

5 Diskussion

Da in der ISO-Norm 3630-1 Mindestanforderungen bezüglich des Biege- und Torsionsverhaltens für maschinelle Nickel-Titan-Instrumente nicht definiert sind, wurde jeweils ein Vergleich zwischen den ermittelten Werten und den Mindestanforderungen nach der ISO-Norm 3630-1 für ISO-genormte Instrumente herangezogen.

Außerdem wurden die ermittelten Ergebnisse hinsichtlich des Biege- und Torsionsverhaltens mit den Ergebnissen aus anderen Untersuchungen (SCHÄFER u. FRITZENSCHAFT 1999; BERGMANS et al. 2001, ZINELIS et al. 2002) verglichen. Die Vergleiche sollen dazu beitragen, Mindestanforderungen an die Nickel-Titan-Instrumente bezüglich dieser Parameter zu definieren.

5.1 Elementanalyse der Nickel-Titan-Legierung

Das Biege- und Frakturverhalten eines Wurzelkanalinstrumentes hängt maßgeblich von seiner geometrischen Form und der verwendeten Legierung ab (DOLAN u. CRAIG 1982, WALIA et al. 1988, TEPEL u. SCHÄFER 1997, CAMPS et al. 1994, CAMPS et al. 1995, SCHÄFER u. TEPEL 2001, CAMPS u. PERTOT 1994, KRUPP et al. 1984). Daher ist es sinnvoll, wie in dieser Studie, bei den Wurzelkanalinstrumenten, die alle aus einer Nickel-Titan-Legierung bestehen, zunächst eine quantitative Bestimmung der chemischen Elemente vorzunehmen. So kann sichergestellt werden, daß die ermittelten Unterschiede im Biege- und Frakturverhalten nicht etwa durch Unterschiede in der Legierungszusammensetzung bedingt sind.

Bei allen untersuchten Wurzelkanalinstrumenten wurde - abgesehen von geringfügigen Abweichungen - ein gleichmäßiges Verhältnis zwischen den Hauptkomponenten Nickel und Titan festgestellt (Tab. 6, Kapitel 4). Der Oberbegriff für die verwendete Legierung ist 55-Nitinol (THOMPSON 2000).

5.2 Überprüfung der Instrumentendurchmesser und Konizitäten

Da zur Zeit weder internationale noch nationale Standards zur Maßhaltigkeit für Instrumente mit größeren Konizitäten vorhanden sind, wurde in dieser Studie der Instrumentendurchmesser und die daraus resultierende Konizität für jeden Instrumententyp überprüft.

Als Grundlage für die Beurteilung der Ergebnisse wurde die ISO-Norm 3630-1 herangezogen, in der Mindestanforderungen bezüglich des Biegeverhaltens der ISO-normten Instrumente definiert sind. Darin sind ebenfalls die Anforderungen an die Instrumentendurchmesser und die daraus resultierenden Konizitäten der verschiedenen Wurzelkanalinstrumente genau beschrieben.

• Instrumente mit 2 %-iger Konizität

Alle untersuchten Instrumente mit 2 %-iger Konizität erfüllten die Anforderungen der ISO-Norm 3630-1 (Tab. 7, Kapitel 4).

• Instrumente mit 4 %-iger und 6 %-iger Konizität

Bei den untersuchten Instrumenten dieser Konizitäten wiesen die ProFile- und HERO-Instrumente nur wenige Größen auf, die außerhalb des Toleranzbereiches lagen.

Die Durchmesser der Instrumente lagen allesamt unterhalb der Normwerte.

Die FlexMaster-Instrumente mit 4 %-iger Konizität und der Größe 30 zeigten als einzige Instrumentengruppe an dem Meßpunkt D_3 größere Werte als festgelegt. Die Meßwerte an dem Meßpunkt D_{13} befanden sich hingegen im Normbereich.

Die RaCe-Instrumente wiesen bei beiden untersuchten Konizitäten gleichmäßige Abweichungen auf, die durchgehen im unteren Toleranzbereich lagen und somit nicht die Konizität aufweisen, die vom Hersteller angegeben wird.

