

# Der Einfluss der Makro- und Mikrostruktur auf die Benetzungs- und Retentionseigenschaften von Wurzelkanalstiften *in vitro*

The influence of macro- and microstructure on the surface wettability and retention properties of endodontic posts *in vitro*

Felix Worm<sup>1,\*</sup>, Claudia Lurtz<sup>2</sup>, Detlef Behrend<sup>2</sup>, Lena Schmitt<sup>2</sup>, Klaus-Peter Schmitz<sup>2</sup>, Peter Ottl<sup>1</sup> und Heinrich von Schwanevede<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkunde, Medizinische Fakultät, Universität Rostock, Germany

<sup>2</sup> Institut für Biomedizinische Technik, Medizinische Fakultät, Universität Rostock, Germany

## Zusammenfassung

Zur Rekonstruktion von weitreichend destruierten und endodontisch behandelten Zähnen werden Wurzelkanalstifte zur Retentionssicherung der Kronenrestauration benötigt. Wurzelkanalstifte aus Faserverbundwerkstoffen gewinnen gegenüber Stiften aus Keramik oder Metall aufgrund biomechanischer Vorteile zunehmend an klinischer Bedeutung in der Zahnheilkunde. Für einen dauerhaften Behandlungserfolg ist neben einer adäquaten mechanischen Lastübertragung die optimale Retention des Stiftes im Wurzelkanal entscheidend. Im Rahmen einer vergleichenden *In vitro*-Studie wurden strukturmorphologische Parameter von aktuell in der klinischen Praxis verwendeten Wurzelkanalstiften untersucht. Ermittelte Faserdurchmesser und Faserverteilung im Stiftquerschnitt ergaben einen stiftspezifischen Faseranteil. Faseranteil, Faserverteilung und die Faserart des Stiftverbundwerkstoffes zeigten eine Korrelation zu den durch Drei-Punkt-Biegeprüfung ermittelten Biegefestigkeitswerten der Wurzelkanalstifte. Ein weiterer Schwerpunkt lag in der Quantifizierung der Benetzbarkeit der Stiftoberfläche. Dafür wurde ein Messverfahren genutzt, welches den Kontaktwinkel an dem Benetzungspunkt der Stiftoberfläche mit einer Modellflüssigkeit bestimmt. Weitere Untersuchungen zur uniaxialen Auszugsfestigkeit ergaben eine Korrelation zwischen der Benetzbarkeit der Stiftmantelfläche und der Haftfestigkeit der Stifte in Verbindung mit einem Befestigungskomposit in artifiziellen Wurzelkanälen.

**Schlüsselwörter:** Benetzbarkeit; Kontaktwinkel; Makrostruktur; Mikrostruktur; Retention; Wurzelkanalstift.

\*Korrespondenz: Felix Worm, Universität Rostock, Medizinische Fakultät, Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkunde, Strempeistraße 13, D-18055 Rostock, Germany  
Phone: +49 (0)381 4946501  
Fax: +49 (0)381 4946503  
E-mail: felix.worm@uni-rostock.de

## Abstract

Esthetical and biomechanical requirements on fiber-reinforced endodontic posts play an important role in clinical application. Leading to a long-term clinical success, post systems must ensure an adequate force transmission and optimal retention behavior into the root channel. The aim of this study was to determine the microstructure and morphology of commonly used fiber reinforced endodontic posts *in vitro*. Post-specific fiber diameter, fiber arrangement over the cross-sections and length, and fiber-matrix ratio could be associated with mechanical properties, such as three-point bending strength and structure modulus. Furthermore, our investigation focused on the quantification of the wettability of the post surface. By using a modified contact-angle measurement, the meniscus on the post surface was characterized. In additional investigations, posts were inserted in artificial root channels and the extraction force was measured. The results show a strong correlation between the extraction force and the wettability of the post surface.

**Keywords:** contact-angle; endodontic post; macrostructure; microstructure; retention; surface wettability.

## Einleitung

Der langfristige Erhalt der Zähne stellt, insbesondere unter Berücksichtigung demographischer Verschiebungen, ein primäres Ziel in der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde dar [11]. Der sachgerecht ausgeführte Aufbau endodontisch behandelter Zähne ist Bestandteil eines vorausschauenden therapeutischen Gesamtkonzeptes und schafft die Voraussetzung für eine gute Langzeitprognose dieser Zähne [10]. Bei weitgehender Schonung der gesunden Zahnhartsubstanz soll eine zuverlässige Verankerung für eine definitive Restauration geschaffen werden.

Der komplexe Aufbau endodontisch behandelter Zähne stellt hohe Ansprüche an die zu verwendenden Werkstoffkombinationen. Sie sollten über ein maßgeschneidertes Eigenschaftsprofil verfügen, das nicht nur bioverträglich ist, sondern auch anwendungsgerechte mechanische Funktionen erfüllt und somit aus Einzelkomponenten besteht, die sich zu einem strukturkompatiblen Gesamtsystem fügen [6]. Das bedeutet vor allem eine Adaptation der Biegestrukturmoduln von Wurzelkanalstiften an die der Zielgewebe Kronen- und

Wurzeldentin [8, 21]. Wurzelkanalstifte aus Metalllegierungen und Keramiken, die durch weit von dem Dentin abweichende Elastizitätsmoduln gekennzeichnet sind, verursachen auf Grund lokaler Spannungen häufig Wurzelfrakturen [19]. Verstärkt wird im Bereich der Wurzelstifte für den Einsatz der Faser-Verbund-Werkstoffe geforscht. Faserverstärkte Wurzelkanalstifte zeichnen sich neben ihrer hohen Biegefestigkeit durch ein dentinähnliches elastisches Verhalten aus, durch das eine annähernd homogene Spannungsübertragung auf die Zahnwurzel begünstigt wird [11]. Faserverstärkte Stifte weisen den klinisch relevanten Vorteil auf, dass nach deren Fraktur eine Entfernung unter minimalem Zahnhartsubstanzverlust möglich ist [5]. Klinische Verlaufsstudien mit Stiften aus glasfaserverstärkten Kompositen erscheinen prognostisch vielversprechend [2, 13, 16]. Die derzeitige klinische Misserfolgsrate dieser Stiftstumpfabauten infolge von Wurzelfrakturen, Stiftbrüchen und Retentionsverlusten wird zwischen 7 bis 11% beziffert [2].

