf 5% und bei keiner residualen Kavitätenwand von 50% auf 20% sank (Ferrari et al., 2007). Andererseits muss beachtet werden, dass während der Stiftbettpräparation eine Reduktion der Zahnhartsubstanz stattfindet, die zu einer signifikanten Abnahme der Steifigkeit des Zahns führt (Lang, Korkmaz, Schneider, & Raab, 2006). Aus diesem Grund wird in verschiedenen Studien empfohlen, die vorhandene Zahnhartsubstanz nicht für die Insertion eines Wurzelkanalstifts zu opfern (Freno, 1998; Heydecke, Butz, & Strub, 2001). In einer Literaturübersicht von 2018 wird entsprechend kontrovers der Nutzen eines

Wurzelkanalstifts diskutiert (Naumann, Schmitter, & Krastl, 2018). Die Autorengruppe um NAUMANN et al. schlussfolgern, dass die wissenschaftliche Literatur bei einem Zahn mit noch ≥ 1 residualen Kavitätenwand keinen Vorteil durch das Inserieren eines Wurzelkanalstifts zeigt. Steht allerdings keine residuale Kavitätenwand mehr, wird durch die Stiftinsertion ein Vorteil in der Bruchbelastbarkeit für den Zahn ausgesprochen (Naumann et al., 2018). Diese Empfehlung deckt sich mit den Ergebnissen einer anderen Studie, die für dekapitierte Frontzähne eine postendodontische Restauration mit Ferrule-Effekt und inseriertem Glasfaserstift empfiehlt (Salameh et al., 2008).

III.2.3.3 Der Ferrule-Effekt

Der Ferrule-Effekt (Synonym: Fassreifeneffekt) ist ein Schlüsselfaktor für den Erfolg einer postendodontischen Restauration. Dieser Effekt tritt auf, wenn eine definitiv befestigte Krone den Stift-Stumpf-Aufbau zu 360° Grad fasst und bis zum Präparationsrand eine Dentinmanschette umschließt (Abbildung 2) (Sorensen & Engelman, 1990). Diese Verbindung führt dazu, dass die über der Präparationsgrenze liegenden Strukturen (Wurzelkanalstift, Stumpfaufbau, Dentin und Krone) als Einheit fungieren und die auftretenden Kräfte, in Form von Spannungen, aus dem koronalen Anteil an das Dentin übertragen werden (Mamoun, 2017). Dies reduziert die Belastung auf den Stift-Stumpf-Aufbau sowie die Krone und senkt die Gefahr eines Misserfolgs durch Randspaltbildung oder Fraktur. Eine 2 mm hohe Dentinmanschette, die annähernd parallelwandig präpariert ist, hat dabei den größten positiven Einfluss auf die maximale Belastbarkeit eines postendodontisch restaurierten Zahns (Barkhordar, Radke, & Abbasi, 1989; McLean, 1998; Singh & Thareja, 2014). In einer dreijährigen klinischen Studie zeigte sich, dass Zähne, die mit dem Ferrule-Effekt versorgt wurden, eine Misserfolgsrate von 6,67 %, und Zähne ohne Ferrule-Effekt eine Misserfolgsrate von 26,2 % aufwiesen (Mancebo, Jimenez-Castellanos, & Canadas, 2010). Fehlt zusätzlich einer 2 mm hohen Dentinmanschette nur eine pulpaaxiale Wand, ist dieser Zahn um bis zu 25 % weniger belastbar (Santos Pantaleon et al., 2018). Fehlt der Ferrule-Effekt hingegen komplett, sinkt die maximale Belastbarkeit um 47 %. Eine unvollständige Dentinmanschette ist dabei prognostisch günstiger als eine vollständig fehlende und sollte demnach bevorzugt werden (Juloski, Radovic, Goracci, Vulicevic, & Ferrari, 2012; Santos Pantaleon et al., 2018).

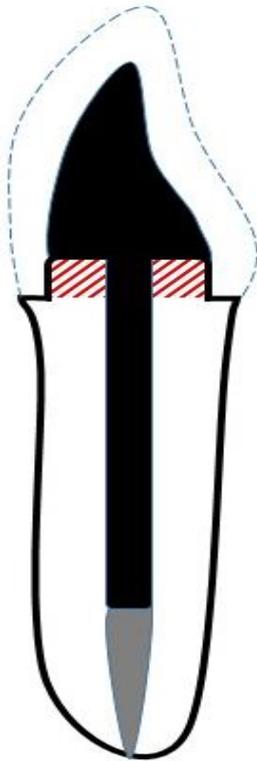


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines mit einem Stift-Stumpf-Aufbau und einer Krone versorgten Schneidezahns. Die rot schraffierte Dentinmanschette wird von der Krone zu 360° Grad umfasst und ist essenziell für den Ferrule-Effekt.

III.3 Die biologische Breite

Im Jahr 1961 untersuchten GARGIULO et al., in welchem Verhältnis die marginale Gingiva zum krestalen Knochenrand steht (Gargiulo, Wentz, & Orban, 1961). Die Forschungsgruppe hatte an 287 Zähnen von Humanpräparaten die marginale Gingiva ausgemessen und errechneten folgende Höhenmittelwerte: 0,69 mm für den Sulkus, 0,97 mm für das epitheliale Attachment und 1,07 mm für das bindegewebige Attachment. Die Autoren bezeichnen die anatomische Region des Zahnhalteapparats, die sich zwischen dem Boden des Sulkusepithels und dem krestalen Knochenrand befindet, als „biologische Breite“. Sie beinhaltet das bindegewebige Attachment und das epitheliale Attachment, die zusammen im Durchschnitt 2,04 mm hoch sind. Die Forschungsgruppe um VACEK et al. führten ebenfalls Messungen an der biologischen Breite durch und erhielten in ihrer Studie einen Durchschnittswert von 1,91 mm (Abbildung 3) (Vacek, Gher, Assad, Richardson, & Giambarresi, 1994). Weitere Studien haben diese Durchschnittswerte bestätigt.

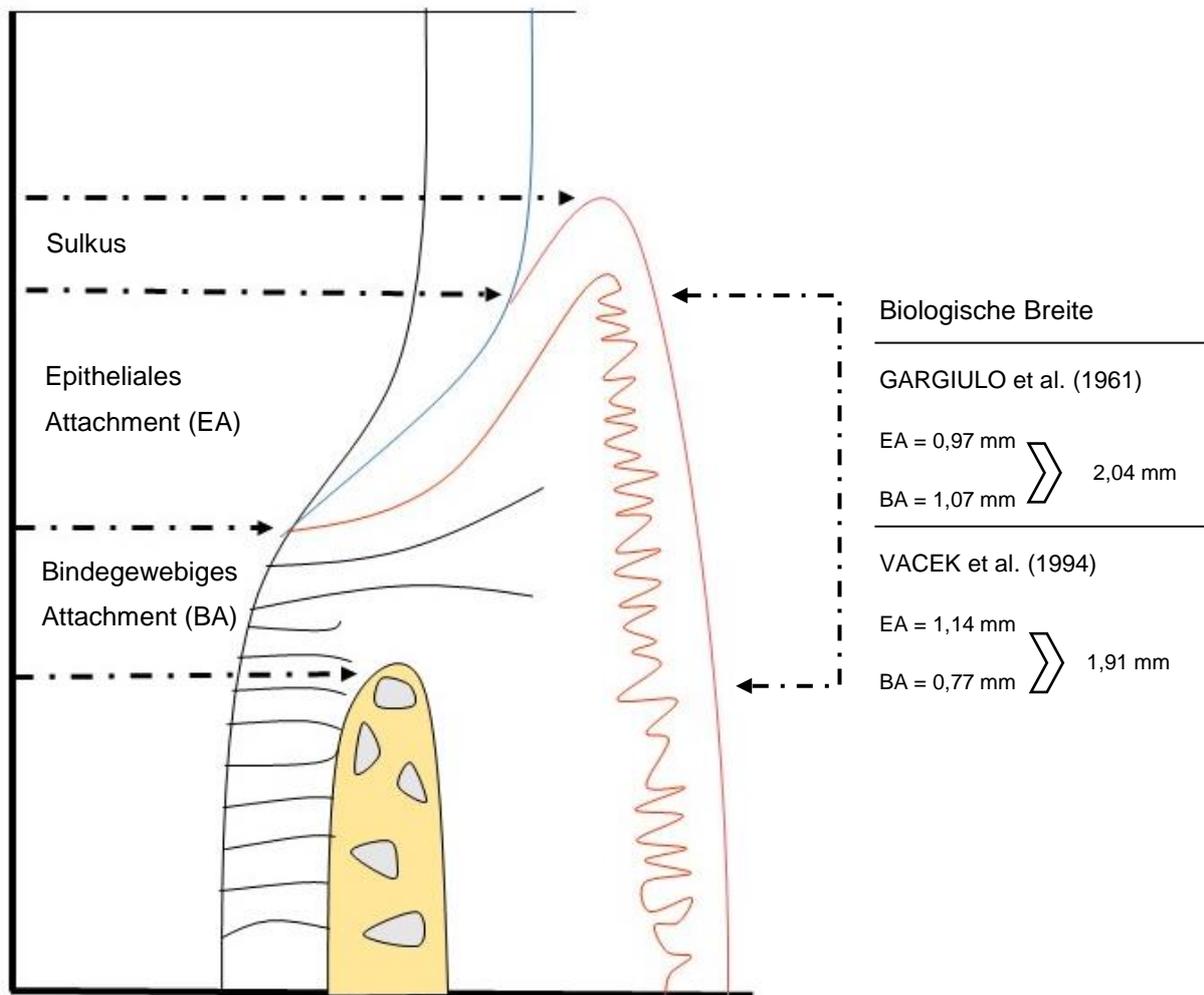


Abbildung 3: Schematische Darstellung der biologischen Breite. Querschnitt auf Höhe der Schmelz-Zement-Grenze. *Grafik modifiziert nach PADBURY et al. (Padbury, Eber, & Wang, 2003).*

Studien, die sich mit der biologischen Breite befassen, erörtern, dass Restaurationsränder, die innerhalb dieser Struktur liegen, zu einer Gingivitis sowie zu Attachment- und Knochenverlust führen können (Orkin, Reddy, & Bradshaw, 1987). Subgingival liegende Kronenränder steigern das Risiko einer Gingivablutung um das 2,42-Fache und das Risiko einer Gingivarezession um das 2,65-Fache. Kronenränder, die supragingival liegen, führen zu keiner entzündlichen Veränderung der Gingiva. Dies deckt sich mit den Ergebnissen weiterer Studien, in denen trotz engmaschigem Recall und Zahnreinigungen Entzündungszeichen an der Gingiva, verursacht durch subgingival

liegende Kronenränder, beobachtet werden konnten (Bader, Rozier, McFall, & Ramsey, 1991; Newcomb, 1974). Es wird vermutet, dass Plaqueakkumulation an makro- und mikroskopisch kleinen Spalten und Unebenheiten an Restaurationsrändern zu Entzündungsreaktionen führen. Um diese zu vermeiden, wird in der Literatur empfohlen, einen Mindestabstand der Kronenränder zum krestalen Knochenrand von 2–3 mm einzuhalten (Bragger, Lauchenauer, & Lang, 1992).

Dies bedeutet, dass ein tiefzerstörter Zahn eine suprakrestale Restzahnhartsubstanzhöhe von mindestens 4 mm benötigt, um die biologische Breite (2 mm) nicht zu verletzen und den Ferrule-Effekt (2 mm) sicherzustellen. Besitzt der Zahn keine 4 mm hohe suprakrestale Restzahnhartsubstanz, kann der Wert durch eine chirurgische Kronenverlängerung oder eine forcierte Extrusion gesteigert werden. Bei beiden Eingriffen wird das Kronen-Wurzel-Verhältnis verändert, um koronal die benötigte Zahnhartsubstanz für den Ferrule-Effekt und die biologische Breite zu schaffen.

III.4 Präprothetische Maßnahmen, die das Kronen-Wurzel-Verhältnis beeinflussen

Zu den zahnärztlichen Eingriffen, die den Knochen-Wurzel-Kontakt verändern, um einen Zahn wiederversorgbar zu gestalten, gehören die Wurzelspitzenresektion, die chirurgische Kronenverlängerung und die forcierte Extrusion. Das Verringern der Attachmenthöhe führt sowohl zu einer Veränderung der effektiven Kronen- und Wurzellänge als auch zu einer Veränderung des Kronen-Wurzel-Verhältnisses.

III.4.1 Die chirurgische Kronenverlängerung

Die chirurgische Kronenverlängerung ist ein Eingriff, bei dem der krestale Knochen zirkulär um den Zahn herum entfernt und geglättet wird (Yeh & Andreana, 2004). Die Summe des zu entfernenden Knochens richtet sich dabei nach dem Bedarf an koronaler Zahnhartsubstanz.

Durch den Eingriff nimmt die effektive Wurzellänge ab und die effektive Kronenlänge zu:

$$(L_K + n) \div (L_W - n) = R_{CR-CKV}.$$

Die Indikationen für eine chirurgische Kronenverlängerung sind unter anderem (Hempton & Dominici, 2010; Nethravathy, Vinoth, & Thomas, 2013):

- Eine kurze klinische Krone mit zu geringer Retentionshöhe für eine Restauration.
- Um die biologische Breite wieder herzustellen.
- Um eine Dentinmanschette (Ferrule-Effekt) präparieren zu können.
- Um subgingival liegende Frakturen, Perforationen oder Wurzelkaries zu therapieren.
- Um ein ästhetisches Gesamtbild mit den Nachbarstrukturen zu schaffen.

Kontraindikationen sind unter anderem:

- Das Freilegen einer Furkation.
- Eine zu große Reduktion des Knochen-Wurzel-Kontakts.
- Ein unästhetisches Ergebnis, das zum Beispiel durch eine solitäre Kronenverlängerung an einem Frontzahn verursacht wird.

Um Platz für den Ferrule-Effekt und die biologische Breite sicherzustellen, wird die koronale Zahnhartsubstanz auf Kosten der effektiven Wurzellänge erhöht. Nachdem der krestale Knochen entfernt wurde, kann die Präparationsgrenze nach apikal verlegt werden. Da sich die Okklusionsebene durch diesen Eingriff nicht verschiebt, erhöht sich die effektive Kronenlänge um den Wert der chirurgischen Kronenverlängerung und das Kronen-Wurzel-Verhältnis steigt an. Diese Situation ähnelt einem durch Parodontitis abgebauten Alveolarknochen, bei dem ebenso das Kronen-Wurzel-Verhältnis zunehmend größer wird (Glantz & Nilner, 1994). Bei einer chirurgischen Kronenverlängerung steigt bei gleichbleibender Okklusionsebene das Kronen-Wurzel-Verhältnis an und der Punkt der höchsten Stressbelastung unter Kaulast bewegt sich gemeinsam mit dem Alveolarknochen nach apikal. Durch die veränderte Stressverteilung steigt die Auslenkung des Zahns und somit auch die Frakturgefahr an (Roscoe, Noritomi, Novais, & Soares, 2013).

In Kapitel III.2.3.3 wird der Ferrule-Effekt als Schlüsselfaktor für den Erfolg einer postendodontischen Restauration aufgeführt. Jedoch scheint der frakturprophylaktische Effekt des Ferrules durch die chirurgische Kronenverlängerung neutralisiert zu werden.

Dies wird anhand verschiedener In-vitro-Studien deutlich, die den Einfluss einer chirurgischen Kronenverlängerung an postendodontisch restaurierten Unterkieferprämolaren mit unterschiedlichen Kronen-Wurzel-Verhältnissen verglichen (Gegauff, 2000; Meng et al., 2009; Meng et al., 2007). Proben, die keiner chirurgischen Kronenverlängerung unterzogen wurden und somit keinen Ferrule-Effekt besaßen, deren Kronen-Wurzel-Verhältnisse jedoch unter 1 lagen, hatten signifikant höhere Erfolgsraten als die Proben, die mit dem Ferrule-Effekt versorgt waren und Kronen-Wurzel-Verhältnisse über 1 aufwiesen (Gegauff, 2000). Ein vergleichbares Ergebnis trat in einer weiteren In-vitro-Studie auf, bei der Proben postendodontisch mit einem Ferrule-Effekt versorgt wurden (Meng et al., 2007). Das Kronen-Wurzel-Verhältnis stieg durch eine simulierte chirurgische Kronenverlängerung von 0,75 auf 1,1 an, jedoch sank die Bruchbelastbarkeit trotz Ferrule-Effekt. Die Autoren diskutieren, dass die geringere Belastbarkeit der Zähne nach chirurgischer Kronenverlängerung aus dem Versetzen der Präparationsgrenze nach apikal resultieren könnte (Gegauff, 2000; Meng et al., 2007).

III.4.2 Die forcierte Extrusion

Die forcierte Extrusion eines Zahns beschreibt das Bewegen der Wurzel nach koronal, aus der Alveole heraus. Die Indikationen und Kontraindikationen sind identisch mit denen der chirurgischen Kronenverlängerung (Kapitel III.4.1). Die Extrusion kann kieferorthopädisch mit geringen nach koronal gerichteten Kräften oder chirurgisch durch eine Transplantation stattfinden.

Durch den Eingriff nimmt die effektive Wurzellänge ab und die effektive Kronenlänge bleibt konstant: $L_K \div (L_W - n) = R_{CR-FE}$.

III.4.2.1 Die chirurgische Extrusion

Die chirurgische Extrusion (Synonyme: intraalveoläre Transplantation; intentionelle Replantation) umfasst die Luxation der Wurzel, die Positionierung dieser auf der gewünschten Höhe und die Fixierung durch interproximale Nähte oder eine Schienung an den Nachbarzähnen. Den Vorteilen, wie zum Beispiel die Zahnextrusion auf die

gewünschte Höhe in nur einer Sitzung sowie die geringen Behandlungskosten, stehen auch Nachteile gegenüber: Die psychische Belastung für den Patienten, da der Zahn extrahiert werden muss, die nötige Wurzelkanalbehandlung oder Komplikationen in Form von Wurzelresorption, Verletzung von periapikalen Strukturen, Ankylose und marginalem Knochenverlust (Caliskan, Turkun, & Gomel, 1999).

In einer Literaturübersicht werden folgende Misserfolgsraten genannt (Elkhadem, Mickan, & Richards, 2014):

- 30 % nicht progressive Wurzelresorption.
- 5,0 % Zahnverlust.
- 4,6 % erhöhter Lockerungsgrad.
- 3,7 % marginaler Knochenverlust.
- 3,3 % progressive Wurzelresorption.

III.4.2.2 Die kieferorthopädische Extrusion

Bei der kieferorthopädischen Extrusion (Synonyme: kontrollierte vertikale Extrusion; langsame Eruption; forcierte orthodontische Extrusion) wird der Zahn mithilfe einer kieferorthopädischen Apparatur aus der Alveole extrudiert. Hierbei wird der Zahnhalteapparat mit dem Zahn zusammen in Richtung Kraftvektor bewegt. Dieser Umstand macht es möglich, Knochendefekte und Zahnfleischtaschen zu reduzieren (Amato, Mirabella, Macca, & Tarnow, 2012; Ingber, 1974), Gingivaverläufe anzupassen (Brindis & Block, 2009; Fakhry, 2007) und präimplantologisch eine bis zu 70%ige Knochenregeneration zu schaffen (Amato et al., 2012). Die extrudierenden Kräfte sollten bei 25–30 Gramm liegen (Reitan, 1967), können aber bei leicht ankylosierten oder kürzlich wurzelkanalbehandelten Zähnen erhöht werden (Batenhorst, Bowers, & Williams, 1974). Ein komplett ankylosierter Zahn kann nicht bewegt werden und birgt die Gefahr, dass die Pfeilerzähne intrudieren. Um eine Ankylosierung, Resorption oder Wurzel- und Gingivarezession zu verhindern, werden Kräfte empfohlen, die den Zahn um circa 1 mm pro Monat extrudieren (Buskin, Castellon, & Hochstedler, 2000). Praktisch sind auch höhere Extrusionsgeschwindigkeiten von 2–3 mm innerhalb von drei Wochen möglich (Malmgren, Malmgren, & Frykholm, 1991). In der Retentionszeit von 6-12 Wochen muss der Zahn durch eine Schienung an den Nachbarzähnen ruhiggestellt

werden, damit sich periapikal neuer Knochen bilden und sich der Zahn stabilisieren kann (Buskin et al., 2000). Es wird empfohlen, eine Fibrotomie zu Beginn und am Ende der Extrusion durchzuführen, um die Gefahr einer Re-Intrusion zu verhindern (Carvalho, Bauer, Romito, Pannuti, & De Micheli, 2006). In einer klinischen Studie wurden 33 Zähne kieferorthopädisch extrudiert. Nach einem Jahr kam es bei 3 Zähnen zu einer Re-Intrusion von 0,5 mm und bei 7 Zähnen zu Resorptionen (Malmgren et al., 1991).

Die Datenlage zu postendodontisch restaurierten Zähnen nach forcierter Extrusion ist sehr gering. Eine In-vitro-Studie fand heraus, dass postendodontisch restaurierte Unterkieferprämolaren mit einer chirurgischen Kronenverlängerung und einem Kronen-Wurzel-Verhältnis von 1,1 um 88 % geringer belastbar waren als die Proben der Vergleichsgruppe mit einem Kronen-Wurzel-Verhältnis von 0,9, bei denen eine forcierte Extrusion simuliert wurde (Meng et al., 2009). Die Autoren diskutieren, dass der verminderte Zahndurchmesser auf Höhe der Präparationsgrenze ebenso eine Rolle bei der geringeren Belastbarkeit spielt wie das Kronen-Wurzel-Verhältnis über 1.

III.4.3 Die Wurzelspitzenresektion

Ein weiterer zahnärztlicher Eingriff, der die effektive Wurzellänge reduziert und somit das Kronen-Wurzel-Verhältnis beeinflusst, ist die Wurzelspitzenresektion. Bei diesem mikrochirurgischen Eingriff am Zahn wird der infizierte Bereich periapikal mitsamt der teilweise komplexen Ramifizierung des Wurzelkanals entfernt und die Wurzel retrograd gefüllt. In einer Literaturübersicht hat die Wurzelspitzenresektion nach 2–4 Jahren eine Erfolgsrate von 77,8 % (Torabinejad et al., 2007). In einem Vergleich von zwei Metaanalysen schneidet die klassische Wurzelspitzenresektion, mit einem apikalen Amalgamstopp, mit einer Erfolgsrate von 59 % schlechter ab als eine Wurzelspitzenresektion, die mit modernen Materialien durchgeführt wurde (Setzer, Shah, Kohli, Karabucak, & Kim, 2010). Unter anderem kamen eine zehnfache optische Vergrößerung, Ultraschallinstrumente und amalgamfreie apikale Stopps zum Einsatz, wodurch die Erfolgsrate auf 94 % anstieg.

Durch das Entfernen der apikalen Wurzelregion reduziert sich die Wurzellänge des Zahns im Regelfall um 1–2 mm, wodurch sich das Kronen-Wurzel-Verhältnis verändert. In einer Studie wurden Zähne vor und nach einer Wurzelspitzenresektion mithilfe eines digitalen

Volumentomogramms ausgemessen (von Arx, Jensen, & Bornstein, 2015). Nach dem Eingriff hatten die oberen Schneidezähne den größten Unterschied im Kronen-Wurzel-Verhältnis. Verglichen mit der Kronenlänge halbierte sich die Wurzellänge annähernd und führte zu einem Verhältnis von 1,9.

Durch den Eingriff nimmt die effektive Wurzellänge ab, während die effektive Kronenlänge konstant bleibt: $L_K \div (L_W - n) = R_{CR-WSR}$.

Sollte keine der aufgeführten zahnerhaltenden Maßnahmen mehr umsetzbar sein, um einen zerstörten Zahn restaurierbar zu gestalten, kann eine Extraktion mit anschließender Implantation eine Therapiealternative sein.

III.5 Implantate

Zahnimplantate sind Schrauben aus biokompatiblen Materialien wie Titan oder Keramik, die eine fehlende Zahnwurzel ersetzen. Nach einer individuell unterschiedlichen Einheilphase sind sie durch Osseointegration mit dem Kieferknochen verbunden (Branemark et al., 1969). Auf Implantate können verschiedene Aufbauten geschraubt oder zementiert werden, die als Ersatz für einen Zahn oder als Pfeiler für einen festsitzenden oder herausnehmbaren Zahnersatz dienen. Implantate haben sich seit Jahrzehnten klinisch bewährt; Misserfolge sind jedoch nicht auszuschließen und können folgendermaßen eingeteilt werden (Esposito, Hirsch, Lekholm, & Thomsen, 1998):

- *Biologische Misserfolge*, die in frühe/primäre (keine Osseointegration) und späte/sekundäre (Verlust der Osseointegration) unterteilt werden können.
- *Technische Misserfolge*, die Frakturen von Schrauben, Implantaten und Aufbauten beinhalten.
- *Iatrogene Misserfolge*, womit die Verletzungen von anatomischen Nachbarstrukturen (z. B. Nervus alveolaris inferior) oder nicht versorgbare Implantate durch falsche Angulation beschrieben werden.
- *Inadäquate Adaptation*, womit die ästhetische, phonetische oder psychosoziale Unzufriedenheit des Patienten beschrieben wird.