Die HERO-Instrumente zeigten die größte Variabilität bezüglich der angegebenen Konizitäten, so wurden z. B.: bei den HERO-Instrumenten mit 6 %-iger Konizität und der Größen 25 und 30 Konizitäten von 5,14 % bzw. 5,06 % ermittelt (Tab. 7, Kapitel 4).

Es war sehr bemerkenswert festzustellen, daß bei einigen der untersuchten Instrumente die ermittelten Werte mit den vom Hersteller angegebenen Werten bzw. Konizitäten wenig oder überhaupt nicht übereinstimmten. Diese Ergebnisse stimmen gut mit den Ergebnissen einer früher durchgeführten Studie überein (ZINELIS et al. 2002).

Das Fehlen einer ISO-Spezifikation für Wurzelkanalinstrumente, die größere Konizitäten aufweisen als 2 % macht offensichtlich die Notwendigkeit der Entwicklung internationaler Standards bezüglich der ISO-Größen, Konizitäten und Toleranzbereiche für diese Instrumente deutlich. Es ist anzunehmen, daß die Einführung solcher Standards dazu beitrüge, mehr Effizienz der rotierenden Nickel-Titan-Instrumente, eine Verringerung der unerwünschten Effekte der überlappenden Größen (ZINELIS et al. 2002) und eine Reduktion des Aussortierens der abgenutzten Instrumente zu erzielen. Diese Annahme berechtigt zu weiteren Untersuchungen.

5.3 Biegeverhalten - Diskussion der Ergebnisse

In dieser Studie wurden die Biegeeigenschaften der rotierenden Nickel-Titan-Instrumente nach der ISO-Norm 3630-1 geprüft, obwohl keine Maximalwerte für Wurzelkanalinstrumente mit größeren Konizitäten vorliegen. Maximalwerte für das Biegemoment von Wurzelkanalinstrumenten nach der ISO-Norm 3630-1 liegen für K-Feilen vor: 120 gcm (Größe 25), 150 gcm (Größe 30) und 190 gcm (Größe 35). Alle in dieser Studie getesteten Wurzelkanalinstrumente erreichten Werte, die unterhalb der festgelegten Maximalwerten lagen (Tab. 8, 9, 10, Kapitel 4).

• Instrumente mit 2 %-iger Konizität

Die in der vorliegenden Studie untersuchten Instrumente aller ISO-Größen mit 2 %-iger Konizität zeichneten sich durch geringe Biegemomente aus, die weit unter den Maximalwerten lagen und damit die Flexibilität dieser Instrumente bestätigten.

• Instrumente mit 4 %-iger und 6 %-iger Konizität

Die Wurzelkanalinstrumente mit 4 %-iger und 6 %-iger Konizität, vor allem die K³-Instrumente dieser Konizität in den Größen 25, 30 und 35, waren signifikant weniger

flexibel als alle anderen untersuchten Instrumente mit der gleichen Konizität und der gleichen Instrumentengröße ($P < 0,05$). Die ProFile- und RaCe-Instrumente waren unabhängig von der Konizität und der Größe signifikant flexibler als die restlichen getesteten Instrumente ($P < 0,05$). Diese Ergebnisse bestätigten jene aus den früher durchgeführten Studien (PONGIONE et al. 2000, CALAS et al. 1999).

Die geringen Biegemomente bei den überprüften Nickel-Titan-Instrumenten deuten auf eine extreme Flexibilität hin, die klinisch sehr erwünscht ist. Aufgrund dieser Eigenschaft zeigen die Nickel-Titan-Instrumente nicht die Tendenz, sich im gekrümmten Wurzelkanal gerade stellen zu wollen, sondern dem Verlauf des Wurzelkanals folgen (SCHÄFER 1998). Jedoch bedingt die Flexibilität eine geringere Belastung an den Schneiden des Wurzelkanalinstrumentes in gekrümmten Wurzelkanälen. Dies führt zu einer geringeren Beanspruchung der Schneiden und reduziert damit das Frakturrisiko der Instrumente (CAMPS u. PERTOT 1994). Die Superelastizität der Nickel-Titan-Legierung ermöglicht den Nickel-Titan-Instrumenten eine bessere Anpassung an die originäre Kanalform bei der Wurzelkanalaufbereitung. Bei stärker gekrümmten Wurzelkanälen kann es jedoch bei der Anwendung rotierender Nickel-Titan-Instrumente zu einer unerwünschten Veränderung des originären Kanalverlaufs im Bereich der Außenkrümmung kommen (SCHÄFER u. LOHMANN 2002a u. b, THOMPSON u. DUMMER 2000, BAUMANN u. ROTH 1999). Offensichtlich ist aber die Veränderung der Kanalform häufiger bei der Wurzelkanalaufbereitung mit Instrumenten größerer Konizitäten vorzufinden, da diese Wurzelkanalinstrumente eine geringere Flexibilität aufweisen als Wurzelkanalinstrumente mit 2 %-iger bzw. 4 %-iger Konizität und aus diesem Grunde dem originären Kanalverlauf weniger gut folgen können.

