

D. Edelhoff¹, R. Marx²

Adhäsive Retention glasfaserverstärkter Wurzelkanalstifte mit temperaturabhängiger Farbkodierung

Adhesive retention of fiber reinforced posts with temperature dependent color code



D. Edelhoff

Wurzelkanalstifte aus glasfaserverstärktem Epoxidharz verfügen im Vergleich zu Stiften aus Metall oder Keramik nicht nur über ästhetische Vorteile; sie können auch einfacher entfernt werden. Die Entfernbarkeit kann durch eine temperaturabhängige Farbkodierung unterstützt werden, wenn die Einfärbung bei Körpertemperatur nicht sichtbar ist, bei Kühlung dagegen erkennbar wird, so dass sich der Stift farblich deutlicher vom Wurzelkanal und dem Befestigungskomposit absetzt. Häufig ist „chairside“ eine Stiftkonditionierung durch den Behandler erforderlich. Dieser Vorgang verzögert den flüssigen Ablauf und begünstigt Anwendungsfehler. Diese Konditionierung kann auch „herstellerseitig“ erfolgen, z. B. durch PVD-Beschichtung. In dieser In-vitro-Untersuchung wurden farbkodierte Wurzelkanalstifte oberflächenaktiviert, PVD-beschichtet und mit einer glasklaren abwasch- und desinfizierbaren Schutzschicht versehen, die diese Konditionierung konserviert. Die Schutzschicht ermöglicht Lagerbarkeit und Einprobe der Stifte. Zur Verifizierung der Verbundstabilität wurde die Auszugsfestigkeit nach bis zu 180-tägiger Auslagerung in physiologischer Kochsalzlösung bei Mundtemperatur untersucht, insbesondere auch unter dem Gesichtspunkt, dass die Einfärbung die Auszugsfestigkeit negativ beeinflussen könnte. Diese Auszugsfestigkeit erwies sich während des Beobachtungszeitraums als stabil. (Dtsch Zahnärztl Z 2010; 65: 148–155)

Schlüsselwörter: faserverstärkte Wurzelstifte, Adhäsivtechnik, Oberflächenkonditionierung, PVD-Beschichtung, Farbkodierung

For esthetical and biomechanical reasons root canal posts made of fibre-reinforced composite (FRC) have gained an important role in clinical application. FRC-posts offer the option of removal. The removal is simplified when the posts have a color code which disappears at body temperature. For better contrast the color code re-appears when the post and its surrounding is cooled by water spray. Prior to adhesive placement of FRC-posts the post surface must often be pre-conditioned. Up to now the post pre-conditioning has to be proceeded in the chair side technique. Modern PVD-technologies can help to perform this surface pretreatment by the manufacturer. For that reason the apical surfaces of posts were cleaned and activated, PVD-layered and coated by a conserving transparent layer. This coating is performed to protect the surface and allows storage, tryin and disinfection of the posts without any risk of damage of the pre-conditioned surface. To prove the stability of the layer system and to confirm that the color code does not disturb the retention pull out tests have been performed. The pull out tests revealed stable pull out forces during the time of observation.

Keywords: fiber reinforced root canal posts, adhesive technique, surface conditioning, PVD-layering, color code

¹ Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik, München

² Medizintechnisches Zentrum, RWTH Aachen

Peer-reviewed article: eingereicht: 16.12.2008, akzeptiert: 12.11.2009

DOI 10.3238/dzz.2010.0148

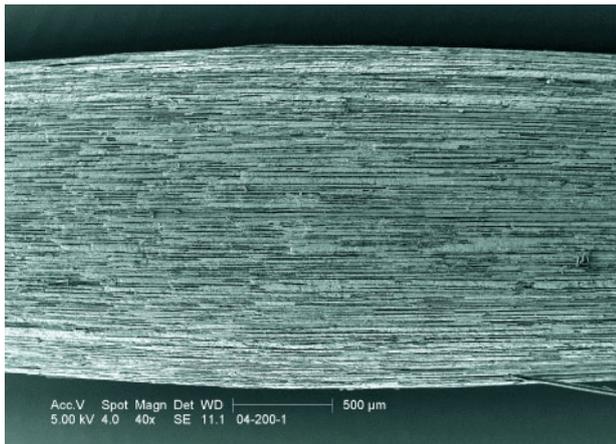


Abbildung 1 REM-Aufnahmen der Stiftoberfläche (DT Light Post Illusion) nach Aktivierung mit HF. Die Flusssäure ätzt in erster Linie die oberflächennahen Quarzglasfasern an und es ergibt sich eine ausgeprägte Textur.

Figure 1 REM analysis of post surface after HF activation. The HF acid primarily etches quartz fibres which are exposed at the surface. Result is a pronounced surface texture.

1 Einleitung

Neben biomechanischen und ästhetischen Vorzügen gegenüber metallischen [21] oder keramischen Wurzelstiften [22], zeigen Stifte aus faserverstärktem Komposit ein elastisches und lichtoptisches Verhalten (Zahnfarbe, Transluzenz), das gut an das des Zahnes angeglichen ist. Faserverstärkte Wurzelkanalstifte auf Komposit- oder Epoxidharzbasis (Fiber Reinforced Composite = FRC) bieten darüber hinaus den wichtigen Vorteil, dass nach einer Fraktur Fragmente leicht zu entfernen sind [4, 5, 19]. Ihre dauerhafte Ermüdungsfestigkeit ist inzwischen gut untersucht und steht nicht in Zweifel [23].

Der Elastizitätsmodul E der hier zu untersuchenden Wurzelkanalstifte (DT Light-Post Illusion; Vertrieb: VDW GmbH, München; Hersteller: RTD, St Egrève, Frankreich) beträgt 15 GPa ([11]) und liegt damit sehr nahe bei dem des Dentins ($E = 13$ GPa), allerdings deutlich unterhalb dem des Schmelzes ($E = 47$ GPa: [14]). Steife Stiftematerialien wie Metalllegierungen und Keramik, insbesondere Zirkoniumdioxid ($E = 210$ GPa [14]), haben um mindestens eine Größenordnung höhere Elastizitätsmoduli (mit Ausnahme von unlegier-

tem Titan; hier liegt der Elastizitätsmodul bei etwa 100 GPa: [29]). Dieser Unterschied kann zu Wurzelfrakturen führen [19]. Ziel muss es sein, eine isoelastische Einheit aus Dentin, Stift und Aufbau zu bilden, um die mechanische Belastung gleichmäßig auf die Restzahnsubstanz zu verteilen [11]). Zu dieser isoelastischen Einheit trägt auch ein effektives Verbundsystem für die Grenzflächenabfolge Wurzelzement-Komposit-Stift bei [3, 25].