In einer Literaturübersicht liegt die Überlebensrate für implantatgetragene Brücken nach 5 Jahren bei 95,2 % und nach 10 Jahren bei 86,7 % (Pjetursson, Bragger, Lang, & Zwahlen, 2007). Für implantatgetragene Kronen liegt sie nach 5 Jahren bei 94,5 % und nach 10 Jahren bei 89,4 %. Diese Werte decken sich mit weiteren Literaturergebnissen, die für festsitzende Implantatversorgungen Überlebensraten von über 90 % angeben (Jung et al., 2008; Sailer, Muhlemann, Zwahlen, Hammerle, & Schneider, 2012). Trotz der hohen Erfolgsraten bei implantatgetragenen Restaurationen fällt eine technische Komplikationsrate von 38,7 % für Brücken und 12,7 % für Einzelkronen nach 5 Jahren auf (Jung et al., 2008; Pjetursson et al., 2007). Als Misserfolge dominieren Frakturen des Verblendmaterials (Chipping), Abutment- oder Schraubenlockerung und der Verlust der Krone. Neben diesen technischen Komplikationen sind biologische Misserfolge wie Periimplantitis und Verlust der Osseointegration ebenso ein Risiko wie eine ungenügende Ästhetik der Restauration (Atieh, Alsabeeha, Faggion, & Duncan, 2013; Buser, Chappuis, Belser, & Chen, 2017; Pjetursson et al., 2007). In der Literatur werden weitere implantologische und prothetische Herausforderungen, vor allem im Frontzahnggebiet, aufgeführt. Diese resultieren aus fehlendem Hart- sowie Weichgewebe (Hammerle & Tarnow, 2018). Defizitäres Weichgewebe kann zudem zu ästhetisch kompromittierten Ergebnissen führen (Atieh et al., 2013; Buser et al., 2017; Chen & Buser, 2014): fehlt die befestigte Gingiva über einem Implantat, kann keine physiologische und optische Übereinstimmung zum Weichgewebsprofil eines natürlichen Zahns erreicht werden. Wird das Implantat hingegen nur von beweglicher Gingiva umgeben, ist das Risiko einer Rezession und einer Periimplantitis erhöht (Smeets et al., 2014). Ebenso spielt das Hartgewebe eine signifikante Rolle für den Therapieerfolg: fehlt es, kann nur ein unzureichendes Implantatlager vorbereitet werden, was in insuffizienter Primärstabilität und dadurch in einem Misserfolg resultieren kann (Schwarz, Sahm, & Becker, 2012). Speziell im vorderen Oberkieferbereich hängt eine befriedigende ästhetische Restauration von vielen Faktoren ab. Hierzu gehören unter anderem das alveoläre Knochenangebot, die Lachlinie, der Approximalkontakt und der Gingivatyp. Die Überlebensrate von Implantatversorgungen wird dabei zusätzlich durch die Erfahrung und die Expertise des Behandlers beeinflusst (Barone et al., 2016).

IV. Problem- und Zielstellung

Nach Sichtung und Auswertung des aktuellen wissenschaftlichen Standes fällt auf, dass die Therapie eines tiefzerstörten Zahns bereits viele Jahre Gegenstand von Forschungsarbeiten ist. Diese Studien betrachten zumeist Teilaspekte der Therapie und erforschen zum Beispiel die Erfolgsrate einer Wurzelkanalbehandlung oder der postendodontischen Restauration.

Die Wurzelspitzenresektion, die chirurgische Kronenverlängerung und die forcierte Extrusion sind zahnerhaltende, präprothetische Therapiemaßnahmen, welche die effektive Kronen- und/oder Wurzellänge verändern und somit zusätzlich das Kronen-Wurzel-Verhältnis. Die wissenschaftliche Datenlage zu Kronen-Wurzel-Verhältnissen ist gering und von vagen Aussagen dominiert wie: „günstig“, „angemessen“, „zufriedenstellend“, „ungünstig“, „schlecht“ oder „ungenügend“ (Grossmann & Sadan, 2005). In der Literatur ist keine verbindliche Aussage darüber vorhanden, wie sich eine Veränderung des Kronen-Wurzel-Verhältnisses auf die biomechanischen Eigenschaften eines postendodontisch restaurierten Schneidezahns auswirkt.

Bei der Literaturrecherche ist aufgefallen, dass keine wissenschaftlichen Studien vorhanden sind, die im gleichen Studiendesign Implantate als Vergleichsgruppe einbeziehen. Zähne und Implantate werden indirekt durch das Heranziehen der Ergebnisse unterschiedlicher Studien verglichen.

Die vorliegende In-vitro-Studie beleuchtet den biomechanischen Einfluss der genannten präprothetischen Therapiemaßnahmen auf die dynamische und maximale Belastbarkeit von tiefzerstörten Oberkiefer-Schneidezähne nach postendodontischer Restauration. Abschließend werden die Ergebnisse der Kausimulation, der maximalen Belastbarkeit und die Frakturmusteranalyse mit den Ergebnissen der Implantatgruppe verglichen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden folgende Fragestellungen beantwortet:

1. Hat eine Manipulation am Kronen-Wurzel-Verhältnis einen Einfluss auf die maximale Belastbarkeit von postendodontisch restaurierten Oberkiefer-Schneidezähnen nach dynamischer Belastung?
2. Hat eine Manipulation am Kronen-Wurzel-Verhältnis einen Einfluss auf das Frakturmuster von postendodontisch restaurierten Oberkiefer-Schneidezähnen nach dynamischer Belastung?
3. Besteht ein Unterschied in der maximalen Belastbarkeit zwischen postendodontisch restaurierten Oberkiefer-Schneidezähnen mit variierenden Kronen-Wurzel-Verhältnissen und Implantatversorgungen nach dynamischer Belastung?

Der Untersuchung zum Einfluss des Kronen-Wurzel-Verhältnisses auf die maximale Belastbarkeit von postendodontisch restaurierten Oberkiefer-Schneidezähnen werden folgende Nullhypothesen zugrunde gelegt:

1. Eine Manipulation am Kronen-Wurzel-Verhältnis hat keinen Einfluss auf die dynamische und lineare Belastbarkeit von postendodontisch restaurierten Oberkiefer-Schneidezähnen.
2. Eine Manipulation am Kronen-Wurzel-Verhältnis hat keinen Einfluss auf das Frakturmuster von postendodontisch restaurierten Oberkiefer-Schneidezähnen.
3. Es gibt keinen Unterschied in der maximalen Belastbarkeit zwischen postendodontisch restaurierten Oberkiefer-Schneidezähnen mit variierenden Kronen-Wurzel-Verhältnissen und Implantatversorgungen nach dynamischer Belastung.

V. Material und Methode

V.1 Zahnauswahl

Aus einem klinikinternen Vorrat von extrahierten menschlichen Zähnen, die in einer 0,5%igen Chloramin-T-Lösung lagerten, wurden 60 obere mittlere Schneidezähne ausgewählt. Ausschlusskriterien waren Restaurationen jeglicher Art, kariöse Läsionen, Erosionen und Abrasionen sowie eine endodontische Behandlung. Es wurden Zähne ausgewählt, die augenscheinlich eine ähnliche Wurzellänge sowie einen ähnlichen Wurzelquerschnitt aufwiesen. Die ausgewählten Zähne wurden unter fließendem Leitungswasser mittels Scaler¹ und Zahnbürste² von Verunreinigungen befreit.

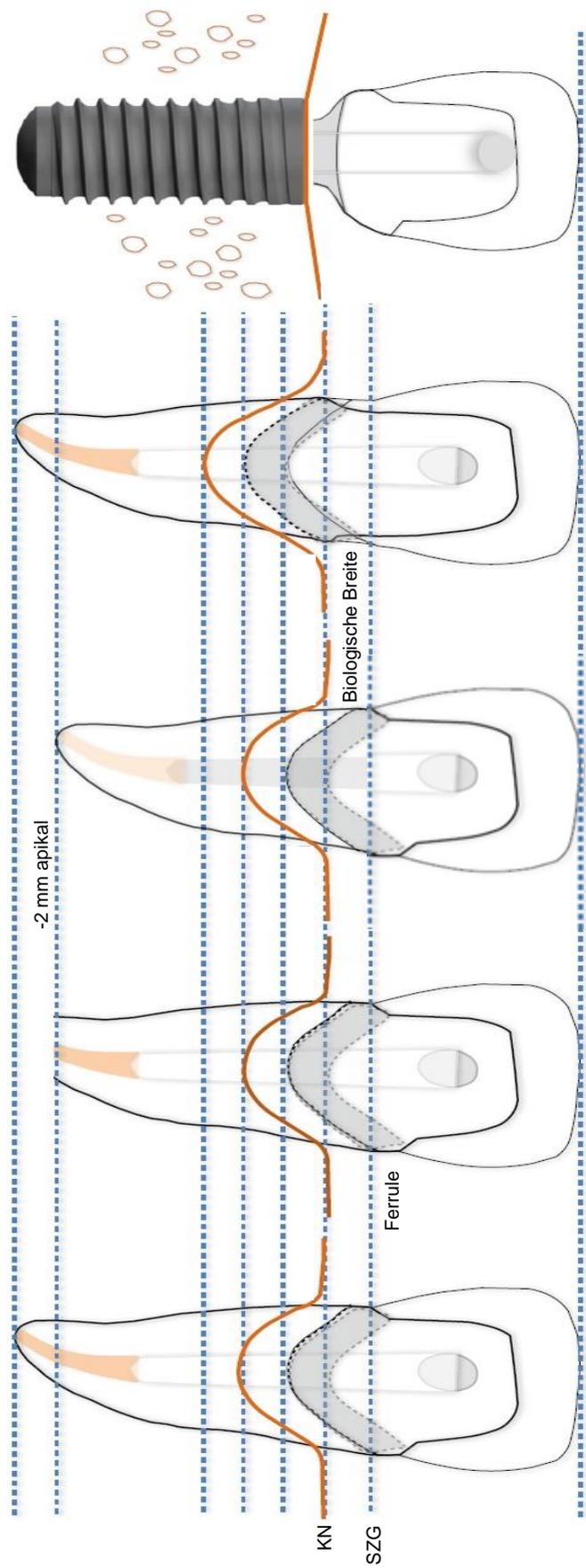
V.2 Zahnvermessung

Nach der Reinigung wurden die Zähne mit einer Messlehre vermessen. Referenzpunkt für die Längenmessung der Wurzel war dabei der koronalste Punkt der mesioapproximalen Schmelz-Zement-Grenze (SZG). Von diesem Punkt aus wurde der Abstand zum Apex gemessen. Um die Wurzelquerschnittsfläche auf Höhe der SZG zu berechnen, wurden die mesiodistale sowie die vestibuloorale Breite gemessen und das Produkt aus beiden berechnet. Die 6 größten und 6 kleinsten Zähne wurden aussortiert, so dass eine Gesamtzahl von 48 Zähnen verblieb.

V.3 Gruppencharakteristika und die Berechnung des Kronen-Wurzel-Verhältnisses

Es wurden 4 Gruppen mit Zähnen und eine Gruppe mit Implantaten angelegt. 24 Zähne mit den längsten Wurzellängen und größten Querschnittsflächen wurden gleichmäßig der Kontrollgruppe (K) und der Wurzelspitzenresektionsgruppe (WSR) zugewiesen, während weitere 24 Zähne mit den kleinsten Wurzellängen und geringsten Querschnittsflächen gleichmäßig auf die Extrusionsgruppe (FE) und die chirurgische Kronenverlängerungsgruppe (CKV) verteilt wurden. Die Proben wurden einzeln in verschließbare Behälter in einer 0,5%igen Chloramin-T-Lösung im Kühlschrank bei circa 06° C gelagert und mit der jeweiligen Gruppen- und Probennummer beschriftet. In Abbildung 4 sind verschiedene Gruppencharakteristika aufgeführt. Die effektive Wurzellänge (L_w) beinhaltet den Zahnabschnitt zwischen Apex und krestalem Knochen.

Die effektive Kronenlänge (L_K) ist die Höhe, die zwischen dem krestalen Knochen und der Inzisalkante gemessen wird. Um das Kronen-Wurzel-Verhältnis (R_{CR}) zu bilden, wird L_K zu L_W ins Verhältnis gesetzt ($L_K \div L_W = R_{CR}$).



Gruppe	Kontrollgruppe (K)	Wurzelspitzenresektion (WSR)	Forcierte Extrusion (FE)	Chirurgische Kronenverlängerung (CKV)	Implantatgruppe (IMPL)
n	12	12	12	12	12
L _K [mm]	10	10	10	12	10

Abbildung 4: Details und Unterschiede zwischen den Gruppen. KN= Knochenniveau; SZG= Schmelz-Zement-Grenze; n= Anzahl; L_K= effektive Kronenlänge. Grafik modifiziert nach Prof. Dr. M. Naumann.

V.4 Gruppenvorbereitung

Gruppe K

Gruppe K stellt die Kontrollgruppe dar. Die Zähne wurden 2 mm über der SZG senkrecht zur Zahnachse mit einer Trennscheibe³ dekapitiert. Die L_K beträgt in dieser Gruppe 10 mm. Diese setzt sich aus 2 mm biologischer Breite und 8 mm Kronenhöhe zusammen.

Gruppe WSR

In der Gruppe WSR wird eine Wurzelspitzenresektion simuliert. Die Zähne wurden analog zu Gruppe K dekapitiert. Um eine WSR zu simulieren, wurden die Proben am Apex um 2 mm senkrecht zur Zahnachse gekürzt. Die L_K beträgt in dieser Gruppe 10 mm.

Gruppe FE

In der Gruppe FE wird eine forcierte Extrusion mittels kürzerer Wurzellängen simuliert. Die Zähne wurden analog zu Gruppe K dekapitiert. Die L_K in dieser Gruppe beträgt 10 mm.

Gruppe CKV

In der Gruppe CKV wird eine chirurgische Kronenverlängerung simuliert. Die Zähne wurden auf Höhe der SZG senkrecht zur Zahnachse dekapitiert. Die L_K beträgt in dieser Gruppe 12 mm. Diese setzt sich aus 2 mm biologischer Breite und 10 mm Kronenhöhe zusammen.

Gruppe IMPL

In der Implantatgruppe wurden 12 Bone-Level-Titanimplantate⁴ (Bone Level, Straumann, Freiburg, Deutschland) mit einer Länge von 12 mm und einem Durchmesser von 4,1 mm verwendet.

In den zahnbasierenden Gruppen wurde im Anschluss an das Dekapitieren eine 2 mm hohe Dentinmanschette für den Ferrule-Effekt präpariert. Die Präparationsgrenze verläuft girlandenförmig, parallel zur SZG. Um die 2 mm hohe Dentinmanschette gleichmäßig zu halten, wurde die Dentinmanschette dem Präparationsgrenzenverlauf angepasst (Abbildung 5). Die Präparationen wurden an der Behandlungseinheit⁵ mit einem hohlkehlförmigen Schleifinstrument⁶ unter Wasserkühlung bei 200.000 Umdrehungen pro Minute durchgeführt. Die Hohlkehle betrug 1 mm und wurde im Rahmen der Kronenpräparation finiert.

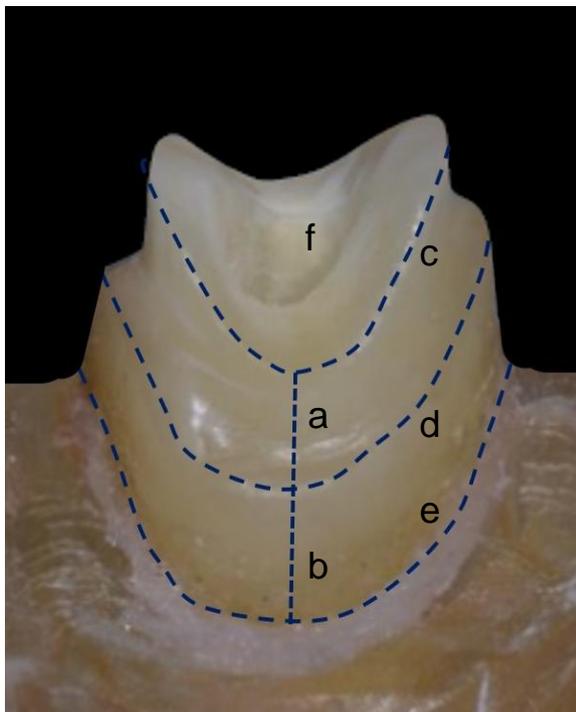


Abbildung 5: Frontalansicht einer präparierten Probe.

- a) 2 mm hohe Dentinmanschette*
- b) 2 mm hohe biologische Breite*
- c) girlandenförmige Dekapitationsebene*
- d) parallel zur SZG girlandenförmig verlaufende Präparationsgrenze*
- e) simulierter Knochenverlauf*
- f) Wurzelkanaleingang*

V.5 Endodontische Aufbereitung

Durch die Dekapitierung wurde das Pulpdach abgetragen und es war eine erste Sondierung des Wurzelkanals mit einem Wurzelkanalinstrument⁷ bis zum Apex möglich. Die Wurzelkanäle wurden maschinell⁸ mit Nickel-Titan-Feilen⁹ (Protaper Next, Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland) aufbereitet. Initial wurden Gleitpfadinstrumente benutzt und anschließend erfolgte in Gegenwart von Natriumhypochlorit¹⁰ die Aufbereitung des Kanals mit der Feile X1 (ISO 017 / Taper 4 %). Hierbei wurde entlang des Gleitpfads in mehreren Schritten und bürtenden Bewegungen gearbeitet, bis die Arbeitslänge erreicht wurde. Im Anschluss erfolgte die Erweiterung auf die Größe X2 (ISO 025 / Taper 6 %)

und die Spülung mit Natriumhypochlorit¹⁰ und Kochsalz. Der aufbereitete Wurzelkanal wurde mit Papierspitzen¹¹ getrocknet und mit korrespondierenden Guttaperchaspitzen¹² in der Größe X2 und Sealer¹³ gefüllt. Die Pulpenkammer wurde provisorisch mit einem Zement¹⁴ verschlossen und die Proben in ihre jeweiligen Behälter gelegt, damit der Sealer mindestens 24 Stunden aushärten konnte.

V.6 Stiftsetzung und Aufbauherstellung

Zur Vereinfachung der koronalen Kunststoffmodellation wurden durchsichtige Frontzahnhülsen aus Kunststoff¹⁵ gewählt. Diese wurden inzisal gefenstert, damit der Glasfaserstift¹⁷ (X-Post Nr. 2, Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland) durchgesteckt werden konnte. Die Frontzahnhülse¹⁵ wurde dem Zahndurchmesser entsprechend ausgesucht und zervikal konturiert, bis sie auf Höhe der Präparationsgrenze dicht war und den Glasfaserstift¹⁷ nicht berührte. Die Stiftbettbohrung erfolgte maschinell⁸ mit den zum Stiftsystem passenden Feilen¹⁶ (Easy Post Precision Drill, Nr.2, Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland) auf eine intrakanalikuläre Länge von 7 mm. Eine apikale Wurzelfüllungslänge von mindestens 4 mm wurde strikt eingehalten. Die Abschlusspülung erfolgte im Anschluss mit 5 ml Natriumhypochlorid¹⁰ für eine Minute. Bei friktionsloser Passung des Glasfaserstifts¹⁷ wurden die zum Kleben nötigen Schmelzareale für 30 Sekunden und Dentinareale, inklusive des Wurzelkanals, für 15 Sekunden mit Phosphorsäure¹⁸ geätzt; anschließend wurden die Wurzelkanäle jeweils mit 5 ml Kochsalz sowie 5 ml Propanol¹⁹ für eine Minute gespült. Überschüssige Flüssigkeit wurde mit Papierspitzen¹¹ aus dem Wurzelkanal entfernt. Falls Dentinareale zu trocken verpusstet wurden, wurden diese Bereiche mithilfe von Bürsten²⁰ und Kochsalz nochmals angefeuchtet. Im Mischbehälter²¹ wurden Adhäsiv²² (XP Bond, Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland) und Dunkelhärtungsaktivator²³ (Self Cure Activator, Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland) im Verhältnis 1:1 für mindestens 5 Sekunden vermischt und anschließend mithilfe einer Bürste²⁰ auf die Schmelz- und Dentinareale aufgetragen sowie in den Wurzelkanal eingebracht. Um die Penetration des Adhäsivgemisches zu erhöhen und ungebundene Moleküle auf die Zahnoberfläche zu führen, wurde das Gemisch für mindestens 10 Sekunden einmassiert und weitere 10 Sekunden unberührt gelassen. Während der Wartezeit wurde der Glasfaserstift¹⁷ mit Propanol¹⁹ gereinigt und anschließend mit dem Adhäsivgemisch für 5 Sekunden benetzt.

Überschüssiges Adhäsiv wurde vom Glasfaserstift¹⁷ und von der Zahnoberfläche mit Luft aus der Behandlungseinheit⁵ verblasen, bis keine Schlierenbildung mehr sichtbar war. Nach der Vorbehandlung des Zahns und des Glasfaserstifts¹⁷ wurde der dualhärtende Befestigungskunststoff²⁴ (core-X flow, Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland) mithilfe einer Applikationshülse in den Wurzelkanal von apikal nach koronal eingebracht und der Glasfaserstift¹⁷ eingeführt. Nach der initialen Lichthärtung für mindestens 20 Sekunden wurde die Hülse¹⁵ auch mit dem Kunststoff²⁴ aufgefüllt, auf den Zahnstumpf adaptiert und von jeder Seite für mindestens 20 Sekunden lichtgehärtet. Um die chemische Polymerisation abzuwarten, wurde eine Liegezeit von 5 Minuten eingehalten und im Anschluss die Hülse¹⁵ mit einer Schere entfernt. Der inzisal überstehende Glasfaserstift¹⁷ wurde mit einem Schleifinstrument⁶ abgetrennt. Damit dieser Bereich keine Flüssigkeit ziehen konnte, wurde die Trennstelle mit dem Adhäsivgemisch versiegelt. Abbildung 6 zeigt eine radiologische Kontrolle eines Probenzahns nach Versorgung mit einem Stift-Stumpf-Aufbau.

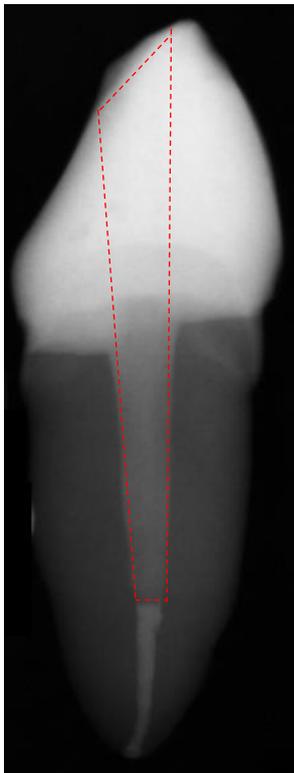


Abbildung 6: Radiologische Kontrolle eines Probenzahns nach Versorgung mit einem Stift-Stumpf-Aufbau. Die rote Umrandung verdeutlicht die Lage des Glasfaserstifts. Apikal des Stifts ist die Restwurzelfüllung zu erkennen.

V.7 Stumpfpräparation

Um laborgefertigte Kronen auf den Zähnen zu befestigen, muss zuvor der Platz durch eine Präparation geschaffen werden. Die Präparationsrichtlinien für Frontzahnkronen aus Lithiumdisilikat²⁵ (IPS e.max, Ivoclar Vivadent, Ellwangen, Deutschland) sind laut Hersteller:

- Zirkuläre Stufenpräparation mit abgerundeten Innenkanten beziehungsweise ausgeprägter Hohlkehlpäparation im Winkel von ca. 10°–30° Grad. Breite der zirkulären Stufe / Hohlkehle mindestens 1 mm.
- Reduktion des inzisalen Kronendrittels um mindestens 1,5 mm.
- Reduktion des vestibulären beziehungsweise oralen Bereichs um mindestens 1,2 mm.

Um die erforderliche Schichtstärke für die Kronen zu erreichen, wurde entsprechend viel Substanz mit diamantierten Schleifkörpern^{6, 26} abgetragen und anschließend die Präparation finiert. Nach der Präparation besaß der Kunststoffaufbau in den Gruppen K, WSR und FE eine Höhe von 4 mm und in der Gruppe CKV eine Höhe von 6 mm. Der girlandenförmige Verlauf der Präparationsgrenze parallel zur Dentinmanschette wurde kontrolliert.