Eine Verankerung von passiven, gewindefreien Stiften im Wurzelkanal setzt im Gegensatz zu aktiven, geschraubten Stiften die Verwendung eines Befestigungsmaterials voraus. Wünschenswert ist ein homogener Haftverbund zwischen Wurzelkanalstift, Befestigungskomposit und Wurzelkanalwand [7]. Aus der Weiterentwicklung der adhäsiven Befestigungskomposite resultierte ihre Anwendung für die Inkorporation von faserverstärkten Stiften. Verwendet werden überwiegend niedrigviskose Befestigungskomposite auf Basis von Bisphenol-A-Glycidyl-Methacrylat (Bis-GMA) und Urethan-Dimethacrylat (UDMA) [25]. Der Haftverbund zwischen Stift und Komposit erfolgt sowohl durch chemische Bindung über Silane an der Faseroberfläche als auch mechanisch über Mikrorauigkeiten auf der Stiftoberfläche [9]. Durch Konditionierung der Wurzelkanalwand mit modernen Dentinadhäsiven der 3. und 4. Generation wird ein zuverlässiger Verbund des Befestigungskomposites mit der Dentinwand ermöglicht [23]. Die Verbundzone zwischen Kunststoff und Wurzelkanalstift trägt im Hinblick auf eine homogene Lastübertragung auf das Wurzeldentin und die Vermeidung eines bakteriellen Mikroleakage maßgeblich zum Erfolg der Wurzelstiftapplikation unter kaufunktioneller Belastung bei [18, 24].

Allerdings blieb bislang ungeklärt, welche Haftfestigkeit zwischen Stiftmaterial und Befestigungssystem als Mindestanforderung zur Gewährleistung einer dauerhaften Gesamtrekonstruktion zu stellen ist. Da endodontisch behandelte Zähne aufgrund des Fehlens einer mechanorezeptiven Rückkopplung unbewusst höherer Kau- und Kieferschließkräften ausgesetzt sein können und damit neben thermozyklischen auch hohe mechanische Belastungen der Rekonstruktion zu erwarten sind, ist eine größtmögliche Haftfestigkeit der verwendeten Werkstoffkombinationen unabdingbar.

Ein Misserfolg der Wurzelstiftversorgung kann neben dem Retentionsverlust des Stiftes auch durch dessen Fraktur eintreten. Zur Sicherstellung einer Ermüdungs- und Bruchresistenz des Stiftes ist eine hohe Biegefestigkeit unter Beibehaltung der Strukturintegrität sowie die Berücksichtigung eines dentinähnlichen elastischen Verhaltens des Werkstoffes anzustreben [6].

Da die Biegefestigkeit von faserverstärkten Wurzelkanalstiften wesentlich durch deren Morphologie bestimmt wird, war es das Ziel der vorliegenden *In vitro*-Studie, den Einfluss des Faseranteils und der Faserverteilung auf die mechanischen Eigenschaften zu untersuchen. Weiterhin sollte der Einfluss der Benetzbarkeit der Stiftoberfläche mit einer Modellflüssigkeit auf die Auszugsfestigkeit in einem Wurzelkanalmodell überprüft werden.

## Material und Methode

### Wurzelkanalstifte

Im Rahmen dieser Studie wurden Wurzelstifte aus glas-, quarz- und karbonfaserverstärkter Polymermatrix untersucht (Tabelle 1). Die jeweiligen Faserstifte waren 20,0 mm lang und zylindrokönisch ausgebildet. Allerdings ergeben sich durch herstellereigenspezifische Stiftdurchmesser und Konizitäten unterschiedliche Stiftgeometrien. Die Stiftoberflächen der Cytec Blanco- und Cytec Carbon- Faserstifte weisen z.B. spiralförmige Abflussrillen auf.

### Stiftmorphologie und Biegefestigkeit

Zur Analyse der Strukturmorphologie wurden plastographische Querschliffpräparate der Wurzelkanalstifte ange-

**Tabelle 1** Übersicht der untersuchten Wurzelkanalstifte.

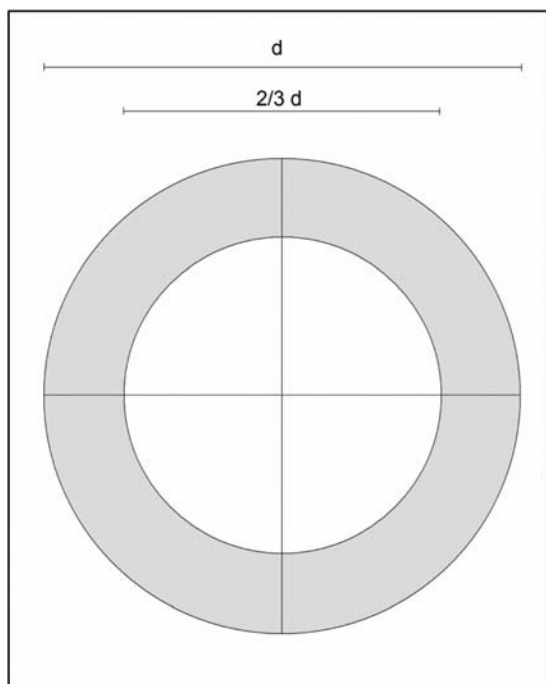
Wurzelkanalstift	Hersteller	Faserart	Stiftmatrix
Cytec Blanco	E. Hahnekratt GmbH, Königsbach-Stein, Deutschland	Glasfaser	Epoxidharz
Mirafit White	Hager & Werken GmbH & Co. KG, Duisburg, Deutschland	Glasfaser	Epoxidharz
Easypost	Dentsply DeTrey GmbH, Konstanz, Deutschland	Glasfaser	Epoxidharz
Fiberpost	Dentsply DeTrey GmbH, Konstanz, Deutschland	Glasfaser	Epoxidharz
Rebilda Post	Voco GmbH, Cuxhaven, Deutschland	Glasfaser	Methacrylat
Cytec carbon	E. Hahnekratt GmbH, Königsbach-Stein, Deutschland	Karbonfaser	Epoxidharz
Mirafit Carbon	Hager & Werken GmbH & Co. KG, Duisburg, Deutschland	Karbonfaser	Epoxidharz
DT light Post	VDW GmbH, München, Deutschland	Quarzfaser	Epoxidharz