Die vorliegende Untersuchung ist fokussiert auf das farbkodierte FRC-Stiftsystem auf Epoxidharzbasis DT Light-Post Illusion (die weiterentwickelten Stifte „Illusin X-RO“ mit verbesserter Röntgenopazität haben unter den hier diskutierten Gesichtspunkten ganz analoge Eigenschaften). Dieses Stiftsystem ist in vier Größen erhältlich und jeder Größe ist eine eigene Farbe zugeordnet, die allerdings nur bei Zimmertemperatur sichtbar ist und so als Größenkodierung dienen kann. Die korrespondierenden Bohrer sind ebenfalls entsprechend farbkodiert. Die Farbe der Stifte verschwindet bei Erwärmung auf Mundtemperatur (der Umschlagspunkt liegt bei etwa 29 °C) und wird z. B. durch punktuell Wasser kühlen auf unter 29 °C wieder sichtbar. Damit setzt sich

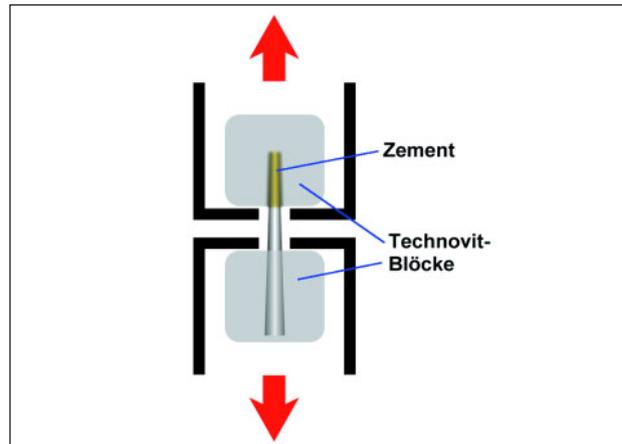


Abbildung 2 Versuchsanordnung für den Auszugstest. Die Länge der Stifte ist etwa 20 mm. Ein Drittel der Länge (etwa 6,7 mm) wird in den Technovitblock verankert (oben), ein weiteres Drittel der Länge nimmt die Versuchsanordnung in Anspruch. Für die Retention des koronalen Teiles des Stiftes bleiben etwa 6,7 mm.

Figure 2 Test equipment for pull out test. The posts have a length of about 20 mm. One third of the length of the posts will be fixed in a technovitblock (upper part), a further third is available for test equipment. Hence for the retention of the coronal part of the posts 6,7 mm remain (lower part).

der eingesetzte Wurzelstift z. B. nach einer Fraktur zur leichteren Entfernung optisch deutlich von seiner Umgebung ab. Eine analoge Untersuchung wurde bereits für das nicht-farbkodierte Stiftsystem DT Light-Post vorgestellt [5, 6].

In der Literatur herrscht Einigkeit, dass vor der adhäsiven Eingliederung von Wurzelstiften das Dentin des Wurzelkanals konditioniert werden muss [12, 19]. Für die adhäsive Befestigung stiftseitig gibt es bisher keine allgemein gültigen Richtlinien, insbesondere die Frage betreffend, ob die Stiftoberfläche zu konditionieren ist. Der dauerhafte Verbund zwischen Wurzelkanalstift und Befestigungssystem wird jedoch maßgeblich zum Erfolg der Rekonstruktion unter kaufunktioneller Belastung beitragen [28]. Die Epoxidharzmatrix des FRC-Wurzelstiftes und die organische Matrix des Befestigungskomposits sind chemisch nicht kompatibel und deshalb ist ad hoc kein belastbarer Verbund zu erwarten [18]. Um diesen Mangel auszugleichen und die Retention zum Befestigungskomposit zu erhöhen, wird deshalb die Oberfläche des Wurzelkanalstiftes fast immer konditioniert [28] oder vorbeschichtet [5, 8, 24]. Es werden allerdings Systeme beschrieben (z. B. RelyX Unicem, RelyX Fiber Post, Panavia F als Komposit), die of-



Abbildung 3 Stifte (DT Light Post Illusion Gr. 1) SiOx-beschichtet mit konservierender PolyMA-Schutzschicht (unten) vs. Stift ohne SiOx-Beschichtung und ohne diese PolyMA-Schutzschicht (oben).

Figure 3 Posts (DT Light Post Illusion size 1) SiOx layered and with PolyMA protective layer conserved (below) and without those layers (above).

fenbar ohne jede Konditionierung gute Auszugsfestigkeiten erzielen [1, 2, 27, 28].

Die Konditionierung sowohl zahn- als auch stiftseitig wird derzeit noch überwiegend am Stuhl vorgenommen. Die zahnseitige Konditionierung am Stuhl ist unvermeidlich, die stiftseitigen Konditionierungsschritte stören jedoch den flüssigen klinischen Behandlungsablauf in unnötiger Weise. Zudem birgt die am Stuhl vorgenommene Konditionierung des Stiftes vermeidbare Risiken in sich, die bei einer stiftseitigen Konditionierung durch den Hersteller zum Teil vermieden werden können.

Die Prozesssicherheit dieses Schrittes kann also gesteigert werden, in dem die Stifte vorkonditioniert zum Behandler gelangen, so dass die Stiftkonditionierung am Stuhl entfällt. Inzwischen sind zwei Systeme [6, 24] für die herstellereitige Konditionierung bekannt: DentinPost Coated (Brasseler GmbH, Lemgo) und das schon oben erwähnte System DT Light SL (VDW GmbH, München). Bei dem letzteren System wird die Oberfläche des Stiftes in moderner PVD- (Physical-Vapour-Deposition)-Beschichtungstechnologie mit SiOx bedampft. SiOx hat nicht nur in Verbindung mit Silan eine Funktion als Haftvermittler, sondern ist auch eine hydrophobe Barriere gegen die Diffusion von Wasser in den Wurzelstift. Ohne diese Silikatbeschichtung würde lediglich der expo-

nierte Glasfaseranteil für die Bindung zum anschließend aufzutragenden Silan zur Verfügung stehen [8].

