

3. Material und Methode

Zu untersuchende Materialien sowie Hilfsmaterialien werden zunächst in Kap.3.1 beschrieben, um danach die Methodik in Vorversuchen zu erproben (Kap. 3.2) und in Kapitel 3.3 die Herstellungsprozesse der Proben, die Versuchsdurchführung und die Analyseverfahren darzustellen.

3.1. Materialien

Aus den verschiedenen Stiftstumpfaufbausystemen und ihren Befestigungsmitteln werden 8 Untersuchungsgruppen gebildet, die in Tab. 3.1 vorgestellt werden.

Tab. 3.1: Untersuchte Stiftstumpfaufbau-Systeme

Stiftmaterial	Abkürzung	Stift:		Aufbau: Fabrikat, Herstellung	Befestigung, Fabrikat
		Fabrikat	Durchmesser [mm]		
Phantom-Metall	PhanMe/ GIZ	Phantom-Metall, Degussa-Hüls AG	1,7	Phantom-Metall, Degussa-Hüls AG, Schleuderguss	KetacCem, Espe
Zirkonoxidkeramik	Cosmo/ GIZ	CosmoPost, Ivoclar	1,7	Empress Cosmo, Ivoclar, Heisspressverfahren	Syntac VariolinkII Ivoclar
	Cosmo/ Vario		1,7		
Glasfaser- verstärkter Kunststoff	Glas/ Multi	FRC Postec, Ivoclar	2,0	Tetric, Ivoclar, direkt	ExciteDSC Multilink, Ivoclar
	HTGlas/ PanF	HT Cytec blanco Hahnenkratt	1,8		
Karbonfaser verstärkter Kunststoff	Karb*/ PanF	Mirafit black, Hager&Werken	1,5		EDPrimer PanaviaF, Kuraray
	Karb/ PanF		1,5		
	HTKarb/ PanF	HT Cytec carbon Hahnenkratt	1,8		

3.1.1. Metallstifte

Die für die Versuche verwendete Legierung Phantom-Metall (Degussa-Hüls AG, Hanau) soll stellvertretend für metallische Stiftstumpfaufbau-Systeme Anwendung finden. Es besteht aus 78,5 Massenprozent (m%) Kupfer, 10,0 m% Zink, 9,0 m% Zinn und 2,5 m% Cobalt, und kommt einer Messing-Legierung mit 70 m% Kupferanteil (E-Modul= 116 GPa) in seinen Bestandteilen sehr nahe. Seine technischen Daten sind der Tabelle 3.2 zu entnehmen.

Tab. 3.2: Technische Daten des Phantom-Metalls [24]

Schmelzintervall	Härte	Zugfestigkeit	Dehngrenze	Bruchdehnung	Dichte	Guss-temperatur
900 – 1030 °C	HV5 130	400 MPa	230 N/mm ²	50 %	9 g/cm ³	1050 – 1100 °C

Phantom-Metall ist ein zahntechnischer Übungswerkstoff, der in der Verarbeitung den Eigenschaften handelsüblicher Dental-Edelmetall-Legierungen sehr nahe kommt.

Seine Härte, Dehngrenze sowie sein E-Modul und Schmelzintervall liegen im Bereich der von hochgoldhaltigen Edelmetall-Legierungen [97].

Zur Herstellung der gegossenen Stiftstumpfaufbauten wurden ausbrennbare Stifte des Exatec G Systems (Fa. Hahnenkratt, Königsbach-Stein) verwendet. Sie besitzen eine konische Form mit einem Durchmesser von 1,8 mm am zervikalen Ende und von 0,98 mm an der apikalen Spitze bei einer Gesamtlänge von 11,4 mm.

Für die in vorliegender Arbeit gewählte Stiftlänge von 10 mm ergibt sich für die metallischen Stifte ein Durchmesser von 1,7 mm im zervikalen Bereich.

3.1.2. Keramikstifte

Aus Zirkonoxid–Hochleistungskeramik bestehen die in vorliegenden Versuchen eingesetzten Keramikstifte CosmoPost (Ivoclar Vivadent AG, Schaan, FL., Tab. 3.3). Sie sind zylindronisch geformt und werden in zwei unterschiedlichen Größen angeboten. Indiziert sind die Stifte mit einem Durchmesser von 1,4 mm im Oberkiefer für laterale Schneidezähne sowie im Unterkiefer für alle Inzisiven, und mit einem Durchmesser von 1,7 mm bei allen Zähnen, bei denen hinsichtlich des koronalen Durchmesseranteils ein größerer Stift nötig ist. Dies ist meist bei Eckzähnen und mittleren Oberkieferschneidezähnen der Fall.

Zu den Stiften gehören sowohl ein Kanaleröffner (Durchmesser 1,1 mm), als auch je ein Kanalbohrer mit einem Durchmesser von 1,4 mm bzw. 1,7 mm.

Tab. 3.3: Zusammensetzung CosmoPost [70]

Zusammensetzung CosmoPost in Gew.-%	
ZrO ₂ + HfO ₂ + Y ₂ O ₃ *	> 99
Y ₂ O ₃	= 4,5 - 5,4
HfO ₂	< 5,0
Al ₂ O ₃	< 0,5
* durch Yttrium teilstabilisiertes tetragonales Zirkonoxid	

Vorteilhaft bei den keramischen Stiften sind ihre große Biokompatibilität [1, 66] und Ästhetik [55, 66, 82, 140] sowie ihre Röntgensichtbarkeit. Korrosive Vorgänge, wie sie oft bei metallischen Stiftstumpfaufbauten beobachtet wurden, treten nicht auf (Tab. 2.1) [14].

3.1.3. Karbonfaserverstärkte Kunststoffstifte

Karbonfasern werden aufgrund ihrer vortrefflichen Materialeigenschaften (geringes Gewicht, hohe Ermüdungsgrenze, Korrosionsbeständigkeit) bereits in vielen Bereichen wie der Raumfahrttechnik, der Kraftfahrzeugindustrie, aber auch in der Herstellung von Leistungssportgeräten eingesetzt. Durch ihre hohe Biegebruchfestigkeit bei vergleichsweise niedrigem E-Modul fanden sie auch als geeignetes Verstärkungsmaterial von Kunststoffstiften in der Zahnmedizin Eingang. Zur Anwendung kommen in dieser Arbeit der Mirafit black und der HT Cytec carbon Stift. Die Mirafit black Stifte (Fa. Hager & Werken, Duisburg) sind 20,0 mm lang und werden mit Durchmessern von 1,2 mm, 1,35 mm und 1,5 mm angeboten, sodass für diese Untersuchungsgruppen ein Stiftdurchmesser von 1,5 mm gewählt werden konnte. Die Stifte sind zylindrisch geformt und an ihrem apikalen Ende spitz zulaufend bei einer Oberflächenrauigkeit von 5 bis 15 μm . Sie unterscheiden sich von anderen faserverstärkten Stiften in der Ausrichtung der Faserbündel. Üblicherweise sind diese in Längsrichtung, also parallel zueinander ausgerichtet. Bei den Mirafit Stiften sind die Faserbündel über Kreuz vernetzt ausgerichtet, sodass eine höhere Bruchfestigkeit erwartet wird. In der linken Abbildung 3.1 wird dieser Faserverlauf im zweiten horizontalen Viertel von oben deutlich.

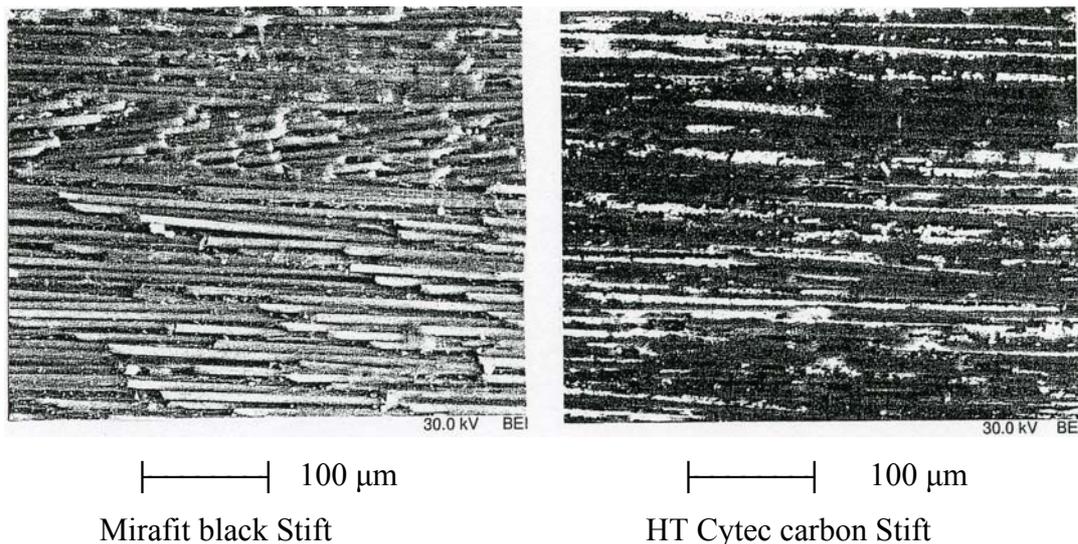


Abb. 3.1: Elektronenmikroskopische Aufnahmen der Faserverläufe in Mirafit black und HT Cytec carbon Stiften

Die HT Cytec carbon Stifte (Fa. Hahnenkratt, Königsbach-Stein) besitzen eine Länge von 22,0 mm und sind zylindrokönisch ausgeformt. Sie werden in vier verschiedenen Durchmessern angeboten (Tab. 3.4). Der zervikale Durchmesser der in der Studie verwendeten Stifte beträgt 1,8 mm, der apikale Durchmesser 1,2 mm.

