

4 Material und Methode

4.1 Probenauswahl

Es wurden 152 extrahierte, menschliche, obere mittlere Schneidezähne der zweiten Dentition ausgewählt, die zuvor maximal 1 Jahr in einer Alkohollösung¹ lagerten. Karies im Kronen- und Wurzelbereich, sowie keilförmige Defekte oder Erosionen führten zum Ausschluss. Die Zähne wurden mit einer Universalkürette² unter fließendem Wasser von Weichgewebsresten und Konkrementen befreit. Die Wurzellänge wurde mit einer digitalen Messlehre³ vom Apex zum am weitesten koronal gelegenen Punkt der mesialen SZG bestimmt und Zähne mit einer Wurzellänge kleiner 13 mm ausgeschlossen. Alle Zähne wiesen eine vollständige und restaurationsfreie Krone auf. Die Zähne zeigten keine im Durchlicht, mit dem unbewaffneten Auge, erkennbaren Resorptionen, Frakturen oder Infraktionen.

Zum Ausschluss von Zähnen ohne ausreichende Sondierungsmöglichkeit des Endodonts wurde eine Trepanationsöffnung präpariert⁴ und es erfolgte die Instrumentierung mit einer K-Feile⁵ (ISO 15). 132 Probenzähne konnten zur weiteren Verarbeitung ausgewählt werden.

Nach fortlaufender Nummerierung der Probenzähne wurde mit einem digitalen Schnelltaster⁶ (Genauigkeit $\pm 2 \mu\text{m}$) jeweils der größte mesio-distale und vestibulo-orale Durchmesser auf Höhe der SZG bestimmt. Das Produkt aus beiden Werten ergab die Variable zur Gruppenverteilung (Schnittflächenprodukt). Die Gesamtlänge der Zähne wurde mit einer digitalen Messlehre³ (Genauigkeit $\pm 50 \mu\text{m}$) und die Kronenlänge mit einem digitalen Schnelltaster⁶ (Genauigkeit $\pm 2 \mu\text{m}$) ermittelt.

4.2 Gruppeneinteilung

Ein Ranking bezogen auf das Schnittflächenprodukt bildete die Grundlage zur Gruppenzuordnung (Tabelle 4-1). Alternierend von 1 bzw. 12 beginnend sind die Zähne auf 11 Gruppen mit je 12 Proben verteilt worden, sodass die Mittelwerte des Schnittflächenprodukts der Gruppen gleich waren [$p = 1$].

Tabelle 4-1 Versuchsgruppen

Gruppe	Stiftsystem	Zement	Krone	Zement	n	
1	Kontrollgruppe: Kompositaufbau				12	
2	7	ER TitanPost	IPS Empress® 2	Compolute®	24	
3	8 10	ER TitanPost			PANAVIA® 21	36
4		LuscentAnchor			Compolute®	12
5		FibreKor			Compolute®	12
6	9 11	ER DentinPost			Compolute®	36
11		Gesamt				

Zur weiteren Verarbeitung wurden alle nummerngleichen Zähne aus jeder Gruppe zu einer neuen Arbeitsgruppe zusammengefasst. Jedem Prüfkörper wurde ein Aufbewahrungsglas zugeordnet, in dem die Zähne über den gesamten Untersuchungszeitraum in einem Alkohollösung¹ bei Raumtemperatur (20-24 °C) aufbewahrt wurden.

4.3 Herstellung der Probenzähne

4.3.1 Endodontische Aufbereitung

Es wurde eine Versorgungsabformung der Kronen aller Zähne mit einem additionsvernetzten Silikon⁷ vorgenommen. Im Anschluss wurden die Zähne 3 mm oberhalb des koronalsten Punktes der Schmelz-Zementgrenze (mesioapproximal) und senkrecht zur Zahnachse, unter Wasserkühlung dekapitiert⁸.

Für alle nun folgenden Arbeitsschritte wurden die Probenzähne stets mit feuchtem Zellstoff vor dem Austrocknen bewahrt. Zeitweilig diente eine ebenfalls mit feuchtem Zellstoff bedeckte Knetmasse als Probenhalterung.

Alle Proben wurden unter Wasserkühlung trepaniert^{9, 10}. Die Wurzelkanäle wurden mit Handfeilen¹¹ sequentiell bis ISO-Größe 60, 0,5 mm vor dem anatomischen Apex aufbereitet und gespült¹². Zur Lagerung wurden die Zähne provisorisch mit Zinkoxid-Phosphatzement¹³ abgedeckt. Die Wurzelkanalfüllung erfolgte mit Sealer¹⁴ und Gutta-percha-Spitzen¹⁵. Zur lateralen Kondensation diente ein Handspreader¹⁶. Der provisorische

sche Verschluss der Trepanationsöffnung erfolgte erneut mit Zinkoxid-Phosphatzement¹³.