fertigt. Nach Einbettung der Stifte in ein kalthärtendes Epoxidharz (Epo-Thin; Buehler GmbH, Düsseldorf, Deutschland) wurden diese auf einer halbautomatischen Poliermaschine (Tegra Pol-15; Strues® GmbH, Willich, Deutschland) unter ständiger Wasserkühlung mit Siliziumcarbidnassschleifpapier (FEPA P 4000) geschliffen. Anschließend wurde das Schliffbild mittels eines konfokalen Laser-Scanning Mikroskopes dokumentiert (LEXT OLS 3000; Olympus GmbH, Hamburg, Deutschland). Die Angabe eines mittleren Faserdurchmessers resultierte aus der Vermessung von je 20 im Stiftquerschnitt verteilten Fasern. Zur morphometrischen Analyse der Faserverteilung im Stiftgefüge wurde der Stiftquerschnitt in ein äußeres Kreissegment und einen inneren Kreis ( $R_1 = 2/3 R_{ges}$ ) mit jeweils 4 Kreissektoren unterteilt (Abbildung 1). Damit verfügt das äußere Kreissegment über 55,6% und der innere Kreis über 44,4% des gesamten Flächeninhaltes des Stiftquerschnittes.

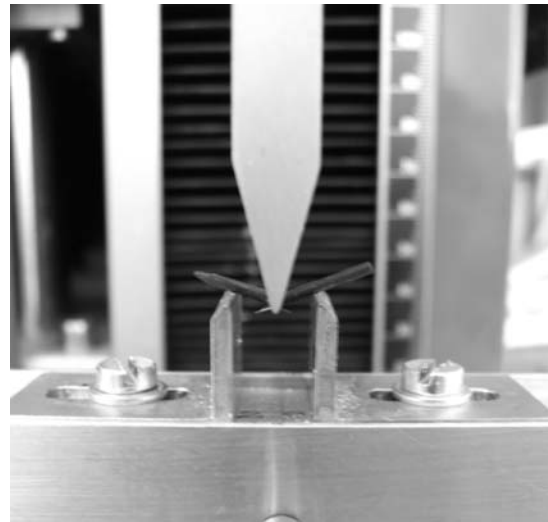
Um einen Einfluss des Faseranteils und der Faserverteilung auf die Biegefestigkeit des Stiftwerkstoffes zu prüfen, wurde der zylindrische Stiftanteil in einem Drei-Punkt-Biegeversuch beansprucht (Zwick TNS 2.5; Zwick GmbH & Co. KG, Ulm, Deutschland). In fünf Versuchsreihen wurden die Faserstifte unter konstanten Prüfbedingungen mit einem Auflagerabstand von 8 mm und einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min bis zum Bruch belastet (Abbildung 2). Unter Einbeziehung des jeweiligen Stiftdurchmessers ergab sich für jeden Stift eine mittlere Biegefestigkeit.

#### Benetzbarkeit und Haftfestigkeit der Stiftoberfläche

Da gegenwärtig keine Untersuchungsverfahren zur Bestimmung der Benetzbarkeit von Wurzelstiftoberflächen bekannt sind, wurde ein modifiziertes Kontaktwinkelverfahren verwendet. Das Prinzip basiert darauf, dass



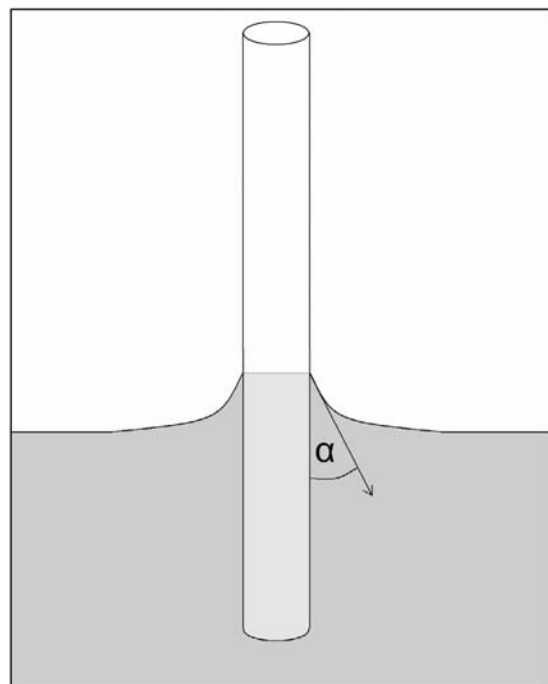
**Abbildung 1** Aufteilung des Stiftquerschnittes in ein äußeres Kreissegment und einen inneren Kreis.