Tab.3.4: Übersicht über die Dimensionierung von HT Cytec Stiften [56]

Größenangebot von HT Cytec blanco und HT Cytec carbon Stiften					
Durchmesser	zervikal [mm]	1,2	1,4	1,6	1,8
	apikal [mm]	0,6	0,8	1,0	1,2
Länge [mm]		22	22	22	22

Die Stiftköpfe sind mit flachen Einkerbungen versehen, der untere Stiftbereich mit spiralförmigen Abzugsrillen, die eine Dekompression bei Insertion sicherstellen.

Zu dem System gehören ein Kanalerweiterer und ein Kalibrierbohrer.

Die Fasern sind gebündelt longitudinalparallel in der Epoxidharzmatrix ausgerichtet (Abb. 3.1) und nach ISO 10993 (Sensibilisierung und Zytotoxizität) auf ihrer Biokompatibilität getestet.

3.1.4. Glasfaserverstärkte Kunststoffstifte

Glasfasern finden in der Medizintechnik schon viele Jahre Anwendung (z.B. Glasfaseroptik). Seit Ende der neunziger Jahre finden sie auch als Verstärkungsmaterial von Kunststoffstiften (Glasfaserstifte) in der Zahnmedizin Verwendung. Es handelt sich hierbei um amorphe Fasern, die nach verschiedenen Verfahren aus geschmolzenem Glas gewonnen werden (z.B. Zieh-Reck-Brechprozess, Düsenziehverfahren, Spritzpressen etc.).

Die hier vorgestellten FRC Postec (Ivoclar Vivadent AG, Schaan, FL.) bestehen zu über 60 Gew.-% aus unidirektional ausgerichteten Glasfasern. Ihre Zusammensetzung ist der Tabelle 3.5 zu entnehmen.

Tab. 3.5: Materialzusammensetzung des Glasfaserverstärkten FRC Postec Stiftes [71]

Zusammensetzung FRC Postec in Gew.-%	
Triethylenglycoldimethacrylat	7.6
Urethandimethacrylat	18.3
Hochdisperses Siliziumdioxid	0.9
Katalysatoren und Stabilisatoren	< 0.3
Ytterbiumfluorid	11.4
Glasfasern	61.5

Die konischen Stifte werden in den Größen eins und drei angeboten. Ihre Dimensionierung ist der Tabelle 3.6 zu entnehmen. Zur Aufbereitung der Wurzelkanäle werden Kalibrierbohrer der entsprechenden Größe verwendet. Zur Anwendung kommen hier die Stifte der Größe drei mit einem Durchmesser von 2,0 mm.

Tab. 3.6: Maße der FRC Postec Wurzelstifte

Maße	FRC Postec Größe 1	FRC Postec Größe 3
Konizität	5°18'	5°18'
Spitzendurchmesser	0,8 mm	1,0 mm
Schaftdurchmesser	1,5 mm	2,0 mm
Konizitätlänge	7,8 mm	11,0 mm
Gesamtlänge	15,0 mm	18,0 mm

Hochleistungsglasfasern werden ebenfalls in HT Cytec blanco Stiften (Hahnenkraft GmbH, Königsbach-Stein) verarbeitet. Sie besitzen eine Biegefestigkeit von 13,6 N/mm². In Größe und Form gleichen sie den HT Cytec carbon Stiften (Tab. 3.4). Auch hier wurde ein Stiftdurchmesser von 1,8 mm ausgewählt.

3.1.5. Aufbaumaterial

Die metallischen Aufbauten wurden mit dem Stift in einem Stück gegossen.

Die Aufbauten der keramischen Wurzelstifte bestehen aus zirkonoxidhaltiger Glaskeramik (IPS Empress Cosmo (Ivoclar Vivadent AG)). Der Wärmeausdehnungskoeffizient (WAK) des keramischen Aufbaumaterials IPS Empress Cosmo ist speziell auf den CosmoPost Wurzelstift angepasst. Der Keramik-Keramik-Verbund beider Materialien wird durch das Heißpressverfahren erreicht. Die Faserverstärkten Stifte wurden mit einem plastischen Aufbau aus Tetric (Ivoclar Vivadent AG) versorgt. Es handelt sich hierbei um ein lichthärtendes Feinpartikel - Hybridkomposit.

3.1.6. Befestigungsmittel

Zur Verankerung der Stiftstumpfaufbauten in den Wurzelkanälen wurden die von den Stiftherstellern empfohlenen konventionellen Zemente und chemisch oder dual härtenden Befestigungskomposite eingesetzt (Tab. 3.7).

Für die konventionelle Zementierung der Phantom-Metall- und Keramik- Stiftstumpfaufbauten kam Glasionomerezement (Ketac-Cem radiopaque, Espe, Seefeld) im Kapselsystem zum Einsatz. Zur Befestigung der CosmoPost Zirkonoxidkeramikstifte des Systems Cosmo/Vario diente das dualhärtende Komposit Variolink II (Ivoclar Vivadent AG). Variolink II kann auch allein lichthärtend angewendet werden, wenn nur die Basiskomponente appliziert wird. Zur Konditionierung der Dentinoberfläche wurde das Adhäsiv-System Syntac (Ivoclar Vivadent AG) verwendet (Tab. 3.8). Die Schmier-schicht auf dem Dentin wurde mittels vorheriger Phosphorsäureätzung entfernt.

Tab. 3.7: Stiftstumpfaufbau-Systeme und ihre Befestigungsmittel

Stiftstumpfaufbau, Systemabkürzung	Befestigungsmittel		
	Zement, Fabrikat	adhäsive Befestigung	
		Adhäsiv-System, Fabrikat	Komposit, Fabrikat
Phantom-Metall, PhanMe/GIZ	Ketac-Cem, Espe	_____	_____
CosmoPost, Cosmo/GIZ		_____	_____
CosmoPost, Cosmo/Vario	_____	Syntac, Ivoclar	Variolink II, Ivoclar
FRC Postec, Glas/Multi	_____	Excite DSC, Ivoclar	Multilink, Ivoclar
HT Cytec blanco, HTGlas/PanF	_____	ED Primer, Kuraray	Panavia F, Kuraray
Mirafit black, Karb*/PanF	_____		
Mirafit black, Karb/PanF	_____		
HT Cytec black, HTKarb/PanF	_____		

Zum Einsetzen der FRC Postec Stifte wurden Excite DSC und Multilink, beides Produkte der Ivoclar Vivadent AG, verwendet. Auch hier muss im Vorfeld das Dentin mit Phosphorsäure behandelt werden. Primer und Bonding werden in einem Schritt auf das Dentin aufgetragen. Die Initiatoren für dieses dualhärtende Adhäsiv befindet sich auf den Endopinselchen, sodass eine Aktivierung erst beim Einbringen des Pinsels in das „Einmal-Aktivator“ Töpfchen stattfindet. Es handelt sich hier um ein Kompositadhäsiv des Typs II (Tab. 3.8). Da Multilink ein rein chemisch härtender Kunststoff ist, braucht eine Aushärtung mit UV-Strahlung nicht stattzufinden.

Mirafit black und HT Cytec black Karbonfaserstifte sowie HT Cytec blanco Glasfaserstifte wurden mit Panavia F (Kuraray, Osaka, J.) eingesetzt. Es handelt sich um einen dualhärtenden Kunststoff auf Bis-GMA Basis. Das dazu gehörige Adhäsiv ED Primer ist ein „all-in-one“ Produkt des Typs IV (Tab. 3.8). Die Schmierschicht auf dem Dentin wird durch Phosphorsäureester aufgelöst; ein separates Phosphorsäureätzen entfällt bei der Anwendung dieses Adhäsivs.

Tab. 3.8: Einteilung der verwendeten Adhäsiv-Systeme laut Tab. 2.3 [160]

Adhäsiv-System	Klinische Arbeitsschritte:		
	Ätzel	Primer	Bonding
Syntac	Total Etch, 37% Phosphorsäure	Syntac	Heliobond
ExciteDSC		Primer + Bonding	
EDPrimer	Phosphorsäureester + Primer + Bonding		

3.1.7. Hilfsmaterial

Autopolymerisate

Technovit 4004 (Heraeus Kulzer GmbH, Wehrheim) ist ein schnell härtender, kalt polymerisierender Kunststoff auf Basis von Methylmethacrylat in Form von Pulver und Flüssigkeit. Dieser Kunststoff wurde speziell für die Schliffeinbettung in der Materialprüfung entwickelt und besitzt eine Druckfestigkeit von 1920 kg/cm².

Günstig ist hier die nur geringe Polymerisationswärme des Materials, da so bei der Einbettung der Zähne eine größere Hitzeeinwirkung auf die Zahnwurzeln vermieden werden kann.

