

Aus der Poliklinik für Kieferorthopädie der
Heinrich-Heine-Universität
Düsseldorf

Direktor: Univ.-Prof. Dr. D. Drescher

Friktionseigenschaften von Edelstahlbrackets mit Tefloneinlagen

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnmedizin

Der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
vorgelegt von

Melanie Heinrich

2008

Als Inauguraldissertation gedruckt mit Genehmigung der
Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

gez.: Univ.-Prof. Dr. med. Dr. rer. nat. Bernd Nürnberg
Dekan

Referent: Univ.-Prof. Dr.D. Drescher

Korreferent: Univ.-Prof. Dr. U.Stüttgen

Inhaltsverzeichnis

1.	EINLEITUNG	6
2.	LITERATURÜBERSICHT	7
2.1.	Polytetrafluorethylen (PTFE, Teflon®)	7
2.1.1.	Geschichte des Polytetrafluorethylen	7
2.1.2.	Eigenschaften des Polytetrafluorethylen.....	7
2.2.	Friktion	8
2.2.1.	Physikalische Definition	8
2.2.2.	Friktion in der Kieferorthopädie.....	10
2.3.	Einflussfaktoren auf die Friktion	12
2.3.1.	Ligatur.....	12
2.3.2.	Bracket	13
2.3.2.1.	selbstligierende Brackets	13
2.3.2.2.	Bracketform.....	15
2.3.2.3.	Bracketbreite	15
2.3.2.4.	Bracketdesign	16
2.3.2.5.	Bracketmaterial	16
2.3.3.	Drähte.....	19
2.3.3.1.	Legierung	19
2.3.3.2.	Dimension	21
2.3.4.	Milieu	21
3.	PROBLEMSTELLUNG	22
4.	MATERIAL UND METHODE.....	23
4.1.	Untersuchte Brackets.....	23

4.2.	Ligatur	26
4.3.	Verwendete Bögen.....	27
4.4.	Versuchsaufbau	27
4.5.	Statistische Auswertung.....	30
4.6.	Rasterelektronenmikroskopische Auswertung	31
5.	ERGEBNISSE	31
5.1.	Überprüfung der Normalverteilung – Kolmogorov-Smirnov-Test.....	31
5.2.	Vergleich der Friktion der untersuchten Brackets im OK / UK.....	32
5.3.	Vergleich der Friktion der untersuchten Brackets im OK.....	34
5.3.1.	Bogen 1: NiTi.....	34
5.3.1.1.	NiTi .018“	34
5.3.1.2.	NiTi .016“ x .022“.....	36
5.3.2.	Bogen 2: Stahl	38
5.3.2.1.	Stahl .018“	38
5.3.2.2.	Stahl .016“ x .022“.....	40
5.3.3.	Bogen 3: TMA.....	42
5.3.3.1.	TMA .018“	42
5.3.3.2.	TMA .016 x .022“.....	44
5.4.	Vergleich der Friktion der untersuchten Brackets im UK.....	46
5.4.1.	Bogen 1: NiTi.....	46
5.4.1.1.	NiTi .018“	46
5.4.1.2.	NiTi .016“ x .022“.....	48
5.4.2.	Bogen 2:Stahl	50
5.4.2.1.	Stahl .018“	50
5.4.2.2.	Stahl .016“ x .022“.....	52
5.4.3.	Bogen 3: TMA.....	54

5.4.3.1.	TMA .018“	54
5.4.3.2.	TMA .016“ x .022“	56
5.5.	Vergleich der Friktion der untersuchten Bögen im OK / UK	58
5.5.1.	Vergleich der Drahtform.....	59
5.5.2.	Vergleich des Drahtmaterials.....	59
5.6.	Vergleich der Friktion der untersuchten Bögen im OK	60
5.6.1.	Bracket 1: Fascination	60
5.6.1.1.	Vergleich der Drahtform	61
5.6.1.2.	Vergleich der Drahtmaterialien.....	61
5.6.2.	Bracket 2: Inspire.....	62
5.6.2.1.	Vergleich der Drahtform	63
5.6.2.2.	Vergleich der Drahtmaterialien.....	63
5.6.3.	Bracket 3: Opal.....	64
5.6.3.1.	Vergleich der Drahtform	65
5.6.3.2.	Vergleich der Drahtmaterialien.....	65
5.6.4.	Bracket 4: Ormco Diamond	66
5.6.4.1.	Vergleich der Drahtform	67
5.6.4.2.	Vergleich der Drahtmaterialien.....	67
5.6.5.	Bracket 5: Teflon	68
5.6.5.1.	Vergleich der Drahtform	69
5.6.5.2.	Vergleich der Drahtmaterialien.....	69
5.7.	Vergleich der Friktion der untersuchten Bögen im UK	70
5.7.1.	Bracket 1: Fascination	70
5.7.1.1.	Vergleich der Drahtform	71
5.7.1.2.	Vergleich der Drahtmaterialien.....	71

5.7.2. Bracket 2: Inspire.....	72
5.7.2.1. Vergleich der Drahtform	73
5.7.2.2. Vergleich der Drahtmaterialien.....	73
5.7.3. Bracket 3: Opal.....	74
5.7.3.1. Vergleich der Drahtform	75
5.7.3.2. Vergleich der Drahtmaterialien.....	75
5.7.4. Bracket 4: Ormco Diamond	76
5.7.4.1. Vergleich der Drahtform	77
5.7.4.2. Vergleich der Drahtmaterialien.....	77
5.7.5. Bracket 5: Teflon	78
5.7.5.1. Vergleich der Drahtform	79
5.7.5.2. Vergleich der Drahtmaterialien.....	79
5.8. Rasterelektronenmikroskopische Bilder	80
5.9. Vergleich der Stahlbrackets mit Tefloneinlagen untereinander	83
6. DISKUSSION	84
6.1. Diskussion der Versuchsmethodik	84
6.2. Diskussion der eigenen Ergebnisse	86
6.3. Schlussfolgerung.....	88
7. ZUSAMMENFASSUNG	88
8. ANHANG	90
8.1. Statistische Einzelauswertungen.....	90
8.1.1. Deskriptive Statistik OK / UK zusammen.....	90
8.1.2. Deskriptive Statistik UK gesamt.....	90
8.1.3. Deskriptive Statistik OK gesamt	91
8.1.4. Deskriptive Statistik UK Bracket 1 Fascination	91
8.1.5. Deskriptive Statistik UK Bracket 2 Inspire.....	92
8.1.6. Deskriptive Statistik UK Bracket 3 Opal.....	92

8.1.7.	Deskriptive Statistik UK Bracket 4 Ormco.....	93
8.1.8.	Deskriptive Statistik UK Bracket 5 Teflon	93
8.1.9.	Deskriptive Statistik OK Bracket 1 Fascination.....	94
8.1.10.	Deskriptive Statistik OK Bracket 2 Inspire	94
8.1.11.	Deskriptive Statistik OK Bracket 3 Opal.....	95
8.1.12.	Deskriptive Statistik OK Bracket 4 Ormco	95
8.1.13.	Deskriptive Statistik OK Bracket 5 Teflon	96
8.1.14.	Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Tests	96
9.	LITERATURVERZEICHNIS	107
10.	DANKSAGUNG.....	116
11.	LEBENS LAUF.....	117

1. Einleitung

Als therapeutisches Hilfsmittel werden in der Kieferorthopädie oftmals festsitzende Apparaturen (Multibandtechnik) eingesetzt. Bei der bogengeführten Zahnbewegung kommt es zu Verlusten der applizierten Kräfte durch Reibung, die so groß sein kann, dass die gewünschte Bewegung des Zahnes verzögert wird oder sogar ausbleibt. Das heißt, es muss mehr Kraft aufgewendet werden, um die gewünschte Bewegung des Zahnes zu erreichen. Nach Drescher et al hat man selbst bei optimaler Materialauswahl mit einem Kraftverlust durch Friktion von mindestens 50 % zu rechnen [23], was wiederum in Fällen mit kritischer Verankerungssituation zu Problemen führen kann. Der Kraftverlust entsteht zum einen durch Kontakt des Bogens mit der Ligatur (ligaturbedingte Friktion) und zum anderen durch einen Winkelkonflikt zwischen Bracketslot und Bogen (kippmomentinduzierte Friktion). Ziel ist es, diese beiden Reibungskräfte so gering wie möglich zu halten. Aus diesem Grund werden heutzutage auf dem Markt vermehrt Brackets mit dem Attribut „friktionslos“ angeboten, wobei es sich hier fast immer um selbstligierende Brackets handelt, welche eine Reduktion der ligaturbedingten Friktion gegenüber einem Standard Bracket (Straightwire-Bracket) mit einer festen Drahtligatur zeigen [30]. Dies sagt aber nichts über den allgemeinen Kraftverlust durch Friktion aus, bei dem auch die kippmomentinduzierte Friktion mitbedacht werden muss.

Als wichtigste Einflussfaktoren auf die kippmomentinduzierte Friktion werden in der Literatur die Bögen (Legierung und Dimension) und das Bracket (Form, Breite, Design, Material) beschrieben. In zahlreichen Studien wurde nach der optimalen Kombination gesucht. Vielversprechend erweist sich hier der Werkstoff Polytetrafluorethylen (PTFE), umgangssprachlich als Teflon® (Handelsname der Firma DuPont) bezeichnet. In verschiedenen Studien zeigten teflonbeschichtete Bögen vergleichsweise geringe Friktionswerte [9,35,77]. Als problematisch gilt jedoch ein relativ hoher Abrieb der Beschichtung nach Gebrauch und die mangelnde Haftung [55]. Für die vorliegende Studie wurde aus diesem Grund ein Edelstahlbracket mit Tefloneinlagen entworfen, bei welchem das Reibungsverhalten gemessen wurde.

2. Literaturübersicht

2.1. Polytetrafluorethylen (PTFE, Teflon®)

2.1.1. Geschichte des Polytetrafluorethylen

Polytetrafluorethylen (PTFE) wurde nicht, wie häufig behauptet als ein Nebenprodukt der Raumfahrt entdeckt, sondern eher zufällig von R. J. Plunkett, der in einer Forschungsgruppe von Du Pont de Nemours (Wilmington/ Del.) mit fluorhaltigen Substanzen arbeitete. Im Jahr 1941 füllte er eines Tages mehrere Gefäße mit Tetrafluorethylen, verschloss sie und ließ sie über Nacht stehen. Am nächsten Morgen fand er ein weißes Pulver vor, das Polytetrafluorethylen [18]. Das Tetrafluorethylen wurde in Gegenwart von Peroxid als Initiator bei Überdruck zu Polytetrafluorethylen polymerisiert [7]. 1941 erhielt DuPont das Patent auf PTFE, weshalb es oft umgangssprachlich als Teflon® (Handelsname der Firma DuPont) bezeichnet wird.

Erstmalige Anwendung fand Polytetrafluorethylen im zweiten Weltkrieg. Im sogenannten Manhattan-Projekt, das zu der Entwicklung der Atombombe führte, wurde ein geeignetes Dichtungsmaterial gesucht, welches gasförmigem Fluor widerstand. PTFE entsprach diesen Anforderungen. Es wurde außerdem als Leiterisolation bei Radargeräten und in Kampfflugzeugen verwendet [18].

Heute findet PTFE Verwendung in der Fabrikation von Dichtungen und Rohren, sowie wasserabweisenden Filmen, Schutzanstrichen und Elastomeren [7]. In der Medizin nutzt man es im Bereich der Implantologie und als PTFE-Membran (Gore-Tex®).

2.1.2. Eigenschaften des Polytetrafluorethylen

Mechanische Eigenschaften:

Dichte: 2,15 bis 2,20 g / cm³

Zugfestigkeit: 25 bis 36 N / mm²

Reißdehnung: 350-550 %

E- Modul: 408 N / mm²

Als Füll- und Verstärkungsstoffe eignen sich:

Graphit, Kohle, Bronze, Glasfaser, Stahl, Molybdändisulfid

Die Vorzüge des PTFE liegen in einer nahezu universellen Chemikalienbeständigkeit, sowie einer Unlöslichkeit in allen bekannten Lösungsmitteln unter 300 Grad Celsius. Es kann in einem Bereich von -270 bis +260 Grad Celsius eingesetzt werden und besitzt sehr gute elektrische Eigenschaften. Besonders charakteristisch ist die niedrige Reibungszahl für Teflon. PTFE weist von allen festen Werkstoffen die niedrigste Reibungszahl auf, eine Folge der niedrigen zwischenmolekularen Kräfte. Bei PTFE entspricht die Haftreibung der Gleitreibung, d.h. es tritt kein Ruckgleiten (stick-slip) auf. Des Weiteren hat PTFE ein geringes Adhäsionsvermögen und ist bioinert [18].

2.2. Friktion

2.2.1. Physikalische Definition

Obwohl schon den alten Ägyptern das Problem der Reibung bekannt war, befasste sich erst Leonardo da Vinci (1452-1519) in wissenschaftlicher Weise mit dem Reibungsproblem. Er formulierte die Gesetze der trockenen Gleitreibung: „Reibung verursacht die doppelte Anstrengung, wenn die Last verdoppelt wird.“ Weiterhin beobachtete er, dass die Größe der Gleitfläche keinen Einfluss auf die Reibungskraft hat und beschäftigte sich mit dem Reibungskoeffizienten. Seine Versuche gerieten in Vergessenheit, bis sich Amontons (1663-1705) und Desaguliers (1683-1744) erneut mit dem Reibungsphänomen befassten. Desaguliers machte die Adhäsion bzw. Kohäsion für den Reibungsprozess verantwortlich. Später verwarf Coulomb (1736-1806) diese Theorie und entdeckte die Oberflächenrauigkeit als Ursache der Reibungskraft [21].

Bis heute gab es zahlreiche weitere Bemühungen, das Phänomen der Reibung zu durchleuchten, doch das Verständnis der zugrundeliegenden Vorgänge entspricht dem Stand früherer Jahrhunderte [68].

Definition der Reibung:

Reibung ist eine physikalische Kraft, die einer Relativbewegung zwischen zwei einander berührenden Körpern entgegenwirkt.

Man unterscheidet: Haftreibung (statische Reibung) und Gleitreibung (dynamische Reibung).

Beispiel: Drückt man mit einer nicht zu großen horizontalen Kraft gegen eine auf dem Boden liegende Kiste, dann wird sich die Kiste wahrscheinlich nicht bewegen. Grund dafür ist eine vom Boden ausgeübte horizontale **Haftreibungskraft (FH)**, welche die aufgebrachte Kraft ausgleicht. Sie wirkt in entgegengesetzter Richtung zu der von außen angreifenden Kraft.

Wenn man fest genug gegen die Kiste drückt, dann wird sie über den Boden gleiten. Sobald die Kiste in Bewegung ist, werden die molekularen Wechselwirkungen zwischen ihr und dem Fußboden ständig aufgebaut und wieder getrennt. Dieses Phänomen ist auf die **Gleitreibungskraft (FG)** zurückzuführen. Um die Kiste mit einer konstanten Geschwindigkeit zu schieben, muss man eine Kraft aufbringen, die den gleichen Betrag hat wie die Gleitreibungskraft, aber in die entgegengesetzte Richtung wirkt [88].

Das Verhältnis von Reibungskraft (F) und Normalkraft (N) bezeichnet man als Reibungskoeffizient μ , auch Reibungszahl genannt.

$$\mu = F/N$$

Aus Experimenten geht hervor:

μ_G ist kleiner als μ_H .

μ_G hängt von der Relativgeschwindigkeit der Oberflächen ab.

μ_G hängt (wie μ_H) von der Oberflächenstruktur ab. [88]

Näherungswerte einiger Reibungszahlen [88]:

	μ_H	μ_G
Glas auf Glas	0,9	0,4
Stahl auf Stahl	0,7	0,6
Teflon auf Stahl	0,04	0,04
Teflon auf Teflon	0,04	0,04

2.2.2. Friktion in der Kieferorthopädie

Die kippmomentinduzierte kieferorthopädische Friktion tritt bei der Bewegung eines Brackets entlang eines Führungsdrahtes auf.

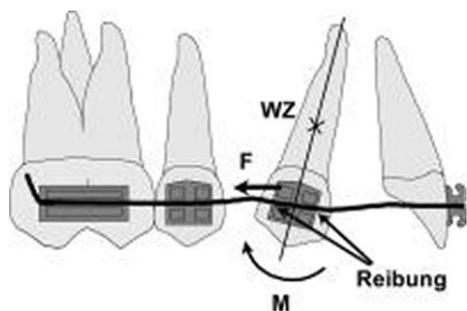


Abb.1 Reibung in der Kieferorthopädie

Die Phasen der bogengeführten Zahnbewegung gestalten sich wie folgt:

Vor Applikation einer orthodontisch wirksamen Kraft liegt der Draht zunächst konfliktfrei im Bracketschlitz.

Durch exzentrische Krafteinwirkung entsteht ein Drehmoment, $[M = F \times d$ (M = Drehmoment, F = am Bracket wirkende Kraft, d= Abstand zwischen Widerstandszentrum und Kraftlinie)], welches den Zahn gegen den Bogen anguliert, bis es zu einem Kontakt zwischen Slotkante und Bogen kommt. Der Zahn wird gekippt.

Eine Kippung des Zahnes erfolgt, solange die orthodontisch wirksame Kraft kleiner als die Rückhaltekraft, d. h. der biologischer Widerstand, des Zahnes ist. Der Bogen wird abhängig von der eingesetzten Kraft und vom Bracket- bzw. Bogenmaterial elastisch deformiert. Es kommt zu einer S-förmigen Verbiegung.

Parallel zu der Kippung kommt es zu einer Rotation des Zahnes um seine Längsachse. Hierdurch wird die Anlagerungskraft zwischen Draht und Slot, sowie Draht und Ligatur erhöht.

Aufgrund der elastischen Eigenschaften des Bogens kommt es zu Antikipp- und Antirotationsmomenten, die auf den Zahn einwirken. Im Wechselspiel zwischen Kippung und Aufrichtung bzw. Rotation und Derotation wird der Zahn entlang des Führungsbogens im Sinne einer Translation bewegt.

Dieses Aufrichtemoment wird in Form zweier antiparalleler, senkrecht zu den reibenden Flächen wirkender Kräfte auf das Bracket übertragen. Die Größe dieser sogenannten Normalkräfte berechnet sich nach der Formel: $N = M/b$ (N = Normalkraft, M = Drehmoment, b = Bracketbreite). Die dadurch erzeugte Friktion ergibt sich aus der Formel: $F = \mu \times N$ (F = Friktionskraft, μ = Friktionskoeffizient der Materialien, N = Normalkraft).

Phänomen der Verklemmung:

Ist die eingesetzte Kraft sehr groß, so kann es zu einer dauerhaften Deformation des Drahtes kommen. Man spricht von dem Zustand der Verklemmung. Eine kontrollierte Bewegung des Zahnes ist dann unmöglich [22, 30].

2.3. Einflussfaktoren auf die Friktion

2.3.1. Ligatur

Die Stärke der ligaturbedingten Reibung entsteht durch die von der Ligatur auf den Bogen ausgeübte Kraft und durch den Reibungskoeffizienten. Diese zwei Faktoren sind bei den verschiedenen Ligaturarten unterschiedlich [37].

In nur wenigen Studien, wie etwa bei Edwards et al sowie Bazakidou et al, erzielen Stahlligaturen und elastische Ligaturen ähnliche Friktionswerte [4, 27].

Die Mehrzahl der Autoren sind sich darüber einig, dass Stahlligaturen geringere Friktionskräfte erzeugen als elastische Ligaturen, solange sie durch Rückrotation entschärft sind [5,10,33, 70,74, 76,80]. Dieses nachträgliche Lösen der Stahlligatur um ca. 90-180 Grad sollte immer erfolgen, da es zu einer Reduktion der Reibung führt. Nach Schumacher et al kann es bei Einsatz einer Stahlligatur ohne Rückrotation zu Friktionswerten in Höhe der orthodontisch eingesetzten Kraft kommen [70].

Ein weiterer Grund dafür, dass Stahlligaturen vergleichsweise wenig ligaturbedingte Friktion erzeugen, liegt in dem niedrigen Reibungskoeffizienten von Edelstahl, welcher als „Goldstandard“ angesehen wird [44].

Chimenti et al verglichen in ihrer Studie silikonüberzogene elastische Ligaturen mit nichtüberzogenen und geben an, bei den silikonüberzogenen Ligaturen signifikant geringere Friktionskräfte gemessen zu haben. Die Größen „small“ und „medium“ sollen hier 13 – 17 % weniger Friktionskraft erzeugt haben als die großen ihrer Art [14].

Nach neusten Bemühungen von Baccetti et al liegt angeblich eine neue nicht konventionelle, passive, elastische Ligatur aus einem neuen Material und in neuer Form vor, die den wenigen Untersuchungen zufolge signifikant geringere Friktionskräfte als konventionelle elastische Ligaturen ausüben soll [3].

Des Weiteren wurde versucht, die Ligaturdrähte auf verschiedenste Weise zu modifizieren. Edwards et al beschreiben, dass mit Teflon beschichtete Ligaturen signifikant weniger Friktion als Stahlligaturen und elastische Ligaturen erzeugen [27]. Im letzten Punkt stimmten ihnen De Franco et al zu [16]. Auch ummantelte Ligaturdrähte mit PTFE (Polytetrafluorethylen) haben aufgrund des geringeren Reibungskoeffizienten eine geringfügig niedrigere Friktion als Stahlligaturen [27].

Solche Ummantelungen lösen sich jedoch häufig vom Ligaturdraht ab, was zu einem Anstieg der Friktion führt [92].

2.3.2. Bracket

2.3.2.1. selbstligierende Brackets

Selbstligierende Brackets kann man in passive und aktive selbstligierende Brackets einteilen.

Die aktiv selbstligierenden Brackets gewährleisten eine kontrollierte Führung des Zahnes am Bogen durch Druck des Bogens auf den Slotboden, wobei dieser Druck zu einem Anstieg der Friktionskräfte führen kann.

Die passiv selbstligierenden Brackets erlauben dem Bogen ein ungehindertes Durchgleiten durch den Bracketslot, wobei ein wenig "Spiel" besteht, was wiederum zu Kontrollverlusten führen kann, die Friktion allerdings eher reduziert.

In den bisher publizierten Untersuchungen zu diesem Thema wurden hauptsächlich einzelne selbstligierende Brackets miteinander oder mit einem „straight-wire“ Bracket verglichen.

Generell wird in der Literatur beschrieben, dass selbstligierende Brackets nicht unbedingt friktionsreduziert seien [6,72,76,80]. Bednar et al geben an, dass selbstligierende Orec Stahl Brackets nicht weniger Friktion als Ormco Stahlbrackets mit Stahlligatur oder mit elastischer Ligatur zeigen [5].

Pizzoni et al widersprechen dem und geben an, dass selbstligierende Brackets deutlich weniger Friktion als konventionelle Brackets aufweisen [61].

Weitgehend übereinstimmend ist jedoch die Aussage, dass passiv selbstligierende Systeme weniger Friktion als aktiv selbstligierende Systeme zeigen [9,15,85].

Khambay et al gehen soweit, dass sie behaupten, unter ihren Versuchsbedingungen seien passiv selbstligierende Brackets die einzige Methode, die fast zu einer Eliminierung der ligaturbedingten Friktion führt [43].

Untersuchungen einzelner Brackets erfolgten z.B. von Redlich et al. Sie testeten fünf verschiedene „ friktionsreduzierte Brackets“ aus Stahl gegen ein Kontrollbracket (Omni Arch, GAC International, Bohemia, NY, USA). Gruppe1: Nu Edge (TP Orthodontics, LaPorte, Ind, USA) 2: Discovery (Dentaurum, Ispringen, Germany) 3: Synergy (Rocky Mountain Orthodontics, Denver, Colo, USA) 4: Friction Free (American Orthodontics, Sheboygan, Wis, USA) 5: Time, ein selbstligierendes Bracket (American Orthodontics, Sheboygan, Wis, USA). Es wurden drei verschieden dimensionierte Stahlbögen genutzt .018“, .018“ x .025“, .019“ x .025“. Die Gruppe 4 (Friction Free) zeigte die geringste Friktion und Gruppe 5 (Time) zeigte die höchsten Friktionswerte (auch höher als das Kontrollbracket).

Des Weiteren wurden mehrere Versuche mit den folgenden selbstligierenden Brackets durchgeführt: Damon 2 (Sybron Dental Specialities Ormco, Orange, Cal, USA) , Damon SL (A-company, San Diego, Cal, USA) und Speed (Strite Industries, Cambridge, Ontario, Canada) .

Alle drei Brackets zeigten im Vergleich mit einem konventionellen Stahlbracket immer geringere Friktionswerte (Damon SL [15, 81], Damon 2 [12,32], Speed Bracket [33]).

Hain et al beschreiben, dass das Damon 2 Bracket in direktem Vergleich mit dem Speed Bracket eine geringere Friktion zeigte [32].

2.3.2.2. Bracketform

Neben der Art der Ligierung spielt bei der kieferorthopädischen Friktion auch die Bracketform eine Rolle.

2.3.2.3. Bracketbreite

Obwohl einige Autoren dagegensprechen [1,28,29,40,90], vertritt die Mehrheit [22, 23,24,31,52,59,74,75,87,] die Auffassung, dass ein breiteres Bracket im Gegensatz zu einem schmaleren weniger Friktion verursacht. Dies geschehe deswegen, weil es bei geringer Bracketbreite schneller zu einer Angulation zwischen Bracket und Bogen komme. Dies wurde bei Versuchen mit fest eingestellter Angulation bestätigt [1,29,60].

Muirhead et al, sowie Edwards et al behaupten übereinstimmend ein Doppelbracket erzeuge im Vergleich zu einem Einzelbracket eine stärkere Friktion [54,29].

Slotgröße:

Über den Einfluss der Slotgröße auf die Friktion wurde in der Literatur bisher nur wenig berichtet. Nach Vaughan et al hat sie nur sehr wenig Einfluss auf die Friktion [89].

Bei einer Untersuchung von Willems et al wurden Stahlbrackets und Bögen miteinander getestet, wobei die Kombinationen Bracketslot .018 und Bogen .018 x .025, sowie Bracketslot .022 mit Bogen .016 x 0.22 (sogenannte „slot filling wire-bracket combinations“) schlechter abschnitten als z.B. Bracket .018 und Bogen .017 x .025, sowie Bracket .022 mit Bogen .017 x .025. Zu bemerken ist, dass durch eine besondere Zentrierungsmethode eine geringere Friktion erzielt wurde. Die „slot filling wire-bracket combinations“ sind nicht zur Zahnbewegung, sondern zur Verankerung empfohlen [91].

2.3.2.4. Bracketdesign

Bei Brackets mit unkonventionellem Design kann im Vergleich zu denen mit konventionellem Design eine geringere Friktion nachgewiesen werden, es treten jedoch negative Nebenwirkungen im Sinne von Nivellierungsverlusten auf [74].

Speziell bei Keramikbrackets zeigen gegossene Brackets weniger Friktion als monokristalline Keramikbrackets [59]. Generell kann hier die relativ hohe Friktion durch das Abrunden der Slotbasis reduziert werden [90]. Hierbei beobachteten Thorstenson et al bei Brackets mit abgeschrägten Kanten, wie etwa dem Rocky Mountain Orthodontic Synergy-Bracket oder dem VersaT-Bracket, (die durch die Abschrägung zwar eine Vergrößerung des kritischen Kontaktwinkels erreichen), verstärkt Verklemmungen [86].

2.3.2.5. Bracketmaterial

Der Einfluss des Bracketmaterials auf die Friktion hängt entscheidend vom Friktionskoeffizienten μ des Materials ab.

Stahl:

Generell besteht laut Kapur et al ein deutlicher Trend darin, dass die Friktionskraft bei wiederholtem Gebrauch des Brackets steigt [42].

Nach Untersuchungen von Michelberger et al zeigen Stahlbrackets einen signifikant geringeren Friktionskoeffizienten als Titanbrackets bei allen getesteten Bögen bis auf .020" Stahlrundbögen [53].

Außerdem ergab eine Studie von Vaughan et al, dass gesinterte Stahlbrackets zu 40% weniger Friktion führen als ungesinterte [89].

Pratten et al veröffentlichten eine Studie, in der Stahlbrackets einen geringeren Friktionskoeffizienten zeigen als Keramikbrackets [62]. Dem stimmten auch Kusy et al bei dem Vergleich des Friktionskoeffizienten verschiedener Bracket – Bogenkombinationen zu. Hier zeigten polykristalline Keramikbrackets immer einen höheren Friktionskoeffizienten als Stahlbrackets [49], dies Ereignis zeigte sich ebenso in weiteren Untersuchungen [25,69,82].

Bei einer Untersuchung von Tanne et al [78] wurde die Reibung von Stahlbrackets mit der von Keramikbrackets verglichen. Ergebnisse: 1. Die Zahnbewegung, die durch das Keramikbracket ausgelöst wurde, war signifikant niedriger, als jene, die durch das Stahlbracket ausgelöst wurde. 2. Die Drahtoberfläche wurde deutlich mehr durch das Keramikbracket, als durch das Metallbracket beschädigt. 3. Die Slotoberfläche und die Ecken des Keramikbrackets waren deutlich stärker porös als die des Stahlbrackets.

Keramik:

Auch über die Friktionseigenschaften von Keramikbrackets wird in der Literatur zahlreich berichtet.

Einig sind sich die Autoren dahingehend, dass monokristalline und polykristalline Keramikbrackets mehr Friktion zeigen als Stahlbrackets. [2,5,16,36,49,51,69].

Im Vergleich zwischen mono- und polykristallinen Keramikbrackets zeigen polykristalline weniger Friktion [69].

Eine Reduktion der sonst relativ hohen Friktion bei Keramikbrackets kann nach einheitlicher Meinung durch Abrunden der Slotbasis und Beschichtung des Slots mittels Stahleinlage erzielt werden [90, 56].

Nach Angaben von Omana et al zeigen glatte, gegossene Keramikbrackets weniger Friktion als andere Keramikbrackets.