Die Abbildungen 7 bis 9 zeigen schematisch die Probenherstellung bis zur Präparation für die Kronen.



Abbildung 7: In den Wurzelkanal inserierter Glasfaserstift.



Abbildung 8: Gefensterte Frontzahnöhse, zum Befüllen mit Kunststoff vorbereitet.

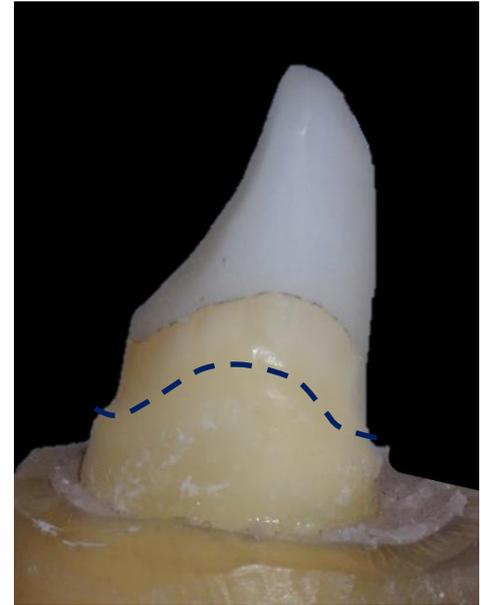


Abbildung 9: Seitenansicht präparierter Probenzahn. Verlauf der Präparationsgrenze zur Verdeutlichung markiert.

V.8 Einbetten der Proben

Die Probenzähne wurden in Kunststoff³⁰ eingebettet. Dabei wurde eine leichte Beweglichkeit der Zähne, um die physiologische Bewegung des Zahns im Parodontium zu simulieren, durch eine dünne Silikonschicht³⁷ um die Wurzeln herum bewerkstelligt. Die Probenzähne wurden für die Einbettung senkrecht, in Richtung der Zahnachse, an einem Parallelometer²⁷ mit Wachs befestigt. Um Platz für die bewegliche Einbettung zu schaffen, wurden zuvor die Wurzeln in ein Tauchwachsgerät²⁸ getaucht und mit Wachs überzogen. Damit genügend Platz für die biologische Breite zur Verfügung stand, wurde ein 2 mm breiter Wachsdraht zirkulär unter der Präparationsgrenze angewachst (Abbildung 10). Eine Aluminiumhülse mit 2 cm Durchmesser wurde als Form für den Kunststoffblock herangezogen. Die mit Vaseline²⁹ isolierte Hülse wurde auf einer Glasplatte mit Wachs befestigt und anschließend mit dem nach Herstellerangaben angerührten Einbettkunststoff³⁰ befüllt. Der Probenzahn am Parallelometer²⁷ wurde daraufhin in die Hülse abgesenkt, bis der blaue Wachsdraht die obere Grenze des Kunststoffs darstellte. Die befüllte Hülse wurde dann von H₂O umgeben, damit die Wachsschicht auf der Wurzel durch die exotherme Reaktion beim Abbinden des Kunststoffs³⁰ nicht schmolz. Nach der Abbindezeit wurden die Kunststoffblöcke aus der

Hülse entfernt und scharfe Kanten mit einer Fräse³¹ geglättet. Um die Zahnposition im Block zu fixieren, wurden diese mit einem Silikon³² überabgeformt. Das Silikon³² und der Block bekamen anschließend korrelierende Markierungen zum späteren Repositionieren. Der Zahn wurde dann aus dem Block entfernt und mit einem Dampfstrahler vom Wachs befreit. Die Wurzeloberfläche und die Alveole im Kunststoffblock wurden daraufhin in einem Sandstrahlgerät³³ mit Aluminiumoxid³⁴ bei 3 Bar für 10 Sekunden bestrahlt. Nach der Propanol¹⁹-Reinigung wurde eine dünne Schicht Autopolymerisat³⁵ auf die Wurzeloberfläche aufgetragen und im Drucktopf auspolymerisiert. Es erfolgte ein erneutes Anstrahlen der Wurzeloberfläche (siehe oben) mit anschließender Beschickung mit einem Primer³⁶. Nach der Trocknungszeit wurde der Kunststoffblock mit einem weichbleibenden Silikon³⁷ befüllt. Der Zahn wurde in die jeweilige Silikon³²-Vorabformung positioniert und in den Kunststoffblock gesteckt, bis die korrelierenden Markierungen wieder bündig waren. Nach der Aushärtungszeit des Silikons³² wurden die Proben von Silikonüberschüssen befreit und die physiologische Beweglichkeit des Zahns im Kunststoffblock mit einem Messgerät³⁸ (Periotest, Medizintechnik Gulden, Modautal, Deutschland) kontrolliert. Dieses wurde vorher durch ein geeichtes Messinstrument auf Funktionalität überprüft. Die Beweglichkeit jeder Probe wurde dreimal gemessen. Bei Werten über 15 wurde der Einbettprozess wiederholt, bis ein Wert zwischen 5 und 15 erreicht wurde (Abbildung 11).



*Abbildung 10:
Zum Einbetten
vorbereitete
Probe.*



*Abbildung 11:
Fertiggestellte
Probe.*

V.9 Herstellung der Kronen

Die präparierten Stümpfe wurden mittels eines intraoralen Scanners³⁹ (Trios, 3Shape, Kopenhagen, Dänemark) erfasst. Mithilfe einer computergestützten Design-Software⁴⁰ (CAD) und einer computergesteuerten Fräse⁴¹ (CAM) wurden Polyurethan-Stumpfmodelle sowie auf die jeweiligen Zahnstümpfe passende Kronen aus Wachs gefräst. Die Wachsmodelle wurden dann im Dentallabor eingebettet⁴² und in Lithiumdisilikat²⁵ (IPS e.max, Ivoclar Vivadent, Ellwangen, Deutschland) überführt. Ein Glasurbrand⁴³ vollendete die Kronenherstellung (Abbildung 12 und 13).



Abbildung 12: Polyurethan-Modell des Zahnstumpfs.



Abbildung 13: Fertiggestellte Krone auf dem Modell.

Die inzisale Höhe der Kronen betrug 2 mm, die Breite am prothetischen Äquator 1,5 mm und am Präparationsrand 1 mm. Die Restaurationshöhe vom Präparationsbeziehungsweise Abutmentrand zur Inzisalkante betrug in den Gruppen K, WSR, FE und IMPL 8 mm, in der Gruppe CKV 10 mm.

V.10 Befestigung der Kronen

Die fertiggestellten Kronen wurden mit einem dünnfließenden Silikon⁴⁴ auf Passgenauigkeit kontrolliert. Die Zahnstümpfe wurden mit Propanol¹⁹ gereinigt. Um eine maximale Haftkraft zu erreichen, wurde die Kroneninnenseite mit Flusssäure⁴⁵ für 20 Sekunden geätzt und anschließend mit einem Wasserstrahl aus der Behandlungseinheit⁵ entfernt. Es folgte die Reinigung im H₂O-Ultraschallbad. Nach Trocknung der Kronen wurde ein Silan⁴⁶ (Monobond Plus, Ivoclar Vivadent, Ellwangen, Deutschland) für 60 Sekunden aufgetragen, woraufhin drei Minuten lang die Trocknung abgewartet wurde. Als Befestigungsmaterial kam ein selbsthaftender und dualhärtender Kunststoff⁴⁷ (SmartCem2, Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland) zum Einsatz. Nach Vorbehandlung des Zahns und der Krone wurde eine Portion des Kunststoffs⁴⁷ in die Krone eingebracht und mit einer Bürste²⁰ gleichmäßig dünn auf die innenliegenden Wände verteilt. Die Krone wurde auf den Zahnstumpf gesetzt und die Überschüsse wurden entfernt. Um die Sauerstoffinhibitionsschicht zu verhindern, wurde der Kronenrand mit Glyceringel abgedichtet. Tabelle 1 listet die Materialien auf, die für die postendodontische Restauration verwendet wurden.

Tabelle 1: Spezifikationen der postendodontisch verwendeten Materialien.

Materialien	Zusammensetzung	Produktname und Hersteller
Wurzelkanalstift	Endodontischer Glasfaserstift: Quarzfasern 60 Vol. %, Epoxidharz 40 Vol. %; Kopfdurchmesser 1,47 mm; Spitzendurchmesser 0,80 mm.	X Post, Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland

Materialien	Zusammensetzung	Produktname und Hersteller
Adhäsivsysteme	<p>Universaladhäsiv: Carbonsäure-modifiziertes Dimethacrylat, phosphorsäure-modifiziertes Acrylatharz, Urethan-Dimethacrylat, Triethylenglycol-Dimethacrylat, 2-Hydroxyethylmethacrylat, butyliertes Benzenediol, Ethyl-4-Dimethylaminobenzoat, Campherchinon, funktionalisiertes amorphes Siliciumoxid, tertiäres Butanol.</p> <p>Self Cure Activator: Urethandimethacrylat, 2-Hydroxyethylmethacrylat, Katalysator, Photoinitiatoren, Stabilisatoren, Aceton, Wasser.</p> <p>Universalprimer: Alkoholische Lösung von Silanmethacrylat, Phosphorsäuremethacrylat, Sulfidmethacrylat.</p>	<p>XP Bond / Self Cure Activator, Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland</p> <p>Monobond Plus, Ivoclar Vivadent, Ellwangen, Deutschland</p>
Befestigungsmaterial (Wurzelkanalstift) und Aufbaukomposit	<p>Dualhärtender, hoch gefüllter Komposit: Urethandimethacrylat, di- und trifunktionale Methacrylate, Barium-Boron-Fluoroaluminosilikatglas, Campherchinon, Fotoakzeleratoren, Siliciumdioxid, Benzoylperoxid.</p>	<p>core-X flow, Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland</p>

Materialien	Zusammensetzung	Produktname und Hersteller
Krone	Keramische Stoffe: Lithiumdisilikat.	IPS e.max Press, Ivoclar Vivadent, Ellwangen, Deutschland
Befestigungs- material (Krone)	Selbsthäftender Zement: Urethandimethacrylat, Di- und Trimethacrylate, phosphorsäure- modifizierte Acrylate, Barium-Bor-Fluoro- Aluminium-Silikat-Glas, organischer Peroxidinitiator, Campherchinon(CQ)- Fotoinitiator, Phosphenoxidfotoinitiator, Akzeleratoren, butylierte Hydroxytoluene, UV- Stabilisatoren, Titandioxid, Eisenoxide, hydrophobes amorphes Silikondioxid.	SmartCem2, Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland

Die Informationen entsprechen den Auflistungen aus den herstellereitigen Gebrauchsanweisungen und Sicherheitsdatenblättern.

V.11 Vorbereitung der Implantatgruppe

Die Zahnimplantate⁴ aus Titan (Bone Level, Straumann, Freiburg, Deutschland) wurden mit Titan-Klebebasen⁴⁸ versorgt, auf denen Lithiumdisilikat²⁵-Abutments verklebt wurden. Die Implantate⁴ wurden dann unbeweglich in Kunststoff³⁰ eingebettet. Eine Klebebasis⁴⁸ wurde daraufhin mit dem intraoralen Scanner³⁹ digitalisiert. Anschließend wurden mithilfe der CAD-Software⁴⁰ die Abutments designt und in Wachs gefräst. Das Abutmentdesign und die Maße entsprachen den Abmessungen der Stümpfe aus den Gruppen K, WSR und FE. Die Wachsabutments wurden eingebettet⁴² und in Lithiumdisilikat²⁵ überführt (Abbildung 14). Die fertigen Abutments wurden daraufhin mit Flusssäure⁴⁵ für 20 Sekunden konditioniert, mit H₂O gereinigt und im Ultraschallbad von Rückständen befreit. Die Klebefläche auf der Titan-Klebebasis⁴⁸ wurde mithilfe des Sandstrahlgeräts³³ mit

Aluminiumoxid³⁴ bei 3 Bar für 10 Sekunden konditioniert. Die Klebeflächen am Abutment und der Titan-Klebebasis⁴⁸ wurden mit Monobond Plus für 60 Sekunden lang bestrichen. Anschließend wurden die Proben drei Minuten liegen gelassen, damit das Lösungsmittel verdunsten konnte. Zum Befestigen der Abutments auf den Titan-Klebebasen⁴⁸ wurde ein selbsthärtender Kunststoff⁴⁹ (Multilink Hybrid Abutment, Ivoclar Vivadent, Ellwangen, Deutschland) benutzt (Abbildung 15). Im Anschluss wurden die Titan-Kebebasen⁴⁸ nach Herstellerangaben mit 35 Ncm auf den Implantaten verschraubt. Die Kronen wurden analog der anderen Gruppen erst in Wachs gefräst, in Lithiumdisilikat²⁵ überführt und nach Konditionierung mit SmartCem2 auf den Abutments adhäsiv befestigt.



Abbildung 14: Links in Wachs modelliertes Abutment. Rechts in Lithiumdisilikat überführtes Abutment.



Abbildung 15: Implantatmodell mit Titan-Klebebasis und Lithiumdisilikat-Abutment.

V.12 Kausimulation

Die fertigen Proben wurden einer Kausimulation⁵⁰ (Regensburger Kausimulator, Regensburg, Deutschland) unterzogen. Diese erfolgte computergesteuert mit 1,2 Millionen Kauzyklen mit einer Kraft zwischen 0 N und 50 N und einem simultanen Temperaturwechsel von 6000 Zyklen von 5° C bis 55° C bei zweiminütiger Haltezeit in destilliertem Wasser. Die Frequenz betrug 1,6 Hz und es kam ein Zahnantagonist zum Einsatz. Die Kaubelastung erfolgte auf der Palatinalfläche 2 mm unterhalb der Inzisalkante bei einem Auftreffwinkel von 135° Grad, was dem Interinzisalwinkel entspricht (Abbildung 16). Die Proben wurden nach der Kausimulation mithilfe einer

2,7-fach vergrößernden Lupenbrille zum Ausschluss von Infraktionen auf Defekte kontrolliert (Abbildung 17). Frakturierte Proben wurden notiert und aus der weiteren Untersuchung exkludiert. Nach der Kausimulation wurde die Beweglichkeit der Proben erneut mit dem Periotest überprüft.

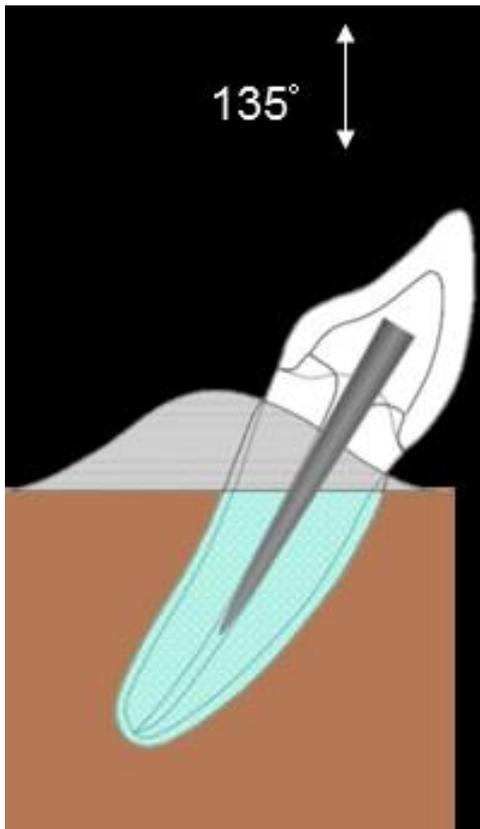


Abbildung 16: Schematische Darstellung der Probe während der Belastung. Grafik modifiziert nach Prof. Dr. M. Naumann (Naumann, Preuss, & Frankenberger, 2007).



Abbildung 17: Probe nach der Kausimulation. Es sind deutliche Abrasionen unterhalb der Inzisalkante zu erkennen.

V.13 Bruchversuche

Die noch suffizienten Proben wurden in einer Universalprüfmaschine⁵¹ (Ermüdungsprüfmaschine, Zwick, Ulm, Deutschland) bis zu einer Fraktur linear belastet. Die Belastung erfolgte, wie zuvor bei der Kausimulation, palatinal 2 mm unterhalb der Inzisalkante bei einem Auftreffwinkel von 135° Grad. Eine 0,9 mm starke Zinnfolie befand sich während der Belastung zwischen Stempelkopf und Probe. Die geeichte Maschine hatte eine Vorschubgeschwindigkeit von 1 mm pro Minute. Es wurden der zurückgelegte Weg und die Belastung aufgezeichnet, die auf dem Zahn auftrafen. Die Kraftabschaltswelle wurde mit 10 % der Maximalkraft definiert und führte zum Ende des Versuchs. Die eingebetteten Proben wurden vor den Belastungstests in eine eigens dafür hergestellte Haltevorrichtung eingesteckt (Abbildung 18). Es wurden alle frakturierten Proben fotografisch dokumentiert und das Bruchmuster notiert.



Abbildung 18: Eingespannte Implantatkrone in der Prüfmaschine. Vor der Belastung wird eine Zinnfolie zwischen Probe und Stempelkopf platziert.

V.14 Frakturmusteranalyse

Die aufgetretenen Misserfolge wurden nach Lage und Wiederversorgbarkeit quantifiziert und in fünf unterschiedliche Kategorien eingeteilt (A–E) (Abbildung 19).

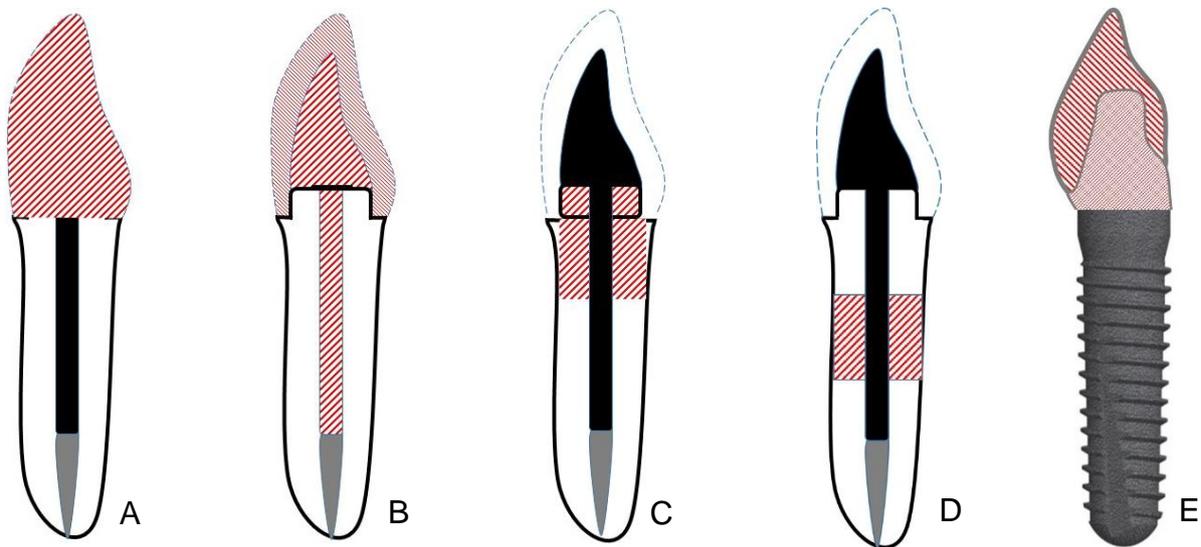


Abbildung 19: Schematische Darstellung der verschiedenen Frakturmuster. A und B sind wiederversorgbar, während C und D infauste Prognosen aufweisen. Die aufgetretenen Misserfolge liegen in den rot schraffierten Bereichen und beschreiben den jeweils schwerwiegendsten Misserfolg.

- A) Fraktur der klinischen Krone. Risse in der Keramik bis zur Fraktur in mehrere Teile.
- B) Fraktur der klinischen Krone mit zusätzlichem Adhäsivversagen des Stift-Stumpf-Aufbaus.
- C) Wurzelfraktur im zervikalen Drittel der Wurzel.
- D) Wurzelfraktur im mittleren Drittel der Wurzel.
- E) Fraktur des Implantataufbaus.

V.15 Statistik

Die statistische Auswertung erfolgte mit der Software SPSS⁵¹ (SPSS Version 23, IBM, Ehningen, Deutschland). Um gruppenspezifische Werte zu erhalten, wurde eine

einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) durchgeführt. Die Überlebensrate der Proben nach der Kausimulation wurde mit der Log-Rank-Analyse evaluiert. Der nichtparametrische Kruskal-Wallis-Test diente dem quantitativen Gruppenvergleich, während mit dem Mann-Whitney-Test der paarweise Gruppenvergleich durchgeführt wurde. Für die Frakturmusteranalyse wurde der Chi-Quadrat-Test angewandt. Das Signifikanzniveau wurde auf $p \leq 0,05$ festgelegt.

VI. Ergebnisse

VI.1 Zahnvermessung

Tabelle 2 listet die gruppenspezifischen Mittelwerte auf und zeigt die Standardabweichung (SD) der effektiven Kronenlänge (L_K), der effektiven Wurzellänge (L_W), des Querschnittsflächenprodukts und die Periotestwerte nach der Kausimulation. Die L_W der Gruppe K unterscheidet sich signifikant ($p < 0,001$) von den L_W der anderen zahnbasierenden Gruppen. Das Querschnittsflächenprodukt hingegen zeigt keinen signifikanten Unterschied unter den zahnbasierenden Gruppen ($p = 0,479$).

Gruppe	K	WSR	FE	CKV	IMPL
L_K [mm]	10	10	10	12	10
L_W [mm] (SD)	13,48 (0,57)	11,86 (0,79)	11,18 (0,49)	11,74 (0,74)	12
Querschnittsflächen- produkt [mm²] (SD)	39,37 (3,49)	40,12 (3,53)	37,68 (4,03)	39,20 (4,35)	16,81
Periotestwerte (SD)	6,00 (2,45)	5,82 (1,60)	6,80 (2,44)	5,91 (3,30)	2,50 (1,43)

Tabelle 2: Gruppenspezifische Werte der Proben.

VI.2 Kronen-Wurzel-Verhältnis

Das Kronen-Wurzel-Verhältnis (R_{CR}) ergibt sich aus der Gleichung $L_K \div L_W = R_{CR}$. Tabelle 3 und Diagramm 1 veranschaulichen die unterschiedlichen R_{CR} unter den Gruppen. Die errechneten Kronen-Wurzel-Verhältnisse unterscheiden sich signifikant voneinander ($p = 0,001$), außer zwischen WSR und FE: hier liegt keine Signifikanz vor ($p = 0,139$).

Gruppe	K	WSR	FE	CKV	IMPL
R_{CR}	0,74	0,85	0,90	1,03	0,83
(SD)	(0,03)	(0,06)	(0,04)	(0,07)	

Tabelle 3: Das Kronen-Wurzel-Verhältnis im Mittelwert und mit Standardabweichung.

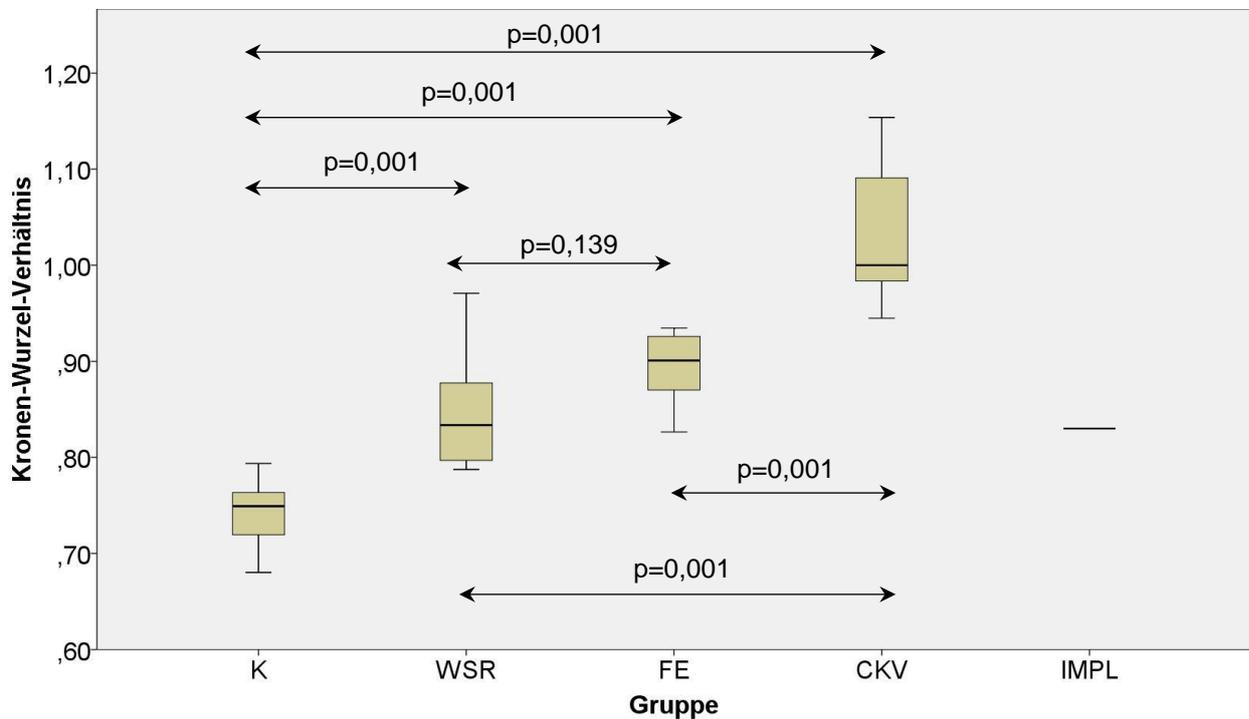


Diagramm 1: Boxplotdiagramm der Kronen-Wurzel-Verhältnisse und die statistischen Signifikanzen.