Acemi (Wirz-Buehler GmbH) ist ein Kunstharz auf Polyesterbasis und wird in Form von flüssigem Aktivator und zähfließender Basismasse angeboten. In vorliegenden Versuchen wurde es zur Einbettung der Proben in die Bruchform verwendet.

Dubliersilikon

Protesil (Austenal GmbH, Köln) ist ein additionsvernetzendes Dublier-Silikon, welches dimensions- und detailgenau glatte und kantenscharfe Oberflächen wiedergibt.

Das Material unterliegt nach sieben Tagen lediglich einem Schwund von 0,05 % linear.

3.2. Vorversuche

Um Fehlerquellen und eventuelle Problematiken in der Methodik der Versuche auszuschließen, wurden Vorversuche durchgeführt. Hierzu fand die Herstellung von jeweils zwei Zahnproben mit Stiftstumpfaufbauversorgungen aus Phantom-Metall, Zirkonoxidkeramik und Faserverbundkunststoff statt. Danach wurden die Proben mit Hilfe von Holzspateln und Klebewachs in Silikonformen fixiert (Abb. 3.2). Dies sollte eine spätere Bruchbelastung der Zahnproben im 135° Winkel zur Zahnängsachse gewährleisten. Zum Schluss wurden die Formen mit Kunststoff bis zu einer Höhe von 12,0 mm gefüllt, sodass die Zahnwurzeln in Kunststoff gefasst waren. Bei der Durchführung der Arbeitsschritte für die Vorversuche traten Probleme auf, die eine Änderung der Methodik für die Hauptversuche nötig machten. Die Präparation der Zähne und die Aufbauherstellung der Vorversuche fand ohne präzise Hilfsmittel statt, sodass Ungenauigkeiten auftreten konnten. Auch die Genauigkeit der Probenfixierung war nicht zufrieden stellend. Daher wurde die Methodik der Hauptversuche (Abb. 3.3), wie in Kap. 3.3 beschrieben, geändert.

Beim Bruch der Vorversuchsproben ist durch die Krafteinleitung kein Prüfkörper verrutscht und keine Zahnprobe aus dem Kunststoff ausgerissen, sodass die Bruchvorrichtung als gut befunden und für die Hauptversuche übernommen wurde.

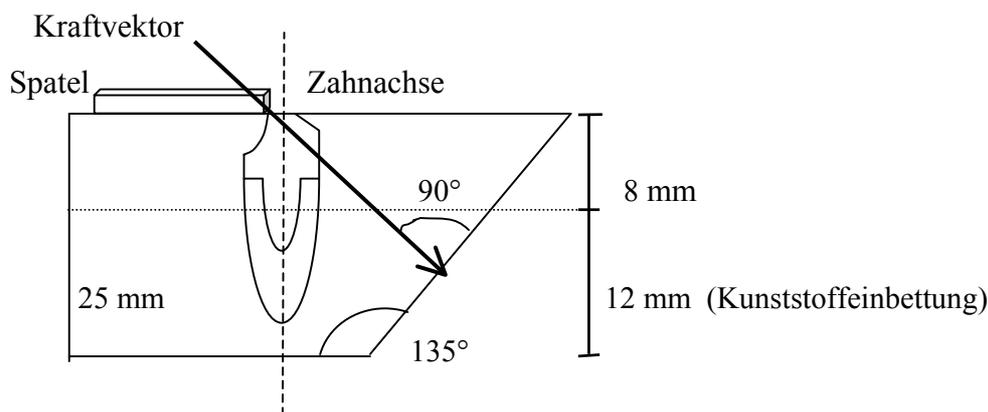


Abb. 3.2: Methode der Vorversuche

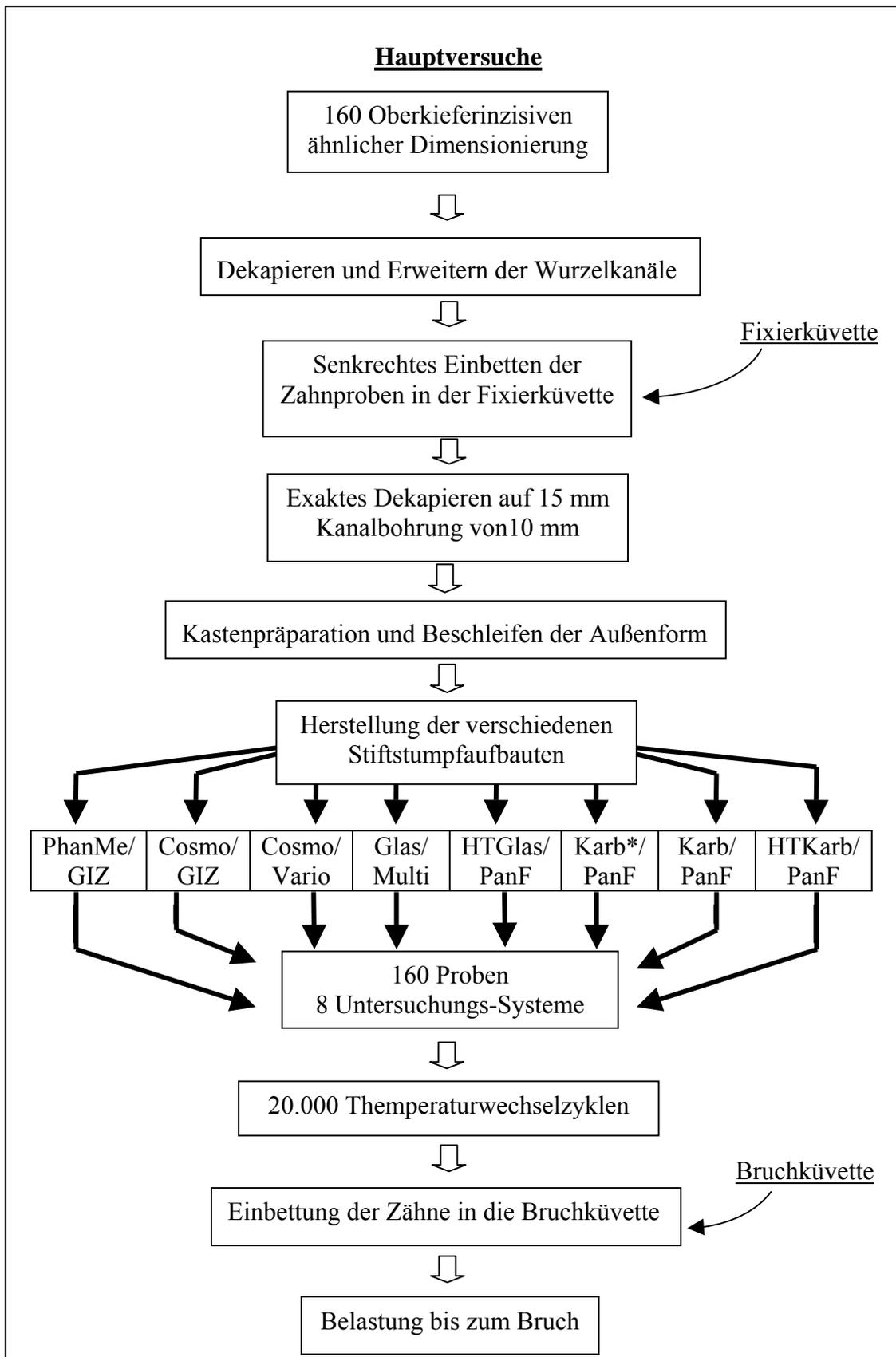


Abb. 3.3: Flussdiagramm der Hauptversuche

3.3. Hauptversuche

3.3.1. Herstellung der Küvetten

Um eine exakte Fixierung der Zahnproben während der Präparation und der späteren Bruchbelastung zu erhalten, fand zunächst die Herstellung einer Fixier- und einer Bruchküvette statt.

Die Herstellung der Fixierküvette für die exakte Probenfixierung wurde mittels eines Kunststoffblocks mit den Kantenlängen 8 x 12 x 12 mm und einer kreuzweisen Einkerbung an ihrer Unterseite durchgeführt (siehe Abb. 3.4).