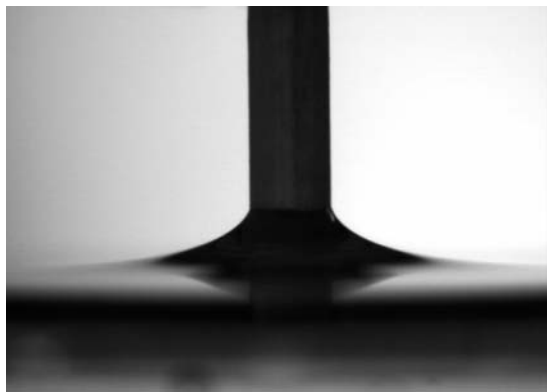
**Abbildung 2** Drei-Punkt-Biegeprüfung am Beispiel des Mirafit Carbon Wurzelkanalstiftes.

sich bei senkrechtem Eintauchen des zylindrischen Stiftanteiles in eine Modellflüssigkeit (destilliertes Wasser) ein von der Benetzbarkeit der Oberfläche abhängiger Kontaktwinkel an der Dreiphasengrenze zwischen Stift, Luft und Modellflüssigkeit einstellt (Abbildung 3). Mittels eines Kontaktwinkelmessgerätes mit integrierter Kamera (OCA 20; DataPhysics Instruments GmbH, Deutschland) wurde die mit der Modellflüssigkeit benetzte Stiftmantelfläche dokumentiert (Abbildung 4) und der Kontaktwinkel an dem Benetzungspunkt P der Faserstifte ermittelt ( $n=10$ ).

Um den Einfluss der Benetzbarkeit der Stiftoberfläche auf die Haftfestigkeit des Stiftes mit einem Befestigungskomposit zu bestimmen, erfolgte die Ermittlung der Ver-



**Abbildung 3** Prinzip der Kontaktwinkelmessung an der Wurzelstiftoberfläche.

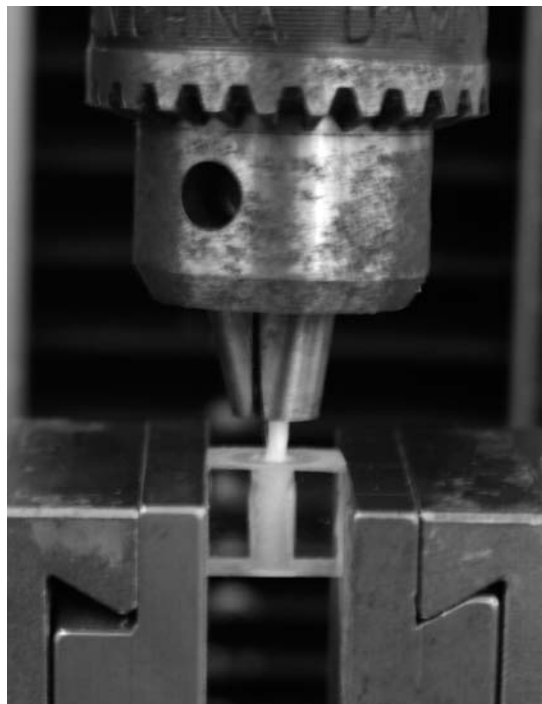


**Abbildung 4** Meniskusausbildung am Beispiel der Oberfläche des DT light Post Wurzelkanalstiftes.

sagenslast des adhäsiven Verbundes zwischen der Stiftoberfläche und dem Komposit in einem Modellwurzelkanal ( $n=5$ ). Für die Verankerung der Wurzelkanalstifte wurde ein Wurzelkanalmodell mit 8 mm tiefen Wurzelkanälen durch senkrechte Bohrung in Polymethylmethacrylat-Blöcken ( $8 \times 10 \times 10$  mm) hergestellt. Nach vorheriger Reinigung der Stiftoberfläche mit Ethanol (70%) wurde zur besseren Benetzung auf die Stiftoberfläche das Adhäsivsystem ED Primer (Kuraray, Okayama, Japan) aufgetragen und dünn ausgeblasen. Das dazugehörige dualhärtende Befestigungskomposit Panavia F 2.0 (Kuraray, Okayama, Japan) auf Methacrylat-Basis wurde anschließend gleichmäßig auf der Stiftoberfläche verteilt. Die Wurzelstifte wurden unter langsamer, rotierend pumpender Vorgehensweise in den Kanal inseriert und überschüssiger Befestigungskomposit entfernt. Die Aushärtung des Kunststoffes mit einer geeigneten Lichtpolymerisationslampe (Elipar<sup>®</sup> Highlight; 3M ESPE, Seefeld, Deutschland; 400–500 nm, 800 mW/cm<sup>2</sup>) wurde unter Sauerstoffabschluss für 120 Sekunden durchgeführt.

Nach senkrechter Positionierung der Proben in der Prüfvorrichtung (Zwick TNS 2.5; Zwick GmbH & Co. KG, Ulm, Deutschland) erfolgten die Zugversuche unter uniaxialer Zugbeanspruchung mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min bis zum vollständigen Kraftabfall (Abbildung 5). Da aufgrund der differierenden Stiftgeometrien bei einer identischen Einsetztiefe von 8 mm unterschiedliche effektive Haftoberflächen der Stifte resultieren, wurde auf die flächenbasierte Haftfestigkeit (N/mm<sup>2</sup>) normiert.

Die aus den Zug- und Biegeversuchen gewonnenen Daten wurden mit Hilfe des Statistikprogramms SPSS



**Abbildung 5** Versuchsaufbau zur Ermittlung der Abzugskraft.

15.0 ausgewertet. Die Prüfung auf Signifikanz der Ergebnisse erfolgte mit dem parameterfreien, beidseitigen Mann-Whitney-U-Test (Irrtumswahrscheinlichkeit  $p < 0,05$ ).

