

Maschinelle Aufbereitung gekrümmter Wurzelkanäle: Messaufbau zur Darstellung physikalischer Parameter

Zusammenfassung

Zur Wurzelkanalpräparation werden immer mehr Instrumente für die rotierende Arbeitsweise angeboten. Mit diesen Instrumenten lässt sich eine verbesserte Aufbereitung erreichen, gleichzeitig nimmt aber das Risiko einer Instrumentenfraktur gegenüber Handinstrumenten zu.

Physikalische Parameter bei der rotierenden Kanalaufbereitung am gekrümmten Wurzelkanal sind nur ungenügend untersucht. Daher war es das Ziel des hier dargestellten Projektes, einen Versuchsaufbau für solche Messungen zu entwickeln.

Dies wurde durch die Konstruktion eines Messaufbaus verwirklicht, bei dem ein Drehmomentaufnehmer zwischen dem Kanalinstrument und der Motorwelle integriert ist. Durch weitere Sensoren kann die apikale Kraft sowie die Eindringtiefe des Instrumentes relativ zur Zeit bestimmt werden. Durch spezielle Anbauteile liessen sich auch weitere Messmöglichkeiten verwirklichen.

In der hier dargestellten ersten Versuchsreihe wurden GT-Instrumente der Grössen 35.12 sowie 20.12 bis 20.06 untersucht.

Neben den Parametern «Frakturmoment nach ISO 3630-1» und «Zyklen bis zum Ermüdungsbruch am Phantom» wurde auch die Präparation von gekrümmten simulierten Wurzelkanälen in Plastikblöcken untersucht.

Es zeigte sich, dass die Momente bei der Präparation mit bis zu 40 Nmm weit über den statischen Bruchlasten lagen, die weniger als 13 Nmm (für 20.12) betragen. Dagegen lag die Zahl der Rotationen bei einer Kanalaufbereitung weit unter den am Phantom mit einem Krümmungsradius von 5 mm ermittelten. Insofern erscheint eine Anwendung eines GT-Instrumentensatzes in 10 Kanälen möglich. Die apikalen Kräfte lagen immer über 1 N, in Ausnahmefällen wurden sogar 8 N und mehr erreicht.

OVE A. PETERS, STEFAN KAPPELER, WILLI BUCHER und FRED BARBAKOW

Klinik für Präventivzahnmedizin, Parodontologie und Kariologie der Universität Zürich

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass weitere Untersuchungen an natürlichen Zähnen mit unterschiedlicher Kanalgeometrie nötig sind, um die Inzidenz von Instrumentenfrakturen zu verringern, so dass das volle klinische Potenzial von rotierenden Instrumenten zur Kanalaufbereitung ausgeschöpft werden kann.

Schweiz Monatsschr Zahnmed 111: 834–842 (2001)

Schlüsselwörter: Wurzelkanalpräparation, Nickel-Titan, Drehmoment, Kraft, Kanalkrümmung, GT-Instrumente

Zur Veröffentlichung angenommen: 20. März 2001

Einleitung

Ein wesentlicher Schritt bei jeder Wurzelbehandlung ist die chemomechanische Präparation des Kanals (SCHILDER 1974, SCHÄFER 2000). Nach herkömmlicher Art und Weise werden dabei Handinstrumente verwendet, über deren mechanische Eigenschaften in einer Reihe von Untersuchungen berichtet wird (u. a. CAMPS & PERTOT 1994a, 1994b). In der vergangenen Dekade konnte ein Trend hin zur Aufbereitung des gesamten Kanals mit maschinell betriebenen rotierenden Aufbereitungstechniken beobachtet werden. Diese Art der Aufbereitung wurde erst durch die Einführung von hochflexiblen und widerstandsfähigen Nickel-Titan-Legierungen möglich (SERENE et al. 1995). Die mechanischen Eigenschaften dieser Legierung wurden bei ersten Versuchen mit Handinstrumenten hinsichtlich Biegemomenten und Verformungen untersucht (CAMPS & PERTOT 1994a, SERENE et al. 1995).

Bei maschinell angetriebenen Aufbereitungstechniken, wie z. B. Lightspeed (Lightspeed Inc, San Antonio, TX, USA), ProFile

Korrespondenzadresse:

OA Dr. Ove Peters, Station für Endodontologie
Klinik für Präventivzahnmedizin, Parodontologie und
Kariologie der Universität Zürich
Plattenstr. 11, 8028 Zürich
Tel. + 41 1 634 39 34, Fax +41 1 634 43 08
E-Mail: peters@zzmk.unizh.ch

.04 & .06 (Dentsply-Maillefer, Ballaigues, Schweiz), GT-Files (Dentsply-Maillefer) oder Quantec 2000 (NT Company, Chattanooga, TN, USA), stellten die experimentellen Untersuchungen in der Vergangenheit hauptsächlich den Einfluss der Präparationstechnik auf den Verlauf des Wurzelkanals dar. Es konnte mehrfach gezeigt werden, dass die Aufbereitung mit den genannten Techniken der konventionellen Aufbereitung mit Handinstrumenten hinsichtlich der Vermeidung von Aufbereitungsfehlern überlegen ist (GLOSSON et al. 1995, PORTENIER et al. 1998); sie ermöglicht es, Aufbereitungsfehler wie apikale Trichterbildung, sanduhrförmige Aufbereitung und allgemeine Verlagerung des Kanalverlaufs weitgehend zu vermeiden.

Als gravierendes Problem der rotierenden Aufbereitung ist indessen die Bruchanfälligkeit der Instrumente zu nennen. Das Auftreten von Frakturen wurde in einer retrospektiven Analyse von Kursteilnehmern diskutiert, in welcher 76% der Anwender über mindestens ein frakturiertes Lightspeed-Instrument berichtet hatten (BARBAKOW & LUTZ 1997). Die Ursachen dieser Frakturen waren selten offensichtlich: Sicher muss man aber die so genannte zyklische Ermüdung der Metalllegierung durch Rotation im gekrümmten Wurzelkanal (PRUETT et al. 1997) als einen wesentlichen Faktor ansehen. Andere Faktoren, wie fehlerhafte Anwendung der Technik und anatomische Besonderheiten, können ebenfalls zu Instrumentenfrakturen führen.

Die mechanischen und metallurgischen Eigenschaften von Nickel-Titan waren daher im Zusammenhang mit der Vermeidung von Instrumentenfrakturen von zunehmendem Interesse. Kürzlich konnte durch Vergleich von Lightspeed-Instrumenten vor und nach Benutzung in einer bestimmten Anzahl von Wurzelkanälen (EGGERT et al. 1999) gezeigt werden, dass die Aufbereitung zu keiner signifikanten Zunahme von äusserlich erkennbaren Instrumentenfehlern, wie Mikrorissen, ausgefranschten oder stumpfen Schneidekanten, führt. Ebenfalls ist durch mehrfache Sterilisation keine Verschlechterung der Materialeigenschaften von Nickel-Titan zu befürchten (SILVAGGIO & HICKS 1997).

Die Messung von Drehmomenten gewann nach der Markteinführung von drehmomentkontrollierten Antrieben durch verschiedene Hersteller (*TriAuto ZX*, Morita, Dietzenbach, Schweiz; *Endostepper*, S.E.T., Germering/München, Deutschland; *ART-Tecnika*, Dentsply-Maillefer) an Bedeutung. Nach ersten Berichten scheinen mit diesen Antrieben klinisch gute Resultate erzielbar zu sein (GAMBARINI 2000), auch wenn die zu Grunde liegenden Einstellungen durch statische Bruchlastmessungen nach ISO 3630-1 (INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDISATION 1992) ermittelt wurden. Diese Norm gilt für ISO-normierte Handinstrumente und lässt sich nicht ohne weiteres auf rotierende Anwendung übertragen. Für die Aufbereitung mit GT-Instrumenten liegen keinerlei physikalische Werte vor.