Diese Erkenntnisse sollten bei den Herstellern dazu führen, das Biegeverhalten der verschiedenen rotierenden Nickel-Titan-Instrumente bei ihrer Empfehlung zur Nutzung dieser Instrumente in stark gekrümmten Wurzelkanälen zu berücksichtigen.

5.3.1 Klinische Relevanz des Biegeverhaltens

Für den klinischen Einsatz der Instrumente spielt das Biegeverhalten eine eher untergeordnete Rolle. Die Auswahlkriterien wie Frakturverhalten, Formveränderung

infolge der Wurzelkanalaufbereitung sowie Schneidleistung der Instrumente sind für den klinischen Einsatz eines Wurzelkanalinstrumentes von eindeutig übergeordneter Bedeutung.

Ein neuer Aspekt, der vielleicht in weiterführenden Untersuchungen hinsichtlich des Biegeverhaltens berücksichtigt werden sollte, ist der Instrumentenquerschnitt.

Dieser Studie ist zu entnehmen, daß Wurzelkanalinstrumente mit einer Konizität von mehr als 2 % nicht für die Aufbereitung des apikalen Drittels gekrümmter Wurzelkanäle geeignet sind.

5.4 Frakturverhalten

5.4.1 Verdrehwinkel - Diskussion der Ergebnisse

Der Torsionswinkel bei dem eine Instrumentenfraktur eintritt, wird als Verdrehwinkel bezeichnet. Dieser Winkel gibt Aufschluß darüber, inwieweit die Gefahr einer Instrumentenfraktur besteht, wenn ein im Wurzelkanal verklemmtes Instrument weiter rotiert wird. Für Aufbereitungstechniken auf der Grundlage der drehend-schabenden Arbeitsweise („reaming motion“) werden in der Literatur Verdrehwinkel von 90° (WILDEY u. SENIA 1989) und 180° (ROANE et al. 1985) vorgeschlagen.

• Instrumente mit 2 %-iger Konizität

Die in der vorliegenden Studie untersuchten Instrumente aller ISO-Größen mit 2 %-iger Konizität erlaubten durchschnittlich mindestens eineinhalb Umdrehungen, bevor eine Instrumentenfraktur eintrat (Tab. 11, Kapitel 4).

• Instrumente mit 4 %-iger Konizität

Bei den überprüften Instrumenten aller ISO-Größen mit 4 %-iger Konizität war es durchschnittlich mindestens eine Umdrehung um die eigene Achse, wobei die FlexMaster-Instrumente der ISO-Größe 30 mit dem durchschnittlichen Verdrehwinkel von 351° (Tab. 12, Kapitel 4) die Ausnahmen darstellten und bei etwas weniger als einer vollständigen Umdrehung frakturierten.

• Instrumente mit 6 %-iger Konizität

Die getesteten Instrumente aller ISO-Größen mit 6 %-iger Konizität erlaubten durchschnittlich mindestens eine halbe Umdrehung. Die FlexMaster-Instrumente wiesen Frakturen bei ca. 180° auf und stellten eine Ausnahme gegenüber den anderen Instrumenten mit 6 %-iger Konizität dar. Es ist zu bedenken, daß an die Instrumente mit größeren Konizitäten vielleicht nicht die gleichen Anforderungen gestellt werden sollten wie an die Instrumente mit 2 %-iger Konizität. Eine Tatsache die dagegen spricht, sind die vorliegenden Untersuchungsergebnisse für K³- und ProFile-Instrumente der ISO-Größe 35 mit 6 %-iger Konizität, die deutlich höhere Verdrehwinkel aufwiesen (K³-Instrumente: 530°; ProFile-Instrumente: 375°) (Tab. 13, Kapitel 4).