VI.3 Versagensrate nach der Kausimulation

Nach der Kausimulation lag in den Gruppen K und FE eine Kronenfraktur und in den Gruppen WSR und CKV eine Fraktur im oberen Wurzeldrittel vor. In der IMPL-Gruppe lagen eine Abutmentfraktur und eine Kronenfraktur vor. Die Log-Rank-Analyse der Kaplan-Meier-Überlebensplots zeigt keine statistisch signifikanten Unterschiede in der Versagensrate zwischen den Gruppen nach der Kausimulation ($p = 0,948$). Die bis hierhin frakturierten Proben wurden nicht mehr weiter in der Universalprüfmaschine belastet.

VI.4 Auswertung der maximalen Belastbarkeit

In der Universalprüfmaschine wurde der Weg aufgezeichnet, den der Prüfmaschinenkopf bei Belastung auf der Probe zurücklegte. Die Kraftabschaltsschwelle lag bei 10 % der Maximalkraft und führte zu dem Wert F_{\max} in Newton (N). Tabelle 4 listet die Minimal-, Median- und Maximalwerte sowie das obere und untere Konfidenzintervall der Belastbarkeit für alle Versuchsgruppen auf.

Die Medianwerte für die maximale Belastbarkeit variieren zwischen 195 N in der CKV-Gruppe und 446 N in der IMPL-Gruppe. Der Kruskal-Wallis-Test zeigt signifikante ($p < 0,001$) Unterschiede in den Werten der maximalen Belastbarkeit zwischen den Gruppen. Dies trifft auch dann zu, wenn die frakturierten Proben aus der Kausimulation in die Berechnung inkludiert werden und einen Wert von $F_{\max} = 0$ N zugewiesen bekommen ($p < 0,001$).

Der paarweise Gruppenvergleich zeigt signifikante Unterschiede in der Belastbarkeit zwischen allen zahnbasierenden Gruppen und der IMPL-Gruppe ($p \leq 0,002$). Ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den zahnbasierenden Gruppen besteht zwischen K und CKV ($p = 0,045$), WSR und CKV ($p = 0,001$) und zwischen FE und CKV ($p = 0,033$). Diagramm 2 verdeutlicht anhand von Boxplots Differenzen in der Belastbarkeit zwischen den Gruppen und führt die statistischen Signifikanzen auf.

Gruppe	K	WSR	FE	CKV	IMPL
Anzahl [n]	11	11	11	11	10
Minimalwert [N]	204	243	183	140	370
Maximalwert [N]	542	443	371	274	539
Unteres Konfidenzintervall (95 %) [N]	238	251	206	159	389
Oberes Konfidenzintervall (95 %) [N]	277	353	368	262	506
Median [N]	252	293	263	195	446

Tabelle 4: Maximale Belastbarkeit der Versuchsgruppen nach der Kausimulation.

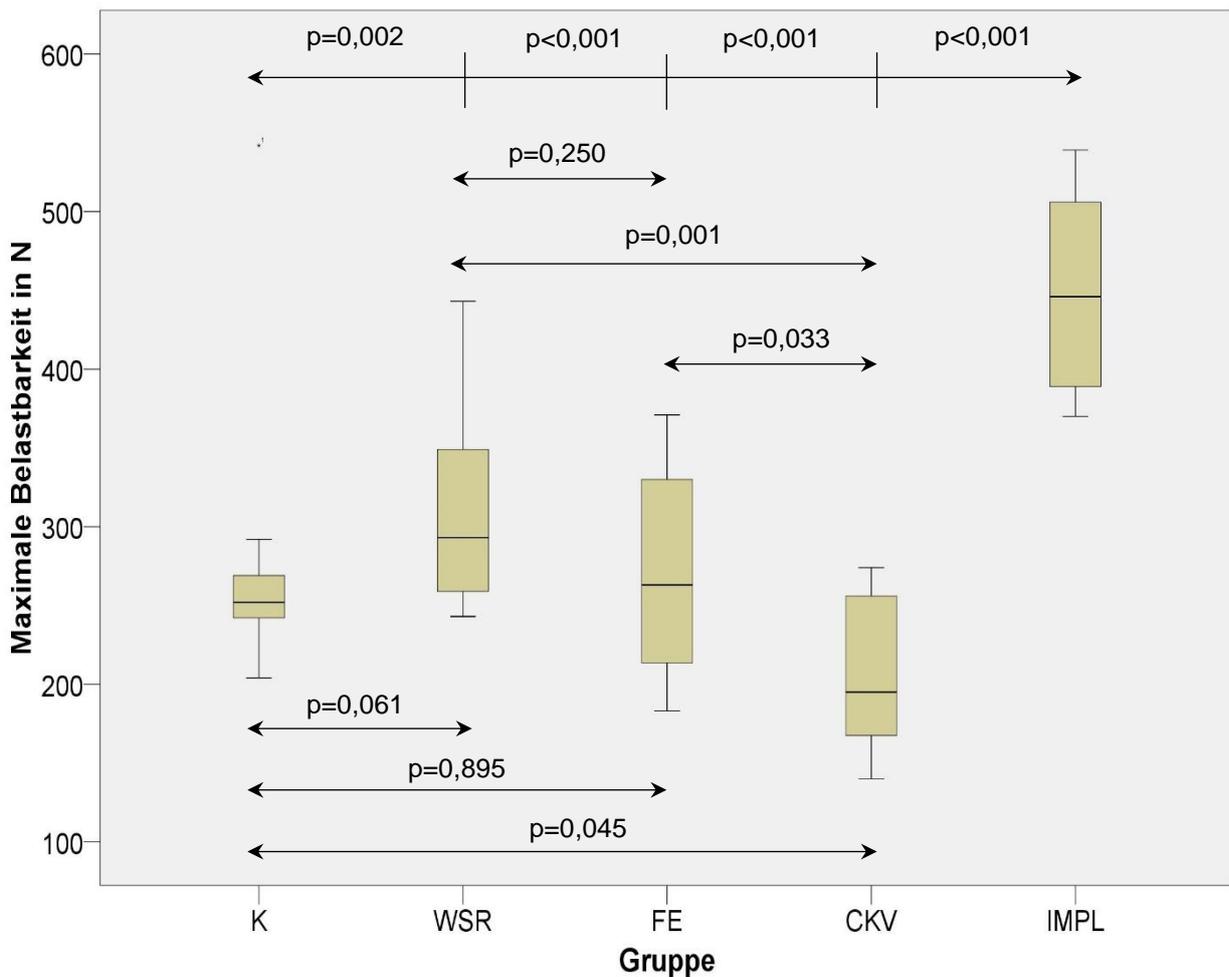


Diagramm 2: Boxplotdiagramm der maximalen Belastbarkeit der Gruppen nach der Kausimulation. Die statistische Signifikanz zwischen den Gruppen steht über den entsprechenden Linien.

VI.5 Auswertung der Frakturmuster

VI.5.1 Frakturmusteranalyse

Die aufgetretenen Misserfolge wurden nach Lage und Wiederversorgbarkeit quantifiziert und in fünf unterschiedliche Kategorien eingeteilt (A–E). Frakturierte Proben aus der Kausimulation wurden hier nicht inkludiert. Tabelle 5 zeigt die Verteilung der verschiedenen Frakturmuster innerhalb der Gruppen.

Gruppe	K	WSR	FE	CKV	IMPL
Frakturmuster					
A	2 (18,2 %)	2 (18,2 %)	3 (27,3 %)	3 (27,3 %)	-
B	4 (36,4 %)	1 (9 %)	2 (18,2 %)	5 (45,5 %)	-
C	4 (36,4 %)	3 (27,3 %)	3 (27,3 %)	3 (27,3 %)	-
D	1 (9 %)	5 (45,5 %)	3 (27,3 %)	0 (0 %)	-
E	-	-	-	-	10 (100 %)
Gesamt	11	11	11	11	10
Wiederversorgbar	6 (55 %)	3 (27 %)	5 (45 %)	8 (73 %)	10 (100 %)
Infaust	5 (45 %)	8 (73 %)	6 (55 %)	3 (27 %)	0 (0 %)

Tabelle 5: Die Aufteilung der Frakturmuster innerhalb der verschiedenen Versuchsgruppen.

VI.5.2 Häufigkeitsverteilung der Frakturmuster innerhalb der Gruppen

Die grafische Häufigkeitsverteilung der verschiedenen Frakturmuster innerhalb der Versuchsgruppen verdeutlicht Diagramm 3. In der Gruppe WSR trat signifikant häufig die mittlere Wurzelfraktur und in der Implantatgruppe signifikant häufig die Fraktur des Implantataufbaus auf.

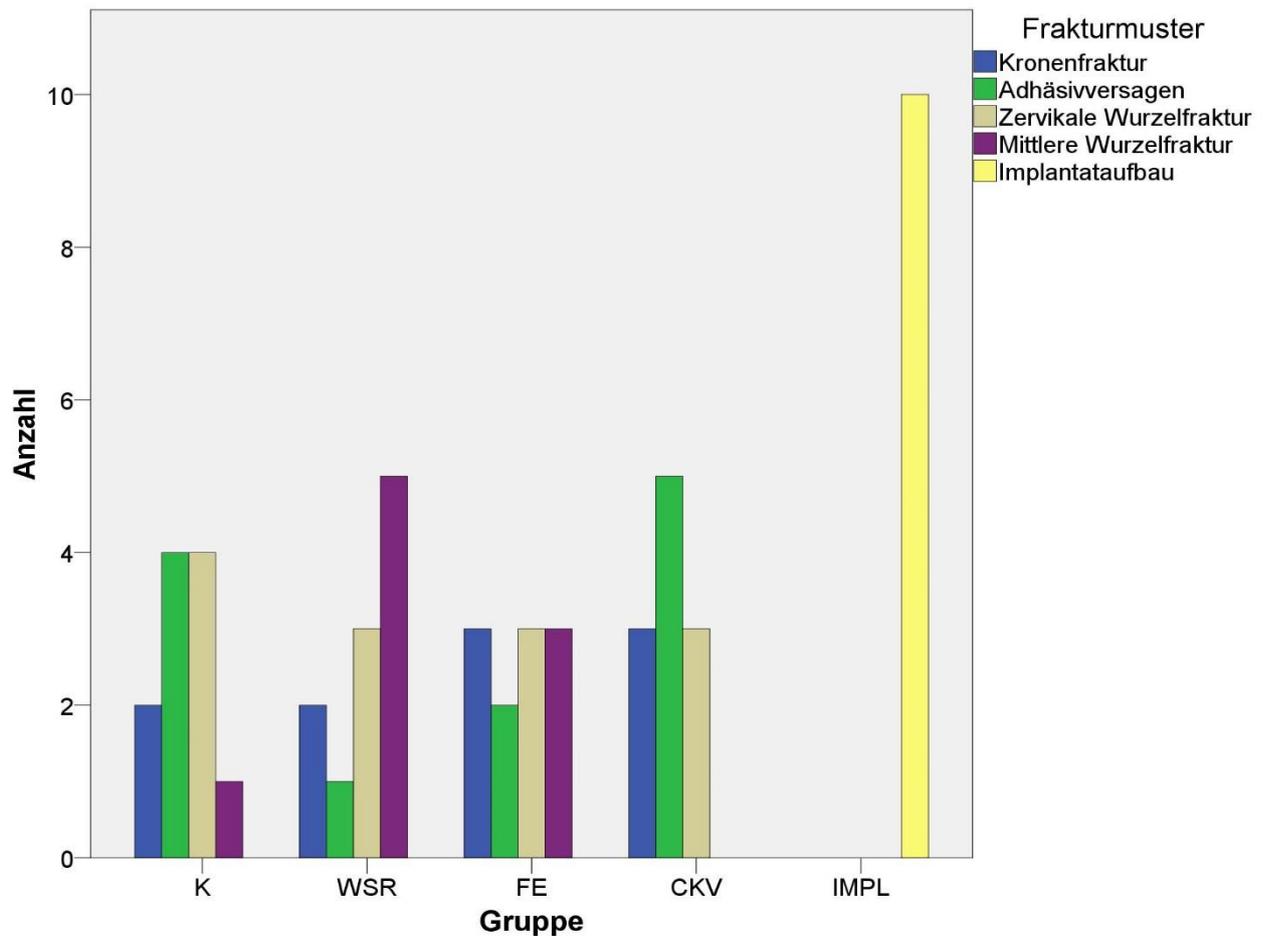


Diagramm 3: Grafische Darstellung der Frakturmuster innerhalb der Gruppen.

VI.5.3 Darstellung der verschiedenen Frakturmuster

Folgend werden exemplarisch die Frakturmuster fotografisch dargestellt.

Frakturmuster A



Abbildung 20 zeigt eine in zwei Teile frakturierte Krone. Der Riss verläuft vom Punkt des Kraftauftritts (Interinzisalpunkt) in Richtung des vestibulären Präparationsrands.



Abbildung 21: Keramikfraktur.

Frakturmuster B



Abbildung 22 zeigt eine in zwei Teile frakturierte Krone. Der Spalt zwischen dem Stift-Stumpf-Aufbau und dem Zahn deutet auf ein Adhäsivversagen hin.



Abbildung 23: Auch hier deutet der Spalt zwischen Stift-Stumpf-Aufbau und Zahn auf ein Adhäsivversagen hin.

Frakturmuster C



Abbildung 24: Fraktur im oberen Wurzel Drittel. Die Keramikfraktur ist zusätzlich zum Adhäsivversagen ersichtlich.



Abbildung 25: Fraktur im oberen Wurzel Drittel.

Frakturmuster D



Abbildung 26 zeigt eine Fraktur im mittleren Wurzel Drittel. Im Kunststoffblock ist die Wurzelspitze mit Restwurzelfüllung sichtbar.

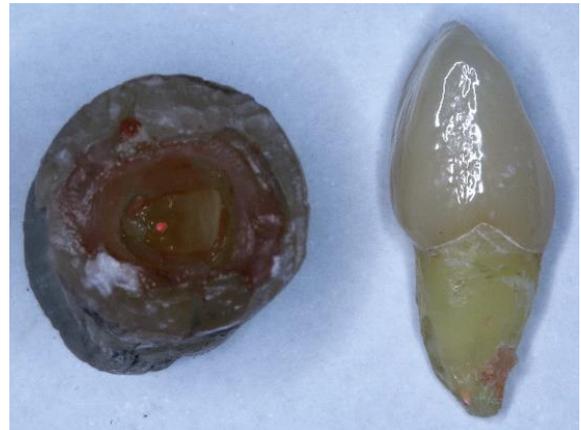


Abbildung 27: Fraktur im mittleren Wurzel Drittel.

Frakturmuster E



Abbildung 28 zeigt eine Fraktur des Keramikabutments und der Keramikkrone. Die Titan-Klebebasis und das Implantat sind unbeschädigt.



Abbildung 29 zeigt eine weitere Probe mit der Fraktur des Implantataufbaus.

VI.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die errechneten Kronen-Wurzel-Verhältnisse der Versuchsgruppen unterscheiden sich signifikant ($p = 0,001$) voneinander. Ausgenommen hiervon ist die WSR-Gruppe, die im Vergleich zur FE-Gruppe ein ähnliches Kronen-Wurzel-Verhältnis besitzt ($p = 0,139$). Die größte Differenz (28 %) im Kronen-Wurzel-Verhältnis hat die CKV-Gruppe ($R_{CR} - CKV = 1,03$) verglichen zur K-Gruppe ($R_{CR} - K = 0,74$).

Die Versagensrate nach der Kausimulation zeigte keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen ($p = 0,948$).

Nach der Kausimulation hielt die IMPL-Gruppe den größten Bruchbelastungswerten im Testfeld stand ($p \leq 0,002$). Im Vergleich zur CKV-Gruppe hielten die K($p = 0,045$)-, WSR($p = 0,001$)- und FE($p = 0,033$)-Gruppen signifikant höheren Bruchbelastungswerten stand.

Die Frakturmusteranalyse zeigte in der WSR-Gruppe signifikant häufiger auftretende mittlere Wurzelfrakturen und signifikant häufigere Frakturen des Implantataufbaus in der IMPL-Gruppe.

VII. Diskussion

VII.1 Diskussion der Methodik

VII.1.1 Zahnauswahl

Für die vorliegende Untersuchung wurden mittlere Oberkiefer-Schneidezähne der zweiten Dentition des Menschen ausgewählt. Im Vergleich zu artifiziellen Zähnen sollen menschliche Zähne ein klinisch näheres Ergebnis simulieren. Zahlreiche Studien betrachten bei der Frakturresistenz postendodontisch restaurierter Zähne die Prämolaren (Gegauff, 2000; Meng et al., 2009; Meng et al., 2007), jedoch ist die Untersuchung an Oberkiefer-Schneidezähnen, wie im Folgenden dargelegt wird, aus verschiedenen Gründen besonders interessant.

Oberkiefer-Frontzähne gelten als gefährdet, da sie durch ihre exponierte Lage bei Traumata in 83 % der Fälle involviert sind. (Castro, Poi, Manfrin, & Zina, 2005). Dies betrifft mit einer Prävalenz von 58,3 % die zentralen Schneidezähne, gefolgt von den seitlichen Schneidezähnen mit 28,4 %. Oftmals ist mehr als ein Zahn involviert. Durch riskante Sportarten und fahrlässige Unfälle sind Männer häufiger betroffen als Frauen. Eine komplizierte Fraktur mit Eröffnung der Pulpa kommt seltener vor als eine unkomplizierte ohne Eröffnung (Castro et al., 2005; Zerman & Cavalleri, 1993). Während im Seitenzahnbereich vorwiegend kompressive axiale Belastungen auftreten, treten im Frontzahnbereich zusätzlich horizontale Scherkräfte auf, die zu Ermüdungsbrüchen führen können (Torbjörner & Fransson, 2004a, 2004b; Wiskott, Nicholls, & Belser, 1997). NAUMANN et al. haben in einer prospektiven klinischen Studie gezeigt, dass tiefzerstörte Zähne, die mit einem Glasfaserstift sowie einer Krone versorgt wurden, im Frontzahnbereich ein doppelt so hohes Risiko für einen Misserfolg aufwiesen als Seitenzähne (Naumann et al., 2012). Es wird erläutert, dass die höhere Misserfolgsrate für Frontzähne aus dem vermehrten Auftreten horizontaler Scherkräfte bei Belastung resultiert.

Oberkiefer-Schneidezähne gehören zu den am häufigsten überkronten Zähnen (Burke & Lucarotti, 2009; Walton, 1999). Sie werden in zahlreichen Studien als Proben verwendet und sind somit als Standard etabliert, so dass sie auch in diesem Untersuchungsaufbau verwendet wurden. (Abduljawad, Samran, Kadour, Karzoun, & Kern, 2017; Butz, Lennon, Heydecke, & Strub, 2001; Heydecke et al., 2001; Naumann, Preuss, & Rosentritt, 2006).

Als Limitation ist anzuführen, dass menschliche Zähne bei der maximalen Belastbarkeit zu höheren Standardabweichungen führen können. Dies ist verschiedenen Faktoren geschuldet: Unterschiedliche Zahngrößen, Pulpenkammerausdehnungen oder Dentin-Mineralisationsgrade (Yoshiyama et al., 1996) können die Belastbarkeit einer Probe ebenso beeinflussen wie die Lagerungsdauer (Beech, Tyas, & Solomon, 1991). Die Lagerungsdauer der Probenzähne oder der angesetzten Chloramin-T-Lösung war nicht zurückverfolgbar.

VII.1.2 Gruppengröße und -zuweisung

Die hier verwendete Fallzahl von 12 je Gruppe führte zu teils signifikanten Unterschieden in der maximalen Belastbarkeit zwischen den Gruppen. Verglichen mit anderen In-vitro-Studien erscheint die Fallzahl von 12 überdurchschnittlich hoch, da in einer Literaturübersicht vermehrt Fallzahlen von 10 und darunter aufgeführt werden (Naumann et al., 2009). Um die Standardabweichung durch unterschiedlich große Probenzähne zu minimieren, wurden nur Zähne mit ähnlichen Maßen inkludiert. Hierfür wurden das Querschnittflächenprodukt und die effektive Wurzellänge der Proben ermittelt. Dieses Vorgehen deckt sich mit dem anderer Forschungsarbeiten (Abduljawad et al., 2017; Akkayan, 2004; Butz et al., 2001). Die forcierte Extrusion und die chirurgische Kronenverlängerung wurden mittels Einteilung von kürzeren Wurzeln und Querschnittsflächen simuliert. Dies folgt den Erkenntnissen von GEGAUFF et al. und MENG et al., welche aufgrund der konischen Wurzelform kleinere Querschnittsflächen auf Höhe der Präparationsgrenzen nach diesen Eingriffen bemerken (Gegauff, 2000; Meng et al., 2009; Meng et al., 2007). Im Testfeld besitzen die Gruppen FE und CKV die geringsten Querschnittsflächen und kleinsten effektiven Wurzellängen unter den Gruppen, jedoch sind diese Unterschiede nicht signifikant.

VII.1.3 Wurzelkanalbehandlung und Stiftbettbohrung

Alle Probenzähne wurden wurzelkanalbehandelt. Nach der maschinellen Aufbereitung wurden die Wurzelkanäle mit Natriumhypochlorit gespült, da dies als Standardspüllösung zur Keimreduzierung in der endodontischen Therapie gilt (Mohammadi, 2008). Laut der Deutschen Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (DGZMK) ist die

Wurzelkanalfüllung mit Guttapercha und Sealer die Standardversorgung bei einer Wurzelkanalbehandlung und diente dementsprechend in diesem Versuchsaufbau als Obturationsmaterial (Hülsmann & Schäfer, 2005). Nachdem die Wurzelkanäle mit Guttapercha und Sealer abgefüllt wurden, erfolgte die Stiftbettaufräsbereitung und erneute Spülung mit Natriumhypochlorit, gefolgt von Kochsalz und Propanol. Die finale Propanolspülung steigert verglichen mit einer Chlorhexidinspülung den Haftverbund zum Dentin (Bitter, Aschendorff, Neumann, Blunck, & Sterzenbach, 2014). In der Literatur werden der Zahnhartsubstanzverlust durch die Wurzelkanalbehandlung und die Stiftbettbohrung als Faktoren für frühzeitige Misserfolge genannt (Reeh et al., 1989; Tang et al., 2010; Trope & Ray, 1992). Um dieses Risiko zu minimieren und die Proben vergleichbar zu gestalten, wurde für die Stiftbettbohrung der Wurzelkanal bis zur Größe X2 erweitert und es wurden für die endodontische und postendodontische Restauration nur systemkompatible Bohrer und Materialien verwendet. Ebenso wurde auf eine guttapercha- und sealerfreie Klebefläche geachtet, da diese sonst die adhäsive Fläche für den Verbund vom Wurzelkanalstift zum Dentin reduziert hätte (Serafino, Gallina, Cumbo, & Ferrari, 2004).

VII.1.4 Wurzelkanalstift

In der Einleitung (Kapitel III.2.3.2) wurde die heterogene Datenlage zu Stiftindikationen aufgeführt. Diese Studie hält sich an die Empfehlung einer Literaturübersicht von 2018, in der nach Stiftinsertion ein Vorteil in der Bruchbelastbarkeit für Zähne ohne jegliche residuale Kavitätenwand ausgesprochen wird (Naumann et al., 2018). Im Versuchsaufbau wurden für den Stift-Stumpf-Aufbau zylindrokonische Glasfaserstifte verwendet. Diese haben ein dentinähnliches Elastizitätsmodul und können passiv im Wurzelkanal befestigt werden. Die apikal konische Form passt zum Wurzelkanalverlauf und dient der substanzschonenden Präparation, während der parallelförmige koronale Anteil die Retention erhöht (Jayasenthil, Solomon-Sathish, Venkatalakshmi-Aparna, & Balagopal, 2016). Um ein apikales Leakage und eine Re-Infizierung des Wurzelkanals zu vermeiden, wurde eine Restwurzelfüllung von mindestens 4 mm beibehalten (Goodacre & Spolnik, 1995). Der Wurzelkanalstift selbst konnte bei vorhandenem Ferrule-Effekt und adhäsivem Befestigen auf eine Länge von 7 mm im Wurzelkanal reduziert werden, da eine Längenzunahme keinen positiven Effekt auf die

Stressverteilung innerhalb der Wurzel hat (Nissan, Dmitry, & Assif, 2001; Santos-Filho, Verissimo, Raposo, Noritomi MecEng, & Marcondes Martins, 2014; Santos-Filho, Verissimo, Soares, et al., 2014).