Eine „herstellereitige“ Konditionierung setzt voraus, dass die Wirksamkeit der Konditionierung während der durch den Hersteller angegebenen Lagerfrist unverändert erhalten bleibt. Auf dem Weg zwischen Herstellung, über die Zwischenlagerung und bis zur Anwendung beim Patienten darf daher keine Deaktivierung erfolgen. Durch diese durch die Praxis vorgegebene Forderung scheidet ein breites Spektrum von industriellen Konditionierungsverfahren aus, z. B. die für viele Materialien, insbesondere auch Kunststoffe und Gläser, so wirksame Plasmaaktivierung [10].

Der Mangel der Deaktivierung hafet tendenziell jeder „herstellereitigen“ Konditionierung an, es sei denn, es gelänge, den „herstellereitig“ bewirkten Aktivierungszustand praxisgerecht zu konservieren. Eine solche Konservierung ist in der Tat möglich, indem auf das der Aktivierung dienende Schichtsystem eine sehr dünne „PolyMA-Schutzschicht“ aufgetragen wird, die nach der Polymerisation chemisch und mechanisch widerstandsfähig ist und die bei Kontakt mit dem Befestigungskomposit in dieses „einleiert“. Es besteht insofern eine Analogie zwischen dem hier angestrebten und – wie die Auszugstests zeigen werden – dem ziel-

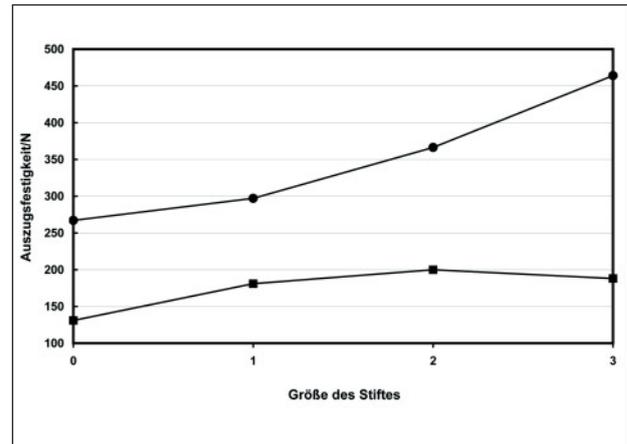


Abbildung 4 Zusammenhang zwischen der Auszugsfestigkeit unbeschichteter (unten) bzw. beschichteter Stifte (oben) und der Größe dieser Stifte. Die Auszugsfestigkeit der beschichteten Stifte nimmt mit der Größe der Stifte überproportional zu.

Figure 4 Pull out strength of layered posts (above) and unlayered posts (below) vs their size. The pull out strength of the layered posts increases more than proportional.

führenden Mechanismus der Interdiffusion der Monomere des Befestigungskomposit in die MMA-haltige PolyMA-Schutzschicht und der von Mannoeci et al. [13] beschriebenen Penetration von Monomeren aus Adhäsivsystemen in die Matrix von PMMA-haltigen Glasfaserstiften.

Auf diese Weise kann eine Monate oder Jahre dauernde Zeitspanne (Versand, Lagerung) zwischen der Fertigung des Stiftes und der Anwendung am Stuhl sicher überbrückt werden. Nach der Einpolymerisation bilden Befestigungskomposit und diese PolyMA-Schutzschicht eine chemische Einheit. Dies setzt jedoch voraus, dass die Schutzschicht aus Monomeren besteht, die entweder mit denen des Befestigungskomposit identisch oder ihnen sehr ähnlich sind [15].

Ziel muss der „Endodontische Monoblock“ sein, also ein durchgehend dichtes und hochbelastbares Verbundsystem zwischen der restaurativen Krone und dem Inneren des Wurzelkanals vermittelt durch ein schlüssiges Adhäsivsystem [3, 18, 25].

Ziel der vorliegenden In-vitro-Untersuchung war es, die Dauerhaftigkeit der Verbundstabilität des PVD-Beschichtungsverfahrens unter simulierten klinischen Bedingungen zu überprüfen, insbesondere vor dem Hintergrund, ob die eingebrachten Farbpigmente für

Größe	0 Tage		180 Tage	
	Mittelwert* N besch.	SD N	Mittelwert N	SD N
0	267,1	24,0	n.g.	n.g.
1	297,1	19,6	n.g.	n.g.
2	366,3	13,4	n.g.	n.g.
3	464,1	36,5	n.g.	n.g.

Größe	0 Tage				180 Tage	
	Mittelwert N unbesch.	SD N	Mittelwert** N besch.	SD N	Mittelwert N besch.	SD N
0	131,7	21,3	317,9	21,7	237,4	8,1
1	181,2	12,4	273,3	13,5	225,3	85,2
2	–	–	361,9	22,2	275,5	17,7
3	188,3	33,9	356,2	49,8	306,4	88,0

Auszugstests. Mittelwerte aus 5 Einzelmessungen. Ohne Auslagerung (0 Tage) und nach 180 d Auslagerung bei 37 °C in aqua dest.
**) Wg. Reproduzierbarkeit Wiederholung von den mit *) gekennzeichneten Werten

Pull out tests: mean out of five single measurements. Without removal from storage (0 days) and after 180 hours removal from stock by 37 °C in aqua dest.
**) Because of reproducibility repetition of the numbers marked with *)

Tabelle 1 Einfluss der Größe und der hydrolytischen Belastung auf die Auszugsfestigkeit von DT Light Post Illusion® (z. T. beschichtet vs. unbeschichtet).

Table 1 Influence of amount and hydrolytic force on the pull out strength of DT Light Post Illusion®.

den temperaturabhängigen Farbumschlag bzw. die temperaturabhängige Farbtonveränderung die Auszugsfestigkeit beeinträchtigen. Ferner sollte zum einen überprüft werden, ob Kontaminationen leicht zu entfernen sind, und zum anderen, ob der Einsatz des Autoklavier-Verfahrens möglich ist und inwieweit die PolyMA-Schutzschicht die Auszugsfestigkeit der Stifte weitgehend unabhängig von der Art des verwendeten Befestigungskomposits macht.