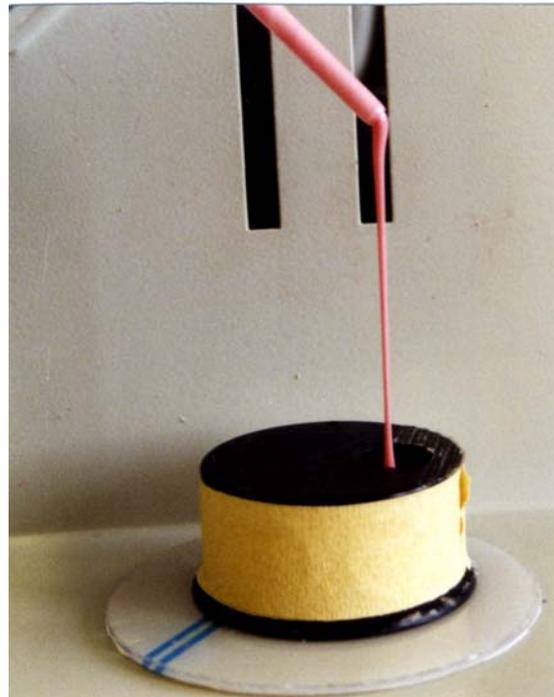
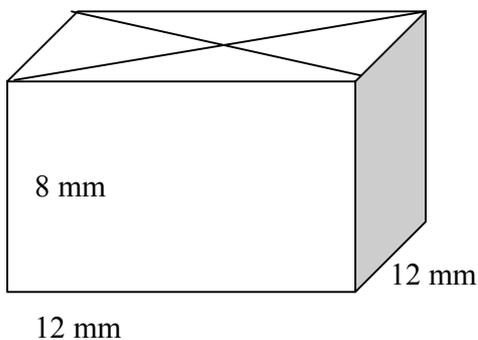


Abb. 3.4: Kunststoffblock und Herstellung einer Küvette

Über die mit Wachs an der Unterlage befestigten Kunststoffblöcke wurde eine stabile, runde Hartkunststoffdose gestülpt, die ebenfalls eine Wachsfixierung erhielt (Abb. 3.4). An der Oberseite der Dose befinden sich zwei Öffnungen zum Auffüllen der Dosenräume mit Dubliersilikon (Protesil, Austenal, Köln). Das Mischen der Komponenten erfolgte im Protesilmixer, um Dosierungsfehler zu vermeiden. Nach dem Aushärten des Silikons wurden die Kunststoffblöcke mit Druckluft aus den Formen entfernt. Die so erhaltenen Fixierküvetten geben deutlich das eingekerbte Kreuz, welches der senkrechten und mittigen

Zahnprobenaufnahme diente (siehe 3.3.2), an ihrem Boden wieder. In gleicher Weise fand die Herstellung der Küvette für den Bruchversuch statt. Hierzu wurden trapezförmige Kunststoffkl tzen verwendet (Abb. 3.5).

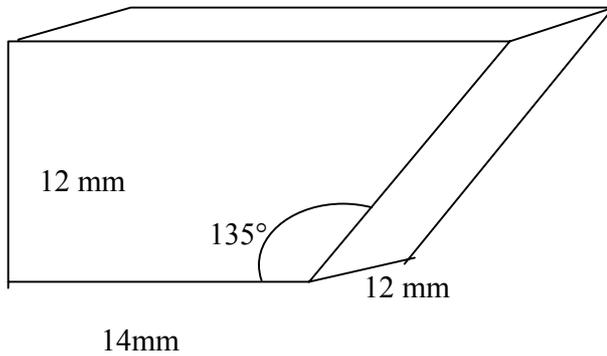


Abb. 3.5: Form für den Bruchversuch

Der stumpfe Winkel im Küvettenboden der Bruchvorrichtung beträgt exakt 135  ; die übrigen Abmessungen sind der Abbildung 3.5 zu entnehmen.

3.3.2. Zahnpr paration

Für die Versuche wurden 160 mittlere Oberkieferfrontz hne ähnlicher Größe verwendet, die bis zur Weiterverarbeitung und zwischen den einzelnen Arbeitsschritten in 0,1 %iger Thymoll sung bei Raumtemperatur aufbewahrt wurden [147]. Ihre Verteilung auf die Versuchsgruppen erfolgte nach dem Zufallsprinzip. Für die Zahnpr paration wurde eine Gesamtlänge von 15 mm (14,0 mm Wurzellänge und 1,0 mm Restsubstanz im Kronenbereich) festgelegt. Nach Reinigung mit Handinstrumenten und Dekapieren der Zähne fand die Eröffnung der Wurzelkanäle mit einem Wurzelkanalvorbohrer statt. Der Trimmer des jeweiligen angewendeten Systems wurde in die Spannzange des Parallelf rsger tes (Parallelf rsger t F1, Degussa, Hanau) eingespannt und auf den Boden der Fixierk vette abgesenkt. Die Ausrichtung des K vettenbodens erfolgte so, dass das Arbeitsende des Instrumentes auf den Schnittpunkt der Diagonalen am Boden der Küvette zeigte. Die anschließend auf den Vorbohrer des jeweiligen Stiftsystems aufgesteckten Zähne wurden bis zur Berührung des K vettenbodens herabgelassen und in Technovit 4004 (Heraeus Kulzer GmbH, Werheim) eingebettet. Nach einer Aushärtzeit von 15 Minuten wurden die Proben entfernt und an ihrer Fixierungsunterseite von eventuellen Unebenheiten mittels Nassschleifpapier der

Körnung 1000, vorsichtig befreit. Für die Nummerierung der Proben fand sich auf der labialen Seite der Klötzchen Platz, die gleichzeitig als Seitenorientierung diente.

Die weitere Aufbewahrung erfolgte nun – nach den Probengruppen sortiert – in verschiedenen Kästen. Es folgte die Präparation aller Zahnproben, deren Maße der Abb. 3.6 zu entnehmen sind.

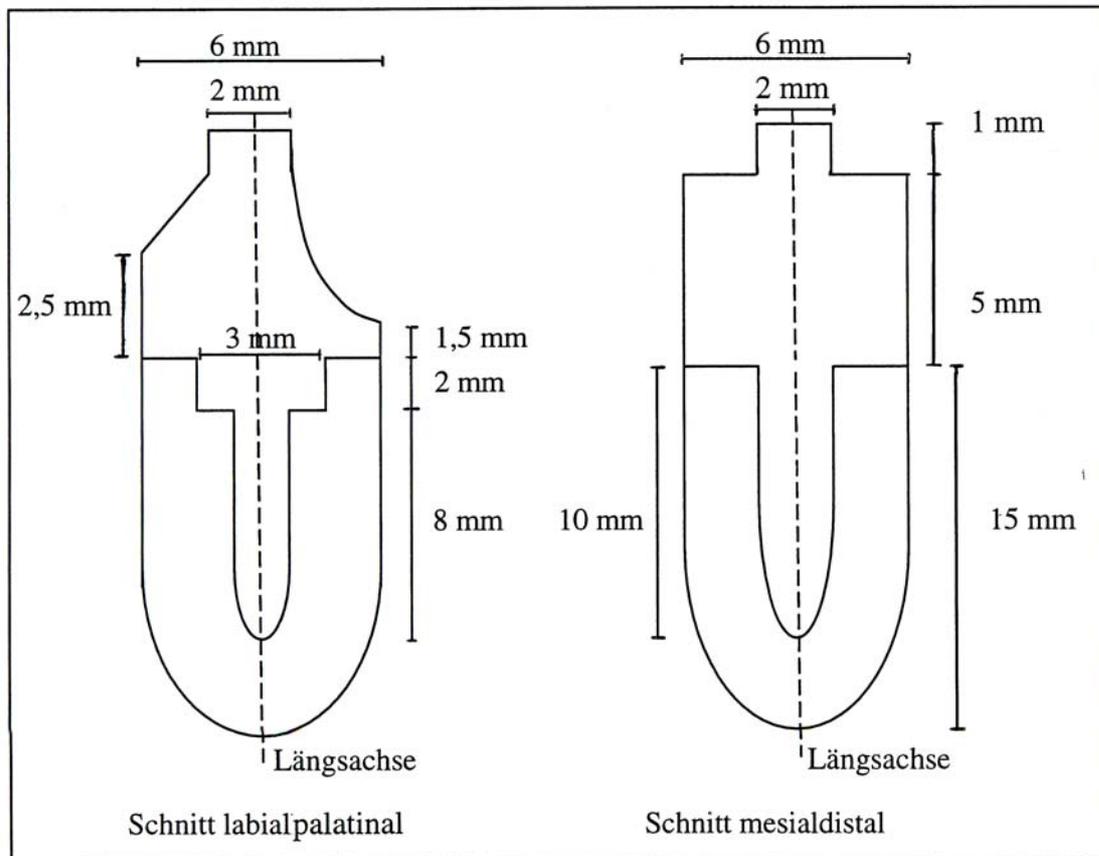


Abb. 3.6: Dimensionierung von Präparation und Aufbauvorlage

Eine diamantierte Trennscheibe (Komet, Gebr. Brassler, Lemgo) wurde in das Parallelfräsgerät eingespannt und auf eine Tischdistanz von 15,0 mm herabgelassen. Anschließend folgte das Kürzen aller eingebetteten Zähne auf eine Länge von 15,0 mm unter Wasserkühlung und bei einer Drehzahl von 25000 U/min. Eine runde Kunststoffschablone mit einer Lochführung in ihrer Mitte und einem Durchmesser von 6,0 mm wurde mittels eines in dem Wurzelkanal fixierten Kalibrierbohrers auf der Zahnoberfläche befestigt, um so gleiche Durchmesser festzulegen. Anschließend wurde die Schablone mit einem Bleistift auf der Zahnfläche umfahren, wodurch eine runde Markierung auf dem Zahn zurück blieb. Mittels einer Reduzierhülse fand ein zylindrischer Diamant mit gerundetem Ende

(Gebr. Brassler GmbH, Lemgo) in dem Parallelfräsgerät Halt. Senkrecht zur Tischebene und parallel zur Zahnachse wurde Zahnhartsubstanz bis zur Bleistiftmarkierung an allen Zähnen von zervikal aus 6,0 mm nach apikal abgetragen. Im nächsten Arbeitsschritt folgte das Absenken eines in das Fräsgerät eingespannten zylindrischen Diamanten mit abgerundeten Kanten und einem Durchmesser von 1,0 mm. Das Herablassen des Diamanten in den Wurzelkanal um 2,0 mm und sein Feststellen in dieser Position folgte. Die Anlage eines ovalen Kastens, der in seiner approximalen Ausdehnung dem Stiftdurchmesser entsprach und in vestibulo-lingualer Richtung eine Länge von 3,0 mm, sowie einer Tiefe von 2,0 mm besaß, schloss sich an. Um einer idealen Wurzelpräparation für den Stiftstumpfaufbau zu entsprechen, wurde die Kanalpräparation bis zu einer Tiefe von 10 mm (inklusive Kastentiefe) vorgenommen, sodass eine restliche Wurzellänge von 5,0 mm übrig blieb. Da die Zähne später keine Kronenversorgung erhielten, wurde auf eine Hohlkehlpräparation verzichtet. Nach der Präparation folgte eine Kontrolle unter dem Mikroskop (Stereo-lichtmikroskop DRC, ZEISS) auf Frakturen in der Zahnschicht bei einer 20-fachen Vergrößerung.