VII.1.5 Stiftsetzung und Aufbau

Die Wurzelkanalstifte wurden im Wurzelkanal adhäsiv befestigt. Hierbei wurde der Gebrauchsanweisung des Herstellers gefolgt, dessen Vorgang wissenschaftlich erprobt ist (Sterzenbach, Karajouli, Naumann, Peroz, & Bitter, 2012). Studien attestieren die Überlegenheit von adhäsiv eingesetzten Glasfaserstiften gegenüber den konventionell mit Glasionomermertement oder Zinkphosphatzement eingesetzten Glasfaserstiften (Goracci & Ferrari, 2011; Naumann, Sterzenbach, Rosentritt, Beuer, & Frankenberger, 2008; Schmitter et al., 2006). Dieser techniksensitive Vorgang war in dieser In-vitro-Studie leicht umsetzbar, da extraoral problemlos trockengelegt werden konnte. Klinisch kann jedoch die Trockenlegung je nach Destruktionsgrad des Zahns und der Compliance des Patienten zu Problemen führen. Der Haftvermittler (XP Bond) hat sich klinisch (Blunck, Knitter, & Jahn, 2007) sowie *in vitro* (Manhart & Trumm, 2010) bewährt und wurde mit einer Bürste (Ferrari, Vichi, & Grandini, 2001) auf die Adhäsivflächen am Zahn aufgetragen. Das vorherige Vermischen mit Dunkelhärtungsaktivator (Self Cure Activator) stellte ein Aushärten auch in tiefen Wurzelkanalabschnitten sicher. Das Aufbaumaterial (core-X flow) diente gleichzeitig als Befestigungskunststoff für den Glasfaserstift sowie als Aufbaumaterial für den Stumpf. Es ist als Etch-and-rinse-Kombinationspräparat vergleichbar zuverlässig wie selbstadhäsive Zemente für die solitäre Stiftsetzung und bringt den Vorteil mit sich, dass für die Aufbauherstellung kein separater Kunststoff verwendet werden muss (Sterzenbach, Karajouli, et al., 2012). *In vitro* zeigt core-X flow hohe Haftwerte (Marigo et al., 2017). Eine Konditionierung des Glasfaserstifts wurde nur mit Propanol durchgeführt, da eine Oberflächenbestrahlung mit Strahlgut zur Separation und Beschädigung der oberflächlichen Glasfasern in der Epoxidharzmatrix führen kann (Drummond, Toepke, & King, 1999). Für die Formgebung des Aufbaus wurde eine Frontzahnöhülse verwendet. Die Wiederherstellung der originären Kronenform war in diesem Versuchsaufbau nicht nötig gewesen, da die Stumpfform nach Präparation entscheidend war.

VII.1.6 Kronenversorgung

Um die postendodontische Restauration zu vollenden und den Ferrule-Effekt sicherzustellen, wurden Kronen auf die Proben zementiert. Das in dieser Untersuchung verwendete Lithiumdisilikat (IPS e.max) ist *in vitro* sowie im klinischen Alltag etabliert und erreicht in einer prospektiven klinischen Studie Überlebensraten nach 4 Jahren von 96,3 % (Reich & Schierz, 2013) und nach 10 Jahren von 83,5 % (Rauch, Reich, Dalchau, & Schierz, 2018). Vollkeramikkronen haben ein großes Indikationsfeld und sind durch ihre einfache Herstellung, hohe Ästhetik und Zuverlässigkeit zum Standardmaterial in der täglichen Praxis geworden (Edelhoff & Brix, 2011). In einer Literaturübersicht werden Vollkeramikkronen eine ähnliche 5-Jahres-Überlebenswahrscheinlichkeit attestiert wie keramisch verblendeten Metallkronen (Sailer, Makarov, Thoma, Zwahlen, & Pjetursson, 2015). Aufgrund des fehlenden Metallgerüsts sind Vollkeramikkronen den verblendeten Metallkronen jedoch ästhetisch überlegen und ebenso biokompatibel (Mallineni, Nuvvula, Matinlinna, Yiu, & King, 2013).

Wie vom Hersteller für Vollkronen aus IPS e.max empfohlen, wurde bei der Stumpfpräparation eine 1 mm breite ausgeprägte Hohlkehle angelegt. Die CAD-CAM-gestützte Herstellung der Kronen für diese Studie garantierte eine gleichbleibende Qualität und eine geringere Standardabweichung, verursacht durch variable Kronendimensionen. Durch die digitale Planung konnten alle Kronen in den vom Hersteller freigegebenen Mindestmaßen hergestellt werden.

Vor dem Einsetzen mit dem Befestigungskunststoff (SmartCem2) wurden die Innenseiten der Kronen mit 5%iger Flußsäure geätzt und anschließend mit Silan (Monobond Plus) konditioniert. Dieses Vorgehen erhöht den Haftverbund des Lithiumdisilikats zum Befestigungskunststoff durch Ankopplung der funktionellen Gruppen des Silanhaftvermittlers an die durch die Ätzung freigelegten Si-OH-Gruppen der Keramik. Die funktionellen Gruppen binden sich anschließend chemisch an die Methoxygruppen des Befestigungskunststoffs aus Bis-GMA. Die Keramik-Ätzung mit anschließender Silanisierung wurde in Studien untersucht und schneidet mit hohen Haftwerten ab (Hayakawa et al., 1992; Lyann et al., 2018; Ozcan & Vallittu, 2003; Stacey, 1993; Tribst et al., 2018).

In der Implantatgruppe wurden die Keramikflächen der Abutments mit 5%iger Flusssäure geätzt und anschließend mit Monobond Plus silanisiert. Durch die adhäsive Befestigung mit SmartCem2 wurde ein maximaler Verbund zwischen Krone und Abutment erzielt (Hayakawa et al., 1992; Lyann et al., 2018; Ozcan & Vallittu, 2003; Stacey, 1993; Tribst et al., 2018).

VII.1.7 Einbetten der Proben

Das Einbetten der Proben erfolgte in Einbettkunststoff. Die Beweglichkeit der Proben wurde, wie in In-vitro-Studien empfohlen (Soares, Pizi, Fonseca, & Martins, 2005; Sterzenbach, Kalberlah, Beuer, Frankenberger, & Naumann, 2011), durch eine Silikonschicht um die Wurzeln herum simuliert. Eine bewegliche Einbettung führt zu unterschiedlichen Frakturmustern verglichen mit starr eingebetteten Proben, die sich wie ankylosierte Zähne verhalten (Soares et al., 2005). Die 2 mm hohe biologische Breite wurde durch einen entsprechend hohen Wachsdraht bei der Einbettung unter der Präparationsgrenze sichergestellt. Damit bei der exothermen Abbindereaktion des Einbettkunststoffes der Wachsdraht und die Wachsschicht auf der Wurzel nicht schmolzen, wurde die Einbetthülse während der Polymerisationsreaktion von einem kühlenden Wasserbad umgeben. Nachdem die Probenherstellung fertiggestellt war, wurde die physiologische Beweglichkeit mit dem Periotest verifiziert. Dieser Einbettvorgang entspricht dem validierten Vorgehen einer anderen In-vitro-Studie (Sterzenbach et al., 2011).

Da Implantate nach der Einheilphase durch Osseointegration unbeweglich mit dem Alveolarknochen verbunden sind, wurde hier auf eine bewegliche Einbettung verzichtet.

VII.1.8 Implantate

Bereits in zahlreichen Studien hat sich das verwendete Implantatsystem (Bone Level) von Straumann bewährt (Chiapasco, Casentini, & Zaniboni, 2014; Laurell & Lundgren, 2011; Santing, Raghoobar, Vissink, den Hartog, & Meijer, 2013; Wallkamm et al., 2015). Im ästhetisch wichtigen Frontzahnbereich kann durch die Verwendung eines Keramik-Abutments auf einer Titan-Klebebasis ein metallischer Rand vermieden werden.

Die Eignung und Leistungsfähigkeit von Lithiumdisilikat-Abutments, versorgt mit einer Lithiumdisilikat-Krone, wurde *in vitro* untersucht und für ähnlich erfolgsversprechend wie Restaurationen auf Titan-Abutments befunden (Silva et al., 2018). Multilink-Hybrid-Abutment wurde nach Vorbehandlung des Titans und der Keramik zum adhäsiven Befestigen der Keramik-Abutments auf den Titan-Klebebasen verwendet. Dieser Befestigungskunststoff hat sich bewährt und liefert auch nach Thermozyklierung gute Haftwerte (Sellers, Powers, & Kiat-Amnuay, 2017).

VII.1.9 Kausimulation

Unter Realbedingungen müssen eingegliederte Restaurationen im Mund verschiedenen thermischen und mechanischen Belastungen standhalten. Da multiple Faktoren zu einer Materialermüdung und zu einem frühzeitigen Versagen der Restaurationen führen können (Sterzenbach, Rosentritt, Frankenberger, Paris, & Naumann, 2012), wurden alle Proben vor dem linearen Belastungstest einer Kausimulation unterzogen. Der Versuchsaufbau geht auf KREJCI et al. zurück, die durch die gleichzeitige thermische und mechanische Belastung der Proben eine klinische Situation simulierten (Krejci, Reich, Lutz, & Albertoni, 1990). In dieser Studie wurde die Kausimulation computergesteuert durchgeführt. Sie soll klinisch auftretende Kräfte und Temperaturen simulieren und hat sich wissenschaftlich bewährt (Naumann, Preuss, & Rosentritt, 2006; von Stein-Lausnitz et al., 2018). Die Temperaturwechselbadbelastung führt zu unterschiedlichen Dimensionsänderungen der Restaurationsmaterialien sowie des Zahns, bedingt durch verschiedene Wärmeausdehnungskoeffiziente. Diese durch Entspannung und Schrumpfung entstehenden Volumenschwankungen führen zur Beanspruchung des Verbunds an den Grenzflächen am Kronenrand und Füllungsmaterial und können zu Randundichtigkeiten führen. In zahlreichen Studien wurden bereits Zähne durch dieses Verfahren temperaturbelastet, womit es als Standardtest für In-vitro-Studien angesehen werden kann (Jones, Grieve, & Harrington, 1979; Sterzenbach, Rosentritt, et al., 2012; Sterzenbach, Rosentritt, Meyer-Lueckel, Bitter, & Naumann, 2018; von Stein-Lausnitz et al., 2018).

STERZENBACH et al. zeigten in einer In-vitro-Studie, dass Probenkörper, die einer Kausimulation unterzogen wurden, signifikant geringeren Belastungswerten bis zur Fraktur standhielten (Sterzenbach, Rosentritt, et al., 2012). Sie schlussfolgern, dass unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffiziente der Materialien, Erschütterungen und Dimensionsänderungen die Materialermüdung beschleunigen und zu einem frühzeitigen Misserfolg führen können.

VII.1.10 Linearer Belastungstest

Nach der Kausimulation wurden alle noch intakten Proben einem linearen Belastungstest unterzogen. Diese Untersuchungsmethode ist in der Literatur ein gängiges und validiertes Verfahren, um die maximale Belastbarkeit von Proben zu testen (Gegauff, 2000; Meng et al., 2007; Sterzenbach et al., 2018). Die lineare Belastung erfolgte identisch zur Kausimulation, bei einem Belastungswinkel von 135° Grad zur Zahnängsachse mit einem Kraftangriffspunkt 2 mm unterhalb der Inzisalkante. Dies entspricht einer häufig in der Bevölkerung vorkommenden Klasse-I-Okklusion (Coca & Schwickerath, 1987). Um eine gleichmäßige Kraftverteilung sicherzustellen und eine punktuelle Belastung zu vermeiden, wurde zwischen Krone und Stempelkopf des Prüfgeräts eine 0,9 mm starke Zinnfolie positioniert (Rosentritt, Furer, Behr, Lang, & Handel, 2000). Die Vorschubgeschwindigkeit des Stempelkopfes betrug 1 mm / Minute und simulierte eine physiologisch auftretende Belastungsgeschwindigkeit (Rosentritt et al., 2000). Höhere Vorschubgeschwindigkeiten simulieren klinische Extremsituationen, wie zum Beispiel bei Traumata (Stokes & Hood, 1993).

VII.2 Diskussion der Ergebnisse

Da in den Gruppen WSR, FE und CKV gleichermaßen, jedoch durch unterschiedliche zahnärztliche Maßnahmen, ein Attachmentverlust von 2 mm simuliert wird, liegt es nahe anzunehmen, dass auch die Bruchbelastbarkeit im gleichen Maße abnehmen müsste. Jedoch zeigen die Ergebnisse dieser Studie, dass die Bruchbelastbarkeiten sich teilweise signifikant zwischen den Gruppen unterscheiden. Dies deutet darauf hin, dass mindestens ein anderer Faktor neben dem Attachmentverlust ausschlaggebend ist für den Erfolg oder Misserfolg der Therapie eines postendodontisch restaurierten Oberkiefer-Schneidezahns.

VII.2.1 Das Kronen-Wurzel-Verhältnis

Die Begriffe „effektive Wurzellänge“ (L_W) und „effektive Kronenlänge“ (L_K) wurden aus dem Englischen von GEGAUFF et al. übernommen und dienen in diesem Versuchsaufbau dazu, das Kronen-Wurzel-Verhältnis (R_{CR}) zu beschreiben (Gegauff, 2000).

Die Forschungsgruppe um MENG et al. ermittelte in ihren In-vitro-Studien einen Anstieg des Kronen-Wurzel-Verhältnisses durch eine chirurgische Kronenverlängerung von 0,75 auf 1,1, welches einem Anstieg von 46,7 % entspricht (Meng et al., 2009; Meng et al., 2007). Die Forschungsgruppe um GEGAUFF et al. ermittelte in ihrer In-vitro-Studie einen Anstieg des Kronen-Wurzel-Verhältnisses durch eine chirurgische Kronenverlängerung von 0,89 auf 1,28, welches einem Anstieg von 43,82 % entspricht (Gegauff, 2000). In der vorliegenden Studie steigt das Kronen-Wurzel-Verhältnis durch eine chirurgische Kronenverlängerung von 0,74 auf 1,03 an, welches einem Anstieg von 39,19 % entspricht. In allen Untersuchungen wurde eine 2 mm Reduktion des krestalen Knochens simuliert. Der prozentual geringere Anstieg des Kronen-Wurzel-Verhältnisses verglichen mit den zitierten Studien ist daher zu erklären, dass die Differenz der effektiven Wurzellänge zwischen der K- und der CKV-Gruppe nicht exakt 2 mm entspricht, sondern 1,74 mm.

GEGAUFF et al. weisen in ihrer Studie darauf hin, dass der ungünstige, weil rapidere Anstieg des Kronen-Wurzel-Verhältnisses durch die chirurgische Kronenverlängerung verringert werden kann, wenn eine forcierte Extrusion angewandt wird (Gegauff, 2000).

In ihrer Studie steigt durch die forcierte Extrusion das Kronen-Wurzel-Verhältnis von 0,89 auf 1,07 an, welches einem Anstieg von 20,22 % entspricht. In der vorliegenden Studie steigt das Kronen-Wurzel-Verhältnis durch die forcierte Extrusion von 0,74 auf 0,9 an, welches einem Anstieg von 21,62 % entspricht.

Die Ergebnisse dieser Studie belegen, dass bei gleichbleibender Okklusionsebene eine Reduktion der effektiven Wurzellänge durch eine Wurzelspitzenresektion oder forcierte Extrusion einen geringeren Effekt auf das Kronen-Wurzel-Verhältnis hat, als der Verlust von marginaler Knochenhöhe durch eine chirurgische Kronenverlängerung oder eine Parodontitis.

VII.2.2 Wurzelspitzenresektion und forcierte Extrusion

Zahnwurzeln haben im Regelfall eine konische Verlaufsform und somit eine kleinere Kontaktfläche im apikalen Anteil zum Parodontium. Während ein oberer permanenter Schneidezahn im zervikalen Wurzel Drittel eine große Attachmentfläche hat, steht dem apikalen Wurzelanteil nur noch eine 17%ige Kontaktfläche zum Parodontium zur Verfügung (Gu, Zhu, Tang, Zhang, & Feng, 2017). Entscheidend für eine hohe Überlebenswahrscheinlichkeit ist laut den Autoren das vorhandene Attachment im zervikalen Bereich des Zahns, da die größten Kräfte bei Kaubelastung hier auftreten, während das apikale Wurzel Drittel nur 10 % der Gesamtbelastung auffangen muss (Dejak, Mlotkowski, & Romanowicz, 2003). Dies deckt sich mit den Ergebnissen einer weiteren Studie, die die größten Zahnbelastungen in Form von Spannungen zervikal beschreibt und die geringsten im apikalen Drittel der Wurzel (Cho & Kim, 2013). Der biomechanische Einfluss einer Wurzelspitzenresektion auf einen postendodontisch restaurierten Zahn wird in der Literatur dabei kaum beleuchtet. Eine Finite-Elemente-Analyse kommt zu dem Schluss, dass eine apikale Reduktion der Wurzel um bis zu 3 mm nur einen geringen mechanischen Einfluss auf den Zahn hat, da der Großteil der Belastung zervikal am Zahn auftritt (Jang, Hong, Roh, & Chun, 2014).

Die aufgeführten Erkenntnisse aus der Literatur unterstützen die Ergebnisse der vorliegenden Studie, die der WSR-Gruppe (293 N) trotz der apikalen Reduktion der Wurzel vergleichbare Median-Bruchbelastungswerte attestiert wie der K- (252 N) und der FE-Gruppe (263 N).

In der vorliegenden Studie wurden keine statistisch signifikanten Unterschiede im Kronen-Wurzel-Verhältnis oder Querschnittsflächenprodukt zwischen der WSR- und FE-Gruppe festgestellt. Der tendenziell größere Median-Bruchbelastungswert für die WSR-Gruppe könnte dennoch durch das marginal bessere Kronen-Wurzel-Verhältnis und durch das größere Querschnittsflächenprodukt erklärt werden. Die Ergebnisse einer Finite-Elemente-Analyse von JANG, HONG, ROH & CHUN unterstützen diese Vermutung (Jang et al., 2014). Trotz identischer Kronen-Wurzel-Verhältnisse haben Zähne mit einer Wurzelspitzenresektion geringere interne Spannungen und Auslenkungen des Zahns bei Belastung, als die Zähne mit einem marginalen Knochenverlust. Erst eine Wurzelspitzenresektion ab 6 mm hatte einen signifikanten biomechanischen Einfluss auf den Zahn, jedoch war dieser Einfluss immer noch geringer als der biomechanische Einfluss durch eine Reduktion des krestalen Knochens um 2 mm.

MENG et al. untersuchten die Bruchbelastbarkeit von postendodontisch versorgten Unterkiefer-Prämolaren nach forcierter Extrusion (Meng et al., 2009). Die Proben hatten ein Kronen-Wurzel-Verhältnis von 0,9 und hielten Median-Bruchbelastungswerte von bis zu 1920 N aus, bis eine Fraktur eintrat. Ein Vergleich zu den vorliegenden Belastungswerten gestaltet sich trotz des identischen Kronen-Wurzel-Verhältnisses schwierig, da Unterschiede im Versuchsaufbau vorliegen. Folgend werden exemplarisch Unterschiede im Versuchsaufbau genannt: Es kamen Unterkiefer-Prämolaren anstelle von Oberkiefer-Schneidezähnen zum Einsatz, deren Aufbewahrungsmethode nach der Extraktion nicht beschrieben wird. Die postendodontische Restauration beinhaltete eine Edelmetallfreie-Krone und der Auftreffwinkel bei der Bruchbelastung betrug 150° Grad. Als weiterer maßgeblicher Unterschied ist die fehlende Alterung durch eine Kausimulation zu nennen. Wie bereits im Kapitel VII.1.9 (Kausimulation) beschrieben wurde, senkt die Kausimulation die Bruchbelastbarkeit einer Probe signifikant. Die aufgeführten Gründe können die große Differenz in der Bruchbelastbarkeit erklären.

Verglichen mit der K- und WSR-Gruppe, führte das Reduzieren der effektiven Wurzellänge auf zervikaler Höhe zu keiner signifikanten Reduktion in der Bruchbelastbarkeit in der FE-Gruppe.

VII.2.3 Chirurgische Kronenverlängerung

Die vorliegenden Ergebnisse dieser Studie zeigen auf, dass eine chirurgische Kronenverlängerung zu einer signifikant reduzierten Bruchbelastbarkeit von postendodontisch restaurierten Oberkiefer-Schneidezähnen führt. Der ausschlaggebende Faktor hierfür ist die zunehmende effektive Kronenlänge bei abnehmender effektiver Wurzellänge und das dadurch steigende Kronen-Wurzel-Verhältnis. Die Ergebnisse der Literaturrecherche spiegeln diese Erkenntnis wider:

Eine Finite-Elemente-Analyse beschreibt eine erhöhte Belastung im Wurzelkollagen, wenn eine Reduktion der alveolären Knochenhöhe simuliert wird (Roscoe et al., 2013). Es zeigt sich, dass eine Reduktion des Knochenkontakts zu einer geringeren Bruchbelastbarkeit des Zahns führt. Lag das krestale Knochniveau 6 mm unter der Schmelz-Zement-Grenze, war die Dentinbelastung 4- bis 10-mal höher als bei einem Knochniveau nahe der Schmelz-Zement-Grenze. Dies wird durch den zunehmenden koronalen Lastarm erklärt, während der radikuläre Kraftarm reduziert wird. Die Ergebnisse einer klinischen Langzeitstudie an 299 Patienten unterstützen diese Ergebnisse (Nyman & Lindhe, 1979). Hier frakturierten postendodontisch restaurierte Zähne im parodontal geschädigten Alveolarknochen häufiger als Zähne ohne parodontalen Knochenabbau. TADA et al. konnten in einer klinischen Studie zeigen, dass Pfeilerzähne für Prothesen eine schlechte Prognose besaßen, sobald das Kronen-Wurzel-Verhältnis anstieg (Tada et al., 2015). Während die Pfeilerzähne mit einem Kronen-Wurzel-Verhältnis zwischen 0,76-1 eine 7-Jahres Überlebensrate von 85,9 % und Pfeilerzähne mit einem Kronen-Wurzel-Verhältnis zwischen 1,01-1,25 von 86,5 % besaßen, sank bei einem Kronen-Wurzel-Verhältnis zwischen 1,26-1,5 die 7-Jahres Überlebensrate auf 76,9 % und bei einem Kronen-Wurzel-Verhältnis von über 1,51 auf 46,7 %. In der zitierten klinischen Studie wurden wurzelkanalgefüllte Zähne ebenso inkludiert wie vitale Zähne und auch Pfeiler mit oder ohne indirekten Restaurationen wurden inkludiert. Somit ist eine direkte Vergleichbarkeit mit den vorliegenden Ergebnissen nur erschwert möglich, jedoch ähnelt die Tendenz, dass ein Anstieg des Kronen-Wurzel-Verhältnisses einen negativen Effekt auf die Erfolgsrate eines Zahnes hat.

In der In-vitro-Studie von GEGAUFF et al. haben Proben mit einer chirurgischen Kronenverlängerung höhere Misserfolgsraten als die Proben ohne chirurgische Kronenverlängerung (Gegauff, 2000). Durch den Eingriff stieg das Kronen-Wurzel-Verhältnis der Proben um 43,82 % an und verringerte den Median-Bruchbelastungswert von 920 N auf 660 N (39,39 %). In der vorliegenden Studie verringerte sich ebenfalls der Median-Bruchbelastungswert durch die chirurgische Kronenverlängerung von 252 N auf 195 N (22,62 %). In beiden Studien ist die Tendenz zu geringeren Median-Bruchbelastbarkeiten zu erkennen, jedoch sollte kein direkter Vergleich der Werte stattfinden. In der Studie von GEGAUFF et al. wurden Unterkiefer-Prämolaren aus Kunststoff verwendet. Während die Proben mit der chirurgischen Kronenverlängerung eine 2 mm hohe Dentinmanschette für den Ferrule-Effekt erhielten, hatte die Vergleichsgruppe ohne chirurgische Kronenverlängerung keine Dentinmanschette. Ebenfalls unterschied sich die postendodontische Restauration durch die verwendeten Materialien. Als ausschlaggebender Punkt muss das Fehlen der Alterung durch eine Kausimulation genannt werden. Hier diskutieren die Autoren um GEGAUFF et al., dass durch diesen Umstand die Erfolgsrate für die Gruppe mit dem Ferrule-Effekt höchstwahrscheinlich höher ausgefallen wäre.