4.3.2 Stiftsetzung

Die Stiftbettpräparation wurde mit dem jeweiligen systemzugehörigen Reamer¹⁷ trocken bei 2000 U/min durchgeführt. Die Stiftbettkavität ist für alle Stiftsysteme bis auf eine Länge von 12 mm präpariert worden. Der Referenzpunkt war die Dekapitationsebene. Damit ergab sich eine residuale Wurzelfüllung von mindestens 4 mm. Die Tabelle 4-2 zeigt eine Auflistung der verwendeten Wurzelstiftsysteme.

Tabelle 4-2 Spezifikation der verwendeten Aufbaustifte**

	ER	ER	Luscent	FibreKor
	TitanPost	DentinPost	Anchor	
	61L16 090	355L12 000 090		N18BB
	LOT 168799	LOT 250379		LOT 58389
Hersteller/ Vertrieb	Fa. Komet, Gebr. Brasseler GmbH & Co.KG , D-32631 Lemgo		Dentatus AB, Loser & Co GmbH D-51381 Leverkusen	Jeneric/Pentron Inc. Wallington, CT 06492 U.S.A.
Material	Reintitan	GFRC*	GFRC*	GFRC*
Makroform	konisch / 2° 6'		zylindro-konisch / 6°	segmentiert zylindrisch
Durchmesser [mm]	ISO 90 min. 0,9 max. 1,78		min. 0,8 max. 1,45	1,25
Stiftlänge [mm]	konisch 12		konisch 12	18
Vorbehandlung	Silan (60 s)	Adhäsiv***	Adhäsiv***	Adhäsiv***

*GFRC: glasfaserverstärktes Komposit

**Herstellerangaben

***EBS Multi, 3M ESPE

4.3.2.1 Allgemeine Vorgehensweise

Die Wurzelkanäle wurden unmittelbar vor der Stiftinsertion mit 2 ml 70 %iger Alkoholösung¹⁸ gespült. Im Anschluss erfolgte die moderate Trocknung der Kanalstollen im Luftstrom (Sprayvitansatz) und mit Papierspitzen¹⁹.

Alle Wurzelstifte sind vor Insertion zunächst mit Aceton²⁰ und im Anschluss mit Alkohollösung¹⁸ gereinigt worden. Die Titanstifte wurden zur Vorbehandlung gestrahlt²¹ und auf 14 mm gekürzt²².

Die Adhäsivsysteme und Kompositemente sind streng nach Herstellerangaben verarbeitet worden (Stand 2002). Zur Anwendung kamen die Kompositemente Compolute[®] und PANA VIA[®] 21. In Tabelle 4-3 ist die Zusammensetzung der verwendeten Komposite und Haftvermittler zur Stiftzementierung und für die Herstellung der Stumpfaufbauten aufgeführt.

Die Applikation des Adhäsivs ist in allen Gruppen mit Hilfe eines Applikator-Bürstchens²³ erfolgt. Die Stifte wurden unter gleichmäßigem Druck (leichter Fingerdruck) eingesetzt und die Überschüsse belassen, um die Notwendigkeit einer Sauerstoffblockerapplikation zu vermeiden.

4.3.2.2 Systemspezifisches Vorgehen

PANA VIA[®] 21

1. Dentinkonditionierung mit PANA VIA Etching Agent (20 s).
2. Absprühen mit Wasser (20 s)
3. Trocknung
4. ED Primer Flüssigkeit A und B im Verhältnis 1:1 vermischen (3-5 s)
5. Auftragen mit Applikator-Bürstchens²³ im Kanallumen (60 s)
6. Verblasen im leichten Luftstrom
7. Katalysatorpaste und Universalpaste im Verhältnis 1:1 vermischen (20 s)
8. Applikation auf den Aufbaustift
9. Stifffixierung mit leichtem Fingerdruck (3 min)

Compolute[®]

1. Dentinkonditionierung mit Ätzelgel MINITIP (20 s)
2. Absprühen mit Wasser (20 s)
3. Trocknung
4. EBS Multi Primer mit Applikator-Bürstchens²³ einmassieren (20 s)
5. Trocknung im Luftstrom bis Wasseranteil vollständig verdunstet ist
6. EBS Multi Bond mit Applikator-Bürstchens²³ dünn einmassieren
7. aktivierte Kapsel im CAPMIX²⁴ angemischt (10 s)
8. Applikation in den Kanal, zusätzliches einrotieren mit Lentulo²⁵ (5 s)
9. Applikation auf den Stift