Das Ziel der hier dargestellten Pilotstudie war daher, die bei der Aufbereitung mit GT-Instrumenten vorliegenden physikalischen Parameter zu charakterisieren. Im Einzelnen wurden Drehmoment und vertikale Last dynamisch und unabhängig von der Kanalachse gemessen. Ausserdem wurden Bruchdrehmomente und zyklische Ermüdungsschwellen bestimmt. Zu diesem Zweck wurde eine Testplattform entwickelt, die nachstehend beschrieben wird.

Material und Methoden

Leistungsfähigkeit der Plattform

Zusätzlich zu Messungen nach Norm ISO 3630-1 (INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDISATION 1992) ermöglicht die

Testplattform auch die dynamische Messung von physikalischen Parametern während der Aufbereitung eines Wurzelkanals. Insbesondere erlaubt sie die Messung unabhängig von der Lage der Kanalachse, eine Voraussetzung, die in der herkömmlichen Bauweise der Messanordnungen nicht gegeben ist (Abb. 1). Im Detail werden in Abhängigkeit von der Zeit folgende Kenngrössen gemessen: das Drehmoment am Schaft des Wurzelkanalinstrumentes, die apikal gerichtete Kraft, die Eindringtiefe des Instrumentes sowie die Anzahl an Rotationen des Instrumentes.

Die Plattform ermöglicht folgende verschiedene Betriebsarten: statische Bruchlastbestimmung (nach ISO 3630-1), Prüfung der zyklischen Ermüdung, dynamisch oder statisch, simulierte Kanalaufbereitung mit Handführung und vollautomatische, standardisierte Aufbereitung mit maschinellem Vorschub.

Die aus der Plattform exportierten Daten der unterschiedlichen Prüfungsmodi sind grafisch und numerisch aufbereitbar.

Mechanischer Aufbau

Im Gegensatz zur bisher gängigen Messung der resultierenden Momente am Probekörper (Abb. 1) wird in der vorliegenden Anordnung die Messung des Drehmomentes direkt am Instrumentenschaft durchgeführt (Abb. 2). Der Drehmomentaufnehmer (MT TRA-10, Microtec Systems, Villingen, Deutschland) ist auf einem beweglichen Schlitten montiert, auf welchem sich ebenfalls ein drehzahlkontrollierter Schrittmotor mit hohem Drehmoment (> 400 Nmm, Typ ZSS, Phytron, Gröbenzell, Deutschland) für den Antrieb des Wurzelkanalinstrumentes befindet. Am Schlitten ist auch ein Linearpotentiometer (Lp-100, Midori, Osaka, Japan) zur Wegmessung angeflanscht.

Der Schlitten kann von Hand gegen einen in einem speziellen Halter befestigten Probekörper bewegt werden. Dieser Halter ist an einem Kraftaufnehmer (A&D 30, Orientec, Tokio, Japan) montiert, welcher in horizontaler Richtung empfindlich ist. Die Bewegung des Schlittens kann auch automatisch durch einen programmierbaren Linearmotor (> 33 N, P01-23×80, LinMot, Zürich, Schweiz) erfolgen. Statt einer Probe (Zahn oder Plastikblock) lässt sich am Maschinenbett auch ein Aufnehmer mit einer Spannzange aus Messing zur Messung der statischen Bruchlast nach ISO 3630-1 befestigen (Abb. 3a). Auch ist eine

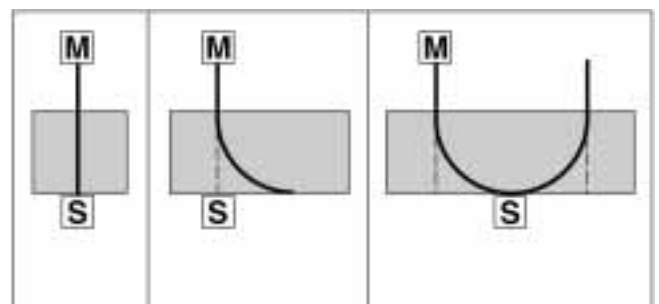


Abb. 1 Abhängigkeit der Messung des Drehmoments von der Wurzelkanalachse.

Dargestellt sind beispielhaft drei möglichen Geometrien. Bei einem geraden Kanal ist die Messung unabhängig von der Lage des Sensors S zur Kanalachse in der Umgebung (grauer Block). Bei einem Kanal mit 90° Krümmung (Mitte) kann maximal das Nenndrehmoment d des Motors M gemessen werden, für alle anderen Positionen wird das Drehmoment zu gering dargestellt. Bei 180° Krümmung (rechts) wird das Drehmoment in der mittleren Sensorposition 0.

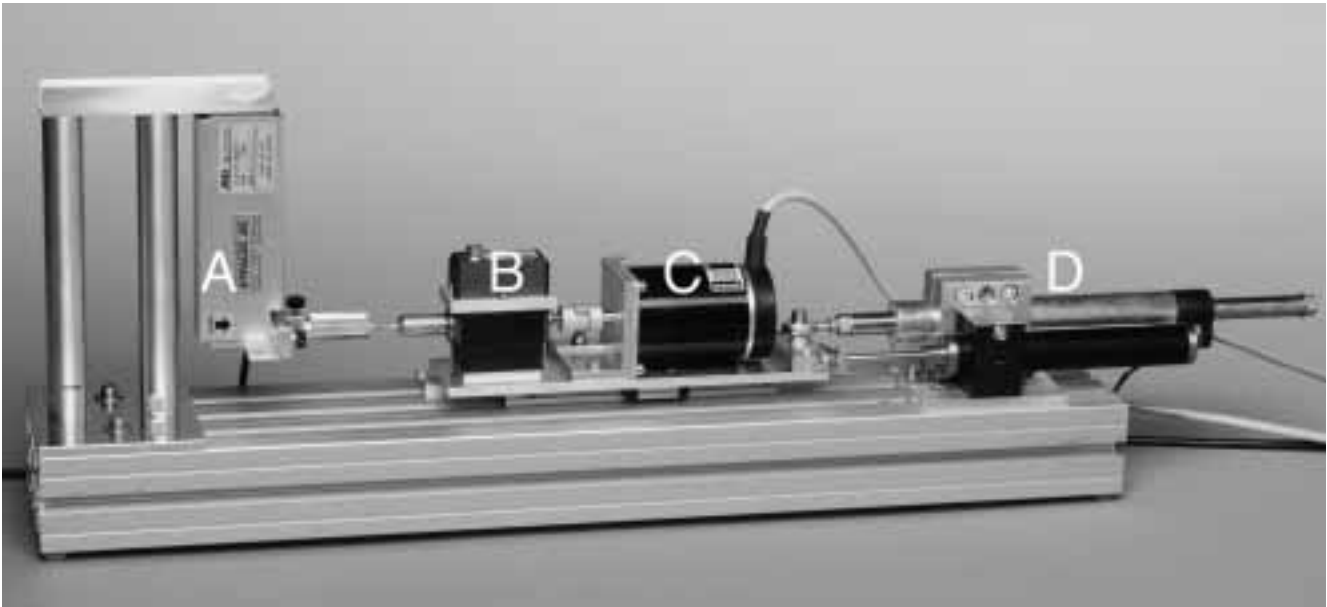


Abb. 2 Messaufbau zur Erfassung von physikalischen Parametern bei rotierender Aufbereitung mit Kraftsensor (A), Drehmomentsensor (B), Antrieb (C) und Vorschub (D).

