

Aus der Klinik für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

**Die Bewertung der Leistungsfähigkeit von
PEEK Teleskopkronen in-vitro**

**The evaluation of the performance of
PEEK telescopic crowns in vitro**

zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor rerum medicinalium (Dr. rer. Medic.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Matthias Priester
aus Kassel

Datum der Promotion: 23.03.2024

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	ii
Abbildungsverzeichnis	iii
Abkürzungsverzeichnis	v
Zusammenfassung	1
Abstract	3
1. Einleitung	5
2. Methodik	12
3. Ergebnisse	16
4. Diskussion	25
5. Schlussfolgerungen	32
Literaturverzeichnis	33
Eidesstattliche Versicherung	37
Auszug aus der Journal Summery List	39
Druckexemplar der Ausgewählten Publikation	40
Lebenslauf	49
Publikationsliste	50
Danksagung	51

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenstellung von Vor- und Nachteilen aus dem Vergleich von Konus- mit Teleskopkronen.	7
Tabelle 2: Übersicht der Testgruppen durch Materialkombinationen und Testbedingungen.....	15
Tabelle 3 Abzugsgeschwindigkeiten aus der Literatur:.....	16
Tabelle 4: Mittlere Haltekräfte der Materialpaarungen mit PEEK-Sekundärkronen von 3C, 2C und 1C; Position 0 = F_{\max}	19
Tabelle 5: „Kruskal-Wallis One Way ANOVA“ über Ränge mit allen paarweisen Mehrfachvergleichsverfahren (Holm-Sidak-Methode): $p = 0,05$. Primärkronenmaterial	28
Tabelle 6: Entwicklung der Rauheitswerte (Mittelwert \pm SD(Standardabweichung)) im Inneren von Sekundärkronen vor und nach einer Langzeitbelastung von 10.000 Zyklen	24
Tabelle 7: Steigung der Regressionen für jede Materialpaarung ohne Berücksichtigung des Ursprungspunkts und mit Berücksichtigung des Ursprungspunkts. (z = Anzahl der Kronen).....	28
Tabelle 8: Auswertung Retentionskraft als Funktion des Weges für die drei verschiedenen Werkstoffpaarungen für Teleskope.....	29

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung von Teleskopkronen und Konuskronen	5
Abbildung 2: Beispiel für korrosionsbedingte Verfärbungen auf Primärkronen einer Teleskoparbeit	6
Abbildung 3: Beispiel für Metallabrieb auf Keramikoberflächen (aus eigenen Untersuchungen)	9
Abbildung 4: PEEK-Arbeit mit Teleskopkronen (M:Priester).....	9
Abbildung 5: Vergleich der Retentionskräfte für Teleskope (0°) und Konuskronen (1° u. 2°) für PEEK als Werkstoff für die Sekundärkronen, gefräst (milled) und gepresst (pressed) aus [19] und [20].....	10
Abbildung 6: Herstellungsablauf der Prüfkörper	12
Abbildung 7: Einrichtung der Zwick-Universalprüfmaschine für die Durchführung der Experimente	13
Abbildung 8: Testaufbau in der Universalprüfmaschine; (A) aufgesetzte und (B) getrennte Positionen eines Blocks mit drei teleskopischen Kronen (3C); (C) Querschnitt eines Paar teleskopischen Kronen	14
Abbildung 9: Einfluss der Abzugsgeschwindigkeit auf den Verlauf des Kraft (F) – Weg (s) Diagramms	17
Abbildung 10: Beispiele von Kraft- (F) - Weg- (s) Kurven für 3- (3C), 2- (2C) und Einzel-Teleskop-Kronenblöcken (1C) bei 10 mm/min.....	18
Abbildung 11: Kraft (F) vs. Abstand (d) für die Materialpaarungen CoCr + PEEK, PEEK + PEEK und ZrO ₂ + PEEK, sortiert nach Anzahl der getesteten Kronen	20
Abbildung 12: Maximale Haltekraft F _{max} in Abhängigkeit von der Anzahl der Kronen und der Materialpaarung.....	20

Abbildung 13: Vergleich von F_{max} in Abhängigkeit von der Anzahl der Kronen (1C - 3C), zusammengefasst über die 4 verschiedenen Abzugsgeschwindigkeiten über 10 Zyklen	21
Abbildung 14: F_{max} [N] vs. Anzahl der Zyklen, getestet in einem 3-Kronen-Block (3C) für die Materialkombinationen PEEK + PEEK (blau) und ZrO_2 + PEEK (Magenta) ..	22
Abbildung 15: Vergleich von F_{max} in Abhängigkeit von der Abzugsgeschwindigkeit für die Paarung ZrO_2 – PEEK (links) und PEEK – PEEK (rechts) 3er Block	24
Abbildung 16: Extrapolation der maximalen Haltekraft in Abhängigkeit von der Anzahl der Kronen und der Materialpaarung (linke Seite); angepasste Regression durch den Ursprungspunkt der Diagramme (rechte Seite)	26
Abbildung 17: Schematischer Vergleich der verschiedenen Kurvenverläufe. Rechts im Bild Querschliffe von Kronenpaaren.	31

Abkürzungsverzeichnis

PEEK	Polyetheretherketon
CAD/CAM	Computer Aided Design / Computer Aided Manufacturing
ZrO ₂	Zirkoniumdioxid
CoCr-Legierung	Kobalt-Chrom-Legierung
N	Newton
GPa	Gigapascal
3Y-TZP	3 mol% Yttriumoxid („3Y“) stabilisiertes tetragonales („T“) polykristallines („P“) Zirkonoxid („Z“)
R _a	Arithmetischer Mittelwert des Rauheitsprofils
R _z	Gemittelte Rauhtiefe
R _{max}	Maximale Rauhtiefe
SD	Standardabweichung

Zusammenfassung

Teleskopkronen sind ein probates Mittel herausnehmbare Prothesen im Mund des Patienten zu verankern. Auf natürlichen Stümpfen oder Implantaten bieten sie aufgrund der guten Verankerung im Mund einen hohen Tragekomfort für den Patienten.