Bei allen anderen untersuchten Instrumenten bestand eine ausreichende Sicherheitsspanne bis zu dem Winkel, bei dem es zur Fraktur kam. Für die klinische Anwendung bedeutet ein großer Verdrehwinkel ein geringeres Frakturrisiko im Wurzelkanal. Der tatsächliche Wert des Verdrehwinkels gibt an, wie oft ein Instrument in Wurzelkanal um die eigene Achse torquiert werden darf, bevor eine Fraktur eintritt.

5.4.2 Bruchfestigkeit - Diskussion der Ergebnisse

Im Hinblick auf den klinischen Einsatz hilft die Bruchfestigkeit abzuschätzen, ob ein bestimmter Instrumententyp leichter plastisch deformieren wird als ein anderer. Diese Tatsache ist wichtig wenn es darum geht, von einem Instrument mit einem hohen Drehmoment auf ein Instrument mit einem geringeren Drehmoment zu wechseln, da letztere sich leichter aufdrehen, d. h. eine plastische Deformation setzt bereits bei geringeren Drehmomenten ein. Unter klinischen Gesichtspunkten ist eine makroskopisch sichtbare plastische Deformation für den Zahnarzt ein eindeutiger Hinweis, daß dieses deformierte Instrument ohne weiteren Einsatz sofort ausgesondert werden muß.

Inwieweit die Wurzelkanalinstrumente makroskopisch sichtbare Veränderungen aufweisen, ist von dem Herstellungsverfahren (SCHÄFER 1998) abhängig. Bei Reamern und K-Feilen aus Edelstahl sind Veränderungen der herstellungstypischen

Verdrillung zu sehen. Im Gegensatz dazu zeigen Hedström-Feilen aus Edelstahl, die aus einem Rohling gefräst werden, keine makroskopisch sichtbaren Veränderungen, so daß die Gefahr einer Fraktur durch die mit jeder Rotationsbewegung zunehmende plastische Deformation bei diesen Instrumenten ggf. nicht bemerkt wird. Nickel-Titan-Instrumente werden ebenfalls durch Fräsung eines runden Rohlings hergestellt, so daß sie aufgrund des Herstellungsverfahrens in ihrem Verhalten bezüglich der Bruchfestigkeit den Hedström-Feilen entsprechen. Andererseits ist der Grund für ein solches Verhalten die so genannte „Superelastizität“ der Nickel-Titan-Instrumente, die keine sichtbaren Zeichen einer plastischen Deformation, der eine Fraktur folgen kann, zulässt.

In dieser Studie wurden die Fraktureigenschaften hinsichtlich der Bruchfestigkeit der rotierenden Nickel-Titan-Instrumente nach der ISO-Norm 3630-1 geprüft, obwohl keine minimalen Werte für die Bruchfestigkeit für Wurzelkanalinstrumente mit größeren Konizitäten angegeben sind. Die minimalen Werte für die Bruchfestigkeit von Wurzelkanalinstrumenten nach der ISO-Norm 3630-1 sind für K-Feilen: 30 gcm (Größe 25), 45 gcm (Größe 30) und 60 gcm (Größe 35).

- **Instrumente mit 2 %-iger Konizität**

Die in der vorliegenden Studie untersuchten Instrumente aller ISO-Größen mit 2 %-iger Konizität wiesen Werte auf, die sich weit über den minimal geforderten Werten befinden.

- **Instrumente mit 4 %-iger Konizität**

Von den geprüften Instrumenten waren es nur die RaCe-Instrumente der ISO-Größe 25 und 35 mit 4 %-iger Konizität, die sich geringfügig unter den Minimalwerten befanden (ISO-Größe 25: 29,05 gcm und ISO-Größe 35: 58,66 gcm) und somit die Anforderung einer minimalen Bruchfestigkeit nicht erfüllten.