Kusy et al erstellten eine 3-D Friktionskarte die aufzeigt, dass Metall überzogene Keramikbrackets (nur der Slot) in ihrer Funktion vergleichbar mit Stahlbrackets sind. 18-kt Goldinserts zeigen eine noch bessere Funktion als Stahl. Wenn die Morphologie der Metallinserts verbessert wird, zeigen diese Keramikbrackets nicht nur eine gute Ästhetik, sondern auch eine minimale Friktion unter den konventionell ligierten Brackets. [50]

Cha et al verglichen folgende Brackets untereinander: 1. polykristalline Keramikbrackets, 2. polykristalline Keramikbrackets mit Stahlslot, 3. polykristalline Keramikbrackets mit einer Siliziumbeschichtung, 4. monokristalline Saphirbrackets, 5. Stahlbrackets. Das polykristalline Keramikbracket mit Siliziumbeschichtung zeigt Friktionswerte, die vergleichbar mit denen des Stahlbrackets sind und geringer als die Werte der anderen Keramikbrackets [13].

Untersuchungen zu Zirkonoxid-Brackets machten Tanne et al. Das neue Zirkonoxid-Bracket der Firma Hoya Corp., Tokyo, Japan, das sich durch eine glattere Oberfläche auszeichnet, wurde gegen zwei andere Keramikbrackets^{1,2} bezogen auf seine Friktionseigenschaften, gemessen und zeigte geringere Friktionswerte [79].

¹ polykristallines Keramikbracket (Transcendend, Unitek Corp. Monrovia, Calif.)

² Zirkonoxidbracket (Torayceram Hi-Brace, Toray Corp., Tokyo, Japan)

Titan:

Titanbrackets wurden bisher nicht genauer hinsichtlich ihrer Friktionseigenschaften untersucht. Lediglich eine Studie von Bourauel et al gibt Hinweise darauf, dass Titanbrackets sehr geringe Friktionswerte aufweisen [10].

Kunststoff:

Nach Untersuchungen von Telepsis et al zeigen Polykarbonatbrackets generell die höchste Friktion im Vergleich mit Stahl-, Keramik- und Saphirbrackets [82].

Nach Angaben von Bazakidou et al zeigen Kompositbrackets geringere Friktion als Keramik- und Stahlbrackets [4].

2.3.3. Drähte

Die Art des Bogendrahtes beeinflusst, genau wie die des Brackets, die Friktionseigenschaften einer Multibandapparatur. Entscheidend bei der Auswahl des Bogenmaterials ist ebenso wie bei der Auswahl des Bracketmaterials der Friktionskoeffizient.

2.3.3.1. Legierung

Edelstahl:

In der Literatur ist man sich einig darüber, dass Stahlbögen den geringsten Friktionskoeffizienten bzw. die geringste Friktion im Vergleich zu allen anderen Bogenmaterialien erzielt [2,4,8,11,22,23,36,49,53,56,61,62,83,], besonders in Kombination mit Metallbrackets [24,31,70,87]. Nach Untersuchungen von Drescher et al zeigt HI-T-Stahl eine geringere Friktion als andere Stahlbögen, CoCr, NiTi, und TMA [22].

Nur Cacciafesta konnte keinen signifikanten Unterschied zu einem Ni-Ti Bogen feststellen [12].

Kobalt-Chrom (CoCr):

Drescher et al, sowie Angolkar et al beschreiben, dass Kobalt-Chrom-Legierungen weniger Friktion als TMA und NiTi zeigen [2,22,23]. Da sie eine eher glatte Oberfläche aufweisen, erzielen sie besonders in Verbindung mit Metallbrackets relativ wenig Friktion [24,31,70,87].

β-Titan (TMA):

TMA Bögen zeigen im Vergleich zu Stahlbögen, CoCr und NiTi Bögen eine höhere Friktion, bzw. einen höheren Friktionskoeffizienten [2,12,22,23, 49,51,52,56,71]. Dies erfolgt laut Drescher et al, sowie anderen [24,31,70,87], auf Grund der starken Oberflächenrauigkeit von β-Titan. Nur wenige Stimmen widersprechen diesen Aussagen [47,63].

Nickel Titan (NiTi):

Wie oben beschrieben, zeigen NiTi Bögen mehr Friktion als HI-T-Stahl, Stahlbögen und CoCr Bögen, aber weniger als TMA. [2,12,22,23,56,60,62,83].

Komposit:

Zufall et al entwickelten einen Kompositdraht der nach ihren Angaben verglichen mit anderen Studien mehr Friktion als Stahlbögen aber weniger als NiTi und TMA Bögen zeigte [92].

Oberflächenmodifikation:

Die Oberflächenrauigkeit des Drahtes beeinflusst die Gleiteffektivität, sowie das Korrosionsverhalten und die Ästhetik [8].

Drescher et al, sowie Kusy et al kamen zu den Ergebnissen, dass ein Anstieg der Oberflächenrauigkeit zu einer stärkeren Friktion führt [22,23, 48,49, 70].

Aus diesen Gründen wurde versucht, durch verschiedene Oberflächenmodifikationen die Friktion zu reduzieren.

Hier werden besonders Teflon Beschichtungen als friktionsreduzierend beschrieben [9,35,77]. Als problematisch gilt jedoch ein relativ hoher Abrieb der Beschichtung nach Gebrauch [55].

Des Weiteren wurden Ionen-implantierte β -Titan Bögen getestet. Sie haben einen generell höheren Friktionskoeffizienten als Stahlbögen [53] und führen somit nicht zu einer Friktionsreduktion.

2.3.3.2. Dimension

Auch die Dimension der Bögen beeinflusst die Friktion. Bezogen auf die Querschnittsform kann festgestellt werden, dass runde Bögen weniger Friktion als rechteckige erzielen [2,40,57,61,89]. Bezogen auf den Durchmesser wird in der Literatur fast ausnahmslos beschrieben, dass die Friktion mit steigendem Durchmesser ansteigt [1, 2, 12,19, 22, 23,24, 28, 29,34,40,41,57,65,89], wobei der vertikale Drahtquerschnitt für das Friktionsverhalten ausschlaggebend ist [23,24].

Ebenso steigt mit Anstieg der Angulation die Friktion [1, 17,24, 28,29,34,56,57,60,61, 82].

2.3.4. Milieu

Der Einfluss des Milieus wird in der Literatur eher kontrovers diskutiert. Einige Autoren beschreiben einen nur unwesentlichen Einfluss auf die Friktion bei Zugabe von Speichel [1,23,25,31, 38,60,65]. Andere wiederum sprechen von einem Anstieg der Friktion bei Zugabe von Speichel [20, 45, 49,62, 77,87,89], wobei diese meist als gering beschrieben wird.

Kao et al stellen eine Untersuchung vor, in der die Friktion zwischen Metallbrackets und Bögen a) nach der Lagerung in fluoridhaltiger Lösung sowie b) nach der Lagerung

in künstl. Speichel (pH 6.75) gemessen wurde. Sie geben an, dass die Reibung nach der Lagerung in fluoridhaltiger Lösung höher war als nach der Lagerung in künstlichem Speichel [39].

3. Problemstellung

Durch die im Kapitel kieferorthopädische Friktion beschriebene Reibungskraft, die während der bogengeführten Zahnbewegung entsteht, kommt es dazu, dass nicht die gesamte am Bracket angelegte Kraft orthodontisch wirksam werden kann.

Dies kann dazu führen, dass bei zu großer Friktion zwischen Bracket und Bogen die gewünschte Bewegung des Zahnes unterbleibt oder stark verzögert wird.

Um die gewünschte Bewegung des Zahnes zu erreichen, muss also mehr Kraft aufgewendet werden. Nach Drescher et al hat man selbst bei optimaler Materialauswahl mit einem Kraftverlust durch Friktion von mindestens 50 % zu rechnen [23], was wiederum in Fällen mit kritischer Verankerungssituation zu Problemen führen kann.

Somit wäre es sehr wünschenswert, die Friktionskraft zwischen Bracket und Bogen so gering wie möglich zu halten.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Fragestellung, ob das Einsetzen von Tefloneinlagen in Stahlbrackets zu einer Reduktion der Friktionskraft führt.

4. Material und Methode

4.1. Untersuchte Brackets

In der vorliegenden Studie wurde das Friktionsverhalten fünf verschiedene Brackets getestet. Die Brackets unterschieden sich im Material.

1. Keramikbracket polykristallin: Fascination³



Abb.2 Bracket Fascination

2. Keramikbracket monokristallin: Inspire Ice⁴

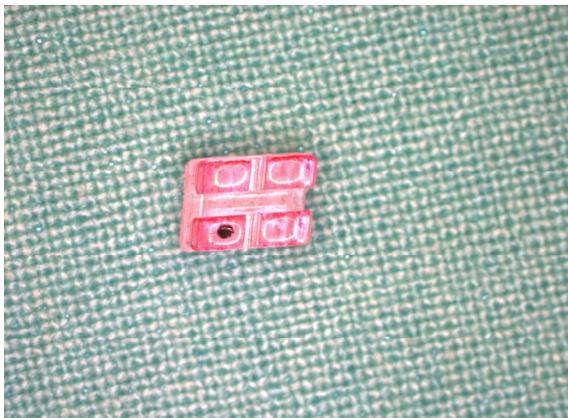


Abb.3 Bracket Inspire Ice

³ Fascination, Dentauro, Ispringen, Germany

⁴ Inspire Ice, Ormco Corporation, Glendora, CA, USA

3. Kunststoffbracket : Opal⁵



Abb. 4 Bracket Opal

4. Stahlbracket: Diamond Ormesh⁶

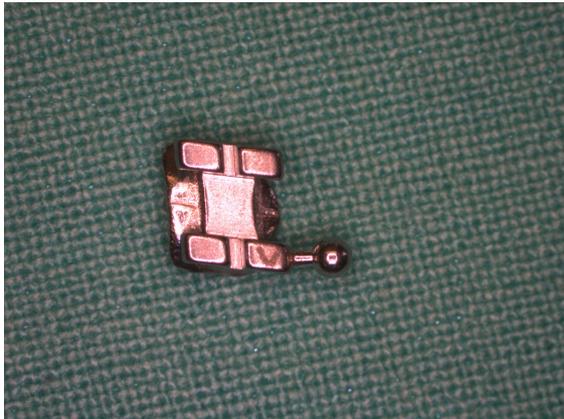


Abb. 5 Bracket Diamond Ormesh

⁵ Opal, Ultradent Products, Inc., South Jordan, UT, USA

⁶ Diamond Ormesh, Ormco Corporation, Glendora, CA, USA

5. Edelstahlbracket mit Tefloneinlagen



Abb.6 OK Stahlbracket mit Tefloneinlagen



Abb.7 UK Stahlbracket mit Tefloneinlagen

Von jedem Produkt wurden jeweils sechs breite (OK Eckzahnbrackets) und sechs schmale (UK Frontzahnbrackets) Brackets untersucht.

Die sog. Teflonbrackets liegen als handgefertigte Prototypen vor. Sie bestehen aus einem Edgewise Stahlbracket, in welches per Hand vier runde Teflonstifte eingesetzt wurden.

Alle Brackets hatten die Slotdimension 0,018“.

4.2. Ligatur

Die Messung der Reibungskräfte erfolgte für alle Brackettypen mit vorgeformten Stahlligaturen der Stärke 0,010“.

Diese wurde „locker“ angewandt, das heißt die Ligatur wurde durch Rückrotation um ca. 180 Grad gelockert, sodass eine leichte Beweglichkeit ohne Verlust der Ligatur gegeben war.



Abb.8 Stahlligatur

4.3. Verwendete Bögen

Es wurden drei Bögen unterschiedlichen Materials eingesetzt (Stangendraht ohne Bogenform):

1. Nickel Titan⁷

2. Stahl⁸

3. TMA⁹

Jeder Bogentyp wurde in zwei Ausführungen gemessen:

1. Rundbogen mit dem Durchmesser von 0,016“

2. Vierkantbogen mit einer Dimension von 0,016“ x 0,022“

Ausnahme: Durch die eingesetzten Teflonstifte veränderte sich das Bracketdesign dahingehend, dass es nicht richtig gelang, die runden Drähte im UK Teflon-Bracket zu führen, sie sprangen immer wieder heraus. Deshalb wurde hier jeweils nur ein Messwert erfasst.

4.4. Versuchsaufbau

Die Friktionsmessungen wurden mittels Simulation einer bogengeführten Eckzahnbewegung durchgeführt. Dies erfolgte mit Hilfe des RMS (robotergestütztes Messsystem), dessen Hauptkomponente der Präzisionsroboter RX 60 der Firma Stäubli darstellt.

⁷ Nickel-Titan Stangendraht, Smile Dental, Düsseldorf, Germany

⁸ Stahlstangendraht, Smile Dental, Düsseldorf, Germany

⁹ TMA Archwires, Ormco, Glendora, Ca, USA

Zunächst wurden die Brackets mittels einer Positionierungslehre zentral auf einer Schraube adhäsiv befestigt. Die Positionierungslehre adaptierte das Bracket so, dass sich der Bracketslot orthogonal ausgerichtet im Mittelpunkt der Schraubenlängsachse befand, sodass Inset, Offset, Torque und Angulation des Slots keinen Einfluss auf die Messungen nehmen konnten.

Danach erfolgte die Anbringung der Schraube an einer kugelgelagerten Achse des Roboters.

Der Bogen wurde an einem 3D Kraft-Moment Sensor (Schunk FTS Nano 20) befestigt und mittels Ligatur mit dem Bracket locker verbunden.

Um Verfälschungen des Versuchsaufbaus vorzubeugen, wurde vor jeder einzelnen Messung eine „Nullmessung“ ohne Gewicht durchgeführt, deren Friktionswert von dem der Hauptmessung abgezogen wurde. Während der Hauptmessung wurde das Bracket mit 10 Nmm gegen den Bogen anguliert, dies erfolgte mit Hilfe eines Gewichtes, das an das Ende des Hebelarms eingehängt wurde.

Zwei kugelgelagerte Rollen, durch welche der Draht eine zusätzliche Führung erhielt, eine über und eine unter dem befestigten Bracket, simulierten die Nachbarzähne und ermöglichten so eine möglichst realistische Nachstellung der bogengeführten Eckzahnbewegung.

Während der Messung wurde der Draht mit einer Geschwindigkeit von 0,5 mm / s über eine Strecke von 10 cm durch das Bracket geführt, während der Sensor die dazu erforderliche Kraft aufzeichnete.

Diese wurde innerhalb einer Sekunde 10mal von der RMS-Software gespeichert. Die so gewonnenen 2000 Messwerte pro Messung wurden anschließend statistisch analysiert.

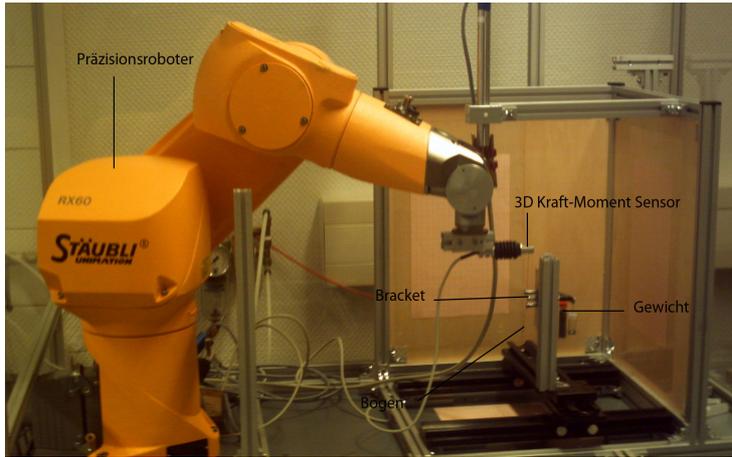


Abb.9 Präzisionsroboter RX 60 der Firma Staubli

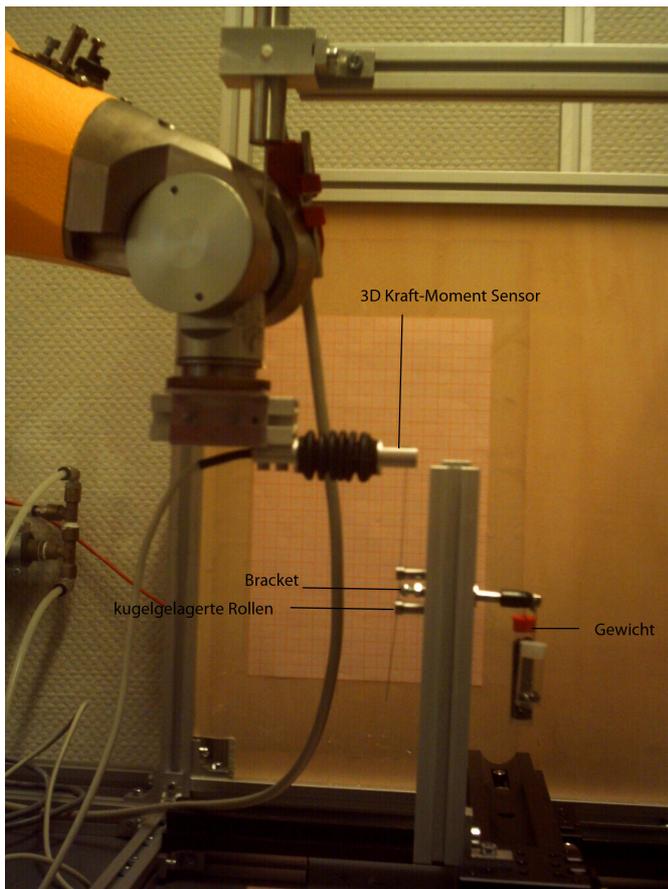


Abb.10 Versuchsaufbau

4.5. Statistische Auswertung

Die ermittelten Werte wurden zunächst in das Tabellenkalkulationsprogramm Excel und danach zur statistischen Auswertung in das Statistikprogramm SPSS 12.0 für Windows importiert.

Sie wurden mit Hilfe des Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstests auf Normalverteilung geprüft.

Generell gilt für alle statistischen Tests eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $p < 0,05$ als signifikant (*) und $p < 0,01$ als sehr signifikant, bzw. hochsignifikant (**) und $p < 0,001$ als höchstsignifikant.

Die Ergebnisse zeigten für den Oberkiefer und für den Unterkiefer einen Wert $p < 0,05$ an, somit besteht in allen Fällen eine signifikante Abweichung der Normalverteilung.

In diesem Fall ist zur weiteren Bearbeitung ein nichtparametrischer Test zu nutzen. Es handelt sich um den Mann-Whitney-U-Test als nichtparametrischer Test für unabhängige Stichproben, d.h. es werden die Messungen aller geprüften Bracketarten bei jeweils dem gleichen Draht paarweise miteinander verglichen, um festzustellen, ob sich die beiden Mittelwerte signifikant voneinander unterscheiden.

Als deskriptive Statistik wurde Mittelwert, Minimum, Maximum und die Standardabweichung berechnet.

Zur Veranschaulichung der statistischen Ergebnisse wurden Boxplots als graphische Darstellung gewählt.

4.6. Rasterelektronenmikroskopische Auswertung

Die Teflonbrackets wurden nach den Friktionsmessungen zunächst durch Aceton gereinigt und anschließend mittels des Sputter Coaters 108auto von Cressington mit einer Goldschicht überzogen.

Die folgende rasterelektronenmikroskopische Untersuchung erfolgte bei 25 kV unter 50facher Vergrößerung mit einem Gerät der Firma Hitachi, Typ S 3000N.

5. Ergebnisse

5.1. Überprüfung der Normalverteilung – Kolmogorov-Smirnov-Test

Kolmogorov-Smirnov-Test	
Gesamter OK	0,011
Gesamter UK	0,031

5.2. Vergleich der Friktion der untersuchten Brackets im OK / UK

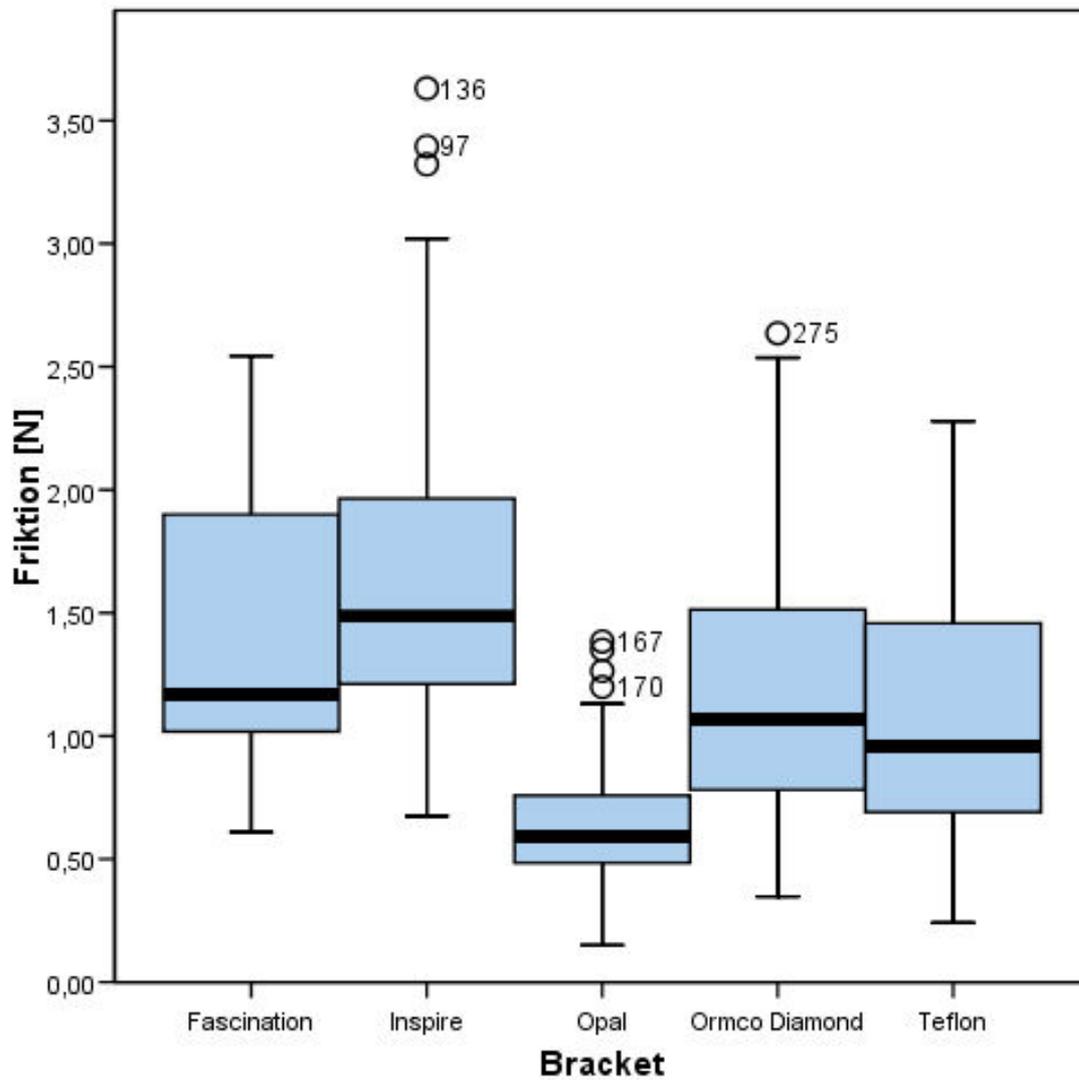


Abb. 1: Boxplot (Vergleich der Friktion aller Brackets im OK / UK bei allen Drähten)

	Fascination	Inspire	Opal	Ormco	Teflon
Fascination		**	***	*	***
Inspire			***	***	***
Opal				***	***
Ormco					n.s.

Tabelle 1: Signifikanzen zu Abb.1 Boxplot (Mann-Whitney-U-Test :Vergleich der Friktion aller Brackets im OK / UK bei allen Drähten)

Vergleicht man die Friktionseigenschaften aller getesteten Brackets (OK und UK bei allen Drähten), so kommt man zu folgenden Ergebnissen:

Insgesamt zeigte das Opal-Bracket im Mittel eine signifikant geringere Friktion als alle anderen getesteten Brackets. Seine Friktion bewegte sich im Rahmen der Werte zwischen 0,15 N und 1,38 N. Der Mittelwert lag bei 0,647 N mit einer Standardabweichung von 0,263 N.

Hierauf folgte das neu entwickelte und hier zum ersten Mal getestete Teflon-Bracket mit Friktionswerten zwischen 0,24 N und 2,28 N, einem Mittelwert von 1,070 N und einer Standardabweichung von 0,474 N.

Die Reibungswerte des Ormco-Brackets unterschieden sich nicht signifikant von denen des Teflon-Brackets. Sie lagen zwischen 0,35 N und 2,64 N, bei einem Mittelwert von 1,198 N und einer Standardabweichung von 0,553 N.

Die Reibung des Fascination-Brackets zeigte signifikant höhere Werte an als die des Opal,- des Teflon,- und die des Ormco Diamond-Brackets, jedoch signifikant niedrigere als die des Inspire-Brackets. Seine Friktionswerte bewegten sich im Rahmen zwischen 0,61 N und 2,55 N. Der Mittelwert lag bei 1,390 N mit einer Standardabweichung von 0,523 N.

Das Inspire-Bracket zeigte somit insgesamt mittelwertig die höchsten Werte an.

Sie bewegten sich zwischen 0,68 N und 3,63 N. Der Mittelwert lag bei 1,677 N mit einer Standardabweichung von 0,659 N.

Im Folgenden werden zunächst die Brackets innerhalb eines Kiefers in Kombination eines Drahtes untereinander verglichen.

5.3. Vergleich der Friktion der untersuchten Brackets im OK

5.3.1. Bogen 1: NiTi

5.3.1.1. NiTi .018"

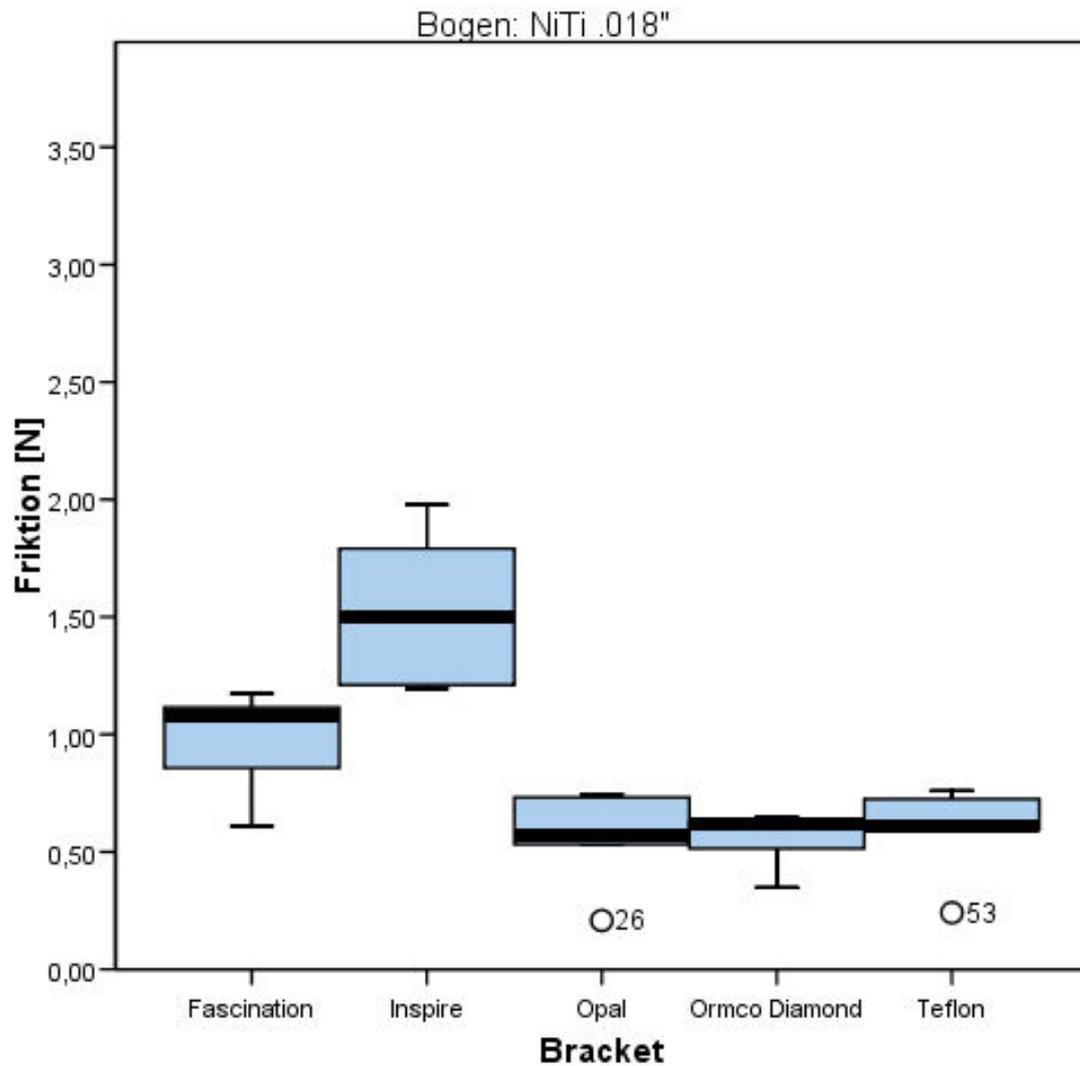


Abb.2: Boxplot (Bracketvergleich im OK bei NiTi .018")

	Fascination	Inspire	Opal	Ormco	Teflon
Fascination		**	*	*	*
Inspire			**	**	**
Opal				n.s.	n.s.
Ormco					n.s.

Tabelle 2: Signifikanzen zu Abb.2 Boxplot (Mann-Whitney-U-Test: Bracketvergleich im OK bei NiTi .018“)

Bei NiTi .018“ zeigte das Opal Bracket mit Werten zwischen 0,21N und 0,75N sowie einem Mittelwert von 0,557N und einer Standardabweichung von 0,217N die geringsten Reibungskräfte, gefolgt von dem Ormco,- und Teflon-Bracket .

Die Friktionswerte dieser drei Brackettypen unterschieden sich nicht signifikant.

