

Aus dem  
CharitéCentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde  
Institut für Zahnärztliche Prothetik, Alterszahnmedizin und Funktionslehre  
Direktor: Univ.-Prof. Dr. Florian Beuer, MME

HABILITATIONSSCHRIFT

**Grenzen der Zahnerhaltung:**

**Die Restauration tief zerstörter Zähne nach orthodontischer Extrusion**

zur Erlangung der Lehrbefähigung  
für das Fach Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde

vorgelegt dem Fakultätsrat der Medizinischen Fakultät  
Charité-Universitätsmedizin Berlin

von

Dr. med. dent. Maria Bruhnke

Eingereicht: Januar 2024

Dekan: Prof. Dr. med. Joachim Spranger

Meiner Tochter Anna

# Inhaltsverzeichnis

## 1. Einleitung

1.1.	Die Herausforderung der Restauration eines tief zerstörten Zahnes	5
1.2.	Der Zahnhartsubstanzdefekt und seine Bedeutung	6
1.3.	Die Indikation von Aufbaustiften in der postendodontischen Restauration	6
1.4.	Die Bedeutung des Fassreifeneffektes	8
1.5.	Die Bedeutung der biologischen Breite	8
1.6.	Therapiekonzepte für den Zahnerhalt	9
1.6.1.	Chirurgische Kronenverlängerung	9
1.6.2.	Orthodontische Extrusion	10
1.6.3.	Chirurgische Extrusion	12
1.7.	Therapiekonzepte bei Zahnentfernung	12
1.7.1.	Brückenversorgung	13
1.7.2.	Adhäsivbrückenversorgung	13
1.7.3.	Implantatversorgung	14
1.8.	Die Bedeutung wirtschaftlicher Aspekte und der Patientenperspektive in der Therapieauswahl	16
1.9.	Fragestellungen	18

## 2. Eigene Arbeiten

2.1.	Langzeitüberleben endodontisch behandelter Zähne mit adhäsiv befestigten Aufbaustiften im Wurzelkanal	19
2.2.	Forcierte orthodontische Extrusion zur Restauration tief zerstörter Frontzähne und Prämolaren als Pfeiler für Einzelzahnkronen: bis zu 5-Jahresdaten einer klinischen Pilotstudie	29
2.3.	Gesundheitsökonomische Bewertung der forcierten orthodontischen Extrusion tief zerstörter Zähne: bis zu 6-Jahresdaten einer klinischen Studie	39
2.4.	Implantat oder Zahn? – Eine Kosten-Zeit-Analyse der Therapie tief zerstörter Zähne	49
2.5.	Implantat oder Zahn? – Eine prospektive klinische Studie zur mundgesundheitsbezogenen Lebensqualität von Patienten mit tief zerstörten Zähnen	57

<b>3. Diskussion</b>	
3.1. Langzeitüberleben postendodontischer Restaurationen	72
3.2. Orthodontische Extrusion – Chancen und Herausforderungen	74
3.3. Implantat oder Zahn? – Die Therapiekonzepte im Vergleich	79
3.4. Schlussfolgerungen und Ausblick	84
<b>4. Zusammenfassung</b>	<b>86</b>
<b>5. Votum der Ethikkommission</b>	<b>88</b>
<b>6. Literaturnachweise</b>	<b>89</b>
<b>Danksagung</b>	<b>98</b>
<b>Erklärung</b>	<b>99</b>

# 1. Einleitung

## 1.1. Die Herausforderung der Restauration eines tief zerstörten Zahnes

Die Restauration tief zerstörter Zähne ist trotz jahrelanger klinischer Forschung ein Thema, das in der wissenschaftlichen Literatur unter vielen Aspekten kontrovers diskutiert wird. Subgingivale Restaurationsränder und subkrestale Defekte stellen den klinisch tätigen Zahnarzt fast täglich vor die Frage, ob ein tief zerstörter Zahn mit Hilfe von präprothetischen Maßnahmen, endodontischen Behandlungen und Stift-Stumpf-Aufbauten erfolgreich restauriert werden kann oder ob eine Zahnextraktion mit konsekutivem Zahnersatz prognostisch besser zu bewerten ist [1, 2]. Das Ziel der Entscheidungsfindung liegt stets darin, eine funktionelle, ästhetische und langzeitstabile Rehabilitation für den Patienten zu ermöglichen. Da für die Restauration tief zerstörter Zähne keine uniformen Behandlungsrichtlinien existieren, treffen klinisch tätige Zahnärzte durchaus unterschiedliche Therapieentscheidungen [3]. Der Entscheidungsprozess ist dabei von einer Vielfalt an Faktoren abhängig wie dem individuellen Patientenwunsch, anatomischen Grundvoraussetzungen [4], dem Zustand der umliegenden Weich- und Hartgewebe, der klinischen Erfahrung des Behandlers und nicht zuletzt von der prothetischen Gesamtplanung. Grundsätzlich stehen sich hierbei der Zahnerhalt mit nachfolgender Restauration und die Zahnextraktion mit nachfolgendem Zahnersatz als denkbare Therapiealternativen gegenüber.

Subgingivale und subkrestale Defekte stellen aus restaurativer und parodontaler Sicht insofern eine Herausforderung dar, als in den meisten Fällen eine Verletzung der biologischen Breite vorliegt [5, 6]. Hinzu kommt, dass bei Zähnen dieser Defekzebene nicht genug Zahnhartsubstanz für die Retention einer Kronenversorgung vorliegt. Als Ursachen für subkrestale Defekte kommen kariöse Läsionen, Frakturen in Folge von traumatischen Verletzungen, Perforationen oder Zahnhartsubstanzverluste in Form von Attritionen, Abrasionen oder Erosionen in Betracht. Bei Zahnhartsubstanzdefekten, die nicht ausschließlich die klinische Krone betreffen, ist meist auf Grund der anatomischen Nähe zum Wurzelkanal von einer Beteiligung der Pulpa und einer notwendigen endodontischen Behandlung auszugehen. Die bakteriendichte koronale Abdichtung des Wurzelkanalsystems und die Wiederherstellung der Kaufunktion sind zwei wesentliche Maßnahmen, um den Erhalt dieser Zähne langfristig sicher zu stellen. Dennoch zeigen endodontisch behandelte Zähne im Vergleich zu vitalen Zähnen eine erhöhte Frakturanfälligkeit [7]. Dabei ist die Prognose von endodontisch behandelten Zähnen von einer Reihe von Faktoren abhängig, wie zum Beispiel

dem Vorhandensein einer apikalen Aufhellung [8], der finalen prothetischen Restauration [9, 10] und der residualen Zahnhartsubstanz [4, 10, 11]. Im Gegensatz zu der früher weit verbreiteten Ansicht, dass eine Versprödung und Austrocknung der Zahnhartsubstanz im Rahmen der endodontischen Therapie für die erhöhte Frakturgefahr endodontisch behandelter Zähne verantwortlich ist, werden nach heutigem Kenntnisstand die physikalischen Eigenschaften des Dentins durch die Wurzelkanalbehandlung nicht erheblich verändert [12, 13]. Die Frakturanfälligkeit ist vielmehr auf die Destabilisierung der Zähne durch den koronalen und radikulären Substanzverlust zurückzuführen. So vermindert etwa die Präparation einer Trepanationsöffnung und anschließender Wurzelkanalaufbereitung die Steifigkeit des Zahnes um 5 %, während die zusätzliche Präparation einer okklusalen Kavität mit einer Verringerung der Steifigkeit um 20 % und die Präparation einer mesialen und distalen Kavität gar mit einer Verminderung der Steifigkeit um 63 % verbunden ist [14].

## **1.2. Der Zahnhartsubstanzdefekt und seine Bedeutung**

Die Rekonstruktion von endodontisch behandelten Zähnen richtet sich vor allem nach dem Ausmaß des koronalen Zahnhartsubstanzverlustes, der als kritischer Faktor für den Langzeiterfolg postendodontischer Restaurationen maßgeblich ist. So konnten zwei systematische Übersichtsarbeiten zeigen, dass die Überlebensrate restaurierter Zähne vom Ausmaß der residualen Zahnhartsubstanz abhängig ist [15, 16]. Für endodontisch behandelte Zähne mit hohem Substanzverlust werden dabei prospektive indirekte Restaurationen mit höckerübergreifenden Präparationen bevorzugt [17], während kleinere Defekte erfolgreich direkt mit Komposit restauriert werden können. Im Seitenzahnbereich betrifft dies besonders Klasse I und Klasse II Defekte [18], im Frontzahnbereich auch Klasse III und Klasse IV Defekte [19, 20]. Bei indirekten Restaurationen in Form von non-retentiven minimalinvasiven Teilkronen kann bei tief zerstörten Zähnen mit subgingivalen Defekträndern die adhäsive Befestigung durch die eingeschränkte Kontaminationskontrolle limitiert sein. Darüber hinaus sollte die definitive restaurative Therapie von endodontisch behandelten Zähnen möglichst zeitnah erfolgen, da Zähne, die nicht innerhalb von vier Monaten restauriert werden, ein deutlich erhöhtes Versagensrisiko zeigen [21].

## **1.3. Die Indikation von Aufbaustiften in der postendodontischen Restauration**

Aufbaustifte sind bei tief zerstörten Zähnen mit hohem Substanzverlust indiziert. Der Aufbaustift dient der Retention der koronalen Aufbaufüllung und der Restauration, wenn die

Retentions- und Adhäsionsfläche der verbliebenen Zahnhartsubstanz für eine direkte Kompositfüllung nicht ausreichend ist. Die Insertion eines Aufbaustiftes ist im Wesentlichen bei Zähnen mit einer residualen oder keiner verbliebenen Dentinwand bei gleichzeitigem Vorliegen einer mindestens 2 mm hohen zirkulären Dentinmanschette indiziert [22, 23].

Aufbaustifte sind aus hochgoldhaltigen Legierungen [24, 25], Cobalt-Chrom-Legierungen [26] und Zirkoniumdioxidkeramiken [27] sowie aus flexibleren Materialien wie glasfaserverstärkten Kompositen [4] auf dem Dentalmarkt verfügbar. In der Vergangenheit wurden individuell und im Dentallabor indirekt gefertigte Stift-Stumpf-Aufbauten aus Metalllegierungen lange Zeit als Goldstandard der postendodontischen Restauration angesehen [28, 29]. Der Nachteil dieser Stiftsysteme liegt jedoch in der provisorischen Versorgung, die mit einem erhöhten Risiko der Reinfektion des Wurzelkanals einhergeht [30]. Aus diesem Grund werden heute direkt gefertigte Stift-Stumpf-Aufbauten bevorzugt. Flexible Stiftsysteme haben ein dem Dentin ähnliches Elastizitätsmodul und sollen bei adhäsiver Zementierung die Kaukräfte gleichmäßiger verteilen [31-33], während starre Stiftsysteme der Belastung ohne Deformation widerstehen [34]. In klinischen Studien konnte bisher jedoch kein Unterschied zwischen flexiblen faserverstärkten Kompositstiften und rigiden Stiftsystemen nachgewiesen werden [35, 36]. Einzig metallische Schraubensysteme induzieren nachweislich Spannungen im Wurzelkanal und führen damit zu deutlich mehr intrafaskalen Frakturen im Vergleich zu glasfaserverstärkten Kompositstiften [37]. Im Hinblick auf die Langzeitprognose der Restauration spielt auch die Art der Zementierung im Wurzelkanal eine entscheidende Rolle. Das Ziel der adhäsiven Zementierung von Aufbaustiften im Wurzelkanal und eines adhäsiven Kompositaufbaus besteht darin, eine strukturelle Einheit herzustellen, die in Bezug auf ihre mechanischen Eigenschaften dem Dentin möglichst ähnlich ist. Diese Einheit wird in der wissenschaftlichen Literatur als „Monoblock“ definiert [38, 39]. Basierend auf der Anzahl der involvierten Oberflächen können glasfaserverstärkte Kompositstifte in Verbindung mit einer adhäsiven Zementierung im Wurzelkanal als ein „sekundärer Monoblock“ angesehen werden [40]. Obwohl die vorhandene Datenlage einen positiven Effekt für diesen sekundären Monoblock nahelegt [41], liegt keine ausreichende Langzeitevidenz für diese Art der Versorgung vor. Faktisch gibt es keine universalen Behandlungsrichtlinien und praktizierende Behandler benutzen unterschiedliche Systeme und Materialien [42]. Obwohl In-vitro-Studien von günstigeren Frakturmustern bei glasfaserverstärkten Kompositstiften im Vergleich zu rigiden Materialien auf Grund des dentinähnlichen Elastizitätsmoduls berichten [43, 44], zeigen klinische Studien eine weite Bandbreite an unterschiedlichen Frakturmustern [45, 46]. Klinische Langzeitdaten und insbesondere vergleichende Studien sind rar [47]. So fordert eine

systematische Übersichtsarbeit klinische Langzeitdaten in einem standardisierten Studiendesign auf Grund der Heterogenität der Methodik und der Ergebnisse in bisherigen klinischen Studien [45]. Für die adhäsive Zementierung des Aufbaustiftes im Wurzelkanal können unterschiedliche Befestigungssysteme mit Anwendung eines Adhäsivs oder selbstadhäsive Befestigungszemente ohne Adhäsivapplikation gewählt werden. Dabei muss eine ausreichende Lichthärtung im Wurzelkanal gewährleistet sein, die mit dual- oder selbsthärtenden Befestigungssystemen realisiert werden kann [48].

#### **1.4. Die Bedeutung des Fassreifeneffektes**

Die Prognose eines endodontisch behandelten Zahnes ist maßgeblich sowohl von der residualen Zahnhartsubstanz [49, 50] als auch von einer zirkumferenten Ferrulepräparationform abhängig [51]. Dabei ist diese Präparationsform im Zusammenhang mit der restaurativen Versorgung endodontisch behandelter Zähne als eine 2 mm hohe zirkumferente Dentinmanschette definiert, die vollständig durch die Kronenrestauration erfasst wird. Diese Art der Präparation wird im deutschen Sprachgebrauch als „Fassreifeneffekt“ bezeichnet und hat einen stabilisierenden Effekt für den endodontisch behandelten restaurierten Zahn [52], der in verschiedenen Studien nachgewiesen wurde [22, 53, 54]. Darüber hinaus scheint diese Präparationsform einen größeren Einfluss auf die Prognose des endodontisch behandelten Zahnes zu haben als die Auswahl des Stiftmaterials [22].

#### **1.5. Die Bedeutung der biologischen Breite**

Die vorhandene wissenschaftliche Datenlage legt nahe, den prospektiven Kronenrand einer Restauration nicht nach subgingival oder subkrestal zu legen, da dies zu einer Verletzung der biologischen Breite führt, die mit gingivalen Entzündungen, einem Attachmentverlust oder einem Knochenabbau verbunden sein kann [55]. Der anatomische Bereich oberhalb des Limbus alveolaris und die biologische Breite waren für Jahrzehnte Gegenstand vieler klinischer Untersuchungen. Die biologische Breite wurde dabei von Gargiulo 1961 erstmals beschrieben [56]. Sie ist als Abstand vom Sulkus bis zum alveolären Knochenrand definiert und umfasst das bindegewebige und epitheliale Attachment. Die klinischen Dimensionen der biologischen Breite wurden in diversen Studien untersucht und werden in einer systematischen Übersichtsarbeit mit einem durchschnittlichen Wert von 2,15 mm bis 2,3 mm angegeben [57]. Die Autoren verweisen allerdings auf eine hohe intra- und interindividuelle Variabilität, die zwischen 0,2 mm und 6,73 mm liegt.



## **1.6. Therapiekonzepte für den Zahnerhalt**

Vor diesem Hintergrund ist für die Restauration von tief zerstörten Zähnen mit subgingivalen und subkrestalen Defekträndern eine präprothetische Vorbehandlung notwendig, um die biologische Breite wiederherzustellen und eine Ferrulepräparation zu ermöglichen. Dabei stehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten zur Verfügung, die sich unterschiedlicher Methoden bedienen, die vorhandene Zahnhartsubstanz freizulegen und damit eine Restauration zu ermöglichen: die chirurgische Kronenverlängerung und die Extrusion.