Aufnahme zur Bestimmung des Widerstandes bei zyklischer Ermüdung vorgesehen, die freie Rotation eines gekrümmten Instrumentes (Radien 5 und 10 mm) ermöglicht (Abb. 3b).

Mess- und Steuerprogramm Endotest

Die vorliegende Version des Programmes mit einer grafischen Benutzeroberfläche (Abb. 4) wurde in Pascal entwickelt und für einen Macintosh Power PC (Apple, Cupertino, CA, USA) kompiliert. Die Datenaufnahme von 3 Analogkanälen (Drehmoment, Kraft, Weg) erfolgt durch ein 12-bit Interface (PCI-MIO-16XE, National Instruments, Austin, TX, USA). Durch die Programmarchitektur ist die Messzeit nur von der Grösse des installierten Festspeichers (RAM) abhängig: beispielsweise belegt ein Satz von 10 Messungen in allen drei Kanälen mit einer zeitlichen Auflösung von 100 Messungen pro Sekunde über eine Messdauer von 1 Minute einen Speicherplatz von 1,44 mB. Die Darstellung der Messgrössen erfolgt in Nmm bzw Ncm, in g bzw. N und in mm.

Die Messparameter können vor jeder Messung (bis zu 20 Messungen pro Datei) festgelegt werden. Im Einzelnen sind dies: Auswahl der Messkanäle (1–3), Messdauer und zeitliche Auflösung (von 1 s^{-1} bis $10'000 \text{ s}^{-1}$), Hand- oder automatischer Vorschub, Kalibrierung, Verstärkungsfaktoren und Messwertebereich sowie Auswahl des Drehmomentsensors (20 Nmm und 10 Ncm).

Ausserdem können die Parameter zur Steuerung des Antriebes festgelegt werden. Das Programm *Endotest* übermittelt dabei die Commandos zur Steuerung des Instrumentenantriebes (Drehzahl wählbar zwischen 1 bis 2000 U/min) der Endstufe (IXE Alpha, Phyttron). Zur Steuerung des Vorschubes stehen 10 frei programmierbare Modi in einem Pulldown-Menü zur Verfügung, die bezüglich weiterer Grössen wie maximaler Beschleunigung und Geschwindigkeit ebenfalls frei programmiert werden können.

Durchführung der Messungen

Für die Durchführung der nachfolgend beschriebenen Messungen wurden die Aufnehmer für Drehmoment und Kraft mit

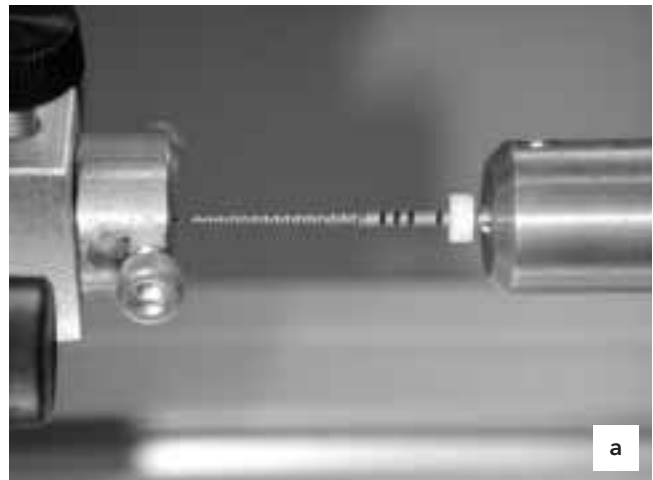


Abb. 3 Anbauten für die Messung von statischen Bruchmomenten nach ISO 3630-1 (a) sowie für die Untersuchung der Ermüdungsfestigkeit (b).

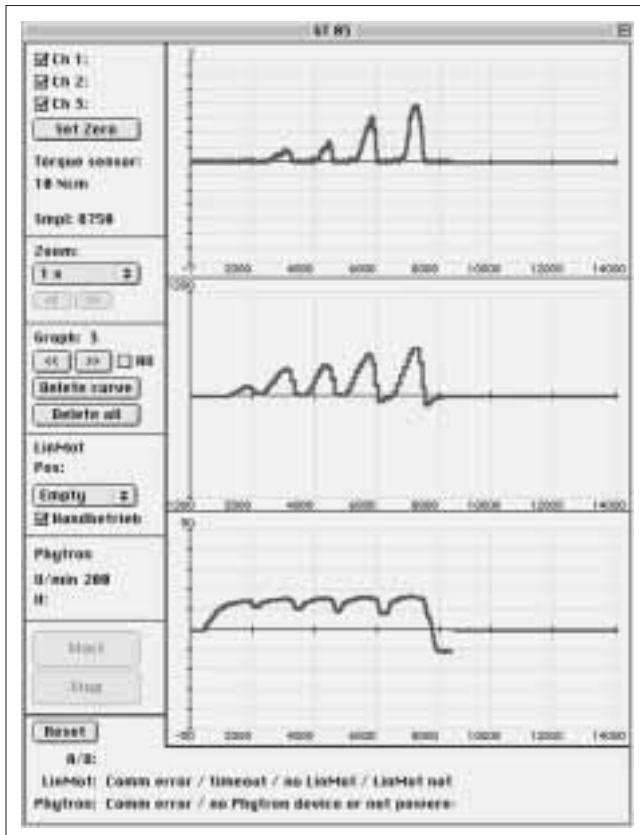


Abb. 4 Grafische Benutzeroberfläche des Messprogrammes Endotest mit den drei Kanälen (von oben nach unten) Drehmoment, Kraft und Eindringtiefe.

Eichgewichten von 1–10 g (Drehmoment) bzw. 400 und 200 g (Kraft) und Waagebalken kalibriert. Dabei ergab sich eine lineare Abhängigkeit von elektrischer Spannung und Last (Abb. 5), und entsprechende Verstärkungsfaktoren für diese Kanäle wurden festgelegt.

Bezüglich Drehmoment betrug die Messgenauigkeit 1% für den 20-Nmm-Aufnehmer sowie 0,5% für den 10-Ncm-Aufnehmer. Die Genauigkeiten für Kraft und Weg waren 0,5 g und 0,2 mm. Die Kalibrierungen wurden in regelmässigen Abständen vor den Messungen wiederholt.

Eine Bestimmung des Zusammenhanges von Bruchlasten und Verdrehwinkel erfolgte beispielhaft für GT-Instrumente (Dentsply-Maillefer). Es handelt sich bei dem in dieser Studie verwendeten Satz um nicht standardisierte Instrumente mit einem Spitzendurchmesser Grösse 20 mit den Konizitäten .12, .10, .08 und .06 mm/mm sowie um eine Accessory File der Grösse 35.12 zur Erzielung einer konischen Kanalpräparation (BUCHANAN 2000). Eine Übersicht über den GT-Instrumentensatz gibt SUTER (1999). Für die 4 Crown-down-Instrumente wurde das Bruchmoment statisch bestimmt ($n = 8$, Lot Nr. 1669870, 1669880, 1681160, 1678030). Dazu wurde die Spannzange in die Messaufnahme eingebracht (Abb. 3a); die Instrumente wurden bis zu einer Tiefe von 3 mm eingeschoben und durch die Stellschrauben gefasst. Die Rotationsgeschwindigkeit des Antriebes wurde auf 2 U/min^{-1} eingestellt, die zeitliche Auflösung auf 24 Messungen s^{-1} . So konnte der Dehnungswinkel mit einer Auflösung von $0,5^\circ$ erfasst werden.