Die Reibung des Fascination-Brackets zeigte signifikant höhere Friktionswerte an, als die des Opal,-, des Teflon,- und die des Ormco Diamond-Brackets, jedoch signifikant niedrigere als die des Inspire-Brackets.

Das Inspire-Bracket zeigte somit insgesamt mittelwertig die höchsten Werte an. Diese bewegten sich zwischen 1,20N und 1,98 N. Der Mittelwert lag bei 1,529 N mit einer Standardabweichung von 0,316 N.

5.3.1.2. NiTi .016" x .022"

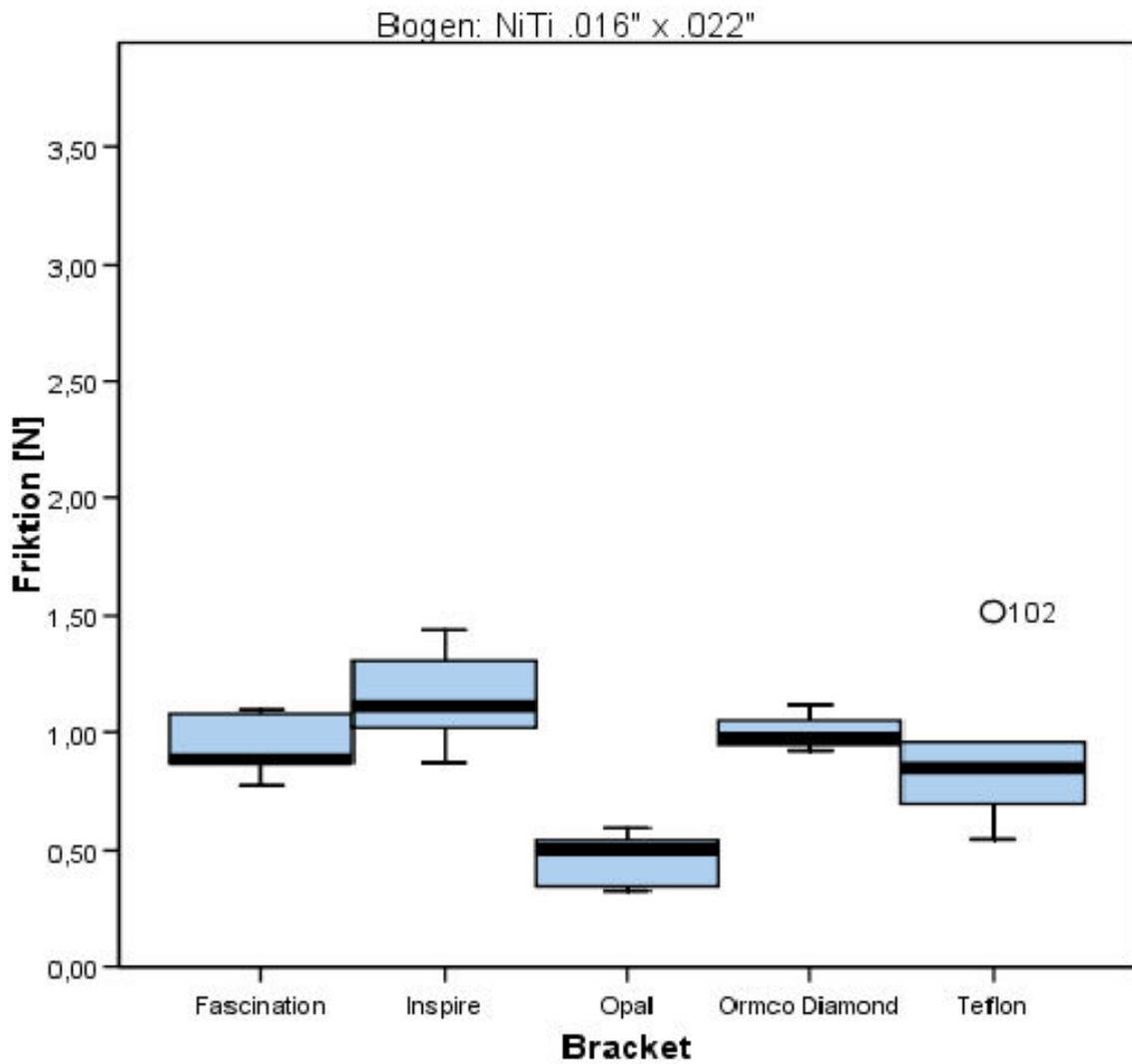


Abb. 3: Boxplot (Bracketvergleich im OK bei NiTi .016" x .022")

	Fascination	Inspire	Opal	Ormco	Teflon
Fascination		n.s.	**	n.s.	n.s.
Inspire			**	n.s.	n.s.
Opal				**	**
Ormco					n.s.

Tabelle 3: Signifikanzen zu Abb. 3 Boxplot (Mann-Whitney-U-Test: Bracketvergleich im OK bei NiTi .016“ x .022“)

Testete man mit einem vierkant NiTi Draht, so zeigte sich deutlich, dass das Opal-Bracket mit einem Minimum von 0,33 N und einem Maximum von 0,60 N, einem Mittelwert von 0,463 N bei einer Standardabweichung von 0,121 N signifikant geringere Friktionswerte als alle anderen getesteten Brackets aufwies.

Die höchsten Werte wurden bei dem Inspire-Bracket gemessen. Sie lagen zwischen einem Minimum von 0,87 N und einem Maximum von 1,44 N. Der Mittelwert betrug 1,143 N bei einer Standardabweichung von 0,211 N. Die Friktionswerte des Inspire-Brackets unterschieden sich nicht signifikant von den Werten des Fascination,- des Ormco- und des Teflon-Brackets.

5.3.2. Bogen 2: Stahl

5.3.2.1. Stahl .018"

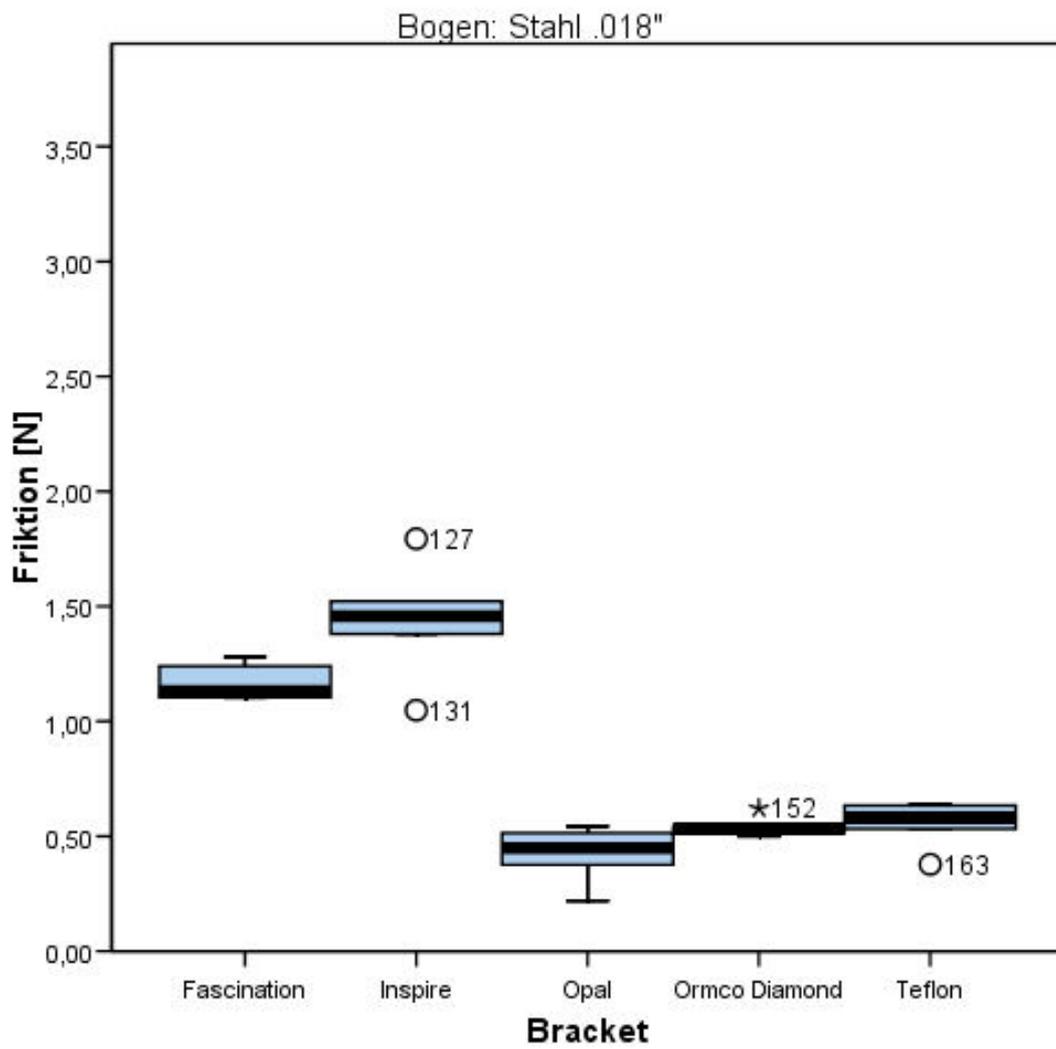


Abb. 4: Boxplot (Bracketvergleich im OK bei Stahl 0.18")

	Fascination	Inspire	Opal	Ormco	Teflon
Fascination		n.s.	**	**	**
Inspire			**	**	**
Opal				n.s.	n.s.
Ormco					n.s.

Tabelle 4: Signifikanzen zu Abb. 4 Boxplot (Mann-Whitney-U-Test :Bracketvergleich im OK bei Stahl 0.18“)

Die geringsten Friktionswerte zeigte auch in diesem Fall das Opal-Bracket. Die Friktionswerte lagen hier zwischen 0,22 N und 0,54 N bei einem Mittelwert von 0,426 N und einer Standardabweichung von 0,117 N.

Die Werte des Ormco Diamond-Brackets, sowie die des Teflon-Brackets lagen geringfügig über denen des Opal-Brackets, wobei hier keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden konnten.

Signifikant deutlich höher lagen die gemessenen Reibungswerte des Fascination-Brackets, welche nur noch von den Werten des Inspire-Brackets übertroffen wurden. Seine Friktionswerte lagen zwischen 1,05 N und 1,79 N bei einem Mittelwert von 1,443 N und einer Standardabweichung von 0,241 N.

Ein signifikanter Unterschied zwischen den Friktionswerten des Fascination,- und denen des Inspire-Brackets zeigte sich nicht.

5.3.2.2. Stahl .016" x .022"

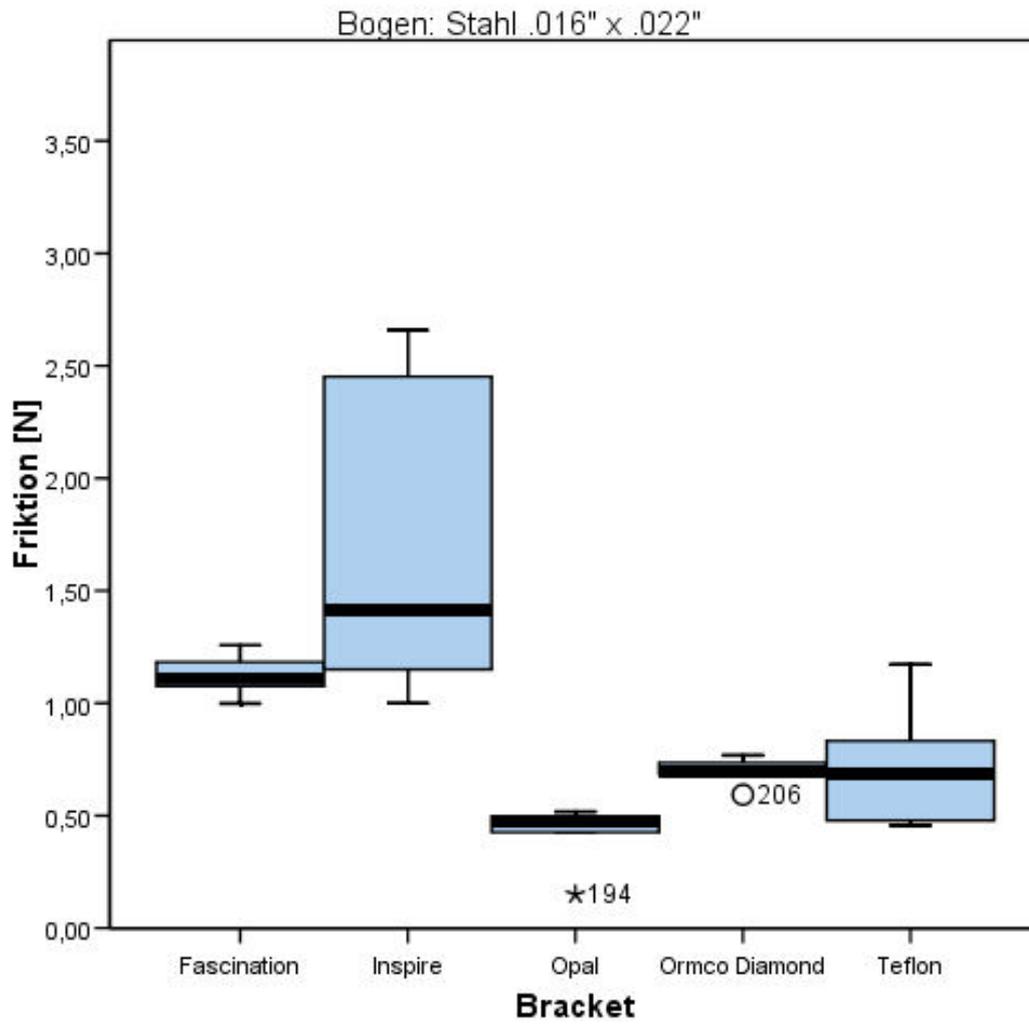


Abb. 5: Boxplot (Bracketvergleich im OK bei Stahl .016" x .022")

	Fascination	Inspire	Opal	Ormco	Teflon
Fascination		n.s.	**	**	*
Inspire			**	**	**
Opal				**	n.s.
Ormco					n.s.

Tabelle 5: Signifikanzen zu Abb. 5 Boxplot (Mann-Whitney-U-Test: Bracketvergleich im OK bei Stahl .016“ x .022“)

Bei einem Stahldraht mit der Dimension .016“ x .022“ zeigte das Opal-Bracket mit Werten zwischen 0,15 N und 0,52 N sowie einem Mittelwert von 0,423 N und einer Standardabweichung von 0,137 N die geringsten Reibungskräfte, gefolgt von dem Teflon- und dem Ormco-Bracket.

Die Friktionswerte des Ormco-Diamond-Brackets und die des Opal-Brackets unterschieden sich signifikant, wobei es keinen signifikanten Unterschied zwischen den Werten des Opal-Brackets und denen des Teflon- Brackets gab.

Ein signifikanter Unterschied zwischen den Friktionswerten des Fascination- und denen des Inspire-Brackets zeigte sich nicht, wobei das Inspire-Bracket mit einem Minimalwert von 1,00 N und einem Maximalwert von 2,66 N, sowie einem Mittelwert von 1,681 N und einer Standardabweichung von 0,701 N im Mittel, die höchsten Friktionswerte zeigte.

Die beiden Brackets zeigten jedoch signifikant höhere Werte verglichen mit den anderen drei Brackettypen: Opal, Ormco-Diamond und Teflon.

5.3.3. Bogen 3: TMA

5.3.3.1. TMA .018"

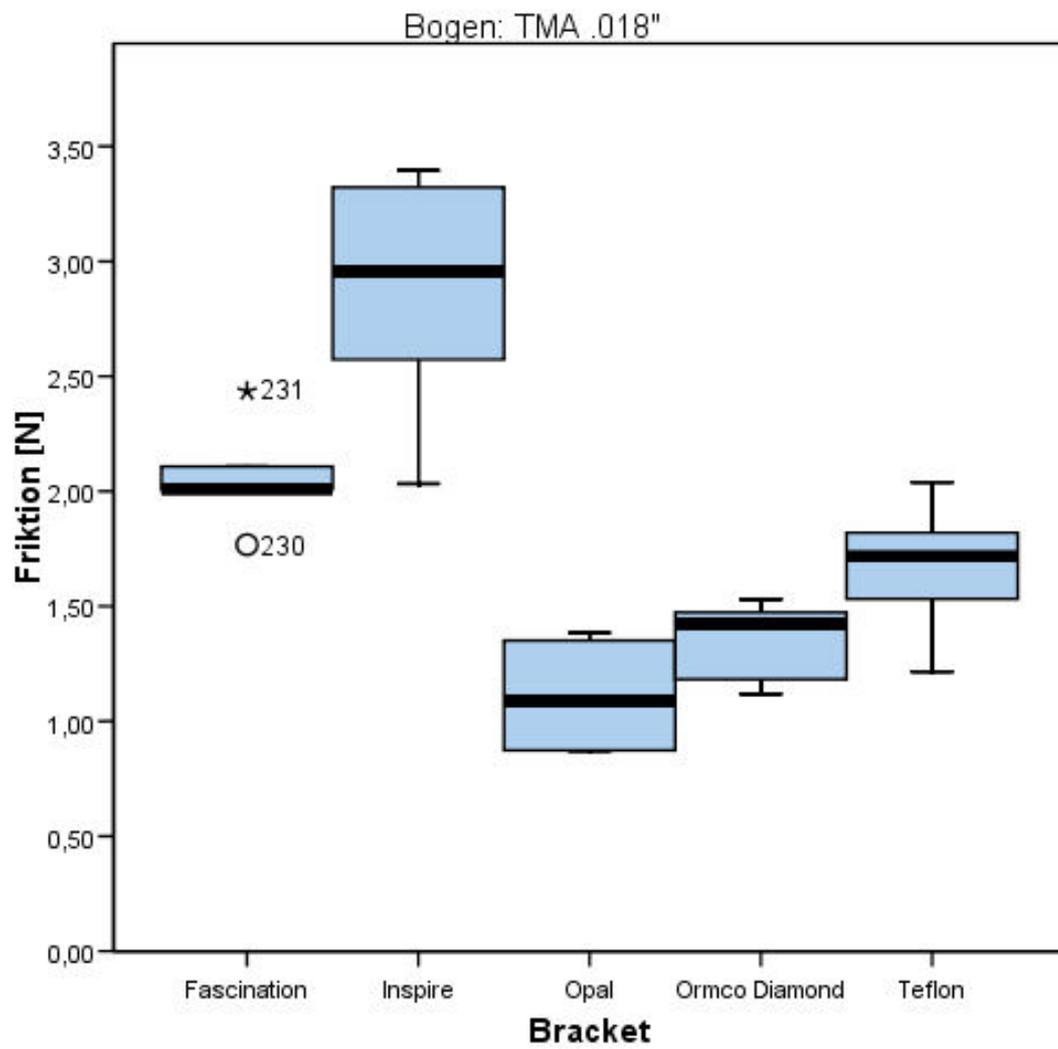


Abb. 6: Boxplot (Bracketvergleich im OK bei TMA .018"

	Fascination	Inspire	Opal	Ormco	Teflon
Fascination		**	**	**	*
Inspire			**	**	**
Opal				n.s.	**
Ormco					*

Tabelle 6: Signifikanzen zu Abb. 6 Boxplot (Mann-Whitney-U-Test: Bracketvergleich im OK bei TMA .018“)

Hier zeigten das Opal-Bracket und das Ormco-Diamond-Bracket die geringsten Friktionswerte. Unter ihnen konnte kein signifikanter Unterschied ermittelt werden, wobei das Opal-Bracket bei Werten zwischen 0,87 N und 1,38 N, einem Mittelwert von 1,109 N und einer Standardabweichung von 0,234 N mittelwertig die geringsten Friktionswerte zeigte.

Signifikant höhere Werte zeigten die anderen drei Brackettypen in folgender Reihenfolge an: Teflon-Bracket, Fascination-Bracket und mit den deutlich höchsten Friktionswerten zwischen 2,03 N und 3,40 N, sowie einem Mittelwert von 2,872 N bei einer Standardabweichung von 0,509 N das Inspire-Bracket.

5.3.3.2. TMA .016 x .022“

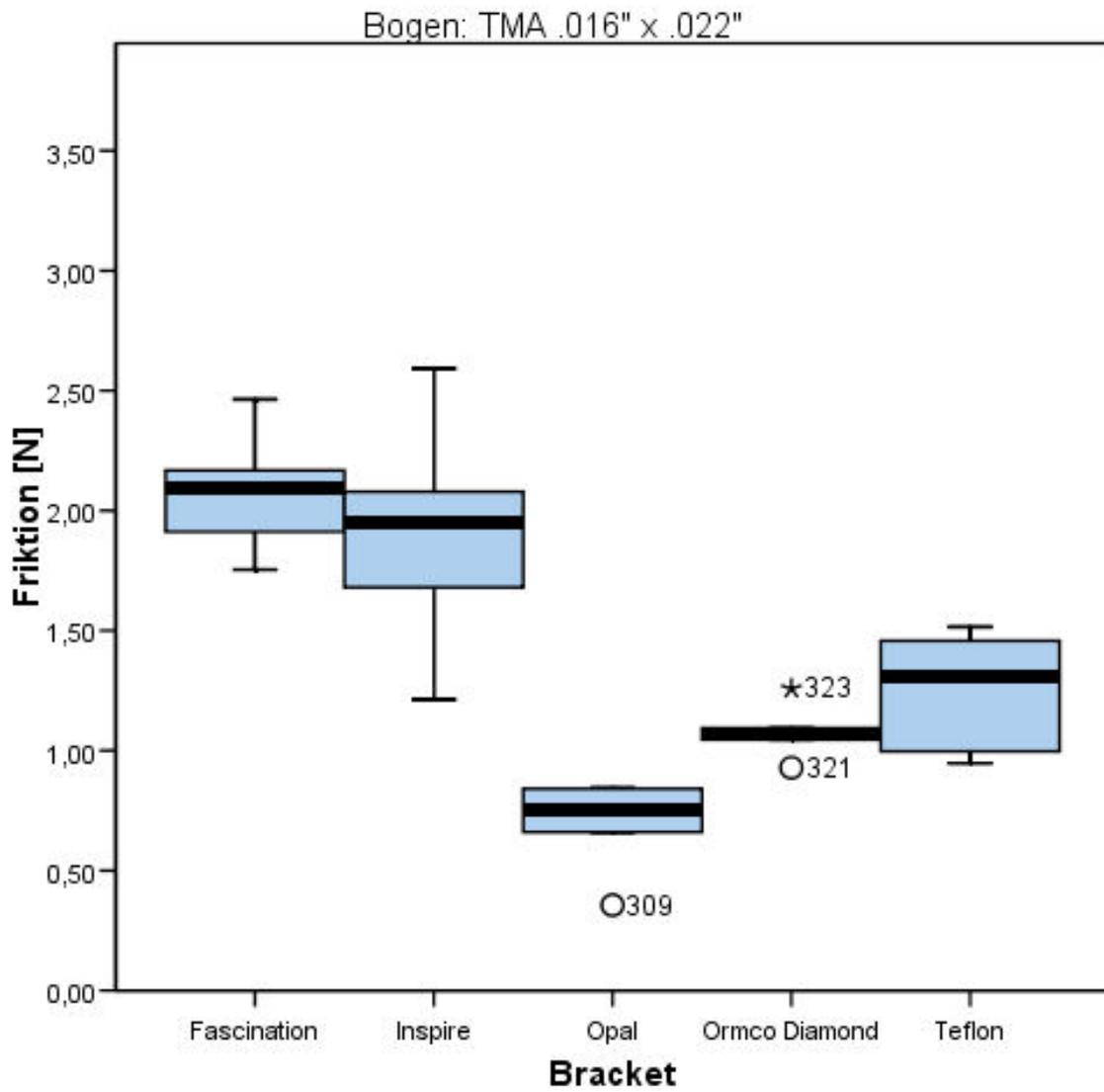


Abb. 7: Boxplot (Bracketvergleich im OK bei TMA .016" x .022")

	Fascination	Inspire	Opal	Ormco	Teflon
Fascination		n.s.	**	**	**
Inspire			**	**	*
Opal				**	**
Ormco					n.s.

Tabelle 7: Signifikanzen zu Abb.7 Boxplot (Mann-Whitney-U-Test: Bracketvergleich im OK bei TMA .016“ x .022“)

Die Ergebnisse der Messungen mit Vierkant TMA Bögen der Dimension .016“ x .022“ zeigten für das Opal-Bracket signifikant niedrigere Werte im Vergleich zu allen anderen getesteten Brackets. Seine Werte lagen zwischen 0,0,36 N und 0,85 N, sowie einem Mittelwert von 0,691 N und einer Standardabweichung von 0,202 N.

Die Werte des Ormco-Diamond-Brackets und die des Teflon-Brackets unterschieden sich untereinander nicht signifikant, waren aber, wie oben beschrieben, signifikant höher als die Friktionswerte des Opal-Brackets, aber auch signifikant niedriger als die Werte von Inspire und Fascination.

Das Fascination-Bracket zeigte hier mit Ergebnissen zwischen 1,75 N und 2,46 N, sowie einem Mittelwert von 2,081 N bei einer Standardabweichung von 0,241 N die höchste Reibung.

5.4. Vergleich der Friktion der untersuchten Brackets im UK

Durch die eingesetzten Teflonstifte veränderte sich das Bracketdesign dahingehend, dass es nicht richtig gelang, die runden Drähte im UK Teflon-Bracket zu führen, er sprang immer wieder heraus. Deshalb wurde hier jeweils nur ein Messwert erfasst.

5.4.1. Bogen 1: NiTi

5.4.1.1. NiTi .018“

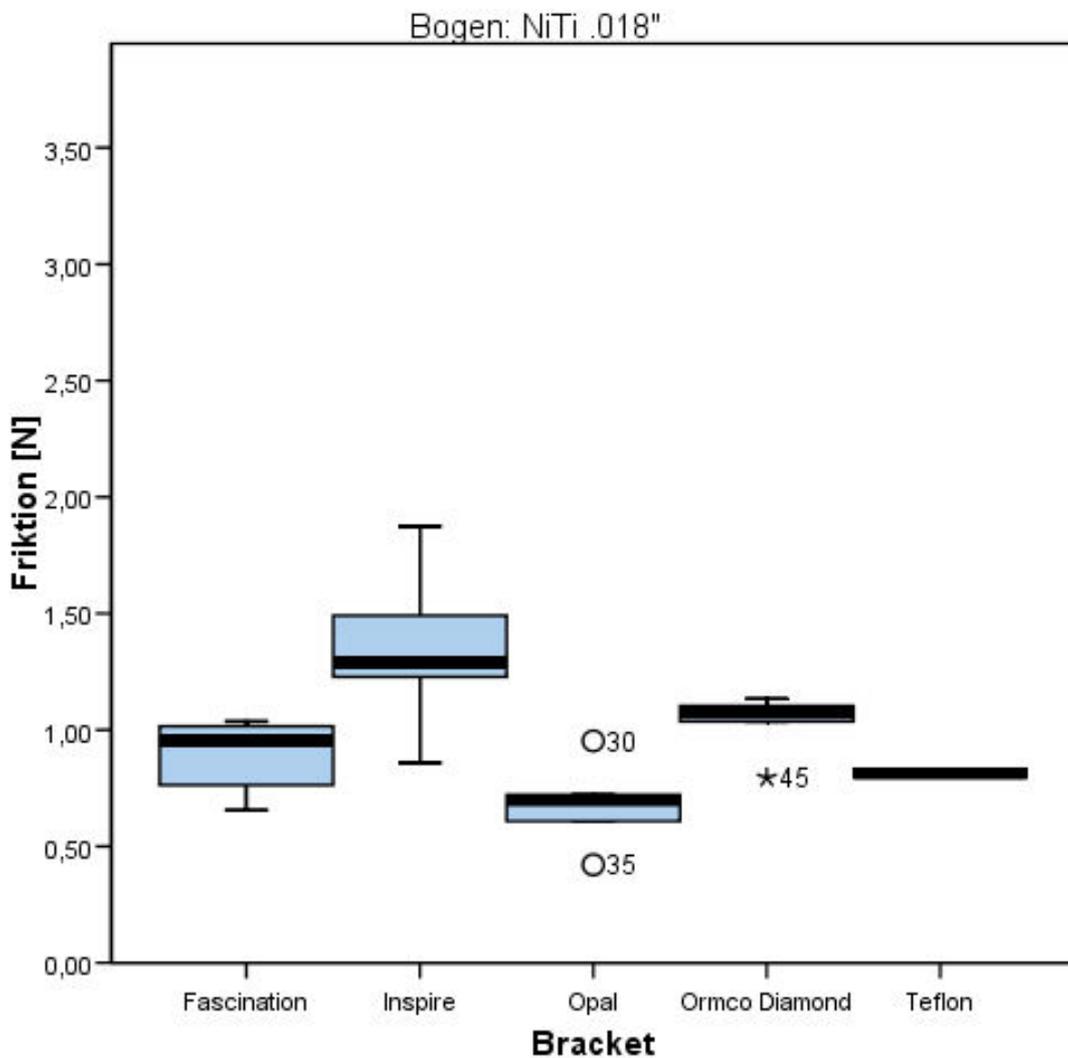


Abb. 8: Boxplot (Bracketvergleich im UK bei NiTi .018“)

	Fascination	Inspire	Opal	Ormco	Teflon
Fascination		*	n.s.	*	n.s.
Inspire			**	*	n.s.
Opal				**	n.s.
Ormco					n.s.

Tabelle 8: Signifikanzen zu Abb. 8 Boxplot (Mann-Whitney-U-Test: Bracketvergleich im UK bei NiTi .018“)

Die geringsten Friktionswerte zeigte auch in diesem Fall das Opal-Bracket. Die Friktionswerte lagen zwischen 0,42 N und 0,95 N bei einem Mittelwert von 0,684 N und einer Standardabweichung von 0,173 N.

Die Werte des Fascination-Brackets lagen über denen des Opal-Brackets, wobei hier keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden konnten.