3.3.3. Herstellung der Aufbauvorlage

Ein Prototyp aller Stiftstumpfaufbauten wurde aus Phantom-Metall hergestellt, um eine einheitliche Dimensionierung aller Aufbauten zu erhalten. Hierzu wurde ein ausbrennbarer Stift des Exatec G Systems in den vorbereiteten Wurzelkanal eingebracht. Der Aufbau wurde aus Gusswachs mittels des Parallelfräsgerätes hergestellt. Seine Maße entsprechen denen der Abb. 3.6. Der inzisal aus dem gegossenen Aufbau herausragende Stift wurde auf 1,0 mm Länge gekürzt, um eine Passung der Tiefziehkäppchen für die Herstellung der weiteren Aufbauten zu gewährleisten. Um den Prototypen zu erhalten, wurde abschließend der Stiftstumpfaufbau in einen bereits präparierten Zahn zementiert.

Auf diesem Vorlagenzahn, dessen Aufbau dünn mit Vaseline versehen war, erfolgte die Herstellung der Tiefziehkäppchen. Folien der Stärke 0,6 mm mit einem Durchmesser von 42 mm und Platzhalterfolien mit der Dicke 0,1 mm wurden in das Adaptec System der Firma Bego (Bremen) eingespannt und über einer Flamme erwärmt. In plastischem Zustand fand das Einpressen der Folien mittels des Vorlagenzahnes in die Masse des Adaptec Systems statt. Nach kurzer Abkühlphase konnte die so geformte Folie aus der Masse entfernt

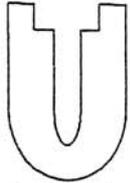
und von dem Aufbau abgezogen werden. Die überstehenden Ränder wurden grob entfernt und der inzisal abgeformte Stiftbereich abgetrennt, sodass eine runde Öffnung zurückblieb. Diese Öffnung sollte Platz für die in den Zahnproben fixierten Stifte lassen und als Führung der Kämpchen dienen.

3.3.4. Herstellung der Stiftstumpfaufbauten

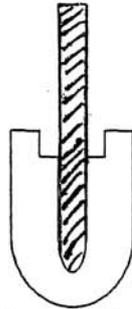
Für die Herstellung der zwanzig gegossenen **Phantom-Metall-Stiftstumpfaufbauten (PhanMe/GIZ)** (Degussa, Hanau) fand das Exatec G System mit ausbrennbaren Kunststoffstiften (Hahnenkratt GmbH, Königsbach-Stein) Einsatz (Abb. 3.7).

Der Exatec Kanalbohrer wurde bis zu einer Tiefe von 10,0 mm in den Wurzelkanälen der Zähne versenkt. Die ausbrennbaren Stifte wurden im Bereich des späteren Aufbaus mit Einkerbungen versehen und in die Zähne eingebracht. Nach dem Anfeuchten der Zahnoberflächen folgte das Anmischen des Pattern resin (GC Dental Products Corp.,J.), welches in die Kastenpräparation der Zähne eingebracht wurde. Der restliche Teil des Pattern resin wurde in die vorbereiteten Tiefziehkämpchen gegeben. Das Aufsetzen der Kämpchen über den in den Zähnen befindlichen Stiften und das Anpassen der Höhe bis auf 5,0 mm schloss sich an. Nach dem Aushärten des Pattern resin erfolgte das Entfernen der Kämpchen und das Abziehen der gewonnenen Stiftstumpfaufbauten von den Zähnen. Einer Kontrolle der Unterseite schlossen sich das Anstiften der Stiftstumpfaufbauten auf ihrer vestibulären Seite mit einem 3,0 mm starken Gussdraht im Winkel von 45°, und das Einbetten in einer Muffel mit der Einbettmasse Cehacast (Hafner, Pforzheim) an. Das Ausarbeiten und Einpassen der Stiftstumpfaufbauten in den Zähnen sowie das Abstrahlen der Stifte folgten nach dem Schleuderguss. Mittels einer Schieblehre wurden die Maße der Stifte mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1$ mm abschließend kontrolliert. Das Reinigen und Entfetten der Stifte mit Alkohol sowie die Reinigung und Trocknung der Wurzelkanäle mit Papierspitzen und Luftstrom fand statt. Die Wurzelkanäle wurden mittels eines Lentulos mit dem in Kapseln befindlichen Glasionomermzement Ketac-Cem gefüllt und die Stifte beschickt. Langsam - in leicht pumpender Weise – wurden die Stifte in die Wurzelkanäle gesetzt. Unter Druck härtete der Zement aus. Zementreste wurden abgesprengt.

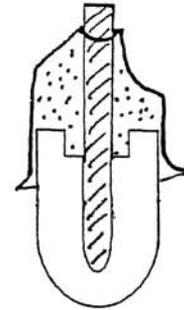
Herstellung der Stiftstumpfaufbauten aus Phantom-Metall



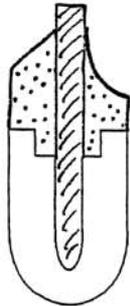
Präparierte Zahnprobe



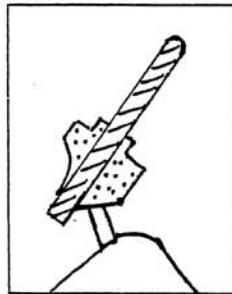
Exatec G Stift



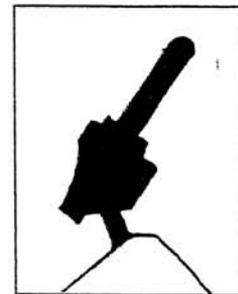
Aufbauformung
mit Tiefziehkappe



Ausbrennbarer Stift-
stumpfaufbau



eingebetteter Stift-
stumpfaufbau



gegossener Stift-
stumpfaufbau



Einsetzen des ausgearbeiteten Stiftstumpfaufbaus

Abb. 3.7: Herstellung eines Stiftstumpfaufbaus aus Phantom-Metall

Zur Herstellung der **vollkeramischen Stiftaufbauten (Cosmo/GIZ, Cosmo/Vario)** fand eine Passkontrolle der Zirkonoxidwurzelstifte CosmoPost (Ivoclar Vivadent AG) in den bereits mit dem Kalibrierbohrer vorbereiteten Wurzelkanal statt. Die Zähne wurden leicht angefeuchtet und Aufbauten aus Gusswachs direkt an den Stiften in den Kavitäten modelliert. Die Bestimmung der exakten Höhe fand mit dem Parallelfräsgesetz und einer eingespannten Trennscheibe statt. Die parallele Gestaltung der Seitenwände des Aufbaus erfolgte mittels eines zylindrischen Finierers. Die Ausmaße der vestibulären Abschrägung und lingualen Konkavität wurden abgemessen und modelliert. Es folgte das Glätten der Wachsoberfläche und das vorsichtige Entnehmen des Stiftstumpfaufbaus aus der Kavität. Die Stiftstumpfaufbauten wurden an der Fazialfläche der Aufbauten mit einem Gussdraht des Durchmessers 3,0 mm auf einem Muffelsockler für den Keramikpressvorgang in einem Winkel von 45° befestigt und mit Waxit entspannt [70]. Der Muffelring wurde aufgesteckt und zur Stabilisierung an der Öffnung mit einem Kunststoffring versehen. Danach schloss sich das Anmischen der Einbettmasse Star Vest press (Weber Dental GmbH, Sigmaringen) mit der dazugehörigen Flüssigkeit und destilliertem Wasser in einem Verhältnis von 200 g Pulver : 37 ml Flüssigkeit an. Nach dreiminütigem Anrühren unter Vakuum wurde die Muffel mit den angestifteten Aufbauten auf den Rüttler gestellt, auf dem dann das Auffüllen mit der Einbettmasse erfolgte. Der Stützring wurde abgezogen und der eigentliche Muffelkunststoffaufsatz angebracht, der überflüssige Einbettmasse bis zu einer definierten Höhe verdrängte. Nach einer Aushärtzeit von 45 Minuten wurde das Wachs ausgetrieben und das Anpressen von drei IPS Empress Cosmo Rohlingen je Muffel vorgenommen. Das Ausbetten der Objekte erfolgte durch Abstrahlen mit Korox (Bego, Bremen). Schließlich wurden die fertigen Stiftstumpfaufbauten von den Gusskanälen getrennt und in die Probenwurzeln eingepasst.