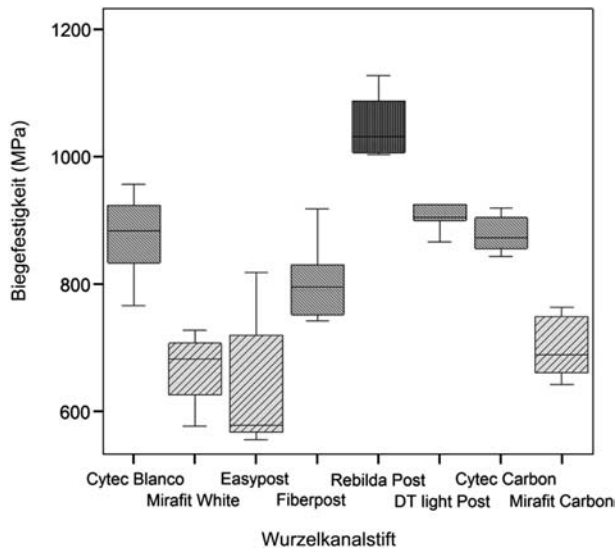
## Ergebnisse

Die jeweiligen mittleren Faserdurchmesser, die Faseranzahl in den Kreissektoren und die daraus resultierenden Faseranteile sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Die ermittelten Biegefestigkeitswerte zeigt Abbildung 6. Dabei erzielte der Wurzelkanalstift Rebuilda Post mit durchschnittlich 1051 MPa ( $\pm 54$  MPa) eine signifikant höhere Biegefestigkeit als die übrigen untersuchten Wurzelkanalstifte ( $p < 0,05$ ). Zwischen den Werten der Versuchsgruppen von Cytec Blanco (873 MPa  $\pm 75$  MPa), FiberPost (808 MPa  $\pm 71$  MPa), DT light Post (921 MPa  $\pm 55$  MPa) und Cytec Carbon (880 MPa  $\pm 32$  MPa) Wurzelstiften ergaben sich keine signifikanten Unterschiede ( $p < 0,05$ ). Allerdings unterscheiden sich die Werte dieser Versuchsgruppen signifikant ( $p < 0,05$ ) von der ermittelten Biegefestigkeit der Wurzelstifte Mirafit White (674 MPa  $\pm 62$  MPa), Mirafit Carbon (708 MPa  $\pm 54$  MPa) und Easypost (647 MPa  $\pm 116$  MPa).

**Tabelle 2** Mittlerer Faserdurchmesser, Faseranzahl und Faseranteil der Wurzelkanalstifte.

	Cytec Blanco	Mirafit White	Easypost	Fiberpost	Rebuilda Post	Dt light Post	Cytec Carbon	Mirafit Carbon
Stiftdurchmesser ( $\mu\text{m}$ )	1,39	1,21	1,47	1,47	1,31	1,79	1,41	1,2
2/3 Stiftradius ( $\mu\text{m}$ )	0,463	0,403	0,490	0,490	0,437	0,597	0,470	0,400
Faserdurchmesser ( $\mu\text{m}$ )	12,332	17,308	13,253	13,378	14,420	12,689	6,100	5,596
Faseranzahl äußerer Kreisring	4261	1190	3242	4124	2893	5213	15118	5909
Faseranzahl innerer Kreis	3237	1087	2647	3245	2000	4047	10036	4308
Faseranteil äußerer Kreisring (%)	60,37	43,83	47,43	61,48	63,18	47,15	50,94	23,12
Faseranteil innerer Kreis (%)	57,33	50,04	48,41	60,47	54,60	45,76	42,27	21,07
Faseranteil gesamt (%)	59,02	46,59	47,87	61,04	59,37	46,53	47,09	22,21

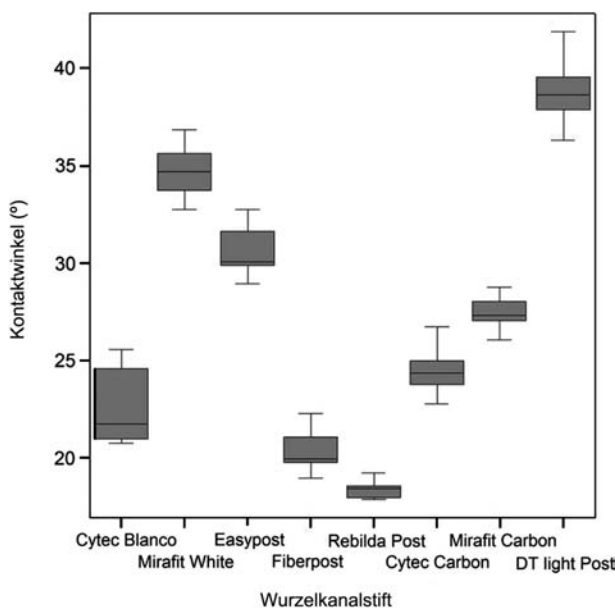


**Abbildung 6** Biegefestigkeitswerte der Faserstifte (Versuchsgruppen die sich signifikant unterscheiden ( $p < 0,05$ ) sind unterschiedlich strukturiert dargestellt).

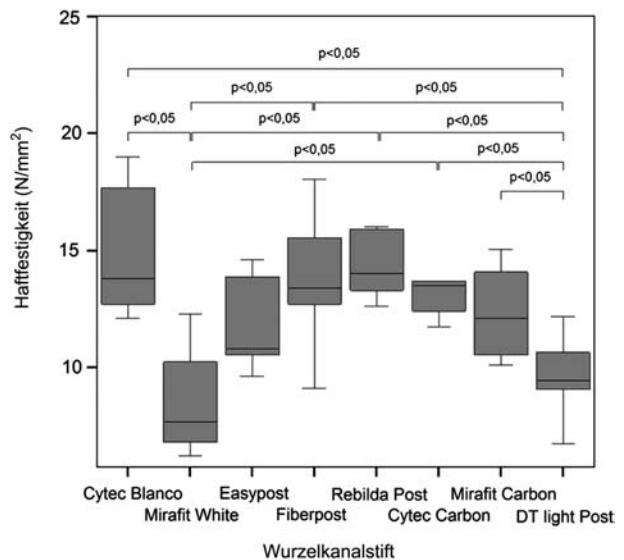
Die Resultate der Kontaktwinkelmessungen sind in Abbildung 7 dargestellt. Die statistische Auswertung der Versuchsergebnisse ergaben hier signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) der Kontaktwinkelwerte zwischen allen Faserstiften.