### **1.6.1. Chirurgische Kronenverlängerung**

Bei der chirurgischen Kronenverlängerung wird durch einen kleinen, zumeist unter Lokalanästhesie stattfindenden chirurgischen Eingriff die Zahnhartsubstanz durch eine Reduktion des umliegenden Knochen- und Weichgewebes so weit reduziert, dass für eine prospektive Kronenversorgung genug Zahnhartsubstanz bzw. Wurzeloberfläche vorliegt [58]. Dieser operative Eingriff führt immer zu einer Verlängerung der klinischen Krone, was vor allem im sichtbaren Bereich mit erheblichen ästhetischen Nachteilen verbunden ist [59]. Da bei der orthodontischen Extrusion die Dimension der klinischen Krone nicht verändert wird, ist diese Therapieform in ästhetischer Hinsicht vorteilhafter und wird immer mehr als valide Therapiealternative zur chirurgischen Kronenverlängerung angesehen [60, 61]. Darüber hinaus ist im Hinblick auf eine prospektive Implantation bei einem Versagen des restaurierten Zahnes eine Reduktion der knöchernen und weichgewebigen Anteile nicht zielführend, da für eine Implantation ein ausreichendes natives Knochenangebot vorliegen muss. Darüber hinaus scheint die Stabilität der umliegenden Weichgewebe nach chirurgischer Kronenverlängerung nicht sicher vorhersagbar zu sein [62]. Hinzu kommt, dass für gesundheitlich kompromittierte und Patienten mit anderen Risikofaktoren in der Anamnese chirurgische Eingriffe nur unter strengen Voraussetzungen erfolgen können und in einigen klinischen Situationen sogar kontraindiziert sind. Insgesamt liegen in der Literatur wenige Studien vor, die sich dem Therapiekonzept der chirurgischen Kronenverlängerung widmen [62, 63]. Eine davon konnte retrospektiv zeigen, dass sich eine chirurgische Kronenverlängerung per se negativ auf das Langzeitüberleben von endodontisch behandelten Zähnen auswirkt [63]. Übersteigt durch den chirurgischen Eingriff das Kronen-Wurzel-Verhältnis des endodontisch behandelten Pfeilerzahnes den Faktor 1, ist von einer deutlich geringeren Überlebensrate auszugehen [63]. Insofern scheint das Kronen-Wurzel-Verhältnis bei der Prognose endodontisch behandelter, restaurierter Zähne eine entscheidende Rolle zu spielen. Sowohl bei dem Konzept der chirurgischen Kronenverlängerung als auch bei der Extrusion wird das Kronen-Wurzel-

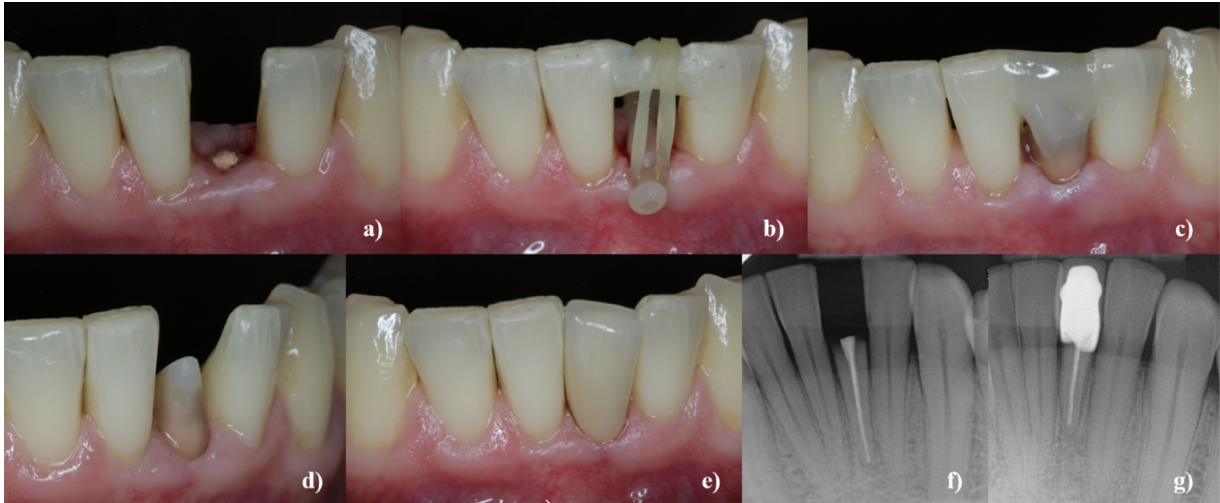
Verhältnis zwangsläufig kompromittiert. Bei der chirurgischen Kronenverlängerung erfolgt durch die Verlängerung der klinischen Krone in gleichem Maße die Verkürzung der Wurzel. Im Gegensatz hierzu wird bei der Extrusion lediglich die Wurzellänge verändert, während die Länge der klinischen Krone konstant bleibt. Aus diesem Grund ergibt sich bei der Extrusion grundsätzlich ein günstigeres Kronen-Wurzel-Verhältnis als bei der chirurgischen Kronenverlängerung, woraus sich ein weiteres Argument für das Therapiekonzept der Extrusion ergibt [64].

### **1.6.2. Orthodontische Extrusion**

Die orthodontische Extrusion stellt neben dem Verfahren der chirurgischen Kronenverlängerung eine präprothetische Maßnahme dar, um die Restauration eines tief zerstörten Zahnes zu ermöglichen [59]. Diese ist als eine koronale Bewegung des Zahnes in okklusale Richtung aus seinem Alveolarfach definiert [58]. Die Extrusion ermöglicht eine Wiederherstellung der biologischen Breite, den Erhalt der umliegenden Weich- und Hartgewebe und legt Zahnoberfläche für prospektive Restaurationsränder frei [59]. Diese Therapieform ist bei Zähnen mit Querfrakturen oder horizontalen Frakturen, kariösen Läsionen und iatrogenen Perforationen indiziert [59]. Dabei existieren verschiedene Techniken, um diese Bewegung zu ermöglichen. Grundsätzlich kann zwischen der chirurgischen Extrusion [65-67] und der orthodontischen Extrusion unterschieden werden [68]. Während die chirurgische Extrusion in einer Sitzung erfolgt, ist für die orthodontische Extrusion von einer Extrusionszeit von etwa 20 Tagen auszugehen [59]. Dabei kann die orthodontische Bewegung mit Hilfe von Magneten [69], festsitzenden Apparaturen in Form von Multibracketapparaturen [70], herausnehmbaren kieferorthopädischen Geräten [71], herausnehmbaren Prothesen [72] oder totalen Prothesen [73] umgesetzt werden. Darüber hinaus kann zwischen einer forcierten bzw. schnellen und einer langsamen Bewegung differenziert werden [59]. Das Konzept der forcierten kieferorthopädischen Extrusion bedient sich hohen Kräften. Durch deren Applikation im Prozess der forcierten Extrusion und durch eine suprakrestale Fibrektomie wird in der Theorie eine koronale Migration des umliegenden Faserapparates und des Weichgewebes limitiert, da die Bewegung die physiologische Adaptation der umgebenden Gewebe übersteigt [59]. Das folgende Fallbeispiel demonstriert die Wiederherstellung der klinischen Krone für einen tief zerstörten Zahn mit Hilfe der forcierten orthodontischen Extrusion (Abbildung 1).

Das Konzept der kieferorthopädischen Extrusion wurde bereits 1973 als Verfahren zum Erhalt tief frakturierter Zähne erstmals beschrieben [74]. Die Darstellung dieser Technik ist in der Literatur auf Fallserien und Fallberichte beschränkt [75, 76]. Daten zur Langzeitbewahrung

liegen nicht vor [68]. Eine vergleichbare Studie, die Kurzzeitdaten zu dieser Therapieform auswertet, zeigt nach einer mittleren Beobachtungszeit von 3,3 Jahren eine Überlebensrate von 94 % und beschreibt orthodontische Intrusionen und limitiert externe Wurzelresorptionen als häufigste Komplikationen [77].



**Abbildung 1: Klinischer Arbeitsablauf der orthodontischen Extrusion zur Restauration eines tief zerstörten Frontzahnes [78].**

(a) Auf dem klinischen Bild ist ein durch Karies tief zerstörter und endodontisch behandelter Zahn 31 zu sehen. Nach Kariesexkavation war ein subkrestales Defektniveau sichtbar. (b) Auf der Wurzeloberfläche wurde ein glasfaserverstärkter Kompositstift (Extrusionsstift, Komet Dental, Lemgo, Deutschland) mit einem selbstadhäsiven Befestigungszement (RelyX Unicem 2 Automix, 3M, Neuss, Deutschland) im Wurzelkanal befestigt. Als Widerlager diente ebenfalls ein glasfaserverstärkter Kompositstift, der an den Nachbarzähnen volladhäsiv mit Komposit (Tetric EvoFlow, Ivoclar, Schaan, Liechtenstein) verankert wurde. Es erfolgte eine suprakrestale Fibrektomie unter Lokalanästhesie. Die Kraft der orthodontischen Gummis initiierte eine gerichtete kieferorthopädische Bewegung. (c) Nach der erfolgreichen Extrusion wurde der Zahn für die Zeit der Retention mit Hilfe von Komposit an den Nachbarzähnen volladhäsiv befestigt. (d) Es erfolgte eine zirkumferente Hohlkehlpräparation für die Aufnahme einer vollkeramischen Krone. (e) Die Krone wurde mit einem selbstadhäsiven Befestigungszement (RelyX Unicem 2 Automix) eingegliedert. (f) Das Röntgenbild vor Behandlung zeigt einen endodontisch behandelten tief zerstörten Zahn. (g) Auf dem radiologischen Kontrollbild bei der Nachuntersuchung sind keine pathologischen Auffälligkeiten erkennbar.

### **1.6.3. Chirurgische Extrusion**

Als Alternative zur orthodontischen Extrusion ist die chirurgische Extrusion [79, 80] anzusehen, die in der wissenschaftlichen Literatur auch synonym als „intra-alveoläre Transplantation“ bezeichnet wird. Bei der chirurgischen Extrusion wird der Zahn zunächst möglichst atraumatisch aus dem Alveolarfach entfernt und nachfolgend weiter nach koronal positioniert, um eine Restauration zu ermöglichen [66]. Im Gegensatz zur orthodontischen Extrusion ist die chirurgische Extrusion ein einzeitiges Verfahren und insoweit dem Konzept der orthodontischen Extrusion vom zeitlichen Aufwand überlegen. Grundlage für diese Technik ist jedoch die atraumatische Entfernung des Zahnes, die auf Grund von anatomischen Gegebenheiten wie Wurzeldeformationen, -krümmungen oder Ankylosen nicht immer realisiert werden kann. Durch die Anwendung von Luxatoren, Elevatoren und Periotomen bei der Zahnextraktion besteht das Risiko einer Zahnfraktur sowie von Schäden am parodontalen Gewebe und der Zahnwurzel selbst. Aus diesem Grund wurde von der Autorengruppe um Krug et al. im Zusammenhang mit der chirurgischen Extrusion die Zahnextraktion mit Hilfe eines axialen Zugsystems beschrieben, das intraradikulär verankert wird und zu einer atraumatischen Zahnextraktion beiträgt [66]. Die Autoren konnten jedoch bei der Nachuntersuchung nach einem Beobachtungszeitraum von 3,1 Jahren in ca. 10 % der Fälle radiologische Anzeichen von Wurzelresorptionen beobachten. Diese Ergebnisse werden durch eine systematische Übersichtsarbeit bestätigt. Diese zeigt, dass in 30 % der klinischen Fälle nicht-progrediente Wurzelresorptionen, in 5 % Zahnextraktionen, in 5 % eine erhöhte Zahnbeweglichkeit, in 4 % ein marginaler Knochenabbau und in 3 % eine progressive Wurzelresorption beobachtet werden können [81].

### **1.7. Therapiekonzepte bei Zahnentfernung**

Die Therapiealternative für tief zerstörte Zähne stellt die Zahnextraktion dar, die zum Lückenschluss eine prothetische Rehabilitation in Form von Brückenversorgungen oder implantatgetragenen Restaurationen nach sich zieht. Aus der Literatur ist bekannt, dass eine Zahnextraktion immer mit einem Knochen- und Weichgewebsabbau einhergeht [82]. Dies kann zu restaurativen Limitationen beitragen und im Allgemeinen eine Herausforderung für Rehabilitationen besonders im ästhetischen Bereich darstellen. Insofern ist bei der Therapieplanung zu berücksichtigen, dass je nach Art der Versorgung mit augmentativen Maßnahmen zu rechnen ist. Zunächst wird in den meisten klinischen Fällen für die Dauer der Ausheilung der Extraktionswunden und zur Verhinderung von Mesial- oder Distalkippungen der Nachbarzähne und von Elongationen der antagonistischen Zähne ein provisorischer

Zahnersatz angefertigt. Nach der Wundheilung sind konventionelle Brückenversorgungen [83, 84], Adhäsivbrücken [85-88] und implantatgetragene Restaurationen [89, 90] denkbare definitive Therapieoptionen mit durchaus erheblichen Komplikationen und Nachteilen.

### **1.7.1. Brückenversorgung**

Brückenversorgungen stellen ein sowohl klinisch als auch wissenschaftlich etabliertes Therapiekonzept für den Ersatz fehlender Zähne dar [83]. Für die Aufnahme einer Brücke muss eine invasive Präparation der klinischen Kronen der lückenbegrenzenden Nachbarzähne erfolgen. Dabei beläuft sich das Ausmaß des koronalen Substanzverlustes auf 63 % bis 72 % des koronalen Anteils im Frontzahnbereich [91] und auf 68 % bis 76 % der klinischen Krone im posterioren Bereich [92]. Insofern stellt die konventionelle Brückenversorgung eine sehr invasive und bezogen auf den Verlust natürlicher Zahnhartsubstanz irreversible Therapiemaßnahme dar. Im Rahmen der Präparation kann deshalb ein Vitalitätsverlust der Zähne auftreten [93]. In einer klinischen Nachuntersuchung waren nach vier Jahren 9 % der überkronten Pfeilerzähne avital, und 1 % der Pfeilerzähne wies eine radiologische Transluzenz auf. Nach 10 Jahren waren 15 % der Pfeilerzähne avital und bei 3 % der Pfeilerzähne war radiologisch eine apikale Aufhellung ersichtlich [93]. In einer systematischen Übersichtsarbeit werden für konventionelle zahngetragene Brücken nach 5 Jahren Überlebensraten von 94 % und nach 10 Jahren von 89 % angegeben [83]. Dabei stellen auch in dieser Übersichtsarbeit Vitalitätsverluste und Sekundärkaries die häufigsten Komplikationsformen von konventionellen Brücken dar [83]. Technische Misserfolge und Materialversagen in Form von Chipping des Verblendmaterials oder Gerüstfrakturen sind weitere Komplikationen [84], die unter anderem auch von der Art der verwendeten Materialien abhängig sind.

### **1.7.2. Adhäsivbrückenversorgung**

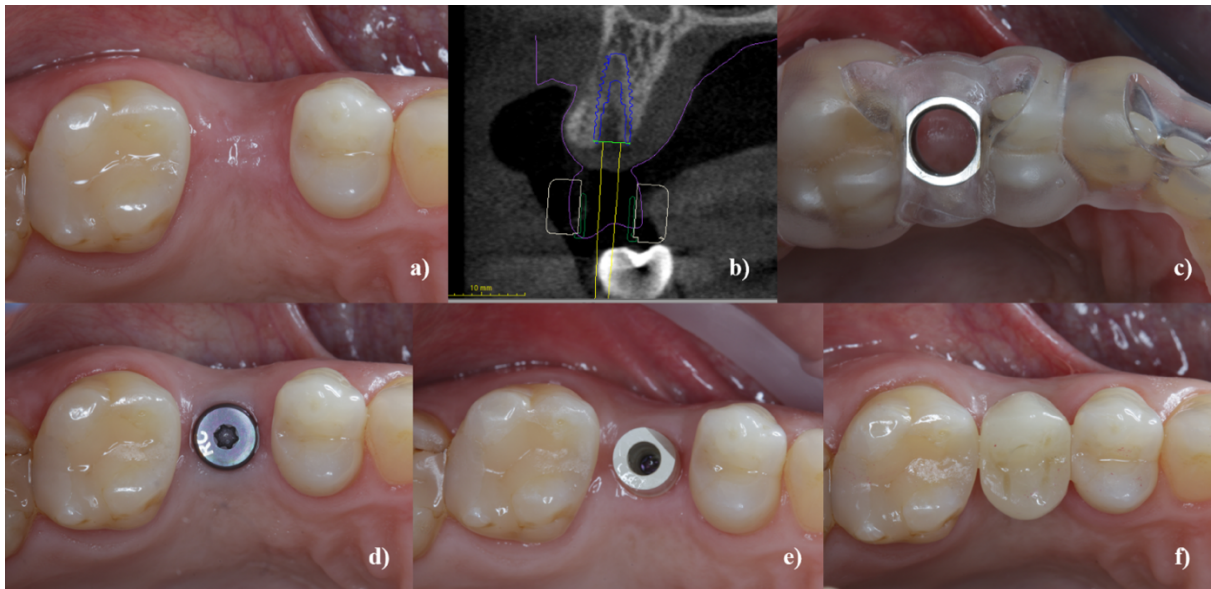
Auf Grund des oben beschriebenen erheblichen Zahnhartsubstanzverlustes [91, 92] und des Risikos einer irreversiblen Pulpaschädigung [93], die mit einer konventionellen Brückenversorgung einhergehen, hat neben der implantatprothetischen Rehabilitation die Adhäsivbrückenversorgung immer mehr an Bedeutung gewonnen [88]. Adhäsivbrücken sind zum Lückenschluss bei zumeist intakten und füllungsfreien Nachbarzähnen mit einer ausreichenden Schmelzoberfläche für die adhäsive Zementierung indiziert [88]. Demgegenüber stellt unter anderem ein Tiefbiss eine Kontraindikation für Adhäsivbrücken dar. Gerade Kinder, die sich noch im Wachstum befinden oder Patienten, bei denen anatomische oder allgemeinmedizinische Faktoren gegen eine Implantation sprechen, profitieren von dieser Versorgungsform. Adhäsivbrücken sind dabei besonders für Versorgungen im

Frontzahnbereich indiziert. Nach 5 Jahren zeigt sich eine Überlebensrate von 100 % für einflügelige Adhäsivbrücken [94]. Die häufigste Art der Komplikation scheint dabei die Dezementierung darzustellen. In einer systematischen Übersichtsarbeit werden Überlebensraten von 88 % und eine Dezementierungsrate von 19 % nach einem Beobachtungszeitraum von 5 Jahren angegeben [85]. Da für die Verwendung von Adhäsivbrücken im Eckzahn- und Prämolarenbereich bisher noch keine ausreichende wissenschaftliche Evidenz vorliegt, ist die Adhäsivbrückenversorgung in dieser Region als Ausnahmeindikation zu betrachten.