Lange Zeit konnten die Primär- und Sekundärteleskope lediglich aus Metalllegierungen gefertigt werden. Hiermit einhergehend waren Probleme, die aus der Korrosion der Legierungen resultierten. Erst durch die Verwendung von Zirkonoxydkeramiken für Primärkronen konnte die Korrosionsanfälligkeit der Konstruktionen reduziert werden.

Das Hochleistungspolymer Polyetheretherketon (PEEK) bietet eine weitere Möglichkeit für die Zahntechnik, Primär- und Sekundärteleskope für den Patienten herzustellen und so die bisherigen Materialpaarungen zu ersetzen.

Ziel dieser Arbeit war es zu untersuchen, ob Teleskopkronen aus PEEK dieselbe Leistungsfähigkeit besitzen, wie Teleskopkronen aus anderen Materialkombinationen. Hierzu wurden Paarungen gebildet aus PEEK (Primärkrone) + PEEK (Sekundärkrone), aus Zirkondioxyd (Primärkrone) + PEEK (Sekundärkrone), sowie Chrom-Cobalt-Molybdän-Legierung (Primärkrone) + PEEK (Sekundärkrone). Anhand eines Modells des Zahnes 26 wurden sämtliche Proben mit Hilfe der CAD/CAM-Technik gefertigt. Es wurden für jede Materialpaarung $n=9$ Primär- und Sekundärkronen hergestellt und getestet. Es wurden sowohl die maximale Retentionskraft (F_{max}), als auch die Retentionskraft (F) im Verhältnis zum Abzugsweg s ermittelt. In Ermangelung eines allgemeingültigen Testprotokolls wurde auch der Einfluss unterschiedlicher Abzugsgeschwindigkeiten untersucht. Zunächst wurden alle Messungen mit drei Blöcken ausgeführt, die jeweils drei Kronenpaarungen enthielten (3K), danach mit 3 Blöcken, die jeweils zwei Kronenpaarungen enthielten (2K) und zuletzt mit neun einzelnen Kronenpaarungen (1K).

Um das Langzeitverhalten von Teleskopkronen zu simulieren, wurden 10000 Zyklen durchlaufen. Dies würde einer Lebensdauer von mindestens 10 Jahren entsprechen.

Es zeigte sich, dass die maximale Retentionskraft der PEEK+PEEK-Paarung im Vergleich zu den anderen Paarungen höher war.

Zwischen 1 mm/min und 10 mm/min Abzugsgeschwindigkeit gab es keine signifikanten Unterschiede in der Retentionskraft. Es wurde erstmals eine Abhängigkeit der Retentionskraft von der Anzahl gleichzeitig wirkenden Kronen im Test untersucht. Die Retentionskraft hat mit sinkender Anzahl der im gleichzeitigen Einsatz befindlichen Kronen zwar abgenommen, dies war aber bei keiner der getesteten Paarungen linear. Im Langzeittest der PEEK-Paarungen wurde keine signifikante Abnahme der Retentionskraft beobachtet. Entlang der Retentionshöhe, hier 5mm, nahm die Retentionskraft in der PEEK/PEEK Paarung nahezu linear ab, was genügend Spielraum für unter Umständen notwendige Unterfütterungen gibt und so als Substitut für bisher genutzte Werkstoffpaarungen für die Herstellung von Teleskopen empfohlen werden kann.

Abstract

Telescopic crowns are a tried and tested means of anchoring removable prostheses in the patient's mouth. On natural stumps or implants, they offer a high level of comfort for the patient and offer good anchoring in the mouth.

For a long time, the primary and secondary telescopes could only be made from metal alloys. This was accompanied by problems resulting from the corrosion of the alloys. It was only through the use of zirconium oxide ceramics for primary crowns that the susceptibility of the structures to corrosion could be reduced.

The high-performance polymer polyetheretherketone (PEEK) offers another possibility to manufacture primary and secondary telescopes for the patient as a potential substitute for usually used material combinations in for telescopes.

The aim of this work was to investigate whether telescopic crowns made of PEEK have the same performance as telescopic crowns made of other material combinations. For this purpose, pairs were formed from PEEK (primary crown) + PEEK (secondary crown), from zirconium dioxide (primary crown) + PEEK (secondary crown), as well as chromium-cobalt-molybdenum alloy (primary crown) + PEEK (secondary crown). Using a model of tooth 26, all preparations were made and reworked by a master dental technician using CAD / CAM technology. For each pair of materials, $n = 9$ primary and secondary crowns were made and subsequently tested. Both the maximum retention force and the retention force in relation to the trigger travel were determined. In the absence of a generally applicable test protocol, the influence of different pull-off speeds was also examined. First, all measurements were carried out with three blocks each containing three crown pairs (3K), then with 3 blocks each containing two crown pairs (2K) and finally with nine individual crown pairs (1K). To simulate the long-term behavior of telescopic crowns, 10,000 cycles were run, which correspond to a service life of at least 10 years.