10. Einbringen des Stiftes in den Kanal und initiale Lichthärtung²⁶ (10 s)

11. Lichtpolymerisation²⁶ (120 s)

Kontrollgruppe

Die Zähne dieser Gruppe wurden mit einem Rosenbohrer²⁷ ($\varnothing 1,6$ mm) bis 3 mm unterhalb der SZG erweitert, ohne das Wurzelkanallumen über den Bohrerdurchmesser zu erweitern. Das Füllen des Präparationskavums und die Herstellung des Aufbaus wurden in der Kontrollgruppe in einem Arbeitsgang mit dem selbsthärtenden Hybridkomposit CLEARFILTMCore durchgeführt. Analog zum Stumpfaufbau wurden gleichzeitig die Vorabformungen aufgefüllt und repositioniert. Zur blasenfreien Applikation diente eine Centrixspritze²⁸.

1. Ätzen mit K-Etchant Gel (20 s)
2. Absprühen mit Wasser (20 s)
3. Trocknung
4. New Bond Universal Liquit und Catalyst Liquit im Verhältnis 1:1 vermischen
5. Auftragen mit Applikator-Bürstchens²³ (60 s)
6. leicht Verblasen (10 s)
7. Vermischen der Basispaste und der Catalysatorpaste im Verhältnis 1:1 (30 s)
8. Applikation vom Kanallumen beginnend und Auffüllen der Vorabformung
9. Repositionierung der Vorabformungen

Zur Minimierung der Wassereexposition wurden die Proben nach Stiftinsertion provisorisch abgedeckt (Cavit²⁹) und nach 12 stündiger Lagerungsdauer mit dem Aufbau versehen.

Tabelle 4-3: Zusammensetzung der verwendeten Komposite und Haftvermittler*

Produkt	Komposit	Konditionierer	Haftvermittler
PANAVIA® 21 EX	Chemischhärtendes Hybridkomposit	PANAVIA Etching Agent	ED-Primer
Kuraray Co.,LTD., Osaka, Japan Kurarary Europe GmbH, D-40549 Düsseldorf	Barium Glaspulver Dimethacrylate Titanoxid, Methacryl- oxyloxydecyldihydrogen- phosphat (MDP), kolloidales Silikat, Amine, Benzoylperoxid	Phosphorsäure (H ₃ PO ₄) 40%	2-Hydroxyethyl- methacrylat (HEMA), MDP, Natriumbenzen- sulfinat, N,N-Diethanol- p-Toluidin, Wasser
Compolute®	Dualhärtendes Hybridkomposit	Ätzel MINITIP	EBS Multi
3M ESPE AG, D- 82229 Seefeld LOT 112594	gesinterte Füller 72,5% Monomere 26,7% Initiatoren 0,8%	H ₃ PO ₄ 37%	Primer: HEMA 45% Wasser 35% Amine 10% Bond: Bis-Ma 73% MAM 17% HEMA 7% Amenidol-Methacrylat, Photoinitiator 2%
CLEARFIL™Core	Chemischhärtendes Hybridkomposit	K-Etchant	New Bond
Kuraray Co.,LTD., Osaka, Japan Kurarary Europe GmbH, D-40549 Düsseldorf LOT 41211	silanisieretes Silikat, kolloidales Silikat, Bisphe- nol-A-Glycidimethacrylat (Bis-GMA), Triethylen- glycoldimethacrylat, (TEGDMA), N,N-Diethanol- p-Toluidin	H ₃ PO ₄ 40%	Bis-GMA, MDP 10, HEMA, Dimethacrylat, Benzoylperoxid, N,N- Diethanol-P-Toluidin, Natrium-benzol-sulfinat, Ethylalkohol

* Herstellerangaben

4.3.3 Aufbauherstellung

Alle Zähne wurden mit Kompositaufbauten aus dem Komposit CLEARFIL™Core versorgt. Die Verarbeitung wurde analog zur Herstellung der erweiterten Stumpfaufbauten der Kontrollgruppe durchgeführt.

Zur Fertigung des Aufbaus ist bei allen Proben die Vorabformung als „Gussform“ verwendet worden, um somit die originäre Kronenform wieder herzustellen (Abb. 4-1). Zuvor erfolgten die Entfernung der Überschüsse des Befestigungskomposits mit einer Kürette² und eine Anfrischung der Dentinbereiche für den Kompositaufbau mit einem Rosenbohrer²⁷ (2000 U/min). Die angemischte Kompositmasse wurde mittels einer Centrixspritze²⁸ zunächst zirkulär um den Wurzelstift auf dem Zahn appliziert und anschließend in die Vorabformungen injiziert, in welche der Zahn reponiert wurde. Zuvor wurden dünne palatinale Abflussrillen angelegt. Nach fünfminütiger Aushärtphase wurden die Überschüsse mit einer Kürette² entfernt.