### **1.7.3. Implantatversorgung**

Als Alternative zu Brückenversorgungen kommt eine aus Patientensicht kostenintensive implantatprothetische Rehabilitation in Betracht [95]. Der Anteil an in Deutschland inserierten Implantaten nimmt laut der 5. Mundgesundheitsstudie stetig zu [96]. Die hohen Überlebensraten von implantatprothetischen Rehabilitationen von 96 % nach 5 Jahren und 89 % nach 10 Jahren zeugen von der Nachhaltigkeit dieses Therapiekonzeptes [97]. Insbesondere bei vitalen und füllungsfreien Nachbarzähnen stellen Implantate eine valide Therapiealternative zu konventionellen Brücken- oder Adhäsivbrückenversorgungen dar. Neben allgemeinmedizinischen Risiken und Kontraindikationen für operative Eingriffe können jedoch lokale Risikofaktoren gegen eine Implantation sprechen. So stellen systemische Knochenerkrankungen, Blutgerinnungsstörungen, Erkrankungen des Immun- oder Kreislaufsystems, Stoffwechselerkrankungen wie Diabetes mellitus, Bestrahlungen im Kopf- und Halsbereich, eine intravenöse Therapie mit Bisphosphonaten sowie ein Nikotinabusus absolute und relative Kontraindikationen dar [98, 99]. Darüber hinaus spielt das Alter des Patienten eine Rolle, da vor Abschluss des Knochenwachstums keine Implantation erfolgen sollte [100]. Zu lokalen Risikofaktoren gehören dabei parodontale Vorerkrankungen, die anatomische Nähe zu relevanten Gefäß- oder Nervstrukturen sowie Defizite der Hart- und Weichgewebe, die meist im Zusammenhang mit der Zahnextraktion entstehen [82] und umfangreiche Augmentationsmaßnahmen nach sich ziehen können. Um diese in aller Regel aufwendigen Augmentationsmaßnahmen zu umgehen und den vorgenannten Knochenresorptionen entgegenzuwirken, wird die Sofortimplantation nach Extraktion als Alternative zur konventionellen Implantation kontrovers diskutiert [101-104]. Eine systematische Übersichtsarbeit schlussfolgert, dass eine Sofort- oder eine frühzeitige Implantation zu einem ästhetisch ansprechenden Ergebnis führen kann [105]. Klinische Studien konnten dabei jedoch zeigen, dass eine bukkale Rezession eine häufige Komplikation

darstellt [106, 107]. Darüber hinaus wird die Sofortimplantation als ein komplexer operativer Eingriff angesehen, der eher für erfahrene Behandler und bei Vorliegen idealer anatomischer Ausgangsvoraussetzungen empfohlen wird [108]. Das folgende klinische Fallbeispiel zeigt den Arbeitsablauf für eine implantatprothetische Rehabilitation (Abbildung 2).



**Abbildung 2: Klinischer Arbeitsablauf einer implantatprothetischen Rehabilitation [78].**

(a) Die initiale klinische Situation zeigt eine ausgeheilte Alveole nach Zahnextraktion des Zahnes 15. (b) Zunächst wird die Implantatposition mit Hilfe einer digital gestützten Planungssoftware (coDiagnostix, Dental Wings, Chemnitz, Deutschland) festgelegt. (c) Es wird eine Operationsschablone für die navigierte Implantation hergestellt. (d) Es erfolgt die Insertion eines 4.1 mm breiten und 10 mm langen Implantates (S-BLT, Straumann, Freiburg, Deutschland) in ortsständigem Knochen. Nach einer gedeckten Einheilung wird nach drei Monaten eine Freilegung des Implantates durchgeführt. (e) Die Implantatposition wird mit Hilfe eines optoelektronischen Scanners dreidimensional erfasst. (f) Es erfolgt die Eingliederung einer okklusal verschraubten vollkeramischen Krone auf einer Titanklebebasis.

Trotz der guten Prognose, die durch viele klinische Daten untermauert ist [109], werden in der wissenschaftlichen Literatur biologische und technische Komplikationen für implantatgetragenen Zahnersatz beschrieben. Dabei sind technische Komplikationen zumeist in Form von Schrauben- und Abutmentlockerungen oder Materialversagen zu beobachten, während biologische Komplikationen in Form von periimplantärer Mukositis und Periimplantitis auftreten [89].

## **1.8. Die Bedeutung wirtschaftlicher Aspekte und der Patientenperspektive in der Therapieauswahl**

Neben Überlebens- und Erfolgsraten aus der wissenschaftlichen Literatur, anamnestischen Risikofaktoren und anatomischen Ausgangsvoraussetzungen spielen ökonomische Aspekte sowie die Perspektive des Patienten auf die Behandlung eine entscheidende Rolle bei der Therapieauswahl.

Das Ziel von ökonomischen Analysen ist dabei die Erforschung des Nutzens von therapeutischen, diagnostischen und präventiven Maßnahmen. Dabei stehen grundsätzlich verschiedene Arten der Wirtschaftlichkeitsanalyse in der medizinischen Versorgungsforschung zur Verfügung [110]. So werden bei Kosten-Nutzen-Analysen alle Kosten und der Nutzen in monetären Einheiten berechnet, während bei Kosten-Effektivitätsanalysen die Kostenparameter in monetären Einheiten erfasst und Effektivitätsparametern in nicht-monetären Einheiten gegenübergestellt werden [110]. Bei Kosten-Nutzwert-Analysen werden die Kosten wiederum monetär ausgedrückt und die Nutzwerte als Präferenzen einer betroffenen Patientengruppe definiert [110]. Unabhängig von der Art der Wirtschaftlichkeitsanalyse kann die wirtschaftliche Bewertung einer Therapieform eine entscheidende Rolle im Entscheidungsprozess einnehmen, weil diese für Kostenträger auf allen Ebenen von Interesse sind: für Patienten, für Versicherungen, für Entscheidungsträger im zahnmedizinischen Gesundheitswesen und für den Dienstleister bzw. Zahnarzt. Die Kostenparameter können dabei in Form von direkten medizinischen Kosten auf der einen Seite und indirekten Kosten bzw. Opportunitätskosten auf der anderen Seite erfasst werden. Für das Therapiekonzept der orthodontischen Extrusion zur Restauration tief zerstörter Zähne besteht zurzeit keine wissenschaftliche, gesundheitsökonomische Datenlage.

In jüngerer Zeit rückt die Perspektive des Patienten immer mehr in den Fokus wissenschaftlicher Untersuchungen, weil sie einen entscheidenden Beitrag zur Therapieauswahl darstellt. Ziel derartiger Analysen ist die Evaluation der Auswirkungen einer bestimmten Erkrankung oder Therapiemaßnahme auf das soziale, psychische, mentale und allgemeine Befinden der betroffenen Patienten. Dabei steht das subjektive Empfinden des Patienten im Mittelpunkt der Betrachtungen. Die Messung erfolgt hierbei üblicherweise durch validierte Fragebögen, Indizes, Skalen oder weitere Indikatoren. Der in der Zahnmedizin am häufigsten verwendete Fragebogen ist der OHIP (Oral Health Impact Profile), der von Slade und Spencer 1994 erstmals beschrieben wurde [111]. Der Fragebogen wurde in unterschiedlichen Ländern in verschiedenen Versionen validiert und stellt ein geeignetes



Instrument dar, die patienten- und die mundgesundheitsbezogene Lebensqualität zu erfassen [112]. Der Fragebogen misst darüber hinaus das Ausmaß unterschiedlicher Beeinträchtigungen und differenziert dabei zwischen funktionellen Einschränkungen, Schmerzen, psychischem Unwohlsein/Unbehagen, physischer Beeinträchtigung, psychischer Beeinträchtigung, sozialer Benachteiligung und Behinderung. Die mundgesundheitsbezogene Lebensqualität wird dabei als eine Punktschme ermittelt und erlaubt den Vergleich unterschiedlicher Therapiemaßnahmen miteinander.

Die Therapiekonzepte der Restauration nach orthodontischer Extrusion und der Implantation nach Zahnextraktion stellen alternative Behandlungsformen für die klinische Situation eines tief zerstörten Zahnes dar. Zurzeit existieren keine klinischen Studien, die die Überlebens- und Erfolgsraten beider Therapiekonzepte im Vergleich untersuchen. Darüber hinaus liegt keine gesundheitsökonomische und patientenbezogene wissenschaftliche Datenlage vor, auf deren Grundlage für diese klinische Situation eine Empfehlung für das eine oder das andere Therapiekonzept ausgesprochen werden könnte.

## 1.9. Fragestellungen

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Ziel, das Langzeitüberleben postendodontischer Restaurationen zu bewerten und das Konzept der orthodontischen Extrusion als Behandlungsstrategie für die Restauration tief zerstörter Zähne in Bezug auf das klinische Überleben und den Behandlungserfolg zu untersuchen sowie das Behandlungskonzept aus einer gesundheitsökonomischen Perspektive zu betrachten. Darüber hinaus soll dieses Therapiekonzept hinsichtlich ökonomischer Faktoren und patientenbezogener Parameter mit dem Therapiekonzept der implantatprothetischen Restauration verglichen werden.

Für die Bewertung auf Basis von klinischen Untersuchungen wurden hierzu folgende Fragestellungen bearbeitet:

Gibt es einen Unterschied in der Langzeitüberlebensrate tief zerstörter, endodontisch behandelter Zähne, die mit rigiden Metallstiften im Vergleich zu faserverstärkten Kompositstiften restauriert wurden?

Welche Überlebens- und Erfolgsrate haben Zähne, die nach orthodontischer Extrusion restauriert wurden, und welche Komplikationen sind nach einer Beobachtungszeit von bis zu 5 Jahren zu erwarten?

Mit welchen direkten und indirekten medizinischen Kosten und Opportunitätskosten ist bei dem Konzept der orthodontischen Extrusion und Restauration von tief zerstörten Zähnen in einer gesundheitsökonomischen Bewertung a) zum Zeitpunkt der initialen Therapie und b) nach einem Beobachtungszeitraum von bis zu 6 Jahren zu rechnen?

Wie unterscheiden sich die Therapiekonzepte der Restauration tief zerstörter Zähne nach orthodontischer Extrusion im Vergleich zur implantatprothetischen Restauration aus ökonomischer Perspektive? Mit welchen Unterschieden hinsichtlich der direkten, indirekten medizinischen Kosten und Opportunitätskosten ist zu rechnen?

Wie hoch ist die Patientenzufriedenheit zu unterschiedlichen Behandlungszeitpunkten während der orthodontischen Extrusion und der implantatprothetischen Rehabilitation im Vergleich?

## 2. Eigene Arbeiten

### 2.1. Langzeitüberleben endodontisch behandelter Zähne mit adhäsiv befestigten Aufbaustiften im Wurzelkanal

*Bruhnke M, Wierichs RJ, von Stein-Lausnitz M, Meyer-Lückel H, Beuer F, Naumann M, Sterzenbach G (2022). Long-term Survival of Adhesively Luted Post-endodontic Restorations. Journal of Endodontics 48 (5), 606-613.*

<https://doi.org/10.1016/j.joen.2022.02.006>

Trotz jahrzehntelanger klinischer Erfahrung liegt für die Restauration endodontisch behandelter Zähne noch immer keine ausreichende wissenschaftliche Evidenz vor. Es existiert zwar eine Vielzahl an Studien, die verschiedene Stiftsysteme mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften sowohl *in vitro* als auch *in vivo* untersuchen, klinisch vergleichende Langzeitdaten sind jedoch rar. Ziel dieser prospektiven klinischen Observationsstudie war es, die Überlebensraten von Restaurationen endodontisch behandelter Zähne zu vergleichen, die mithilfe unterschiedlicher selbstadhäsiv im Wurzelkanal zementierter Aufbaustifte realisiert wurden. Das Studiendesign ist eine Erweiterung der bereits publizierten randomisierten klinischen Studie und stellt zwei unterschiedliche, adhäsiv befestigte Glasfaserstifte den rigideren Titanstiften gegenüber. Auf Basis des verwendeten Stiftmaterials wurden insgesamt drei Gruppen definiert: GFP I (Fiberpoints Root Pins Glass, Schuetz Dental Group, Rosbach, Deutschland), GFP II (RelyX Fiber Post, 3M, Neuss, Deutschland) und TP (Fiberpoint Root Pins Titanium, Schuetz Dental Group). Insgesamt konnten 128 Patienten eingeschlossen werden. Alle Aufbaustifte wurden mit einem selbstadhäsiven Befestigungszement im Wurzelkanal befestigt, die Zähne mit Kompositmaterialien aufgebaut und mit Vollkronen versorgt. Bei stark zerstörten Zähnen erfolgte eine chirurgische Kronenverlängerung, um eine zirkumferente Ferrulepräparationsform zu ermöglichen. Der primäre Endpunkt war die Überlebensrate der Restauration bei der Nachuntersuchung. Sekundäre Endpunkte waren als Komplikationen in Form von Restaurationsverlusten, Stiftfrakturen, Stiftdezementierungen, horizontalen oder vertikalen Frakturen, Zahnverlusten auf Grund von Sekundärkaries, von parodontalen oder endodontischen Komplikationen und Veränderungen im Therapieplan definiert. Die Patienten wurden nach 6, 12, 24 und nach bis zu 178 Monaten klinisch und radiologisch untersucht. Die statistische Auswertung erfolgte mit dem Log-Rank Test und einer Cox-Regressionsanalyse. Nach einer Untersuchungszeit von bis zu 178 Monaten waren 49 Restaurationen *in situ* (GFP I: 18, GFP II: 12, TP: 19) und 26 Restaurationen wurden als

Misserfolge gewertet (GFP I: 10, GFP II: 9, TP: 7). Die kumulativen Überlebensraten waren 57 % für GFP I, 57 % für GFP II und 72 % für TP. In der bivariaten Regressionsanalyse hatten die Faktoren Zahnart und Abrasionsgrad einen signifikanten Einfluss auf die Überlebensrate. Eckzähne zeigten eine signifikant höhere Überlebensrate, während Zähne mit einem Abrasionsgrad III mehr Misserfolge aufwiesen. In der multivariaten Regressionsanalyse wirkte sich keiner der untersuchten Parameter signifikant aus. Dabei hatte die Art des Aufbaustiftes auch keinen signifikanten Einfluss auf die Überlebensrate. Beim Vergleich von dentinähnlichen glasfaserverstärkten Kompositstiften und rigiden Titanstiften in einem Beobachtungszeitraum von bis zu 15 Jahren hat die Art des Stiftes, unter der Voraussetzung einer selbstadhäsiven Zementierung des Aufbaustiftes im Wurzelkanal und dem Vorhandensein einer zirkulären Dentinmanschette, keinen Einfluss auf die Überlebensrate.

## **2.2. Forcierte orthodontische Extrusion zur Restauration tief zerstörter Frontzähne und Prämolaren als Pfeiler für Einzelzahnkronen: bis zu 5-Jahresdaten einer klinischen Pilotstudie**

*Bruhnke M, Beuer F, Böse MWH, Naumann M (2023). Forced orthodontic extrusion to restore extensively damaged anterior and premolar teeth as abutments for single-crown restorations: Up to 5-year results from a pilot clinical study. Journal of Prosthetic Dentistry 129 (1), 61-68. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2022.08.033>*

Klinische Daten zum Therapiekonzept der orthodontischen Extrusion zur Restauration tief zerstörter Zähne sind auf Fallberichte und Fallserien beschränkt. Die einzige vergleichbare Studie zum Thema der forcierten orthodontischen Extrusion stellt klinische Daten über einen Beobachtungszeitraum von bis zu zwei Jahren dar [77]. Ziel dieser klinischen Pilotstudie war es, die Überlebensrate sowie die Häufigkeiten und Arten von Komplikationen von tief zerstörten Zähnen nach orthodontischer Extrusion und Restauration mit Einzelzahnkronen zu untersuchen. Die Patienten wurden im Rahmen der regulären Behandlung in der Abteilung für Zahnärztliche Prothetik, Alterszahnmedizin und Funktionslehre an der Charité – Universitätsmedizin rekrutiert. Folgende Einschlusskriterien wurden definiert: bleibende Zähne mit subgingivalen oder subkrestalen Defekträndern, prospektive Versorgung mit Einzelzahnkronen und zwei approximalen Kontaktpunkten, Sondierungstiefen von  $\leq 2\text{mm}$  und Verletzung der biologischen Breite auf Defektebene, fehlende Ferrulepräparationsform, prospektives Kronen-Wurzel-Verhältnis  $\leq 1$ , Zahnbeweglichkeit  $\leq 1$ . Alle Zähne wurden orthodontisch bewegt, um eine prospektive Ferruledesignpräparation zu ermöglichen und/oder die biologische Breite wiederherzustellen. Als primäre Endpunkte wurden das Überleben und der Erfolg der Restaurationen festgelegt. Als Überleben wurde dabei ein bei der Nachuntersuchung *in situ* befindlicher Zahn definiert. Für einen Erfolg der Restauration mussten folgende Kriterien erfüllt werden: ein extrudierter Zahn mit einer intakten Restauration ohne Anzeichen von Sekundärkaries, Ankylose oder Intrusion, klinische Symptombefreiheit bei Abwesenheit von radiologischen Auffälligkeiten in Form von apikalen Entzündungen und physiologische Sondierungstiefen bei der Nachuntersuchung. Nach einem Beobachtungszeitraum von bis zu 5 Jahren wurden die Patienten sowohl klinisch als auch radiologisch untersucht. In die Studie eingeschlossen wurden insgesamt 34 Patienten (Alter:  $53 \pm 19$  Jahre). Bei 4 Patienten wurde die Behandlung abgebrochen. Aus diesem Grund wurden Daten von 30 Patienten und 35 Zähnen analysiert. Quantitative Parameter wurden mit

Hilfe von Mittelwerten und Standardabweichungen beschrieben. Der Betrag der Extrusion variierte zwischen 2 und 6 mm (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung: 3,4 mm  $\pm$  0,9 mm). Die mittlere Extrusionszeit betrug 18,9  $\pm$  12,6 Tage und die mittlere Retentionszeit 126,9  $\pm$  88,1 Tage. Das mittlere Kronen-Wurzel-Verhältnis nach Restauration betrug 0,8  $\pm$  0,1 und reichte von 0,5 bis 1. Bei drei Patienten wurde eine Intrusion vor der definitiven Restauration beobachtet. Diese Zähne konnten nach einer erneuten Extrusion erfolgreich restauriert werden. Zwei Zähne mussten aufgrund einer Fraktur entfernt werden. Vier Patienten erschienen nicht zum Recall. Die Überlebensrate betrug somit 94 % und die Erfolgsrate 84 %. Radiologisch waren bei der Nachuntersuchung weder Resorptionen noch apikale Transluzenzen erkennbar. Die klinischen Untersuchungen zeigten physiologische Taschentiefen und die Abwesenheit von Ankylosen. Beim Vergleich der Röntgenbilder vor und nach der orthodontischen Extrusion wurde bei den meisten Zähnen eine Tendenz zur Zunahme des marginalen Knochniveaus festgestellt. Bei einem Zahn war ein marginaler Knochenabbau erkennbar. Die häufigste Art der Komplikation war die Intrusion beim Recall (n = 3). Die vorliegende klinische Pilotstudie konnte zeigen, dass die orthodontische Extrusion die Restauration von tief zerstörten Frontzähnen und Prämolaren mit prospektiven Einzelzahnkronen ermöglicht.