Zur Messung des Widerstandes gegen zyklische Ermüdung ($n = 8$, gleiche Lot-Nr. wie oben) wurden die Instrumente in die spezi-

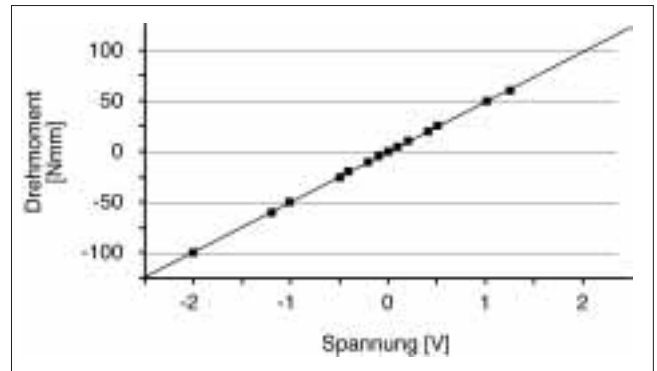


Abb. 5 Beispiel für die Kalibration eines Drehmomentaufnehmers.

Der Zusammenhang zwischen Drehmoment D und Spannung U ist linear und folgt in den gezeigten Beispiel folgender Gleichung: $D = -0,026 + 4,926 \times U$.

elle Halterung aus gehärtetem Stahl mit einer v-förmigen Einfräsung (Abb. 3b) so weit eingeführt, dass die Spitze gerade sichtbar war. Dann wurde der Hartmetallzylinder (Durchmesser 5 mm) durch die justierbare Kulissee dem Formblock angepresst, so dass das zu testende Instrument in einem Bogen von 90° geführt wurde. Das Drehmoment wurde gemessen und die Anzahl an Rotationen bis zum Bruch bestimmt. Dazu wurde die Zeit bis zur Fraktur des Instruments auf 0,1 s genau gestoppt und daraus die Anzahl Umdrehungen (bei 250 U/min^{-1}) berechnet.

Zur Simulation der klinischen Verhältnisse wurden 12 Plastikblöcke mit gekrümmten Kanälen (A0177-1, Dentsply-Maillefer) mit einer Sequenz von GT-Instrumenten aufbereitet. Die Arbeitslänge betrug 18,5 mm; die Kanalkrümmung der Plastikblöcke war etwa 60° bei einem Radius von ca. 6,5 mm. Kontinuierlich gemessen wurden Drehmoment, apikal gerichtete Kraft und Eindringtiefe. Übernommen wurde ausserdem die Anzahl der Rotationen unter der Bedingung, dass ein Drehmoment von mindestens 0,8 Nmm anlag. So wurde vermieden, dass auch dann Rotationen gezählt wurden, wenn sich das Instrument nicht im Kanal befand.

Die Aufbereitungssequenz mit GT-Files entsprach der in der Literatur beschriebenen Vorgehensweise für eine konische Wurzelkanalpräparation (BUCHANAN 2000). Im Einzelnen wurde nach einer initialen Aufbereitung mit einem GT-Accessory der Grösse 35.12 mit einer Sequenz von GT-Instrumenten, beginnend mit der Grösse 20.12, im Crown-down-Verfahren mit absteigender Konizität bis zur Grösse 20.06 vorgegangen. Dann wurde eine weitere Aufbereitung in einer zweiten Phase («wave») der Formgebung durchgeführt, indem nochmals mit der Nr. 20.10 und dann abschliessend mit der Nr. 20.08 bis zum Endpunkt der Aufbereitung in den Kanal eingegangen wurde. Eine Spülung der Kanäle erfolgte mit Leitungswasser (Kanüledurchmesser 0,42 mm) nach jedem Instrument. Der Vorschub wurde in diesem Versuch von Hand durchgeführt.

Auswertung und Darstellung der Messwerte

Die physikalischen Parameter Drehmoment, Kraft sowie Weg wurden vom Messprogramm in ein Exportfile geschrieben, in welchem auch die Motordrehzahl von den Voreinstellungen übernommen wurde. Diese Files wurden in ein programmiertes Arbeitsblatt (HIQ 2.2.1 für Macintosh, National Instruments) eingelesen und halbautomatisch ausgewertet.

Normalverteilte Werte (Mittelwert ± S.D.) für Bruchdrehmomente sowie Anzahl Rotationen wurden mit Hilfe eines kommerziellen Statistikpaketes verglichen (StatView 4.02, Abacus Concepts, Berkeley, CA, USA). Als Nullhypothese wurde definiert, dass sich die getesteten Instrumente bezüglich Bruchlast, Drehwinkel sowie Widerstand gegen zyklische Ermüdung gleich verhielten.

Bei der Aufbereitung der künstlichen Wurzelkanäle wurden aus den Originalregistrierungen (Abb. 6) Maximalwerte für Drehmoment, Kraft und Weg entnommen. Die Anzahl der Rotationen N pro Einsatz des jeweiligen Instrumentes wurde unter der Bedingung bestimmt, dass ein Drehmoment von mindestens 0,8 Nmm vorliegen musste. Die weitere Auswertung umfasste die Zuordnung der Messwerte zu den Einflussgrößen «Instrument» sowie den Aufbereitungsschritten «Crown down» und «zweite Phase». Die Beziehung der Variablen zueinander wurden, da die Verteilung der Messwerte dies zuließ, mit der Varianzanalyse und dem Scheffé- sowie dem T-Test untersucht; das Signifikanzniveau wurde mit 95% festgelegt.

Resultate

Eine Kalibration mit Gewichten und Waagebalken (Abb. 5) stellte sicher, dass die Messung von Drehmoment und Verdrehwinkel entsprechend ISO 3630-1 korrekt durchgeführt werden konnte. Die Abhängigkeit von Moment und Spannung war linear und über die Versuchsdauer konstant.

Bei der Bestimmung der Bruchlast von GT-Instrumenten zeigte sich, dass die von der ISO-Norm für Handinstrumente der entsprechenden Spitzendurchmesser geforderten Werte übertroffen wurden. In den Bruchversuchen zeigte sich ein charakteristischer Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Diagramme mit einer zweiphasigen elastischen Verformung und einer plastischen Phase bis zum Bruch. Tabelle I gibt die Werte für Bruchmomente und Verdrehwinkel wieder. Es zeigt sich, dass die Werte für das Frakturmoment mit der Instrumentenkonizität zunehmen, die Verdrehwinkel nehmen dagegen ab.

Bei der freien Rotation (Drehmoment unter 1,5 Nmm für 20.12 und unter 1 Nmm für die anderen Instrumente) im Phantom mit 5 mm Radius stellten sich grosse Unterschiede in der Anzahl Rotationen bis zum Instrumentenbruch dar: Die Instrumente mit geringer Konizität waren signifikant widerstandsfähiger als die grösseren GT-Rotaries (Tab. II). Die Instrumente der Grösse 20.12 frakturierten im Mittel bereits nach 56 Rotationen, dies entspricht einer mittleren Laufzeit von 13,4 s. Bezüglich der Länge der frakturierten Teile war bei allen Instrumenten eine grosse Streuung festzustellen.

Dagegen zeigte sich bei der Aufbereitung der Plastikblöcke, dass im Mittel pro Instrument nicht mehr als 13 Rotationen unter Last für eine Aufbereitung benötigt wurden (Tab. III). Ledig-

Tab. I Drehmomente und Verdrehwinkel nach ISO 3630-1 für ProFile .04 Instrumente (n = 8).