Die K³-Instrumente zeigten in allen Größen die größten Werte.

- **Instrumente mit 6 %-iger Konizität**

Bei den Instrumenten dieser Konizitäten war auffällig, daß sie in allen ISO-Größen sehr hohe Werte erreichten und somit das zwei- bis dreifache des Minimalwertes aufwiesen.

Die Nickel-Titan-Instrumente lassen aufgrund ihres pseudoelastischen Verhaltens beim klinischen Einsatz zumeist keinerlei plastische Deformation als Hinweis auf eine unmittelbar bevorstehende Fraktur (TEPEL u. SCHÄFER 1997, TEPEL et al. 1997) erkennen, so daß klinisch eine vergleichsweise große Frakturgefahr (SCHÄFER 1998) besteht. In der Tat schilderten mehrere Zahnärzte aus der Praxis bereits die Erfahrung, daß die Instrumente plötzlich im Wurzelkanal frakturierten (SCHÄFER 1998). Dieses Verhalten beruht auf der fehlenden plastischen Deformation, wie sie bei Edelmetallinstrumenten auftritt und eine Vorwarnung zum Aussortieren der deformierten Instrumente darstellt.

5.4.2.1 Klinische Relevanz des Frakturverhaltens

Hinsichtlich des Verdrehwinkels und der Bruchfestigkeit, abgesehen von den aufgeführten Ausnahmen, erreichten die Nickel-Titan-Instrumente die Mindestanforderungen nach der ISO-Norm 3630-1. Auch wenn diese Studie im weitesten Sinne günstige Ergebnisse bezüglich des Frakturverhaltens lieferte, ist zu berücksichtigen, daß Frakturen der Instrumente weitgehend verhindert werden, wenn die systemspezifischen Umdrehungsgeschwindigkeiten eingehalten und ein abrupter Wechsel der Drehzahl während der Aufbereitung vermieden werden. Es sind zudem zu häufige Anwendungen der Instrumente und das Überspringen von Instrumentengrößen zu vermeiden (HÜLSMANN u. VERSÜMER 1998). Die Erfahrung, Fähigkeit und Geschicklichkeit des Zahnarztes wird von mehreren Autoren als ein wichtiger Faktor im Zusammenhang mit der Frakturproblematik rotierender Nickel-Titan-Instrumente gesehen (HÜLSMANN u. VERSÜMER 1998, SHORT et al. 1997, THOMPSON u. DUMMER 1997b, KAVANAGH u. LUMLEY 1998, MANDEL et al. 1999).

5.5 Instrumentenquerschnitt

Um die Korrelation zwischen dem Biegemoment, dem Verdrehwinkel sowie der Bruchfestigkeit und der berechneten Querschnittsfläche des Wurzelkanalinstrumentes zu prüfen, wurde der Pearsons Koeffizient r berechnet. Grundsätzlich erstrecken sich die Ergebnisse dieses linearen Korrelationskoeffizienten zwischen -1 und $+1$. Bei einem positiven Wert spricht man vom einer „kompletten positiven Wechselbeziehung“, die in einem Korrelationsdiagramm eine Gerade mit positiver Steigung aufweist (Abb. 14a und 14c, Kapitel 4). Ein negativer Wert deutet auf eine „komplette negative Wechselbeziehung“ hin und stellt sich im Korrelationsdiagramm als eine Gerade mit negativer Steigung hin (Abb. 14b, Kapitel 4). Ein Wert nahe bis Null zeigt das Fehlen einer Wechselbeziehung zwischen den Variablen an.

5.5.1 Biegeverhalten und die Querschnittsfläche

Wie erwartet zeigte sich eine hoch signifikante Korrelation zwischen der Biegefestigkeit des Wurzelkanalinstrumentes und seinem Querschnitt ($P < 0,0001$). Dieses Ergebnis läßt erkennen, daß die Konfiguration des Instrumentenquerschnittes als ein dominanter Faktor hinsichtlich des Biegeverhaltens bei den rotierenden Nickel-Titan-Instrumenten anzusehen ist. Dies bestätigt die ermittelten Ergebnisse bei dem Vergleich des Biegeverhaltens der spezialangefertigten Prototypen von herkömmlichen Instrumenten für die manuelle Instrumentierung mit fünf verschiedenen Konfigurationen des Instrumentenquerschnittes (SCHÄFER u. TEPEL 2001). Zudem stimmen die Ergebnisse dieser Studie einerseits gut mit den Ergebnissen der erwähnten Studie überein, andererseits werden sie durch mathematische Berechnungen bestätigt (TURPIN et al. 2001, TURPIN et al. 2000).