It was found that the maximum retention force of the PEEK + PEEK pairing was higher compared to the others. Between 1 and 10 mm / min take-off speed, there was no significant influence of the take-off speed. A greater impact was expected from the change in the number of crown pairs in use at the same time.

The frictional force decreased with the decreasing number of crowns in simultaneous use, but not linearly in any of the tested pairings. A constant frictional force was shown in the long-term test. Along the retention height, here 5mm, the retention force in the PEEK / PEEK pairing decreased almost linearly, which gives enough leeway for relining that may be necessary. PEEK telescopic pairs can be proposed as a substitute for previously used material pairs.

1 Einleitung

Konische oder teleskopartige Doppelkronen dienen der Abstützung und Verankerung von herausnehmbarem Zahnersatz [1-5]. Das Prinzip basiert auf einer Primärkrone, die auf einem Zahn oder Implantat befestigt wird, und einer die Primärkrone abdeckenden Sekundärkrone, die in den herausnehmbaren Zahnersatz integriert wird.

Becker [6] diskutierte die Vorteile dieses Systems folgendermaßen:

- physikalische zirkuläre Umschließung der Ankerzähne und damit axiale und physiologische Belastung der Zahnwurzel;
- Ermöglichung einer idealen Parodontalhygiene;
- einfache Handhabung beim Einsetzen und Herausnehmen der Prothese;
- Langlebigkeit;
- gute technische Umsetzbarkeit im Labor.

Grundsätzlich wird zwischen zylindrischen und konischen Doppelkronen unterschieden, wie in Abb. 1 dargestellt.

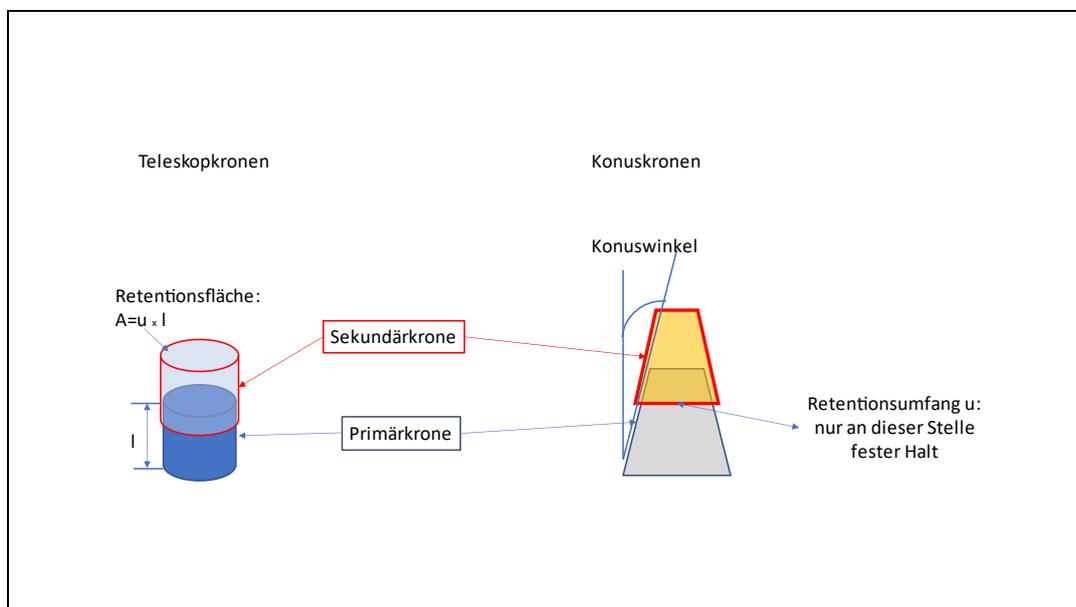


Abbildung 1: Schematische Darstellung von Teleskopkronen und Konuskronen

Die zylindrischen Typen zeichnen sich durch parallele Wände zwischen Primär- und Sekundärkrone aus, während bei Letzteren die Außenwände der Primärkrone in einem Konuswinkel zwischen 2 und 6 Grad zueinanderstehen.

In der Realität hat letzteres den Vorteil, dass bei Erreichen des Durchmessers der Primärkrone die Sekundärkrone fixiert wird und klemmt [11] (eventuell). Im Falle der Teleskopkonstruktion liegt immer ein gewisses Spiel vor, da ein Gleiten zwischen der Außenwand der Primärkrone und der Innenwand der Sekundärkrone erreicht werden soll. Um das Einsetzen und Herausnehmen sicherzustellen wird die Fixierung so eingestellt, dass die Herausnahme nicht zu einer Extraktion der Pfeiler führt. Außerdem sollten die wirkenden Kräfte auch über einen langen Zeitraum von Jahren gleichbleiben, was bei einer Metall-Metall-, oder Keramik-Metall-Paarung nicht zu erwarten ist, da durch das „Auf“ und „Ab“ beim Einsetzen und Herausnehmen Reibungsverluste durch Abrieb entstehen, die eine Verringerung der Retentionskraft zur Folge haben. Um dies einstellen bzw. nachregulieren zu können wurde unter anderem das Snap-System sowie der Friktionsstift eingeführt. [7]

Im Folgenden sind Vor- und Nachteile beider Systeme aufgelistet und in der Tabelle 1 zusammengestellt:

- Teleskopkronen haben über die gesamte Höhe der Sekundärkrone Kontakt, Retention, d.h. bei Unterfütterungen sind sie noch aktiv, selbst wenn sie ein wenig „aufgeschwommen“ sein sollten und sich nicht mehr in der Endposition befinden.
- Konuskronen verlieren ihre Haltewirkung nach Unterfütterung, weil durch das Anheben keine Retention mehr vorliegt.
- Bei Konuskronen ist die gewünschte Passung zwischen Primär- und Sekundärteil, durch die Präzision der Winklereinstellung, nur mit sehr großem Aufwand zu erreichen, da die Teleskope für die zahnmedizinische Anwendung in keinem Fall einen kreisrunden Querschnitt aufweisen.
- Frontzähne haben wenig Platz für Konuskronen. Der Grund liegt darin, dass Konuskronen einen dickeren cervicalen Rand haben und somit das marginale Parodont schädigen [8].
- Teleskope nutzen die Resilienz der Sekundärkrone, diese ist nur für Metalle und Legierungen gegeben. Im Falle des Aufsetzens der Sekundärkrone auf die Primärkrone kommt es zu einer Dehnung letzterer, d.h. es wird eine Zugspannung aufgebaut, um die Retention zu ermöglichen.

- Eine unter Zugspannung stehende konische Sekundärkrone stellt eine Gefahr für die Verblendung dar, die dadurch abplatzen kann. Bei Teleskopkronen tritt das nicht auf, da die Retentionskraft konstant ist.
- Die Lösekraft einer Konuskrone ist abhängig von der Fügekraft und daher nicht eindeutig kalkulierbar, d.h. es kann zu Überlastungen des Zahnhalteapparates kommen.
- Wenn die sekundären Konuskronen aus elastischem Material bestehen (z.B. PEEK), können diese die Spannung nicht halten und verlieren die Retentionskraft mit der Zeit.

Tabella 1: Zusammenstellung von Vor- und Nachteilen aus dem Vergleich von Konus- mit Teleskopkronen.

Vergleich von Konus- mit Teleskop	Teleskop	Konus	T	K
Retentionskraft	gut	sehr gut	-	+
Herstellung	klassisch, CAD CAM	klassisch	+	-
Materialauswahl primär	Metalle/Keramik/PEEK	Metalle/ Keramik	+	-
Unterfütterung	möglich	unmöglich	+	-
Sekundärkronen	Metalle/Keramik/PEEK	Metalle	+	-
Verblendung sekundär	Keramik und Komposit	nur Komposit	+	-
Reibungsverlust	ja	Nein	-	+
Korrosion	Ja / nein	Ja	+	0
Tragekomfort	gut	gut	0	0
Retention	einstellbar	Funktion der Aufsetzkraft	+	-

Dementsprechend wird bei zylindrischen Teleskopen die Haltekraft bereits bei der Montage durch Reibung aufgebaut, sobald sich die parallelen Wände von Primär- und Sekundärkrone berühren, während bei konischen Teleskopen die Haltekraft erst in der Endposition durch den Klemmsitz erreicht wird. Die Retentions- bzw. Friktionskraft ist ein wesentlicher Einflussparameter für den Erfolg einer solchen Konstruktion [9,10]. Körber und Blum [11] schlugen eine Retentionskraft von 5 - 10 N vor, wobei die mögliche Beschädigung der Pfeilerzähne berücksichtigt wurde. Becker [6] fand bei Messungen an Patienten heraus, dass eine Retentionskraft von 3 - 3,5 N schon ausreichend sein kann.

In jedem Fall werden bemerkenswert hohe Anforderungen an die technische Umsetzung gestellt. Dies gilt sowohl für die Auswahl der Materialien als auch für deren Be- und Verarbeitung. Bisher wurden aufgrund der technischen Möglichkeiten im Labor Metalllegierungen verwendet, insbesondere CoCr-Legierungen, oft in Verbindung mit Edelmetall-Legierungen aufgrund deren höheren Elastizität. Insbesondere bei der Kombination unterschiedlich zusammengesetzter Metalllegierungen kommt es zwischen den Metalldoppelkronen zu Tribokorrosion (Reibkorrosion). Dadurch werden die Korrosionserscheinungen zusätzlich verstärkt, was dann zu Ablagerungen auf den Edelmetallstrukturen der äußerlich sichtbaren Suprastruktur führt, wie in Abbildung 2 zu sehen [13].



Abbildung 2: Beispiel für korrosionsbedingte Verfärbungen auf Primärkronen einer Teleskoparbeit [12]

Mit der Einführung von hochfesten Keramiken auf ZrO_2 -Basis stand zumindest für die Primärkronen ein weiterer Werkstoff zur Verfügung [14]. Es zeigte sich jedoch, dass die Paarung von ZrO_2 mit einer CoCr-Legierung zu erheblichem Verschleiß an der Sekundärkrone führte. Dies war sichtbar an den Abriebspuren auf der Keramikprimärkrone, wie in Abbildung 3 zu sehen ist, was zu einer Abnahme der Haltekraft führte [15].