### **2.3. Gesundheitsökonomische Bewertung der forcierten orthodontischen Extrusion tief zerstörter Zähne: bis zu 6-Jahresdaten einer klinischen Studie**

*Bruhnke M, Naumann M, Böse MWH, Beuer F, Schwendicke F (2023). Health economic evaluation of forced orthodontic extrusion of extensively damaged teeth: up to 6-year results from a clinical study. Clinical Oral Investigations 27 (9), 5587-5594.*

<https://doi.org/10.1007/s00784-023-05178-w>

Klinische Daten zum Konzept der orthodontischen Extrusion zum Erhalt von tief zerstörten Zähnen sind rar und ökonomische Daten nicht vorhanden. Auf Basis der vorliegenden klinischen Studie erfolgte eine Post-hoc-Analyse und gesundheitsökonomische Bewertung dieser Therapieform. Im Rahmen von zahnärztlichen Routinebehandlungen an der Charité – Universitätsmedizin Berlin, Abteilung für Zahnärztliche Prothetik, Alterszahnmedizin und Funktionslehre wurden tief zerstörte Zähne nach orthodontischer Extrusion mit Einzelzahnkronen versorgt und die Patienten für bis zu 6 Jahre nachuntersucht. Auf Basis von elektronischen Patientenakten wurden alle endodontischen, parodontalen und restaurativen initialen Maßnahmen, Nachbehandlungen, einschließlich der restaurativen Therapiemaßnahmen bei Misserfolgen (Zahnextraktion und Zahnersatz) sowie Art und Anzahl der verwendeten Materialien erfasst. Darüber hinaus wurden Daten wie das Alter, Geschlecht der Patienten und die Art des Zahnes erhoben. Die Kostenparameter wurden im deutschen Gesundheitssystem aus der Perspektive der privaten Kostenträger auf Basis eines einheitlichen Bewertungsmaßstabes in Rahmen der Gebührenordnung für Zahnärzte (GOZ) erfasst. Dabei wurde sowohl zwischen initialen und Nachbehandlungen als auch zwischen direkten medizinischen und Opportunitätskosten differenziert. Die Kosten wurden für jeden Zahn und Patienten individuell erfasst. Die direkten medizinischen Kosten wurden als Summe aller Behandlungs-, Labor- und Materialkosten definiert, die durch die initiale Diagnostik, die orthodontische Extrusion, Stift-Stumpf-Aufbauten, endodontische, parodontale und restaurative Maßnahmen sowie Nachbehandlungen verursacht wurden. Für jeden Patienten wurden auf Basis der Wohnadresse die Anfahrts- und Rückwege in Kilometern berechnet sowie die Anzahl der Termine, die für die Behandlung notwendig waren, individuell erfasst. Aus der Multiplikation der zurückgelegten Kilometer, der Anzahl der Termine und der Kilometerpauschale wurden die indirekten initialen Kosten berechnet. Die Opportunitätskosten wurden auf Basis der Dauer der Behandlung und der Zeit kalkuliert, die für die Hin- und Rückwege der Behandlung aufgebracht wurde, und mit dem Nettodurchschnittslohn in Deutschland im spezifischen Behandlungsjahr multipliziert. Prospektive Kosten wurden in

Form einer Diskontierung von 3 % berücksichtigt. Die statistische Auswertung erfolgte mit dem verallgemeinerten linearen Modell. Als sekundäre Endpunkte wurden Überleben und Erfolg definiert. Insgesamt konnten 35 Zähne bei 30 Patienten in einem mittleren Beobachtungszeitraum von 49 Monaten (Standardabweichung:  $\pm 19$  Monate) untersucht werden. Fünf Patienten waren für die Nachuntersuchungen nicht erreichbar. Die medianen initialen Kosten betragen 1941 € (Kostenspanne: 1284 - 4392 €) und die Kosten für die Nachuntersuchungen 215 € (Kostenspanne: 0 – 5812 €). Die medianen Gesamtkosten betragen 2284 € (Kostenspanne: 1453 – 7109 €). Revisionen von bestehenden endodontischen Behandlungen und die Insertion eines Aufbaustiftes hatten einen signifikanten Einfluss auf die Gesamtkosten der Behandlung. Die direkten Kosten hingen nicht vom Alter, vom Geschlecht, vom Zahntyp und der Art des Kiefers ab. Bei 3 Patienten wurde eine orthodontische Intrusion beobachtet. Darüber hinaus mussten 3 Zähne extrahiert werden: ein oberer Prämolare wurde bei einem Patienten mit Bruxismus in der Anamnese entfernt und bei 2 weiteren Patienten frakturierten die seitlichen Schneidezähne im Oberkiefer. Die Kosten waren bei diesen 3 Patienten besonders hoch, weil die Zähne entfernt und zwei Zähne mit Brücken und ein Zahn mit einer implantatgetragenen Krone ersetzt wurden. Die Überlebensrate betrug 91 % und die Erfolgsrate 83 %. Im Rahmen der Limitationen dieser klinischen Studie konnte gezeigt werden, dass die Gesamtkosten für das Konzept der orthodontischen Extrusion und nachfolgender Restauration von tief zerstörten Zähnen hauptsächlich initial verursacht werden. Bei der Nachbehandlung und in einem Beobachtungszeitraum von bis zu 6 Jahren ist dagegen von eher geringeren Kosten auszugehen, da wenige Komplikationen auftreten. Die orthodontische Extrusion und Restauration von tief zerstörten Zähnen ist initial mit erheblichen und im Verlauf der Nachuntersuchung mit eher geringen Kosten verbunden.



## 2.4. Implantat oder Zahn? – Eine Kosten-Zeit-Analyse der Therapie tief zerstörter Zähne

*Bruhnke M, Naumann M, Beuer F, Böse MWH, von Stein-Lausnitz M, Schwendicke F (2023). Implant or tooth? – A cost-time analysis of managing „unrestorable“ teeth. Journal of Dentistry 136, 104646.*

<https://doi.org/10.1016/j.jdent.2023.104646>

Die Entscheidung tief zerstörte Zähne mit subkrestalen Defekten zu erhalten und zu restaurieren oder diese Zähne zu entfernen und mit Implantaten zu ersetzen, ist Gegenstand einer kontrovers geführten Diskussion in der wissenschaftlichen Literatur. Ökonomische Auswertungen, die beide Therapiekonzepte vergleichen, liegen nicht vor. Aus diesem Grund war es das Ziel dieser prospektiven klinischen Studie, eine Kosten-Zeit-Analyse für beide Therapieformen durchzuführen und diese miteinander zu vergleichen. In einer Patientenkohorte wurden die Zähne nach orthodontischer Extrusion mit Einzelzahnkronen restauriert, während in einer zweiten Patientenkohorte die Zähne extrahiert und mit Implantaten ersetzt wurden. Die Patienten wurden aus der Routinebehandlung an der Charité – Universitätsmedizin Berlin in der Abteilung für Zahnärztliche Prothetik, Alterszahnmedizin und Funktionslehre rekrutiert. Pro Gruppe konnten 21 Patienten eingeschlossen werden. Es wurden die direkten medizinischen und indirekten Kosten (Opportunitätskosten) für alle abrechnungsrelevanten Therapieschritte (Initialbehandlung, Therapie, Restauration und Nachuntersuchung) aus der Perspektive eines privaten Kostenträgers mit Hilfe von Positionen in der Gebührenordnung für Zahnärzte (GOZ) im deutschen Gesundheitssystem auf Basis einer Mikrokostenanalyse erfasst. Darüber hinaus wurde die Anzahl der Termine und die Behandlungsdauer in Minuten individuell für jeden Patienten in beiden Untersuchungsgruppen ausgewertet. Der statistische Vergleich erfolgte mit dem Mann-Whitney-U-Test. Die Patienten wurden nach einem Beobachtungszeitraum von mindestens einem Jahr nachuntersucht (n = 40). Für jeweils einen Patienten pro Gruppe konnte keine restaurative Therapie erfolgen. Die gesamten medizinischen Kosten waren für die Implantatgruppe (Medianwert: 3439,05 €) bei  $p < 0,001$  signifikant höher als für die Extrusionsgruppe (Medianwert: 1601,46 €). Die Anzahl der Termine war für Patienten in der Implantatgruppe (Medianwert: 14,5) bei  $p = 0,002$  ebenfalls höher im Vergleich zur Extrusionsgruppe (Medianwert: 12). Dabei verbrachten die Patienten in der Extrusionsgruppe bei  $p < 0,001$  signifikant mehr Zeit in der Behandlung (Medianwert: 402,5 min) im Vergleich zur Implantatgruppe (Medianwert: 250 min). Diese Ergebnisse resultierten in vergleichbaren Opportunitätskosten für beide Untersuchungsgruppen

(Extrusionsgruppe: 304,50 €; Implantatgruppe: 328,98 €). Auf Basis der vorliegenden Daten sind implantatprothetische Rehabilitationen mit höheren initialen medizinischen Kosten und einer höheren Anzahl an Terminen im Vergleich zum Zahnerhalt und Restauration nach orthodontischer Extrusion verbunden. Gleichzeitig geht der Zahnerhalt mit einer höheren Behandlungszeit einher. Diese Umstände führen zu vergleichbaren Opportunitätskosten beider Therapieformen. Diese Daten müssen im Rahmen von klinischen Studien, die die Kosteneffektivität über einen langen Beobachtungsraum untersuchen, bestätigt werden.

## **2.5. Implantat oder Zahn? – Eine prospektive klinische Studie zur mundgesundheitsbezogenen Lebensqualität von Patienten mit tief zerstörten Zähnen**

*Bruhnke M, Naumann M, Beuer F, Herklotz I, Böse MWH, Neumeyer S, von Stein-Lausnitz M (2022). Implant or Tooth? – A Prospective Clinical Study on Oral Health-Related Quality of Life for Patients with “Unrestorable” Teeth. Journal of Clinical Medicine 11 (24), 7496.*

<https://doi.org/10.3390/jcm11247496>

In klinischen Situationen mit tief zerstörten Zähnen sind praktizierende Zahnärzte fast alltäglich mit der Entscheidung konfrontiert, den Zahn mit Hilfe von präprothetischen Therapiemaßnahmen zu erhalten oder diesen zu extrahieren und mit einem Implantat zu ersetzen. Vergleichende wissenschaftliche Studien zur Patientenzufriedenheit liegen für beide Therapiekonzepte kaum vor. Ziel dieser prospektiven klinischen Untersuchung war es, die mundgesundheitsbezogene Lebensqualität zwischen zwei Untersuchungsgruppen zu vergleichen: Restauration tief zerstörter Zähne nach orthodontischer Extrusion versus Zahnextraktion und Restauration mit implantatgetragenen Einzelkronen. Die Patienten entschieden sich nach ausführlicher Aufklärung beider Therapiekonzepte selbst für eine Therapieform. Pro Gruppe wurden 21 Patienten untersucht, die in der Charité – Universitätsmedizin Berlin in der Abteilung für Zahnärztliche Prothetik, Alterszahnmedizin und Funktionslehre behandelt wurden. Die mundgesundheitsbezogene Lebensqualität wurde mit Hilfe eines etablierten Fragebogens (OHIP-G49) zu unterschiedlichen Zeitpunkten während der Therapie erfasst: vor der Behandlung (T1), nach der Behandlung (T2), nach der Restauration (T3) und bei der Nachuntersuchung (T4). Dabei bilden kleinere Werte eine Verbesserung der mundgesundheitsbezogenen Lebensqualität ab, während größere Werte auf eine Verschlechterung der mundgesundheitsbezogenen Lebensqualität hindeuten. Insgesamt konnte für beide Untersuchungsgruppen ab dem Zeitpunkt der Behandlung bis zur Nachuntersuchung eine Verbesserung der mundgesundheitsbezogenen Lebensqualität festgestellt werden, die sich in einer Verminderung des OHIP-Gesamtscore widerspiegelte. Es gab keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Untersuchungsgruppen zu den Untersuchungszeitpunkten T1, T2, T3 und T4. Darüber hinaus wurden einzelne Fragen zu funktionellen Dimensionen gruppiert. Hier waren keine signifikanten Unterschiede zu den Untersuchungszeitpunkten T1, T2 und T4 zwischen den Untersuchungsgruppen feststellbar. Lediglich zum Untersuchungszeitpunkt T2 (nach der Behandlung) wurden signifikant höhere

Werte für die Dimensionen „funktionelle Einschränkung“ ( $p = 0,003$ ) und „physische Beeinträchtigung“ ( $p = 0,021$ ) in der Extrusionsgruppe im Vergleich zur Implantatgruppe festgestellt. Zu allen anderen Zeitpunkten zeigt die Studie ein annähernd gleiches Maß an mundgesundheitsbezogener Lebensqualität für beide Therapieformen und insgesamt eine Verbesserung der mundgesundheitsbezogenen Lebensqualität für beide Untersuchungsgruppen ab dem Zeitpunkt der Erstvorstellung der Patienten.

### **3. Diskussion**

Ziel dieser Arbeit war es, auf Basis von mehreren klinischen Studien das Therapiekonzept der orthodontischen Extrusion zum Zahnerhalt und Restauration tief zerstörter Zähne zu untersuchen und mit dem Konzept der implantatprothetischen Rehabilitation zu vergleichen.

#### **3.1. Langzeitüberleben postendodontischer Restaurationen**

Zunächst konnte anhand einer prospektiven klinischen Langzeitstudie in einem Beobachtungszeitraum von bis zu 15 Jahren und einer Gesamtanzahl von 128 Patienten gezeigt werden, dass die Restauration endodontisch behandelter Zähne sowohl mit Hilfe von rigiden Titanstiften als auch mit in ihrem mechanischen Verhalten dem Dentin ähnlichen glasfaserverstärkten Kompositstiften, die jeweils adhäsiv im Wurzelkanal befestigt werden, erfolgen kann. Die patientenbezogenen demographischen und zahnmorphologischen Charakteristika waren in allen drei Untersuchungsgruppen gleichmäßig verteilt. Die Mehrheit der Zähne in allen Gruppen waren Prämolaren, wiesen zwei proximale Kontaktpunkte auf und wurden mehrheitlich mit Einzelzahnkronen restauriert. Bei der Interpretation der Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass die Mehrheit der Zähne keine residuale Wand aufwies, sodass es sich also um Zähne mit erheblichem koronalen Substanzverlust handelte. Diese vergleichbaren Grundvoraussetzungen resultieren in relevanten Langzeitdaten für postendodontische Restaurationen von tief zerstörten Zähnen. Die residuale Zahnhartsubstanz ist als ein die Prognose bestimmender Faktor in Rahmen der postendodontischen Restauration in der Literatur bereits mehrfach beschrieben worden [16, 23, 53]. Auf Basis der Daten dieser Studie konnte gezeigt werden, dass es keinen signifikanten Zusammenhang zwischen der Variable „Stiftart“ und „Misserfolg“ gab. Diese Ergebnisse bestätigen, dass unter der Voraussetzung, dass präfabrizierte Stiftsysteme verwendet werden, die adhäsiv im Wurzelkanal verankert werden, die Auswahl des Stiftsystems weniger relevant ist, als bisher angenommen. Die klinischen Parameter „Zahnart“ (Frontzahn, Eckzahn, Prämolare, Molar) und „Abrasiongrad“ (Abrasionsgrad I-III) wurden als signifikante Faktoren für einen Erfolg bzw. Misserfolg ermittelt. Eckzähne zeigten dabei eine signifikant höhere Überlebensrate, die auf die anatomische Länge der Wurzel und die große Wurzeloberfläche zurückgeführt werden könnte. Für Zähne mit einem hohen Abrasionsgrad wurden signifikant mehr Misserfolge festgestellt, da diese Zähne einer höheren funktionellen Belastung ausgesetzt sind. Andere Studien konnten darüber hinaus belegen, dass im Allgemeinen für Frontzähne eine signifikant höhere Frakturrate besteht [113], da in dieser Region bevorzugt Scherkräfte auftreten, die für

die postendodontische Rekonstruktion ein spezifisches Versagensrisiko darstellen und somit das Frontzahnggebiet zum „Hochrisikogebiet“ für mechanisches Versagen machen. Im Vergleich dazu wird im Seitenzahnbereich bevorzugt ein kompressiver Kraftvektor parallel zur Zahnachse angenommen, der deshalb zu weniger Misserfolgen führt. Für 20 % der Zähne wurde eine chirurgische Kronenverlängerung mit dem Ziel durchgeführt, eine zirkuläre Fassreifenpräparationsform zu ermöglichen. Im Gegensatz zu dem Ergebnis einer anderen klinischen Studie [63] hatte dieser operative Eingriff keinen Einfluss auf die Überlebensrate der postendodontischen Restaurationen. Als primärer Endpunkt der vorliegenden Untersuchung wurde das Überleben der postendodontischen Restauration definiert. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie sind bei einer kumulativen Überlebensrate von rund 57 % für glasfaserverstärkte Kompositstifte mit einer prospektiven klinischen Studie, die nach 120 Monaten eine Überlebensrate von 60 % angibt [4], und einer multizentrischen Studie, die nach einer Beobachtungszeit von 91 Monaten eine Überlebensrate von 78 % darstellt [114], vergleichbar. Die Autorengruppe um Ferrari et al. berichtet von deutlich höheren Überlebensraten von 94 % nach 72 Monaten [23]. Dabei ist die Beobachtungszeit deutlich kürzer und die Studie inkludiert Zähne mit bis zu vier residualen Kavitätenwänden, für die die Indikation zur Stiftsetzung an sich fraglich erscheint. Damit sind Zähne Gegenstand der Untersuchung, die in ihrer strukturellen Beschaffenheit Zähnen der vorliegenden Untersuchung deutlich überlegen sind. Für adhäsiv zementierte Zirkoniumdioxidstifte werden ebenfalls vielversprechende Überlebensraten von 81 % nach 120 Monaten berichtet [27]. Ein grundsätzlicher Vergleich ist bedingt durch die heterogene Methodik und Beobachtungszeit in klinischen Studien nur mit Vorsicht möglich. Darüber hinaus stellt die Drop-out-Rate in klinischen Studien ein grundsätzliches Problem bei der Interpretation der Daten dar [115]. Auch in der vorliegenden Untersuchung war ein Großteil der Patienten für die Nachuntersuchungen nicht erreichbar. Da die Weiterbehandlung in unterschiedlichen Praxen erfolgte, ist die hohe Drop-out-Rate auf fehlende und veraltete Kontaktinformationen zurückzuführen. Für eine standardisierte Datenerhebung wurde die Studie in einem universitätsbasierten Umfeld durchgeführt. Die Behandlungen erfolgten durch zwei kalibrierte Behandler, die als sehr erfahren eingestuft wurden.