2 Material und Methode

Die Stifte des DT Light-Post Illusion-Systems (Größen 0, 1, 2, 3; Farbkodierung grau-blau, rot, gelb-grün, blau; alle hier gemachten Angaben und durchgeführten Untersuchungen beziehen sich wenn nicht anders angemerkt auf die Größe 2; je Untersuchungsparameter Probenanzahl fünf Stifte) bestehen aus einer Epoxidharz-Matrix verstärkt mit

dichtgepackt in der Achse des Stiftes verlaufenden Quarzglasfasern (Hauptbestandteil SiO₂) der Dicke 14 µm (Faser zu Matrixgewicht ist 3:1). Die Fasern sind für eine verbesserte Haftung mit der Epoxidharz Umgebung konditioniert [11]. Der Stift ist doppelkonisch [21].

Vor der für diese Untersuchung vorzunehmenden Beschichtung wurden die Wurzelkanalstifte durch intensives Reinigen mit 10 %iger HF (90 Sekunden) „oberflächenaktiviert“. Nach der Flusssäurebehandlung zeigte sich eine minimal abgetragene und deshalb saubere, für den PVD-Silikatauftrag vorbereitete hochretentive Oberfläche (Abb. 1).

Auf die durch die Flusssäurebehandlung vorbereitete Oberfläche wurde in einer PVD-Anlage (Eigenbau; [15, 17]) im Hochvakuum ($p = 2 \cdot 10^{-5}$ mbar) bei 1070°C Quelltemperatur Silikat aufgedampft. Als Silikatquelle diente ein Tantal/Niob-Schiffchen, gefüllt mit SiOx (Siliziumoxid, Balzers Materials, Fürstentum Liechtenstein) mit einer

schornsteinförmigen Öffnung, aus der die SiOx-Teilchen als Dampfstrahl austreten und auf der aktivierten Oberfläche des Wurzelstiftes als dünne gleichmäßige Schicht kondensieren. Für eine gleichmäßige Schichtdicke werden die bürstenförmig aufgestellten Wurzelkanalstifte entlang der Achse der Halterung und in zwei Stellungen um diese Achse mit Hilfe einer Dreiachsensteuerung im SiOx-Dampfstrahl bewegt. Die Schichtdicke der SiOx-Schicht beträgt 120 ± 20 nm, gemessen mit einem interferometrischen Verfahren (NanoCalc 2000, Mikropack, Ostfildern) an der Oberfläche eines mitlaufenden Spiegelclips. Aus dem Abstand zweier Interferenzminima oder -maxima, durch Reflexion an diesem Spiegelclip erzeugt, ergibt sich die Schichtdicke.

Anschließend wurde Silan (Espe Sil, 3M ESPE, Seefeld; der Silanauftrag macht nur Sinn, wenn ein silikatischer Bindungspartner vorhanden ist) aufgetragen und nach Abdampfen des alkoholischen Lösungsmittels das auf dem Stift befindliche Schichtsystem mit einer transparenten hochglänzenden, also sehr glatten und deshalb Verunreinigungen abweisenden PolyMA-Schutzschicht im Tauchverfahren abgedeckt. Die Schutzschicht wurde unter Vakuum ($p = 10^{-1}$ mbar) mit Licht, das einen hohen blauen Spektralanteil hat, ausgehärtet (Polymerisationszeit drei Minuten). Die Mohshärte der Schicht beträgt danach etwa 2, gemessen mit einem Gipsprüfling an einem Stift, der willkürlich jeweils dreimal aus einer Charge herausgegriffen wird. Die Bestimmung der Mohshärte dient als einfache Kontrolle, ob die Schutzschicht ausgehärtet ist.

Zur Verifizierung der dauerhaften mechanischen Stabilität der Verbundfestigkeit insbesondere auch unter simulierten Mundbedingungen wurden die folgenden Versuchsgruppen gebildet: Messung der größenabhängigen Auszugsfestigkeit (Stiftgrößen 0, 1, 2, 3; ohne Auslagerung und nach 180-tägiger Auslagerung in aqua dest. bei 37 °C), Auszugsfestigkeit für verschiedene Befestigungskomposite (siehe Tab. 3), Auszugsfestigkeit nach Kontamination mit Rinderblut (siehe Legende Tab. 3), Auszugsfestigkeit nach Fehlbehandlung der Beschichtung durch zusätzlichen Silanauftrag (siehe Legende Tab. 3), Auszugsfestigkeit nach Desinfizieren/Autoklavieren (siehe Tab. 2), Auszugsfestigkeit

	Mittelwert N	SD N
Desinfektion (3 % H ₂ O ₂ , 30 s)	299,3	17,7
Autoklavieren, 135 °C, 2,3 bar 9 min	315,6	18,7
Desinfektion (3 % H ₂ O ₂ , 30 s) und Autoklavieren, 135 °C, 2,3 bar 9 min	400,0	27,5
Auszugsfestigkeit. DT Light Post Illusion, Gr. 2, beschichtet. Mittelwerte aus fünf Einzelmessungen. Prüfung des Schichtsystems auf Desinfizier-/Autoklavierbarkeit. Einzementiert mit Variolink II®.		
Pull out strength. DT Light Post Illusion, Size 2, coated. Mean out of five measurements. Proof of the coating system concerning disinfection and autoclave. Cemented with Variolink II®.		

Tabelle 2 Desinfizier- und Autoklavierbarkeit**Table 2** Desinfection and Autoclave.

nach zweitägiger und siebentägiger Lagerung in Luft bei 20 °C, 37 °C, 50 °C, 60 °C; (siehe Tab. 4). Als Referenz dienten die in [6] berichteten Auszugswerte an Stiften DT Light Post (ebenfalls Größe 2, ohne Farbpigmente, Vertrieb und Hersteller dieser Stifte wie oben).

Abbildung 2 zeigt die Versuchsanordnung für die Auszugsfestigkeit, die sich selbst erklärt [1, 2]. Im Vorfeld dieser Untersuchung wurden Pilotexperimente mit natürlichen Zähnen vs. Simulation dieser natürlichen Zähne durch Technovitblöcke (Technovit ist ein Kunststoff auf PMMA-Basis, Heraeus-Kulzer, Wehrheim) durchgeführt. Abgesehen davon, dass es sich als sehr schwierig erwies, eine entsprechend große Anzahl von geeigneten natürlichen Zähnen zu beschaffen, war die Reproduzierbarkeit der Auszugsfestigkeiten aus natürlichen Zähnen außerordentlich mangelhaft. Da in dieser Untersuchung der Fokus auf der Grenzfläche zwischen Komposit und Stiftoberfläche und nicht auf der Grenzfläche zwischen Komposit und Innenseite des Wurzelkanals liegt, erwies sich der Auszug aus Technovitblöcken als sachgerechter. Der Wurzelkanal wird in diesen Blöcken durch eine konische Bohrung dargestellt. Die Haftung zwischen Komposit und Technovit ist so hoch, dass sich stets der wurzelstiftseitige Verbund löst.