Abbildung 4-1

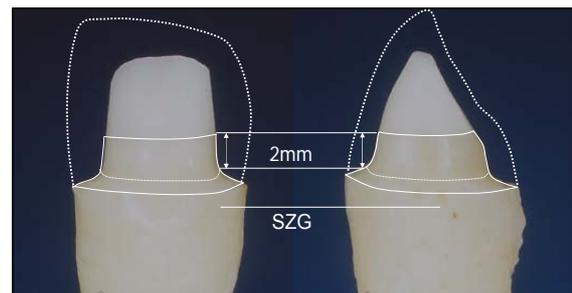


Abbildung 4-2

4.3.4 Stumpfpräparation

In diesem Arbeitsschritt wurden alle Zähne in der Hand mit diamantierten Schleifern³⁰ entsprechend den vom Hersteller (Ivoclar-Vivadent) geforderten Dimensionen für eine Vollkeramikkrone präpariert. Die Präparierdiamanten wurden nach 20 Prüfkörpern ausgetauscht, um eine verschleißbedingte Überhitzung zu vermeiden. Die Präparation erfolgte wassergekühlt mit einer Turbine⁹ und das abschließende Finieren mit Feinstkorn-diamanten³⁰ bei 20000 U/min. Zunächst wurden Markierungsrillen mit diamantierten Kugeln³⁰ entsprechenden Durchmessers angelegt.

Die Stufenbereite betrug zirkulär 1 mm, vestibulär und palatinal lag die Präparationstiefe bei 1,3- 1,5 mm und inzisal wurde um 2,0 mm reduziert. Es wurden diamantierte Zylinder³⁰ mit abgerundeter Stufe benutzt. Der angestrebte Präparationswinkel betrug

10°. Mit der Präparation wurde eine zirkuläre Dentinmanschette (ferrule) von 2 mm angelegt (Abb. 4-2). Die Präparationsgrenze lag zirkulär im Schmelzbereich.

Für alle Proben wurde unmittelbar nach Präparation eine provisorische Krone hergestellt, um die Wasseraufnahme der Kompositaufbauten zu verringern. Die Provisorien wurden mit Kunststoff³¹ gefüllten konfektionierten Hülsen³² gefertigt und mit einem temporärem non-eugenol Zement³³ befestigt.

4.3.5 Kronenherstellung

Die Zähne wurden mit einem additionsvernetzten Silikon⁷ in der Doppelmischtechnik abgeformt. Dazu wurden die Provisorien entfernt und nach erfolgter Abformung rezeimentiert. Nach 10 min. wurden die Zähne herausgelöst und die Abformungen vor der Modellherstellung für 24 h. bei Raumtemperatur zwischengelagert.

Die mit einem Superhartgips³⁴ hergestellten Stumpfmodelle wurden nach 30 min. Abbindezeit entformt. Die Stumpfmodelle wurden mit einem Distanzlack³⁵ zweimalig beschickt, wobei die Präparationsgrenze bis auf 1mm ausgespart wurde. Zum Aufwachsen der Kronen mit Kronen-Modellierwachs³⁶ dienten wiederum die Vorabformungen der originalen Kronen als „Gussform“, um die originäre Dimension jeder Restauration zu gewährleisten.

Mit der ^{IPS}Empress Speedeinbettmasse³⁷ der ^{IPS}Empress® 2 Keramik wurden die Wachsmoellationen eingebettet und nach Herstellerangaben verarbeitet.

Die Kronen wurden aus der ^{IPS}Empress® 2 Keramik³⁸ hergestellt. Die Anstiftung³⁹ der Wachsmoellationen wurde von einer Zahntechnikerin und die Einbettung vom Promovenden durchgeführt. Die Arbeitsschritte für das Vorwärmen bis zum Glasurbrand wurden für die ersten 6 Kronen jeder Arbeitsgruppe von derselben Technikerin und für die letzten 5 Kronen jeder Arbeitsgruppe durch eine Technikerin eines anderen Dentallabors nach folgendem Versuchsprotokoll durchgeführt:

Bedingungen für Kronenherstellung

1. Anstiften der Wachsmoellation an der vestibulären Kronenfläche
 - a. Dimension der Presskanäle: $\varnothing = 2,5 - 3 \text{ mm}$, $l = 3 - \text{max. } 8 \text{ mm}$
 - b. Winkel zum Pressobjekt: $45 - 60^\circ$
 - c. Abstand zur Papiermanschette: mind. 10 mm
 - d. Abgerundete Ansätze
2. Einbetten mit ^{IPS}Empress® Speedeinbettmasse³⁷