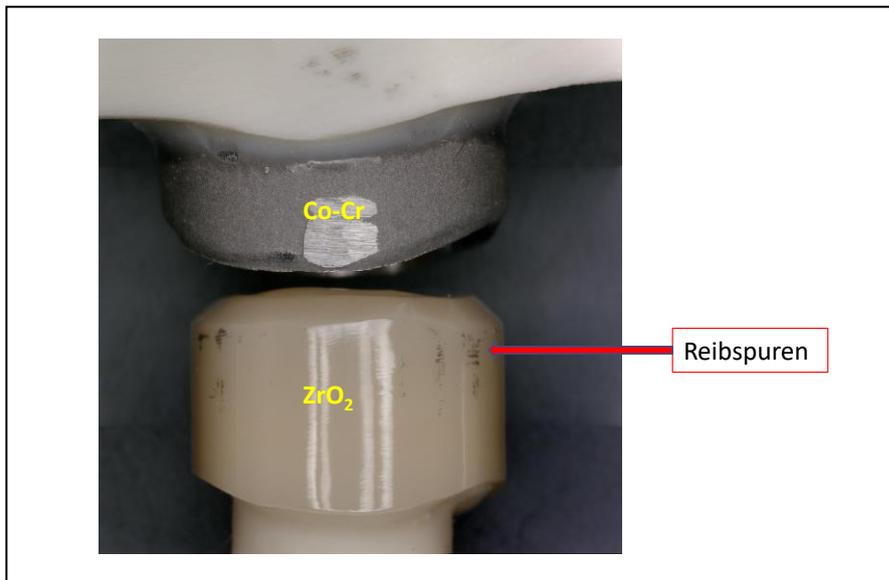


Abbildung 3: Beispiel für Metallabrieb auf Keramikoberflächen (aus eigenen Untersuchungen)

Aufgrund der hohen Anforderungen an Passung, Beständigkeit gegen Korrosion und Abrasionsfestigkeit erscheint der Hochleistungskunststoff Polyetheretherketon (PEEK) als alternativer metallfreier Werkstoff für die Herstellung von Teleskopkronen vielversprechend. PEEK ist ein Hochleistungspolymer mit einem Elastizitätsmodul von 4,4 bis 5,1 GPa, guter chemischer Beständigkeit gegen fast alle Lösungsmittel, bei einer Wasseraufnahme von weniger als 0,4%, dazu einer geringeren Dichte zwischen 1,36 und 1,52 g/cm³ im Vergleich zu Legierungen und Keramiken und besitzt hervorragenden tribologische Eigenschaften [16]. Darüber hinaus kann mit Verblendkompositen eine gute Verbundfestigkeit erreicht werden [17]. So können mit Hilfe der CAD/CAM-Technologie metallfreie und leichte Prothesengerüste als Alternative zu Strukturen aus konventionellen Materialien hergestellt werden [18], wie in der Abbildung 4 zu sehen ist.



Abbildung 4: PEEK-Arbeit mit Teleskopkronen (M. Priester)

Entsprechend gibt es bereits Studien zum Verhalten von Sekundärkronen aus PEEK auf Primärkronen aus CoCr [19] oder ZrO_2 [20]. Zum einen scheint sich bei der Betrachtung von Doppelkronen mit einem Konuswinkel von 0 Grad die Herstellung von PEEK-Sekundärkronen durch Heißpressen im Vergleich zur Herstellung durch Fräsen positiv auf die Retentionskraft auszuwirken [19,20]. Dies könnte möglicherweise auf eine gewisse fertigungsbedingte Schrumpfung bei heißgepressten Kronen zurückgeführt werden. Schubert et al. [21] geben Retentionskräfte für die Kombination von einer PEEK-Sekundärkrone mit einer ZrO_2 -Primärkrone von 2,8 N an, die sich über einen simulierten Zeitraum von 10 Jahren nicht signifikant verändert haben. Es wurden von Stock, Schmidlin et.al. auch Versuche beschrieben, in denen PEEK-Sekundärkronen und PEEK-Primärkronen kombiniert wurden [23].

Die Abbildung 5 gibt einen Überblick über die Streuung der Retentionskräfte aus den o.g. Publikationen, die PEEK als Sekundärkronenwerkstoff genutzt haben

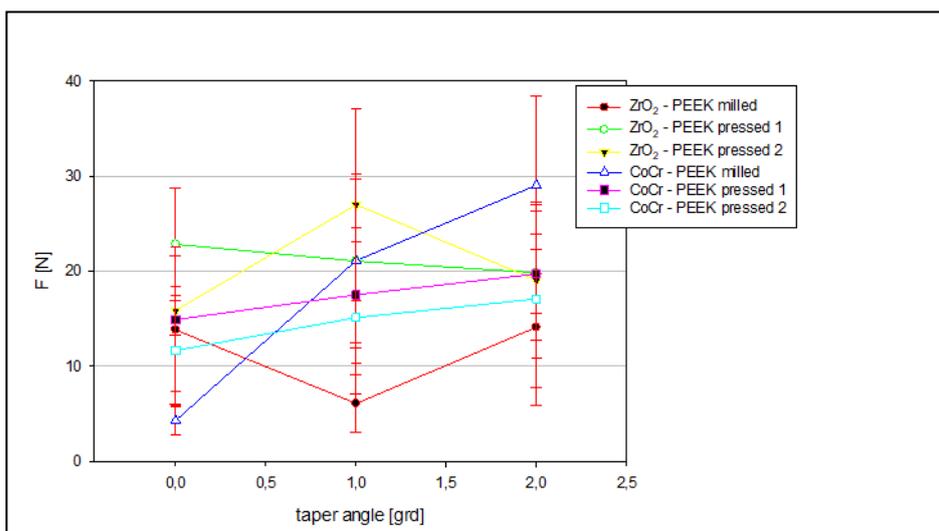


Abbildung 5: Vergleich der Retentionskräfte für Teleskope (0°) und Konuskronen (1° u. 2°) für PEEK als Werkstoff für die Sekundärkronen, gefräst (milled) und gepresst (pressed) aus [19] und [20]

Meistens wurden einzelne Kronenpaare mit unterschiedlichen Abzugsgeschwindigkeiten unter verschiedenen Umgebungsbedingungen getestet. In allen Fällen wurden nur die Maximalkräfte analysiert und verglichen, aber die Kraft-Distanz-Beziehung entlang des Kontaktbereichs zwischen Primär- und Sekundärkrone wurde nicht untersucht.