Instrumententyp	Moment [Nmm] §	Winkel [°] ‡
GT 20.06	5,12 ± 0,77ab	562,1 ± 68,9ab
GT 20.08	9,34 ± 2,20ab	429,7 ± 23,0a
GT 20.10	12,70 ± 2,24a	356,5 ± 57,4b
GT 20.12	12,67 ± 2,33b	269,4 ± 39,6ab

§ Werte mit gleichem Buchstaben sind signifikant verschieden (ANOVA, p < 0,01)

‡ Werte mit gleichem Buchstaben sind signifikant verschieden (ANOVA, p < 0,05)

Tab. II Anzahl von Rotationen bis zum Instrumentenbruch bei Test (n = 8) im Phantom¹.

Instrumententyp	Anzahl §
GT 20.06	529,9 ± 108,7ab
GT 20.08	251,4 ± 41,6b
GT 20.10	263,8 ± 29,1a
GT 20.12	55,9 ± 39,4ab

¹ Aufbau mit Hartmetallzylinder von 5 mm Durchmesser und 90° Winkel
§ Werte mit gleichem Buchstaben sind signifikant verschieden (ANOVA, p < 0,001)

Tab. III Anzahl von Rotationen bei der vollständigen Aufbereitung von Plastikblöcken (n = 10).

Instrumententyp	Anzahl §
GT 20.06	6,2 ± 0,7a
GT 20.08	10,4 ± 2,3‡b
GT 20.10	7,6 ± 2,4‡c
GT 20.12	12,5 ± 2,8ac
GT 35.12	28,6 ± 2,8abc

‡ Summe aus Crown-down-Aufbereitung und zweiter Phase der Formgebung
§ Werte mit gleichem Buchstaben sind signifikant verschieden (ANOVA, p < 0,01)

lich das sehr massive Instrument 35.12 wurde länger eingesetzt. Abbildung 6 stellt beispielhaft eine Originalregistrierung und den Zusammenhang zwischen Drehmoment und Eindringtiefe dar. Rotationen unter messbarer Last fanden bei der Aufbereitung am Plastikblock durchgehend nur bei der halben Aufbereitungszeit oder weniger statt (oberste Spur in Abb. 6).

Bei zwei Instrumenten der Grösse 20.08 kam es zur Fraktur, bevor die Arbeitslänge in der zweiten Phase der Formgebung erreicht wurde. Durch diese Instrumentenfrakturen kamen noch 10 Messungen an Plastikblöcken zur Auswertung, welche in den Abbildungen 7 und 8 grafisch dargestellt ist. Es zeigte sich, dass die Spitzendrehmomente mit abnehmender Instrumentengrösse generell signifikant abnahmen (p < 0,01); eine Aus-

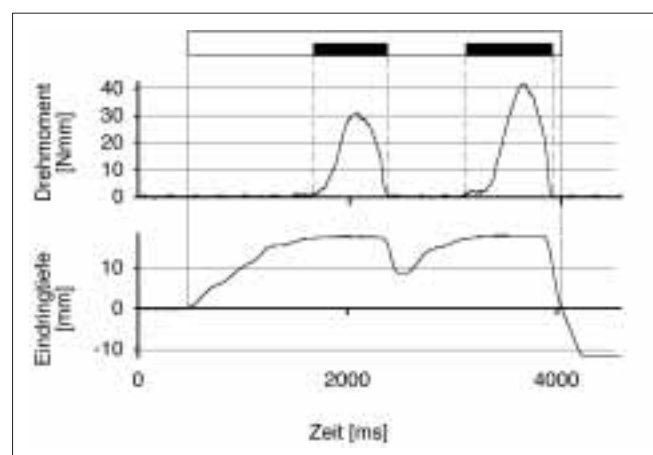


Abb. 6 Originalaufzeichnung der Aufbereitung eines Kanals im Plastikblock mit einem GT-Instrument der Grösse 20.08 bis auf Arbeitslänge. Das oberste Panel stellt die Perioden mit und ohne anliegendes Drehmoment dar: Das Instrument ist während 3,32 s im Kanal (nicht gefüllter Bereich; 13,8 Rotationen), ein Drehmoment über 0,8 Nmm ist während 1,52 s messbar (schwarze Balken; 6,3 Rotationen)

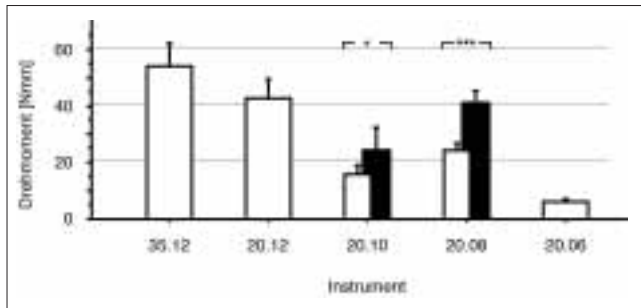


Abb. 7 Mittlere (\pm S.D.) maximale Drehmomente bei der Aufbereitung mit GT-Instrumenten am Plastikblock. Signifikante Unterschiede zwischen der ersten (offene Säulen) und zweiten Phase (gefüllte Säulen) der Präparation sind dargestellt. * $p < 0,05$, *** $p < 0,001$

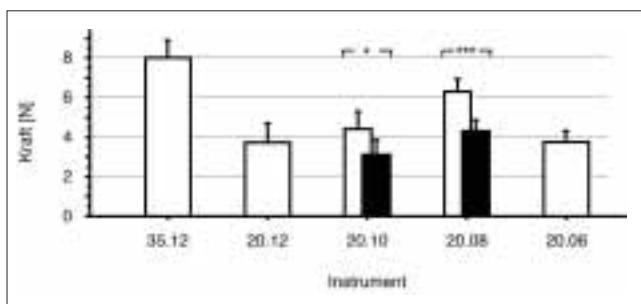


Abb. 8 Mittlere (\pm S.D.) maximale apikalwärts gerichtete Kräfte bei der Aufbereitung mit GT-Instrumenten am Plastikblock. Signifikante Unterschiede zwischen der ersten (offene Säulen) und zweiten Phase (gefüllte Säulen) der Präparation sind dargestellt. * $p < 0,05$, *** $p < 0,001$

nahme bildete der Übergang von Instrument Nr. 20.10 zu 20.08. Insgesamt lagen die Werte für die fünf verschiedenen GT-Instrumente im Mittel zwischen 6,2 und 54 Nmm. Die zweite Phase der Aufbereitung mit dem Erreichen der Arbeitslänge mit dem Instrument Nr. 20.08 war durch signifikant höhere Drehmomente im Vergleich zum initialen Crown down gekennzeichnet (Abb. 6). Bezüglich apikal gerichteter Kraft war beim initial angewendeten GT 35.12 mit etwa 8 N ein signifikant ($p < 0,001$) höherer Wert als bei den anderen Instrumenten zu verzeichnen. Lediglich das GT-Instrument Nr. 20.08 wies mit mehr als 6 N einen annähernd vergleichbaren Wert auf. In der zweiten Phase der Formgebung wurden signifikant niedrigere Werte für die apikal gerichtete Kraft bei den GT-Instrumenten Nr. 20.10 und 20.08 gemessen (Abb. 7).

Die Messung der Eindringtiefe zeigte, dass das Crown-down-Instrument Nr. 35.12 nicht mehr als 12 mm und das Instrument Nr. 20.12 nicht mehr als 14,5 mm in den Kanal eingebracht wurde. In der 2. Phase der Formgebung konnte das Instrument Nr. 20.10 einen halben Millimeter und die Nr. 20.08 1,5 mm weiter in den Kanal eingeführt werden.