- a. Anrühren⁴⁰ nach Herstellerangaben für 2 min. unter Vakuum
- b. Abbindezeit: mind. 30 min – max. 60 min
3. Vorwärmofen⁴¹
 - a. Temperatur: 850 °C
 - b. Vorwärmzeit für 100 g Muffel⁴²: mind. 45 min
 - c. Vorwärmen des Aloxkolben⁴³
4. Pressen⁴⁴ (EP 500)
 - a. Rohling³⁸ 100 g
 - b. Bereitschaftstemperatur: 700 °C
 - c. Temperaturanstieg: 60 °C / min
 - d. Pressdruck: 5 bar
 - e. Endtemperatur: 920 °C
 - f. Haltezeit: 15 min
 - g. Vakuum: 500 – 920 °C
5. Ausbettung⁴⁵
 - a. Grobausbettung: Glanzstrahlmittel⁴⁶ mit 4 bar
 - b. Feinausbettung: Glanzstrahlmittel⁴⁶ mit 2 bar
 - c. Ultraschallreinigung⁴⁷: in Invexflüssigkeit⁴⁸ für 10 – max. 30 min
 - d. Reaktionsschicht entfernen: Al-Korund⁴⁹ Typ 110 mit 1 bar
 - e. Abtrennen⁵⁰ des Pressobjekts und Aufpassen der Krone mit minimaler Schleifarbeit
6. Washbrand
 - a. Gleichmäßiges Auftragen: Dentinfarbe⁵¹ (Pulver) angemischt mit Glasur – Malfarbenfluid⁵²
 - b. Bereitschaftstemperatur: 403 °C
 - c. Temperaturanstieg: 60 °C / min
 - d. Endtemperatur: 800 °C
 - e. Schließzeit des Ofens: 6 min
 - f. Haltezeit: 1 min
 - g. Vakuum: 450 – 800 °C
7. Glasurbrand⁵³
 - a. ^{IPS}Empress® Universal Glasurpaste⁵³ dünn auftragen
 - b. Bereitschaftstemperatur: 403 °C
 - c. Temperaturanstieg: 60 °C / min

- d. Endtemperatur: 780 °C
- e. Schließzeit des Ofens: 6 min
- f. Haltezeit: 1 – 2 min
- g. Vakuum: 450 – 780°C

4.3.6 Zementieren der Vollkeramikronen

Alle Keramikrestaurationen wurden, nach Entfernung der Provisorien, mit dem dualhärtenden Befestigungszement Compolute® eingesetzt. Die Konditionierung der Zähne erfolgte mit Ätzelgel⁵⁴ (37,5 % H₃PO₄) initial für 10 s im Schmelz und anschließend für weitere 20 s im Schmelz und Dentin. Anschließend wurde die Säure für 30 s abgespült und moderat luftgetrocknet.

Unmittelbar vor der Stumpfkonditionierung wurden die Keramikronen für 60 s mit Flusssäuregel⁵⁵ (5 %) geätzt, anschließend für 60 s mit Wasser abgesprüht und nach Lufttrocknung für weitere 60 s in einem Silanbad⁵⁶ getränkt und im Luftstrom getrocknet.

Der Haftvermittler (EBS-Multi) wurde mit einem Applikatorbürstchen²³ in einer dünnen Schicht sowohl auf den Zahnstumpf als auch in die Kronen aufgetragen und leicht verblasen. Es erfolgte keine Lichthärtung. Unmittelbar im Anschluss wurde das Compolute® Aplicap im Rotormixgerät²⁴ für 10 s angemischt und das Komposit ebenfalls in die Kronen und auf den Zahnstumpf aufgetragen. Bei leichtem Fingerdruck wurden die Kronen bis in die Endposition gebracht. Nach der Zementierung wurden mittels Watterolle die Überreste entfernt, zirkulär ein Sauerstoffblocker⁵⁸ aufgetragen und die Lichthärtung²⁶ von 45 s für jede Zahnfläche (vestibulär, mesial, palatinal, distal) durchgeführt. Die Politur der Zementfuge erfolgte mit aluminiumoxidbeschichteten Polierscheiben⁵⁸ von mittel über fein bis superfein. Während dieser Versuchsphase wurden alle Probenzähne, wie zuvor beschrieben, in der Probenhalterung vor Austrocknung geschützt.