Ziel der vorliegenden Studie war es daher, das Retentionsverhalten verschiedener Materialpaarungen bei unterschiedlicher Anzahl von gleichzeitig im Einsatz befindlichen Teleskopkronen zu vergleichen. Diese wurden auch mit unterschiedlichen Abzugsgeschwindigkeiten getestet, wobei auf das Material PEEK sowohl für Primär- als auch Sekundärkronen besonders Bezug genommen wurde. Die Null-Hypothese war daher, dass es keinen Unterschied im Retentionsverhalten von CAD / CAM hergestellten sekundären PEEK-Kronen auf Primärkronen aus verschiedenen Materialien, wie CoCr-Legierung, ZrO₂ und PEEK gibt.

Darüber hinaus sollte das langfristige Verhalten über Jahre simuliert werden, um die Retentionskraft in Abhängigkeit von der Zeit zu bewerten.

2. Methodik

Für die Herstellung der Primärkronen wurde ein idealisiertes Modell eines vorbereiteten oberen 1. Molaren (26) verwendet. Als Werkstoffe wurden eine CoCr-Sinterlegierung (Ceramill Sintron, Amann Girrbach AG, Pforzheim, Deutschland) als beispielhafte Basismetalllegierung (BMA), 3Y-TZP ZrO₂-Keramik (DD Bio ZX2 color, Dental Direkt GmbH, Spenge, Deutschland), sowie PEEK (DD PeekMED, Dental Direkt, Spenge, Deutschland) verwendet. Für jedes Material wurden nach den Anweisungen des Herstellers 6 Primärkronen mit einem Kegelwinkel von 0° hergestellt, wie im Workflow in Abbildung 6 dargestellt. Dazu wurde ein digitales 3D-Bild des Modells mit einem DD ArgusM2 HD Scanner (Dental Direkt GmbH, Spenge, Deutschland) aufgenommen. Die Primärkronen wurden mit der Software exocad DentalCAD (exocad GmbH, Darmstadt) und aus den entsprechenden Rundrohlingen durch Fräsen mit einer 5-Achs-Fräsmaschine (Coritec 350i-L, imes-icore GmbH, Eiterfeld, Deutschland) gefertigt. Die Primärkronen wurden parallel gefräst, poliert und gescannt, um die Sekundärkronen herzustellen. In allen Fällen wurde der Spalt zwischen den Kronen auf 20 µm gesetzt. Nach der Fertigstellung wurde die Innenseite der Sekundärkronen von Hand poliert.

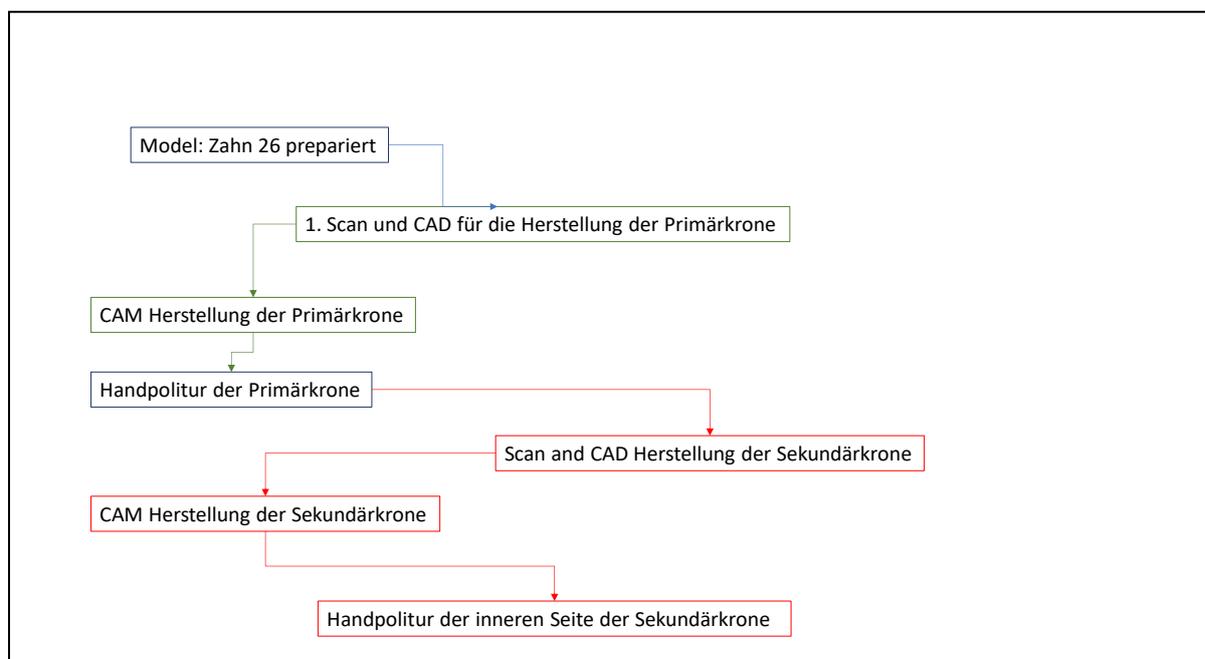


Abbildung 6: Herstellungsablauf der Prüfkörper [22] eigene Übersetzung

Von den folgenden Materialpaarungen wurden $n=9$ Kronenpaare (Primärkrone + Sekundärkrone) von einem Zahntechnikermeister produziert: CoCr Legierung + PEEK, ZrO_2 + PEEK und PEEK + PEEK. Diese wurden dann jeweils in 3 Blöcke von 3 Kronenpaaren (3C) aufgeteilt

Die Retention, d.h. die Retentionskraft, wurde mit einer 250 N Kraftmessdose in einer Zwick Z005 Universalprüfmaschine (ZwickRoell GmbH & Co. KG, Ulm, Deutschland) gemessen, siehe Abbildung 7.