In der In-vitro-Studie von MENG et al. wurden Proben mit und ohne chirurgischer Kronenverlängerung Bruchbelastet (Meng et al., 2009). Durch den Eingriff stieg das Kronen-Wurzel-Verhältnis der Proben um 46,7 % an und es verringerte sich der Median-Bruchbelastungswert von 1130 N auf 1020 N (9,73 %). Die Ergebnisse der vorliegenden Studie und die Ergebnisse von MENG et al. zeigen eine Tendenz zu geringeren Median-Bruchbelastungswerten. Jedoch sollten, wie bereits zuvor erwähnt, die Ergebnisse aufgrund des unterschiedlichen Versuchsaufbaus nicht direkt miteinander verglichen werden.

In weiteren Studien werden ebenfalls verringerte Bruchbelastungswerte für Zähne aufgrund eines kompromittierten alveolären Lagers durch erhöhte Lockerungsgrade oder einen verringerten Knochen-Wurzel-Kontakt aufgezeigt (Naumann, Rosentritt, et al., 2006; Nyman & Lindhe, 1979; Sterzenbach et al., 2014). Zahlreiche Studien zeigen den Zusammenhang zwischen Attachmentverlust und einer erhöhten Misserfolgsrate auf. Die Autoren schlussfolgern, dass der höhere Misserfolg multifaktorielle Ursachen hat. Der abnehmende Wurzelquerschnitt wird ebenso genannt wie der Zahnhartsubstanzverlust durch die Präparation für den Ferrule-Effekt und ein gesteigertes Kronen-Wurzel-Verhältnis (Gegauff, 2000; Meng et al., 2009; Meng et al., 2007; Naumann, Rosentritt, et al., 2006).

In dieser vorliegenden Studie erhielten alle zahnbasierenden Gruppen die identische postendodontische Präparation sowie Restauration und besitzen ähnliche Wurzelquerschnittsflächen. Es bleibt somit als signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen das Kronen-Wurzel-Verhältnis zu nennen.

Zwischen R_{CR-WSR} und R_{CR-FE} liegt keine Signifikanz vor. Jedoch zwischen allen zahnbasierenden Gruppen und R_{CR-CKV} . Daher kann die These aufgestellt werden, dass der signifikant geringere Median-Bruchbelastungswert für die Gruppe CKV direkt mit dem größten Kronen-Wurzel-Verhältnis im Versuchsfeld zusammenhängt. Das um bis zu 28 % höhere Kronen-Wurzel-Verhältnis in der Gruppe CKV führt zu einer signifikant verminderten Bruchbelastbarkeit verglichen mit der K-, der WSR- und der FE-Gruppe, und zu der niedrigsten Median-Bruchbelastbarkeit in der gesamten Studie.

Aufgrund der Ergebnisse dieser Studie kann die Annahme formuliert werden, dass durch die Zunahme des Kronen-Wurzel-Verhältnisses die maximale Belastbarkeit eines postendodontisch restaurierten Oberkiefer-Schneidezahns abnimmt und das Misserfolgsrisiko ansteigt.

Die Ergebnisse der Literaturrecherche unterstützen die hier aufgeführte These, dass ein Kronen-Wurzel-Verhältnis über 1 zu höheren Misserfolgsraten führt als ein geringeres Kronen-Wurzel-Verhältnis (Avila et al., 2009; Gegauff, 2000; Meng et al., 2009; Meng et al., 2007; Tada et al., 2015; Tada et al., 2013).

VII.2.4 Implantate

Bei der Durchsicht der Literatur fiel auf, dass es bisher keine evidenten Daten bezüglich der direkten Vergleichbarkeit zwischen Implantatversorgungen und postendodontisch restaurierten Oberkiefer-Schneidezähnen mit variierenden Kronen-Wurzel-Verhältnissen vorliegen. In einer Literaturübersicht, die unter anderem Kronen auf wurzelkanalbehandelten Zähnen und Implantatkronen als Therapiealternativen vergleicht, werden nur Ergebnisse verschiedener Studien gesammelt und indirekt miteinander verglichen (Torabinejad et al., 2007). Hier schlussfolgern die Autoren, dass durch unterschiedliche und nicht standardisierte Untersuchungsmethoden die Empfehlung für oder gegen eine Therapieform wenn überhaupt nur sehr vorsichtig gegeben werden kann.

Implantatversorgungen nehmen weltweit stetig zu und werden prospektiv gesehen keinen Rückgang erleben. Es erschien daher sinnvoll, zusätzlich zu der Frage nach dem Einfluss des Kronen-Wurzel-Verhältnisses auf die maximale Belastbarkeit postendodontisch restaurierter Oberkiefer-Schneidezähne die Frage zu klären, wie sich im gleichen Versuchsaufbau Implantatversorgungen als Alternativtherapie verhalten.

Es bleibt eine komplexe Entscheidung, zwischen einem kompromittierten, aber wiederversorgbaren Zahn und einem sogenannten „hoffnungslosen“ Zahn zu unterscheiden (Iqbal & Kim, 2008). Ausschlaggebende Faktoren sind laut Literatur die in der Einleitung erwähnten prognosebestimmenden Faktoren sowie die prothetische Versorgung, die Knochenqualität, ästhetische Ansprüche, das Kosten-Nutzen-Verhältnis, systemische Einflussfaktoren und der Patientenwunsch (Iqbal & Kim, 2008). Faktoren wie der medizinische Fortschritt (Maeda & Imaishi, 2007) und die Expertise des Behandlers (Barone et al., 2016) spielen eine ebenso wichtige Rolle in der Entscheidungsfindung wie die finanziellen Mittel des Patienten.

Es wird auch angeführt, dass ein direkter Vergleich beider Therapieformen nicht stattfinden sollte, da Implantate fehlende Zähne ersetzen und nicht einen vorhandenen Zahn als solches (Zitzmann, Krastl, Hecker, Walter, & Weiger, 2009). In der Literatur wird die Implantatversorgung als letzte Alternative eingestuft, wenn die Wurzelkanalbehandlung, die Wurzelkanalrevision und die Wurzelspitzenresektion erfolglos bleiben (Pennington et al., 2009).

Kritische Studien weisen darauf hin, dass die Überlebens- und Erfolgsraten von Implantaten klinisch nicht immer die hohen Werte erreichen wie in der Literatur angegeben (Setzer & Kim, 2014). Manche Studien verwenden Studiendesigns, die wichtige Aspekte wie das ästhetische Endergebnis, das physiologische Weichgewebsmanagement oder die Patientenzufriedenheit außer Betracht lassen (den Hartog, Slater, Vissink, Meijer, & Raghoobar, 2008).

Wie in der Einleitung beschrieben, tritt während der Gebrauchsphase der Implantatversorgung ein hoher Anteil an technischen Komplikationen auf. Diese These wird durch die vorliegende Studie unterstützt, da in diesem Versuchsaufbau bei zwei Proben während der Kausimulation technische Defekte auftraten. Die Reparatur von defekten Bestandteilen führt allerdings zu höheren Kosten und zusätzlicher Behandlungszeit, was das Kosten-Nutzen-Verhältnis von Implantatversorgungen negativ beeinflusst (Pennington et al., 2009).

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit attestieren der Implantatversorgung die höchste Belastbarkeit im Testfeld. Dies deckt sich mit den Werten anderer wissenschaftlicher Studien, die Lithiumdisilikatrestaurationen auf Implantaten hohe maximale Belastbarkeit bestätigen (Alkharrat, Schmitter, Rues, & Rammelsberg, 2018; Roberts, Bailey, Ashcraft-Olmscheid, & Vandewalle, 2018; Rosentritt, Hahnel, Engelhardt, Behr, & Preis, 2017).

Der Promovend ist der Meinung, dass die Therapie von stark zerstörten Zähnen immer vor einer Implantation in Betracht gezogen werden sollte. Durch moderne zahnerhaltende Maßnahmen sind erfolversprechende Resultate möglich. Eine Implantatversorgung hat die aufgeführten Misserfolgsrisiken und sollte nur als Alternative gesehen werden, wenn ein extraktionswürdiger Zahn vorliegt. Die Extraktionswürdigkeit eines Zahns kann mithilfe der aufgeführten prognosebestimmenden Faktoren, sowie der hier vorliegenden Ergebnisse getroffen werden.

VII.2.5 Frakturmusteranalyse

Wie in den Frakturmusteranalysen anderer wissenschaftlicher Veröffentlichungen üblich, wird auch in dieser Studie zwischen einer restaurierbaren Fraktur, bei dem der Zahn wiederversorgbar ist, und einer infausten Fraktur, bei dem der Zahn durch eine zu große

Zerstörung nicht mehr wiederversorgbar ist, unterschieden (Naumann, Preuss, & Rosentritt, 2006; Naumann, Sterzenbach, & Proschel, 2005).

Ein direkter Vergleich der Frakturmuster mit den Ergebnissen ähnlicher Studien erscheint nicht sinnvoll. Die Proben unterscheiden sich unter anderem durch ihre postendodontische Restauration, den Zahntypen und durch die fehlende Kausimulation (Gegauff, 2000; Meng et al., 2009; Meng et al., 2007).

Ein frakturierter Zahn kann durch eine chirurgische Kronenverlängerung oder eine forcierte Extrusion wiederversorgbar gestaltet werden. Da jedoch diese Eingriffe hier bereits stattgefunden haben, wurde in der vorliegenden Studie die Fraktur im oberen Wurzeldrittel als infaust eingestuft. Dies betrifft ebenfalls die wurzelspitzenresizierten Zähne, da auch hier eine erneute Manipulation am Kronen-Wurzel-Verhältnis dieses so weit ansteigen lassen würde, dass sich eine erneute Restauration nicht lohnt. Eine Dezementierung der Krone oder des Wurzelstifts ist durch erneutes Einsetzen oder Neuanfertigung klinisch möglich und wurde aus diesem Grund als wiederversorgbar eingestuft.

In allen zahnbasierenden Gruppen traten wiederversorgbare sowie infauste Frakturen auf. In den zahnbasierenden Gruppen trat in der WSR-Gruppe signifikant häufig die mittlere Wurzelfraktur auf. Dies kann damit erklärt werden, dass in dieser Gruppe die höchsten Belastungen auftraten, die zu einer Wurzelfraktur führten. Ein Vergleich der Frakturmuster der zahnbasierenden Gruppen zur IMPL-Gruppe erscheint indessen nicht sinnvoll, da die Implantatversorgung naturgemäß eine andere Versorgungsform ist.

Die Frakturmusteranalyse der IMPL-Gruppe zeigte signifikant häufig auftretende Frakturen des Implantataufbaus. Makroskopisch war kein Defekt oder eine Verformung an der Titan-Klebebasis oder am Implantat zu erkennen. In der Literatur wird als technische Komplikation von einer Schrauben- und Abutmentlockerung berichtet; dies konnte in diesem Versuchsaufbau jedoch nicht beobachtet werden (Jung et al., 2008; Pjetursson et al., 2007; Sailer et al., 2012). Die mit 35 Ncm festgezogenen Implantatschrauben benötigten zum Lösen ebenfalls mindestens 35 Ncm.

VIII. Schlussfolgerungen

Betrachtet man die Forschungsziele und berücksichtigt die Limitationen, die eine In-vitro-Studie mit sich bringt, sind folgende Ergebnisse zusammenfassbar:

1. Die chirurgische Kronenverlängerung als präprothetische Maßnahme hat den negativsten Einfluss auf das Kronen-Wurzel-Verhältnis und sollte vor Durchführung sorgfältig eruiert werden.

Um die biologische Breite und einen Ferrule-Effekt herzustellen, ist eine forcierte Extrusion gegenüber einer chirurgischen Kronenverlängerung vorteilhaft, da sie das Kronen-Wurzel-Verhältnis in geringerem Maße beeinflusst.

Jede präprothetische Maßnahme, die die effektive Wurzellänge und/oder die effektive Kronenlänge manipuliert, hat einen Einfluss auf das Kronen-Wurzel-Verhältnis.

Eine Wurzelspitzenresektion hat nur einen geringen Effekt auf die biomechanischen Eigenschaften eines Zahns.

Ist die effektive Wurzellänge kleiner als die effektive Kronenlänge, steigt das Kronen-Wurzel-Verhältnis auf über 1 an ($R_{CR} > 1$). Hierdurch nimmt die maximale Belastbarkeit von postendodontisch restaurierten Oberkiefer-Schneidezähnen signifikant ab.

Somit wird die erste Nullhypothese widerlegt.

2. Eine Manipulation am Kronen-Wurzel-Verhältnis führte in der WSR-Gruppe zu signifikant häufigeren Frakturen im mittleren Wurzeldrittel.

Somit wird die zweite Nullhypothese widerlegt.

3. Implantatversorgungen hielten signifikant höheren Belastungswerten im Testfeld stand, bis eine Fraktur eintraf.

Somit wird die dritte Nullhypothese widerlegt.

IX. Literaturverzeichnis

- Abduljawad, M., Samran, A., Kadour, J., Karzoun, W., & Kern, M. (2017). Effect of fiber posts on the fracture resistance of maxillary central incisors with Class III restorations: An in vitro study. *J Prosthet Dent*, 118(1), 55-60. doi:10.1016/j.prosdent.2016.09.013
- Adolphi, G., Zehnder, M., Bachmann, L. M., & Gohring, T. N. (2007). Direct resin composite restorations in vital versus root-filled posterior teeth: a controlled comparative long-term follow-up. *Oper Dent*, 32(5), 437-442. doi:10.2341/06-147
- Akkayan, B. (2004). An in vitro study evaluating the effect of ferrule length on fracture resistance of endodontically treated teeth restored with fiber-reinforced and zirconia dowel systems. *J Prosthet Dent*, 92(2), 155-162. doi:10.1016/S0022391304002768
- Alkharrat, A. R., Schmitter, M., Rues, S., & Rammelsberg, P. (2018). Fracture behavior of all-ceramic, implant-supported, and tooth-implant-supported fixed dental prostheses. *Clin Oral Investig*, 22(4), 1663-1673. doi:10.1007/s00784-017-2233-9
- Amato, F., Mirabella, A. D., Macca, U., & Tarnow, D. P. (2012). Implant site development by orthodontic forced extraction: a preliminary study. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 27(2), 411-420.
- Aquilino, S. A., & Caplan, D. J. (2002). Relationship between crown placement and the survival of endodontically treated teeth. *J Prosthet Dent*, 87(3), 256-263.
- Asmussen, E., Peutzfeldt, A., & Heitmann, T. (1999). Stiffness, elastic limit, and strength of newer types of endodontic posts. *J Dent*, 27(4), 275-278.
- Atieh, M. A., Alsabeeha, N. H., Faggion, C. M., Jr., & Duncan, W. J. (2013). The frequency of peri-implant diseases: a systematic review and meta-analysis. *J Periodontol*, 84(11), 1586-1598. doi:10.1902/jop.2012.120592
- Aurelio, I. L., Fraga, S., Rippe, M. P., & Valandro, L. F. (2015). Are posts necessary for the restoration of root filled teeth with limited tissue loss? A structured review of laboratory and clinical studies. *Int Endod J*. doi:10.1111/iej.12538
- Avila, G., Galindo-Moreno, P., Soehren, S., Misch, C. E., Morelli, T., & Wang, H. L. (2009). A novel decision-making process for tooth retention or extraction. *J Periodontol*, 80(3), 476-491. doi:10.1902/jop.2009.080454
- Baba, N. Z., Golden, G., & Goodacre, C. J. (2009). Nonmetallic prefabricated dowels: a review of compositions, properties, laboratory, and clinical test results. *J Prosthodont*, 18(6), 527-536. doi:10.1111/j.1532-849X.2009.00464.x
- Bader, J. D., Rozier, R. G., McFall, W. T., Jr., & Ramsey, D. L. (1991). Effect of crown margins on periodontal conditions in regularly attending patients. *J Prosthet Dent*, 65(1), 75-79.
- Barkhordar, R. A., Radke, R., & Abbasi, J. (1989). Effect of metal collars on resistance of endodontically treated teeth to root fracture. *J Prosthet Dent*, 61(6), 676-678.
- Barone, A., Toti, P., Marconcini, S., Derchi, G., Saverio, M., & Covani, U. (2016). Esthetic Outcome of Implants Placed in Fresh Extraction Sockets by Clinicians with or without Experience: A Medium-Term Retrospective Evaluation. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 31(6), 1397-1406. doi:10.11607/jomi.4646
- Batenhorst, K. F., Bowers, G. M., & Williams, J. E., Jr. (1974). Tissue changes resulting from facial tipping and extrusion of incisors in monkeys. *J Periodontol*, 45(9), 660-668. doi:10.1902/jop.1974.45.9.660
- Beech, D. R., Tyas, M. J., & Solomon, A. (1991). Bond strength of restorative materials to human dentin: influence of post-extraction time. *Dent Mater*, 7(1), 15-17.

- Bergman, B., Lundquist, P., Sjogren, U., & Sundquist, G. (1989). Restorative and endodontic results after treatment with cast posts and cores. *J Prosthet Dent*, 61(1), 10-15.
- Bitter, K., Aschendorff, L., Neumann, K., Blunck, U., & Sterzenbach, G. (2014). Do chlorhexidine and ethanol improve bond strength and durability of adhesion of fiber posts inside the root canal? *Clin Oral Investig*, 18(3), 927-934. doi:10.1007/s00784-013-1040-1
- Bitter, K., Noetzel, J., Stamm, O., Vaudt, J., Meyer-Lueckel, H., Neumann, K., & Kielbassa, A. M. (2009). Randomized clinical trial comparing the effects of post placement on failure rate of postendodontic restorations: preliminary results of a mean period of 32 months. *J Endod*, 35(11), 1477-1482. doi:10.1016/j.joen.2009.07.026
- Blunck, U., Knitter, K., & Jahn, K. R. (2007). Six-month clinical evaluation of XP BOND in noncarious cervical lesions. *J Adhes Dent*, 9 Suppl 2, 265-268.
- Bragger, U., Lauchenauer, D., & Lang, N. P. (1992). Surgical lengthening of the clinical crown. *J Clin Periodontol*, 19(1), 58-63.
- Branemark, P. I., Adell, R., Breine, U., Hansson, B. O., Lindstrom, J., & Ohlsson, A. (1969). Intra-osseous anchorage of dental prostheses. I. Experimental studies. *Scand J Plast Reconstr Surg*, 3(2), 81-100.
- Brindis, M. A., & Block, M. S. (2009). Orthodontic tooth extrusion to enhance soft tissue implant esthetics. *J Oral Maxillofac Surg*, 67(11 Suppl), 49-59. doi:10.1016/j.joms.2009.07.013
- Burke, F. J., & Lucarotti, P. S. (2009). Ten-year outcome of crowns placed within the General Dental Services in England and Wales. *J Dent*, 37(1), 12-24. doi:10.1016/j.jdent.2008.03.017
- Buser, D., Chappuis, V., Belser, U. C., & Chen, S. (2017). Implant placement post extraction in esthetic single tooth sites: when immediate, when early, when late? *Periodontol 2000*, 73(1), 84-102. doi:10.1111/prd.12170
- Buskin, R., Castellon, P., & Hochstedler, J. L. (2000). Orthodontic extrusion and orthodontic extraction in preprosthetic treatment using implant therapy. *Pract Periodontics Aesthet Dent*, 12(2), 213-219; quiz 220.
- Butz, F., Lennon, A. M., Heydecke, G., & Strub, J. R. (2001). Survival rate and fracture strength of endodontically treated maxillary incisors with moderate defects restored with different post-and-core systems: an in vitro study. *Int J Prosthodont*, 14(1), 58-64.
- Caliskan, M. K., Turkun, M., & Gomel, M. (1999). Surgical extrusion of crown-root-fractured teeth: a clinical review. *Int Endod J*, 32(2), 146-151.
- Caplan, D. J., Kolker, J., Rivera, E. M., & Walton, R. E. (2002). Relationship between number of proximal contacts and survival of root canal treated teeth. *Int Endod J*, 35(2), 193-199.
- Carvalho, C. V., Bauer, F. P., Romito, G. A., Pannuti, C. M., & De Micheli, G. (2006). Orthodontic extrusion with or without circumferential supracrestal fiberotomy and root planing. *Int J Periodontics Restorative Dent*, 26(1), 87-93.
- Castro, J. C., Poi, W. R., Manfrin, T. M., & Zina, L. G. (2005). Analysis of the crown fractures and crown-root fractures due to dental trauma assisted by the Integrated Clinic from 1992 to 2002. *Dent Traumatol*, 21(3), 121-126. doi:10.1111/j.1600-9657.2005.00276.x
- Caton, J. G., Armitage, G., Berglundh, T., Chapple, I. L. C., Jepsen, S., Kornman, K. S., . . . Tonetti, M. S. (2018). A new classification scheme for periodontal and peri-

- implant diseases and conditions - Introduction and key changes from the 1999 classification. *J Periodontol*, 89 Suppl 1, S1-S8. doi:10.1002/JPER.18-0157
- Chen, S. T., & Buser, D. (2014). Esthetic outcomes following immediate and early implant placement in the anterior maxilla--a systematic review. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 29 Suppl, 186-215. doi:10.11607/jomi.2014suppl.g3.3
- Chiapasco, M., Casentini, P., & Zaniboni, M. (2014). Implants in reconstructed bone: a comparative study on the outcome of Straumann(R) tissue level and bone level implants placed in vertically deficient alveolar ridges treated by means of autogenous onlay bone grafts. *Clin Implant Dent Relat Res*, 16(1), 32-50. doi:10.1111/j.1708-8208.2012.00457.x
- Cho, S. Y., & Kim, E. (2013). Does apical root resection in endodontic microsurgery jeopardize the prosthodontic prognosis? *Restor Dent Endod*, 38(2), 59-64. doi:10.5395/rde.2013.38.2.59
- Coca, I., & Schwickerath, H. (1987). [Stress distribution in crowns in the anterior region]. *Dtsch Zahnarztl Z*, 42(4), 338-341.
- Dejak, B., Mlotkowski, A., & Romanowicz, M. (2003). Finite element analysis of stresses in molars during clenching and mastication. *J Prosthet Dent*, 90(6), 591-597. doi:10.1016/S0022391303005900
- Demarco, F. F., Collares, K., Coelho-de-Souza, F. H., Correa, M. B., Cenci, M. S., Moraes, R. R., & Opdam, N. J. (2015). Anterior composite restorations: A systematic review on long-term survival and reasons for failure. *Dent Mater*, 31(10), 1214-1224. doi:10.1016/j.dental.2015.07.005
- den Hartog, L., Slater, J. J., Vissink, A., Meijer, H. J., & Raghoobar, G. M. (2008). Treatment outcome of immediate, early and conventional single-tooth implants in the aesthetic zone: a systematic review to survival, bone level, soft-tissue, aesthetics and patient satisfaction. *J Clin Periodontol*, 35(12), 1073-1086. doi:10.1111/j.1600-051X.2008.01330.x
- Drummond, J. L., Toepke, T. R., & King, T. J. (1999). Thermal and cyclic loading of endodontic posts. *Eur J Oral Sci*, 107(3), 220-224.
- Edelhoff, D., & Brix, O. (2011). All-ceramic restorations in different indications: a case series. *J Am Dent Assoc*, 142 Suppl 2, 14S-19S.
- Edelhoff, D., & Sorensen, J. A. (2002). Tooth structure removal associated with various preparation designs for anterior teeth. *J Prosthet Dent*, 87(5), 503-509.
- Elemam, R. F., & Pretty, I. (2011). Comparison of the success rate of endodontic treatment and implant treatment. *ISRN Dent*, 2011, 640509. doi:10.5402/2011/640509
- Elkhadem, A., Mickan, S., & Richards, D. (2014). Adverse events of surgical extrusion in treatment for crown-root and cervical root fractures: a systematic review of case series/reports. *Dent Traumatol*, 30(1), 1-14. doi:10.1111/edt.12051
- Esposito, M., Hirsch, J. M., Lekholm, U., & Thomsen, P. (1998). Biological factors contributing to failures of osseointegrated oral implants. (I). Success criteria and epidemiology. *Eur J Oral Sci*, 106(1), 527-551.
- Fakhry, A. (2007). Enhancing restorative, periodontal, and esthetic outcomes through orthodontic extrusion. *Eur J Esthet Dent*, 2(3), 312-320.
- Ferrari, M., Cagidiaco, M. C., Grandini, S., De Sanctis, M., & Goracci, C. (2007). Post placement affects survival of endodontically treated premolars. *J Dent Res*, 86(8), 729-734. doi:10.1177/154405910708600808
- Ferrari, M., Vichi, A., & Grandini, S. (2001). Efficacy of different adhesive techniques on bonding to root canal walls: an SEM investigation. *Dent Mater*, 17(5), 422-429.