Für die adhäsive Befestigung der Hälfte der 40 CosmoPost Stiftstumpfaufbauten erfolgte ihr Anätzen mit Fluorwasserstoffsäure für 20 Sekunden. Die Wurzelfläche und der Kanal wurden für 15 Sekunden mit 37 %iger Phosphorsäure geätzt und anschließend wurde sowohl der Stift als auch die Zahnschmelze mit Wasserspray für 60 Sekunden gereinigt und mit Luftstrom getrocknet. Der Zahn wurde weiter mit Syntac Primer für 15 Sekunden und Syntac Adhäsiv für 10 Sekunden nacheinander konditioniert und die Konditionierung jeweils mit schwachem Luftstrom verblasen. Der Stift wurde mit Monobond S

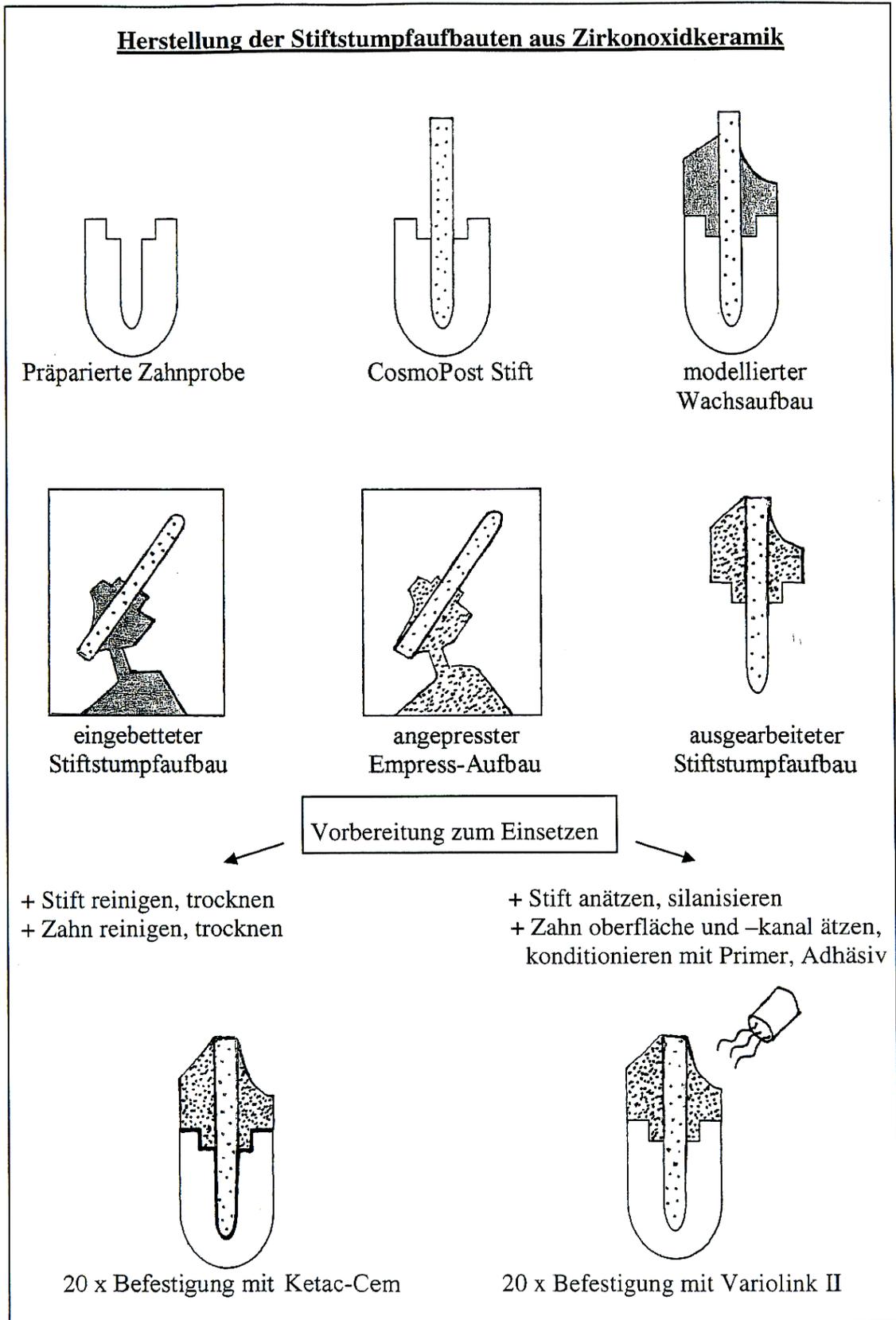


Abb. 3.8: Herstellung von Stiftstumpfaufbauten aus Zirkonoxidkeramik

silanisiert und das Monobond S ebenfalls verblasen. Nach dem Auftragen einer dünnen Schicht Heliobond kam es schließlich zur Eingliederung der Stiftstumpfaufbauten mit Variolink II, welches im Verhältnis Base 1 : Katalysator 1 für 10 Sekunden angeteigt wurde. Mit leicht pumpenden Bewegungen wurden die Stifte eingeführt. Überschüsse wurden grob mit einem Wattepellet entfernt; die Zementfugen wurden mit Glyceringel abgedeckt. Die Lichtpolymerisation folgte für 60 Sekunden.

Für alle Stiftstumpfaufbauten, die eine konventionelle Befestigung erhielten, wurde entsprechend der Zementierung der Phantom-Metall Stiftaufbauten vorgegangen (Abb. 3.8).

Die Anfertigung der mit **Glasfaserstiften FRC Postec** versehenen Proben (**Glas/Vario**) fand im direkten Verfahren statt (Abb. 3.9). Dazu wurden die eingepassten und anschließend mit Alkohol gereinigten Stifte mit Monobond S (Ivoclar Vivadent AG) für 60 Sekunden silanisiert und getrocknet. Danach folgte das Auftragen des Excite DSC (Ivoclar Vivadent AG) mit imprägnierten Pinselchen (Größe small / endo) und das Verteilen mit leichtem Luftstrom auf dem Stift; eine lichtgeschützte Lagerung unter dem Vivapad schloss sich an. Die Zahnoberfläche und der Kanal wurden mit Total Etch (Ivoclar Vivadent AG) für maximal 15 Sekunden versehen, mit Wasser für 60 Sekunden abgesprüht und mit Papierspitzen soweit getrocknet, dass das Dentin noch leicht feucht blieb. Mit einem imprägnierten Vivadent-Einmal-Applikator folgte das Auftragen einer großen Menge Excite DSC auf Schmelz und Dentin und das Einmassieren desselben für 10 Sekunden in die Zahnschmelz. Restliche Lösungsmittel waren mit kurzem schwachem Luftstrom verdampft; eine glänzende Zahnstruktur blieb zurück. Es schloss sich das Anmischen von Multilink Base und Katalysator im Verhältnis 1 : 1 für 10 Sekunden und das Überziehen von sowohl den Zähnen als auch den Stiften mit dem Material an. Nach einminütiger Polymerisation des Multilink fand die Stiftkopfsilanisierung für den Aufbau statt. In Schichten wurde Tetric auf den Zahn aufgetragen und mit UV-Strahlung ausgehärtet. Mit Hilfe der Tiefziehkäppchen ließ sich die Form der Aufbauten bestimmen. Nach der letzten Aushärtung folgten das Abziehen der Käppchen und die Kontrolle der Aufbaumaße sowie das Entfernen des an der inzisalen Kante überstehenden Glasfaserstiftanteils mit einer Trennscheibe.