Signifikante Unterschiede zeigten sich zwischen den gemessenen Werten des Opal,- und Fascination-Brackets zu denen des Ormco-Diamond-Brackets und denen des Inspire-Brackets. Das Inspire-Bracket zeigte mit Werten zwischen 0,86 N und 1,88 N, bei einem Mittelwert von 1,339 N und einer Standardabweichung von 0,336 N, die höchsten Friktionswerte.

5.4.1.2. NiTi .016" x .022"

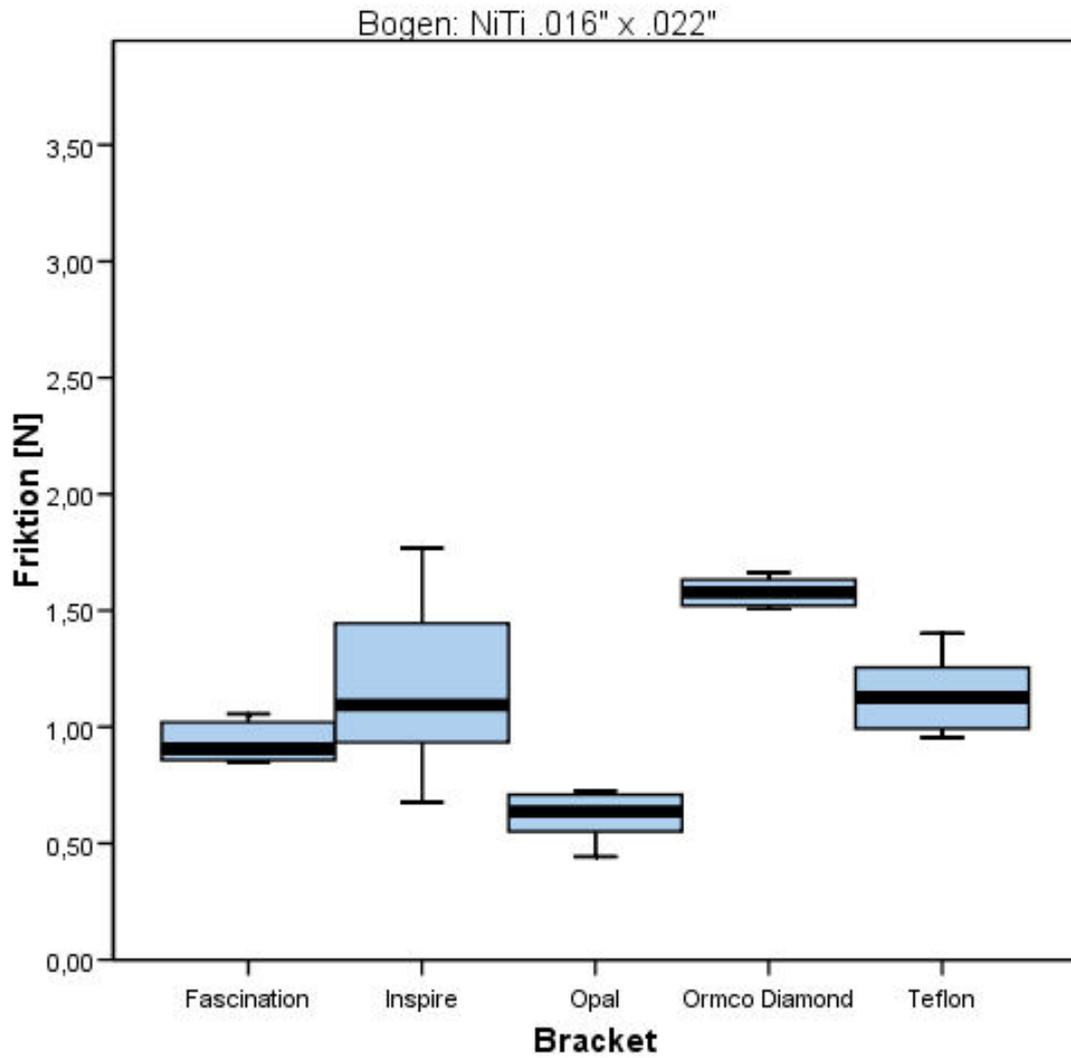


Abb. 9: Boxplot (Bracketvergleich im UK bei NiTi .016" x .022")

	Fascination	Inspire	Opal	Ormco	Teflon
Fascination		n.s.	**	**	*
Inspire			*	n.s.	n.s.
Opal				**	**
Ormco					**

Tabelle 9: Signifikanzen zu Abb. 9 Boxplot (Mann-Whitney-U-Test: Bracketvergleich im UK bei NiTi .016“ x .022“)

Die Ergebnisse der Messungen mit Vierkant NiTi Bögen der Dimension .016“ x .022“ zeigten für das Opal-Bracket signifikant niedrigere Werte, verglichen mit den Werten aller anderen getesteten Brackets. Seine Werte lagen zwischen 0,44 N und 0,95 N, sowie einem Mittelwert von 0,684 N und einer Standardabweichung von 0,173 N.

Die Friktionswerte steigerten sich in folgender Reihenfolge: Fascination-Bracket, Inspire-Bracket, Teflon-Bracket und mit der höchsten Reibung das Ormco- Diamond-Bracket. Seine Werte lagen zwischen 1,51 N und 1,66 N, sowie einem Mittelwert von 1,580 N und einer Standardabweichung von 0,062 N.

5.4.2. Bogen 2:Stahl

5.4.2.1. Stahl .018“

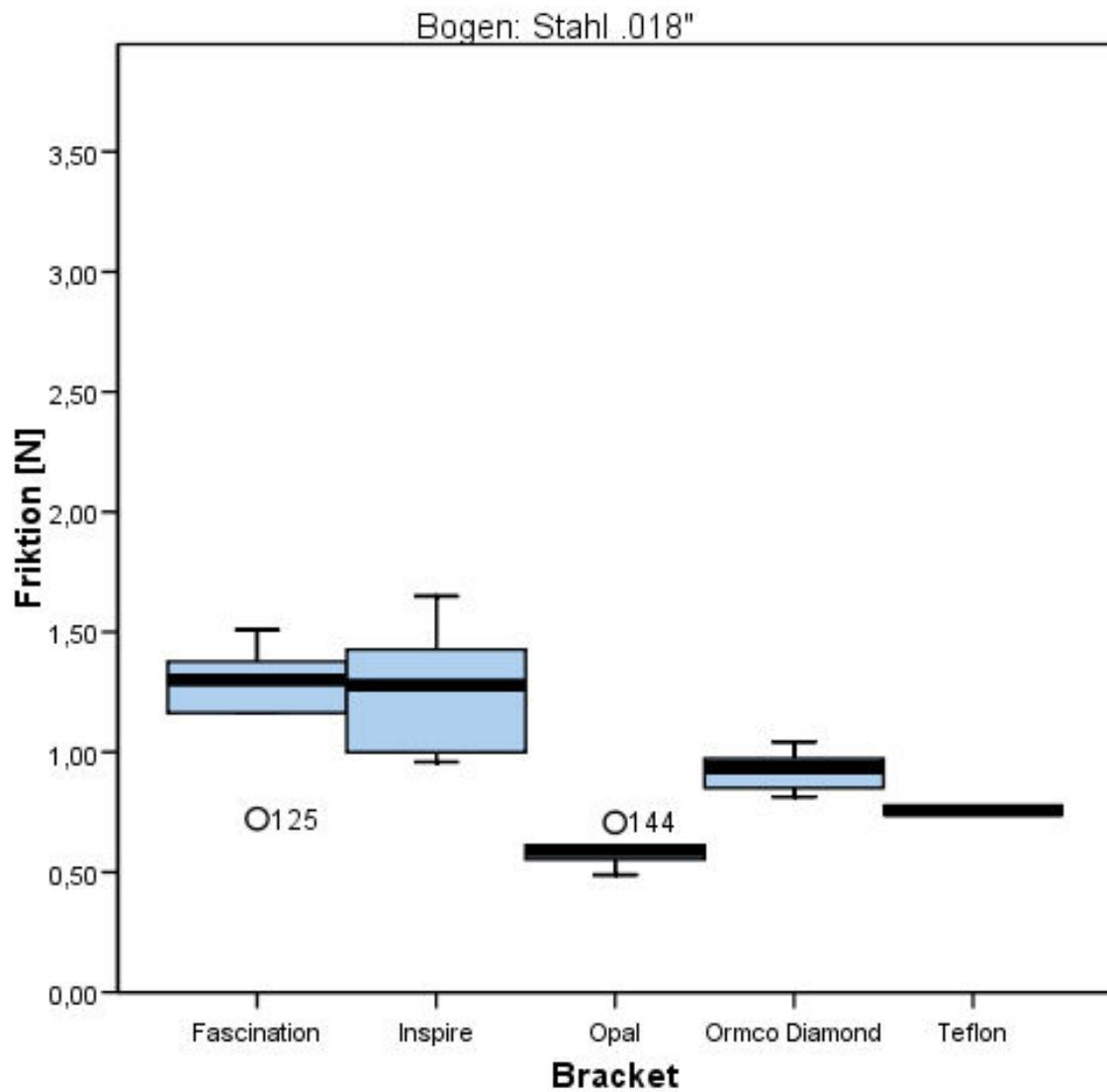


Abb. 10: Boxplot (Bracketvergleich im UK bei Stahl .018“)

	Fascination	Inspire	Opal	Ormco	Teflon
Fascination		n.s.	**	n.s.	n.s.
Inspire			**	*	n.s.
Opal				**	n.s.
Ormco					n.s.

Tabelle 10: Signifikanzen zu Abb. 10 Boxplot (Mann-Whitney-U-Test: Bracketvergleich im UK bei Stahl .018“)

Das Opal-Bracket zeigte eine signifikant geringere Friktion als alle anderen getesteten Brackets (ausgenommen das Teflon-Bracket, da in diesem Fall nur eine Messung vorliegt). Seine Friktion bewegte sich im Rahmen der Werte zwischen 0,49 N und 0,71 N. Der Mittelwert lag bei 0,591N mit einer Standardabweichung von 0,0727 N.

In diesem Fall zeigte das Inspire-Bracket mit einem Minimalwert von 0,96 N und einem Maximalwert von 1,65 N, sowie einem Mittelwert von 1,265 und einer Standardabweichung von 0,263 N, die mittelwertig höchsten Friktionswerte.

5.4.2.2. Stahl .016“ x .022“

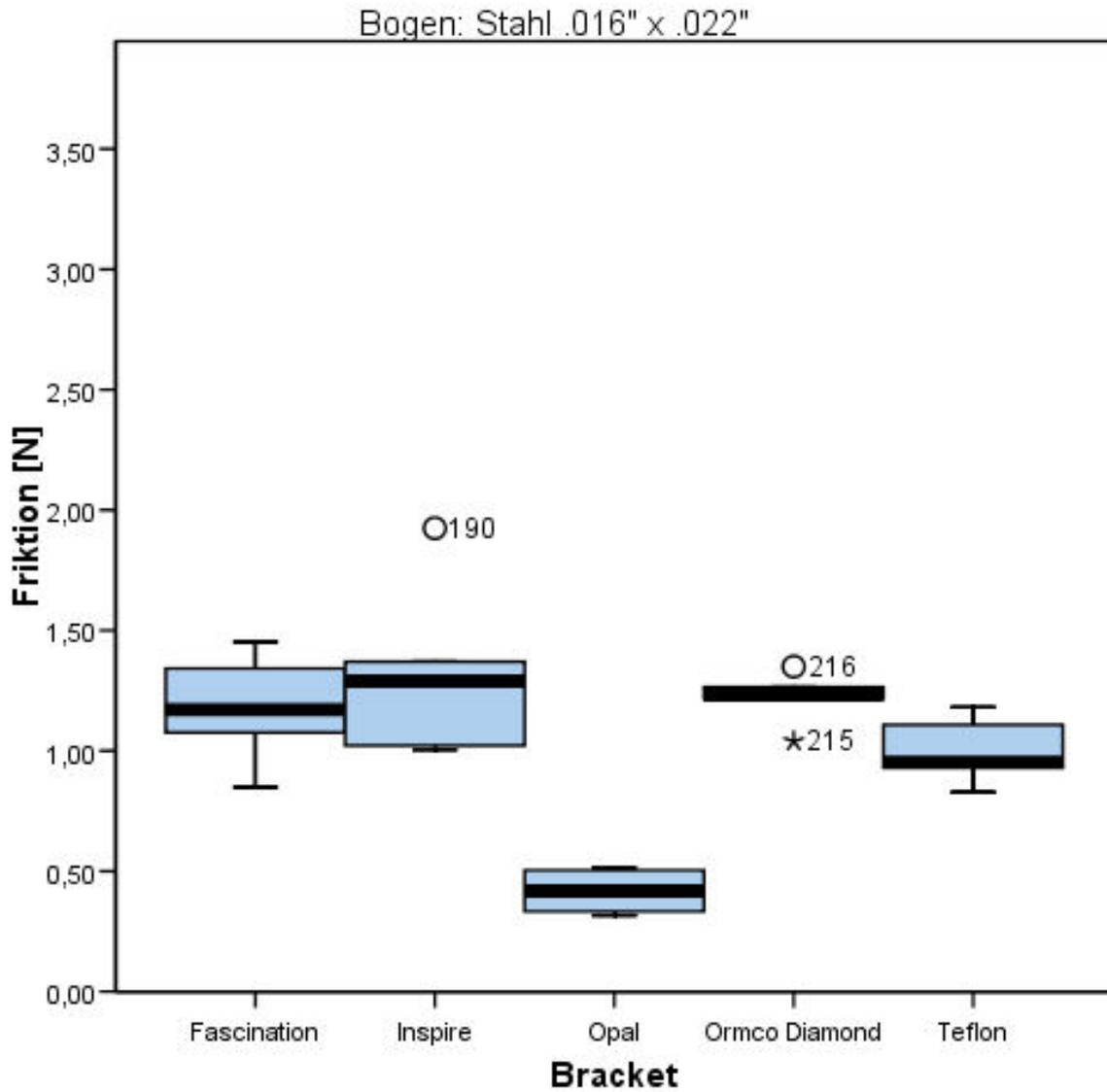


Abb. 11: Boxplot (Bracketvergleich im UK bei Stahl .016“ x .022“)

	Fascination	Inspire	Opal	Ormco	Teflon
Fascination		n.s.	**	n.s.	n.s.
Inspire			**	n.s.	*
Opal				**	**
Ormco					**

Tabelle 11: Signifikanzen zu Abb. 11 Boxplot (Mann-Whitney-U-Test: Bracketvergleich im UK bei Stahl .016“ x .022“)

Auch bei den Messungen mit dem Vierkantdraht zeigte das Opal-Bracket eine signifikant geringere Friktion als alle anderen getesteten Brackets. Das Minimum lag bei 0,32 N, der Maximalwert bei 0,52 N. Der Mittelwert lag bei 0,417 N bei einer Standardabweichung von 0,092 N.

Das Teflon-Bracket zeigte signifikant geringere Reibungswerte als das Inspire- und das Ormco-Bracket, aber nicht signifikant geringere als das Fascination-Bracket.

Auch in diesem Fall zeigte das Inspire-Bracket mit Werten zwischen 1,00 N und 1,93 N, einem Mittelwert von 1,317 N und einer Standardabweichung von 0,337 N, die höchsten Friktionwerte an.

5.4.3. Bogen 3: TMA

5.4.3.1. TMA .018"

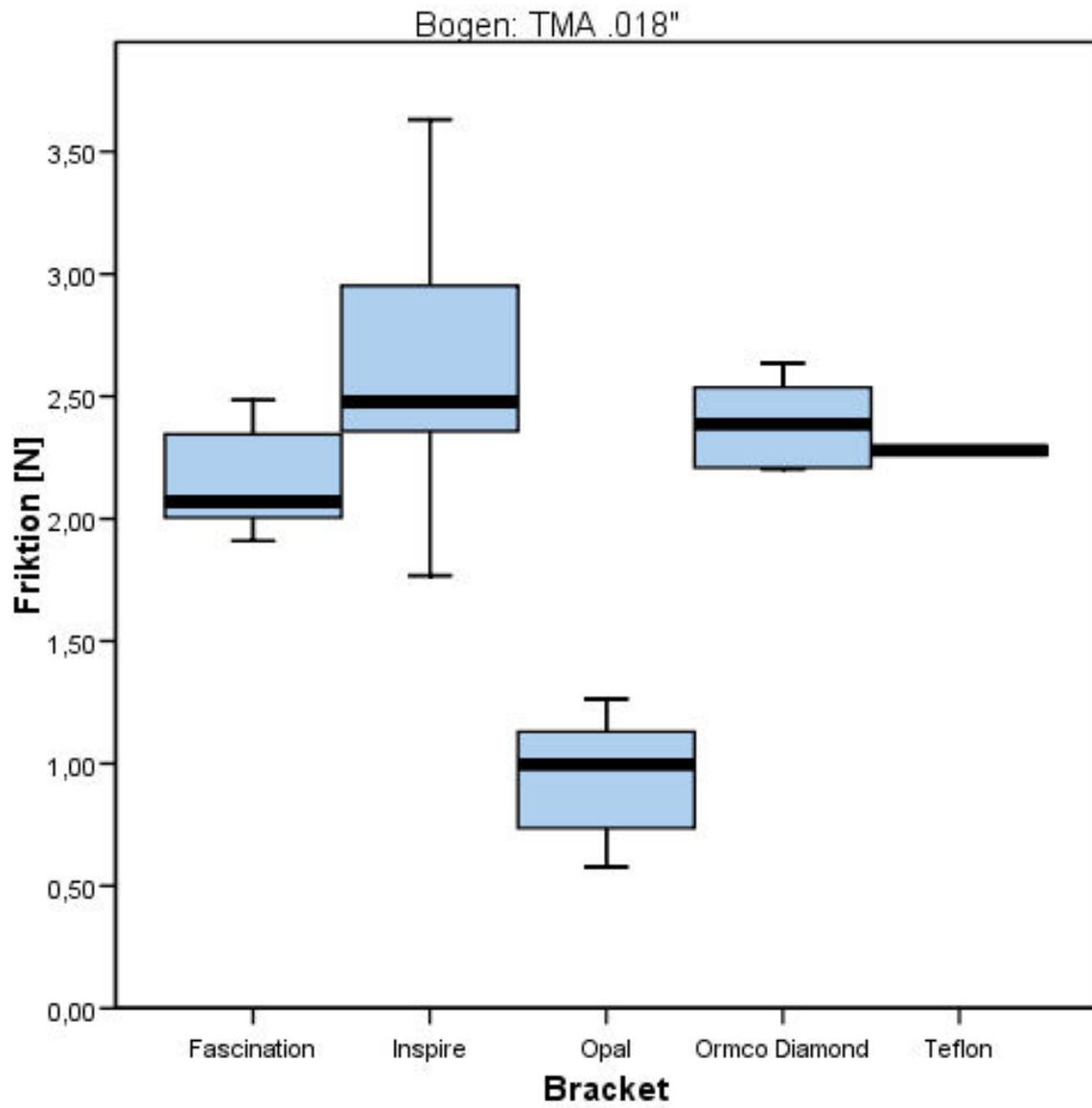


Abb. 12: Boxplot (Bracketvergleich im UK bei TMA .018")

	Fascination	Inspire	Opal	Ormco	Teflon
Fascination		n.s.	**	n.s.	n.s.
Inspire			**	n.s.	n.s.
Opal				**	n.s.
Ormco					n.s.

Tabelle12: Signifikanzen zu Abb. 12: Boxplot (Mann-Whitney-U-Test: Bracketvergleich im UK bei TMA .018“)

Ganz eindeutig kann auch bei den Messungen mittels TMA Draht der Dimension .018“ eine signifikant geringere Reibung des Opal-Brackets ermittelt werden.

Bei Werten zwischen 0,58 N und 1,26 N, einem Mittelwert von 0,950 und einer Standardabweichung von 0,259 N kann man einen deutlichen Abstand zum Fascination-Bracket erkennen, das mit Werten zwischen 1,91 N und 2,48 N, einem Mittelwert von 2,15 N bei einer Standardabweichung von 0,220 N die zweit geringste Reibung aufwies.

Die höchsten Friktionswerte konnten hier bei dem Inspire-Bracket gemessen werden. Sie lagen zwischen 1,77 N und 3,63 N bei einem Mittelwert von 2,611 N und einer Standardabweichung von 0,630 N.

Sie wiesen keine signifikanten Unterschiede zu den Brackettypen Fascination, Ormco-Diamond und Teflon auf.

5.4.3.2. TMA .016" x .022"

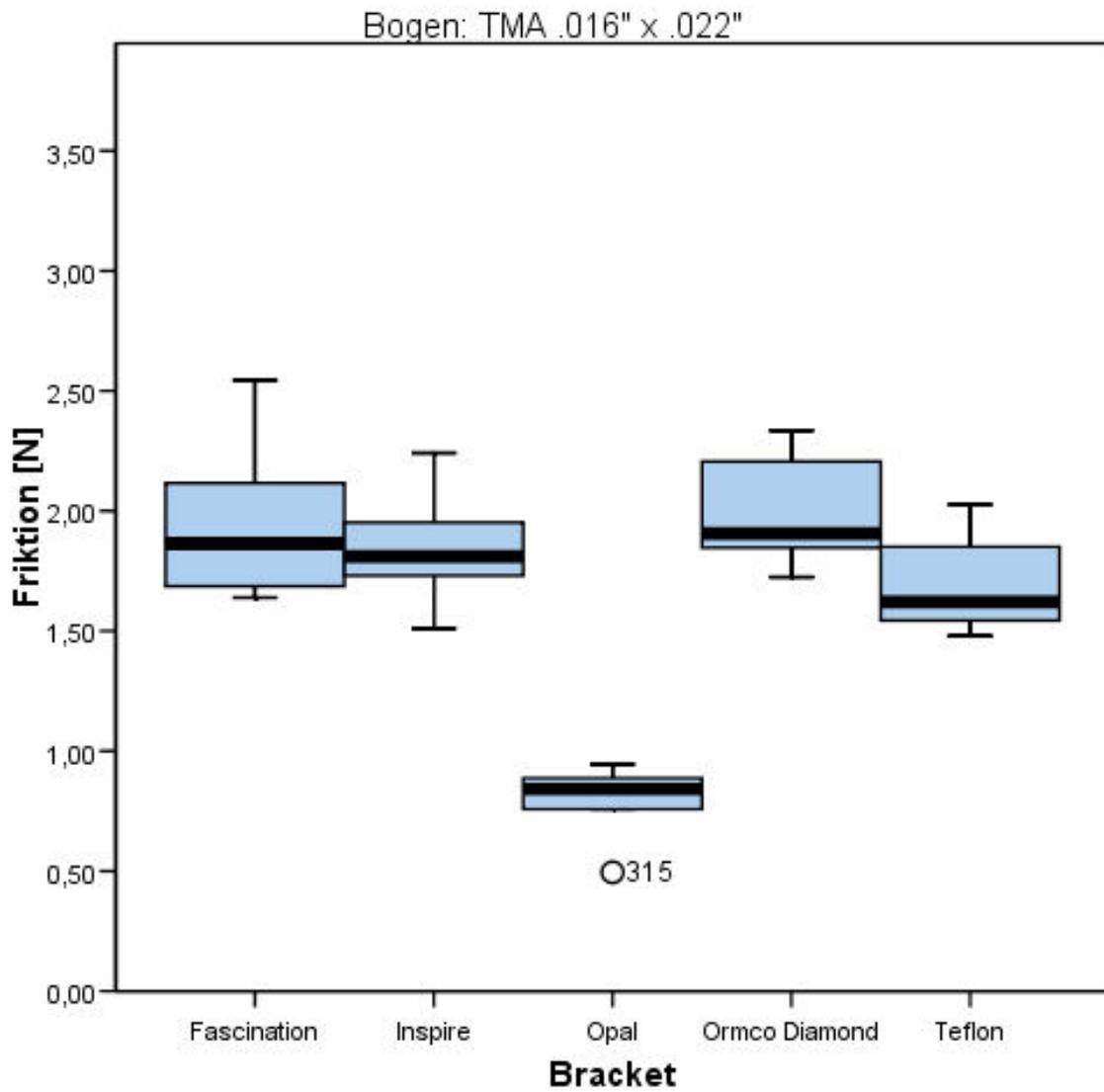


Abb. 13: Boxplot (Bracketvergleich im UK bei TMA .016" x .022")

	Fascination	Inspire	Opal	Ormco	Teflon
Fascination		n.s.	**	n.s.	n.s.
Inspire			**	n.s.	n.s.
Opal				**	**
Ormco					n.s.

Tabelle13: Signifikanzen zu Abb. 13 Boxplot (Mann-Whitney-U-Test : Bracketvergleich im UK bei TMA .016“ x .022“)

Das Opal-Bracket zeigte hier mit Friktionswerten zwischen 0,50 N und 0,95 N, sowie einem Mittelwert von 0,950 und einer Standardabweichung von 0,259 N wiederum signifikant geringere Werte.

Die Ergebnisse der anderen vier Brackets liegen deutlich über den Werten des Opal-Brackets. Unter ihnen herrscht kein signifikanter Unterschied.

5.5. Vergleich der Friktion der untersuchten Bögen im OK / UK

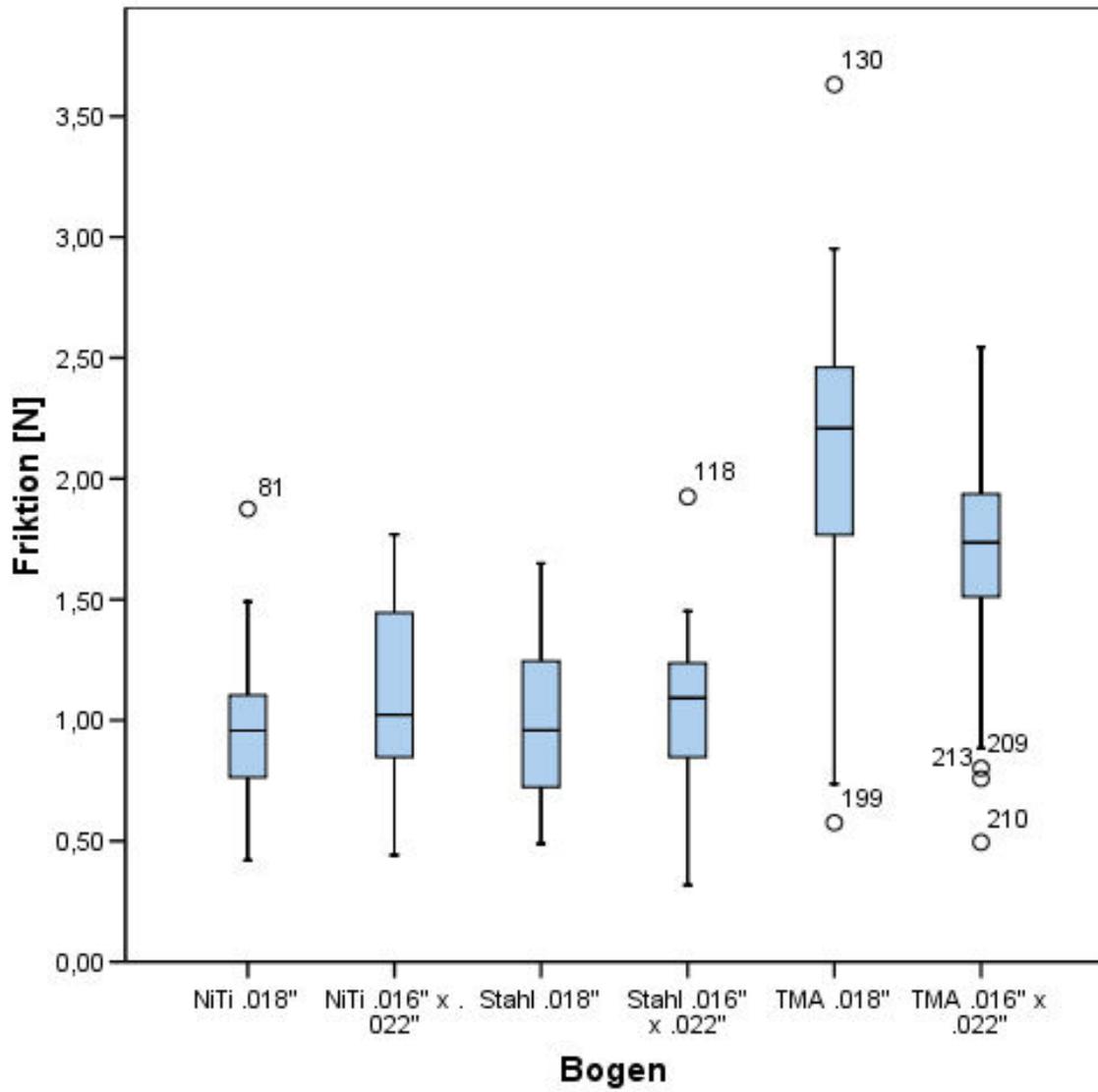


Abb. 14: Boxplot (Drahtvergleich OK / UK)

	NiTi.018“	Stahl.018“	TMA.018“	NiTi.016“x.022“	Stahl.016“x.022“
Stahl.018“	n.s.				
TMA.018“	***	***			
NiTi.016“x.022“	n.s.				
Stahl.016“x.022“		n.s.		n.s.	
TMA.016“x.022“			**	***	***

Tabelle 14: Signifikanzen zu Abb. 14 Boxplot (Mann-Whitney-U-Test: Drahtvergleich OK / UK)

Vergleicht man die Friktionseigenschaften aller getesteten Bögen untereinander, so kommt man zu folgenden Ergebnissen.

5.5.1. Vergleich der Drahtform

Vergleicht man die Drahtform insgesamt, so kann man sagen, dass sich die Friktionswerte eines Drahtes aus gleichem Material, aber mit unterschiedlicher Geometrie, nur bei dem TMA Draht signifikant unterscheiden.

Hier wies der TMA Vierkantdraht im Mittel eine signifikant geringere Reibungskraft auf als der TMA Runddraht.

Bei den Materialien NiTi und Stahl konnten insgesamt keine signifikanten Unterschiede, bezogen auf die Drahtgeometrie, nachgewiesen werden.