Der untere Technovit-Zylinder (Abb. 2) hat aufgrund der Konizität der Wurzelkanalstifte mehr Retention als der obere Zylinder, so dass sich bei Zug der obere Technovitzyylinder mit dem Kom-

posit vom schlankeren Bereich des Wurzelstiftes löst. Erfasst wird durch den Befestigungskomposit das apikale Drittel des Wurzelstiftes, also etwa 6,7 mm; dieser Bereich ist in Abbildung 2 messsingfarben abgesetzt. Die Zylinder garantierten eine gute körperliche Fassung der druckempfindlichen Stifte ohne die Gefahr einer Gefügeschädigung der Stifte.

Die Proben wurden bis zum Versagen des Verbundsystems „Technovit/Befestigungskomposit/Stift“ belastet und die entsprechende Kraft als Auszugsfestigkeit in Newton (N) dokumentiert.

3 Ergebnisse

Abbildung 3 zeigt beispielhaft zwei Wurzelkanalstifte (Gr. 1) unbeschichtet (oben) vs beschichtet (unten), der obere koronale Stifteil wird bei der Beschichtung ausgespart; (dieser Bereich wird am Stuhl individuell abgelängt). Beim unteren Stift sieht man deutlich die glänzende PolyMA-Schutzschicht, die in das Befestigungskomposit einpolymerisieren und so ein schlüssiges Verbundsystem zwischen der aktivierten Oberfläche des Wurzelkanalstiftes, seiner Silikatisierung und Silanisierung und dem Wurzelkondent herstellbar kann. Die konservierende Schutzschicht hat eine Dicke von $10 \pm 5 \mu\text{m}$, ist sehr gleichmäßig reproduzierbar und stellt die Passgenauigkeit nicht infrage, weil sie im Toleranzbereich liegt, der für den Durchmesser der Stifte ermittelt wurde ($20 \pm 5 \mu\text{m}$).

Tabelle 1 zeigt den Vergleich „Einfluss der Größe und der sechsmonatigen hydrolytischen Belastung auf die Auszugsfestigkeit“ und die Reproduzierbarkeit der Messwerte. Im Mittel hatten die beschichteten Stifte eine Auszugsfestigkeit von $348 \pm 87 \text{ N}$ bzw. $326 \pm 40 \text{ N}$ (gemittelt über alle Größen; Messung und reproduzierte Messung). Der entsprechende Mittelwert für die unbeschichteten Stifte lag bei $166 \pm 31 \text{ N}$. Der Mittelwert nach 180-tägiger Auslagerung für die beschichteten Stifte lag bei $260 \pm 36 \text{ N}$.

Nach Abbildung 4 nimmt die Auszugsfestigkeit der beschichteten Stifte mit der Größe der Stifte überproportional zu.

Tabelle 2 zeigt die Auszugsfestigkeiten im Vergleich „Desinfizier- und Autoklavierbarkeit“. Mit Auszugsfestigkeiten von 299, 315 und 400 N entsprechen diese Werte der Tabelle 1.

Tabelle 3 zeigt Auszugstests für eine Auswahl von typischen Befestigungskompositen (oberer Block), nach Kontamination mit Rinderblut, ferner nach einer typischen Fehlbehandlung: die PolyMA-Schutzschicht wurde zusätzlich mit Silan behandelt (unterer Block). Der Mittelwert über alle Komposite beträgt $347 \pm 19 \text{ N}$.

Tabelle 4 zeigt Auszugstests nach trockenem Lagern unter verschiedenen Bedingungen (Temperatur, Dauer). Die Werte zeigen keinen bestimmten Trend.

4 Diskussion

Ziel dieser Untersuchung war es zu testen, ob eine herstellerseitige Vorbeschichtung, in einem ähnlichen Zusammenhang bereits untersucht [6], auch bei farbkodierten FRC-Wurzelkanalstiften zur Vereinfachung des Behandlungsablaufs anwendbar ist. Dies würde bedeuten, dass dem praktisch tätigen Zahnarzt am Stuhl die Möglichkeit gegeben wird, sich ganz auf die unabdingbare Konditionierung des Wurzelkanaladentins und danach auf das Einsetzen des Wurzelkanalstiftes zu konzentrieren. Ein weiteres Ziel dieser Untersuchung war, eine Verbesserung des adhäsiven Verbundes zum Befestigungskomposit zu erreichen. Ohne eine entsprechende Beschichtung werden Auszugsfestigkeiten für die Dislokation des adhäsiv befestigten Stiftes erreicht, die nur 41 % bis 66 % der Werte mit Beschichtung betragen und deshalb mögli-

	ohne, mit zus. Konditionierung/ verschiedene Zemente/ Kontamination, Fehlbehandlung	Mittelwert N	SD N
PVD-beschichtet befestigt mit dem angegebenen Befestigungsmaterial	Clearfil SE, Panavia F 2.0 (Kuraray)	358,8	34,9
	Excite DSC, Variolink II (Ivoclar Vivadent)	358,3	29,9
	Variolink II hochviskös (Ivoclar Vivadent)	366,3	13,4
	Multilink Automix transp. (Ivoclar Vivadent)	360,0	11,0
	Panavia F 2.0 (Kuraray)	344,5	15,3
	Calibra normalviskös (Dentsply)	296,8	36,6
	X-Flow (Dentsply)	338,7	50,0
	LuxaCore (DMG)	348,3	34,1
	X Bond, X-Flow (Dentsply)	340,7	19,9
	X Bond + SCA, X-Flow (Dentsply)	355,3	29,8
	RelyX Unicem (ESPE)	369,6	31,2
PVD-beschichtet befestigt mit Variolink II hochviskös	ParaCem (Coltene Whaledent)	337,6	34,6
	Rinderblut-Kontamination, Äthanol (70 %)	85,2	10,7
	Silan auf PolyMA-Schutzschicht	359,7	23,8
Auszugsfestigkeit; DT Light Post Illusion, Gr. 2, Mittelwerte aus jeweils fünf Einzelmessungen. Prüfung des Schichtsystems auf seine Kompatibilität mit verschiedenen Kompositen (oberer Block), der Möglichkeit, die Schicht nach Kontamination mit Äthanol zu reinigen (fünftägige Kontamination mit Rinderblut/37 °C, Reinigung mit Äthanol) und der Toleranz gegen Fehlbehandlung (zusätzlicher, nicht sachgerechter Auftrag von Silan; unterer Block)			
Pull out strength; DT Light Post Illusion, size 2, mean out of five single measurements. Proof of the coating system concerning compatibility with different composites (block above), of the possibility to purify the coat after it had been contaminated with ethanol (contamination five days with blood of beefs / 37 °C, cleaning with ethanol) and of the tolerance against medical malpractice (additional, not appropriate application of Silan, block below).			