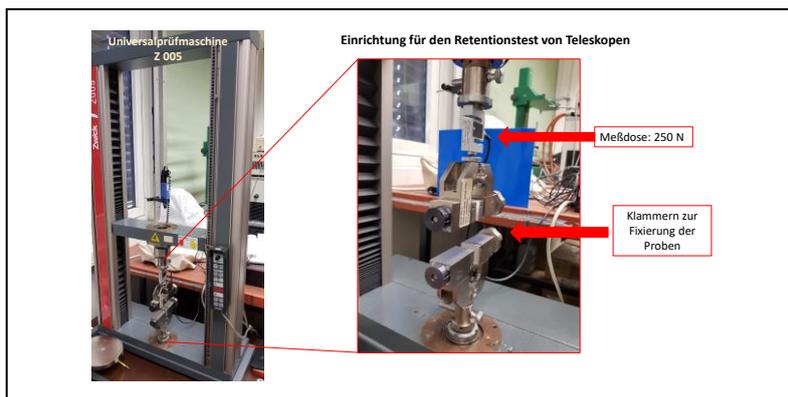


Abbildung 7: Einrichtung der Zwick-Universalprüfmaschine für die Durchführung der Experimente

Dazu wurden die Proben ähnlich wie in der Praxis von Hand übereinandergelagt, eingespannt und dann bis auf einen vertikalen Abstand von 6 mm voneinander entfernt, wie in Abbildung 8 dargestellt. Das Prüfprogramm steuerte dann das wiederholte Auf- und Absetzen der Sekundärstrukturen auf die Primärstrukturen. Anschließend konnten die Kraft-Weg-Diagramme mit Geschwindigkeiten von 1, 2, 5 und 10 mm/min für 10 Zyklen aufgenommen werden. Aus den Kurven wurde die Haltekraft bei einem Abstand von 0, 1, 2, 3, 4 und 5 mm abgelesen und verglichen.

Von den Materialpaarungen $ZrO_2 + PEEK$, $PEEK + PEEK$ wurde jeweils eine 3C einem Langzeittest mit 10.000 Zyklen bei einer Geschwindigkeit von 10 mm/min unterzogen.

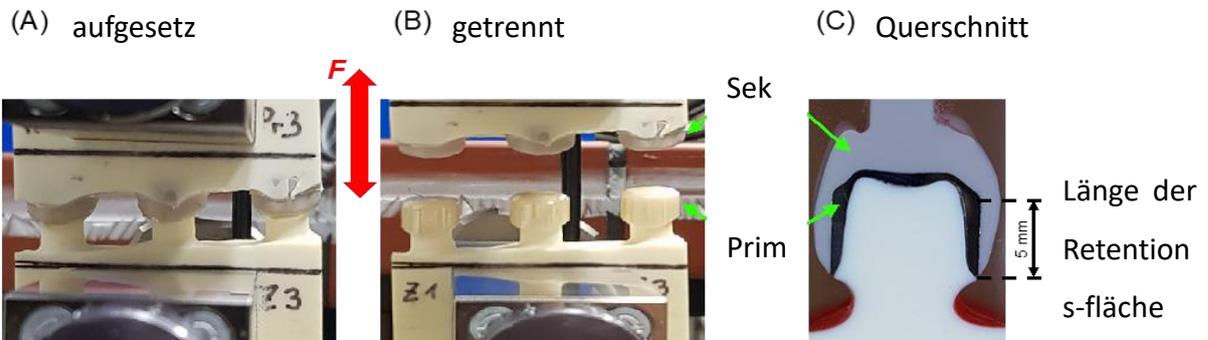


Abbildung 8: Testaufbau in der Universalprüfmaschine; (A) aufgesetzte und (B) getrennte Positionen eines Blocks mit drei teleskopischen Kronen (3C); (C) Querschnitt eines Paar teleskopischen Kronen [22]

In diesen Fällen wurde die Rauheit der Primärkronenoberflächen vor und nach der Prüfung mit einem Rauheitsmessgerät (Perthometer M2, Mahr GmbH, Göttingen, Deutschland) über eine Länge von 1,7 mm gemessen.

Anschließend wurden die 3-Kronen-Blöcke um eine Krone reduziert, so dass die 3 verbleibenden 2-Kronen-Blöcke (2C) jedes Materialpaares den ersten Abzugstests mit insgesamt 40 Zyklen bei 1, 2,5 und 10 mm/min unterzogen werden konnten. Anschließend wurden die 2-Kronen-Blöcke ebenfalls getrennt, so dass 9 Einzelkronenpaare (1C) jedes Materialpaares dem Initial Pull-Off-Test unterzogen werden konnten (je 10 Zyklen bei Abzugsgeschwindigkeiten von 1, 2, 5 und 10 mm/min).