Für die Haftfestigkeit konnten die in Abbildung 8 dargestellten Werte und Signifikanzen der Faserstifte ermittelt werden. Eine Analyse der Stiftoberflächen nach der Zugbeanspruchung zeigte ausschließlich ein Versagen des Verbundes zwischen adhäsivem Befestigungsmaterial und Stift.

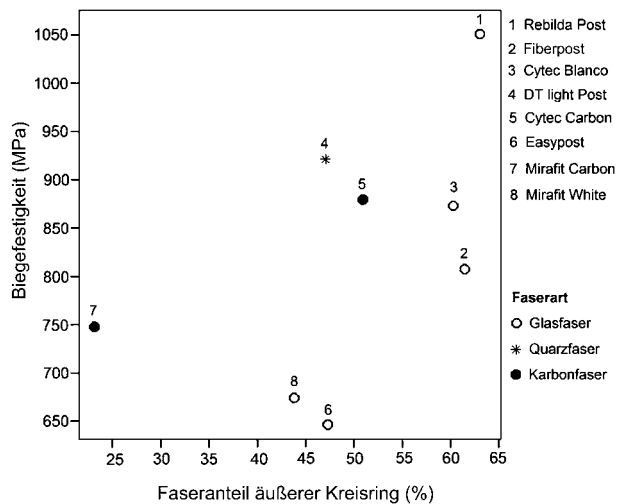
Aus der Gegenüberstellung der Biegefestigkeitswerte in Abhängigkeit von dem Faseranteil im äußeren Kreissegment des Stiftquerschnittes resultierte die in Abbildung 9 gezeigte Situation. In Abbildung 10 sind die



**Abbildung 7** Kontaktwinkel der Wurzelstifte.



**Abbildung 8** Darstellung der ermittelten Haftfestigkeitswerte und deren Signifikanzen.

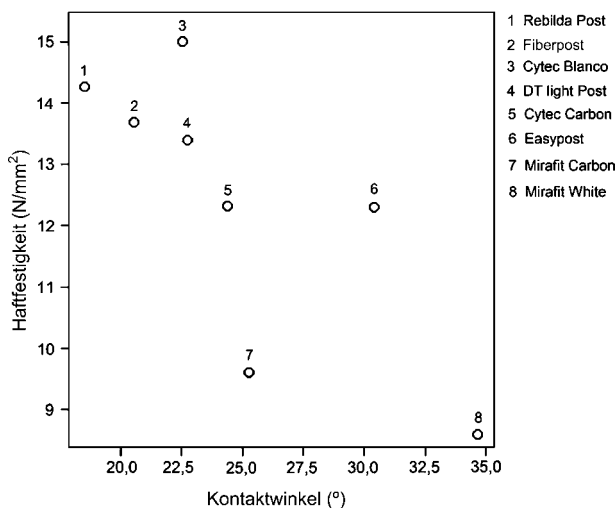


**Abbildung 9** Korrelation der Biegefestigkeit mit Faseranteil und Faserart.

Haftfestigkeitswerte den Ergebnissen der Kontaktwinkelmessung gegenübergestellt.

## Diskussion

Ziel dieser Untersuchung war die vergleichende Analyse des Einflusses der Fasermorphologie auf die Materialeigenschaften von faserverstärkten Wurzelkanalstiften sowie die Prüfung des Einflusses der Benetzbarkeit der Stiftoberfläche auf die Retentionseigenschaften mit einem Befestigungskomposit in einem Wurzelkanalmodell. In vergangenen Studien wurden faserverstärkte Wurzelkanalstifte vorwiegend im Vergleich zu metallischen oder keramischen Stiftwerkstoffen mit oft kontroversen Ergebnissen untersucht [12, 14, 20]. Die vergleichende Untersuchung der Biegefestigkeit von Faserstiften unter Berücksichtigung der jeweiligen Fasermorphologie der Stifte wurde bisher nicht vorgenommen. In dieser Studie