4.4 Einbettung der Probenkörper

Zur Imitation des Parodonts und gleichzeitiger Gewährleistung der Retention des Zahns in der Einbettmasse wurden alle Zähne mit einer Schicht „Anti-Rutsch“-Lack⁵⁹ bis 2 mm unterhalb der SZG durch einmaliges Eintauchen überzogen.

Eine zirkuläre Wachsmanschette aus Anstiftwachs³⁹ (Ø 2,5 mm) unterhalb der SZG-Grenze sicherte den gleichmäßigen 2 mm starken Saum des physiologischen supraal-

veolären Wurzelbereiches auch beim Einbetten in den Kunststoff⁶⁰. Zunächst wurden die Probenzähne der Gruppen 7, 8 und 9 für die Kausimulation mit einem Silikonschlüssel in Ausrichtung der Zahnachse im Winkel von 45° zur Tischebene in einen Probenhalter aus Kunststoff⁶⁰ eingebettet. Nach der Kausimulation⁶¹ wurden die Zähne schonend ausgebettet und auf Frakturen untersucht.

Zur Herstellung der Probenhalterung für die linearen Belastungsversuche wurden Doublierungsmasseformen von 6kant Muttern⁶² hergestellt. In diese Form wurde eine kegelförmige Versenkung mit Knetmasse ausgeblockt. Zur reproduzierbaren Festlegung der Zahnachse diente ein auf einem Standfuß montiertes Diodenlicht (Eigenbau). Die Probenzähne wurden mit dem Apex auf den Lichtpunkt gesetzt, in die Knetmasse um 3-4 mm intrudiert und senkrecht ausgerichtet bis der Lichtpunkt sich auf der Mitte der Inzisalkante abzeichnete. Während der Polymerisation des Kunststoffes lagerten die Proben in einem mit kaltem Wasser gefüllten Drucktopf bei 2 bar für 15 min.

Alle Proben wurden vor der Testung in zwei Dimensionen digital geröntgt.

Die standardisierte Positionierung wurde durch die Einbettform gewährleistet. Mit Hilfe eines Führungsstabes wurde der Abstand zum Röntgentubus auf 1,5 cm eingestellt und die Proben mit 0,12 s, 7 mA, 70 kV.

4.5 Simulation der Probenalterung

4.5.1 Kausimulation

Drei Versuchsgruppen wurden einer computergestützten Kausimulation⁶¹ von $1,2 \times 10^6$ Zyklen unterzogen, wobei die Belastungskraft zwischen 0 und 30 N und die Zyklusfrequenz 1,3 Hz bei einer Hubhöhe von 8 mm betrug. Die Belastung entsprach der eugnathen Interkuspitationsposition oberer mittlerer Schneidezähne, 2 mm unterhalb der Inzisalkante, auf der palatinalen Konkavität, und wurde durch eine Stealitkugel (\varnothing 6 mm) gewährleistet. Simultan erfolgte eine Temperaturwechselbadbelastung von 10,000 Zyklen bei 5 °C und 55 °C, bei einer Haltezeit von 60 s.

4.5.2 Temperaturwechselbadbelastung (TWB)

Die Proben der zwei Gruppen für die zyklische Belastung wurden einem thermischen Ermüdungsprozess durch eine zyklische TWB unterworfen. Dabei tauchte ein mikroprozessorgesteuertes Gerät⁶³ die Probenzähne 2000 mal wechselweise in ein Warmwasserbad von 55 ± 5 °C und ein Kältebad mit einer Temperatur von 5 ± 2 °C. Die Proben

verweilten in den Bädern jeweils für 30 s. Die Transferzeit zwischen den Bädern betrug 12 s.

4.6 Bruchversuche

4.6.1 Probenhalterung

Die Proben wurden in einer Universalprüfmaschine⁶⁴ im Winkel von 135° palatinal zur Zahnachse belastet (Abbildung 4-3). Der Kraftangriffspunkt lag auf der Inzisalkante der Proben. Die vestibulo-palatinal Neigung gegen die Vertikale wurde durch die Anordnung der Probenhalterung gewährleistet. Die Probenhalterung wurde aus einem Messingblock gefräst und entsprach exakt den Außenmaßen der für die Kunststoffblöcke verwendeten Negativformen der Muttern. Der Messingblock bildete mit dem fest verschraubten Standfuß einen Winkel von 45° zur Tischebene. Dieser wiederum wurde mit dem Fuß der Prüfmaschine⁶⁴ fest verschraubt. Eine 0,9 mm starke Zinnfolie wurde zwischen Stempel und Krone positioniert.

Zur Gewährleistung eines sicheren Kontaktes des Messanzeigers für die apikale Auslenkung wurde an den Apex eine Kunststoffkugel (Ø 1 mm) geklebt (Abbildung 4-4).