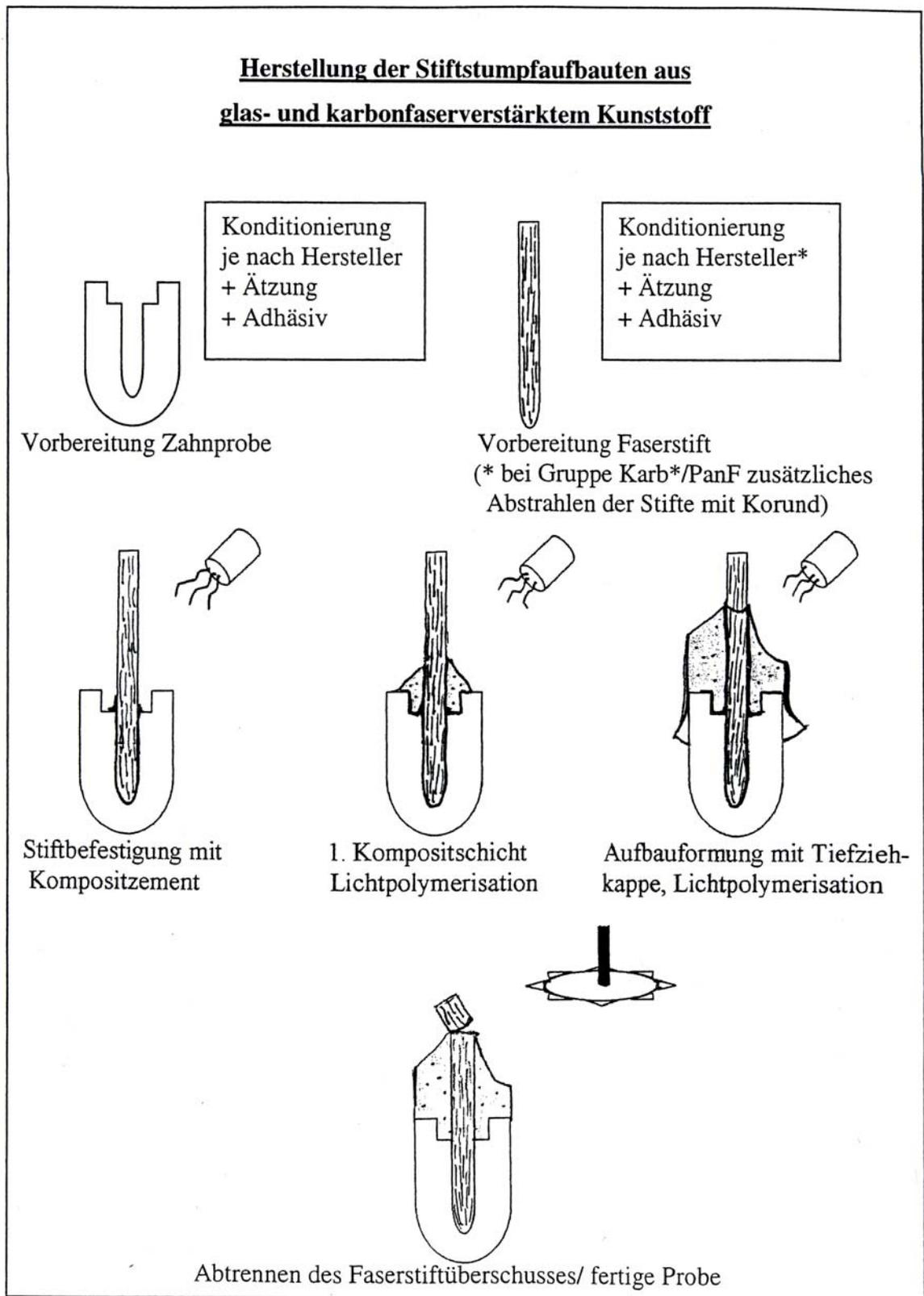


Abb. 3.9: Herstellung eines Stiftstumpfaufbaus mit Faserstift

Die Stiftstumpfaufbauten **HT Cytec blanco** aus **glasfaserverstärktem Kunststoff (HTGlas/PanF)** wurden adhäsiv mit Panavia F befestigt (Abb. 3.9). Eine Reinigung der Zähne mit Wasserspray und Trocknung mit Luftstrom und Papierspitzen fand statt. Der mit ED Primer für 60 Sekunden konditionierte Wurzelkanal trocknete unter leichtem Luftstrom und mit Papierspitzen. Panavia F Pasten wurden im Verhältnis 1:1 für 20 Sekunden angemischt und mit einem Pinsel auf allen Stiften verteilt. Es folgte das Einsetzen der Stifte in langsamer pumpender Weise und anschließend die Entfernung der Überschüsse sowie das Aushärten des Panavia F für 20 Sekunden. Eine erste Schicht Tetric wurde fest in den Kasten der Präparationen gedrückt, für 1 Minute bestrahlt und eine zweite Schicht aufgetragen, sodass das Tiefziehkäppchen noch locker über den Zahn zu setzen war. Die letzte Schicht Tetric wurde in das Käppchen gegeben. Unter steigendem Druck wurde das Käppchen auf den Zahnstumpf gesetzt, sodass eine Aufbauhöhe von 5,5 mm zurückblieb und die Inzisalkante, von okklusal betrachtet, sich in mesiodistaler Ausrichtung befand. Ein drittes Bestrahlen für weitere 60 Sekunden folgte. Das Tiefziehkäppchen ließ sich entfernen und der Stift inzisal auf einer Aufbauhöhe von 5,0 mm mittels horizontal ausgerichteter Trennscheibe kürzen. Abschließend fand eine Kontrolle der Aufbaumaße statt.

Der Verarbeitungsprozess der Proben mit **Karbonfaserstiften Mirafit black (Karb/PanF und Karb*/PanF)** entspricht dem der HT Cytec blanco Stifte (Abb. 3.9). Die Gruppe der Oberflächen behandelten Mirafit black Stifte wurde vor dem Beschicken mit Panavia F mit Korund abgestrahlt. Ebenfalls identische Herstellungsprozesse der Stiftstumpfaufbauten wie für HT Cytec blanco Glasfaserstifte folgten bei der Verarbeitung der **Karbonfaserstifte HT Cytec carbon (HTKarb/PanF)**.

3.3.5. Temperaturlastwechsel

Eine künstliche Alterung der mit Stiftstumpfaufbauten versorgten Zahnproben fand im Temperaturwechselversuch (Thermocycling) mit den Thermostaten Haake DC10 und Haake DC3 statt. Dabei wurden alle Zähne 20.000 Temperaturwechselzyklen zwischen einem 5° C und einem 55° C warmen Wasserbad unterzogen. Jeder Zyklus umfasste jeweils eine halbe Minute Verweildauer in den Bädern. Der Transport zwischen den beiden Bädern erfolgte mittels eines mechanischen Schwenkarmes (Abb. 3.10).

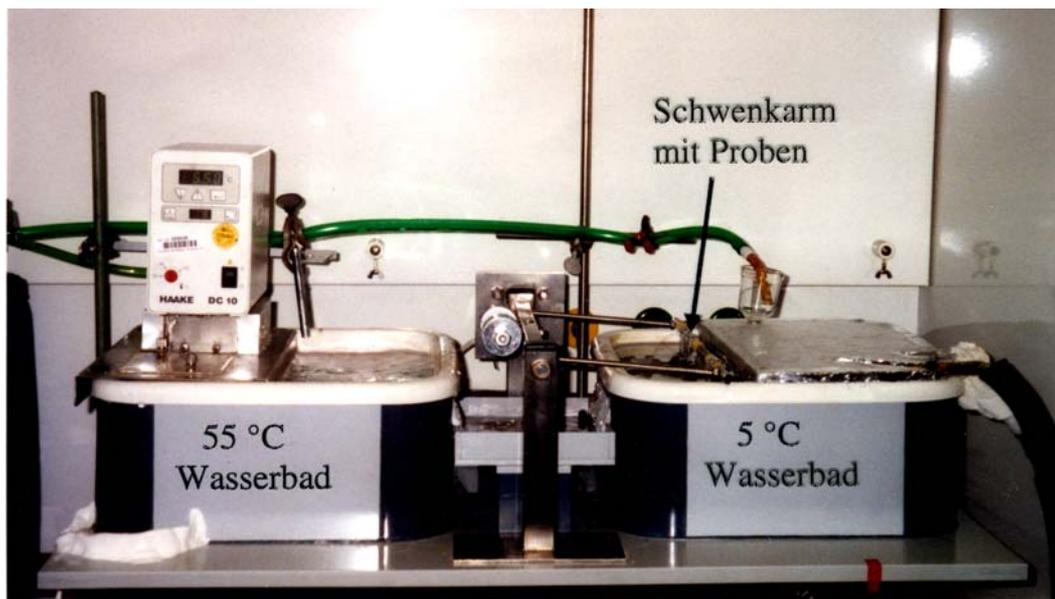


Abb. 3.10: Künstliche Alterung durch Thermocycling

3.3.6. Bruchversuch

Die Einbettung aller Zähne in der Form für den Bruchversuch folgte. Dazu wurden alle Zahnproben auf der labialen Seite ihrer Kunststofffixierung mit zwei Retensionsrillen mittels eines Rosenbohrers versehen und die Oberfläche der Klötzchen angeraut, damit eine sichere Verankerung gewährleistet ist. Mit der Labialfläche des Zahnes zur Schräge der Forminnenseite zeigend, wurde dann jeder Zahn an der Hinterwand der Bruchform

platziert (Abb. 3.11).

Eine Markierung an den Zähnen 2 mm unterhalb der Zahnkrone sollte die biologische Breite definieren, welche durch eine zusätzliche Wachsmanschette aus Modellierwachs oberhalb der Markierung gesichert wurde (Abb. 3.11).