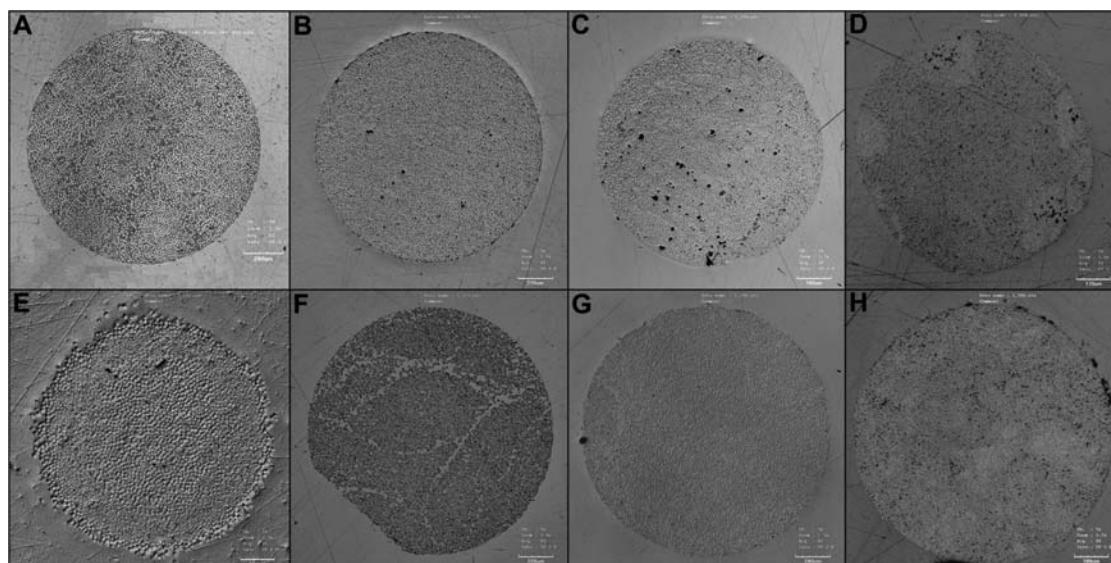


**Abbildung 10** Korrelation der Haftfestigkeit mit dem Kontaktwinkel.

wurde daher sowohl der Faseranteil als auch die Faser-  
verteilung im Stiftquerschnitt beachtet. Da während einer  
Biegebelastung vor allem die Zugbeanspruchung der  
äußeren Fasern im Stiftquerschnitt von Bedeutung ist,  
wurde für die weitere vergleichende Betrachtung der  
Ergebnisse der Faseranteil im äußeren Kreissegment des  
Stiftquerschnittes gewählt. Dabei muss grundsätzlich für  
eine Gegenüberstellung der Biegefestigkeit von faserver-  
stärkten Wurzelkanalstiften zwischen quarz-, karbon-  
und glasfaserverstärkten Werkstoffen differenziert  
werden. Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung  
zeigen, dass Faserstifte mit einem höherem Faseranteil  
im äußeren Stiftsegment auch durch eine höhere Biege-  
festigkeit gekennzeichnet sind (Abbildung 9). Dieser  
Zusammenhang wird sowohl am Beispiel der Karbonfa-  
serstifte Cytec Carbon und Mirafit Carbon als auch im  
Vergleich der Glasfaserstifte Cytec Blanco, Mirafit White,  
Easypost, Fiberpost und Rebilda Post deutlich. Karbon-  
faserstifte erreichten in dieser Untersuchung im Vergleich

zu Glas- und Quarzfaserstiften keine höhere Biegefestig-  
keit. Daher ist es nicht notwendig, die Indikation von  
transluzenten Quarz- und Glasfaserstiften auf ästhetisch  
anspruchsvolle Vollkeramikrestaurationen im Front- und  
Eckzahnbereich zu begrenzen. Die mikroskopische  
Untersuchung der Stiftquerschnitte zeigte faserfreie  
Anteile der Wurzelstifte Fiberpost (Abbildung 11F) und  
Easypost (Abbildung 11C), die für deren verringerte Biege-  
festigkeit gegenüber Stiften mit höherem Faseranteil  
im äußeren Kreissegment (Rebilda Post Abbildung 11B,  
Cytec Blanco Abbildung 11A) verantwortlich gemacht  
werden können. Faserdelaminationen im Schlibbild des  
Mirafit White Stiftes (Abbildung 11E) weisen auf eine  
verminderte Faser-Matrix-Haftung hin. In Kombination  
mit dem geringsten Faseranteil erreichte dieser Stift die  
niedrigste Biegefestigkeit.

Für den dauerhaften klinischen Erfolg der Stiftversor-  
gung ist neben einer hohen Biegefestigkeit der Wurzel-  
stifte auch deren beständige Retention im Wurzelkanal  
entscheidend [15]. Häufig wird klinisch über ein adhä-  
sives Versagen des Stiftes im Wurzelkanal berichtet [2,  
4, 17]. Ein lediglich auf den Auszugskräften basierender  
Vergleich lässt ohne die Berücksichtigung der effektiven  
Haftfläche des Stiftes keine exakte Aussage zur Gesamt-  
situation des Haftverbundes zu [1]. Um einen einheitli-  
chen Versuchsaufbau zu gewährleisten und große  
Streuungen der Messwerte zu vermeiden, wurde hier auf  
die Verwendung von natürlichem Zahnmaterial verzichtet.  
Die Haftfestigkeit eines Stiftes im Wurzelkanal ist von  
dem gewählten Befestigungskomposit, von den verwen-  
deten Stiftmaterialien (Keramik, Titan oder Faserver-  
bundwerkstoffe), von der Stiftkonfiguration (konisch,  
zylindrisch, zylindrokonisch) und von der Verbundeigen-  
schaft der Dentinoberfläche abhängig [23–25]. Die  
Ergebnisse dieser Untersuchung weisen darauf hin, dass  
durch die individuelle Benetzbarkeit der Stiftoberfläche  
ein zusätzlicher Einfluss auf den Haftverbund vorliegt.  
Das angewandte Kontaktwinkelmessverfahren erwies  
sich aufgrund der signifikanten Unterschiede der Mess-



**Abbildung 11** (A) Querschnitte der Endodontiestifte Cytec Blanco; (B) Rebilda Post; (C) Easypost; (D) Cytec Carbon; (E) Mirafit White; (F) Fiberpost; (G) DT light Post und (H) Mirafit Carbon.

werte aller Versuchsgruppen untereinander als geeignet und reproduzierbar. Die Gegenüberstellung von Kontaktwinkel und Haftfestigkeit der untersuchten Wurzelkanalstifte (Abbildung 10) verdeutlicht, dass Stifte mit einem geringeren Kontaktwinkel höhere Haftfestigkeitswerte aufweisen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine unvollständige Benetzung der Stiftoberfläche mit dem Befestigungskomposit zu einer Spaltbildung an der Verbundfläche führen kann [22] und die durch die Spaltbildung verursachte verminderte Haftfläche die Differenzen der Haftfestigkeitswerte bewirkt. Weiterhin können die auf der Oberfläche der Wurzelstifte Cytec Carbon und Cytec Blanco vorhandenen makromechanischen Retentionselemente die für den Haftverbund wirksame Stiftoberfläche vergrößern und damit zusätzlich die relativ hohe Haftfestigkeit dieser Wurzelkanalstifte begründen [24]. In vorangegangenen Untersuchungen der Oberflächenstruktur von Wurzelkanalstiften konnte gezeigt werden, dass eine geringere Oberflächenrauigkeit mit niedrigeren Haftfestigkeiten einhergeht [23]. Mit einer Verringerung des Kontaktwinkels und damit einer vollständigeren Benetzung mit dem Befestigungskomposit ist eine weitere Erhöhung der Haftfestigkeit zu erwarten.