5.5.2. Vergleich des Drahtmaterials

Bezogen auf das Drahtmaterial, kann insgesamt gesagt werden, dass der TMA Rund- und Vierkantdraht eine signifikant höhere Reibung aufweisen als die Rund-, und Vierkantbögen aus NiTi und Stahl.

Die Bögen aus Stahl und NiTi, gleich welcher Drahtform, unterschieden sich nicht signifikant voneinander.

Im Folgenden werden zunächst die Bögen innerhalb eines Kiefers in Kombination eines Brackets miteinander verglichen.

5.6. Vergleich der Friktion der untersuchten Bögen im OK

5.6.1. Bracket 1: Fascination

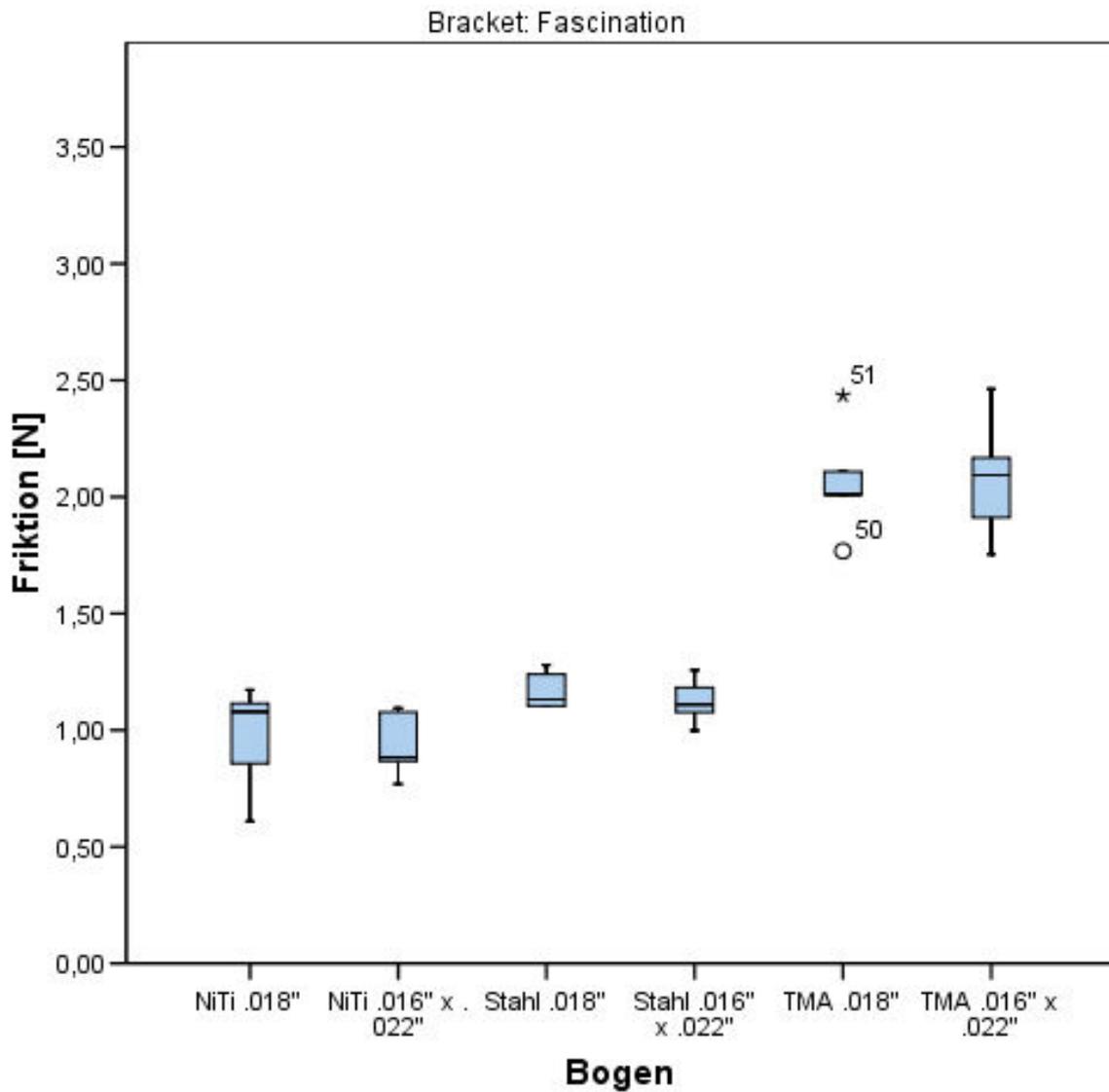


Abb. 15: Boxplot (Drahtvergleich bei Bracket Fascination im OK)

	NiTi.018“	Stahl.018“	TMA.018“	NiTi.016“x.022“	Stahl.016“x.022“
Stahl.018“	n.s.				
TMA.018“	**	**			
NiTi.016“x.022“	n.s.				
Stahl.016“x.022“		n.s.		*	
TMA.016“x.022“			n.s.	**	**

Tabelle 15: Signifikanzen zu Abb. 15 Boxplot (Mann-Whitney-U-Test: Drahtvergleich bei Bracket Fascination im OK)

5.6.1.1. Vergleich der Drahtform

Bei den Messungen mit dem Fasionation-Bracket konnten keine signifikanten Unterschiede, bezogen auf die Drahtform, festgestellt werden.

5.6.1.2. Vergleich der Drahtmaterialien

Vierkantbögen:

Hier konnten signifikante Unterschiede zwischen allen gemessenen Vierkantbögen festgestellt werden, wobei der NiTi-Vierkantbogen die geringste Reibungskraft unter den Vierkantbögen zeigte und der TMA-Bogen die höchsten Werte.

Rundbögen:

Auch unter den Rundbögen zeigte der TMA-Bogen eine signifikant höhere Friktionskraft als der NiTi,- und der Stahl-Runddraht. Die anderen beiden (Stahl und NiTi) unterschieden sich nicht signifikant voneinander.

5.6.2. Bracket 2: Inspire

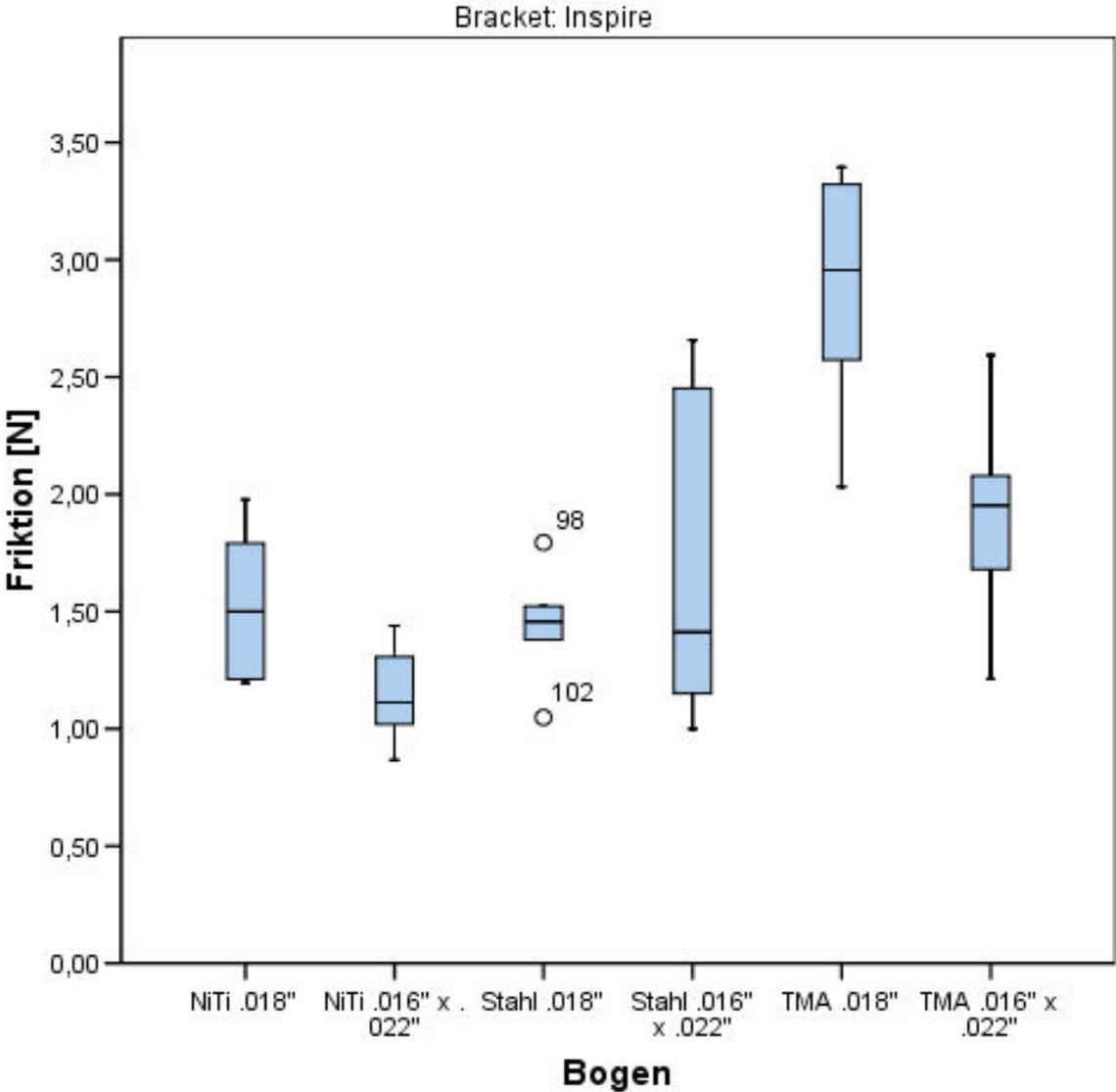


Abb. 16: Boxplot (Drahtvergleich bei Bracket Inspire im OK)

	NiTi.018“	Stahl.018“	TMA.018“	NiTi.016“x.022“	Stahl.016“x.022“
Stahl.018“	n.s.				
TMA.018“	**	**			
NiTi.016“x.022“	n.s.				
Stahl.016“x.022“		n.s.		n.s.	
TMA.016“x.022“			*	**	n.s.

Tabelle16: Signifikanzen zu Abb. 16 Boxplot (Mann-Whitney-U-Test : Drahtvergleich bei Bracket Inspire im OK)

5.6.2.1. Vergleich der Drahtform

Bezogen auf die Drahtform konnte ein signifikanter Unterschied zwischen dem TMA Rund,- und Vierkantbogen festgestellt werden, wobei der Rundbogen die vergleichsweise höheren Friktionswerte aufwies.

5.6.2.2. Vergleich der Drahtmaterialien

Vierkantbögen:

Unter den gemessenen Vierkantbögen konnte ein signifikanter Unterschied zwischen dem NiTi-Vierkantbogen und dem TMA-Vierkantbogen erkannt werden, wobei der TMA-Vierkantbogen die deutlich höheren Reibungskräfte aufwies. Die Friktionswerte des Stahlvierkantbogens unterschieden sich nicht signifikant von den anderen.

Rundbögen:

Der TMA-Rundbogen zeigte im Vergleich zu den anderen Rundbögen signifikant höhere Friktionswerte an, die Rundbögen aus NiTi und Stahl unterschieden sich untereinander nicht signifikant.

5.6.3. Bracket 3: Opal

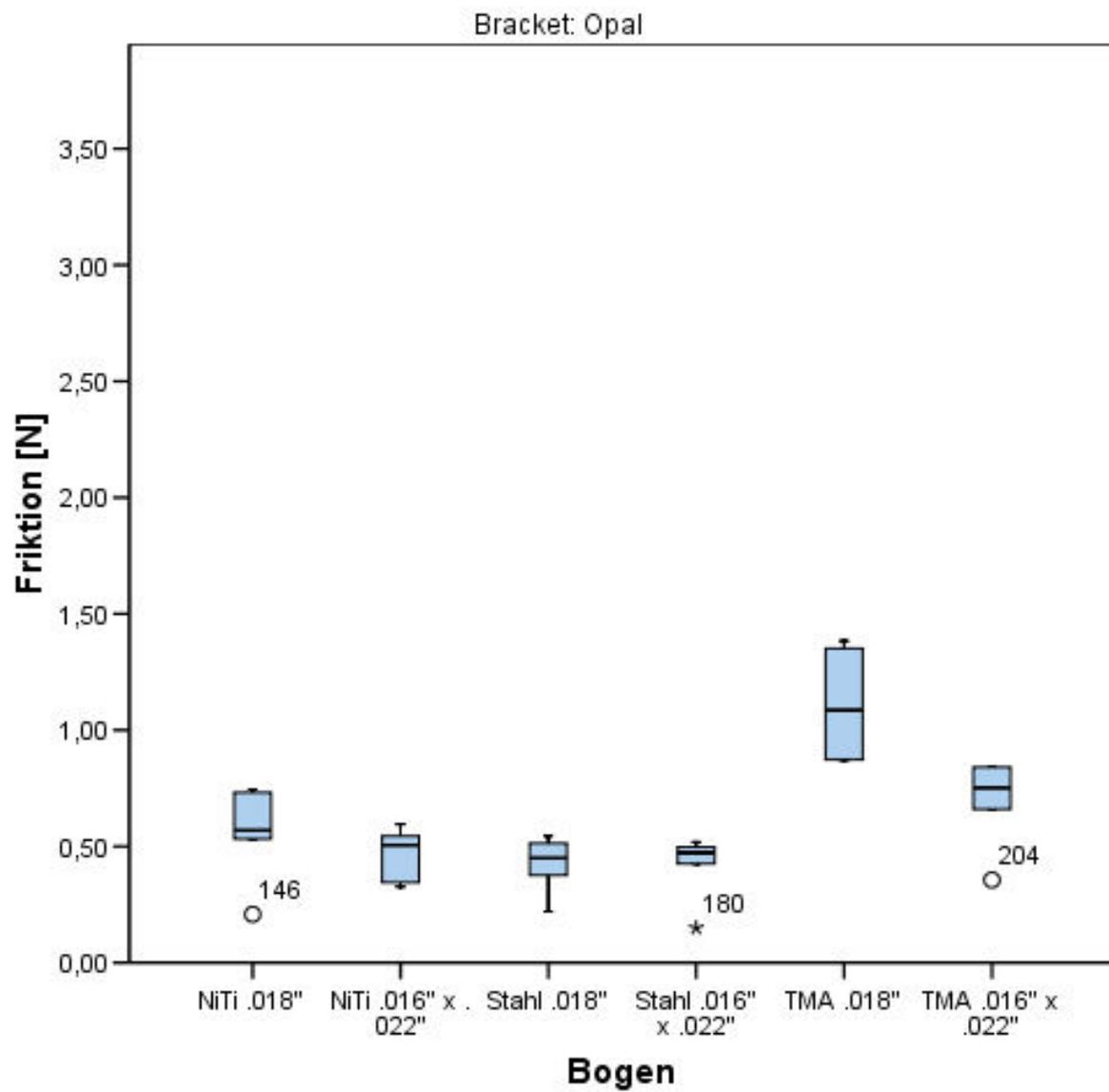


Abb. 17: Boxplot (Drahtvergleich bei Bracket Opal im OK)

	NiTi.018“	Stahl.018“	TMA.018“	NiTi.016“x.022“	Stahl.016“x.022“
Stahl.018“	n.s.				
TMA.018“	**	**			
NiTi.016“x.022“	n.s.				
Stahl.016“x.022“		n.s.		n.s.	
TMA.016“x.022“			**	n.s.	n.s.

Tabelle 17: Signifikanzen zu Abb. 17 Boxplot (Mann-Whitney-U-Test: Drahtvergleich bei Bracket Opal im OK)

5.6.3.1. Vergleich der Drahtform

Bezogen auf die Drahtform, konnte man bei Messungen mit dem TMA-Draht einen signifikanten Unterschied zwischen dem Rund,- und Vierkantbogen erkennen, wobei der Rundbogen die höheren Reibungswerte aufzeigte.

5.6.3.2. Vergleich der Drahtmaterialien

Vierkantbögen:

Unter den gemessenen Vierkantbögen konnte man keinen signifikanten Unterschied feststellen.

Rundbögen:

Hier zeigte wieder einmal der TMA-Rundbogen signifikant höhere Friktionswerte als die Rundbögen aus Stahl und NiTi. Die Rundbögen aus den beiden letztgenannten Materialien unterscheiden sich nicht signifikant voneinander.

5.6.4. Bracket 4: Ormco Diamond

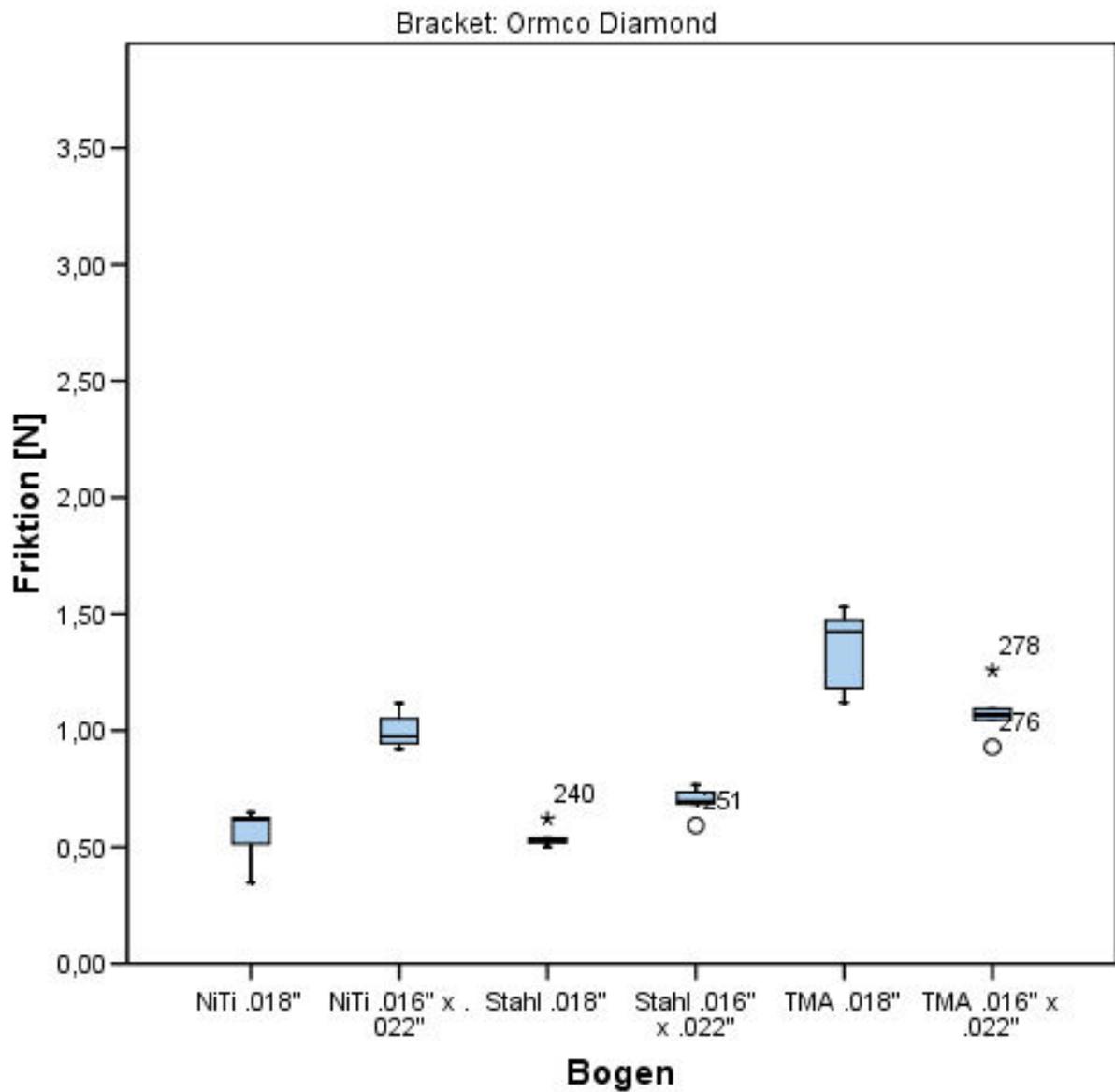


Abb. 18: Boxplot (Drahtvergleich bei Bracket Ormco Diamond im OK)

	NiTi.018“	Stahl.018“	TMA.018“	NiTi.016“x.022“	Stahl.016“x.022“
Stahl.018“	n.s.				
TMA.018“	**	**			
NiTi.016“x.022“	**				
Stahl.016“x.022“		**		**	
TMA.016“x.022“			**	n.s.	**

Tabelle18: Signifikanzen zu Abb. 18 Boxplot (Mann-Whitney-U-Test: Drahtvergleich bei Bracket Ormco Diamond im OK)

5.6.4.1. Vergleich der Drahtform

Bei Messungen mit dem Ormco Diamond Bracket konnte man innerhalb jeder Materialgruppe einen signifikanten Unterschied zwischen den Rund,- und Vierkantbögen messen, wobei bei NiTi und Stahl die Vierkantbögen eine höhere Friktion aufwiesen als die Rundbögen und bei TMA der Runddraht eine stärkere Reibung als der Vierkantdraht zeigte.

5.6.4.2. Vergleich der Drahtmaterialien

Vierkantbögen:

Hier zeigten sich signifikant höhere Friktionswerte bei TMA-Rundbögen, verglichen mit NiTi,- und Stahlrundbögen.

Rundbögen:

Bei Materialvergleich innerhalb der Gruppe der getesteten Rundbögen konnte man erkennen, dass die Stahlvierkantbögen eine signifikant geringere Reibungskraft aufwiesen als die NiTi,- und TMA-Vierkantbögen.

5.6.5. Bracket 5: Teflon

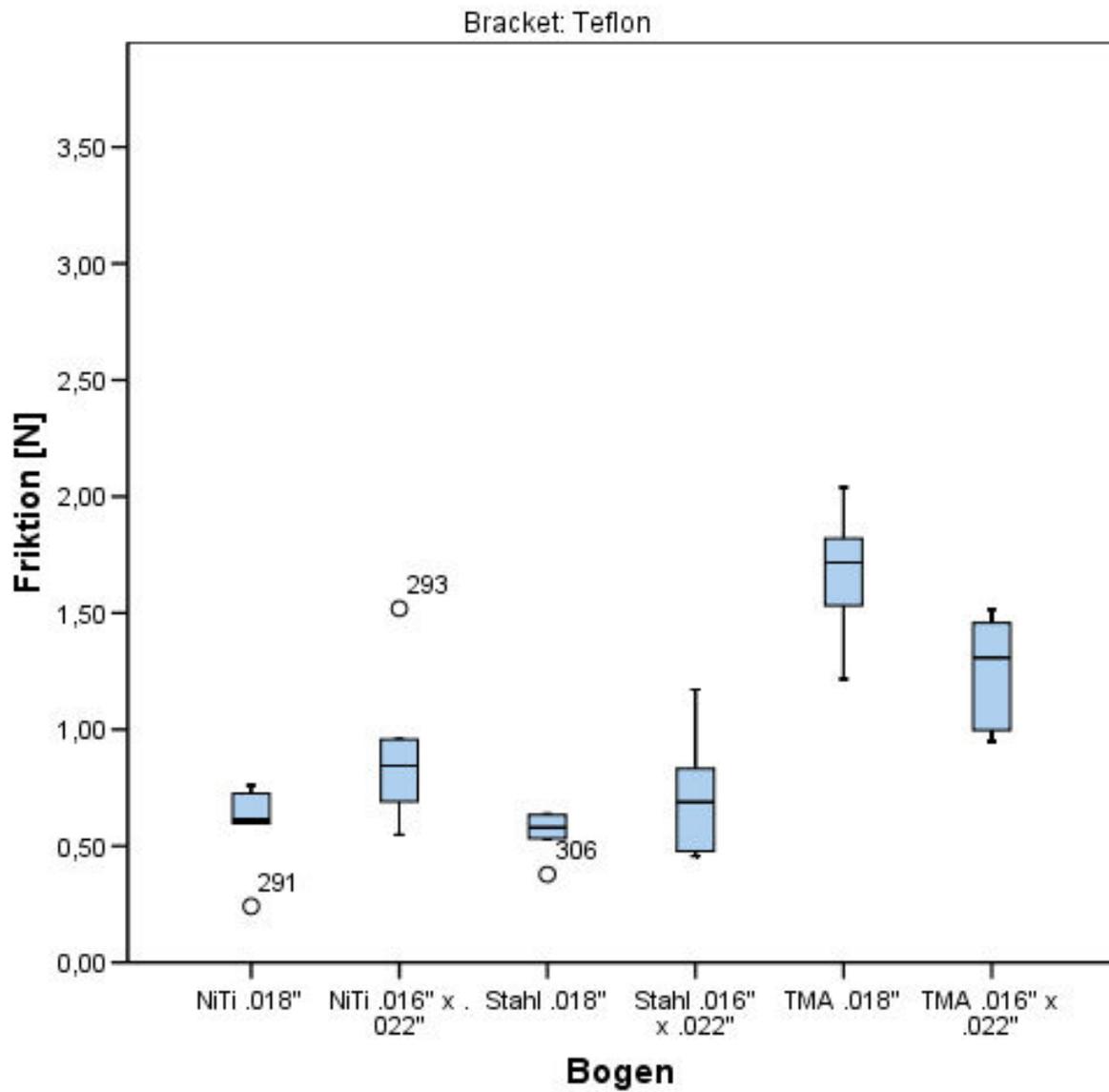


Abb. 19: Boxplot (Drahtvergleich bei Bracket Teflon im OK)

	NiTi.018“	Stahl.018“	TMA.018“	NiTi.016“x.022“	Stahl.016“x.022“
Stahl.018“	n.s.				
TMA.018“	**	**			
NiTi.016“x.022“	n.s.				
Stahl.016“x.022“		n.s.		n.s.	
TMA.016“x.022“			*	n.s.	*

Tabelle19: Signifikanzen zu Abb. 19: Boxplot (Mann-Whitney-U-Test: Drahtvergleich bei Bracket Teflon im OK)

5.6.5.1. Vergleich der Drahtform

Der TMA-Runddraht wies hier eine signifikant geringere Reibungskraft auf als der TMA-Vierkantdraht.

Die anderen Bögen unterschieden sich nicht signifikant hinsichtlich der Drahtform.

5.6.5.2. Vergleich der Drahtmaterialien

Vierkantbögen:

Hier konnte man erkennen, dass die Stahlvierkantbögen eine signifikant geringere Reibungskraft aufwiesen als die TMA-Vierkantbögen. Ein signifikanter Unterschied zwischen Stahl und NiTi oder TMA und NiTi konnte hier nicht festgestellt werden.

Rundbögen:

Bezogen auf das Material zeigte sich, dass die TMA- Rundbögen eine signifikant höhere Friktionskraft aufweisen als die NiTi,- und die Stahl- Rundbögen.

5.7. Vergleich der Friktion der untersuchten Bögen im UK

5.7.1. Bracket 1: Fascination

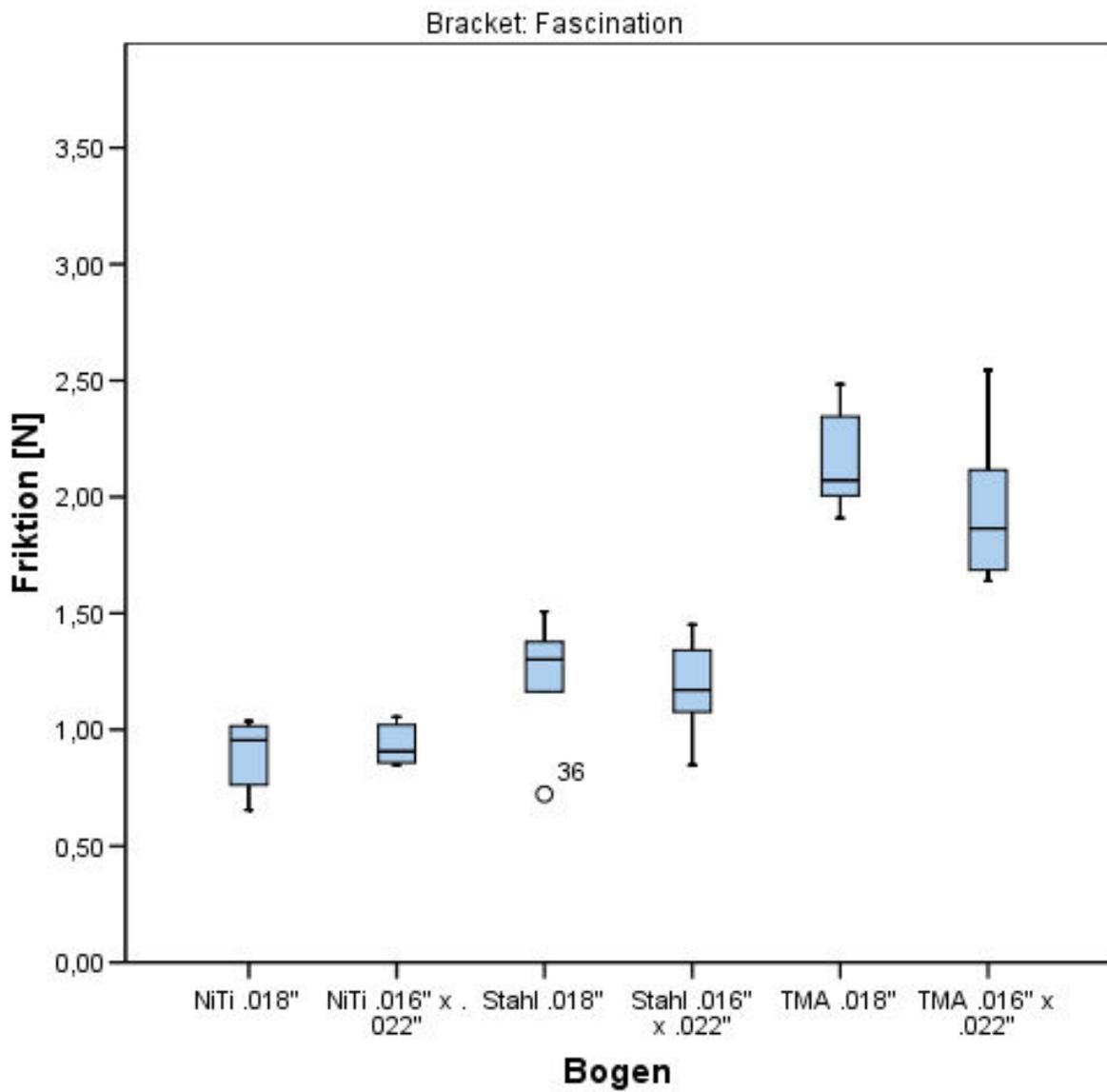


Abb. 20: Boxplot (Drahtvergleich bei Bracket Fascination im UK)

	NiTi.018“	Stahl.018“	TMA.018“	NiTi.016“x.022“	Stahl.016“x.022“
Stahl.018“	*				
TMA.018“	**	**			
NiTi.016“x.022“	n.s.				
Stahl.016“x.022“		n.s.		*	
TMA.016“x.022“			n.s.	**	**

Tabelle20: Signifikanzen zu Abb. 20 Boxplot (Mann-Whitney-U-Test: Drahtvergleich bei Bracket Fascination im UK)

5.7.1.1. Vergleich der Drahtform

Die gemessenen Bögen unterschieden sich nicht signifikant hinsichtlich der Drahtform.