Tabelle 3 Einfluss verschiedener Befestigungsmaterialien, Kontamination, Fehlbehandlung.**Table 3** Influence of different luting materials, contamination, medical malpractice.

cherweise unzureichend sind (Tab. 1: unten links).

Die Verbesserung der Auszugsfestigkeit wird besonders nach hydrolytischer Belastung deutlich (Vergleich im unteren Bereich der Tab. 1). Die Auszugsfestigkeiten nach 180-tägiger hydrolytischer Belastung der beschichteten Stifte waren immer höher als die Auszugsfestigkeiten der unbeschichteten Stifte ohne hydrolytische Belastung. Dies ist ein im Sinne zusätzlicher Systemsicherheit erwünschter Effekt. Klinisch wird allerdings beobachtet, dass die häufigste Versagensursache der Verlust der Adhäsion zwischen dem Befestigungskomposit und der Wurzelkanalwand ist (Monticelli et al. 2003). Es ist aber auch die gegenteilige Aussage belegt, dass das Versagen in

der Mehrzahl der Fälle zwischen dem Stift und dem Befestigungskomposit stattfindet [18]. Leider ist den Autoren keine Literaturreferenz bekannt, in der eine Mindestanforderung an die Auszugsfestigkeit diskutiert wird, also welche Retentionswerte für einen dauerhaften Verbund adhäsiv befestigter Faserstifte klinisch zu fordern sind. Solange dieser Zustand fortbesteht, ist es zweckmäßig, stets die höchste erreichbare Auszugsfestigkeit anzustreben.

Abbildung 4 zeigt, dass die Auszugsfestigkeit mit der „Größe“ des Stiftes überproportional zunimmt. Im Zweifel ist es also zweckmäßig, den größeren Stift einzusetzen, da die kleineren Stifte ein erheblich höheres Risiko aufweisen, einen Retentionsverlust zu erleiden.

Die in der vorliegenden Untersuchung vorgestellte Schicht ist im Autoklaven sterilisierbar und mit H₂O₂ desinfizierbar. Auch die Kombination beider Methoden wird von der Schutzschicht toleriert (Tab. 2). Die Sterilisation geht zwar bei einer eventuellen Einprobe verloren; eine nachträgliche Desinfektion lässt sich jedoch auch durch Abreiben mit Alkohol (z. B. 70 %iges Äthanol-Wasser-Gemisch) auf einem geeigneten Trägermaterial wie Kunststoffpellets (z. B. Pele Tim No 1, Voco, Cuxhaven) erreichen.

Tabelle 3 demonstriert, dass die PolyMA-Schutzschicht mit einer großen Zahl von gängigen Befestigungskompositen kompatibel ist. Unabhängig vom benutzten Komposit ist die Auszugsfestigkeit fast immer deutlich höher als 300 N und kann Werte bis zu 370 N (Größe 2) erreichen. Der untere Teil dieser Tabelle zeigt, dass selbst nach fünftägiger Kontamination mit Rinderblut und anschließender Reinigung mit Äthanol noch eine gewisse restliche Auszugsfestigkeit erhalten bleibt. Das Auftragen von Silan auf die PolyMA-Schutzschicht macht zwar im Hinblick auf die Logik des Verbundsystems (Stift-Silikat/Silan-PolyMA-Komposit-[konditionierter]-Wurzelzement) keinen Sinn, hat jedoch auch keinen nachteiligen Effekt (siehe ebenfalls unteren Teil der Tab. 3).

Wie beschrieben, würde ohne die beschriebene PolyMA-Schutzschicht die Wirkung der PVD-Schicht innerhalb kurzer Zeit durch Kontamination aus der Luft deaktiviert; aus dem gleichen Grunde wäre eine Einprobe des Stiftes am Stuhl nicht möglich. Die Einprobe des Stiftes wird durch das Vorhandensein der Schutzschicht erst ermöglicht, denn wegen der Beständigkeit gegen Alkohol lässt sich eine Blut- und Speichelkontamination durch Abreiben mit Äthanol teilweise beheben.

Ein wichtiges Kriterium für eine praxisgerechte Vorbeschichtung ist, dass die Lagerfähigkeit des Stiftes gegeben ist. Dies insbesondere auch unter Bedingungen, die zwar nicht der normalen Lagerung unter den üblichen Bedingungen in einer zahnärztlichen Praxis entsprechen, aber durchaus denkbar sind und auch vorkommen, z. B. durch Lagerung unter oder auf einer Wärmequelle (Tab. 4). Selbst bei einer Lagertemperatur von 60 °C beobachtet man unveränderte Auszugsfestigkeiten; deshalb

Temperatur °C	2 Tage		7 Tage	
	Mittelwert N	SD	Mittelwert N	SD N
20	307,7	66,7	328,6	96,3
37	325,2	55,3	285,7	32,8
50	289,2	53,4	318,6	32,4
60	325,3	56,1	326,4	65,2

Auszugsfestigkeit; DT Light Post Illusion Gr. 2, Mittelwerte aus fünf Einzelmessungen. Lagerung in temperierter Umgebungsluft

Pull out strength; DT Light Post Illusion, Size 2, mean out of five single measurements. Storing in tempered ambient air.

Tabelle 4 Einfluss verschiedener Lagerbedingungen auf die Auszugsfestigkeit von DT Light Post Illusion®.