Im Rahmen der Limitationen dieser klinischen Untersuchung konnte gezeigt werden, dass die Art des Stiftmaterials bei einem Vergleich von rigiden Titanmaterialien mit flexiblen Materialien auf glasfaserverstärkter Kompositbasis keinen Einfluss auf das Überleben postendodontischer Restaurationen hat. Diese Schlussfolgerung steht im Einklang mit den Ergebnissen einer Studie, die bei der Evaluation von 9-Jahresdaten zwischen gegossenen Stift-

Stumpf-Aufbauten und Glasfaserstiften differenziert und keinen signifikanten Unterschied in der Überlebensrate der Restaurationen findet [116]. Bei der Betrachtung unterschiedlicher Glasfaserstiftsysteme zeigen sich ebenfalls keine Unterschiede in der Prognose der Zähne [117]. Demgegenüber ist einzig für metallische Schraubensysteme von einer deutlich geringeren Überlebensrate im Vergleich zu Glasfaserstiften bei einer Beobachtungszeit von 5 Jahren auszugehen [37]. Die Autoren schlussfolgern, dass der Gebrauch von Schraubensystemen kritisch hinterfragt werden muss, da diese Spannungen im Wurzelkanal induzieren und dadurch zu einer deutlich erhöhten Frakturrate beitragen.

Auf Grundlage der vorliegenden Ergebnisse und im Rahmen der beschriebenen Limitationen dieser klinischen Studie lässt sich schlussfolgern, dass beim Vergleich von zwei unterschiedlichen Stiftsystemen – einem dem Dentin in seinen mechanischen Eigenschaften ähnlichen und einem eher rigiden Titanstiftsystem – die Auswahl des Stiftmaterials keinen signifikanten Einfluss auf das Überleben der postendodontischen Rekonstruktion hat. Hierfür müssen jedoch zwei grundsätzliche Voraussetzungen erfüllt sein: (I) die adhäsive Zementierung der Stifte im Wurzelkanal sowie (II) das Vorliegen einer zirkumferenten Fassreifenpräparationsform.

Um diese Präparationsform konsequent umzusetzen, sind präprothetische Maßnahmen notwendig. Hierbei scheint das Konzept der Extrusion, bei dem der Zahn um einen spezifischen Betrag aus seinem Alveolarfach bewegt wird, um eine Restauration zu ermöglichen, gegenüber der chirurgischen Kronenverlängerung vorteilhaft. Das Konzept der forcierten kieferorthopädischen Extrusion war Gegenstand der vorliegenden klinischen Studien, die im Folgenden näher beschrieben werden.

### **3.2. Orthodontische Extrusion – Chancen und Herausforderungen**

Mit der vorliegenden klinischen Studie konnte gezeigt werden, dass das Therapiekonzept der forcierten orthodontischen Extrusion zum Erhalt und Restauration tief zerstörter Zähne erfolgreich im klinischen Alltag eingesetzt werden kann. Über einen medianen Beobachtungszeitraum von 3,3 Jahren (Spanne: 1 Jahr bis 5 Jahre) sind günstige Überlebens- und Erfolgsraten für derartig restaurierte Zähne zu erwarten. Untersucht wurden insgesamt 35 tief zerstörte Frontzähne und Prämolaren bei 30 Patienten, die mit Hilfe der orthodontischen Extrusion bewegt und restauriert werden konnten. Nach einem Beobachtungszeitraum von bis zu 5 Jahren waren 94 % der Zähne *in situ*. Die häufigste Form der Komplikation war die orthodontische Intrusion.

Durch die rasante Entwicklung adhäsiver Materialien auf dem Dentalmarkt ist sowohl eine volladhäsive Verankerung an den Nachbarzähnen als auch eine selbstadhäsive Zementierung der glasfaserverstärkten Kompositstifte im Wurzelkanal möglich geworden [118, 119], die forcierten nach okklusal gerichteten Zugkräften widersteht. Während die konventionelle kieferorthopädische Extrusion mit Hilfe von Multibracketapparaturen an mehreren benachbarten Zähnen realisiert wird und nach okklusal gerichtete Kräfte angewendet werden, um eine Bewegung der Zähne zu initialisieren [70], können intrusive Bewegungen an den Nachbarzähnen als Nebenwirkung auftreten. Diese Komplikation wird mit Hilfe der dargestellten Methodik vermieden, da die Nachbarzähne mit Hilfe eines glasfaserverstärkten Kompositstiftes verblockt werden. Die häufigste Komplikation der Methode stellte der Verlust der glasfaserverstärkten Kompositstifte der Extrusionsapparatur dar, die auf einen Adhäsionsverlust zum Dentin im Wurzelkanal oder zu einem Adhäsionsverlust auf der Schmelzoberfläche der Nachbarzähne auf Grund der Anwendung besonders starker Zugkräfte zurückzuführen ist [120]. Neben dem Vorteil der schnellen orthodontischen Bewegung, ist diese Komplikation als Nachteil der Anwendung so hoher Kräfte anzusehen. In den vorliegenden Arbeiten konnte gezeigt werden, dass die forcierte kieferorthopädische Bewegung innerhalb von durchschnittlich 19 Tagen erfolgen kann. Während eine klinische Studie zum Konzept der kieferorthopädischen Extrusion von einer Extrusionszeit zwischen drei, vier, sechs und neun Wochen berichtet [77], erreichen andere Autoren eine Extrusion innerhalb von sieben bis 15 Tagen [121]. Trotz der zirkulären Fibrektomie war darüber hinaus in der Mehrheit der klinischen Fälle ein lokalisierter parodontaler Eingriff notwendig [120]. Während einige Autoren schlussfolgern, dass die Notwendigkeit chirurgischer Eingriffe sowohl durch die forcierte, schnelle Extrusionsbewegung als auch durch eine suprakrestale Fibrektomie eliminiert werden kann [122], kommt eine Übersichtsarbeit zu dem Ergebnis, dass in vielen klinischen Fällen eine korrektive parodontale Chirurgie notwendig wird und als Nachteil dieser Methode anzusehen ist [59]. Im Gegensatz zu der Methodik der vorliegenden Studie wurde im Rahmen einer anderen klinischen Untersuchung ein Laser für die suprakrestale Fibrektomie angewendet, worin eine vielversprechende Modifikation der Behandlungsmethode zu liegen scheint [123]. Für 4 Patienten konnte keine restaurative Therapie erfolgen, da diese die notwendige Behandlungszeit und Mitwirkung unterschätzten. Obwohl die Extrusion selbst innerhalb weniger Tage bis Wochen erreicht werden kann, verlängern die Retentionszeit und die mögliche Notwendigkeit parodontalchirurgischer und endodontischer Folgeeingriffe den Behandlungsprozess. Darüber hinaus ist der Behandlungserfolg der orthodontischen Extrusion in hohem Maße von der Mitarbeit und Zuverlässigkeit der Patienten abhängig, da diese die



kieferorthopädischen Gummis eingeständig wechseln müssen. Diese Umstände erfordern eine überaus sorgfältige Patientenselektion [120].

Insgesamt ist bei einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 96 % und einer Erfolgsrate von 84 % von einem vielversprechenden Therapiekonzept für den Zahnerhalt und die Restauration tief zerstörter Zähne auszugehen. Zwei obere laterale Frontzähne mussten auf Grund von Frakturen extrahiert werden. Ursächlich hierfür war der schmale Durchmesser der Zähne nach Extrusion. Als Erfolg wurde in dieser klinischen Studie ein symptomfreier Zahn mit einer intakten, kariesfreien Restauration mit physiologischen Sondierungstiefen und ohne Anzeichen einer Intrusion, Ankylose, Wurzelresorption oder radiologischen Transluzenz definiert. Dabei konnte auf radiologischen Kontrollröntgenbildern festgestellt werden, dass keine Wurzelresorptionen vorlagen und mit Ausnahme eines Patienten kein marginaler Knochenabbau ersichtlich war. Die häufigste Komplikation stellte die Intrusion des betroffenen Zahnes bei insgesamt drei Patienten im Nachbeobachtungszeitraum dar.

Die wissenschaftliche Evidenz dieser Technik ist bisher auf Fallberichte und Fallserien beschränkt [74, 76, 124, 125]. Klinische Daten zur Langzeitbewährung dieser Therapieform liegen nicht vor. Eine der wenigen klinischen Studien, die das Behandlungskonzept der orthodontischen Extrusion untersucht, kommt in der Schlussfolgerung zu einem ähnlichen Ergebnis. Die Autorengruppe um Malmgren et al. untersuchte insgesamt 33 Zähne bei 32 Patienten im Alter von 10 bis 20 Jahren und einem Untersuchungszeitraum von bis zu zwei Jahren [77]. Sie konnten bei 3 Patienten ebenfalls eine Intrusion feststellen. Insofern scheint die orthodontische Intrusion die Hauptkomplikation dieser Behandlungsmethode darzustellen. Diesem Umstand kann womöglich durch eine verlängerte oder lebenslange Retentionszeit entgegengewirkt werden [126].

Als Alternativen zur orthodontischen Extrusion grenzen sich die chirurgische Extrusion [65, 66], die intentionelle Replantation und Autotransplantationstechniken ab [67]. Diese Techniken bedürfen einer atraumatischen Zahnextraktion, da der Erfolg dieser Behandlungsmethoden maßgeblich vom Überleben der Zellen des parodontalen Faserapparates abhängig ist [67]. Dabei können Zahnextraktionen infolge der applizierten Kräfte mit Zahn- oder Alveolarfortsatzfrakturen verbunden sein, worin ein Argument für die konventionelle orthodontische Extrusion liegt. Darüber hinaus können allgemeine Risiken und Komplikationen von operativen Eingriffen gegen eine chirurgische Intervention sprechen. Eine Autorengruppe, die sich der Thematik der chirurgischen Extrusion widmet, veröffentlicht Überlebensraten von 92 % für chirurgisch extrudierte Zähne in einem Beobachtungszeitraum

von 0,8 bis 6,5 Jahren [66]. Von den Autoren wird in 20 % der klinischen Fälle ein marginaler Knochenabbau beschrieben. Im Gegensatz hierzu wurde in der vorliegenden Studie ein marginaler Knochenabbau nur bei einem Patienten beobachtet (3 %). Darüber hinaus wurden bei der Nachuntersuchung der chirurgischen Extrusion Wurzelresorptionen bei 5 von 51 Patienten auf Röntgenbildern festgestellt. Auf Basis der vorliegenden Daten konnten für die orthodontische Extrusion keine resorptiven Prozesse beobachtet werden. Aufgrund der relativ geringen Anzahl an Patienten in diesen klinischen Studien, erlauben die Ergebnisse jedoch keine allgemeingültigen, sicheren Schlussfolgerungen. Die klinische Evidenz für dieses Behandlungskonzept bleibt weiterhin rar. Kontrollierte, randomisierte Studien mit größeren Patientenkohorten fehlen [68]. Vor diesem Hintergrund bedarf es entsprechender klinischer Studien zur Langzeitbewahrung dieser Therapieform.

Eine Limitation stellt der Indikationsbereich für die orthodontische Extrusion dar. So muss für eine erfolgreiche Extrusion ein ausreichender vertikaler, interokkluslaer Abstand vorliegen. Dabei können in einigen klinischen Situationen sowohl die approximalen Flächen der Nachbarzähne als auch die antagonistische Bezahnung eine Limitation für diese Therapieform darstellen. Des Weiteren wurden Molaren aufgrund einer möglichen Furkationsbeteiligung, die die Prognose des Zahnes ungünstig beeinflussen kann, in dieser Studie ausgeschlossen. Darüber hinaus stellen Ankylosen, Hyperzementosen und vertikale Wurzelfrakturen Kontraindikationen für die orthodontische Extrusion dar [127]. Auch bei Zähnen mit kurzen Wurzeln, bei denen das prospektive Kronen-Wurzel-Verhältnis den Faktor 1 überschreiten wird, können der kieferorthopädischen Extrusion Grenzen gesetzt sein, da sich ein ungünstiges Kronen-Wurzel-Verhältnis negativ auf die Langzeitprognose endodontisch behandelter Zähne auswirkt [63].

Mit den vorliegenden Arbeiten konnte gezeigt werden, dass das Therapiekonzept der forcierten orthodontischen Extrusion eine vorhersagbare Methode darstellt, die Restauration tief zerstörter Frontzähne und Prämolaren mit Einzelzahnkronen zu ermöglichen. Dabei konnte sowohl die biologische Breite wiederhergestellt als auch eine Fassreifenpräparation implementiert werden. Die orthodontische Extrusion kann aus diesem Grund als minimalinvasive and maximal gewebeerhaltende Therapiealternative angesehen werden [127].

Neben den Überlebens-, Erfolgs- und Komplikationsraten einer Behandlungsmethode stellen sozioökonomische Abwägungen relevante Aspekte bei der Entscheidungsfindung einer Therapieform dar [110]. Um Rückschlüsse auf die Gestaltung von klinischen Strategien zu gewinnen, werden hierzu neben Kostenparametern auch Nutzenaspekte medizinischer Prozesse erfasst [110].

Die vorliegende Untersuchung ist die erste klinische Studie, die eine Post-hoc-Analyse und gesundheitsökonomische Bewertung für das Therapiekonzept der orthodontischen Extrusion zur Restauration tief zerstörter Zähne vornimmt. Bei einem Beobachtungszeitraum von bis zu 6 Jahren wurden prognostisch günstige Überlebensraten bei erheblichen initial verursachten Kosten und niedrigen Nachbehandlungskosten beobachtet. Die Notwendigkeit einer endodontischen Revision und Stiftinsertion hatte dabei einen signifikanten Einfluss auf die Kostenparameter. Zwei obere laterale Frontzähne und ein oberer Prämolare mussten aufgrund von Frakturen extrahiert werden und wurden als Misserfolge klassifiziert. Für diese Zähne wurden sowohl initial hohe medizinische Kosten als auch hohe Nachbehandlungskosten generiert, da zusätzlich zur aufwendigen restaurativen Versorgung die Anfertigung von Zahnersatz notwendig wurde. Insgesamt waren jedoch die Kosten für Nachbehandlungen für alle anderen Patienten gering, da wenige Komplikationen auftraten. Diese Ergebnisse bedürfen einer eingehenden Diskussion.

Die vorliegenden Kostenkalkulationen basieren auf Gebührenpositionen der Gebührenordnung für Zahnärzte (GOZ) [128], die für privatversicherte Patienten im deutschen Gesundheitssystem angewendet werden, obwohl ca. 90 % der deutschen Bevölkerung gesetzlich versichert ist. Da jedoch derzeit die Kosten für eine orthodontische Extrusion von den gesetzlichen Krankenkassen nicht getragen werden, wurden die Kostenkalkulationen auf Basis der Perspektive des privaten Kostenträgers ermittelt [128]. Die Gebührenpositionen werden dabei routinemäßig mit einem variablen Faktor multipliziert, der die Komplexität und den Zeitaufwand der notwendigen Therapie widerspiegelt. In dieser Studie wurde für alle Behandlungen der Standardfaktor von 2,3 angewandt. Diese Vorgehensweise basiert auf der Methodik einer anderen klinischen Untersuchung [129]. Diese Autorengruppe konnte in einer weiteren Untersuchung zeigen, dass die Kostenkalkulation mit Hilfe des Standardfaktors von 2,3 keine signifikante Auswirkung auf die Abschätzung der Kosteneffektivität bei der Betrachtung des Zahnerhalts von Molaren mit Furkationsbeteiligungen hatte [130].

Der Zahnerhalt und die Restauration tief zerstörter Zähne nach kieferorthopädischer Extrusion ist im gewählten Versorgungskontext und aus der gewählten Perspektive heraus weniger kostenintensiv als eine Zahnextraktion und Implantation. Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung sind durch ein kürzlich von der European Association of Osseointegration veröffentlichtes Review aus der Konsensuskonferenz bestätigt. Dieses schlussfolgert, dass der Zahnerhalt oberer, mittlerer Schneidezähne bei Vorhandensein einer irreversiblen Pulpitis und koronalen Läsionen mit einer folgenden endodontischen Behandlung kosteneffektiver ist als

eine Zahnextraktion und Implantatversorgung [95]. Eine vergleichbar hohe Kosteneffektivität konnte für den Zahnerhalt und die Revision endodontisch behandelter Zähne mit persistierenden Entzündungen im Vergleich zu zahngetragenen Brücken und Implantatversorgungen in einer gesundheitsökonomischen Bewertung in den USA gezeigt werden [131] und wird auch in anderen Studien belegt [132, 133]. Keine dieser Studien untersuchte jedoch tief zerstörte Zähne, für die eine Restauration ohne eine prothetische Vorbehandlung in Form einer orthodontischen Extrusion nicht möglich gewesen wäre.

Die Kosten für die orthodontische Extrusion können von der Art der verwendeten Apparatur abhängig sein. So werden für die kieferorthopädische Extrusion mit Hilfe von Multibracketapparaturen [70], Magneten [69], herausnehmbaren kieferorthopädischen Apparaturen [71] oder herausnehmbaren Prothesen [72] andere Kosten generiert, als durch Anwendung der Methodik der vorliegenden Untersuchung. Genauso kann die chirurgische Extrusion eine Alternative darstellen [65, 66], die sich durch die reduzierte Behandlungszeit unter Umständen in noch geringeren Gesamtkosten auswirkt. Insofern basieren die Kostenkalkulationen der vorliegenden Arbeit auf einer spezifischen Vorgehensweise und sind somit nicht uneingeschränkt auf andere Methoden übertragbar.