- Freno, J. P., Jr. (1998). Guidelines for using posts in the restoration of endodontically treated teeth. *Gen Dent*, 46(5), 474-479; quiz 481-472.
- Gargiulo, A. W., Wentz, F. M., & Orban, B. (1961). Dimensions and Relations of the Dentogingival Junction in Humans. *Journal of Periodontology*, 32(3), 261-267. doi:10.1902/jop.1961.32.3.261
- Gegauff, A. G. (2000). Effect of crown lengthening and ferrule placement on static load failure of cemented cast post-cores and crowns. *J Prosthet Dent*, 84(2), 169-179. doi:10.1067/mpr.2000.107583
- Glantz, P. O., & Nilner, K. (1994). The devitalized tooth as an abutment in dentitions with a reduced but healthy periodontium. *Periodontol 2000*, 4, 52-57.
- Goodacre, C. J., & Spolnik, K. J. (1994). The prosthodontic management of endodontically treated teeth: a literature review. Part I. Success and failure data, treatment concepts. *J Prosthodont*, 3(4), 243-250.
- Goodacre, C. J., & Spolnik, K. J. (1995). The prosthodontic management of endodontically treated teeth: a literature review. Part II. Maintaining the apical seal. *J Prosthodont*, 4(1), 51-53.
- Goracci, C., & Ferrari, M. (2011). Current perspectives on post systems: a literature review. *Aust Dent J*, 56 Suppl 1, 77-83. doi:10.1111/j.1834-7819.2010.01298.x
- Grossmann, Y., & Sadan, A. (2005). The prosthodontic concept of crown-to-root ratio: a review of the literature. *J Prosthet Dent*, 93(6), 559-562. doi:10.1016/j.prosdent.2005.03.006
- Gu, Y., Zhu, Q., Tang, Y., Zhang, Y., & Feng, X. (2017). Measurement of root surface area of permanent teeth in a Chinese population. *Arch Oral Biol*, 81, 26-30. doi:10.1016/j.archoralbio.2017.04.015
- Hammerle, C. H. F., & Tarnow, D. (2018). The etiology of hard- and soft-tissue deficiencies at dental implants: A narrative review. *J Periodontol*, 89 Suppl 1, S291-S303. doi:10.1002/JPER.16-0810
- Hayakawa, T., Horie, K., Aida, M., Kanaya, H., Kobayashi, T., & Murata, Y. (1992). The influence of surface conditions and silane agents on the bond of resin to dental porcelain. *Dent Mater*, 8(4), 238-240.
- Hempton, T. J., & Dominici, J. T. (2010). Contemporary crown-lengthening therapy: a review. *J Am Dent Assoc*, 141(6), 647-655.
- Heydecke, G., Butz, F., & Strub, J. R. (2001). Fracture strength and survival rate of endodontically treated maxillary incisors with approximal cavities after restoration with different post and core systems: an in-vitro study. *J Dent*, 29(6), 427-433.
- Heydecke, G., & Peters, M. C. (2002). The restoration of endodontically treated, single-rooted teeth with cast or direct posts and cores: a systematic review. *J Prosthet Dent*, 87(4), 380-386.
- Hulsmann, M., Rummelin, C., & Schafers, F. (1997). Root canal cleanliness after preparation with different endodontic handpieces and hand instruments: a comparative SEM investigation. *J Endod*, 23(5), 301-306. doi:10.1016/S0099-2399(97)80410-4
- Hülsmann, M., & Schäfer, E. (2005). "Good clinical practice": Die Wurzelkanalbehandlung. *DZZ*, 60, 418-420.
- Imfeld, T. N. (1991). Prevalence and quality of endodontic treatment in an elderly urban population of Switzerland. *J Endod*, 17(12), 604-607.
- Ingber, J. S. (1974). Forced eruption. I. A method of treating isolated one and two wall infrabony osseous defects-rationale and case report. *J Periodontol*, 45(4), 199-206. doi:10.1902/jop.1974.45.4.199

- Institut-der-Deutschen-Zahnärzte. (2016). *Fünfte Deutsche Mundgesundheitsstudie (DMS V)* (Vol. 35). Köln: Deutscher Zahnärzte Verlag DÄV
- Iqbal, M. K., Johansson, A. A., Akeel, R. F., Bergenholtz, A., & Omar, R. (2003). A retrospective analysis of factors associated with the periapical status of restored, endodontically treated teeth. *Int J Prosthodont*, *16*(1), 31-38.
- Iqbal, M. K., & Kim, S. (2008). A review of factors influencing treatment planning decisions of single-tooth implants versus preserving natural teeth with nonsurgical endodontic therapy. *J Endod*, *34*(5), 519-529. doi:10.1016/j.joen.2008.01.002
- Jang, Y., Hong, H. T., Roh, B. D., & Chun, H. J. (2014). Influence of apical root resection on the biomechanical response of a single-rooted tooth: a 3-dimensional finite element analysis. *J Endod*, *40*(9), 1489-1493. doi:10.1016/j.joen.2014.03.006
- Jayasenthil, A., Solomon-Sathish, E., Venkatalakshmi-Aparna, P., & Balagopal, S. (2016). Fracture resistance of tooth restored with four glass fiber post systems of varying surface geometries-An in vitro study. *J Clin Exp Dent*, *8*(1), e44-48. doi:10.4317/jced.52491
- Jepsen, A. (1963). Root surface measurement and a method for x-ray determination of root surface area. *Acta Odontol Scand*, *21*, 35-46.
- Jones, J. C., Grieve, A. R., & Harrington, E. (1979). A machine for thermal cycling in the investigation of marginal leakage. Its development and use. *Br Dent J*, *146*(7), 207-211.
- Juloski, J., Radovic, I., Goracci, C., Vulicevic, Z. R., & Ferrari, M. (2012). Ferrule effect: a literature review. *J Endod*, *38*(1), 11-19. doi:10.1016/j.joen.2011.09.024
- Jung, R. E., Pjetursson, B. E., Glauser, R., Zembic, A., Zwahlen, M., & Lang, N. P. (2008). A systematic review of the 5-year survival and complication rates of implant-supported single crowns. *Clin Oral Implants Res*, *19*(2), 119-130. doi:10.1111/j.1600-0501.2007.01453.x
- Kabak, Y., & Abbott, P. V. (2005). Prevalence of apical periodontitis and the quality of endodontic treatment in an adult Belarusian population. *Int Endod J*, *38*(4), 238-245. doi:10.1111/j.1365-2591.2005.00942.x
- King, P. A., & Setchell, D. J. (1990). An in vitro evaluation of a prototype CFRC prefabricated post developed for the restoration of pulpless teeth. *J Oral Rehabil*, *17*(6), 599-609.
- Krejci, I., Reich, T., Lutz, F., & Albertoni, M. (1990). [An in vitro test procedure for evaluating dental restoration systems. 1. A computer-controlled mastication simulator]. *Schweiz Monatsschr Zahnmed*, *100*(8), 953-960.
- Lang, H., Korkmaz, Y., Schneider, K., & Raab, W. H. (2006). Impact of endodontic treatments on the rigidity of the root. *J Dent Res*, *85*(4), 364-368. doi:10.1177/154405910608500416
- Laurell, L., & Lundgren, D. (2011). Marginal bone level changes at dental implants after 5 years in function: a meta-analysis. *Clin Implant Dent Relat Res*, *13*(1), 19-28. doi:10.1111/j.1708-8208.2009.00182.x
- Lin, L. M., Skribner, J. E., & Gaengler, P. (1992). Factors associated with endodontic treatment failures. *J Endod*, *18*(12), 625-627. doi:10.1016/S0099-2399(06)81335-X
- Lyann, S. K., Takagaki, T., Nikaido, T., Uo, M., Ikeda, M., Sadr, A., & Tagami, J. (2018). Effect of Different Surface Treatments on the Tensile Bond Strength to Lithium Disilicate Glass Ceramics. *J Adhes Dent*, *20*(3), 261-268. doi:10.3290/j.jad.a40632

- Maeda, Y., & Imaishi, K. (2007). Impact of osseointegrated implants on the selection of treatment options in relation to tooth extraction: comparison between 1995 and 2005. *Int J Prosthodont*, 20(4), 402-404.
- Magne, P., & Douglas, W. H. (2000). Cumulative effects of successive restorative procedures on anterior crown flexure: intact versus veneered incisors. *Quintessence Int*, 31(1), 5-18.
- Mallineni, S. K., Nuvvula, S., Matinlinna, J. P., Yiu, C. K., & King, N. M. (2013). Biocompatibility of various dental materials in contemporary dentistry: a narrative insight. *J Investig Clin Dent*, 4(1), 9-19. doi:10.1111/j.2041-1626.2012.00140.x
- Malmgren, O., Malmgren, B., & Frykholm, A. (1991). Rapid orthodontic extrusion of crown root and cervical root fractured teeth. *Endod Dent Traumatol*, 7(2), 49-54.
- Mamoun, J. (2017). Post and core build-ups in crown and bridge abutments: Bio-mechanical advantages and disadvantages. *J Adv Prosthodont*, 9(3), 232-237. doi:10.4047/jap.2017.9.3.232
- Mancebo, J. C., Jimenez-Castellanos, E., & Canadas, D. (2010). Effect of tooth type and ferrule on the survival of pulpless teeth restored with fiber posts: a 3-year clinical study. *Am J Dent*, 23(6), 351-356.
- Manhart, J., & Trumm, C. (2010). Marginal adaptation of an etch-and-rinse adhesive with a new type of solvent in class II cavities after artificial aging. *Clin Oral Investig*, 14(6), 699-705. doi:10.1007/s00784-009-0353-6
- Marigo, L., C, D. A., F, D. E. A., Cordaro, M., Vadini, M., & Lajolo, C. (2017). Evaluation of in vitro push-out bond strengths of different post-luting systems after artificial aging. *Minerva Stomatol*, 66(1), 20-27. doi:10.23736/S0926-4970.16.03969-2
- McGuire, M. K., & Nunn, M. E. (1996). Prognosis versus actual outcome. III. The effectiveness of clinical parameters in accurately predicting tooth survival. *J Periodontol*, 67(7), 666-674. doi:10.1902/jop.1996.67.7.666
- McLean, A. (1998). Predictably restoring endodontically treated teeth. *J Can Dent Assoc*, 64(11), 782-787.
- Meeuwissen, R., & Eschen, S. (1983). Twenty years of endodontic treatment. *J Endod*, 9(9), 390-393. doi:10.1016/S0099-2399(83)80192-7
- Meng, Q. F., Chen, L. J., Meng, J., Chen, Y. M., Smales, R. J., & Yip, K. H. (2009). Fracture resistance after simulated crown lengthening and forced tooth eruption of endodontically-treated teeth restored with a fiber post-and-core system. *Am J Dent*, 22(3), 147-150.
- Meng, Q. F., Chen, Y. M., Guang, H. B., Yip, K. H., & Smales, R. J. (2007). Effect of a ferrule and increased clinical crown length on the in vitro fracture resistance of premolars restored using two dowel-and-core systems. *Oper Dent*, 32(6), 595-601. doi:10.2341/06-169
- Mohammadi, Z. (2008). Sodium hypochlorite in endodontics: an update review. *Int Dent J*, 58(6), 329-341.
- Nakamura, T., Ohyama, T., Waki, T., Kinuta, S., Wakabayashi, K., Mutobe, Y., . . . Yatani, H. (2006). Stress analysis of endodontically treated anterior teeth restored with different types of post material. *Dent Mater J*, 25(1), 145-150.
- Naumann, M., Blankenstein, F., & Barthel, C. R. (2006). A new approach to define defect extensions of endodontically treated teeth: inter- and intra-examiner reliability. *J Oral Rehabil*, 33(1), 52-58. doi:10.1111/j.1365-2842.2006.01530.x
- Naumann, M., Koelplin, M., Beuer, F., & Meyer-Lueckel, H. (2012). 10-year survival evaluation for glass-fiber-supported postendodontic restoration: a prospective

- observational clinical study. *J Endod*, 38(4), 432-435. doi:10.1016/j.joen.2012.01.003
- Naumann, M., Metzdorf, G., Fokkinga, W., Watzke, R., Sterzenbach, G., Bayne, S., & Rosentritt, M. (2009). Influence of test parameters on in vitro fracture resistance of post-endodontic restorations: a structured review. *J Oral Rehabil*, 36(4), 299-312. doi:10.1111/j.1365-2842.2009.01940.x
- Naumann, M., Preuss, A., & Frankenberger, R. (2006). Load capability of excessively flared teeth restored with fiber-reinforced composite posts and all-ceramic crowns. *Oper Dent*, 31(6), 699-704. doi:10.2341/05-142
- Naumann, M., Preuss, A., & Frankenberger, R. (2007). Reinforcement effect of adhesively luted fiber reinforced composite versus titanium posts. *Dent Mater*, 23(2), 138-144. doi:10.1016/j.dental.2006.01.002
- Naumann, M., Preuss, A., & Rosentritt, M. (2006). Effect of incomplete crown ferrules on load capacity of endodontically treated maxillary incisors restored with fiber posts, composite build-ups, and all-ceramic crowns: an in vitro evaluation after chewing simulation. *Acta Odontol Scand*, 64(1), 31-36. doi:10.1080/00016350500331120
- Naumann, M., Rosentritt, M., Preuss, A., & Dietrich, T. (2006). The effect of alveolar bone loss on the load capability of restored endodontically treated teeth: a comparative in vitro study. *J Dent*, 34(10), 790-795. doi:10.1016/j.jdent.2006.03.003
- Naumann, M., Schmitter, M., & Krastl, G. (2018). Postendodontic Restoration: Endodontic Post-and-Core or No Post At All? *J Adhes Dent*, 20(1), 19-24. doi:10.3290/j.jad.a39961
- Naumann, M., Sterzenbach, G., & Proschel, P. (2005). Evaluation of load testing of postendodontic restorations in vitro: linear compressive loading, gradual cycling loading and chewing simulation. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*, 74(2), 829-834. doi:10.1002/jbm.b.30321
- Naumann, M., Sterzenbach, G., Rosentritt, M., Beuer, F., & Frankenberger, R. (2008). Is adhesive cementation of endodontic posts necessary? *J Endod*, 34(8), 1006-1010. doi:10.1016/j.joen.2008.05.010
- Nethravathy, R., Vinoth, S. K., & Thomas, A. V. (2013). Three different surgical techniques of crown lengthening: A comparative study. *J Pharm Bioallied Sci*, 5(Suppl 1), S14-16. doi:10.4103/0975-7406.113281
- Newcomb, G. M. (1974). The relationship between the location of subgingival crown margins and gingival inflammation. *J Periodontol*, 45(3), 151-154. doi:10.1902/jop.1974.45.3.151
- Ng, Y. L., Mann, V., Rahbaran, S., Lewsey, J., & Gulabivala, K. (2007). Outcome of primary root canal treatment: systematic review of the literature - part 1. Effects of study characteristics on probability of success. *Int Endod J*, 40(12), 921-939. doi:10.1111/j.1365-2591.2007.01322.x
- Nissan, J., Dmitry, Y., & Assif, D. (2001). The use of reinforced composite resin cement as compensation for reduced post length. *J Prosthet Dent*, 86(3), 304-308. doi:10.1067/mpr.2001.114759
- Nyman, S., & Lindhe, J. (1979). A longitudinal study of combined periodontal and prosthetic treatment of patients with advanced periodontal disease. *J Periodontol*, 50(4), 163-169. doi:10.1902/jop.1979.50.4.163
- Ona, M., & Wakabayashi, N. (2006). Influence of alveolar support on stress in periodontal structures. *J Dent Res*, 85(12), 1087-1091. doi:10.1177/154405910608501204
- Orkin, D. A., Reddy, J., & Bradshaw, D. (1987). The relationship of the position of crown margins to gingival health. *J Prosthet Dent*, 57(4), 421-424.

- Ozcan, M., & Vallittu, P. K. (2003). Effect of surface conditioning methods on the bond strength of luting cement to ceramics. *Dent Mater*, 19(8), 725-731.
- Padbury, A., Jr., Eber, R., & Wang, H. L. (2003). Interactions between the gingiva and the margin of restorations. *J Clin Periodontol*, 30(5), 379-385.
- Pennington, M. W., Vernazza, C. R., Shackley, P., Armstrong, N. T., Whitworth, J. M., & Steele, J. G. (2009). Evaluation of the cost-effectiveness of root canal treatment using conventional approaches versus replacement with an implant. *Int Endod J*, 42(10), 874-883. doi:10.1111/j.1365-2591.2009.01582.x
- Penny, R. E., & Kraal, J. H. (1979). Crown-to-root ratio: its significance in restorative dentistry. *J Prosthet Dent*, 42(1), 34-38.
- Peroz, I., Blankenstein, F., Lange, K. P., & Naumann, M. (2005). Restoring endodontically treated teeth with posts and cores--a review. *Quintessence Int*, 36(9), 737-746.
- Pjetursson, B. E., Bragger, U., Lang, N. P., & Zwahlen, M. (2007). Comparison of survival and complication rates of tooth-supported fixed dental prostheses (FDPs) and implant-supported FDPs and single crowns (SCs). *Clin Oral Implants Res*, 18 Suppl 3, 97-113. doi:10.1111/j.1600-0501.2007.01439.x
- Pjetursson, B. E., Tan, K., Lang, N. P., Bragger, U., Egger, M., & Zwahlen, M. (2004). A systematic review of the survival and complication rates of fixed partial dentures (FPDs) after an observation period of at least 5 years. *Clin Oral Implants Res*, 15(6), 625-642. doi:10.1111/j.1600-0501.2004.01117.x
- Rauch, A., Reich, S., Dalchau, L., & Schierz, O. (2018). Clinical survival of chair-side generated monolithic lithium disilicate crowns:10-year results. *Clin Oral Investig*, 22(4), 1763-1769. doi:10.1007/s00784-017-2271-3
- Reeh, E. S., Messer, H. H., & Douglas, W. H. (1989). Reduction in tooth stiffness as a result of endodontic and restorative procedures. *J Endod*, 15(11), 512-516. doi:10.1016/S0099-2399(89)80191-8
- Reich, S., & Schierz, O. (2013). Chair-side generated posterior lithium disilicate crowns after 4 years. *Clin Oral Investig*, 17(7), 1765-1772. doi:10.1007/s00784-012-0868-0
- Reitan, K. (1967). Clinical and histologic observations on tooth movement during and after orthodontic treatment. *Am J Orthod*, 53(10), 721-745.
- Robbins, J. W. (1990). Guidelines for the restoration of endodontically treated teeth. *J Am Dent Assoc*, 120(5), 558, 560, 562 passim.
- Roberts, E. E., Bailey, C. W., Ashcraft-Olmscheid, D. L., & Vandewalle, K. S. (2018). Fracture Resistance of Titanium-Based Lithium Disilicate and Zirconia Implant Restorations. *J Prosthodont*, 27(7), 644-650. doi:10.1111/jopr.12765
- Roscoe, M. G., Noritomi, P. Y., Novais, V. R., & Soares, C. J. (2013). Influence of alveolar bone loss, post type, and ferrule presence on the biomechanical behavior of endodontically treated maxillary canines: strain measurement and stress distribution. *J Prosthet Dent*, 110(2), 116-126. doi:10.1016/S0022-3913(13)60350-9
- Rosentritt, M., Furer, C., Behr, M., Lang, R., & Handel, G. (2000). Comparison of in vitro fracture strength of metallic and tooth-coloured posts and cores. *J Oral Rehabil*, 27(7), 595-601.
- Rosentritt, M., Hahnel, S., Engelhardt, F., Behr, M., & Preis, V. (2017). In vitro performance and fracture resistance of CAD/CAM-fabricated implant supported molar crowns. *Clin Oral Investig*, 21(4), 1213-1219. doi:10.1007/s00784-016-1898-9

- Sailer, I., Makarov, N. A., Thoma, D. S., Zwahlen, M., & Pjetursson, B. E. (2015). All-ceramic or metal-ceramic tooth-supported fixed dental prostheses (FDPs)? A systematic review of the survival and complication rates. Part I: Single crowns (SCs). *Dent Mater*, *31*(6), 603-623. doi:10.1016/j.dental.2015.02.011
- Sailer, I., Muhlemann, S., Zwahlen, M., Hammerle, C. H., & Schneider, D. (2012). Cemented and screw-retained implant reconstructions: a systematic review of the survival and complication rates. *Clin Oral Implants Res*, *23 Suppl 6*, 163-201. doi:10.1111/j.1600-0501.2012.02538.x
- Salameh, Z., Sorrentino, R., Ounsi, H. F., Sadig, W., Atiyeh, F., & Ferrari, M. (2008). The effect of different full-coverage crown systems on fracture resistance and failure pattern of endodontically treated maxillary incisors restored with and without glass fiber posts. *J Endod*, *34*(7), 842-846. doi:10.1016/j.joen.2008.03.025
- Salehrabi, R., & Rotstein, I. (2004). Endodontic treatment outcomes in a large patient population in the USA: an epidemiological study. *J Endod*, *30*(12), 846-850.
- Santing, H. J., Raghoobar, G. M., Vissink, A., den Hartog, L., & Meijer, H. J. (2013). Performance of the Straumann Bone Level Implant system for anterior single-tooth replacements in augmented and nonaugmented sites: a prospective cohort study with 60 consecutive patients. *Clin Oral Implants Res*, *24*(8), 941-948. doi:10.1111/j.1600-0501.2012.02486.x
- Santos-Filho, P. C., Verissimo, C., Raposo, L. H., Noritomi MecEng, P. Y., & Marcondes Martins, L. R. (2014). Influence of ferrule, post system, and length on stress distribution of weakened root-filled teeth. *J Endod*, *40*(11), 1874-1878. doi:10.1016/j.joen.2014.07.015
- Santos-Filho, P. C., Verissimo, C., Soares, P. V., Saltarello, R. C., Soares, C. J., & Marcondes Martins, L. R. (2014). Influence of ferrule, post system, and length on biomechanical behavior of endodontically treated anterior teeth. *J Endod*, *40*(1), 119-123. doi:10.1016/j.joen.2013.09.034
- Santos Pantaleon, D., Morrow, B. R., Cagna, D. R., Pameijer, C. H., & Garcia-Godoy, F. (2018). Influence of remaining coronal tooth structure on fracture resistance and failure mode of restored endodontically treated maxillary incisors. *J Prosthet Dent*, *119*(3), 390-396. doi:10.1016/j.prosdent.2017.05.007
- Saunders, W. P., & Saunders, E. M. (1994). Coronal leakage as a cause of failure in root-canal therapy: a review. *Endod Dent Traumatol*, *10*(3), 105-108.
- Schmitter, M., Huy, C., Ohlmann, B., Gabbert, O., Gilde, H., & Rammelsberg, P. (2006). Fracture resistance of upper and lower incisors restored with glass fiber reinforced posts. *J Endod*, *32*(4), 328-330. doi:10.1016/j.joen.2005.09.015
- Schwartz, R. S., & Robbins, J. W. (2004). Post placement and restoration of endodontically treated teeth: a literature review. *J Endod*, *30*(5), 289-301. doi:10.1097/00004770-200405000-00001
- Schwarz, F., Sahm, N., & Becker, J. (2012). Impact of the outcome of guided bone regeneration in dehiscence-type defects on the long-term stability of peri-implant health: clinical observations at 4 years. *Clin Oral Implants Res*, *23*(2), 191-196. doi:10.1111/j.1600-0501.2011.02214.x
- Sellers, K., Powers, J. M., & Kiat-Amnuay, S. (2017). Retentive strength of implant-supported CAD-CAM lithium disilicate crowns on zirconia custom abutments using 6 different cements. *J Prosthet Dent*, *117*(2), 247-252. doi:10.1016/j.prosdent.2016.06.014
- Serafino, C., Gallina, G., Cumbo, E., & Ferrari, M. (2004). Surface debris of canal walls after post space preparation in endodontically treated teeth: a scanning electron