Während des Versuches wurden alle Proben mit einem feuchten Zellulosestreifen umwickelt, um eine Austrocknung der Proben zu verhindern.

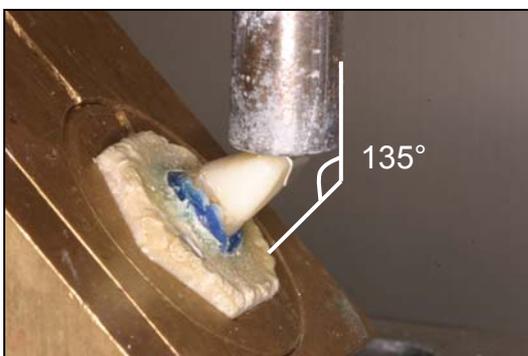


Abbildung 4-3

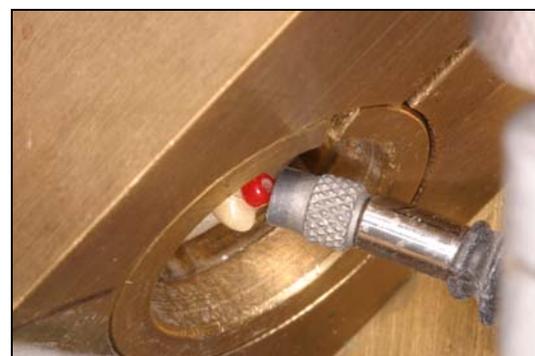


Abbildung 4-4

4.6.2 Versuchsablauf

Alle Prüfkörper lagerten bis zum Belastungsversuch über 55 Wochen in einer 20 %igen Alkohollösung¹, mit Ausnahme einer 8 tägigen Lagerung in destilliertem Wasser während der Kausimulation für die Gruppen 7 - 9 bzw. einer 24 stündigen Lagerung in destilliertem Wasser während der thermischen Wechselbadbelastung für die Gruppen 10 und 11. Die Belastungsversuche wurden innerhalb von 17 Tagen durchgeführt. Die Gesamtlagerungsdauer setzt sich für alle Probenzähne wie folgt zusammen:

Probenauswahl	→ Stiftinsertion:	7 Wochen
Stiftinsertion	→ Stumpfaufbau:	24 Stunden
Stumpfaufbau	→ Kronenpräparation:	1 Wochen
Kronenpräparation	→ Kronenzementierung:	4 Wochen
Kronenzementierung	→ Belastungsversuch:	43 Wochen

Tabelle 4-4 Überblick über die gruppenspezifische Belastungsmethode

Gruppe						Alterung	Belastung	Lagerung [Wochen]
1	2	3	4	5	6	-----	linear steigend	$\Sigma = 55$
7		8		9		Kausimulation*	linear steigend	$\Sigma = 55$
10				11		TWB~	zyklisch steigend	$\Sigma = 55$

* 1,2 Millionen Zyklen 0 – 30N und 10 000 Zyklen TWB zwischen 5 – 55 °C

~ 2000 Zyklen TWB zwischen 5 – 55 °C

4.6.2.1 Linear steigende Belastung

Die Proben wurden mit einer linearen Vorschubgeschwindigkeit von 1mm/min bis zum Versagen belastet. Mit Erreichen der Vorlast von 0,1 N wurde die Kraft auf Null gebracht und der Versuch gestartet. Die Kraftabschaltsschwelle wurde auf 10 % der Maximalkraft (F_{\max}) definiert und der Versuch automatisch abgebrochen. Die Belastungssteigerung erfolgte stufenlos und ohne Haltezeit. Pro Versuch kamen 50 Messdatensätze zur Auswertung, wobei die Maximalkraft (F_{\max}), die Längenänderung unter Belastung ($\Delta L = \text{Dehnung}$) bei F_{\max} , sowie die apikale Auslenkung bei F_{\max} erfasst wurden.

4.6.2.2 Zyklisch steigende Belastung

Die Vorschubgeschwindigkeit betrug 1mm/min. Für die erste Kraftstufe betrug die Standardkraft 50 N für Stufe 1 und 0 N für Stufe 2. In jeder Kraftstufe wurden 200 Stufen (100 Zyklen/Kraftstufe) gefahren. Die Standardkraft wurde in jeder weiteren Kraftstufe um 50 N erhöht ($\Delta F = 50 \text{ N}$). Gemessen wurde die Zykluszahl, die Maximalkraft (F_{\max}), die Bruchkraft, die Längenänderung unter Belastung ($\Delta L = \text{Dehnung}$) bei F_{\max} sowie die apikale Auslenkung bei F_{\max} .