Table 4 Influence of different storage conditions on the pull out strength of DT Light Post Illusion®

(Abb. 1–4 und Tab. 1–4: D. Edelhoff, R. Marx)

wurde keine längere Lagerdauer als eine Woche realisiert.

Als Maß für die Retention der Wurzelstifte wurde die axiale Auszugsfestigkeit definiert. Dies ist in Übereinstimmung mit den Versuchsanordnungen vieler anderer Autoren [11, 20, 21, 28] und beansprucht die Verbundgrenzfläche zwischen Komposit und Wurzelkanalstift auf Zug- und Scherkräfte, wobei wegen der Konizität der Stifte Zugkräfte im Vordergrund stehen. Adhäsion lässt sich am ehesten im Zugversuch überprüfen, wobei die Aussage für die Adhäsion umso spezifischer ist, je mehr sich der Winkel zwischen der die Adhäsion vermittelnden Fläche und der Zugrichtung einem rechten (90 °) Winkel nähert [16, 28]. Der axiale Zugversuch wird zur Überprüfung der Retention in der Literatur als relevant angesehen ([11]; dort auch eine Vielzahl weiterer Literaturbelege), wobei die gemessene Auszugsfestigkeit umso kleiner sein wird, je größer der Konizitätswinkel ist. Größere Winkel bedingen beim Ausziehen weniger Friktion an den Wänden [20].

Alternativ werden zu dem hier favorisierten Auszugstest, der naturgemäß, weil er axial über alle Regionen des Wurzelkanals mittelt, ein sehr pauschaler Test ist, „Micro“- (Tensile- und Push-Out)-Tests (Zug- und Druck-Tests) vorgeschlagen [9, 26]. Diese Tests sollten einerseits sehr gut geeignet sein, bestimmte Details der Retention besonders in

den verschiedenen Regionen des Wurzelkanals aufzuklären, erfordern jedoch andererseits einen viel höheren labor-technischen Aufwand.

Bisher wurden SiOx-Schichten im zahnmedizinischen Bereich vorzugsweise auf Metallen zur randdichten Verblendung, aber auch auf Keramiken zur Verbesserung des Verbundes zu einem Befestigungskomposit eingesetzt. Die hier vorgeschlagene Anwendung bei Wurzelkanalstiften stellt eine Erweiterung des Spektrums der Anwendungsmöglichkeiten im zahnmedizinischen Bereich dar. Dass SiOx auch auf dem Kunststoffanteil des Wurzelkanalstiftes (Epoxidharzpolymer) sehr gut haftet, überrascht nicht, denn hauchdünne SiOx-Schichten werden seit Jahren in der Verpackungsindustrie für die gasdichte, trotzdem transparente und hochflexible Beschichtung von Polyester (PE)- und Polyethylenterephthalat (PET)-Folien eingesetzt (http://pffc-online.com/mag/paper_oxidecoated_films_finding/), also ebenfalls auf Kunststoffen.

Mit einer Schichtdicke von 120 ± 20 nm ist die SiOx-Schicht so dünn und deshalb so flexibel, dass nicht zu befürchten ist, die funktionsbedingte Beanspruchung und die damit einhergehende Verformung des Stiftes könnte zu Rissen in der SiOx-Schicht führen. Diese Risse würden die Funktion der SiOx-Schicht als hydrophobe Barriere in Frage stellen [8].

Für die vorliegenden Untersuchungen wurde methodenbedingt nicht nur die Epoxidharzmatrix des Stiftes beschichtet, sondern zwangsläufig auch der nicht weggeätzte Quarzglasfaseranteil. Auf welchem Anteil die SiOx-Schicht besser haftet, bleibt hier offen. In Abbildung 1 gewinnt man den Eindruck, dass nach der HF-Behandlung die oberflächlich liegenden Faserstifte herausgelöst sind und vorwiegend die Epoxidharzmatrix exponiert ist. Deshalb kann aus den vorliegenden Ergebnissen, bei denen die Schutzschicht mit der darunter liegenden Silikatschicht als haftvermittelnde Schicht auftritt, geschlossen werden, dass SiOx zumindest auf der Epoxidharzmatrix exzellent haftet.

Das dichte Schichtsystem, besonders die abschließende konservierende Lackschicht, hat einerseits eine positive Bedeutung für die Integrität der darunter liegenden Schichten, gleichzeitig jedoch auch eine negative Bedeutung für darunter befindliche ggf. verborgene, geradezu konservierte dem Patienten potentiell Schaden zufügende Keime, Bakterien, Sporen etc. Diese würden im Falle des Debondings der konservierenden Schicht (was im Normalfall nicht eintritt, aber natürlich nicht auszuschließen ist und in der Praxis tatsächlich sporadisch vorkommt) freigesetzt, in der feucht-warmen Umgebung des Wurzelkanals (auch wenn dieser devital ist) vermehrt. Dies könnte zu apikalen Entzündungen führen. Deshalb ist es wichtig, nur desinfizierte Stifte zu beschichten, was sich leicht erreichen lässt, da das Auftragen der SiOx-Schicht ohnehin eine intensive Reinigung der Oberfläche voraussetzt.

Das Schichtsystem könnte die Praxistauglichkeit der Stifte erheblich fördern, da es die Anzahl der am Stuhl erforderlichen Einzelschritte reduziert. Die Vorbeschichtung schließt eine ungleichmäßig aufgetragene Konditionierungsschicht, die die Passgenauigkeit infrage stellen kann, aus. Dies bedeutet eine größere Sicherheit in der klinischen Anwendung. Eine endgültige Beurteilung der Praxistauglichkeit und der verbesserten Sicherheit in der Anwendung ist jedoch erst nach dem Vorliegen von weiteren In-vivo-Ergebnissen möglich. Eine prospektiv angelegte klinische Studie hat allerdings

schon stattgefunden, die die Praxis-tauglichkeit des Schichtsystems bestätigte.

Wie bei zahlreichen anderen zahnmedizinischen und allgemeinmedizinischen [7, 17] Restaurationen (z. B. die kunststoffverblendete Krone bzw. Brücke, die Adhäsivbrücke) gelingt mit der Silikatisierung/Silanisierung der Oberfläche auch hier die Stabilisierung der Auszugsfestigkeit in feuchter Umgebung bei gleichzeitiger Vereinfachung des Behandlungsablaufes [6]. Die Farbkodierung beeinträchtigt die Auszugsfestigkeit nicht.