5.7.1.2. Vergleich der Drahtmaterialien

Vierkantbögen:

Die getesteten Vierkantbögen unterschieden sich alle signifikant voneinander, wobei der NiTi-Rundbogen die geringste Friktionskraft aufwies.

Rundbögen:

Die getesteten Rundbögen unterschieden sich alle signifikant voneinander, wobei die NiTi-Rundbögen auch hier die geringsten Werte zeigten.

5.7.2. Bracket 2: Inspire

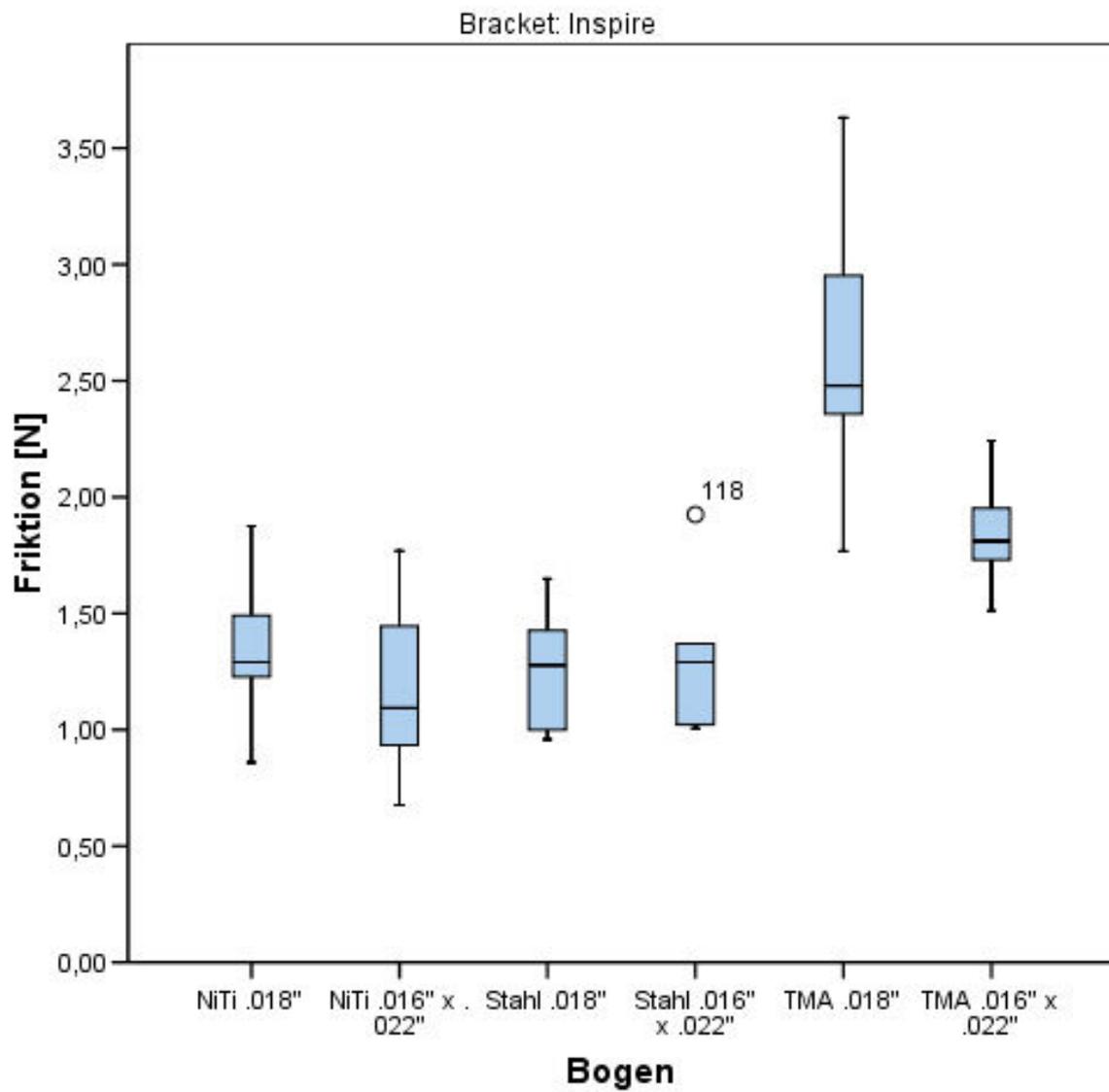


Abb. 21: Boxplot (Drahtvergleich bei Bracket Inspire im UK)

	NiTi.018“	Stahl.018“	TMA.018“	NiTi.016“x.022“	Stahl.016“x.022“
Stahl.018“	n.s.				
TMA.018“	**	**			
NiTi.016“x.022“	n.s.				
Stahl.016“x.022“		n.s.		n.s.	
TMA.016“x.022“			*	*	*

Tabelle 21: Signifikanzen zu Abb. 21 Boxplot (Mann-Whitney-U-Test: Drahtvergleich bei Bracket Inspire im UK)

5.7.2.1. Vergleich der Drahtform

Nur die TMA-Bögen unterschieden sich hinsichtlich der Drahtform signifikant voneinander, wobei der TMA-Runddraht, verglichen mit dem TMA-Vierkantdraht, die höheren Reibungswerte zeigte.

5.7.2.2. Vergleich der Drahtmaterialien

Vierkantbögen:

Bezogen auf das Material, zeigte sich, dass die TMA-Vierkantbögen eine signifikant höhere Friktionskraft als die NiTi,- und die Stahl- Vierkantbögen aufwiesen. Die Stahl,- und NiTi-Vierkantbögen unterschieden sich nicht signifikant voneinander.

Rundbögen:

Auch hier zeigte sich, dass die TMA-Bögen eine signifikant höhere Friktionskraft als die NiTi,- und die Stahl-Rundbögen aufwiesen.

5.7.3. Bracket 3: Opal

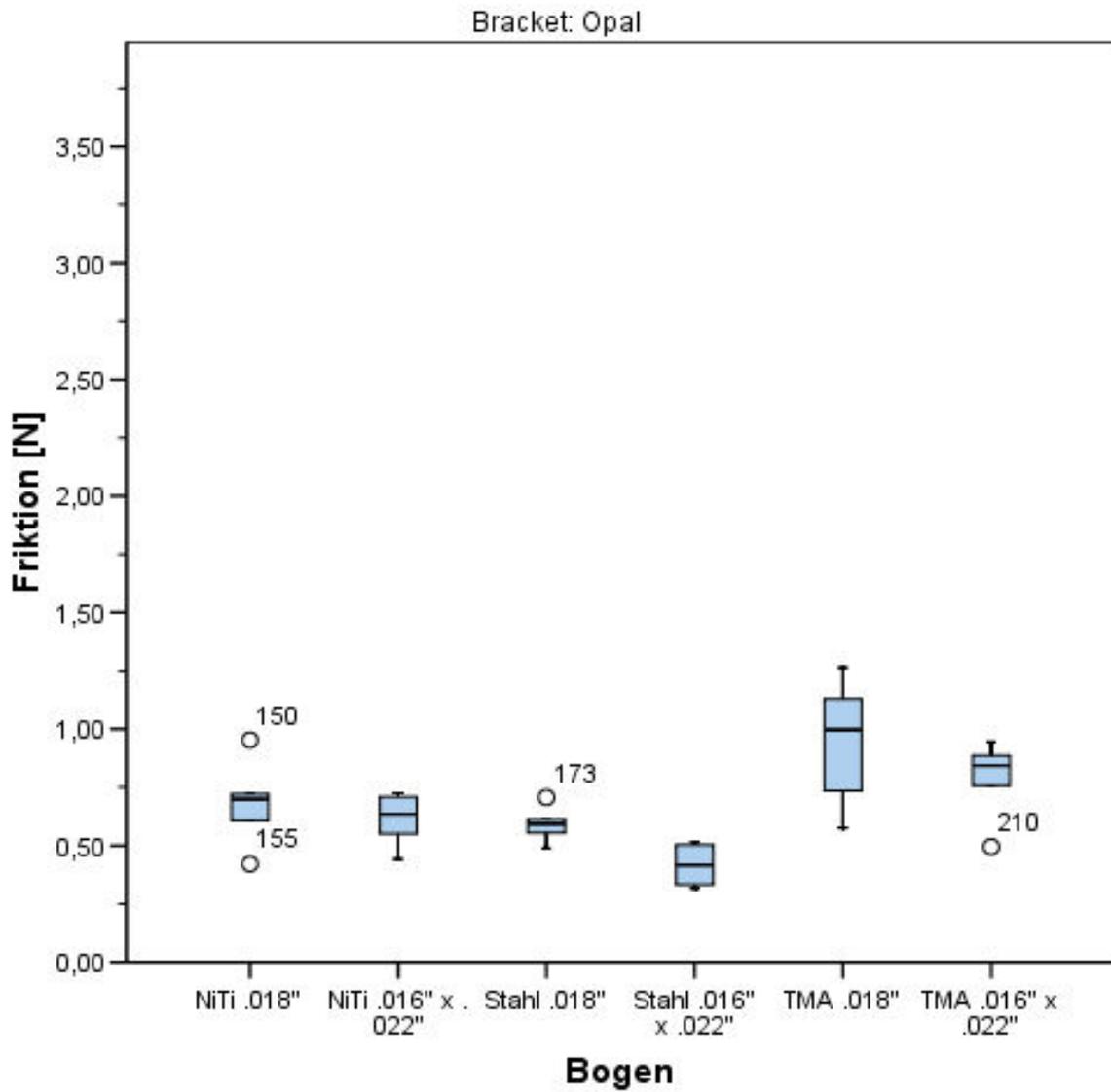


Abb. 22: Boxplot (Drahtvergleich bei Bracket Opal im UK)

	NiTi.018“	Stahl.018“	TMA.018“	NiTi.016“x.022“	Stahl.016“x.022“
Stahl.018“	n.s.				
TMA.018“	n.s.	*			
NiTi.016“x.022“	n.s.				
Stahl.016“x.022“		**		*	
TMA.016“x.022“			n.s.	*	**

Tabelle 22: Signifikanzen zu Abb. 22 Boxplot (Mann-Whitney-U-Test: Drahtvergleich bei Bracket Opal im UK)

5.7.3.1. Vergleich der Drahtform

Nur die Stahlbögen unterschieden sich signifikant hinsichtlich der Drahtform, wobei der Stahlvierkantbogen die geringeren Reibungswerte zeigten.

5.7.3.2. Vergleich der Drahtmaterialien

Vierkantbögen:

Hier zeigte sich, dass sich alle getesteten Materialien signifikant voneinander unterschieden, wobei die Stahlvierkantbögen, die im Mittel geringsten und die TMA-Vierkantbögen die höchsten Friktionswerte aufwiesen.

Rundbögen:

Die TMA-Rundbögen zeigten eine signifikant größere Reibung als die Stahl-Rundbögen, sonst gab es keine signifikanten Unterschiede zwischen den gemessenen Rundbögen.

5.7.4. Bracket 4: Ormco Diamond

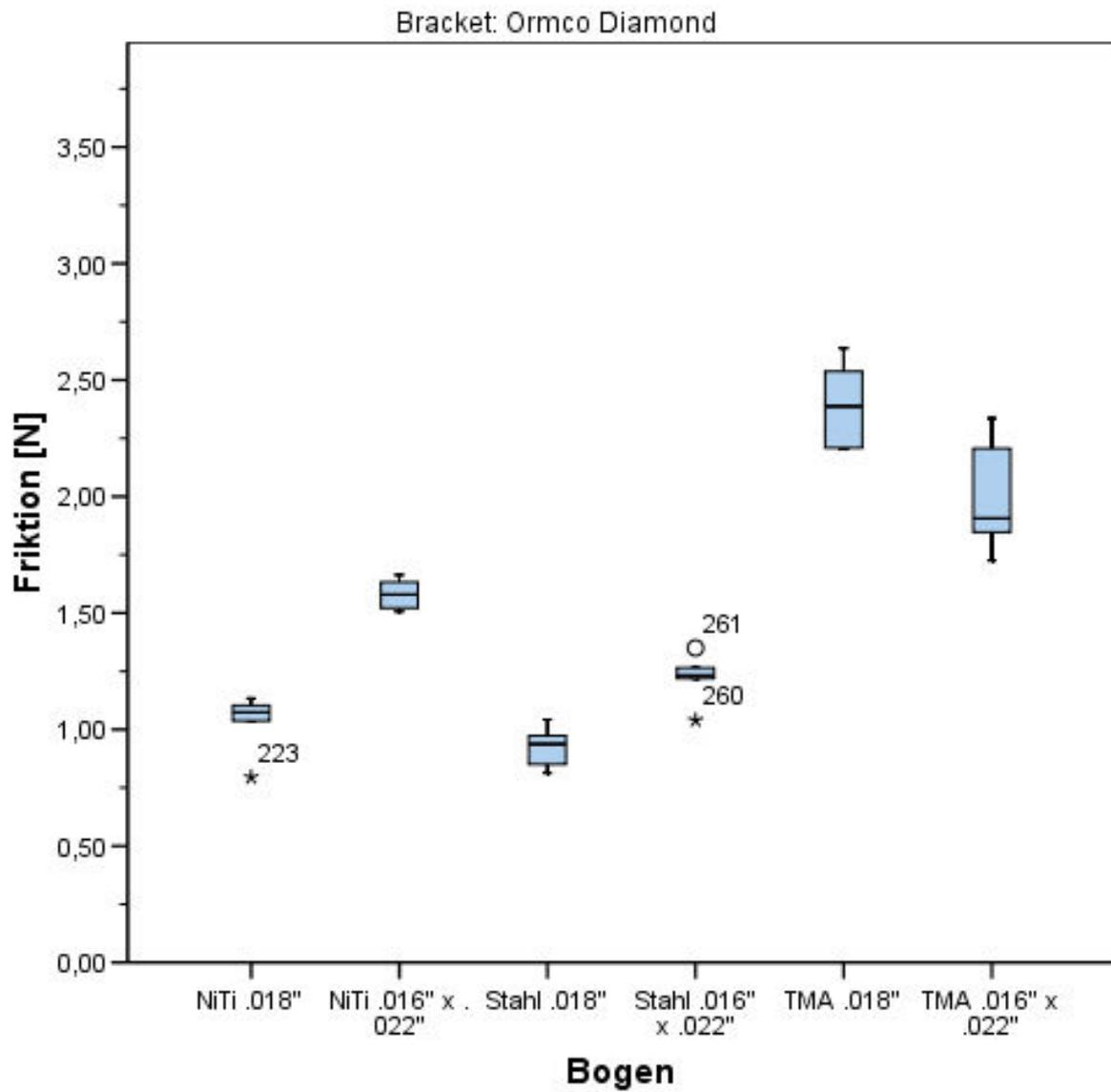


Abb. 23: Boxplot (Drahtvergleich bei Bracket Ormco Diamond im UK)

	NiTi.018“	Stahl.018“	TMA.018“	NiTi.016“x.022“	Stahl.016“x.022“
Stahl.018“	n.s.				
TMA.018“	**	**			
NiTi.016“x.022“	**				
Stahl.016“x.022“		**		**	
TMA.016“x.022“			*	**	**

Tabelle 23: Signifikanzen zu Abb. 23 Boxplot (Mann-Whitney-U-Test: Drahtvergleich bei Bracket Ormco Diamond im UK)

5.7.4.1. Vergleich der Drahtform

Bezogen auf die Drahtform unterschieden sich die Messungen, die dem Ormco Bracket durchgeführt wurden alle signifikant untereinander. Der NiTi-Runddraht zeigte weniger Reibung an als der NiTi-Vierkantdraht. Genauso verhielt es sich bei den Stahldrähten. Bei den TMA-Bögen zeigte sich ein umgekehrtes Verhalten. Hier schnitten die Vierkantbögen mit einer geringeren Friktionskraft ab als die Runddrähte.

5.7.4.2. Vergleich der Drahtmaterialien

Vierkantbögen:

Bezogen auf das Material zeigte sich, ein signifikanter Unterschied zwischen allen Messungen. Die TMA-Vierkantbögen zeigten im Mittel die größte Friktionskraft und die Stahlvierkantbögen die geringste.

Rundbögen:

Hier zeigten die TMA-Rundbögen eine signifikant höhere Friktionskraft als die NiTi,- und die Stahlrundbögen.

5.7.5. Bracket 5: Teflon

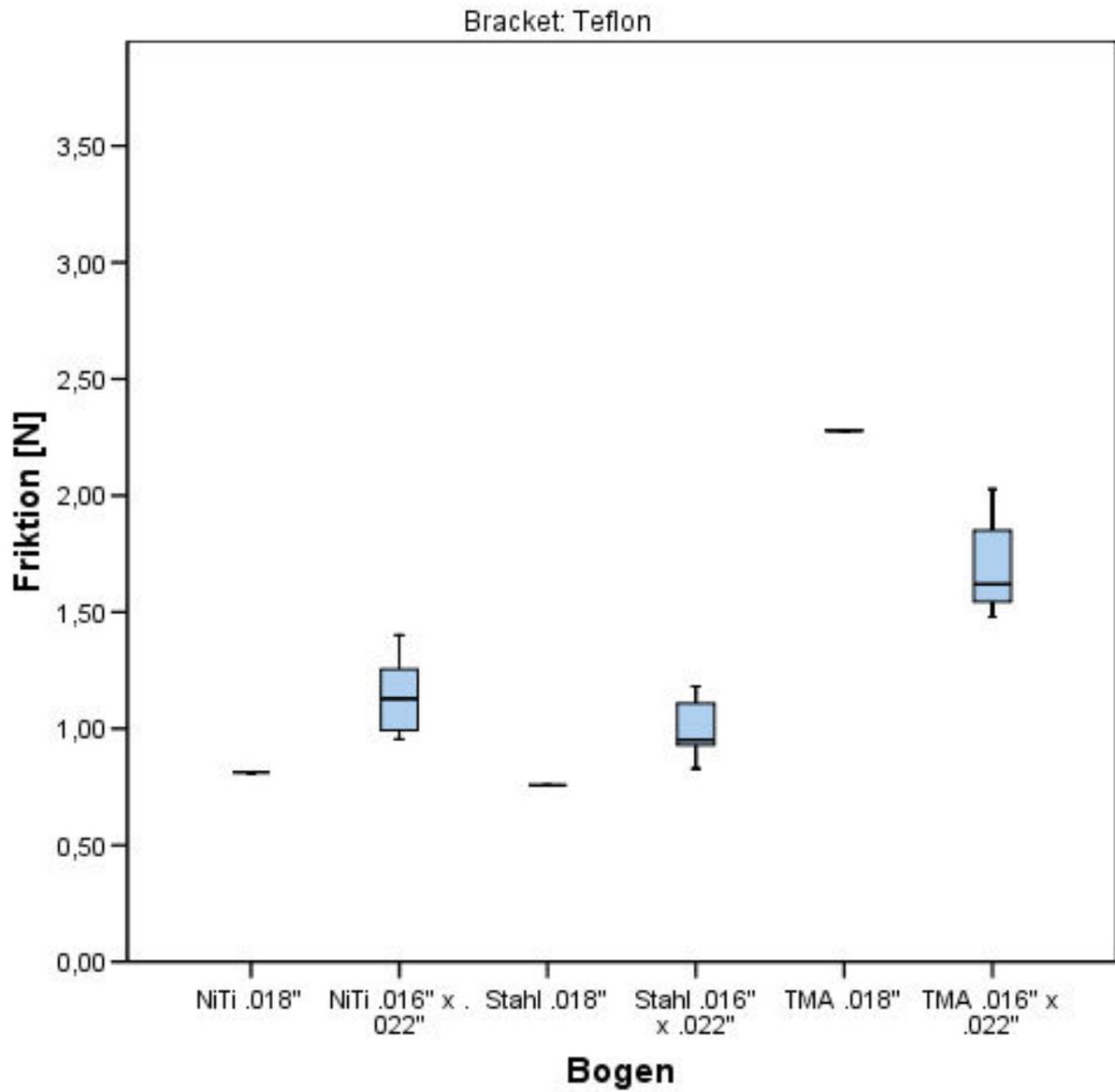


Abb. 24: Boxplot (Drahtvergleich bei Bracket Teflon im UK)

	NiTi.018“	Stahl.018“	TMA.018“	NiTi.016“x.022“	Stahl.016“x.022“
Stahl.018“	n.s.				
TMA.018“	n.s.	n.s.			
NiTi.016“x.022“	n.s.				
Stahl.016“x.022“		n.s.		n.s.	
TMA.016“x.022“			n.s.	**	**

Tabelle 24: Signifikanzen zu Abb. 24 Boxplot (Mann-Whitney-U-Test: Drahtvergleich bei Bracket Teflon im UK)

5.7.5.1. Vergleich der Drahtform

Bezogen auf die Drahtform konnten keine signifikanten Unterschiede bei den gemessenen Drähten festgestellt werden.

5.7.5.2. Vergleich der Drahtmaterialien

Vierkantbögen:

Bezogen auf das Material, zeigte sich, dass die TMA-Vierkantbögen eine signifikant höhere Friktionskraft als die NiTi,- und die Stahlvierkantbögen aufwiesen.

Rundbögen:

Bezogen auf das Material, konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

Zur Erinnerung:

Bei den Rundbögen gelang es nicht richtig, den Draht im UK Teflon-Bracket zu führen, er sprang immer wieder heraus. Deshalb wurde hier jeweils nur ein Messwert erfasst.

5.8. Rasterelektronenmikroskopische Bilder

Die rasterelektronenmikroskopische Betrachtung der untersuchten Stahlbrackets mit Tefloneinlage zeigt, dass man diese in zwei Gruppen einteilen kann. Es gibt Brackets, die so konstruiert wurden, dass der Bogen während der Messung über die Tefloneinlagen glitt (hier benannt als REM Kontakt Bogen-Teflon siehe Abbildungen 11 und 12) und es gibt solche, die konstruktionsbedingt keinen, bzw. sehr geringen Kontakt zwischen Bogen und Tefloneinlage zuließen (hier als „REM kein Kontakt Bogen-Teflon“ benannt siehe Abbildungen 13 und 14), diese zeigen nur Abreibungen der Bögen auf dem Stahl.

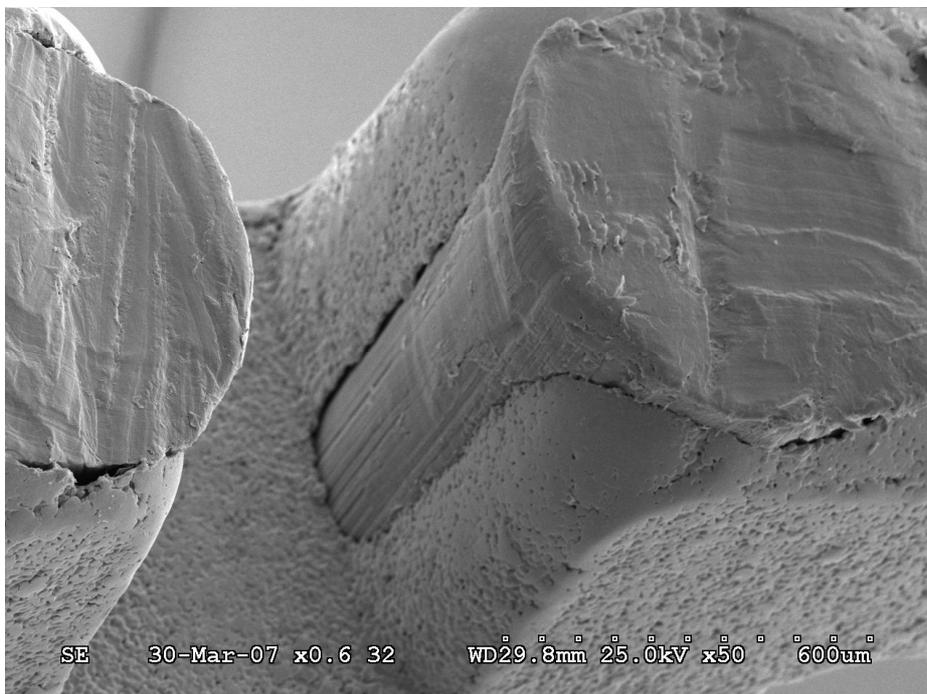


Abb.11 Kontakt zwischen Bogen und Teflon sichtbar

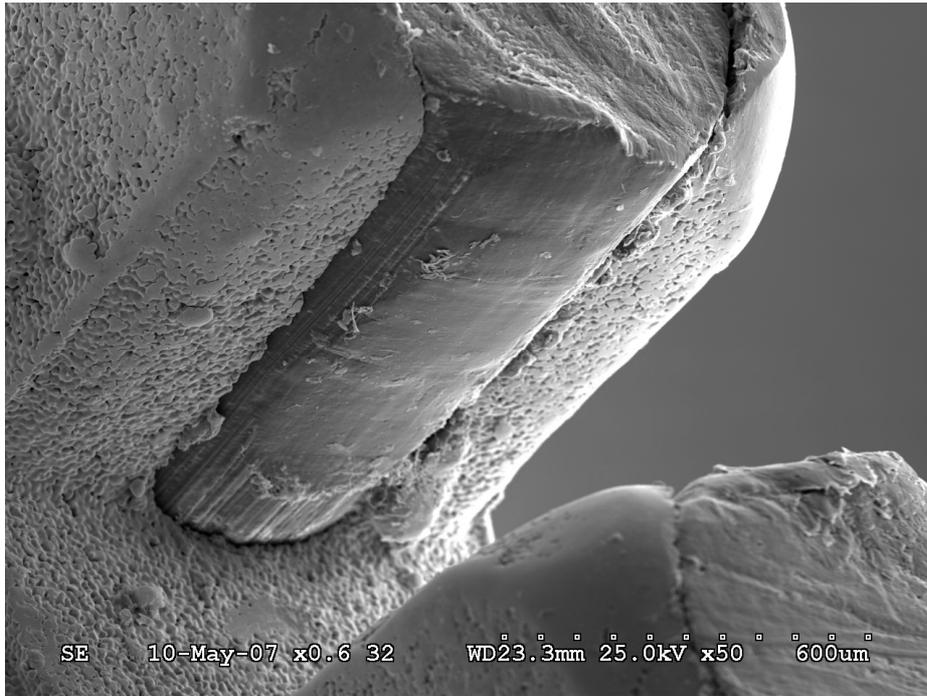


Abb.12 Kontakt zwischen Bogen und Teflon sichtbar



Abb. 13 Kontakt zwischen Bogen und Bracket sichtbar

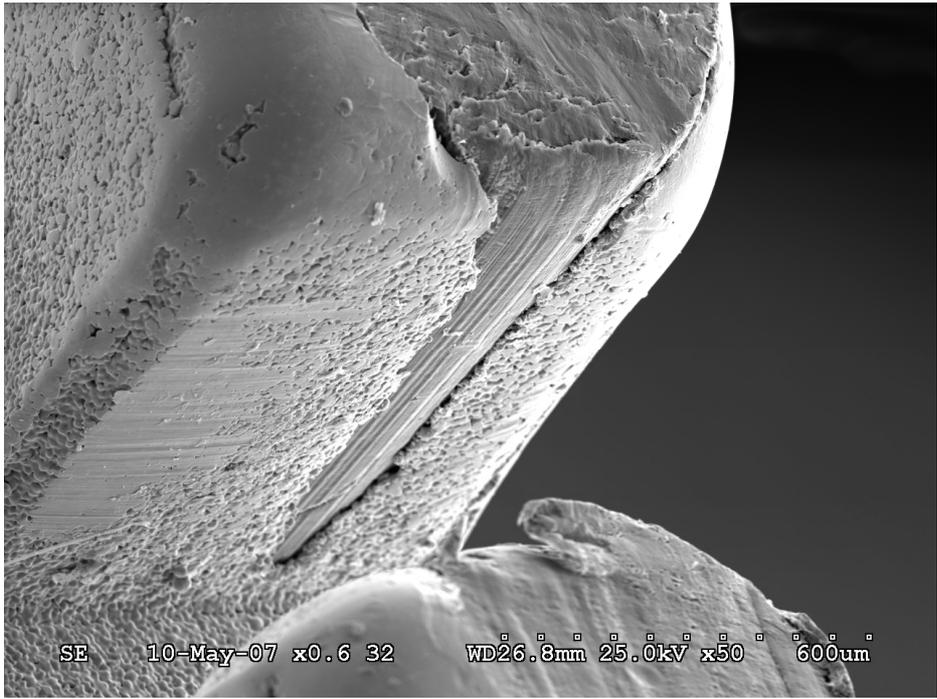


Abb. 14 Kontakt zwischen Bogen und Bracket sichtbar

5.9. Vergleich der Stahlbrackets mit Tefloneinlagen untereinander

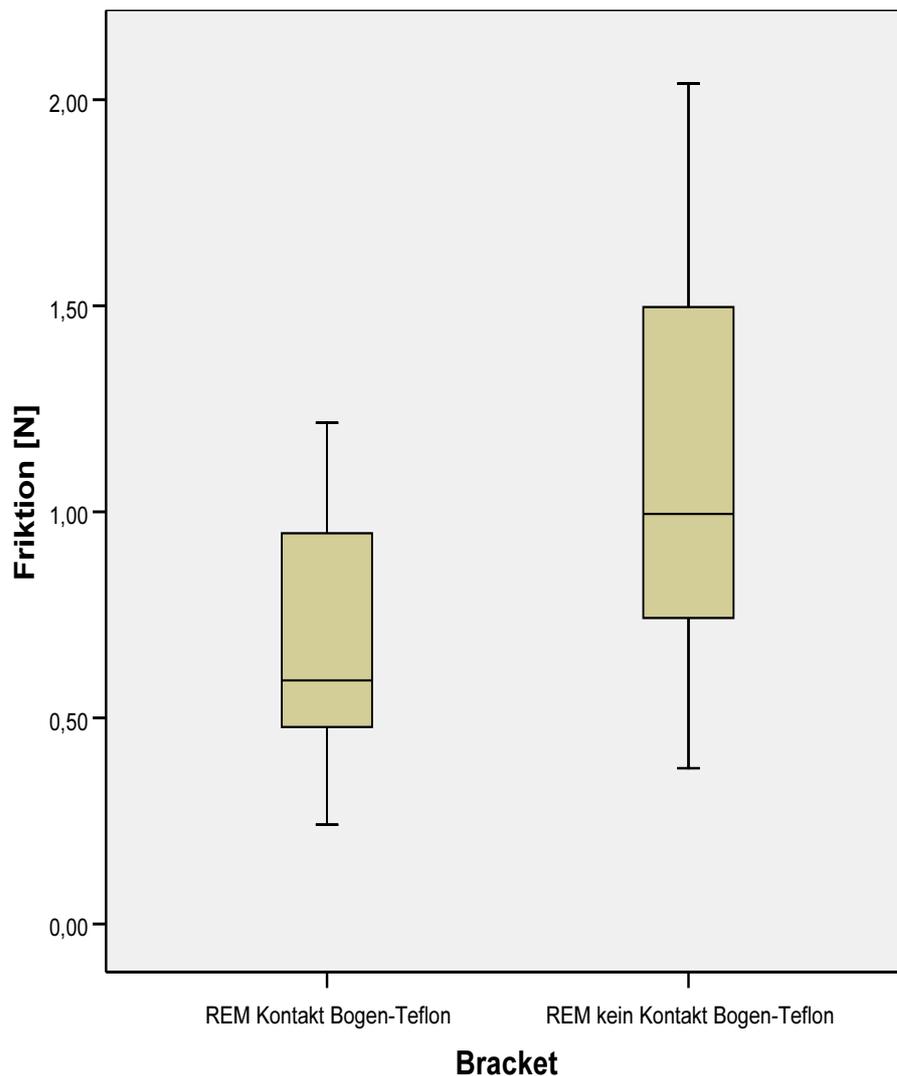


Abb. 25: Boxplot (Vergleich der Stahlbrackets mit Tefloneinlage untereinander)

Nach rasterelektronenmikroskopischer Inspektion werden die Teflonbrackets in zwei Gruppen eingeteilt :Gruppe1: REM Kontakt Bogen-Teflon (OK Bracket 6); Gruppe2: REM kein Kontakt Bogen-Teflon (OK Brackets 1-5, UK Brackets 1-6). Nach Berechnung mittels Mann-Whitney-U-Test zeigt die Gruppe1 signifikant geringere Friktionswerte.