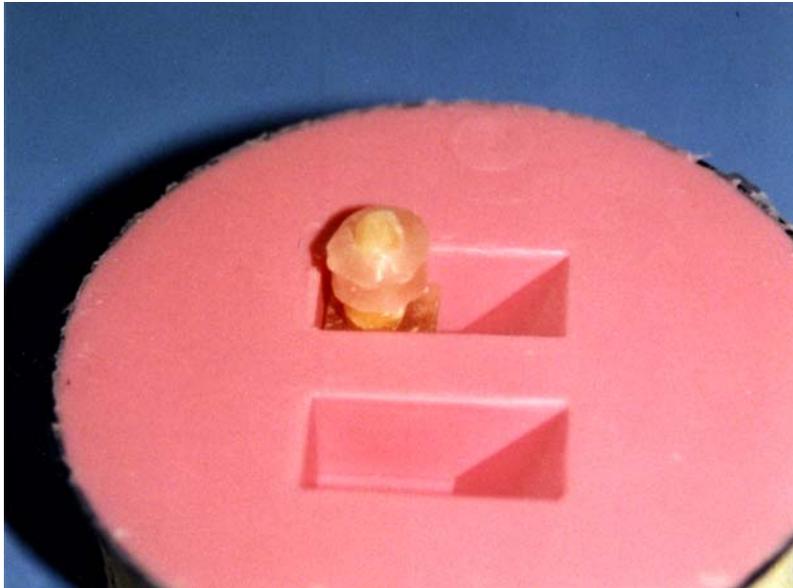


Abb. 3.11 Einbettung der Zahnproben

Acemi (Wirz-Buehler GmbH), ein Kunstharz auf Polyesterbasis, diente zur Formfüllung. Nach einer Aushärtzeit von 24 Stunden und dem Entformen wurde die Schrägseite der Bruchvorrichtung auf Unebenheiten kontrolliert und mit Schleifpapier der Körnung 1000 vorsichtig bearbeitet. In einer Universalprüfmaschine (Instron, Modell 6025) wurden in Anlehnung an einen Versuchsaufbau von PLEIMS (1994) sowie VOSS (1969) alle Zähne mit einem Vorschub von 3 mm/min bis zum Bruch belastet. Durch die Einbettung in die Form für den Bruchversuch entstand beim Auflegen auf deren Schrägfläche ein Proben-Belastungswinkel von 135° zur Zahnlongsachse, was der Normokklusion im Frontzahnbereich entspricht [96]. Der Kraftangriff des meißelförmigen Prüfstempels (Abb. 3.12) lag auf der Kante zwischen inzisaler und linguale Fläche. Dies entspricht dem Kraftangriffspunkt in Normokklusion, etwa 3 bis 4 mm zervikal der Inzisalkante nach COCA und SCHWICKERATH (1987). Alle Proben besaßen die gleiche Belastungsfläche und den gleichen Belastungsansatz. Die Mittenkontrolle erfolgte über eine Markierung, die die mesiodistale Breite des Aufbaus inzisal halbierte.

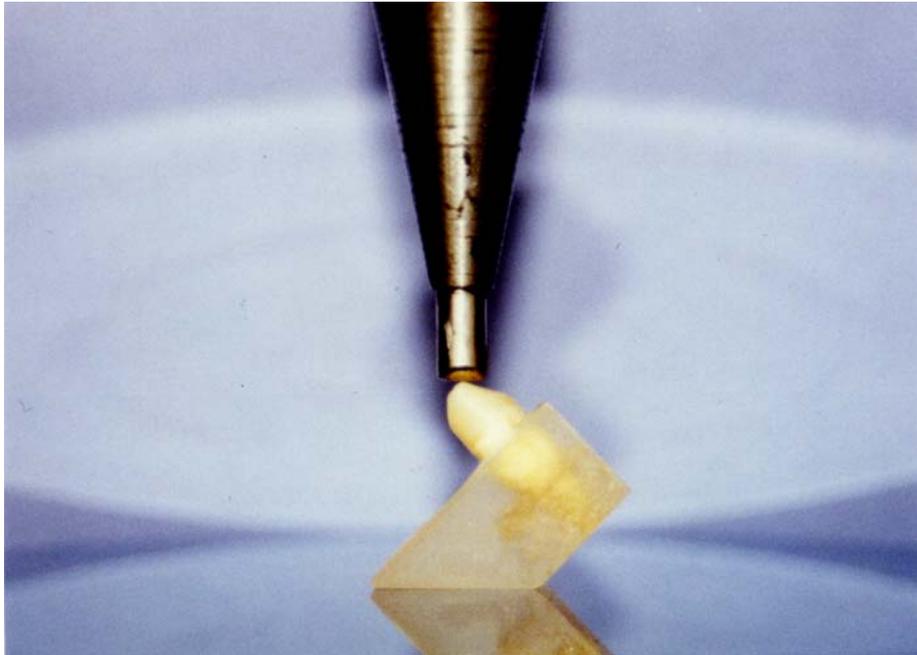


Abb. 3.12: Versuchsaufbau

3.3.7. Analyse der Bruchflächen

Durch Anfärben ließen sich die Bruchspalten der einzelnen Proben darstellen (Quinky Schreibtinte, Pelikan, Hannover).

Danach wurden alle Proben unter einem Lichtmikroskop (Stereomikroskop DRC, ZEISS) bei einer 8 fachen Vergrößerung betrachtet und ihre Bruchverläufe skizziert. Eine Unterteilung der Probengruppen nach Frakturen mit und ohne Wurzelbruch sowie nach vorhandenen Stiftbrüchen folgte (Tab. 3.8).

Tab. 3.8: Einteilung der Frakturverläufe

Kein Wurzelbruch		Wurzelbruch	
Aufbau defekt*, Kein Stiftbruch	Aufbau defekt*, Stiftbruch	Aufbau defekt*, Kein Stiftbruch	Aufbau defekt*, Stiftbruch

*= Aufbau abgebrochen und/ oder von Wurzel abgehoben

3.4. Statistische Methoden

Die gemessenen Frakturkräfte ließen sich mit Hilfe des U-Tests von WILCOXON, MANN und WHINTNEY (1947) beurteilen [129a].

Der U-Test dient dem Vergleich unabhängiger Stichproben; er ist im Gegensatz zum T-Test verteilungsunabhängig. Die Entscheidung fiel auf diesen Test, da trotz Standardisierung der Zahnform und der Gestalt der Stiftstumpfaufbauten eine Stetigkeitsannahme in der Praxis streng genommen nie erfüllt ist und somit nur von einer annähernden Normalverteilung gesprochen werden kann. Viele Parameter nehmen zusätzlichen Einfluss auf die gemessene Höhe der Frakturwiderstände. So ist die Beschaffenheit der verwendeten Zähne oder die Messung an sich in der Instron-Prüfvorrichtung nicht konstant zu halten, da sie natürlichen Schwankungen unterliegen. Je mehr Stichproben bzw. Messungen durchgeführt werden, um so eher treten diese Ungenauigkeiten in den Hintergrund.

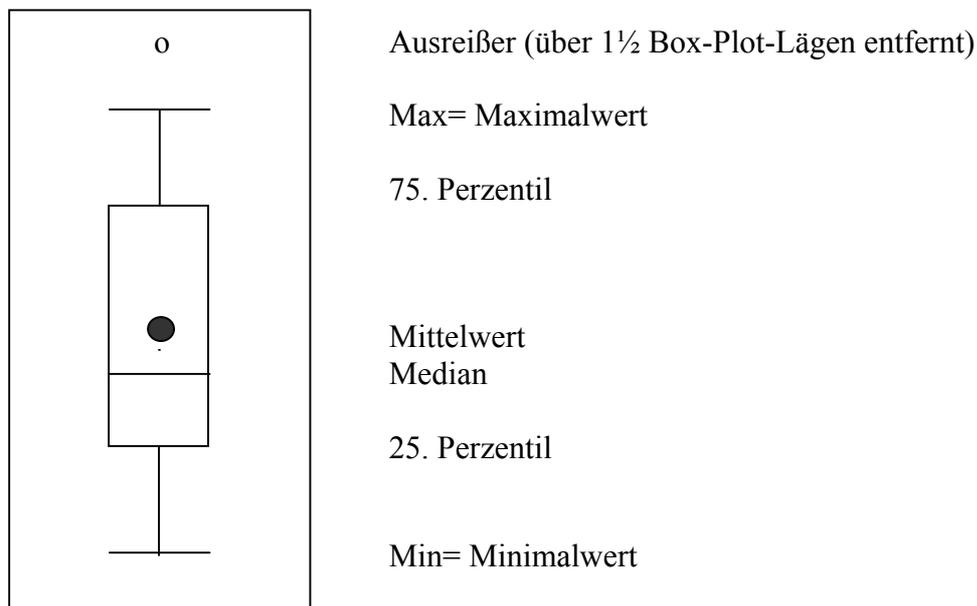


Abb. 3.13: Darstellung einer Box-Plot-Grafik

In der graphischen Darstellung der Ergebnisse kommt das Box-Plot-Diagramm zur Anwendung (Abb. 3.13). Die Ausdehnung einer Box gibt Auskunft über den Abstand zwischen dem 25 %-Quartil und dem 75 %-Quartil und beinhaltet den mittleren Wertebereich mit 50 % der gemessenen Werte. Des Weiteren sind Maximal-, Median-, und Minimalwert sowie Ausreißerwerte dargestellt. Der Median ist der mittlere Repräsentant einer Wertegruppe, während der Mittelwert den allgemeinen Durchschnitt angibt.

Die Beurteilung, ob die Abweichungen der arithmetischen Mittel der verschiedenen Probengruppen zufällig oder nicht zufällig sind, wird mit Hilfe der Irrtumswahrscheinlichkeiten (p) angegeben. Getestet wird auf 5 % und 1 % Signifikanzniveau. Mit $p < 0,05$ sind die Ergebnisse zu 95 % Wahrscheinlichkeit unterschiedlich; bei $p < 0,01$ handelt es sich um hochsignifikante Ergebnisse mit 99 % Wahrscheinlichkeit.