Die Notwendigkeit einer endodontischen Revision und Stiftinsertion hatte einen signifikanten Einfluss auf die Kostenkalkulation. Das ist naheliegend, da beide Therapiemaßnahmen zusätzlich zu den initialen medizinischen Kosten für die orthodontische Extrusion weitere Kosten generieren. Diese Informationen müssen den Patienten im Sinne der Kostentransparenz im Rahmen von Aufklärungsgesprächen vermittelt werden. Darüber hinaus scheinen demographische Charakteristiken wie das Geschlecht, das Alter der Patienten sowie die Art und Position des Zahnes im Zahnbogen die Kosten nicht signifikant zu beeinflussen. Da diese Faktoren auch in einer klinischen Studie zu unterschiedlichen Stiftmaterialien keinen Einfluss auf die Langlebigkeit der Restaurationen hatten, sind die Ergebnisse im Einklang mit der vorliegenden Studie [134].

### **3.3. Implantat oder Zahn? – Die Therapiekonzepte im Vergleich**

Es war das Ziel der nachfolgenden klinischen Studie zwei Therapiekonzepte für den klinischen Fall eines tief zerstörten Zahnes zu vergleichen. In der ersten Patientenkohorte wurden tief zerstörte Zähne nach orthodontischer Extrusion mit Einzelzahnkronen restauriert. In der zweiten Patientenkohorte wurden tief zerstörte Zähne extrahiert und mit implantatgetragenen Einzelkronen ersetzt. Es erfolgte eine Kosten-Zeit-Analyse beider Therapiekonzepte. In einem

kurzen Beobachtungszeitraum ist bei einer Überlebensrate von 100 % für beide Therapiekonzepte von einer günstigen Prognose auszugehen. Dabei waren die direkten medizinischen Kosten für die Implantatgruppe signifikant höher. Die Anzahl der Termine war für die Implantatgruppe größer, während die Behandlungszeit in Minuten in der Extrusionsgruppe höher war. Diese Umstände resultierten in vergleichbaren Opportunitätskosten für beide Untersuchungsgruppen. Die Gesamtkosten in der Extrusionsgruppe betragen etwa die Hälfte der Kosten in der Implantatgruppe. Diese hohen initialen medizinischen Kosten für Implantate sind in den von den Herstellern vorgegebenen Kosten für Materialien sowie den entsprechenden Gebührenpositionen in der Gebührenordnung für Zahnärzte abgebildet [128]. Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang die Beobachtung, dass die Behandlungszeit in Minuten in der Implantatgruppe signifikant geringer als in der Extrusionsgruppe war. Diese Ergebnisse belegen, dass die verwendeten Gebührenpositionen auf Basis der Gebührenordnung für Zahnärzte im deutschen Gesundheitssystem den Zeitaufwand für beide Therapieformen bisher nicht konsistent abbilden. Die Opportunitätskosten wirkten sich in der vorliegenden Untersuchung nicht signifikant aus, da insbesondere die initialen direkten medizinischen Kostenaufwendungen bereits nicht unerheblich waren. Diese Ergebnisse stehen im Gegensatz zu einer globalen sozioökonomischen Untersuchung, bei der sich die indirekten Kosten substantiell auswirkten [135]. Bei den Nachuntersuchungen waren für beide Gruppen sowohl der Kosten- als auch der Zeitaufwand gering, da wenige Komplikationen auftraten. Diese Beobachtung liegt wahrscheinlich in dem kurzen Beobachtungszeitraum begründet.

Die hohe Kosteneffektivität des Therapiekonzeptes der orthodontischen Extrusion ist auf Basis der vorliegenden Untersuchungen bisher nur über einen kurzen Beobachtungszeitraum belegt und muss aus diesem Grund mit Vorsicht interpretiert werden. Es ist denkbar, dass das Risiko für Misserfolge und Komplikationen über Jahre diese initiale Kostenersparnis kompensiert. Im Gegensatz zum Therapiekonzept der orthodontischen Extrusion existieren für Implantate viele Langzeitdaten. Eine kürzlich veröffentlichte Metaanalyse berichtet von einer Überlebensrate von 97,2 % nach einer Beobachtungszeit von 5 Jahren [90]. Dabei ist es essentiell, bei der Betrachtung unterschiedlicher Therapieformen zwischen Überlebens- und Erfolgsraten zu differenzieren [136]. So können biologische Komplikationen wie eine Mukositis und Periimplantitis mit einer Prävalenz von etwa 31 % und 37 % [137] oder technische Komplikationen in Form von Schraubenlockerungen und Schraubenbrüchen [89] die langfristige Prognose von implantatgetragenen Zahnersatz beeinträchtigen. Hinzu kommt, dass Zahnextraktionen immer mit einem Hart- und Weichgewebsdefizit verbunden sind [82]. Aus

diesem Grund kann eine Implantation besonders in der ästhetischen Zone eine hochgradig komplexe Intervention darstellen, die eines spezialisierten und erfahrenen Behandlers bedarf [108].

Die Auswertung der Daten zeigt, dass im spezifischen Kontext des deutschen Gesundheitssystems und aus der Perspektive des privaten Kostenträgers die orthodontische Extrusion und Restauration tief zerstörter Zähne weniger kostenintensiv als die implantatprothetische Rehabilitation ist. Diese Beobachtung lässt sich nicht universell auf andere Gesundheitssysteme und Länder übertragen, obwohl die vorliegenden Kostenaufstellungen mit einer Kostenkalkulation der American Dental Association im Einklang stehen [131]. Darüber hinaus darf ein direkter Vergleich beider Therapiekonzepte nur mit Vorsicht erfolgen, da die anatomischen Grundvoraussetzungen in beiden Gruppen unterschiedlich waren. So wurden in der Extrusionsgruppe beispielsweise nur Frontzähne und Prämolaren untersucht, während in der Implantatgruppe mit Ausnahme eines Eckzahnes nur Prämolaren und Molaren eingeschlossen wurden. Hinzu kommt, dass komplexe Augmentationsmaßnahmen in der Implantatgruppe ausgeschlossen wurden, die voraussichtlich zu einer längeren Behandlungsdauer und zu höheren Kosten geführt hätten. Darüber hinaus erfolgte keine Randomisierung für die therapeutischen Maßnahmen, stattdessen entschieden sich die Patienten selbst für eine Therapie. Nicht zuletzt sind die Therapiemaßnahmen per se in beiden Gruppen sehr unterschiedlich, sodass in der Langzeitprognose andere Outcome-Parameter möglich sind. Während für Zähne der Zahnerhalt sowie der Zustand der residualen Zahnhartsubstanz und der Restauration eine Rolle spielen, wird für Implantate neben der Stabilität der umgebenden periimplantären Weich- und Hartgewebe der Zustand der prothetischen Suprakonstruktion relevant sein [138]. Aufgrund der Variabilität der Outcome-Parameter und des kurzen Beobachtungszeitraumes war auf Grundlage der vorliegenden Daten eine Kosteneffektivitätsanalyse nicht zielführend. Zukünftige Studien sollten sich dieser Fragestellung jedoch in einem multizentrischen, vergleichenden Studiendesign widmen.

Neben ökonomischen Parametern rückt bei therapeutischen Entscheidungen zunehmend die Perspektive des Patienten in den Vordergrund. So war es das Ziel der vorliegenden Arbeit, über die ökonomischen Aspekte hinaus beide Therapiekonzepte in Bezug auf die Patientenzufriedenheit zu vergleichen. Hierzu wurde die mundgesundheitsbezogene Lebensqualität in beiden Patientenkohorten erfasst [111]. Insgesamt war für beide Therapiekonzepte im Therapieverlauf eine Verbesserung der mundgesundheitsbezogenen Lebensqualität festzustellen. Es lagen keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden

Untersuchungsgruppen zu den Behandlungszeitpunkten T1 (= vor der Behandlung), T2 (= nach der Behandlung), T3 (= nach Restauration) und T4 (= bei der Nachuntersuchung) vor. Die Subkategorisierung und Zusammenfassung der Punktwerte zeigte allerdings für die Gruppe der orthodontischen Extrusion zum Zeitpunkt der aktiven Behandlung (= T2) einen signifikanten Unterschied in den Dimensionen „funktionelle Einschränkungen“ und „physische Beeinträchtigung“ im Vergleich zur Implantatgruppe. Während die Implantation einen lokalen, zu einem bestimmten Zeitpunkt stattfindenden operativen Eingriff darstellt, wird die Extrusion über mehrere Tage bzw. Wochen realisiert. Die vorübergehende Zunahme der Punktwerte liegt wahrscheinlich in der hierfür notwendigen Apparatur begründet, die die Patienten sowohl funktionell im Kauverhalten als auch physisch auf Grund der lokalen Zugkräfte der Elastics beeinträchtigen kann. Darüber hinaus kann durch eine temporäre Lücke während der orthodontischen Bewegung das ästhetische Aussehen und die Aussprache beeinträchtigt sein.

Die OHIP-Gesamtwerte sind mit einer Studie vergleichbar, die die mundgesundheitsbezogene Lebensqualität von Patienten 2 Jahre nach endodontischer Behandlung im Vergleich zu implantatprothetischen Rehabilitationen untersucht [139]. Die Autoren berichten von mehr physischen Schmerzen in der Gruppe der Patienten der endodontischen Therapie im Vergleich zur Implantatgruppe. Ebenso wie in der vorliegenden Studie wurden dort die Daten zur mundgesundheitsbezogenen Lebensqualität mit Hilfe des Oral Health Impact Profile (OHIP) erhoben, der ein zuverlässiges und reproduzierbares Instrument zur Erfassung patientenbezogener Parameter darstellt [112, 140].

Die unterschiedliche Verteilung der demographischen und morphologischen Charakteristika in beiden Gruppen müssen auch hier als Limitationen angesehen werden. Es ist denkbar, dass sowohl der Ausschluss komplexer Augmentationsmaßnahmen als auch die Tatsache, dass die Implantate im posterioren Bereich lokalisiert waren, zu einer möglichen Verzerrung der Ergebnisse und damit zu einer gewissen Fehlinterpretation der erhobenen patientenbezogenen Parameter führen können. Auch sind die initialen klinischen Situationen nur bedingt miteinander vergleichbar. In der Implantatgruppe waren die Zähne zum Zeitpunkt der initialen klinischen Situation meist schon entfernt, während in der Extrusionsgruppe die Zähne noch *in situ* waren.

Bei der klinischen Implementierung beider Therapiemaßnahmen spielen weitere Faktoren eine wichtige Rolle im Entscheidungsprozess. Allgemeinmedizinische Risiken [98] und Kontraindikationen, die auf Basis der Einnahme von Medikamenten entstehen [99], können dabei gegen eine implantatchirurgische Intervention sprechen. Darüber hinaus kann das Alter

des Patienten ein Argument gegen die Insertion von Implantaten darstellen. So wurde im Rahmen einer retrospektiven klinischen Studie geschlussfolgert, dass Implantationen erst nach Abschluss des Knochenwachstums erfolgen sollten [100]. Aus diesem Grund profitieren gerade junge Patienten von dem Therapiekonzept der orthodontischen Extrusion [100, 141]. Des Weiteren können biologische [137] und technische Komplikationen an Implantaten [97] neben finanziellen Aspekten [95] Nachteile einer implantatprothetischen Rehabilitation darstellen. Weiterhin entscheidet die Qualität und Quantität der umgebenden knöchernen Strukturen und die anatomische Lagebeziehung zu Nerv- und Blutgefäßen, ob eine Implantation möglich und mit welchem Aufwand diese verbunden ist. Eine systematische Übersichtsarbeit, welche das Therapiekonzept einer Implantatversorgung dem nicht-chirurgischen Zahnerhalt mit anschließender Restauration endodontisch behandelter Zähne gegenüberstellt, schlussfolgert, dass die Behandlungsplanung von vielen Faktoren wie der prothetischen Restaurierbarkeit des Zahnes, der Qualität der umgebenden knöchernen Strukturen, ästhetischen Gesichtspunkten, individuellen ästhetischen Anforderungen, der Kosten-Nutzen-Relation, allgemeinmedizinischen Konditionen, dem Risiko unerwünschter Nebenwirkungen und nicht zuletzt vom Patientenwunsch abhängig ist [142].



### **3.4. Schlussfolgerungen und Ausblick**

Auf Basis der Datenlage der vorliegenden Untersuchung ist das Langzeitüberleben von Stift-Stumpf-Aufbauten nicht von der Art des verwendeten Stift- und Aufbaumaterials abhängig, wenn eine zirkumferente Fassreifenpräparation und eine adhäsive Zementierung des Aufbaustiftes im Wurzelkanal sichergestellt wird. Für die Wiederherstellung der biologischen Breite ist das Therapiekonzept der orthodontischen Extrusion ein vielversprechender Ansatz, die Restauration von tief zerstörten Frontzähnen und Prämolaren mit Einzelzahnkronen zu ermöglichen. Die Ergebnisse müssen vor dem Hintergrund der gewissen Limitationen wie einer überschaubaren Patientenkohorte, der standardisierten Behandlung in nur einem Untersuchungszentrum und dem mittleren Beobachtungszeitraum von bis zu 6 Jahren mit Vorsicht interpretiert werden. Aus diesem Grund bedürfen die vorliegenden Daten der Bestätigung von prospektiven klinischen Langzeitstudien in Bezug auf Langzeiterfolg, Kosteneffektivität und die Patientenzufriedenheit.

Die Behandlungsmaßnahme der orthodontischen Extrusion ist darüber hinaus nicht nur als Konzept zum Zahnerhalt zu verstehen. Auf Grundlage der erhobenen Daten ermöglicht die kieferorthopädische Bewegung den Erhalt der umliegenden Weich- und Hartgewebe. Die orthodontische Extrusion kann möglicherweise in Zukunft in einem modifizierten Arbeitsablauf dazu beitragen, die anatomischen Weich- und Hartgewebenvoraussetzungen vor einer Implantation zu verbessern, das Implantatbett für eine gerichtete Sofortimplantation vorzubereiten und damit komplexe Augmentationsmaßnahmen sowie die Verwendung künstlicher Aufbaumaterialien zu vermeiden.

Trotz einer kurzfristigen Verminderung der mundgesundheitsbezogenen Lebensqualität der Patienten durch funktionelle Einschränkungen und physische Beeinträchtigungen während der Extrusion, ist nach Restauration von einer Verbesserung der Lebensqualität auszugehen, die der implantatprothetischen Rehabilitation vergleichbar ist. Implantatgetragene Rehabilitationen sind hingegen mit deutlich höheren Kosten und häufigeren Behandlungssitzungen als der Erhalt und die Restauration tief zerstörter Zähne nach orthodontischer Extrusion verbunden, während der Zahnerhalt eine insgesamt längere Behandlungszeit in Minuten beansprucht. In diesem Zusammenhang werden komparative Kosteneffektivitätsanalysen benötigt, um die wirtschaftlichen Zusammenhänge von verschiedenen Therapiestrategien einschließlich Zahnextraktion sowie Anfertigung und Eingliederung von Zahnersatz zu erfassen.

Der Ansatz, beide Therapieausnahmen unter gesundheitsökonomischen Gesichtspunkten zu betrachten, leitet sich aus einem präventionstherapeutischen Bedarf ab, da er zur Verbesserung der Mundgesundheit beiträgt. So kann das Therapiekonzept der orthodontischen Extrusion als Therapieform der Erstintervention angesehen werden, die bei optimalem Behandlungsverlauf den langfristigen Erhalt einer geschlossenen Zahnreihe ermöglicht und selbst bei einem Misserfolg unter verbesserten anatomischen Ausgangsvoraussetzungen Raum für die Anwendung konventioneller Formen des Zahnersatzes wie Brücken oder implantatgetragener Rehabilitationen lässt. Damit wird der Zahnersatz und alle mit ihm im Zusammenhang stehenden Komplikationen und Risiken im günstigsten Fall gänzlich vermieden, zumindest jedoch in ein höheres Patientenalter verlegt und der Erhalt der geschlossenen Zahnreihe so lange wie möglich gewährleistet. Die auf Seiten des Patienten und des Behandlers entstehenden Nachteile sind dabei überschaubar und auf die Faktoren „Kosten“ und „Zeit“ beschränkt.

## 4. Zusammenfassung

Die Langzeitprognose endodontisch behandelter Zähne mit ausgeprägtem koronalen Zahnhartsubstanzverlust ist beim Vergleich von einem rigiden Stiftsystem und einem dem Dentin in seinen mechanischen Eigenschaften ähnlichen Stiftsystem nicht von der Art und den mechanischen Eigenschaften des Stiftmaterials abhängig, wenn eine adhäsive Zementierung im Wurzelkanal erfolgt und eine zirkumferente Fassreifenpräparationsform vorliegt.

Dabei ermöglicht die orthodontische Extrusion als präprothetische Therapiemaßnahme die Wiederherstellung der biologischen Breite sowie einer zirkumferenten Fassreifenpräparationsform und stellt eine vorhersagbare Methode dar, den Zahnerhalt und die Restauration tief zerstörter Frontzähne und Prämolaren mit Einzelzahnkronen zu ermöglichen. Bei Gewährleistung einer angemessenen Patientenselektion ist die kieferorthopädische Extrusion ein vielversprechender Ansatz, Zähne als Kronenpfeiler zu erhalten, für die bisher die Extraktion und Implantation als valide Therapiealternative anzusehen ist. Dabei spielen die Mitarbeit und Motivation des Patienten eine ebenso wichtige Rolle im Entscheidungsprozess wie anatomische Grundvoraussetzungen, ein ausreichender interokklusaler Abstand und ein prospektiv günstiges Kronen-Wurzel-Verhältnis. Die Intrusion stellt bei dieser Therapiemaßnahme die häufigste Komplikationsart dar, der durch eine möglichst lange, womöglich lebenslange Retentionszeit begegnet werden kann. Wurzelresorptionen, Ankylosen und ein marginaler Knochenabbau sind mit dieser Therapiemaßnahme auf Basis der vorliegenden Ergebnisse nicht assoziiert.