## Literatur

- [1] Babenhauserheide K, Freesmeyer W. Zugversuche an faserverstärkten Wurzelstiften. *zm* 2008; 98: 40–43.
- [2] Bitter K, Kielbassa AM. Post-endodontic restorations with adhesively luted fiber-reinforced composite post systems: a review. *Am J Dent* 2007; 20: 353–360.
- [3] Butz F, Lennon AM, Heydecke G, Strub JR. Survival rate and fracture strength of endodontically treated maxillary incisors with moderate defects restored with different post-and-core systems: an *in vitro* study. *Int J Prosthodont* 2001; 14: 58–64.
- [4] Cormier CJ, Burns DR, Moon P. *In vitro* comparison of the fracture resistance and failure mode of fiber, ceramic, and conventional post systems at various stages of restoration. *J Prosthodont* 2001; 10: 26–36.
- [5] de Rijk WG. Removal of fiber posts from endodontically treated teeth. *Am J Dent* 2000; 13: 19B–21B.
- [6] 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: 117–129.
- [7] Dietschi D, Romelli M, Goretti A. Adaptation of adhesive posts and cores to dentin after fatigue testing. *Int J Prosthodont* 1997; 10: 498–507.
- [8] Doornbusch H, Vissink A, Huysmans MC. The ideal endodontic posts. A review of the literature. *Ned Tijdschr Tandheelkd* 2003; 110: 107–112.
- [9] Edelhoff D, Weber M, Spiekermann H, Marx R. PVD-layering for increased retention of glass fibre reinforced endodontic posts. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 2006; 116: 992–999.
- [10] Edelhoff D, Heidemann D, Kern M, Weigl P. Aufbau endodontisch behandelter Zähne. Gemeinsame Stellungnahme der DGZMK, der DGZPW und der DGZ 2003; zm 8, 42.
- [11] Ferrari M, Cagidiaco MC, Goracci C, et al. Long-term retrospective study of the clinical performance of fiber posts. *Am J Dent* 2007; 20: 287–291.
- [12] Korves G, von Schwanewede H, Grabow N, Langschwager S, Behrend D. Investigations of the mechanical Properties of various endodontic post systems. *Proceedings Biomed Tech* 2005 (Suppl Biomed Tech 50): 1595–1597.
- [13] Malferrari S, Monaco C, Scotti R. Clinical evaluation of teeth restored with quartz fiber-reinforced epoxy resin posts. *Int J Prosthodont* 2003; 16: 39–44.
- [14] Mannocci F, Sherriff M, Watson TF. Three-point bending test of fiber posts. *J Endod* 2001; 27: 758–761.
- [15] Mannocci F, Bertelli E, Sherriff M, Watson TF, Ford TR. Three-year clinical comparison of survival of endodontically treated teeth restored with either full cast coverage or with direct composite restoration. *J Prosthet Dent* 2002; 88: 297–301.
- [16] Monticelli F, Grandini S, Goracci C, Ferrari M. Clinical behavior of translucent-fiber posts: a 2-year prospective study. *Int J Prosthodont* 2003; 16: 593–596.
- [17] Nergiz I, Schmage P, Platzer U, Ozcan M. Bond strengths of five tapered root posts regarding the post surface. *J Oral Rehabil* 2002; 29: 330–335.
- [18] Olusile AO, Oginni A. Restoration of endodontically treated teeth: a review. *Niger Postgrad Med J* 2004; 11: 50–57.
- [19] Paul SJ, Werder P. Clinical success of zirconium oxide posts with resin composite or glass-ceramic cores in endodontically treated teeth: a 4-year retrospective study. *Int J Prosthodont* 2004; 17: 524–528.
- [20] Pfeiffer P, Schulz A, Nergiz I, Schmage P. Yield strength of zirconia and glass fibre-reinforced posts. *J Oral Rehabil* 2006; 33: 70–74.
- [21] Plotino G, Grande NM, Bedini R, Pameijer CH, Somma F. Flexural properties of endodontic posts and human root dentin. *Dent Mater* 2007; 23: 1129–1135.
- [22] Schäffer F. Rasterelektronenmikroskopische Randspaltanalyse adhäsiv zementierter Wurzelkanalstifte aus glasfaserverstärktem Komposit, Zirkoniumdioxid und Titan. *Dissertationsschrift. Universität Freiburg: Freiburg* 2005.
- [23] Vano M, Goracci C, Monticelli F, et al. The adhesion between fibre posts and composite resin cores: the evaluation of microtensile bond strength following various surface chemical treatments to posts. *Int Endod J* 2006; 39: 31–39.
- [24] Wrbas KT, Kampe MT, Schirrmeister JF, Altenburger MJ, Hellwig E. Retention of fiber posts dependent on different resin cements. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 2006; 116: 18–24.
- [25] Wrbas KT, Altenburger MJ, Schirrmeister JF, Bitter K, Kielbassa AM. Effect of adhesive resin cements and post surface silanization on the bond strengths of adhesively inserted fiber posts. *J Endod* 2007; 33: 840–843.

Eingereicht: 1. Dezember 2008; akzeptiert: 4. Juni 2009