6. Diskussion

6.1. Diskussion der Versuchsmethodik

In der vorliegenden Studie, sowie in den meisten anderen Studien zum Thema Friktionsmessungen, wurden diese mittels Simulation einer bogengeführten Eckzahnbewegung durchgeführt. Dies macht Vergleiche möglich.

Es werden jedoch in der Literatur verschiedene Verfahren zur Messung der Friktion beschrieben. Die ersten Friktionsmessungen wurden 1970 von Andreasen und Quevedo [1] durchgeführt, welche eine rein mechanische Messapparatur anwandten, die von Hand aktiviert wurde.

In den kommenden Jahren wurden ähnliche Apparaturen zur Messung der Reibung angewandt, welche allerdings alle ebenfalls nur eine statische Messung der Friktion ermöglichten, da die Zugkräfte meist durch das Hinzufügen von Gewichten oder wie oben beschrieben durch den Einsatz menschlicher Kraft ausgelöst wurden.

Spätere Messapparaturen ermöglichten die Messung der axialen Kräfte bei definierten konstanten Zuggeschwindigkeiten. Hiermit konnten statische oder dynamische Reibungskräfte gemessen werden [31,38,56,57,59].

Die Messapparaturen der neusten Generation sind in der Lage, statische und dynamische Reibungskräfte parallel zu messen, z.B. das Orthodontische Mess- und Simulationssystem (OMSS) [26].

Das OMSS verfügt über zwei Messtische, die sich jeweils aus einem Kraft/Momenten-Sensor und einem motorisch angetriebenen, dreidimensional beweglichem Positioniertisch zusammensetzen. Die Sensoren sind in der Lage alle auf einen Zahn einwirkenden Kräfte und auch Drehmomente simultan zu erfassen und an das Computersystem OMSS, welches auf einem PC läuft, weiterzuleiten. Das OMSS gestattet eine Vielzahl mikroprozessorgesteuerter, mehrdimensionaler Messungen, wodurch nicht nur statische, sondern auch dynamische Kräfte gemessen werden

können. Das OMSS ahmt, im Vergleich zu anderen In-vitro-Messsystemen, wohl am besten die klinische Situation nach.

Die exakte Nachahmung klinischer Verhältnisse ist verglichen mit dem zu betreibenden Aufwand in der vorliegenden Studie vernachlässigbar, da es sich hier um eine Vergleichsstudie handelt. Es werden Friktionskräfte an unterschiedlichen Brackets und Bögen gemessen und miteinander verglichen. Da andere Autoren auch meist eindimensionale Friktionsmessungen durchführten können die Ergebnisse der vorliegenden Studie durchaus mit den Ergebnissen anderer Studien verglichen werden.

Eine Schwierigkeit zeigte sich in der zentralen Positionierung des Brackets an der Messapparatur. Hierzu wurde eine Positionierungslehre entwickelt, die das Bracket so adaptierte, dass sich der Bracketslot orthogonal ausgerichtet im Mittelpunkt der Schraubenlängsachse befand. Dies diente dazu, dass Inset, Offset, Torque und Angulation des Slots keinen Einfluss auf die Messungen nehmen konnten.

Eine mögliche Fehlerquelle des vorliegenden Messaufbaus liegt in der Anbringung der Ligaturen. Auch derselbe Behandler ist nicht in der Lage, verschiedene Stahlligaturen gleich stark anzuziehen. In der vorliegenden Studie wurde aus diesem Grund mit nur zwei Stahlligaturen abwechselnd gearbeitet. Nach jedem Messvorgang wurde die jeweilige Ligatur nur leicht geöffnet und für den nächsten Vorgang erneut genutzt, so dass sie in gewisser Weise schon „vorgebogen“ waren. Außerdem wurde jeder Messvorgang zweimal durchgeführt. Auf eine „Nullmessung“ ohne Gewicht folgte die Hauptmessung in der das Bracket mit 10 Nmm gegen den Bogen anguliert wurde. Zeigte die „Nullmessung“ schon zu hohe Friktionswerte konnte es sich dabei nur um die ligaturbedingten Reibungskräfte handeln und die Messung wurde nach Lockerung der Ligatur wiederholt.

Ein weiteres Problem zeigte sich in der Durchführung einiger Messungen. Hiervon waren alle Messungen mit den UK Teflon-Brackets betroffen. Durch die eingesetzten Teflonstifte veränderte sich das Bracketdesign dahingehend, dass es nicht richtig

gelang, die runden Drähte im UK Teflon-Bracket zu führen, sie sprangen immer wieder heraus. Deshalb wurde hier jeweils nur ein Messwert erfasst.

Die vorliegenden Friktionsmessungen wurden im Trockenen durchgeführt, da der Einfluss des Speichels als Gleitmittel von diversen Autoren als vernachlässigbarer Faktor im Friktionsmechanismus dargestellt wird [31,38].

6.2. Diskussion der eigenen Ergebnisse

Vergleicht man alle durchgeführten Messungen miteinander, so kann festgestellt werden, dass die Reibungswerte des Polymerbrackets (Opal) signifikant geringer waren, als die aller anderen getesteten Brackets. Da die Opal-Brackets die einzig selbstligierenden Brackets in dieser Studie waren, könnte der Ligaturmechanismus zu den im Vergleich geringen Friktionswerten geführt haben, was vorherige Studien bestätigen würde [32,43,61]. Außerdem bestätigen andere Studien geringere Reibungswerte bei Kunststoffbrackets im Vergleich zu Edelstahlbrackets [4].

Die Reibungswerte der hier zum erstenmal getesteten Stahlbrackets mit Tefloneinlage und die der Ormco-Stahlbrackets lagen wie oben beschrieben über denen des Opal-Brackets. Die Friktionswerte der Teflon-Brackets waren geringfügig niedriger als die der Ormco-Brackets, sie unterschieden sich allerdings nicht signifikant voneinander. Der erhoffte friktionsreduzierende Effekt der Tefloneinlagen blieb somit aus. Da Teflon nachweislich einen sehr geringen Friktionskoeffizienten aufweist [18,88] und schon als Oberflächenmodifikation bei Drähten zu einer Reduktion der Friktionskraft, verglichen mit Edelstahl, geführt hat [9,35,77] stellt sich die Frage, warum die Tefloneinlagen in diesem Fall nicht zu einer Friktionsreduktion führten.

Die rasterelektronenmikroskopische Untersuchung der Brackets zeigte, dass die Tefloneinlagen in den meisten Fällen so in den Stahlbrackets positioniert wurden, dass der Draht während der Messung teils über die Tefloneinlage, teils über den Stahl glitt. Es gab nur ein Bracket, in welches die Tefloneinlagen so eingebracht worden waren, dass der Bogen während der Friktionsmessung nur über das Teflon rieb.

Wenn man die Friktionswerte dieses Teflon-Brackets mit denen der anderen Teflon-Brackets vergleicht, so ergibt sich ein signifikant geringerer Friktionswert für dieses Bracket. Dies deutet darauf hin, dass Tefloneinlagen in Brackets zu einer Friktionsreduktion führen können.

Die Friktionswerte der beiden getesteten Keramikbrackets waren signifikant höher als die der anderen Brackets. Der Unterschied lag darin, dass die Reibungswerte des polykristallinen Keramikbrackets (Fascination) signifikant geringer waren, als die des monokristallinen Keramikbrackets (Inspire), was vorangegangene Studien bestätigt [2,5,16,36,49,51,69].

Vergleicht man die Reibungswerte der in der Studie verwandten Bogenmaterialien (unabhängig von der Bogenform), so zeigen sich für TMA-Bögen signifikant höhere Werte als für NiTi- und Stahlbögen. Dies steht in Übereinstimmung mit zahlreichen anderen Veröffentlichungen [2,12,22,23,49,51,52,56,71]. Die Friktionswerte für NiTi- und Stahlbögen zeigen in dieser Studie keinen signifikanten Unterschied, wobei Stahlbögen in der Literatur fast einstimmig signifikant geringere Reibungswerte als NiTi-Bögen aufweisen [2,4,8,11,22,23,24,31,36,49,53,56,61,62,70,83,87]. Grund hierfür könnten schwankende Qualitäten bei NiTi-Bögen sein. Bourauel et al [8] geben in ihrer Studie an, dass die Oberflächenrauigkeit von Stahl bei zirka $0,10\ \mu\text{m}$ liegt, wobei die von NiTi zwischen $0,10\ \mu\text{m}$ und $1,30\ \mu\text{m}$ variieren kann. Diese Differenz innerhalb der Gruppe der NiTi-Bögen könnte zu Unterschieden der Friktionswerte führen, da ein Anstieg der Oberflächenrauigkeit zu einer stärkeren Friktion führt [22,23, 48,49, 70].

Bezogen auf die Bogenform zeigt die vorliegende Studie keinen signifikanten Unterschied zwischen Rund- und Vierkantbögen bei den Bogenmaterialien NiTi und Stahl. Bei TMA- Bögen können signifikant geringere Reibungswerte für Vierkantbögen im Gegensatz zu Rundbögen beobachtet werden.

6.3. Schlussfolgerung

Schlussfolgernd kann gesagt werden, dass die vorliegenden Teflon-Brackets nicht zu der gewünschten Reduktion der Reibungskraft führen, was mit aller Wahrscheinlichkeit an ihrer Konstruktion liegt. Das Einbringen der Teflonstifte in die Stahlbrackets erfolgte per Hand, was an sich schon handwerkliches Geschick benötigt. Die Tefloneinlagen per Hand so zu positionieren, dass nur sie Kontakt zu dem durchlaufenden Bogen haben, dieser also keinen Kontakt zum Stahl hat, scheint selten zu gelingen. Zu bedenken ist, dass dies bei vier Stiften pro Bracket der Fall sein muss.

Der Einzelfall zeigt allerdings, dass durch Teflon sehr wohl eine Friktionsreduktion erreicht werden kann. Denkbar wäre eine vollständige Auskleidung der Slotwände mit Teflon, wobei dann auch die Kanten aus Teflon bestehen würden. Daher sollten weitere Prototypen mit Tefloneinlagen entwickelt werden.

Bei dieser Studie handelt es sich um eine In-vitro-Untersuchung, die Einwirkungen der natürlichen Umgebung der Mundhöhle wurden nicht berücksichtigt. Die physiologische Kaubewegung des Patienten und die Tatsache, dass die Zähne im Parodontium elastisch aufgehängt sind, tragen wesentlich dazu bei, dass Zahnbewegungen – trotz hoher Friktion zwischen Bogen und Bracket- im Praxisalltag mit weniger Aufwand möglich sind als viele Friktionsmessungen zeigen.

7. Zusammenfassung

Die vorliegende In-vitro-Studie befasst sich mit der Ermittlung von Friktionswerten, welche bei der bogengeführten Zahnbewegung zwischen Bracket und Bogen entstehen. Insbesondere beschäftigt sie sich mit der Fragestellung, ob das Einfügen von Tefloneinlagen in Edelstahlbrackets zu einer Reduktion der Friktionskraft führt.

Es wurde das Reibungsverhalten von fünf Brackets unterschiedlichen Materials getestet. Ein polykristallines Keramikbracket der Firma Dentaurum (Fascination®), ein

monokristallines Keramikbracket von Ormco (Inspire Ice™), ein Kunststoffbracket von Ultradent (Opal®), sowie ein Stahlbracket von Ormco (Diamond Ormesh®) und ein neu entwickeltes Edelstahlbracket mit Tefloneinlagen. Von jedem Produkt wurden jeweils sechs breite (OK Eckzahnbrackets) und sechs schmale (UK Frontzahnbrackets) untersucht, sie hatten alle eine Slotdimension von 0,018“. Die Messung der Reibungskräfte erfolgte für alle Brackettypen, außer des Opal-Brackets, welches selbstligierend ist, mit vorgeformten Stahlligaturen der Stärke 0,010“. Diese wurde „locker“ angewandt, das heißt die Ligatur wurde durch Rückrotation um ca. 180 Grad gelockert, sodass eine leichte Beweglichkeit ohne Verlust der Ligatur gegeben war. Die Brackets wurden mit einem Nickel-Titan, einem β -Titan (TMA) und einem Stahlbogen in jeweils zwei Ausführungen (rund 0,016“ und vierkant 0,016“x 0,022“) gemessen. Die Friktionsmessungen erfolgten mit Hilfe des RMS (robotergestütztes Messsystem).

Die signifikant geringsten Friktionswerte zeigte das selbstligierende Opal-Bracket. Hierauf folgen die Werte des neu entwickelten Stahlbrackets mit Tefloneinlage und die des Stahlbrackets von Ormco. Die Friktionswerte dieser beiden Brackets zeigten untereinander keinen signifikanten Unterschied. Des Weiteren konnten signifikant höhere Reibungswerte für das Fascination-Bracket gemessen werden, welches nur von den Werten des Inspire-Brackets übertroffen wurde.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das Einbringen von Teflonstiften in Stahlbrackets in der vorliegenden Form nicht zu einer gewünschten Reduktion der Friktionskraft geführt hat. Der Grund hierfür zeigte sich in den angefertigten rasterelektronenmikroskopischen Bildern. Bei Stahlbrackets mit Tefloneinlage zeigten sich Reibungsspuren des Drahtes auf dem Teflon und auf dem Stahl, bis auf eine Ausnahme. In diesem besagten Fall hatte der Bogen ausschließlich Kontakt zu dem Teflon. Bei dem Vergleich dieses einen Brackets mit den anderen seiner Art zeigten sich hier signifikant geringere Friktionswerte. Der Einzelfall zeigt somit, dass generell eine Reduktion der Reibungskraft durch Tefloneinlagen in Brackets möglich ist. Eine

vollständige Auskleidung der Slotwände mit Teflon wäre eine denkbare, allerdings technisch auch aufwändige Variante.

8. Anhang

8.1. Statistische Einzelauswertungen

8.1.1. Deskriptive Statistik OK / UK zusammen

Bracket	Min	Max	MW	SD
Fascination	0,61	2,55	1,390	0,523
Inspire	0,68	3,63	1,677	0,659
Opal	0,15	1,38	0,647	0,263
Ormco Diamond	0,35	2,64	1,198	0,553
Teflon	0,24	2,28	1,070	0,474

Tabelle 25 : Deskriptive Statistik OK / UK zusammen

8.1.2. Deskriptive Statistik UK gesamt

Bogen	Min	Max	MW	SD
NiTi .018"	0,42	1,88	0,982	0,309
NiTi .16" x .022"	0,44	1,77	1,088	0,372
Stahl .018"	0,49	1,65	0,993	0,330
Stahl 16" x .022"	0,32	1,93	1,025	0,375
TMA .018"	0,58	3,63	2,036	0,727
TMA 16" x .022"	0,50	2,55	1,654	0,503

Tabelle 26: Deskriptive Statistik UK gesamt

8.1.3. Deskriptive Statistik OK gesamt

Bogen	Min	Max	MW	SD
NiTi .018"	0,21	1,98	0,855	0,437
NiTi .16" x .022"	0,33	1,52	0,901	0,288
Stahl .018"	0,22	1,79	0,826	0,428
Stahl 16" x .022"	0,15	2,66	0,928	0,548
TMA .018"	0,87	3,40	1,814	0,689
TMA 16" x .022"	0,36	2,59	1,428	0,581

Tabelle 27: Deskriptive Statistik OK gesamt

8.1.4. Deskriptive Statistik UK Bracket 1 Fascination

Bogen	Min	Max	MW	SD
NiTi .018"	0,66	1,04	0,897	0,153
NiTi .16" x .022"	0,85	1,06	0,932	0,858
Stahl .018"	0,72	1,51	1,229	0,275
Stahl 16" x .022"	0,85	1,45	1,177	0,211
TMA .018"	1,91	2,48	2,148	0,220
TMA 16" x .022"	1,64	2,55	1,952	0,336

Tabelle 28: Deskriptive Statistik UK Bracket Fascination

8.1.5. Deskriptive Statistik UK Bracket 2 Inspire

Bogen	Min	Max	MW	SD
NiTi .018"	0,86	1,88	1,339	0,336
NiTi .16" x .022"	0,68	1,77	1,169	0,389
Stahl .018"	0,96	1,65	1,265	0,263
Stahl 16" x .022"	1,00	1,93	1,317	0,337
TMA .018"	1,77	3,63	2,611	0,630
TMA 16" x .022"	1,51	2,24	1,843	0,247

Tabelle 29: Deskriptive Statistik UK Bracket Inspire

8.1.6. Deskriptive Statistik UK Bracket 3 Opal

Bogen	Min	Max	MW	SD
NiTi .018"	0,42	0,95	0,684	0,173
NiTi .16" x .022"	0,44	0,73	0,617	0,110
Stahl .018"	0,49	0,71	0,591	0,073
Stahl 16" x .022"	0,32	0,52	0,417	0,092
TMA .018"	0,58	1,26	0,950	0,259
TMA 16" x .022"	0,50	0,95	0,795	0,161

Tabelle 30: Deskriptive Statistik UK Bracket Opal

8.1.7. Deskriptive Statistik UK Bracket 4 Ormco

Bogen	Min	Max	MW	SD
NiTi .018"	0,80	1,13	1,036	0,123
NiTi .16" x .022"	1,51	1,66	1,580	0,615
Stahl .018"	0,81	1,04	0,926	0,083
Stahl 16" x .022"	1,04	1,35	1,223	0,102
TMA .018"	2,20	2,64	2,393	0,179
TMA 16" x .022"	1,73	2,34	1,988	0,233

Tabelle 31: Deskriptive Statistik UK Bracket Ormco

8.1.8. Deskriptive Statistik UK Bracket 5 Teflon

Bogen	Min	Max	MW	SD
NiTi .018"	0,81	0,81	0,814	
NiTi .16" x .022"	0,96	1,40	1,144	0,167
Stahl .018"	0,76	0,76	0,757	
Stahl 16" x .022"	0,83	1,18	0,992	0,123
TMA .018"	2,28	2,28	2,279	
TMA 16" x .022"	1,48	2,03	1,690	0,208

Tabelle 32: Deskriptive Statistik UK Bracket Teflon

8.1.9. Deskriptive Statistik OK Bracket 1 Fascination

Bogen	Min	Max	MW	SD
NiTi .018"	0,61	1,17	0,985	0,214
NiTi .16" x .022"	0,77	1,10	0,929	0,129
Stahl .018"	1,10	1,28	1,165	0,077
Stahl 16" x .022"	1,00	1,26	1,122	0,089
TMA .018"	1,77	2,44	2,057	0,217
TMA 16" x .022"	1,75	2,45	2,081	0,241

Tabelle 33: Deskriptive Statistik OK Bracket Fascination

8.1.10. Deskriptive Statistik OK Bracket 2 Inspire

Bogen	Min	Max	MW	SD
NiTi .018"	1,20	1,98	1,529	0,316
NiTi .16" x .022"	0,87	1,44	1,143	0,211
Stahl .018"	1,05	1,79	1,443	0,241
Stahl 16" x .022"	1,00	2,66	1,681	0,701
TMA .018"	2,03	3,40	2,872	0,509
TMA 16" x .022"	1,21	2,59	1,911	0,456

Tabelle 34: Deskriptive Statistik OK Bracket Inspire

8.1.11. Deskriptive Statistik OK Bracket 3 Opal

Bogen	Min	Max	MW	SD
NiTi .018"	0,21	0,75	0,557	0,217
NiTi .16" x .022"	0,33	0,60	0,463	0,121
Stahl .018"	0,22	0,54	0,426	0,117
Stahl 16" x .022"	0,15	0,52	0,423	0,137
TMA .018"	0,87	1,38	1,109	0,234
TMA 16" x .022"	0,36	0,85	0,691	0,202

Tabelle 35: Deskriptive Statistik OK Bracket Opal

8.1.12. Deskriptive Statistik OK Bracket 4 Ormco

Bogen	Min	Max	MW	SD
NiTi .018"	0,35	0,65	0,563	0,115
NiTi .16" x .022"	0,92	1,12	0,997	0,073
Stahl .018"	0,50	0,62	0,540	0,042
Stahl 16" x .022"	0,59	0,77	0,696	0,059
TMA .018"	1,12	1,53	1,358	0,169
TMA 16" x .022"	0,93	1,26	1,077	0,106

Tabelle 36: Deskriptive Statistik OK Bracket Ormco

8.1.13. Deskriptive Statistik OK Bracket 5 Teflon

Bogen	Min	Max	MW	SD
NiTi .018"	0,24	0,76	0,5908	0,184
NiTi .16" x .022"	0,55	1,52	0,901	0,336
Stahl .018"	0,38	0,64	0,557	0,099
Stahl 16" x .022"	0,46	1,17	0,719	0,271
TMA .018"	1,22	2,04	1,674	0,279
TMA 16" x .022"	0,95	1,52	1,256	0,252

Tabelle 37: Deskriptive Statistik OK Bracket Teflon

8.1.14. Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Tests

Bracketpaar	p	Sign.
Fascination – Inspire	0,004	**
Fascination – Opal	0,000	***
Fascination – Ormco	0,021	*
Fascination – Teflon	0,000	***
Inspire – Opal	0,000	***
Inspire – Ormco	0,000	***
Inspire – Teflon	0,000	***
Opal – Ormco	0,000	***
Opal – Teflon	0,000	***
Ormco – Teflon	0,235	n.s.

Tabelle 38: Mann-Whitney-U-Test zu Abb. 1 Boxplot (Vergleich der Friktion aller Brackets im OK / UK bei allen Drähten)

Bracketpaar	NiTi .018“	Sign.	NiTi .016“x.022“	Sign.
Fascination - Inspire	0,002	**	0,132	n.s.
Fascination – Opal	0,017	*	0,004	**
Fascination – Ormco	0,026	*	0,240	n.s.
Fascination – Teflon	0,015	*	0,699	n.s.
Inspire – Opal	0,004	**	0,004	**
Inspire – Ormco	0,002	**	0,240	n.s.
Inspire – Teflon	0,002	**	0,132	n.s.
Opal – Ormco	0,931	n.s.	0,004	**
Opal – Teflon	0,662	n.s.	0,009	**
Ormco – Teflon	0,937	n.s.	0,132	n.s.

Tabelle 39 : Mann-Whitney-U-Test zu Abb.2 Boxplot (Bracketvergleich im OK bei NiTi .018“) und Abb. 3 Boxplot (Bracketvergleich im OK bei NiTi .016“ x .022“)

Bracketpaar	Stahl .018“	Sign.	Stahl .016“x.022“	Sign.
Fascination - Inspire	0,065	n.s.	0,093	n.s.
Fascination – Opal	0,002	**	0,002	**
Fascination – Ormco	0,002	**	0,002	**
Fascination – Teflon	0,002	**	0,026	*
Inspire – Opal	0,002	**	0,002	**
Inspire – Ormco	0,002	**	0,002	**
Inspire – Teflon	0,002	**	0,009	**
Opal – Ormco	0,065	n.s.	0,002	**
Opal – Teflon	0,065	n.s.	0,093	n.s.
Ormco – Teflon	0,394	n.s.	1,000	n.s.

Tabelle 40: Mann-Whitney-U-Test zu Abb. 4 Boxplot (Bracketvergleich im OK bei Stahl 0.18“) und Abb. 5 Boxplot (Bracketvergleich im OK bei Stahl .016“ x .022“)

Bracketpaar	TMA .018“	Sign.	TMA .016“x.022“	Sign.
Fascination - Inspire	0,009	**	0,394	n.s.
Fascination – Opal	0,002	**	0,004	**
Fascination – Ormco	0,002	**	0,002	**
Fascination – Teflon	0,041	*	0,002	**
Inspire – Opal	0,002	**	0,004	**
Inspire – Ormco	0,002	**	0,004	**
Inspire – Teflon	0,004	**	0,015	*
Opal – Ormco	0,065	n.s.	0,004	**
Opal – Teflon	0,009	**	0,004	**
Ormco – Teflon	0,026	*	0,310	n.s.

Tabelle 41 : Mann-Whitney-U-Test zu Abb. 6 Boxplot (Bracketvergleich im OK bei TMA .018“) und Abb. 7 Boxplot (Bracketvergleich im OK bei TMA .016“ x .022“)

Bracketpaar	NiTi .018“	Sign.	NiTi .016“x.022“	Sign.
Fascination - Inspire	0,026	*	0,180	n.s.
Fascination – Opal	0,065	n.s.	0,002	**
Fascination – Ormco	0,026	*	0,002	**
Fascination – Teflon	0,857	n.s.	0,026	*
Inspire – Opal	0,004	**	0,015	*
Inspire – Ormco	0,041	*	0,065	n.s.
Inspire – Teflon	0,286	n.s.	1,000	n.s.
Opal – Ormco	0,004	**	0,002	**
Opal – Teflon	0,571	n.s.	0,002	**
Ormco – Teflon	0,571	n.s.	0,002	**

Tabelle 42 : Mann-Whitney-U-Test zu Abb. 8 Boxplot (Bracketvergleich im UK bei NiTi .018“) und Abb. 9 Boxplot (Bracketvergleich im UK bei NiTi .016“ x .022“)

Bracketpaar	Stahl .018“	Sign.	Stahl .016“x.022“	Sign.
Fascination - Inspire	1,000	n.s.	0,589	n.s.
Fascination – Opal	0,002	**	0,002	**
Fascination – Ormco	0,065	n.s.	0,589	n.s.
Fascination – Teflon	0,571	n.s.	0,132	n.s.
Inspire – Opal	0,002	**	0,002	**
Inspire – Ormco	0,015	*	0,818	n.s.
Inspire – Teflon	0,286	n.s.	0,026	*
Opal – Ormco	0,002	**	0,002	**
Opal – Teflon	0,286	n.s.	0,002	**
Ormco – Teflon	0,286	n.s.	0,009	**

Tabelle 43: Mann-Whitney-U-Test zu Abb. 10 Boxplot (Bracketvergleich im UK bei Stahl .018“) und Abb.11 Boxplot (Bracketvergleich im UK bei Stahl .016“ x .022“)

Bracketpaar	TMA .018“	Sign.	TMA .016“x.022“	Sign.
Fascination - Inspire	0,132	n.s.	0,818	n.s.
Fascination – Opal	0,002	**	0,002	**
Fascination – Ormco	0,093	n.s.	0,589	n.s.
Fascination – Teflon	0,857	n.s.	0,132	n.s.
Inspire – Opal	0,002	**	0,002	**
Inspire – Ormco	0,485	n.s.	0,589	n.s.
Inspire – Teflon	0,571	n.s.	0,310	n.s.
Opal – Ormco	0,002	**	0,002	**
Opal – Teflon	0,286	n.s.	0,002	**
Ormco – Teflon	0,857	n.s.	0,065	n.s.