Diskussion

In den letzten 10 Jahren kam eine Anzahl von kontinuierlich rotierenden Aufbereitungssystemen auf den Markt, durch die die Kanalaufbereitung optimiert werden konnte. Verschiedene Autoren konnten zeigen, dass die Aufbereitung mit ProFile .04 (BRYANT et al. 1998a, BRYANT et al. 1998b) oder Lightspeed

(GLOSSON et al. 1995, SHORT et al. 1997) bei korrekter Anwendung günstige Kanalformen erzeugt.

Eine genügend weite Aufbereitung zur Optimierung der Desinfektion mittels Spüllösungen konnte ebenfalls mit beiden genannten Techniken dargestellt werden (PETERS & BARBAKOW 2000).

Neben den genannten Vorteilen hat die kontinuierlich rotierende Aufbereitung aber auch ein zentrales Problem: die Gefahr von Instrumentenfrakturen. In einer retrospektiven Befragung von Praktikern nach Lightspeed-Kursen gaben drei Viertel der Befragten an, mindestens eine Fraktur erlebt zu haben (BARBAKOW & LUTZ 1997). In dieser Summe sind auch Frakturen berücksichtigt, die durch offensichtlich fehlerhafte Anwendung wie zu hohe Drehzahl oder Übernutzung der Instrumente verursacht worden waren. Auch andere Autoren bemerken Frakturen oder plastische Verformungen von ProFile-Instrumenten (BRYANT et al. 1998a, BRYANT et al. 1998b). TEPEL (2000) meint sogar, dass «das Frakturrisiko bei der klinischen Anwendung dieser Methode zu gravierenden Problemen führen könnte». Eine mögliche Lösung dieses Problems könnte die Anwendung von drehmomentkontrollierten Antrieben sein. Diese Antriebe benötigen allerdings verlässliche Messwerte für die Grundeinstellungen auf der Basis von korrekt bestimmten Drehmomentgrenzwerten.

Die Messung von Drehmomenten bei nicht bestimmter Drehachse ist technisch schwierig. Abb. 1 zeigt schematisch die Fehlermöglichkeiten bei der Messung von Momenten bei simulierter Kanalaufbereitung. Je stärker die Krümmung des Kanals ist, desto stärker fällt die Diskrepanz zwischen Kanalachse und Achse der Messeinrichtung ins Gewicht. Dies lässt sich nur vermeiden, wenn die Messung innerhalb der Achse von Motor und Instrument durchgeführt wird.

Aus diesem Grunde wurde auch in den bisher publizierten Berichten über die Messung von Kräften bei rotierender Aufbereitung (BLUM et al. 1999a, SATTAPAN et al. 2000) Wert darauf gelegt, dass nur Zähne mit geraden Wurzeln präpariert wurden. Unter dieser Voraussetzung ist es zulässig, nicht das Drehmoment zwischen dem Objekt (in diesem Fall dem Zahn) und dem Instrument, sondern das resultierende Moment zwischen Objekt und Lagerung (dem Kieferknochen resp. der Zahnhalterung im Experiment) zu messen. Die rotierende Aufbereitung soll aber gerade bei gekrümmten Kanälen einen Vorteil bringen, und daher scheinen Messungen an solchen Kanälen dringend geboten.

Die vorliegende Arbeit beschreibt einen Versuchsaufbau, der solche Messungen bezüglich Drehmoment, apikal gerichteter Kraft und Eindringtiefe im Experiment ermöglicht (Fig. 2). Durch die Verwendung von hoch empfindlichen dynamischen Sensoren, die das Drehmoment berührungslos übertragen, wird eine Messung innerhalb der Achse des Antriebes unabhängig von der Kanalachse realisiert. Das verwendete Messprogramm ermöglicht die Darstellung der Verläufe von Kraft und Torsion mit sehr hoher zeitlicher Auflösung (bis 10'000 Messungen pro Sekunde).

Die technische Ausstattung des dargestellten Aufbaus liess auch die Messung von Drehmomentgrenzwerten nach ISO 3630-1 (INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDISATION 1992) zu, die mit den dynamischen Messungen mit dem gleichen Aufbau verglichen wurden. Bei der Aufbereitung am Plastikblock wurden im Mittel Momente von 6,4 bis über 40 Nmm gemessen, dagegen wurden statische Frakturmomente von im Mittel 5–12 Nmm für GT-Instrumente der gleichen Grössen bestimmt. Es scheint daher offensichtlich, dass die Messwerte im stati-

schen Test nach ISO 3630-1 nicht relevant für Grenzwerte bei der rotierenden Aufbereitung sein können. Nach den Vorschriften der Norm werden beim statischen Test die apikalen 3 mm des jeweiligen Instrumentes in einer Halterung aus Messing (INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDISATION 1992) eingespannt. Im klinischen Vorgehen dürften dagegen die Kontaktareale wesentlich grösser sein, wie im Experiment eindrücklich gezeigt werden konnte (BLUM et al. 1999b).

Mit einer gewissen Skepsis sind allerdings die Torsionswerte in der eben zitierten Studie zu interpretieren. Die Autoren verwenden eine komplizierte Versuchseinheit («Endographe», BLUM et al. 1997), die die Messung von Drehmomenten als Resultierende von tangentialen Kräften an der Wand von (geraden) Kanälen zulässt. Die mit diesem Gerät ermittelten Werte liegen um eine Grössenordnung unter den in allen anderen Arbeiten dargestellten (Tab. IV). Zusätzlich besteht eine Unklarheit bezüglich der Nomenklatur der Einheiten (TEPEL 2000). Drehmomente werden als SI-Einheiten in «Nm» und davon abgeleitet in «Nmm» oder – was gleichbedeutend ist – in «mNm» angegeben. Die Normwerte (INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDISATION 1992) werden dagegen in «gcm» angegeben (Tab. IV).

Die Kalibration des vorgestellten Versuchsaufbaus wurde mit einem Waagebalken und Eichgewichten durchgeführt und ständig kontrolliert; dieses Vorgehen macht Irrtümer eher unwahrscheinlich. Die Eichprozedur beim Gerät «Endographe» ist dagegen nicht ersichtlich (BLUM et al. 1997). Ein Vergleich von Ergebnissen für Quantec-Instrumente (SATTAPAN et al. 2000) und statischen Messungen nach ISO 3630-1 (SILVAGGIO & HICKS 1997) scheint ebenfalls einen Widerspruch mit den durch den «Endographen» bestimmten Werten für ProFile Instrumente (Tab. IV) zu zeigen.

Neben den statischen Frakturdrehmomenten wurde in der Literatur auch die Anzahl Rotationen im gekrümmten Kanal als Parameter herangezogen (PRUETT et al. 1997, HAIKEL et al. 1999, YARED et al. 1999, 2000). Diese Situation testet den Widerstand eines Instrumentes gegen zyklische Ermüdung oder Bruch durch Biegebeanspruchung. Verschiedene Konzepte wurden als Testplattform verwendet, von denen keine durch gängige Normen fixiert ist. Es scheint aber denkbar, dass die vorgeschlagene Rotation in einer Biegung von 90° und Radien von 5 und 10 mm (HAIKEL et al. 1999) als Norm akzeptiert werden (GAMBARINI, persönliche Mitteilung). Diese Geometrie ist auch bei dem vor-

liegenden Aufbau verwendet worden. Zusätzlich liesse sich durch den automatischen Vorschub eine oszillierende Bewegung einstellen, die die klinische Situation zutreffender simulieren kann. Im vorliegenden Versuch wurde die Anzahl von Rotationen bis zum Bruch im Mittel mit 56 bis 530 bestimmt. Diese Werte stimmen für die GT-Instrumente mit den Konizitäten .06 bis .10 mit den in der Literatur für ProFile-Instrumente genannten überein (HAIKEL et al. 1999), liegen aber deutlich unter den von YARED et al. (1999, 2000) ermittelten. Das GT-Instrument 20.12 kann durch seinen geringen Widerstand gegen zyklische Ermüdung nicht zum Einsatz in gekrümmten Kanalabschnitten empfohlen werden.