Interessenkonflikte: Die diesem Beitrag zugrunde liegenden Untersuchungen wurden mit Unterstützung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft, Bonn, und des Universitätsklinikums Aachen durch leihweise Zurverfügungstellung der PVD-Anlage für die Silikatbeschichtung der Wurzelstifte ermöglicht. Die Auszugstests wurden im Universitätsklinikum der RWTH Aachen mit finanzieller Unterstützung durch VDW GmbH, München, durchgeführt. Die benötigten Materialien (Komposits, unbeschichtete Stifte) wurden ebenfalls

durch VDW GmbH, München, zur Verfügung gestellt. 

Korrespondenzadresse

Prof. Dr. Daniel Edelhoff
Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik
Goethestr. 70
80336 München
Tel.: 0 89 / 51 60 – 95 11
E-Mail:
daniel.edelhoff@med.uni-muenchen.de

Literatur

- Babenhauserheide K, Freesmeyer WB: Zugversuche an faserverstärkten Wurzelstiften. Zahnärztl Mitt 98, 2352–2355 (2008)
- Babenhauserheide K: Zugversuche an faserverstärkten Wurzelstiften. Zahnärztl Mitt 98, 147–150 (2008)
- Dennhardt H: Der endodontische Monoblock – die adhäsive Wurzelfüllung. Zahnärztl Mitt 98, 531–533 (2008)
- de Rijk WG: Removal of fiber posts from endodontically treated teeth. Am J Dent 13, 19B–21B (2000)
- Edelhoff D, Marx R: Adhäsiv befestigte faserverstärkte Kompositstifte. In Baumann M, Beer R (Hrsg): Farbatlas der Zahnmedizin: Endodontologie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart 2008, 264–271
- Edelhoff D, Weber M, Spiekermann H, Marx R: PVD-Beschichtung für verbesserte Retention glasfaserverstärkter Wurzelkanalstifte. Schweiz Monatsschr Zahnmed 116, 992–999 (2006)
- Erli HJ, Marx R, Paar O, Niethard FU, Weber M, Wirtz DC: Surface pretreatments for medical application of adhesion. BioMedical Engineering OnLine 2, 15–32 (2003)
- Ferrari M, Monticelli F, Cury AH, Pappacchini F, Chieffi N, Goracci C: Efficacy of a combined silica/methacrylate coupling on the fiber post bonding to composite cores. Int Dent SA 8, 58–63 (2006)
- Goracci C, Tavares AU, Fabianelli A, Monticelli F, Raffaelli O, Cardoso PC, Tay F, Ferrari M: The adhesion between fiber posts and root canal walls: comparison between microtensile and push-out bond strength measurements. Eur J Oral Sci 112, 353–361 (2004)
- Habenicht G: Kleben – Grundlagen, Technologie, Anwendungen. Springer Verlag, Berlin 1990
- Kampe MT: Retention glasfaserverstärkter Wurzelkanalstifte in Abhängigkeit vom Befestigungskomposit. Med Diss, Freiburg (2005)
- Letzner G: Erfolgreicher Einsatz moderner Stiftsysteme im Praxisalltag. Zahnärztl Mitt 98, 480–488 (2008)
- Mannoci F, Sherriff M, Watson TF, Vallittu PK: Penetration of bonding resins into fibre-reinforced composite posts: a confocal microscopic study. Int Endod J 38, 46–51 (2005)
- Marx R: Vollkeramische Kronen- und Brückenmaterialien – Restaurationsmaterialien. Eigenverlag (ISBN 3–00–002643–6), Eichenbach 2003
- Marx R, Fischer H: DE-Patent 199 378 64, EU-Patent 1 202 702, US-Patent 10/049,435 (2002)
- Marx R, Haass C: Zug- oder Schertest. Welcher Test ist für den Verbund Metall-Kunststoff aussagekräftiger? Dtsch Zahnärztl Z 47, 165–168 (1992)
- Marx R, Wirtz DC, Mumme T, Niethard FU, Jungwirth F, Paar O, Erli HJ, Weber M: Adhäsive Verbundtechniken aus dem zahnmedizinischen Umfeld etablieren sich in der Medizintechnik. Dtsch Zahnärztl Z 59, 61–68 (2004)
- Mazzitelli C, Ferrari M, Toledano M, Osorio E, Monticelli F, Osorio R: Surface roughness analysis of fiber post conditioning processes. J Dent Res 87, 186–190 (2008)
- Monticelli F, Grandini S, Goracci C, Ferrari M: Clinical behavior of translucent-fiber posts: A 2-year prospective study. Int J Prosthodont 16, 593–596 (2003)
- Nergiz I, Schmage P, Özcan M, Platzer U: Effect of length and diameter of tapered posts on the retention. J Oral Rehabil 29, 28–34 (2002a)
- Nergiz I, Schmage P, Platzer U, Özcan M: Bond strengths of five tapered root posts regarding the post surface. J Oral Rehabil 29, 330–335 (2002b)
- 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 17, 524–528 (2004)
- Reid LC, Kazemi RB, Meiers JC: Effect of fatigue testing on core integrity and post microleakage of teeth restored with different post systems. J Endodontics 29, 125–131 (2003)
- Schmage P: Untersuchungsergebnisse zu einem Stiftaufbausystem. Zahnärztl Mitt 98, 796–797 (2008)
- Tay FR, Pashley DH: Monoblocks in root canals – a hypothetical or a tangible goal? J Endod 33, 391–398 (2007)
- Vano M, Goracci C, Monticelli F, Tognini F, Gabriele M, Tay FR, Ferrari M: 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 39, 31–39 (2006)
- Vorderwülbecke H: Die Retention zahnfarbener Wurzelkanalstifte des Erlanger Systems in Abhängigkeit von dualhärtenden Zementen und Vorbehandlungstechniken: Eine In-vitro-Studie. Med Diss, Halle-Wittenberg 2008
- Wirbas K-Th, Kampe MT, Schirrmeister JF, Altenburger MJ, Hellwig E: Retention glasfaserverstärkter Wurzelkanalstifte in Abhängigkeit vom Befestigungskomposit. Schweiz Monatsschr Zahnmed 116, 18–24 (2006)
- Zwicker U: Titan und Titanlegierungen. Springer Verlag, Berlin 1974