4.7 Auswertung

Zur numerischen Auswertung diente die maximale Belastung [N] (F_{\max}), die aufgebracht wurde, als es zum Versagen des Probekörpers kam. Um einen weiteren Vergleichsparameter zu gewinnen, wurde für die Auswertung der zyklischen Belastung ein Wert kreiert (kumulierte Kraft), der die Gesamtbelastung berücksichtigt und sich aus der Kraft und der Zyklenzahl zusammensetzt. Dabei wurde die Kraft [N] in jeder Kraftstufe (F_1, F_2, F_3 usw.) mit der Zykluszahl (100) für jede Kraftstufe (Z_1, Z_2, Z_3 usw.) multipliziert. Diese Produkte wurden bis zur letzten Kraftstufe in der die Probe noch intakt war summiert und das Produkt des letzten Zyklus (Z_{bruch}) mit der Bruchkraft (F_{bruch}) addiert (Gleichung 1).

$$\text{„kumulierte Kraft“} = F_1 \cdot Z_1 + F_2 \cdot Z_2 + F_3 \cdot Z_3 + \dots + F_{\text{bruch}} \cdot Z_{\text{bruch}} \quad (1)$$

Die Berechnung des E-Moduls erfolgte mit der Gleichung (5) nach Umstellung der Gleichung für die Berechnung der Durchbiegung eines einseitig eingespannten Balkens (2). Das axiale Flächenmoment wurde für den Kreisdurchmesser berechnet, wobei der Durchmesser sich aus der Quersumme der mesio-distalen und vestibulo-oralen Durchmesser ergibt.

$$f = \frac{M \cdot l^2}{3 \cdot E \cdot I_y} \quad (2)$$

f = Auslenkung; M = Biegemoment; l = Länge der Probe; E = E-Modul;

I_y = Flächenträgheitsmoment

Biegemoment:

$$M = F \cdot l \quad (3)$$

F = Kraft (Last); l = Länge der Probe

Flächenträgheitsmoment für den Kreis:

$$I_y = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \quad (4)$$

π = Kreiszahl (pi)

d = Durchmesser

Mit der Berechnung des Flächenträgheitsmomentes für einen kreisförmigen Querschnitt ist die Gleichung für die Durchbiegung eines einseitig eingespannten Zylinders gültig (Schwickerath 1977). Umstellung der Gleichung (2) nach E :

$$E = \frac{F \cdot l^3}{3 \cdot I_y \cdot f} \quad (5)$$

Für die Auswertungen wurden zur Veranschaulichung Gruppensynonyma festgelegt (Tabelle 4-5).

Tabelle 4-5 Erläuterung der Gruppensynonyma als Ableitung aus den verwendeten Versuchsmaterialien

Gruppe	Synonym	Aufbaustift	Kompositzement	Alterung	Belastung
1	CIO	Ohne Stift	CLEARFIL™ Core	-	linear
2	TC	ER-TitanPost	Compolute®	-	linear
3	TP	ER-TitanPost	PANAVIA® 21	-	linear
4	LC	LuscentAnchor	Compolute®	-	linear
5	FC	FibreKor	Compolute®	-	linear
6	DC	ER-DentinPost	Compolute®	-	linear
7	TC*	ER-TitanPost	Compolute®	*Kausimulation	linear
8	TP*	ER-TitanPost	PANAVIA® 21	*Kausimulation	linear
9	DC*	ER-DentinPost	Compolute®	*Kausimulation	linear
10	TP~	ER-TitanPost	PANAVIA® 21	~TWB 2000	zyklisch
11	DC~	ER-DentinPost	Compolute®	~TWB 2000	zyklisch

4.7.1 Statistik

Für die statistische Auswertung kam die Software SPSS⁶⁵ zur Anwendung. Die statistische Auswertung erfolgte mit nicht-parametrischen Tests, da die gegebene Verteilung der maximalen Belastungswerte von der Normalverteilung abwich. Das Signifikanzniveau wurde mit $\alpha = 0,05$ festgelegt. Die quantitativen Gruppenvergleiche wurden mit dem H-Test nach Kruskal und Wallis und für den paarweisen Gruppenvergleich mit dem U-Test nach Mann und Whitney durchgeführt. Für die Analyse der Belastungsmethoden wurde die Variable der maximalen Belastung F_{\max} [N] für das Stiftmaterial und die Belastungsmethode mit einer zweifaktoriellen, nicht-parametrischen Varianzanalyse⁶⁶ ausgewertet. Die Frakturmuster wurden als nominal skalierte Merkmale mit dem Chi-Quadrat-Test auf signifikante Unterschiede materialspezifisch ausgewertet.