Im Rahmen der Limitationen der vorliegenden klinischen Studien waren die Gesamtkosten für die orthodontische Extrusion insgesamt überschaubar und wurden hauptsächlich initial verursacht. Endodontische Revisionen und Stiftaufbauten hatten dabei einen signifikanten Einfluss auf die Kostenparameter. Die Kosten für die Nachbehandlungen und Komplikationen waren gering, da nur wenige Misserfolge auftraten. Über den Beobachtungszeitraum und aus der Perspektive der privaten Kostenträger im deutschen Gesundheitssystem liegen die Gesamtkosten deutlich unter denen für implantatprothetische Rehabilitationen. Die vorliegenden Arbeiten konnten zeigen, dass die implantatprothetische Therapie im Vergleich zum Therapiekonzept der orthodontischen Extrusion und Restauration mit höheren initialen Kosten verbunden ist. Die Anzahl der Behandlungstermine war für Implantatversorgungen höher, während die absolute Behandlungszeit für die orthodontische Extrusion insgesamt länger ausfiel. Diese Ergebnisse resultieren in vergleichbaren Opportunitätskosten.

In Bezug auf funktionelle Einschränkungen und physische Beeinträchtigungen war die mundgesundheitsbezogene Lebensqualität während der Extrusion im Vergleich zu Implantation kurzzeitig vermindert. Vor der Behandlung, nach der Restauration und zum Zeitpunkt der Nachuntersuchung ist für Patienten mit Implantatversorgungen und Patienten mit Einzelkronen nach orthodontischer Extrusion die mundgesundheitsbezogene Lebensqualität vergleichbar. Insgesamt konnte für beide Therapiekonzepte diesbezüglich eine Verbesserung ab dem Zeitpunkt der Erstvorstellung festgestellt werden.

Auf Basis der vorliegenden Untersuchungen stellt das Therapiekonzept der orthodontischen Extrusion einen geeigneten therapeutischen Ansatz dar, tief zerstörte Zähne zu erhalten und zu restaurieren. Die Ergebnisse sollten im Rahmen von klinischen, multizentrischen Studien in Bezug auf das Langzeitüberleben, die Kosteneffektivität und die Patientenperspektive bestätigt werden.

## **5. Votum der Ethikkommission**

Das Studienprotokoll der ersten klinischen Studie wurde von der Ethikkommission der Charité – Universitätsmedizin Berlin bestätigt (EA2/148/06). Die Studie ist in der Studiendatenbank *clinicaltrials.org* unter der Nummer DRKS00027063 registriert.

Das Studienprotokoll der zweiten klinischen Studie wurde von der Ethikkommission der Charité – Universitätsmedizin Berlin bestätigt (EA2/301/20). Die Studie ist in der Studiendatenbank *clinicaltrials.org* unter der Nummer DRKS00026697 registriert.

Das Studienprotokoll der dritten klinischen Studie wurde von der Ethikkommission der Charité – Universitätsmedizin Berlin bestätigt (EA2/300/20). Die Studie ist in der Studiendatenbank *clinicaltrials.org* unter der Nummer DRKS00030342 registriert.

## 6. Literaturnachweise

1. Torabinejad M, Anderson P, Bader J, Brown LJ, Chen LH, Goodacre CJ, et al. Outcomes of root canal treatment and restoration, implant-supported single crowns, fixed partial dentures, and extraction without replacement: a systematic review. *J Prosthet Dent.* 2007;98(4):285-311.
2. Pjetursson BE, Heimisdottir K. Dental implants - are they better than natural teeth? *Eur J Oral Sci.* 2018;126 Suppl 1:81-7.
3. Turp JC, Heydecke G, Krastl G, Pontius O, Antes G, Zitzmann NU. Restoring the fractured root-canal-treated maxillary lateral incisor: in search of an evidence-based approach. *Quintessence Int.* 2007;38(3):179-91.
4. Naumann M, Koelpin M, Beuer F, Meyer-Lueckel H. 10-year survival evaluation for glass-fiber-supported postendodontic restoration: a prospective observational clinical study. *J Endod.* 2012;38(4):432-5.
5. Schatzle M, Land NP, Anerud A, Boysen H, Burgin W, Loe H. The influence of margins of restorations of the periodontal tissues over 26 years. *J Clin Periodontol.* 2001;28(1):57-64.
6. Ingber JS, Rose LF, Coslet JG. The "biologic width"--a concept in periodontics and restorative dentistry. *Alpha Omegan.* 1977;70(3):62-5.
7. Adolphi G, Zehnder M, Bachmann LM, Gohring TN. Direct resin composite restorations in vital versus root-filled posterior teeth: a controlled comparative long-term follow-up. *Oper Dent.* 2007;32(5):437-42.
8. Eckerbom M, Magnusson T, Martinsson T. Reasons for and incidence of tooth mortality in a Swedish population. *Endod Dent Traumatol.* 1992;8(6):230-4.
9. Aquilino SA, Caplan DJ. Relationship between crown placement and the survival of endodontically treated teeth. *J Prosthet Dent.* 2002;87(3):256-63.
10. Ferrari M, Sorrentino R, Juloski J, Grandini S, Carrabba M, Discepoli N, Ferrari Cagidiaco E. Post-Retained Single Crowns versus Fixed Dental Prostheses: A 7-Year Prospective Clinical Study. *J Dent Res.* 2017;96(13):1490-7.
11. Lang H, Korkmaz Y, Schneider K, Raab WH. Impact of endodontic treatments on the rigidity of the root. *J Dent Res.* 2006;85(4):364-8.
12. Sedgley CM, Messer HH. Are endodontically treated teeth more brittle? *J Endod.* 1992;18(7):332-5.
13. Papa J, Cain C, Messer HH. Moisture content of vital vs endodontically treated teeth. *Endod Dent Traumatol.* 1994;10(2):91-3.
14. Reeh ES, Messer HH, Douglas WH. Reduction in tooth stiffness as a result of endodontic and restorative procedures. *J Endod.* 1989;15(11):512-6.
15. Afrashtehfar KI, Ahmadi M, Emami E, Abi-Nader S, Tamimi F. Failure of single-unit restorations on root filled posterior teeth: a systematic review. *Int Endod J.* 2017;50(10):951-66.
16. Afrashtehfar KI, Emami E, Ahmadi M, Eilayyan O, Abi-Nader S, Tamimi F. Failure rate of single-unit restorations on posterior vital teeth: A systematic review. *J Prosthet Dent.* 2017;117(3):345-53 e8.

17. Shu X, Mai QQ, Blatz M, Price R, Wang XD, Zhao K. Direct and Indirect Restorations for Endodontically Treated Teeth: A Systematic Review and Meta-analysis, IAAD 2017 Consensus Conference Paper. *J Adhes Dent.* 2018;20(3):183-94.
18. Dietschi D, Duc O, Krejci I, Sadan A. Biomechanical considerations for the restoration of endodontically treated teeth: a systematic review of the literature, Part II (Evaluation of fatigue behavior, interfaces, and in vivo studies). *Quintessence Int.* 2008;39(2):117-29.
19. Deliperi S. Clinical evaluation of nonvital tooth whitening and composite resin restorations: five-year results. *Eur J Esthet Dent.* 2008;3(2):148-59.
20. von Stein-Lausnitz M, Bruhnke M, Rosentritt M, Sterzenbach G, Bitter K, Frankenberger R, Naumann M. Direct restoration of endodontically treated maxillary central incisors: post or no post at all? *Clin Oral Investig.* 2019;23(1):381-9.
21. Pratt I, Aminoshariae A, Montagnese TA, Williams KA, Khalighinejad N, Mickel A. Eight-Year Retrospective Study of the Critical Time Lapse between Root Canal Completion and Crown Placement: Its Influence on the Survival of Endodontically Treated Teeth. *J Endod.* 2016;42(11):1598-603.
22. Naumann M, Schmitter M, Frankenberger R, Krastl G. "Ferrule Comes First. Post Is Second!" Fake News and Alternative Facts? A Systematic Review. *J Endod.* 2018;44(2):212-9.
23. Ferrari M, Vichi A, Fadda GM, Cagidiaco MC, Tay FR, Breschi L, et al. A randomized controlled trial of endodontically treated and restored premolars. *J Dent Res.* 2012;91(7 Suppl):72S-8S.
24. Jung RE, Kalkstein O, Sailer I, Roos M, Hammerle CH. A comparison of composite post buildups and cast gold post-and-core buildups for the restoration of nonvital teeth after 5 to 10 years. *Int J Prosthodont.* 2007;20(1):63-9.
25. Balkenhol M, Wostmann B, Rein C, Feger P. Survival time of cast post and cores: a 10-year retrospective study. *J Dent.* 2007;35(1):50-8.
26. Fokkinga WA, Kreulen CM, Bronkhorst EM, Creugers NH. Up to 17-year controlled clinical study on post-and-cores and covering crowns. *J Dent.* 2007;35(10):778-86.
27. Bateli M, Kern M, Wolkewitz M, Strub JR, Att W. A retrospective evaluation of teeth restored with zirconia ceramic posts: 10-year results. *Clin Oral Investig.* 2014;18(4):1181-7.
28. Ellner S, Bergendal T, Bergman B. Four post-and-core combinations as abutments for fixed single crowns: a prospective up to 10-year study. *Int J Prosthodont.* 2003;16(3):249-54.
29. Ferrari M, Vichi A, Garcia-Godoy F. Clinical evaluation of fiber-reinforced epoxy resin posts and cast post and cores. *Am J Dent.* 2000;13(Spec No):15B-8B.
30. Fox K, Gutteridge DL. An in vitro study of coronal microleakage in root-canal-treated teeth restored by the post and core technique. *Int Endod J.* 1997;30(6):361-8.
31. King PA, Setchell DJ. An in vitro evaluation of a prototype CFRC prefabricated post developed for the restoration of pulpless teeth. *J Oral Rehabil.* 1990;17(6):599-609.
32. Torbjorner A, Fransson B. A literature review on the prosthetic treatment of structurally compromised teeth. *Int J Prosthodont.* 2004;17(3):369-76.

33. Nakamura T, Ohyama T, Waki T, Kinuta S, Wakabayashi K, Mutobe Y, et al. Stress analysis of endodontically treated anterior teeth restored with different types of post material. *Dent Mater J*. 2006;25(1):145-50.
34. Asmussen E, Peutzfeldt A, Heitmann T. Stiffness, elastic limit, and strength of newer types of endodontic posts. *J Dent*. 1999;27(4):275-8.
35. Sarkis-Onofre R, Jacinto RC, Boscato N, Cenci MS, Pereira-Cenci T. Cast metal vs. glass fibre posts: a randomized controlled trial with up to 3 years of follow up. *J Dent*. 2014;42(5):582-7.
36. Sterzenbach G, Franke A, Naumann M. Rigid versus flexible dentine-like endodontic posts--clinical testing of a biomechanical concept: seven-year results of a randomized controlled clinical pilot trial on endodontically treated abutment teeth with severe hard tissue loss. *J Endod*. 2012;38(12):1557-63.
37. Schmitter M, Hamadi K, Rammelsberg P. Survival of two post systems--five-year results of a randomized clinical trial. *Quintessence Int*. 2011;42(10):843-50.
38. Tay FR, Loushine RJ, Lambrechts P, Weller RN, Pashley DH. Geometric factors affecting dentin bonding in root canals: a theoretical modeling approach. *J Endod*. 2005;31(8):584-9.
39. Tay FR, Pashley DH. Monoblocks in root canals: a hypothetical or a tangible goal. *J Endod*. 2007;33(4):391-8.
40. Belli S, Eraslan O, Eskitascioglu G, Karbhari V. Monoblocks in root canals: a finite elemental stress analysis study. *Int Endod J*. 2011;44(9):817-26.
41. Schmitter M, Sterzenbach G, Faggion CM, Jr., Krastl G. A flood tide of systematic reviews on endodontic posts: methodological assessment using of R-AMSTAR. *Clin Oral Investig*. 2013;17(5):1287-94.
42. Naumann M, Neuhaus KW, Kolpin M, Seemann R. Why, when, and how general practitioners restore endodontically treated teeth: a representative survey in Germany. *Clin Oral Investig*. 2016;20(2):253-9.
43. Coelho CS, Biffi JC, Silva GR, Abrahao A, Campos RE, Soares CJ. Finite element analysis of weakened roots restored with composite resin and posts. *Dent Mater J*. 2009;28(6):671-8.
44. Fokkinga WA, Kreulen CM, Vallittu PK, Creugers NH. A structured analysis of in vitro failure loads and failure modes of fiber, metal, and ceramic post-and-core systems. *Int J Prosthodont*. 2004;17(4):476-82.
45. Barfeie A, Thomas MB, Watts A, Rees J. Failure Mechanisms of Fibre Posts: A Literature Review. *Eur J Prosthodont Restor Dent*. 2015;23(3):P115-27.
46. Wang X, Shu X, Zhang Y, Yang B, Jian Y, Zhao K. Evaluation of fiber posts vs metal posts for restoring severely damaged endodontically treated teeth: a systematic review and meta-analysis. *Quintessence Int*. 2019;50(1):8-20.
47. Sorrentino R, Di Mauro MI, Ferrari M, Leone R, Zarone F. Complications of endodontically treated teeth restored with fiber posts and single crowns or fixed dental prostheses-a systematic review. *Clin Oral Investig*. 2016;20(7):1449-57.
48. Goracci C, Corciolani G, Vichi A, Ferrari M. Light-transmitting ability of marketed fiber posts. *J Dent Res*. 2008;87(12):1122-6.



49. Mangold JT, Kern M. Influence of glass-fiber posts on the fracture resistance and failure pattern of endodontically treated premolars with varying substance loss: an in vitro study. *J Prosthet Dent.* 2011;105(6):387-93.
50. Samran A, El Bahra S, Kern M. The influence of substance loss and ferrule height on the fracture resistance of endodontically treated premolars. An in vitro study. *Dent Mater.* 2013;29(12):1280-6.
51. Naumann M, Preuss A, Frankenberger R. Reinforcement effect of adhesively luted fiber reinforced composite versus titanium posts. *Dent Mater.* 2007;23(2):138-44.
52. Sorensen JA, Engelman MJ. Ferrule design and fracture resistance of endodontically treated teeth. *J Prosthet Dent.* 1990;63(5):529-36.
53. Juloski J, Radovic I, Goracci C, Vulicevic ZR, Ferrari M. Ferrule effect: a literature review. *J Endod.* 2012;38(1):11-9.
54. Magne P, Lazari PC, Carvalho MA, Johnson T, Del Bel Cury AA. Ferrule-Effect Dominates Over Use of a Fiber Post When Restoring Endodontically Treated Incisors: An In Vitro Study. *Oper Dent.* 2017;42(4):396-406.
55. Carnevale G, Sterrantino SF, Di Febo G. Soft and hard tissue wound healing following tooth preparation to the alveolar crest. *Int J Periodontics Restorative Dent.* 1983;3(6):36-53.
56. Anthony W. Gargiulo FMW, Balint Orban. Dimensions and Relations of the Dentogingival Junction in Humans. *The Journal of Periodontology.* 1961;32:261-7.
57. Schmidt JC, Sahrman P, Weiger R, Schmidlin PR, Walter C. Biologic width dimensions--a systematic review. *J Clin Periodontol.* 2013;40(5):493-504.
58. The Glossary of Prosthodontic Terms: Ninth Edition. *J Prosthet Dent.* 2017;117(5S):e1-e105.
59. Simon JH. Root extrusion. Rationale and techniques. *Dent Clin North Am.* 1984;28(4):909-21.
60. Baima RF. Extension of clinical crown length. *J Prosthet Dent.* 1986;55(5):547-51.
61. Smidt A, Lachish-Tandlich M, Venezia E. Orthodontic extrusion of an extensively broken down anterior tooth: a clinical report. *Quintessence Int.* 2005;36(2):89-95.
62. Pilalas I, Tsalikis L, Tatakis DN. Pre-restorative crown lengthening surgery outcomes: a systematic review. *J Clin Periodontol.* 2016;43(12):1094-108.
63. Patil K, Khalighinejad N, El-Refai N, Williams K, Mickel A. The Effect of Crown Lengthening on the Outcome of Endodontically Treated Posterior Teeth: 10-year Survival Analysis. *J Endod.* 2019;45(6):696-700.
64. Bruhnke M, Voss I, Sterzenbach G, Beuer F, Naumann M. Evaluating the prospective crown-root ratio after extrusion and crown lengthening procedures in vitro. *Sci Rep.* 2023;13(1):18899.
65. Kahnberg KE. Surgical extrusion of root-fractured teeth--a follow-up study of two surgical methods. *Endod Dent Traumatol.* 1988;4(2):85-9.
66. Krug R, Connert T, Soliman S, Syfrig B, Dietrich T, Krastl G. Surgical extrusion with an atraumatic extraction system: A clinical study. *J Prosthet Dent.* 2018;120(6):879-85.
67. Plotino G, Abella Sans F, Duggal MS, Grande NM, Krastl G, Nagendrababu V, Gambarini G. Clinical procedures and outcome of surgical extrusion, intentional

- replantation and tooth autotransplantation - a narrative review. *Int Endod J.* 2020;53(12):1636-52.
68. Reichardt E, Krug R, Bornstein MM, Tomasch J, Verna C, Krastl G. Orthodontic Forced Eruption of Permanent Anterior Teeth with Subgingival Fractures: A Systematic Review. *Int J Environ Res Public Health.* 2021;18(23).
  69. Mehl C, Wolfart S, Kern M. Orthodontic extrusion with magnets: a case report. *Quintessence Int.* 2008;39(5):371-9.
  70. Ziskind D, Schmidt A, Hirschfeld Z. Forced eruption technique: rationale and clinical report. *J Prosthet Dent.* 1998;79(3):246-8.
  71. Murchison DF, Schwartz RS. The use of removable appliances for forced eruption of teeth. *Quintessence Int.* 1986;17(8):497-501.
  72. Lythgoe JR, Torabinejad M, Simon JH. Extrusion techniques for the general dentist. *Gen Dent.* 1980;28(1):42-3, 6-9.
  73. Molina DG. Using a complete denture for extrusion. *Gen Dent.* 1984;32(3):247-9.
  74. Heithersay GS. Combined endodontic-orthodontic treatment of transverse root fractures in the region of the alveolar crest. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1973;36(3):404-15.
  75. Ingber JS. Forced eruption. I. A method of treating isolated one and two wall infrabony osseous defects-rationale and case report. *J Periodontol.* 1974;45(4):199-206.
  76. Ingber JS. Forced eruption: part II. A method of treating nonrestorable teeth--Periodontal and restorative considerations. *J Periodontol.* 1976;47(4):203-16.
  77. Malmgren O, Malmgren B, Frykholm A. Rapid orthodontic extrusion of crown root and cervical root fractured teeth. *Endod Dent Traumatol.* 1991;7(2):49-54.
  78. Bruhnke M, Naumann M, Beuer F, Bose MWH, von Stein-Lausnitz M, Schwendicke F. Implant or tooth? - A cost-time analysis of managing "unrestorable" teeth. *J Dent.* 2023;136:104646.
  79. Kahnberg KE. Intraalveolar transplantation of teeth with crown-root fractures. *J Oral Maxillofac Surg.* 1985;43(1):38-42.
  80. Kahnberg KE. Intra-alveolar transplantation. I. A 10-year follow-up of a method for surgical extrusion of root fractured teeth. *Swed Dent J.* 1996;20(5):165-72.
  81. Elkhadem A, Mickan S, Richards D. Adverse events of surgical extrusion in treatment for crown-root and cervical root fractures: a systematic review of case series/reports. *Dent Traumatol.* 2014;30(1):1-14.
  82. Tan WL, Wong TL, Wong MC, Lang NP. A systematic review of post-extractional alveolar hard and soft tissue dimensional changes in humans. *Clin Oral Implants Res.* 2012;23 Suppl 5:1-21.
  83. Pjetursson BE, Bragger U, Lang NP, Zwahlen M. 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.* 2007;18 Suppl 3:97-113.
  84. Sailer I, Pjetursson BE, Zwahlen M, Hammerle CH. A systematic review of the survival and complication rates of all-ceramic and metal-ceramic reconstructions after an observation period of at least 3 years. Part II: Fixed dental prostheses. *Clin Oral Implants Res.* 2007;18 Suppl 3:86-96.