Diese Autoren (TURPIN et al. 2000) haben die Fläche des Instrumentenquerschnittes von HERO- und ProFile-Instrumenten berechnet und die Biegebelastung dieser Instrumente miteinander verglichen. Die Berechnung der Querschnittfläche ergab eine um etwa 30 % größere Querschnittsfläche bei HERO- als bei den ProFile-Instrumenten. Diese Ergebnisse stehen in Korrelation zu dem

Biegeverhalten der beiden Instrumente. Zudem bestätigen sie auch die Ergebnisse der vorliegenden Studie.

5.5.2 Verdrehwinkel und die Querschnittsfläche

Wie erwartet zeigte sich eine hoch signifikante Korrelation zwischen dem Verdrehwinkel eines Wurzelkanalinstrumentes und seinem Querschnitt ($P < 0,05$). Dieses Ergebnis zeigt, daß die Konfiguration des Instrumentenquerschnittes als ein wichtiger Faktor hinsichtlich des Frakturverhaltens bei den rotierenden Nickel-Titan-Instrumenten anzusehen ist.

Das Korrelationsdiagramm (Abb. 14b, Kapitel 4) läßt erkennen, daß Instrumente mit einer kleineren Querschnittsfläche größere Verdrehwinkel aufweisen im Gegensatz zu den Instrumenten mit größerer Querschnittsfläche, die kleinere Verdrehwinkel zeigen. Da große Verdrehwinkel wünschenswert sind, bedeutet das, daß die Instrumente mit kleinerer Querschnittsfläche hinsichtlich des Verdrehwinkels günstigere Ergebnisse liefern.

Die Querschnittsfläche und der Verdrehwinkel des Instrumentes verhalten sich umgekehrt proportional zueinander.

5.5.3 Bruchfestigkeit und die Querschnittsfläche

Es ergab sich eine hoch signifikante Korrelation zwischen der Bruchfestigkeit eines Wurzelkanalinstrumentes und seinem Querschnitt ($P < 0,0001$). Dieses Ergebnis zeigt, daß die Konfiguration des Instrumentenquerschnittes als ein wichtiger Faktor hinsichtlich des Frakturverhaltens bei den rotierenden Nickel-Titan-Instrumenten anzusehen ist.

In dem Korrelationsdiagramm (Abb. 14c, Kapitel 4) ist zu erkennen, daß Instrumente mit einer kleineren Querschnittsfläche geringere Werte für die Bruchfestigkeit aufwiesen im Gegensatz zu den Instrumenten mit größerer Querschnittsfläche, die größere Werte für die Bruchfestigkeit zeigten. Da klinisch eine große Bruchfestigkeit wünschenswert ist, bedeutet dies, daß mit steigender Querschnittsfläche die

Instrumente größere Bruchfestigkeiten erreichen. Zwischen der Querschnittsfläche des Instruments und der Bruchfestigkeit ist eine direkte Proportionalität zu erkennen.

5.5.4 Klinische Relevanz des Instrumentenquerschnittes

Die Untersuchungsergebnisse der vorliegenden Studie lassen erkennen, daß zwischen dem Biege- und Frakturverhalten und dem Instrumentenquerschnitt eines Wurzelkanalinstrumentes eine signifikante Korrelation besteht.

Das Biegemoment und die Bruchfestigkeit sind zu der Querschnittsfläche direkt proportional. Der Verdrehwinkel zeigte eine umgekehrte Proportionalität zu der Querschnittsfläche. Das bedeutet, wählt man ein Instrument mit vergleichsweise kleiner Querschnittsfläche, so würde sich dieses sowohl durch ein geringes Biegemoment und dementsprechend eine große Flexibilität auszeichnen als auch durch einen großen Verdrehwinkel.