In der simulierten Anwendung an Plastikblöcken wurden pro Kanal im Mittel zwischen 6 und 30 Rotationen für die verschiedenen Instrumente registriert. Diese Resultate gelten für Rotationen unter einer Last von mindestens 0,8 Nmm (Abb. 6). Ein Verweilen des Instrumentes im gekrümmten Kanalabschnitt wurde vermieden.

Zu diskutieren wäre, ob nicht der Flächeninhalt unter der Drehmomentkurve in Abbildung 6 ein gutes Mass für die Beanspruchung des jeweiligen Instrumentes wäre. So könnten verschiedene Wurzelkanalkonfigurationen und Aufbereitungssequenzen bezüglich der relevanten physikalischen Parameter verglichen werden.

Vergleicht man aber die so gefundenen Werte mit denen für zyklische Ermüdung am Phantom mit einem Krümmungsradius von 5 mm, so lässt sich Folgendes feststellen: Nach den vorliegenden ersten Resultaten lassen sich 10 Kanäle mit einem Satz von GT-Instrumenten aufbereiten, sofern das Instrument der Grösse 20.12 nur im geraden Kanalabschnitt verwendet wird. Übt man jedoch eine höhere apikale Kraft aus und/oder forciert das Instrument in eine stärkere apikale Krümmung, ist eine Fraktur insbesondere bei den GT-Instrumenten mit einer Konizität von .08 nicht auszuschliessen.

Diese Ergebnisse wurden allerdings an Plastikblöcken gewonnen. Solche Plastikblöcke haben den Vorteil eines hohen Grades von Standardisierung (TEPEL 2000), lassen sich aber nicht direkt mit natürlichen Zähnen vergleichen. Sie unterscheiden sich von Zähnen unter anderem durch die Oberflächenstruktur. Die dreidimensionale Anatomie von natürlichen Wurzelkanälen ist ausserdem komplex, und diese Eigenschaft wirkt sich signifikant auf das Ergebnis der Kanalaufbereitung aus (PETERS et al. 2000a, b).

Tab. IV Beispiele von Messungen von Drehmomenten bei endodontischen Instrumenten in der Literatur: a) Bruchmomente, b) Drehmomente während der Aufbereitung.

Instrument	Messmethode	Drehmoment	Referenz	Umrechnung ¹
a) K-Feile, Sollwerte # 15–45	ISO 3630-1 Bruchlast	8–120 gcm	INT. ORGANISATION FOR STAND. 1992	0,8–12 Nmm
ProFile Series 29, # 2–5 (Ø D1 13–48)	ISO 3630-1 Bruchlast	30,7–254,1 gcm	SILVAGGIO et al. 1997	3,1–25,4 Nmm
Quantec # 2–10	Waageprinzip, Bruchlasten	23,0–200,2 gcm	SATTAPAN et al. 2000	2,3–20 Nmm
b) ProFile .04 & .06 # 15–35	«Endographe» gerader Kanal	4–30×10 ⁻⁵ Nm	BLUM et al. 1999b	0,04–0,3 Nmm
Quantec # 2–10	bei Aufbereitung gerader Kanal	1,2–284,4 gcm	SATTAPAN et al. 2000	0,12–28,4 Nmm
GT 20.06–20.12	Aufbereitung gekrümmter Kanäle	6,2–42,7 Nmm	vorliegende Arbeit	6,2–42,7 Nmm

¹ Umrechnung in SI-Einheiten: 1 gcm ~ 0.1 Nmm (1 Nmm = 1 mNm)

Es scheint daher vernünftig, die Evaluation der Kanalgeometrie, z.B. mittels Mikro-CT, mit der Messung von physikalischen Parametern zu kombinieren. So liessen sich die für einen spezifischen Instrumententyp empfohlenen Aufbereitungssequenzen optimieren. Es könnten auch theoretische Aussagen über den Einfluss der Schneidengeometrie von rotierenden Aufbereitungsinstrumenten verifiziert werden (TURPIN et al. 2000). Diesen Schritt für andere marktübliche rotierende Aufbereitungssysteme an natürlichen, extrahierten Zähnen durchzuführen, wird das Ziel weiterer Arbeiten sein.

Schlussfolgerungen

1. Drehmomente und apikale Kräfte bei kontinuierlich rotierender Wurzelkanalaufbereitung sind nur ungenügend untersucht.
2. Zur Vermeidung von Instrumentenfrakturen sollten Grössenordnungen von apikal gerichteten Kräften, Momenten während der Aufbereitung und die Anzahl der pro Instrument möglichen Aufbereitungszyklen bestimmt werden.
3. Auf diese Weise kann die Inzidenz von Instrumentenfrakturen verringert werden, so dass das volle klinische Potenzial von vollrotierenden Instrumenten zur Kanalaufbereitung ausgeschöpft werden kann.

Summary

PETERS O A, KAPPELER S, BUCHER W, BARBAKOW F: **Engine-driven rotary root canal instrumentation: A platform to assess physical parameters** (in German). Schweiz Monatschr Zahnmed 111: 834–842 (2001)

The number of engine-driven rotary instruments available on the market is steadily increasing. These instruments enable clinicians to prepare better shaped root canals, however, rotary instruments have a higher risk for fracture than hand instruments. Unfortunately, the stresses placed on engine-driven rotary instruments in curved canals are insufficiently studied. The aim of this study was to develop a device which could measure more accurately the physical parameters influencing rotary instruments in curved canals.

For this purpose, a specially designed machine was constructed to measure the torque which develops between the rotary instrument and the motor. Apical forces and penetration depths could also be directly measured in real time. A variety of other measurements was also possible because of other special setups integrated into the device.

In the current study torque was assessed for GT-Files, size 35 with a .12 and sizes 20 with a .12 to .06 taper. In addition to preparations in simulated canals in plastic blocks, the «ISO 3630-1 specification for fracture moment» and «number of cycles till fatigue fracture» was measured.

The findings indicated that when instruments were used for preparations, torques up to 40 Nmm were present. This exceeded the static fracture load, which was less than 13 Nmm for the size 20 with .12 taper. In contrast, the number of rotations were more than 10 times lower when shaping canals in plastic blocks with a 5 mm radius of curvature than the number of rotations to fracture in the «cyclic fatigue test». This suggests that a GT-instrument could be used in ten canals. The apical force was always greater than 1 N and occasionally, 8 N or more was recorded.

Further studies on natural teeth with varying canal geometries are required using the specially developed torsional machine to

reduce the incidence of instrument fracture. In this way an efficient clinical potential can be confirmed for engine-driven rotary instruments in canal preparation.

Résumé

Depuis quelque temps, les instruments endodontiques rotatifs pour préparations canalaires sont devenus à la mode et leur offre ne cesse de croître. Grâce à ces instruments, la mise en forme canalair est améliorée, mais parallèlement, le risque de fracture par rapport aux instruments manuels augmente.

Les paramètres physiques lors de la mise en forme de canaux courbes à l'aide d'instruments rotatifs n'ont, pour le moment, pas suffisamment été étudiés. Le but du projet ici présenté, était de développer un système qui permette d'entreprendre de telles mesures. Un capteur pour la mesure du couple fut intégré entre l'axe du moteur et l'instrument endodontique. La force apicale, ainsi que la profondeur de pénétration des instruments par rapport au temps, pouvaient au moyen d'autres capteurs aussi être enregistrées. De nombreuses autres mesures purent encore être effectuées, grâce à l'adjonction de capteurs supplémentaires.