Tabelle 44 : Mann-Whitney-U-Test zu Abb.12 Boxplot (Bracketvergleich im UK bei TMA .018“) und Abb. 13 Boxplot (Bracketvergleich im UK bei TMA .016“ x .022“)

Bogenpaar	p	Sign.
NiTi .018" – NiTi .016"x.022	0,196	n.s.
Stahl .018" – Stahl .016"x.022"	0,650	n.s.
TMA .018" – TMA .016"x.022"	0,004	**

Tabelle 45 : Mann-Whitney-U-Test zu Abb. 14 Boxplot (Drahtvergleich OK / UK)
Vergleich der Drahtform.

Bogenpaar	p	Sign.
NiTi .018" – Stahl .018"	0,716	n.s.
NiTi .018" – TMA .018"	0,000	***
Stahl .018" – TMA .018"	0,000	***
NiTi .016"x.022" – Stahl .016"x.022"	0,696	n.s.
NiTi .016"x.022" – TMA .016"x.022"	0,000	***
Stahl .016"x.022 - TMA .016"x.022	0,000	***

Tabelle 46 : Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Test zu Abb.14 Boxplot (Drahtvergleich
OK / UK) Vergleich des Drahtmaterials.

Bogenpaar	Bracket Fascination	Sign.
NiTi .018" – NiTi .016"x.022	0,485	n.s.
Stahl .018" – Stahl .016"x.022"	0,485	n.s.
TMA .018" – TMA .016"x.022"	0,699	n.s.

Tabelle 47: Mann-Whitney-U-Test zu Abb. 15 Boxplot (Drahtvergleich bei Bracket
Fascination) Vergleich der Drahtform.

Bogenpaar	Bracket Fascination	Sign.
NiTi .018" – Stahl .018"	0,180	n.s.
NiTi .018" – TMA .018"	0,002	**
Stahl .018" – TMA .018"	0,002	**
NiTi .016"x.022" – Stahl .016"x.022"	0.026	*
NiTi .016"x.022" – TMA .016"x.022"	0,002	**
Stahl .016"x.022 - TMA .016"x.022	0,002	**

Tabelle 48: Mann-Whitney-U-Test zu Abb. 15 Boxplot (Drahtvergleich bei Bracket Fascination) Vergleich der Drahtmaterialien.

Bogenpaar	Bracket Inspire	Sign.
NiTi .018" – NiTi .016"x.022	0,065	n.s.
Stahl .018" – Stahl .016"x.022"	1,000	n.s.
TMA .018" – TMA .016"x.022"	0,015	*

Tabelle 49: Mann-Whitney-U-Test zu Abb. 16 Boxplot (Drahtvergleich bei Bracket Inspire) Vergleich der Drahtform.

Bogenpaar	Bracket Inspire	Sign.
NiTi .018" – Stahl .018"	0,818	n.s.
NiTi .018" – TMA .018"	0,002	**
Stahl .018" – TMA .018"	0,002	**
NiTi .016"x.022" – Stahl .016"x.022"	0.180	n.s.
NiTi .016"x.022" – TMA .016"x.022"	0,009	**
Stahl .016"x.022 - TMA .016"x.022	0,485	n.s.

Tabelle 50: Mann-Whitney-U-Test zu Abb. 16 Boxplot (Drahtvergleich bei Bracket Inspire) Vergleich der Drahtmaterialien.

Bogenpaar	Bracket Opal	Sign.
NiTi .018" – NiTi .016"x.022"	0,421	n.s.
Stahl .018" – Stahl .016"x.022"	1,000	n.s.
TMA .018" – TMA .016"x.022"	0,004	**

Tabelle 51: Mann-Whitney-U-Test zu Abb. 17 Boxplot (Drahtvergleich bei Bracket Opal) Vergleich der Drahtform.

Bogenpaar	Bracket Opal	Sign.
NiTi .018" – Stahl .018"	0,177	n.s.
NiTi .018" – TMA .018"	0,004	**
Stahl .018" – TMA .018"	0,002	**
NiTi .016"x.022" – Stahl .016"x.022"	0,537	n.s.
NiTi .016"x.022" – TMA .016"x.022"	0,056	n.s.
Stahl .016"x.022 - TMA .016"x.022	0,082	n.s.

Tabelle 52: Mann-Whitney-U-Test zu Abb. 16 Boxplot (Drahtvergleich bei Bracket Inspire) Vergleich der Drahtmaterialien.

Bogenpaar	Bracket ormco	Sign.
NiTi .018" – NiTi .016"x.022"	0,002	**
Stahl .018" – Stahl .016"x.022"	0,004	**
TMA .018" – TMA .016"x.022"	0,009	**

Tabelle 53: Mann-Whitney-U-Test zu Abb. 18: Boxplot (Drahtvergleich bei Bracket Ormco Diamond) Vergleich der Drahtform.

Bogenpaar	Bracket Ormco	Sign.
NiTi .018" – Stahl .018"	0,394	n.s.
NiTi .018" – TMA .018"	0,002	**
Stahl .018" – TMA .018"	0,002	**
NiTi .016"x.022" – Stahl .016"x.022"	0,002	**
NiTi .016"x.022" – TMA .016"x.022"	0,240	n.s.
Stahl .016"x.022 - TMA .016"x.022	0,002	**

Tabelle 54: Mann-Whitney-U-Test zu Abb. 18 Boxplot (Drahtvergleich bei Bracket Ormco Diamond) Vergleich der Drahtmaterialien.

Bogenpaar	Bracket Teflon	Sign.
NiTi .018" – NiTi .016"x.022	0,093	n.s.
Stahl .018" – Stahl .016"x.022"	0,485	n.s.
TMA .018" – TMA .016"x.022"	0,015	*

Tabelle 55: Mann-Whitney-U-Test zu Abb. 19 Boxplot (Drahtvergleich bei Bracket Teflon) Vergleich der Drahtform.

Bogenpaar	Bracket Teflon	Sign.
NiTi .018" – Stahl .018"	0,589	n.s.
NiTi .018" – TMA .018"	0,002	**
Stahl .018" – TMA .018"	0,002	**
NiTi .016"x.022" – Stahl .016"x.022"	0,310	n.s.
NiTi .016"x.022" – TMA .016"x.022"	0,093	n.s.
Stahl .016"x.022 - TMA .016"x.022	0,015	*

Tabelle 56: Mann-Whitney-U-Test zu Abb. 19 Boxplot (Drahtvergleich bei Bracket Teflon) Vergleich der Drahtmaterialien.

Bogenpaar	Bracket Fascination	Sign.
NiTi .018" – NiTi .016"x.022	0,937	n.s.
Stahl .018" – Stahl .016"x.022"	0,485	n.s.
TMA .018" – TMA .016"x.022"	0,240	n.s.

Tabelle 57: Mann-Whitney-U-Test zu Abb. 20 Boxplot (Drahtvergleich bei Bracket Fascination) Vergleich der Drahtform.

Bogenpaar	Bracket Fascination	Sign.
NiTi .018" – Stahl .018"	0,041	*
NiTi .018" – TMA .018"	0,002	**
Stahl .018" – TMA .018"	0,002	**
NiTi .016"x.022" – Stahl .016"x.022"	0,041	*
NiTi .016"x.022" – TMA .016"x.022"	0,002	**
Stahl .016"x.022 - TMA .016"x.022	0,002	**

Tabelle 58: Mann-Whitney-U-Test zu Abb. 20 Boxplot (Drahtvergleich bei Bracket Fascination) Vergleich der Drahtmaterialien.

Bogenpaar	Bracket Inspire	Sign.
NiTi .018" – NiTi .016"x.022	0,397	n.s.
Stahl .018" – Stahl .016"x.022"	0,699	n.s.
TMA .018" – TMA .016"x.022"	0,015	*

Tabelle 59: Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Test zu Abb. 21 Boxplot (Drahtvergleich bei Bracket Inspire) Vergleich der Drahtform.

Bogenpaar	Bracket Inspire	Sign.
NiTi .018" – Stahl .018"	0,699	n.s.
NiTi .018" – TMA .018"	0,004	**
Stahl .018" – TMA .018"	0,002	**
NiTi .016"x.022" – Stahl .016"x.022"	0,589	n.s.
NiTi .016"x.022" – TMA .016"x.022"	0,015	*
Stahl .016"x.022 - TMA .016"x.022	0,026	*

Tabelle 60: Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Test zu Abb. 21 Boxplot (Drahtvergleich bei Bracket Inspire) Vergleich der Drahtmaterialien.

Bogenpaar	Bracket Opal	Sign.
NiTi .018" – NiTi .016"x.022	0,485	n.s.
Stahl .018" – Stahl .016"x.022"	0,009	**
TMA .018" – TMA .016"x.022"	0,310	n.s.

Tabelle 61: Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Test zu Abb. 22: Boxplot (Drahtvergleich bei Bracket Opal) Vergleich der Drahtform.

Bogenpaar	Bracket Opal	Sign.
NiTi .018" – Stahl .018"	0,240	n.s.
NiTi .018" – TMA .018"	0,093	n.s.
Stahl .018" – TMA .018"	0,015	*
NiTi .016"x.022" – Stahl .016"x.022"	0,015	*
NiTi .016"x.022" – TMA .016"x.022"	0,041	*
Stahl .016"x.022 - TMA .016"x.022	0,009	**

Tabelle 62: Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Test zu Abb. 22: Boxplot (Drahtvergleich bei Bracket Opal) Vergleich der Drahtmaterialien.

Bogenpaar	Bracket Ormco	Sign.
NiTi .018" – NiTi .016"x.022"	0,002	**
Stahl .018" – Stahl .016"x.022"	0,004	**
TMA .018" – TMA .016"x.022"	0,026	*

Tabelle 63: Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Test zu Abb. 23 Boxplot (Drahtvergleich bei Bracket Ormco Diamond) Vergleich der Drahtform.

Bogenpaar	Bracket Ormco	Sign.
NiTi .018" – Stahl .018"	0,093	n.s.
NiTi .018" – TMA .018"	0,002	**
Stahl .018" – TMA .018"	0,002	**
NiTi .016"x.022" – Stahl .016"x.022"	0,002	**
NiTi .016"x.022" – TMA .016"x.022"	0,002	**
Stahl .016"x.022 - TMA .016"x.022	0,002	**

Tabelle 64: Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Test zu Abb. 23 Boxplot (Drahtvergleich bei Bracket Ormco Diamond) Vergleich der Drahtmaterialien.

Bogenpaar	Bracket Teflon	Sign.
NiTi .018" – NiTi .016"x.022"	0,286	n.s.
Stahl .018" – Stahl .016"x.022"	0,286	n.s.
TMA .018" – TMA .016"x.022"	0,286	n.s.

Tabelle 65: Mann-Whitney-U-Test zu Abb. 24: Boxplot (Drahtvergleich bei Bracket Teflon) Vergleich der Drahtform.

Bogenpaar	Bracket Teflon	Sign.
NiTi .018" – Stahl .018"	1,000	n.s.
NiTi .018" – TMA .018"	1,000	n.s.
Stahl .018" – TMA .018"	1,000	n.s.
NiTi .016"x.022" – Stahl .016"x.022"	0,132	n.s.
NiTi .016"x.022" – TMA .016"x.022"	0,002	**
Stahl .016"x.022 - TMA .016"x.022	0,002	**

Tabelle 66: Mann-Whitney-U-Test zu Abb. 24: Boxplot (Drahtvergleich bei Bracket Teflon) Vergleich der Drahtmaterialien.

9. Literaturverzeichnis

1. Andreasen GF, Quevedo FR: Evaluation of friction forces in the 0.022 x 0.028 edgewise bracket in vitro. J Biomech 3 (1970), 151-160
2. Angolkar PV, Kapilla S, Duncanson MG, Nanda RS: Evaluation of friction between ceramic brackets and orthodontic wires of four alloys. Am J Orthod 98(1990), 499-506
3. Baccetti T, Franchi L: Friction produced by types of elastomeric ligatures in treatment mechanics with the preadjusted appliance. Angle Orthod 76(2) (2006),211-6
4. Bazakidou E, Nanda RS, Duncanson MG, Sinha P: Evaluation of frictional resistance in esthetic brackets. Am J Orthod Dentofac Orthop 112 (1997),138-44
5. Bednar JR, Gruendeman GW, Sandrik JL: A comparative study of frictional force between orthodontic brackets and arch wires. Am J Orthod Dentofac Orthop 100 (1991), 513-22

6. Berger JH: The Influence of the Speed bracket's self-ligating design on force levels in tooth movement: A comparative in vitro study. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 97 (1990), 219-28
7. Beyer W: Lehrbuch der Organischen Chemie. Hirzel Verlag, 23. Auflage
8. Bourauel C, Fries T, Drescher D, Plietsch R: Surface roughness of orthodontic wires via atomic force microscopy, laser specular reflectance, and profilometry. *Eur J Orthod* 20 (1998), 79-92
9. Bourauel C, Husmann P, Höse N, Keilig L, Jäger A: Die Friktion bei der bogengeführten Zahnbewegung- Eine Übersicht. *Inf Orthod Kieferorthop* 39 (2007), 18-26
10. Bourauel C, Sernetz F, Drescher D: Der Kraftverlust durch Friktion bei der bogengeführten Zahnbewegung unter Einsatz von Titan- und Stahl-Brackets. *Kieferorthopädie* 11 (1997), 107-14
11. Cash A, Curtis R, Garrigia-Majo D, McDonald F: A comparative study of the static and kinetic frictional resistance of titanium molybdenum alloy archwires in stainless steel brackets. *Eur J Orthod* 26 (2004), 105-111
12. Cacciafesta V, Sfondrini MF, Ricciardi A, Scibante A, Klersy C, Auricchio F: Evaluation of friction of stainless steel and esthetic self-ligating brackets in various bracket-archwire combinations. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 124 (2003), 395-402
13. Cha JY, Kim KS, Hwang CJ: Friction of Conventional and Silica-Insert Ceramic Brackets in Various Bracket-Wire Combinations. *Angle Orthod* 77 (2007), 100-107
14. Chimenti C, Franchi L, Di Giuseppe MG, Lucci M: Friction of orthodontic elastomeric ligatures with different dimensions. *Angle Orthod* 75 (2005), 421-425
15. Damon DH: The Damon low-friction bracket: A biologically compatible straight-wire system. *J Clin Orthod* 32 (1998), 670-80
16. De Franco DJ, Spiller RE, von Fraunhofer JA: Frictional resistances using teflon-coated ligatures with various bracket-archwire combinations. *Angle Orthod* 65 (1995), 63-74

17. Dickson JAS, Jones SP, Davies EH: A Comparison of the frictional characteristics of five initial alignment wires and stainless steel brackets at three bracket to wire angulations – an in vitro study. Br J Orthod 21 (1994),15-22
18. Domininghaus H: Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften. Springer 5. neu bearbeitete und erweiterte Auflage, 1998
19. Downing A, McCabe J, Gordon P: A study of frictional forces between orthodontic brackets and archwires. Br J Orthod 21 (1994),349-357
20. Downing A, McCabe JF, Gordon PH: The effect of artificial saliva on the frictional forces between orthodontic brackets and archwires. Br J Orthod 22 (1995),41-46
21. Dowson D: History of Tribology. Longmann, London, New York, 1979
22. Drescher D, Laaser W, Schumacher HA: Materialtechnische Untersuchung zum Problem der Friktion zwischen Bracket und Bogen. Fortschr Kieferorthop 50 (1989), 256-267
23. Drescher D, Bourauel C, Schumacher HA: Der Kraftverlust durch Friktion bei der bogengeführten Zahnbewegung. Fortschr Kieferorthop 51 (1990), 99-105
24. Drescher D, Bourauel C, Schumacher HA: Frictional forces between bracket and arch wire. Amer J Orthodont Dentofac Orthop 96 (1989), 397-404
25. Drescher D, Bourauel C, Schumacher HA: Optimization of arch guided tooth movement by the use of uprighting springs. Eur J Orthod 12 (1990),346-353
26. Drescher D, Bourauel C, Their M: Ortodontisches Meß-und Simulationssystem (OMSS) für die statische und dynamische Analyse der Zahnbewegung. Fortschr Kieferorthop 52 (1991), 133-140
27. Edwards GD, Davies EH, Jones SP: The ex vivo effect of ligation technique on the static frictional resistance of stainless steel brackets and archwires. Br J Orthod 22 (1995),145-153
28. Frank CA: An evaluation of the frictional force generated between orthodontic bracket and arch wire. Master thesis,University S. Louis 1979.
29. Frank CA, Nikolai JR: A comparative study of frictional resistance between orthodontic bracket and arch wire. Amer J Orthod 78 (1980), 593-609

30. Fuck LM, Wilmes B, Gürler G, Hönscheid R, Drescher D: Friktionsverhalten selbstligierender und konventioneller Bracketsysteme. *Inf Orthod Kieferorthop* 39 (2007), 6-17
31. Garner LD, Allai WW, Moore BK: A comparison of frictional forces during simulated canine retraction of a continuous edgewise arch wire. *Amer J Orthodont Dentofac Orthop* 90 (1986), 199-203
32. Hain M, Dhopatkar A, Rock P: A comparison of different ligation methods on friction. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 130 (2006), 666-70
33. Hain M, Dhopatkar A, Rock P: The effect of ligation method on friction in sliding mechanics. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 123 (2003), 416-22
34. Ho KS, West VC: Friction resistance between edgewise brackets and archwires. *Aust Orthod J* 12 (1991), 95-99
35. Husmann P, Bourauel C, Wessinger M, Jäger A: Das Reibungsverhalten beschichteter Führungsbögen. *J Orofac Orthop / Fortschr Kieferorthop* 63 (2002), 199-211
36. Ireland AJ, Sherriff M, McDonald F: Effect of bracket and wire composition on frictional forces. *Eur J Orthod* 13 (1991), 322-328
37. Iwasaki LR, Beatty MW, Randall CJ, Nickel JC: Clinical ligation forces and intraoral friction during sliding on a stainless steel archwire. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 123 (2003), 408-15
38. Jost Brinkmann PG, Miethke RR: Einfluß der physiologischen Zahnbeweglichkeit auf die Friktion zwischen Bracket und Bogen. *Fortschr Kieferorthop* 52 (1991), 102-109
39. Kao CT, Ding SJ, Wang CK, He H, Chou MY, Huang TH: Comparison of frictional resistance after immersion of metal brackets and orthodontic wires in a fluoride-containing prophylactic agent. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 130 (2006), 568e1-9
40. Kapila S, Angolkar PV, Duncanson MG: Evaluation of friction between edgewise stainless steel brackets and orthodontic wires of four alloys. *Am J Orthod* 98 (1990), 117-26

41. Kapur R, Sinha PK, Nanda RS: Comparison of frictional resistance in titanium and stainless steel brackets. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 116 (1999), 271-4
42. Kapur R, Sinha PK, Nanda RS: Frictional resistance in orthodontic brackets with repeated use. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 116 (1999), 400-404
43. Khambay B, Millett D, McHugh S: Archwire seating forces produced by different ligation methods and their effect on frictional resistance. *Eur J Orthod* 27 (2005), 302-303
44. Kusy RP: Orthodontic biomechanics: vistas from the top of a new century. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 117 (2000), 589-591
45. Kusy RP, Schafer DL: Effect of salivary viscosity on frictional coefficients of orthodontic archwire / bracket couples. *J Mater Sci Mater Med* 6 (1995), 390-395
46. Kusy RP, Whitley JQ: Influence of fluid media on the frictional coefficients in orthodontic sliding. *Semin Orthod* 9 (2003), 281-289
47. Kusy RP, Whitley JQ, Mayhew MJ, Buckthal JE: Surface roughness of orthodontic archwires. *Angle Orthod* 58 (1988), 33-4
48. Kusy RP, Whitley JQ: Effects of surface roughness on the coefficients of friction in model orthodontic systems. *J Biomech* 23 (1990), 913-925
49. Kusy RP, Whitley JQ, Prewitt MJ: Comparison of the frictional coefficients for selected archwire-bracket slot combinations in the dry and wet states. *Angle Orthod* 61 (1991), 293-302
50. Kusy RP, Whitley JQ: Frictional resistances of metal-lined ceramic brackets versus conventional stainless steel brackets and development of 3-D friction maps. *Angle Orthod* 71 (2001), 364-74
51. Loftus BP, Årtun J, Nicholls JI, Alonzo TA, Stoner JA. Evaluation of friction during sliding tooth movement in various bracket-arch wire combinations. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 116 (1999), 336-45
52. Moore JC, Waters NE: Factors affecting tooth movement in sliding mechanics. *Eur J Orthod* 15 (1993) 235-241

53. Michelberger DJ, Eadie RL, Faulkner MG, Glover KE, Prasad NG, Major PW: The friction and wear patterns of orthodontic brackets and archwires in the dry state. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 118 (2000), 662-74
54. Muirhead RS: A comparison of frictional resistance in the single and twin edgewise brackets. Master's thesis. The University of Texas Health Science Center at Houston, Dental Branch, Houston, Texas 1980
55. Neumann P, Bourauel C, Jäger A: Corrosion and permanent fracture resistance of coated and conventional orthodontic wires. *J Mater Sci Mater Med* 13 (2002), 141-147
56. Nishio C, Jardim da Motta AF, Elias CN, Mucha JN: In vitro evaluation of frictional forces between archwires and ceramic brackets. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 125 (2004), 56-64
57. Ogata RH, Nanda RS, Duncanson MG, Sinha PK, Currier GF: Frictional resistances in stainless steel bracket – wire combinations with effects of vertical deflections. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 109 (1996), 535-42
58. Ogura M, Yamagata K, Kubota S, Hee Kim J, Kuroe K, Ito G: Comparison of tooth movements using friction-free and preadjusted edgewise bracket system. *J Clin Orthod* 30 (1996), 325-30
59. Omana HM, Moore RN, Bagby MD: Frictional properties of metal and ceramic brackets. *J Clin Orthod* 53 (1992), 273-85
60. Peterson L, Spencer R, Andreasen G: A comparison of friction resistance for Nitinol and stainless Steel wire in edgewise brackets. *Quintess. Int.* (1982), 563-565
61. Pizzoni L, Ravnholt G, Melsen B: Frictional forces relates to self-ligating brackets. *Eur J Orthod* 20 (1998), 283-291
62. Pratten DH, Popli K, Germane N, Gunsolley JC: Frictional resistance of ceramic and stainless steel orthodontic brackets. *Am J Orthod* 98 (1990), 398-403
63. Proski R R, Bagby MD, Erickson LC: Static frictional forces and surface roughness of nickel-titanium archwires. *Amer J Orthod Dentofac Orthop* 100 (1991), 341-348

64. Redlich M, Mayer Y, Harari D, Lewinstein I: In vitro study of frictional forces during sliding mechanics of "reduced-friction" brackets. Am J Orthod Dentofac Orthop 124 (2003), 69-73
65. Riley JL, Garret SG, Moon PC: Frictional force of ligated plastic and metal edgewise brackets (abstract 21). J dent Res 58 (1979), 98
66. Schlegel V, Brunner C. Schmales oder breites Bracket? Dtsch Z Mund Kiefer Gesichtschir 15 (1991), 393-4
67. Schlegel V: Relative friction minimization in fixed orthodontic bracket appliances. J Biomech. 19 (1996), 483-91
68. Schneider WB: Wege in der Physikdidaktik Band 1. Palm und Enke Verlag, Erlangen, 1989
69. Schumacher HA, Bourauel C, Drescher D: Das Friktionsverhalten von Keramikbrackets bei der bogengeführten Zahnbewegung. Fortschr Kieferorthop 51 (1990), 259-265
70. Schumacher HA, Bourauel C, Drescher D: Der Einfluß der Ligatur auf die Friktion zwischen Bracket und Bogen. Fortschr Kieferorthop 51 (1990), 106-116
71. Schumacher HA, Bourauel C, Drescher D: Bogengeführte Zahnbewegung - Dynamik, Effektivität und Nebenwirkungen. Fortschr Kieferorthop 52 (1991), 141-152
72. Schumacher HA, Bourauel C, Drescher D: Friktionsverhalten und Bewegungsdynamik bei Mesialisierung des zweiten Molaren nach Sechserextraktion. Fortschr Kieferorthop 54 (1993), 255-262
73. Schumacher HA, Bourauel C, Drescher D: Die Gleitreibung bei Einsatz von Vierkantbögen mit unterschiedlicher Kantenverrundung. J Orofac Orthop / Fortschr Kieferorthop 59 (1998), 139-49
74. Schumacher HA, Bourauel C, Drescher D: Der Einfluß des Bracketdesigns auf die Reibung zwischen Bracket und Führungsbogen. J Orofac Orthop / Fortschr Kieferorthop 60 (1999), 335-47
75. Segner D, Odegaard J. Reibung bei der bogengeführten Distallisierung: Die Bedeutung des aufrichtenden Moments. Kieferorthop Mittelungen 5 (1992), 19-30

76. Shivapuja PK, Berger J: A comparative study of conventional ligation and self-ligation bracket system. *Am J Orthodont Dentofac Orthop* 106 (1994), 472-9
77. Stannard JG, Gau JM, Hanna MA: Comparative friction of orthodontic wires under dry and wet conditions. *Am J Orthod* 89 (1986), 485-491
78. Tanne K, Matsubara S, Shibaguchi T, Sakuda: Wire friction from ceramic brackets during simulated canine retraction. *Angle Orthod* 61 (1991), 285-90
79. Tanne K, Matsubara S, Hotei Y, Sakuda M, Yoshida M: Frictional forces and surface topography of a new ceramic bracket. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 106 (1994), 273-8
80. Taylor NG, Ison K: Frictional resistance between orthodontic brackets and archwires in the buccal segments. *Angle Orthod* 66 (1996), 215-222
81. Tecco S, Festa F, Caputi S, Traini T, Di Iorio D, D'Attilio M. Friction of conventional and self-ligating brackets using a 10 bracket model. *Angle Orthod* 75 (2005), 1041–1045
82. Telepis M, Brockhurst P, West VC: The dynamic frictional resistance between orthodontic brackets and arch wires. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 106 (1994), 131-8
83. Thomas S, Sherriff M, Birnie D: A comparative in vitro study of the frictional characteristics of two types of self-ligating brackets and two types of pre-adjusted edgewise brackets tied with elastomeric ligatures. *Eur J Orthod* 20 (1998), 589-596
84. Thorstenson GA: Systemic Approach to the Resistance to Sliding of Orthodontic Appliances. *Inf Orthod Kieferorthop* 39 (2007), 1-5
85. Thorstenson GA, Kusy RP: Effect of archwire size and material on the resistance to sliding of self-ligating brackets with second-order angulation in the dry state. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 122 (2002), 295-305
86. Thorstenson GA, Kusy RP: Resistance to sliding of orthodontic brackets with bumps in the slot floors and walls: effects of second-order angulation. *Dent Mater* 20 (2004) 881-892
87. Tidy DC, Orth D: Frictional forces in fixed appliances. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 96 (1989), 249-54

88. Tipler PA: Physik. Spektrum Lehrbuch, Heidelberg, 2006
89. Vaughan JL, Duncanson MG, Nanda RS, Currier GF. Relative kinetic frictional forces between sintered stainless steel brackets and orthodontic wires. Am J Orthod Dentofac Orthop 107 (1995), 20-7
90. Wadhwa RK, Kwon HK, Close JM: Frictional resistances of different bracket-wire combination. Aust Orthod J 20 (2004), 25-30
91. Willems D, Clocheret K, Celis JP, Verbeke G, Chatzicharalampous E, Carels C: Frictional behaviour of stainless steel bracket-wire combinations subjected to small oscillating displacements. Am J Orthod Dentofac Orthop 120 (2001), 371-7
92. Zufall SW, Kennedy KC, Kusy RP: Frictional characteristics of composite orthodontic archwires against stainless steel and ceramic brackets in the passive and active configurations. J Mater Sci Mater Med 9 (1998), 611-20

10. Danksagung

Ich möchte mich herzlich bei all jenen Personen bedanken, die mich auf unterschiedliche Weise unterstützt und zu dieser Dissertation beigetragen haben.

Die vorliegende Arbeit wäre nicht möglich gewesen, ohne die außergewöhnlich gute Betreuung durch Herrn Prof. Dr. Drescher, dem als erstes mein Dank gilt. Er unterstützte mich fachlich bei allen theoretisch und praktischen Schwierigkeiten, sowie moralisch, vor allem nach der Entbindung meines Sohnes Tim. Er sprach mir stets gut zu und motivierte mich immer wieder.

Des Weiteren gilt mein Dank den Mitarbeitern der Poliklinik für Kieferorthopädie der Heinrich-Heine-Universität. Herrn Dipl.-Phys. Ralf Hönscheid für seine stets gutgelaunte Hilfsbereitschaft bei allen technischen Fragen, sowie Herrn Dr. Lars Fuck für seine freundschaftliche Unterstützung in der statistischen Auswertung.

Insbesondere bedanke ich mich bei den Menschen, die mit mir durch die Höhen und Tiefen dieser Arbeit gegangen sind und keine Mühe gescheut haben mich tatkräftig dabei zu unterstützen. Vielen Dank für eure Kraft und eure Liebe in dieser Zeit . Danke meinem lieben Mann Micha, meinen Eltern sowie meiner Schwester Tina.

Des Weiteren danke ich Frau Barbara Fonrobert für das Durchsehen des Textes sowie für ihre moralische Unterstützung, welche ich auch zahlreich von all meinen lieben Freunden erfahren durfte. Vielen Dank.

11. Lebenslauf

Persönliche Angaben:

Name: Melanie Heinrich geb. Hinz

Geburtsdatum: 21.12.1977

Geburtsort: Hilden

Familienstand: verheiratet, 1 Kind

Staatsangehörigkeit: deutsch

Schulbildung:

1984-1988 Adolph-Kolping

Grundschule, Hilden

1988-1997 Dietrich-Bonhoeffer-

Gymnasium, Hilden

1997 Abitur

Hochschulbildung:

1998-1999 Studium der Zahnmedizin,

Justus-Liebig-Universität Giessen

1999 Zahnärztliches Vorphysikum,

Giessen

1999-2003 Studium der Zahnmedizin,

Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

2001 Zahnärztliches Physikum

2003 Staatsexamen, Approbation

Tätigkeiten:

12/03-03/04 Praxisgemeinschaft

Ratingen

ab 03/04 Zahnarztpraxis Düsseldorf

Düsseldorf, den 23.04.2008