- microscopic study. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 97(3), 381-387. doi:10.1016/S1079210403006061
- Setzer, F. C., & Kim, S. (2014). Comparison of long-term survival of implants and endodontically treated teeth. *J Dent Res*, 93(1), 19-26. doi:10.1177/0022034513504782
- Setzer, F. C., Shah, S. B., Kohli, M. R., Karabucak, B., & Kim, S. (2010). Outcome of endodontic surgery: a meta-analysis of the literature--part 1: Comparison of traditional root-end surgery and endodontic microsurgery. *J Endod*, 36(11), 1757-1765. doi:10.1016/j.joen.2010.08.007
- Signore, A., Benedicenti, S., Kaitsas, V., Barone, M., Angiero, F., & Ravera, G. (2009). Long-term survival of endodontically treated, maxillary anterior teeth restored with either tapered or parallel-sided glass-fiber posts and full-ceramic crown coverage. *J Dent*, 37(2), 115-121. doi:10.1016/j.jdent.2008.10.007
- Silva, N. R., Teixeira, H. S., Silveira, L. M., Bonfante, E. A., Coelho, P. G., & Thompson, V. P. (2018). Reliability and Failure Modes of a Hybrid Ceramic Abutment Prototype. *J Prosthodont*, 27(1), 83-87. doi:10.1111/jopr.12461
- Singh, S., & Thareja, P. (2014). Fracture resistance of endodontically treated maxillary central incisors with varying ferrule heights and configurations: In vitro study. *J Conserv Dent*, 17(2), 115-118. doi:10.4103/0972-0707.128038
- Smeets, R., Henningsen, A., Jung, O., Heiland, M., Hammacher, C., & Stein, J. M. (2014). Definition, etiology, prevention and treatment of peri-implantitis--a review. *Head Face Med*, 10, 34. doi:10.1186/1746-160X-10-34
- Soares, C. J., Pizi, E. C., Fonseca, R. B., & Martins, L. R. (2005). Influence of root embedment material and periodontal ligament simulation on fracture resistance tests. *Braz Oral Res*, 19(1), 11-16.
- Sorensen, J. A., & Engelman, M. J. (1990). Ferrule design and fracture resistance of endodontically treated teeth. *J Prosthet Dent*, 63(5), 529-536.
- Stacey, G. D. (1993). A shear stress analysis of the bonding of porcelain veneers to enamel. *J Prosthet Dent*, 70(5), 395-402.
- Sterzenbach, G., Kalberlah, S., Beuer, F., Frankenberger, R., & Naumann, M. (2011). In-vitro simulation of tooth mobility for static and dynamic load tests: a pilot study. *Acta Odontol Scand*, 69(5), 316-318. doi:10.3109/00016357.2011.563244
- Sterzenbach, G., Karajouli, G., Naumann, M., Peroz, I., & Bitter, K. (2012). Fiber post placement with core build-up materials or resin cements--an evaluation of different adhesive approaches. *Acta Odontol Scand*, 70(5), 368-376. doi:10.3109/00016357.2011.603702
- Sterzenbach, G., Rosentritt, M., Frankenberger, R., Paris, S., & Naumann, M. (2012). Loading standardization of postendodontic restorations in vitro: impact of restorative stage, static loading, and dynamic loading. *Oper Dent*, 37(1), 71-79. doi:10.2341/10-355-L
- Sterzenbach, G., Rosentritt, M., Meyer-Lueckel, H., Bitter, K., & Naumann, M. (2018). Failure loads of all-ceramic cantilever fixed dental prostheses on post-restored abutment teeth: influence of the post presence and post position. *Eur J Oral Sci*, 126(6), 526-532. doi:10.1111/eos.12573
- Sterzenbach, G., Tunjan, R., Rosentritt, M., & Naumann, M. (2014). Increased tooth mobility because of loss of alveolar bone support: a hazard for zirconia two-unit cantilever resin-bonded FDPs in vitro? *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*, 102(2), 244-249. doi:10.1002/jbm.b.33001

- Stokes, A. N., & Hood, J. A. (1993). Impact fracture characteristics of intact and crowned human central incisors. *J Oral Rehabil*, *20*(1), 89-95.
- Stramotas, S., Geenty, J. P., Darendeliler, M. A., Byloff, F., Berger, J., & Petocz, P. (2000). The reliability of crown-root ratio, linear and angular measurements on panoramic radiographs. *Clin Orthod Res*, *3*(4), 182-191.
- Swanson, K., & Madison, S. (1987). An evaluation of coronal microleakage in endodontically treated teeth. Part I. Time periods. *J Endod*, *13*(2), 56-59. doi:10.1016/S0099-2399(87)80155-3
- Tabassum, S., & Khan, F. R. (2016). Failure of endodontic treatment: The usual suspects. *Eur J Dent*, *10*(1), 144-147. doi:10.4103/1305-7456.175682
- Tada, S., Allen, P. F., Ikebe, K., Zheng, H., Shintani, A., & Maeda, Y. (2015). The Impact of the Crown-Root Ratio on Survival of Abutment Teeth for Dentures. *J Dent Res*, *94*(9 Suppl), 220S-225S. doi:10.1177/0022034515589710
- Tada, S., Ikebe, K., Matsuda, K., & Maeda, Y. (2013). Multifactorial risk assessment for survival of abutments of removable partial dentures based on practice-based longitudinal study. *J Dent*, *41*(12), 1175-1180. doi:10.1016/j.jdent.2013.07.018
- Tang, W., Wu, Y., & Smales, R. J. (2010). Identifying and reducing risks for potential fractures in endodontically treated teeth. *J Endod*, *36*(4), 609-617. doi:10.1016/j.joen.2009.12.002
- Torabinejad, M., Anderson, P., Bader, J., Brown, L. J., Chen, L. H., Goodacre, C. J., . . . White, S. N. (2007). Outcomes of root canal treatment and restoration, implant-supported single crowns, fixed partial dentures, and extraction without replacement: a systematic review. *J Prosthet Dent*, *98*(4), 285-311. doi:10.1016/S0022-3913(07)60102-4
- Torbjorner, A., & Fransson, B. (2004a). Biomechanical aspects of prosthetic treatment of structurally compromised teeth. *Int J Prosthodont*, *17*(2), 135-141.
- Torbjorner, A., & Fransson, B. (2004b). A literature review on the prosthetic treatment of structurally compromised teeth. *Int J Prosthodont*, *17*(3), 369-376.
- Tribst, J., Anami, L. C., Ozcan, M., Bottino, M. A., Melo, R. M., & Saavedra, G. (2018). Self-etching Primers vs Acid Conditioning: Impact on Bond Strength Between Ceramics and Resin Cement. *Oper Dent*, *43*(4), 372-379. doi:10.2341/16-348-L
- Trope, M., & Ray, H. L., Jr. (1992). Resistance to fracture of endodontically treated roots. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, *73*(1), 99-102.
- Vacek, J. S., Gher, M. E., Assad, D. A., Richardson, A. C., & Giambarresi, L. I. (1994). The dimensions of the human dentogingival junction. *Int J Periodontics Restorative Dent*, *14*(2), 154-165.
- Vire, D. E. (1991). Failure of endodontically treated teeth: classification and evaluation. *J Endod*, *17*(7), 338-342. doi:10.1016/S0099-2399(06)81702-4
- von Arx, T., Jensen, S. S., & Bornstein, M. M. (2015). Changes of Root Length and Root-to-Crown Ratio after Apical Surgery: An Analysis by Using Cone-beam Computed Tomography. *J Endod*, *41*(9), 1424-1429. doi:10.1016/j.joen.2015.04.001
- von Stein-Lausnitz, M., Mehnert, A., Bruhnke, M., Sterzenbach, G., Rosentritt, M., Spies, B. C., . . . Naumann, M. (2018). Direct or Indirect Restoration of Endodontically Treated Maxillary Central Incisors with Class III Defects? Composite vs Veneer or Crown Restoration. *J Adhes Dent*, *20*(6), 519-526. doi:10.3290/j.jad.a41635
- Wallkamm, B., Ciocco, M., Ettlin, D., Syfrig, B., Abbott, W., Listrom, R., . . . Rosen, P. S. (2015). Three-year outcomes of Straumann Bone Level SLActive dental implants in daily dental practice: a prospective non-interventional study. *Quintessence Int*, *46*(7), 591-602. doi:10.3290/j.qi.a34076

- Walton, T. R. (1999). A 10-year longitudinal study of fixed prosthodontics: clinical characteristics and outcome of single-unit metal-ceramic crowns. *Int J Prosthodont*, 12(6), 519-526.
- Wiskott, H. W., Nicholls, J. I., & Belser, U. C. (1997). The effect of tooth preparation height and diameter on the resistance of complete crowns to fatigue loading. *Int J Prosthodont*, 10(3), 207-215.
- Wu, M. K., van der Sluis, L. W., & Wesselink, P. R. (2004). Comparison of mandibular premolars and canines with respect to their resistance to vertical root fracture. *J Dent*, 32(4), 265-268. doi:10.1016/j.jdent.2003.12.002
- Yeh, S., & Andreana, S. (2004). Crown lengthening: basic principles, indications, techniques and clinical case reports. *N Y State Dent J*, 70(8), 30-36.
- Yoshiyama, M., Sano, H., Ebisu, S., Tagami, J., Ciucchi, B., Carvalho, R. M., . . . Pashley, D. H. (1996). Regional strengths of bonding agents to cervical sclerotic root dentin. *J Dent Res*, 75(6), 1404-1413. doi:10.1177/00220345960750061201
- Zerman, N., & Cavalleri, G. (1993). Traumatic injuries to permanent incisors. *Endod Dent Traumatol*, 9(2), 61-64.
- Zhu, Z., Dong, X. Y., He, S., Pan, X., & Tang, L. (2015). Effect of Post Placement on the Restoration of Endodontically Treated Teeth: A Systematic Review. *Int J Prosthodont*, 28(5), 475-483. doi:10.11607/ijp.4120
- Zitzmann, N. U., Krastl, G., Hecker, H., Walter, C., & Weiger, R. (2009). Endodontics or implants? A review of decisive criteria and guidelines for single tooth restorations and full arch reconstructions. *Int Endod J*, 42(9), 757-774. doi:10.1111/j.1365-2591.2009.01561.x

X. Anhang

X.1 Abkürzungen

∅	Durchmesser
%	Prozent
BA	Bindegewebiges Attachment
Bis-GMA	Bisphenol A-glycidyl methacrylate
°C	Grad Celsius
CAD	Computer aided design
CAM	Computer aided manufacturing
Cm	Centimeter
CKV	Chirurgische Kronenverlängerung
DMS	Deutsche Mundgesundheitsstudie

EA	Epitheliales Attachment
Et al.	et alii
FE	Forcierte Extrusion
F_{\max}	maximale Belastbarkeit
GPa	Gigapascal
Hz	Hertz
IMPL	Implantat
K	Kontrolle
KN	Knochniveau
l	Länge
L_K	Effektive Kronenlänge
LL	Linear loading
L_W	Effektive Wurzellänge
Max	Maximum
Min	Minimum
Mm	Millimeter
n	Anzahl
N	Newton
Ncm	Newton-Zentimeter
p-Wert	Signifikanzwert
R_{CR}	Kronen-Wurzel-Verhältnis
SD	Standard Deviation
SZG	Schmelz-Zement-Grenze
TCML	Thermo-cycling and mechanical loading

Vol	Volumen
WSR	Wurzelspitzenresektion
Z. B.	Zum Beispiel

X.2 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: Das Verhältnis von L_K zu L_W ergibt das Kronen-Wurzel-Verhältnis (R_{CR}):14	
Abbildung 2: Schematische Darstellung eines mit einem Stift-Stumpf-Aufbau und einer Krone versorgten Schneidezahns. Die rot schraffierte Dentinmanschette wird von der Krone zu 360° Grad umfasst und ist essenziell für den Ferrule-Effekt.	18
Abbildung 3: Schematische Darstellung der biologischen Breite. Querschnitt auf Höhe der Schmelz-Zement-Grenze. Grafik modifiziert nach PADBURY et al. (Padbury, Eber, & Wang, 2003).....	19
Abbildung 4: Details und Unterschiede zwischen den Gruppen. KN= Knochenniveau; SZG= Schmelz-Zement-Grenze; n= Anzahl; L_K = effektive Kronenlänge. Grafik modifiziert nach Prof. Dr. M. Naumann.	31
Abbildung 5: Frontalansicht einer präparierten Probe.	33
Abbildung 6: Radiologische Kontrolle eines Probenzahns nach Versorgung mit einem Stift-Stumpf-Aufbau. Die rote Umrandung verdeutlicht die Lage des Glasfaserstifts. Apikal des Stifts ist die Restwurzelfüllung zu erkennen.....	35
Abbildung 7: In den Wurzelkanal inserierter Glasfaserstift.	37
Abbildung 8: Gefensterter Frontzahn, zum Befüllen mit Kunststoff vorbereitet.	37
Abbildung 9: Seitenansicht präparierter Probenzahn. Verlauf der Präparationsgrenze zur Verdeutlichung markiert.....	37
Abbildung 10: Zum Einbetten vorbereitete Probe.	38
Abbildung 11: Fertiggestellte Probe.....	38
Abbildung 12: Polyurethan-Modell des Zahnstumpfs.	39
Abbildung 13: Fertiggestellte Krone auf dem Modell.	39
Abbildung 14: Links in Wachs modelliertes Abutment. Rechts in Lithiumdisilikat überführtes Abutment.	43
Abbildung 15: Implantatmodell mit Titan-Klebebasis und Lithiumdisilikat-Abutment.	43

Abbildung 16: Schematische Darstellung der Probe während der Belastung. Grafik modifiziert nach Prof. Dr. M. Naumann (Naumann, Preuss, & Frankenberger, 2007). ..	44
Abbildung 17: Probe nach der Kausimulation. Es sind deutliche Abrasionen unterhalb der Inzisalkante zu erkennen.....	44
Abbildung 18: Eingespannte Implantatkrone in der Prüfmaschine. Vor der Belastung wird eine Zinnfolie zwischen Probe und Stempelkopf platziert.....	45
Abbildung 19: Schematische Darstellung der verschiedenen Frakturmuster. A und B sind Wiederversorgbar, während C und D infauste Prognosen aufweisen. Die aufgetretenen Misserfolge liegen in den rot schraffierten Bereichen und beschreiben den jeweils schwerwiegendsten Misserfolg.....	46
Abbildung 20 zeigt eine in zwei Teile frakturierte Krone. Der Riss verläuft vom Punkt des Kraftauftritts (Interinzisalpunkt) in Richtung des vestibulären Präparationsrands.....	54
Abbildung 21: Keramikfraktur.	54
Abbildung 22 zeigt eine in zwei Teile frakturierte Krone. Der Spalt zwischen dem Stift-Stumpf-Aufbau und dem Zahn deutet auf ein Adhäsivversagen hin.....	54
Abbildung 23: Auch hier deutet der Spalt zwischen Stift-Stumpf-Aufbau und Zahn auf ein Adhäsivversagen hin.	54
Abbildung 24: Fraktur im oberen Wurzeldrittel. Die Keramikfraktur ist zusätzlich zum Adhäsivversagen ersichtlich.	55
Abbildung 25: Fraktur im oberen Wurzeldrittel.....	55
Abbildung 26 zeigt eine Fraktur im mittleren Wurzeldrittel. Im Kunststoffblock ist die Wurzelspitze mit Restwurzelfüllung sichtbar.....	55
Abbildung 27: Fraktur im mittleren Wurzeldrittel.	55
Abbildung 28 zeigt eine Fraktur des Keramikabutments und der Keramikkrone. Die Titan-Klebebasis und das Implantat sind unbeschädigt.....	56
Abbildung 29 zeigt eine weitere Probe mit der Fraktur des Implantataufbaus.....	56
Diagramm 1: Boxplotdiagramm der Kronen-Wurzel-Verhältnisse und die statistischen Signifikanzen.	48
Diagramm 2: Boxplotdiagramm der maximalen Belastbarkeit der Gruppen nach der Kausimulation. Die statistische Signifikanz zwischen den Gruppen steht über den entsprechenden Linien.	51

Diagramm 3: Grafische Darstellung der Frakturmuster innerhalb der Gruppen.....	53
Tabelle 1: Spezifikationen der postendodontisch verwendeten Materialien.	40
Tabelle 2: Gruppenspezifische Werte der Proben.	47
Tabelle 3: Das Kronen-Wurzel-Verhältnis im Mittelwert und mit Standardabweichung.	48
Tabelle 4: Maximale Belastbarkeit der Versuchsgruppen nach der Kausimulation.	50
Tabelle 5: Die Aufteilung der Frakturmuster innerhalb der verschiedenen Versuchsgruppen.	52

X.3 Materialliste

- 1) Scaler EverEdge
Hu-Friedy Mfg. Co., LLC., D-60528 Frankfurt am Main
- 2) Oral-B PRO-EXPERT Premium PRO-FLEX Zahnbürste
Procter & Gamble Service GmbH, D-65824 Schwalbach am Taunus
- 3) Trennscheibe 9500.900.220 VPE 100
Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, D-32631 Lemgo
- 4) Bone Level, Durchmesser 4,1 mm RC, SLA 12mm
Straumann GmbH, D-79100 Freiburg
- 5) Sirona Teneo
Dentsply Sirona Deutschland GmbH, D-64625 Bensheim
- 6) Parallele Hohlkehle, rund 8881
Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, D-32631 Lemgo
- 7) K-Feilen Ready Steel 12D 28 mm ISO 010
Dentsply Sirona Deutschland GmbH, D-64625 Bensheim
- 8) X-Smart Plus
Dentsply Sirona Deutschland GmbH, D-64625 Bensheim

9) Protaper Next, Pathfile P1, 25 mm, 013/.02; Pathfile P2, 25 mm, 016/.02;

X1: 25 mm, 017/.04; X2: 25 mm, 025/.06

Dentsply Sirona Deutschland GmbH, D-64625 Bensheim

10) Natriumhypochlorid-Lösung 1%

Aug. Hedinger GmbH & Co. KG, D-70327 Stuttgart

11) Protaper Next Papierspitzen X2

Dentsply Sirona Deutschland GmbH, D-64625 Bensheim

12) Protaper Next, Guttapercha Points A 0220-60x X2

Dentsply Sirona Deutschland GmbH, D-64625 Bensheim

13) AH Plus Jet

Dentsply Sirona Deutschland GmbH, D-64625 Bensheim

14) Cavit

3M Deutschland GmbH, D-41453 Neuss

15) Stripkronen, Frontzahnsortiment

Frasaco GmbH, D-88069 Tettnang

16) Easy Post Precision Drill, Nr.2

Dentsply Sirona Deutschland GmbH, D-64625 Bensheim

17) X-Post Nr 2

Dentsply Sirona Deutschland GmbH, D-64625 Bensheim

18) Etching Gel 37 %

Orbis Dental Handelsgesellschaft mbH, D-48153 Münster

19) 2-Propanol

Merck KGaA, D-64293 Darmstadt

20) Root Canal Applicator Tips

Dentsply Sirona Deutschland GmbH, D-64625 Bensheim

21) CliXdisch

Dentsply Sirona Deutschland GmbH, D-64625 Bensheim

22) XP Bond

Dentsply Sirona Deutschland GmbH, D-64625 Bensheim

23) Self Cure Activator

Dentsply Sirona Deutschland GmbH, D-64625 Bensheim

24) core-X flow

Dentsply Sirona Deutschland GmbH, D-64625 Bensheim

25) IPS e.max

Ivoclar Vivadent GmbH, D-73479 Ellwangen

26) Ei 8379

Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, D-32631 Lemgo

27) Parallelometer VG-2 519,

DeguDent GmbH, D-63457 Hanau-Wolfgang

28) Tauchwachsgerät

Krupp Medizintechnik, D-45145 Essen

29) Vaseline

Fagron GmbH & Co. KG, D-22885 Barsbüttel

30) Technovit 4004

Kulzer GmbH, D-63450 Hanau

31) Hartmetallfräse H251ACR

Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, D-32631 Lemgo

32) Provil novo

Kulzer GmbH, D-63450 Hanau

33) Bego Topstar Z3

BEGO GmbH & Co. KG, D-28359 Bremen

34) Korox 50

BEGO GmbH & Co. KG, D-28359 Bremen

35) Palladur

Kulzer GmbH, D-63450 Hanau

36) Mollosil Plus Primer

DETAX GmbH & Co. KG, D-76275 Ettlingen

37) Mollosil Plus

DETAX GmbH & Co. KG, D-76275 Ettlingen

38) Periotest

Medizintechnik Gulden e. K., D-64397 Modautal

39) Trios

3Shape A/S, DNK-1060 Kopenhagen

40) Dental System

3Shape A/S, DNK-1060 Kopenhagen

41) Organical Multi

Organical CAD/CAM GmbH, D-12681 Berlin

42) IPS Press Vest Speed

Ivoclar Vivadent GmbH, D-73479 Ellwangen

43) IPS e.max Ceram Glaze

Ivoclar Vivadent GmbH, D-73479 Ellwangen

44) Fit Test C & B

VOCO GmbH, D-27457 Cuxhaven

45) Porcelain Etch 9 %

Ultradent Products GmbH, D-51149 Köln

46) Monobond Plus

Ivoclar Vivadent GmbH, D-73479 Ellwangen

47) SmartCem2

Dentsply Sirona Deutschland GmbH, D-64625 Bensheim

48) Straumann RC Variobase Abutment/Sekundärteil mit Schraube, Durchmesser 4,5 mm, Höhe 3,5 mm

Straumann GmbH, D-79100 Freiburg

49) Multilink Hybrid Abutment Starter Kit

Ivoclar Vivadent GmbH, D-73479 Ellwangen

50) Regensburger Kausimulator

Universitätsklinikum Regensburg, D-93053 Freiburg

51) Ermüdungsprüfmaschine

Zwick GmbH & Co. KG, D-89079 Ulm

52) SPSS Version 23

IBM, D-71139 Ehningen

X.4 Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Ufuk Adali versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema:

„Der Einfluss des Kronen-Wurzel-Verhältnisses auf die maximale Belastbarkeit postendodontisch restaurierter Oberkiefer-Schneidezähne nach Alterung“

selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung (siehe „Uniform Requirements for Manuscripts (URM)“ des ICMJE -www.icmje.org) kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

Mein Anteil an der ausgewählten Publikation entspricht dem, der in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem Betreuer, angegeben ist. Sämtliche Publikationen, die aus dieser Dissertation hervorgegangen sind und bei denen ich Autor bin, entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§156,161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.“

Datum

Unterschrift

X.5 Lebenslauf

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

X.6 Publikationsliste

Bacterial leakage and bending moments of screw-retained, composite-veneered PEEK implant crowns

Schwitalla A, Wachtel A, Zimmermann T, Adali U, Abou-Emara M, Sütel M, Mühlemann S, Mueller WD

J Mech Behav Biomed Mater. 2019 Mar; 91:32-37. doi: 10.1016/j.jmbbm.2018.11.027. Epub 2018 Nov 28.

Digital Impression-Taking Facilitates Prosthetic Rehabilitation of Microstomia Patients: A Case History Report

Adali U, Schober S, Beuer F, Spies BC

Int J Prosthodont. 2019 January/February;32(1):110–112. doi: 10.11607/ijp.5995. Epub 2018 Sep 6.

Die prothetische Versorgung von Patienten mit Mikrostomie – Analoge Probleme digital gelöst

Adali U, Beuer F, Schober S

Quintessenz Zahnmedizin 2017;68(9): 1049 - 1055

Veröffentlichungen aus der Dissertation:

Biomechanical Impact of Crown-to-Root Ratio Altering Treatments of Damaged Incisors

Adali U, Sterzenbach G, Beuer F, Naumann M

J Dent Res. Vol 96 (Spec Iss A): 3549 (Primary/PR), 2017 (www.iadr.org)

Beitrag im Einzelnen:

Der Beitrag zu dieser Posterpräsentation beinhaltete die Versuchsdurchführung, Datenerfassung, Diskussion der Ergebnisse, Erstellung der Fotos und Grafiken sowie die Präsentation des Posters.

Biomechanical Impact of Crown-to-Root Ratio Altering Treatments of Damaged Incisors

Adali U, Sterzenbach G, Beuer F, Naumann M

Oral Presentation; Annual Conference; 40th European Prosthodontic Association (EPA); 65th German Society for Prosthetic Dentistry and Biomaterials (DGPro). 2016

Beitrag im Einzelnen:

Der Beitrag zu diesem Kurzvortrag beinhaltete die Versuchsdurchführung, Datenerfassung, Diskussion der Ergebnisse, Erstellung der Fotos und Grafiken sowie die mündliche Präsentation.

Unterschrift, Datum und Stempel des betreuenden Hochschullehrers

Unterschrift des Doktoranden

X.7 Danksagung

Nach vielen Jahren und unzähligen Stunden im Labor und vor dem Monitor liegt nun meine fertiggestellte Dissertation vor. Diese Arbeit wäre nie ohne die Hilfe besonderer Menschen fertig geworden:

Herrn Prof. Dr. Florian Beuer MME danke ich für die Annahme meines Dissertationsthemas.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Michael Naumann, der meine Dissertation ermöglicht und tatkräftig unterstützt hat. Ebenso möchte ich Herrn Prof. Dr. Martin Rosentritt danken, der für die Durchführung der Kausimulation zuständig war.

Zu besonderem Dank bin ich Herrn PD Dr. Guido Sterzenbach verpflichtet. Lieber Guido, vielen Dank für deine Anregungen, Ratschläge und deine Geduld. Deine wissenschaftliche und klinische Ausbildung wird mich mein ganzes Leben begleiten.

Ich danke vor allem meiner Familie, welche mit mir zusammen durch eine aufreibende Dissertationszeit gegangen ist. Ebenso danke ich meinen Freunden für die motivierenden Worte.

Vielen Dank für eure Unterstützung in jeder Lebenslage.