85. Pjetursson BE, Tan WC, Tan K, Bragger U, Zwahlen M, Lang NP. A systematic review of the survival and complication rates of resin-bonded bridges after an observation period of at least 5 years. *Clin Oral Implants Res.* 2008;19(2):131-41.
86. Kern M. Clinical long-term survival of two-retainer and single-retainer all-ceramic resin-bonded fixed partial dentures. *Quintessence Int.* 2005;36(2):141-7.
87. Kern M. Fifteen-year survival of anterior all-ceramic cantilever resin-bonded fixed dental prostheses. *J Dent.* 2017;56:133-5.
88. Kern M, Passia N, Sasse M, Yazigi C. Ten-year outcome of zirconia ceramic cantilever resin-bonded fixed dental prostheses and the influence of the reasons for missing incisors. *J Dent.* 2017;65:51-5.
89. Jung RE, Pjetursson BE, Glauser R, Zembic A, Zwahlen M, Lang NP. A systematic review of the 5-year survival and complication rates of implant-supported single crowns. *Clin Oral Implants Res.* 2008;19(2):119-30.
90. Pjetursson BE, Sailer I, Latyshev A, Rabel K, Kohal RJ, Karasan D. A systematic review and meta-analysis evaluating the survival, the failure, and the complication rates of veneered and monolithic all-ceramic implant-supported single crowns. *Clin Oral Implants Res.* 2021;32 Suppl 21(Suppl 21):254-88.
91. Edelhoff D, Sorensen JA. Tooth structure removal associated with various preparation designs for anterior teeth. *J Prosthet Dent.* 2002;87(5):503-9.
92. Edelhoff D, Sorensen JA. Tooth structure removal associated with various preparation designs for posterior teeth. *Int J Periodontics Restorative Dent.* 2002;22(3):241-9.
93. Kerschbaum T, Voss R. [The risk of crowns]. *Dtsch Zahnarztl Z.* 1979;34(10):740-3.
94. Sasse M, Kern M. CAD/CAM single retainer zirconia-ceramic resin-bonded fixed dental prostheses: clinical outcome after 5 years. *Int J Comput Dent.* 2013;16(2):109-18.
95. Beikler T, Flemmig TF. EAO consensus conference: economic evaluation of implant-supported prostheses. *Clin Oral Implants Res.* 2015;26 Suppl 11:57-63.
96. Jordan RA, Bodechtel C, Hertrampf K, Hoffmann T, Kocher T, Nitschke I, et al. The Fifth German Oral Health Study (Funfte Deutsche Mundgesundheitsstudie, DMS V) - rationale, design, and methods. *BMC Oral Health.* 2014;14:161.
97. Jung RE, Zembic A, Pjetursson BE, Zwahlen M, Thoma DS. Systematic review of the survival rate and the incidence of biological, technical, and aesthetic complications of single crowns on implants reported in longitudinal studies with a mean follow-up of 5 years. *Clin Oral Implants Res.* 2012;23 Suppl 6:2-21.
98. Chen H, Liu N, Xu X, Qu X, Lu E. Smoking, radiotherapy, diabetes and osteoporosis as risk factors for dental implant failure: a meta-analysis. *PLoS One.* 2013;8(8):e71955.
99. Chappuis V, Avila-Ortiz G, Araujo MG, Monje A. Medication-related dental implant failure: Systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Implants Res.* 2018;29 Suppl 16:55-68.
100. Thilander B, Odman J, Lekholm U. Orthodontic aspects of the use of oral implants in adolescents: a 10-year follow-up study. *Eur J Orthod.* 2001;23(6):715-31.
101. Bhola M, Neely AL, Kolhatkar S. Immediate implant placement: clinical decisions, advantages, and disadvantages. *J Prosthodont.* 2008;17(7):576-81.

102. Esposito M, Grusovin MG, Polyzos IP, Felice P, Worthington HV. Timing of implant placement after tooth extraction: immediate, immediate-delayed or delayed implants? A Cochrane systematic review. *Eur J Oral Implantol.* 2010;3(3):189-205.
103. Clementini M, Tiravia L, De Risi V, Vittorini Orgeas G, Mannocci A, de Sanctis M. Dimensional changes after immediate implant placement with or without simultaneous regenerative procedures: a systematic review and meta-analysis. *J Clin Periodontol.* 2015;42(7):666-77.
104. Arora H, Khzam N, Roberts D, Bruce WL, Ivanovski S. Immediate implant placement and restoration in the anterior maxilla: Tissue dimensional changes after 2-5 year follow up. *Clin Implant Dent Relat Res.* 2017;19(4):694-702.
105. Chen ST, Buser D. Esthetic outcomes following immediate and early implant placement in the anterior maxilla--a systematic review. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2014;29 Suppl:186-215.
106. Chen ST, Buser D. Clinical and esthetic outcomes of implants placed in postextraction sites. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2009;24 Suppl:186-217.
107. Cosyn J, Eghbali A, Hermans A, Vervaeke S, De Bruyn H, Cleymaet R. A 5-year prospective study on single immediate implants in the aesthetic zone. *J Clin Periodontol.* 2016;43(8):702-9.
108. Morton D, Chen ST, Martin WC, Levine RA, Buser D. Consensus statements and recommended clinical procedures regarding optimizing esthetic outcomes in implant dentistry. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2014;29 Suppl:216-20.
109. Pjetursson BE, Asgeirsson AG, Zwahlen M, Sailer I. Improvements in implant dentistry over the last decade: comparison of survival and complication rates in older and newer publications. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2014;29 Suppl:308-24.
110. Szucs TD. *Medizinische Ökonomie: eine Einführung.* München: Urban & Vogel GmbH; 1997. 1-271 p.
111. Slade GD, Spencer AJ. Development and evaluation of the Oral Health Impact Profile. *Community Dent Health.* 1994;11(1):3-11.
112. John MT, Omara M, Su N, List T, Sekulic S, Haggman-Henrikson B, et al. Recommendations for Use and Scoring of Oral Health Impact Profile Versions. *J Evid Based Dent Pract.* 2022;22(1):101619.
113. Naumann M, Blankenstein F, Kiessling S, Dietrich T. Risk factors for failure of glass fiber-reinforced composite post restorations: a prospective observational clinical study. *Eur J Oral Sci.* 2005;113(6):519-24.
114. Linnemann T, Kramer EJ, Schwendicke F, Wolf TG, Meyer-Lueckel H, Wierichs RJ. Longevity and Risk Factors of Post Restorations after up to 15 Years: A Practice-based Study. *J Endod.* 2021;47(4):577-84.
115. Fewtrell MS, Kennedy K, Singhal A, Martin RM, Ness A, Hadders-Algra M, et al. How much loss to follow-up is acceptable in long-term randomised trials and prospective studies? *Arch Dis Child.* 2008;93(6):458-61.
116. Sarkis-Onofre R, Amaral Pinheiro H, Poletto-Neto V, Bergoli CD, Cenci MS, Pereira-Cenci T. Randomized controlled trial comparing glass fiber posts and cast metal posts. *J Dent.* 2020;96:103334.

117. Monticelli F, Grandini S, Goracci C, Ferrari M. Clinical behavior of translucent-fiber posts: a 2-year prospective study. *Int J Prosthodont*. 2003;16(6):593-6.
118. Albashaireh ZS, Ghazal M, Kern M. Effect of dentin conditioning on retention of airborne-particle-abraded, adhesively luted glass fiber-reinforced resin posts. *J Prosthet Dent*. 2008;100(5):367-73.
119. Balbosh A, Ludwig K, Kern M. Comparison of titanium dowel retention using four different luting agents. *J Prosthet Dent*. 2005;94(3):227-33.
120. Bruhnke M, Krastl G, Neumeyer S, Beuer F, Herklotz I, Naumann M. Forced Orthodontic Extrusion to Restore the Unrestorable: A Proof of Concept. *Int J Periodontics Restorative Dent*. 2023;43(5):560-9.
121. Rosenberg ES, Cho SC, Garber DA. Crown lengthening revisited. *Compend Contin Educ Dent*. 1999;20(6):527-32, 34, 36-8 passim; quiz 42.
122. Pontoriero R, Celenza F, Jr., Ricci G, Carnevale G. Rapid extrusion with fiber resection: a combined orthodontic-periodontic treatment modality. *Int J Periodontics Restorative Dent*. 1987;7(5):30-43.
123. Faramarzi M, Rikhtegaran S, Biroon SH. Effectiveness of Nd:YAG Laser Fiberotomy in Clinical Crown Lengthening by Forced Eruption. *Int J Periodontics Restorative Dent*. 2017;37(2):211-7.
124. Chaushu S, Zahavi T, Becker A. Forced eruption of maxillary incisor teeth from the lingual side. *Quintessence Int*. 2004;35(6):431-6.
125. Zyskind K, Zyskind D, Soskolne WA, Harary D. Orthodontic forced eruption: case report of an alternative treatment for subgingivally fractured young permanent incisors. *Quintessence Int*. 1992;23(6):393-9.
126. Littlewood SJ, Kandasamy S, Huang G. Retention and relapse in clinical practice. *Aust Dent J*. 2017;62 Suppl 1:51-7.
127. Bach N, Baylard JF, Voyer R. Orthodontic extrusion: periodontal considerations and applications. *J Can Dent Assoc*. 2004;70(11):775-80.
128. Association GD, e.V AdDZ. Dental fee schedule (GOZ), as of December 5, 2011 Berlin: German Dental Association, Arbeitsgemeinschaft der Deutschen Zahnärztekammern e.V. [https://www.bzaek.de/fileadmin/PDFs/GOZ/gebuehrenordnung\\_fuer\\_zahnaerzte\\_2012\\_EN.pdf](https://www.bzaek.de/fileadmin/PDFs/GOZ/gebuehrenordnung_fuer_zahnaerzte_2012_EN.pdf).
129. Schwendicke F, Stolpe M, Meyer-Lueckel H, Paris S. Detecting and treating occlusal caries lesions: a cost-effectiveness analysis. *J Dent Res*. 2015;94(2):272-80.
130. Schwendicke F, Graetz C, Stolpe M, Dorfer CE. Retaining or replacing molars with furcation involvement: a cost-effectiveness comparison of different strategies. *J Clin Periodontol*. 2014;41(11):1090-7.
131. Kim SG, Solomon C. Cost-effectiveness of endodontic molar retreatment compared with fixed partial dentures and single-tooth implant alternatives. *J Endod*. 2011;37(3):321-5.
132. Pennington MW, Vernazza CR, Shackley P, Armstrong NT, Whitworth JM, Steele JG. Evaluation of the cost-effectiveness of root canal treatment using conventional approaches versus replacement with an implant. *Int Endod J*. 2009;42(10):874-83.
133. Goodacre CJ, Naylor WP. Single implant and crown versus fixed partial denture: A cost-benefit, patient-centred analysis. *Eur J Oral Implantol*. 2016;9 Suppl 1:S59-68.

134. Bruhnke M, Wierichs RJ, von Stein-Lausnitz M, Meyer-Luckel H, Beuer F, Naumann M, Sterzenbach G. Long-term Survival of Adhesively Luted Post-endodontic Restorations. *J Endod.* 2022;48(5):606-13.
135. Righolt AJ, Jevdjevic M, Marcenes W, Listl S. Global-, Regional-, and Country-Level Economic Impacts of Dental Diseases in 2015. *J Dent Res.* 2018;97(5):501-7.
136. Clark D, Levin L. In the dental implant era, why do we still bother saving teeth? *Dent Traumatol.* 2019;35(6):368-75.
137. Marrone A, Lasserre J, Bercy P, Brex MC. Prevalence and risk factors for peri-implant disease in Belgian adults. *Clin Oral Implants Res.* 2013;24(8):934-40.
138. Iqbal MK, Kim S. For teeth requiring endodontic treatment, what are the differences in outcomes of restored endodontically treated teeth compared to implant-supported restorations? *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2007;22 Suppl:96-116.
139. Sanz E, Azabal M, Arias A. Quality of life and satisfaction of patients two years after endodontic and dental implant treatments performed by experienced practitioners. *J Dent.* 2022;125:104280.
140. John MT, Feuerstahler L, Waller N, Baba K, Larsson P, Celebic A, et al. Confirmatory factor analysis of the Oral Health Impact Profile. *J Oral Rehabil.* 2014;41(9):644-52.
141. Jemt T, Ahlberg G, Henriksson K, Bondevik O. Changes of anterior clinical crown height in patients provided with single-implant restorations after more than 15 years of follow-up. *Int J Prosthodont.* 2006;19(5):455-61.
142. Iqbal MK, Kim S. A review of factors influencing treatment planning decisions of single-tooth implants versus preserving natural teeth with nonsurgical endodontic therapy. *J Endod.* 2008;34(5):519-29.

## **Danksagung**

Mein Dank gilt Univ.-Prof. Dr. Florian Beuer, MME, Direktor der Abteilung für Zahnärztliche Prothetik, Alterszahnmedizin und Funktionslehre. Lieber Florian, Du hast eine Umgebung geschaffen, in der dieser Weg für mich möglich war. Für Deine konstante Unterstützung und Dein Vertrauen bin ich Dir sehr dankbar.

Ich danke Prof. Dr. Michael Naumann. Lieber Michael, mit Deiner Supervision all unserer gemeinsamen Projekte hast Du maßgeblich dazu beigetragen, dass der Prozess so geradlinig verlaufen ist. Für die unzähligen Stunden an den Manuskripten und unsere Gespräche möchte ich mich bei Dir bedanken. Sie bedeuten mir sehr viel.

PD Dr. Guido Sterzenbach bin ich zu großem Dank verpflichtet. Du bist mein Doktorvater und Mentor. Lieber Guido, ich empfinde unseren Austausch immer als eine große Bereicherung.

Bei PD Dr. Manja von Stein-Lausnitz möchte ich mich für die konstante Unterstützung während meiner Promotion und für den gemeinsam bestrittenen akademischen Weg bedanken.

Dr. Mats Böse war mein immerwährender Halt mit seiner unendlichen Geduld und Hilfsbereitschaft. Dafür bin ich Dir sehr dankbar.

Danken möchte ich Prof. Dr. Ingrid Peroz, die mir diese Stelle als wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Charité angeboten und mir somit überhaupt erst den Weg in die Wissenschaft ermöglicht hat, Univ.-Prof. Dr. Benedikt Spies, unter dessen leitender Tätigkeit ich meine klinischen Studien umsetzen konnte und Prof. Dr. Falk Schwendicke, dessen äußerst schnelle und kooperative Zusammenarbeit mir sehr viel Freude bereitet hat.

Allen Ko-Autoren danke ich für die enge und produktive Zusammenarbeit.

Ich danke der gesamten Abteilung für Zahnärztliche Prothetik, Alterszahnmedizin und Funktionslehre an der Charité – Universitätsmedizin Berlin, insbesondere meinen Kollegen Dr. Stefano Pieralli, Dr. Ufuk Adali, Dr. Simon Peroz, Dr. Sonia Mansour, Dr. Insa Herklotz und Dr. René Tunjan.

Mein besonderer Dank gilt dir, Jan, für deine bedingungslose Unterstützung, die mir diesen Weg ermöglicht hat. Meiner Familie und meinen Freunden danke ich für ihr stets offenes Ohr und das grenzenlose Verständnis.

## Erklärung

### § 4 Abs. 3 (k) der HabOMed der Charité

Hiermit erkläre ich, dass

- weder früher noch gleichzeitig ein Habilitationsverfahren durchgeführt oder angemeldet wurde,
- die vorgelegte Habilitationsschrift ohne fremde Hilfe verfasst, die beschriebenen Ergebnisse selbst gewonnen sowie die verwendeten Hilfsmittel, die Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern/Wissenschaftlerinnen und mit technischen Hilfskräften sowie die verwendete Literatur vollständig in der Habilitationsschrift angegeben wurden,
- mir die geltende Habilitationsordnung bekannt ist.

Ich erkläre ferner, dass mir die Satzung der Charité – Universitätsmedizin Berlin zur Sicherung Guter Wissenschaftlicher Praxis bekannt ist und ich mich zur Einhaltung dieser Satzung verpflichte.

.....

Datum

.....

Unterschrift