Lors du premier test, dont les résultats sont ici présentés, les instruments GT-Files de diamètres 35.12 et 20.12 jusqu'à 20.06 furent évalués.

En plus des paramètres «moment de fracture, selon norme ISO 3630-1» et «nombre de cycles jusqu'à fracture de fatigue», la mise en forme de canaux courbes sur bloc de plastique fut aussi évaluée.

Les moments de force, lors des préparations canalaires, ont montré des valeurs jusqu'à 40 Nmm qui correspondent à des valeurs nettement supérieures aux charges statiques de fracture, qui sont de l'ordre de 13 Nmm (pour 20.12). Par contre, le nombre de rotations pour la mise en forme de canaux avec un rayon de courbure de 5 mm restait bien en-dessous des valeurs obtenues dans le test de fracture de fatigue.

Au vue des données récoltées, l'utilisation d'un set d'instruments GT-Files semble possible pour la mise en forme de 10 canaux radiculaires. Les forces apicales se situaient toujours au-dessus de 1 N et pouvaient, dans certains cas, atteindre voire dépasser 8 N.

En résumé, nous pouvons dire que d'autres évaluations sur dents extraites avec diverses géométries canalaires sont nécessaires, afin d'acquies de plus amples résultats, dans le but d'exploiter au maximum le potentiel des instruments rotatifs pour la mise en forme canalair, tout en réduisant le risque de fracture.

Danksagung

Die Autoren danken dipl. Ing. Th. Reich für die kompetente Hilfe bei Entwicklung und Herstellung des Versuchsaufbaues. Das Projekt wurde durch den Forschungsfonds der Schweizerischen Zahnärztesgesellschaft SSO (Antrag No. 195) sowie durch die Schweizerische Gesellschaft für Endodontie SSE unterstützt.

Literaturverzeichnis

- BARBAKOW F, LUTZ F: The «Lightspeed» preparation technique evaluated by Swiss clinicians after attending continuing education courses. Int Endod J 30: 46–50 (1997)
- BLUM J Y, MACHTOU P, ESBER S, MICALLEF J P: Analysis of forces developed during root canal preparation with the balanced force technique. Int Endod J 30: 386–396 (1997)

- BLUM JY, COHEN A, MACHTOU P, MICALLEF J P: Analysis of forces developed during mechanical preparation of extracted teeth using Profile NiTi rotary instruments. *Int Endod J* 32: 24–31 (1999a)
- BLUM JY, MACHTOU P, MICALLEF J P: Location of contact areas on rotary Profile instruments in relationship to the forces developed during mechanical preparation on extracted teeth. *Int Endod J* 32: 108–114 (1999b)
- BRYANT S, THOMPSON S, AL-OMARI M, DUMMER P M H: Shaping ability of Profile rotary nickel-titanium instruments with ISO sized tips in simulated root canals: Part 1. *Int Endod J* 31: 275–281 (1998a)
- BRYANT S, THOMPSON S, AL-OMARI M, DUMMER P M H: Shaping ability of Profile rotary nickel-titanium instruments with ISO sized tips in simulated root canals: Part 2. *Int Endod J* 31: 282–289 (1998b)
- BUCHANAN L S: The standardized-taper root canal preparation-Part 1. Concepts for variably tapered shaping instruments. *Int Endod J* 33: 516–529 (2000)
- CAMPS J, PERTOT W J: Torsional and stiffness properties of Canal Master U stainless steel and nitinol instruments. *J Endod* 20: 395–398 (1994a)
- CAMPS J, PERTOT W J: Torsional properties of stainless steel Canal Master U and Flexogates. *Int Endod J* 27: 334–338 (1994b)
- EGGERT C, PETERS O, BARBAKOW F: Wear of Nickel-Titanium Lightspeed instruments evaluated by scanning electron microscopy. *J Endod* 25: 494–497 (1999)
- GAMBARINI G: Rationale for the use of low-torque endodontic motors in root canal instrumentation. *Endod Dent Traumatol* 16: 95–100 (2000)
- GLOSSON C R, HALLER R H, DOVE S B, DEL RIO C: A comparison of root canal preparations using NiTi hand, NiTi engine driven, and K-Flex endodontic instruments. *J Endod* 21: 146–151 (1995)
- HAIKEL Y, SEFATY R, BATEMAN G, SENGER B, ALLEMANN C: Dynamic and cyclic fatigue of engine-driven rotary Nickel-Titanium endodontic instruments. *J Endod* 25: 434–440 (1999)
- INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDISATION: Dental root-canal instruments – Part 1: Files, reamers, barbed broaches, rasps, paste carriers, explorers and cotton broaches. Geneva (1992)
- PETERS O A, BARBAKOW F: Effects of irrigation on debris and smear layer on canal walls prepared by two rotary techniques: a scanning electron microscopic study. *J Endod* 26: 6–10 (2000)
- PETERS O A, LAIB A, RÜEGSEGGER P, BARBAKOW F: Three dimensional analysis of root canal geometry using high resolution computed tomography. *J Dent Res* 79: 1405–1409 (2000a)
- PETERS O A, SCHÖNENBERGER K, LAIB A: Effects of four NiTi preparation techniques on root canal geometry assessed by Micro computed tomography. *Int Endod J*: in press (2000b)
- PORTENIER I, LUTZ F, BARBAKOW F: Preparation of the apical part of the root canal by the Lightspeed and step-back techniques. *Int Endod J* 31: 103–111 (1998)
- PRUETT J, CLEMENT D, CARNES D J: Cyclic fatigue testing of nickel-titanium endodontic instruments. *J Endod* 23: 77–85 (1997)
- SATTAPAN B, PALAMARA J E A, MESSER H H: Torque during canal instrumentation using rotary Nickel-Titanium files. *J Endod* 26: 156–160 (2000)
- SCHÄFER E: Wurzelkanalbehandlungen. *Dtsch Zahnärztl Z* 55: 730–740 (2000)
- SCHILDNER H: Cleaning and shaping the root canal. *Dent Clin North Am* 18: 269–296 (1974)
- SERENE T P, ADAMS J D, SAXENA A: Nickel-Titanium instruments: Applications in Endodontics. Ishiaku EuroAmerica, Inc., St. Louis, Mo, USA (1995)
- SHORT J A, MORGAN L A, BAUMGARTNER J C: A comparison of canal centering ability of four instrumentation techniques. *J Endod* 23: 503–507 (1997)
- SILVAGGIO J, HICKS M L: Effect of heat sterilisation on the torsional properties of rotary Nickel-Titanium endodontic files. *J Endod* 23: 731–734 (1997)
- SUTER B: Die Wurzelkanalaufbereitung mit GT Rotary Files. *Endodontie* 8: 247–259 (1999)
- TEPEL J: Experimentelle Untersuchungen über die maschinelle Wurzelkanalaufbereitung. Quintessenz Verlags-GmbH, Berlin, (2000)
- TURPIN Y L, CAGNEAU F, VULCAIN J M: Impact of two theoretical cross-sections on torsional and bending stresses of Nickel-Titanium instrument models. *J Endod* 26: 414–417 (2000)
- YARED G M, BOU DAGHER F E, MACHTOU P: Cyclic fatigue of Profile rotary instruments after simulated clinical use. *Int Endod J* 32: 115–119 (1999)
- YARED G M, BOU DAGHER F E, MACHTOU P: Cyclic fatigue of Profile rotary instruments after clinical use. *Int Endod J* 33: 204–207 (2000)