Tabelle 2 gibt einen Überblick über das Prüfprotokoll.

Tabelle 2: Übersicht der Testgruppen durch Materialkombinationen und Testbedingungen [22].

Sekundärkronen	PEEK	PEEK	PEEK
Primärkronen	CoCr	ZrO ₂	PEEK
Konuswinkel	0°	0°	0°
Abzugsgeschwindigkeit [mm/min]	1; 2; 5; 10	1; 2; 5; 10	1; 2; 5; 10
Anzahl der Zyklen/Abzugsgeschwindigkeit	10	10	10
Anzahl der Kronen pro Block (Anzahl der Blöcke)	3C (3); 2C (3); 1C (9)	3C (3); 2C (3); 1C (9)	3C (3); 2C (3); 1C (9)
Langzeittest	keinen	ein 3-Kronen- Block für 10.000 Zyklen bei 10 mm/min	ein 3-Kronen- Block für 10.000 Zyklen bei 10 mm/min

Die statistische Auswertung erfolgte mittels ANOVA unter Verwendung der Software Sigmaplot 14.0.

Das Signifikanzniveau für Unterschiede zwischen den Ergebnissen wurde auf $p < 0,05$ festgelegt.

3. Ergebnisse

In der Literatur sind keine Empfehlungen für eine bestimmte Meßgeschwindigkeit zu finden. Die Angaben schwanken sehr, wie der Tabelle 3 zu entnehmen ist.

Tabelle 3: Abzugsgeschwindigkeiten aus der Literatur

Zitat	Teleskop	Konus
Weigl et al [1]	30 mm/min	
Becker [6]	15 mal je min	
Schwindling et al [14]		30 mm/s
Wagner et al [15]	50 mm/min	
Stock et al [19]	50 mm/min	
Merk et al [20]	50 mm/min	
Arnold et al [25]	50 mm/min	1Hz
Minagi et al [32]		500 mm/min

Daher wurden in Vorbereitung auf die Langzeitmessungen verschiedene Abzugsgeschwindigkeiten getestet: 1, 2, 5, 10, 20, 50 mm/min.

Für die Paarung PEEK – PEEK ist der Kraft – Weg – Verlauf exemplarisch in der Abb. 9 dargestellt.

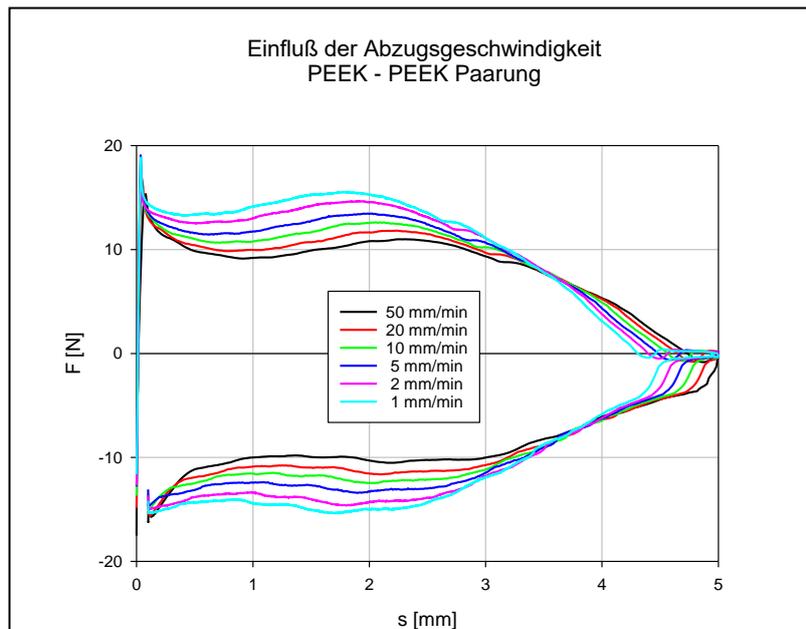


Abbildung 9 Einfluss der Abzugsgeschwindigkeit auf den Verlauf des Kraft (F) – Weg (s) – Diagramms

Damit wird das Geschwindigkeitsspektrum m.E. für das Abnehmen zwischen vorsichtig langsam (1mm/min) bis hin zu schnell unvorsichtigem (50mm/min) simuliert.

Es zeigt sich, dass 10mm/min ein guter Mittelwert für die Testgeschwindigkeit ist.

Da in den meisten Einsatzfällen von Teleskopen nicht nur Einzelkronen, sondern 2, 3 und mehr Kronen parallel genutzt werden, wurde eine Set-up gewählt, das erlaubt mehrere Kronen parallel zu prüfen. So wurden neben Einzelkronen, auch 2er und 3er Blöcke vermessen.

Abbildung 10 zeigt exemplarische Kraft-Weg-Kurven für jede Paarung und Anzahl der Kronen pro Block bei einer Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min, sowohl für das Abziehen (Zugkraft, positiv) als auch das Aufsetzen (Druckkraft, negativ). Die Kurvenverläufe unterschieden sich aufgrund der Reibung entlang der Kontaktflächen der einzelnen Paarungen teilweise erheblich. Die Verläufe der Paarungen PEEK + PEEK und ZrO_2 + PEEK waren ähnlich, und zwar in Form einer annähernd linearen Abnahme der Haltekraft von der maximalen Kraft bei 0 mm bis zur Kontaktlosigkeit bei 6 mm Abstand. Bei den CoCr + PEEK-Paarungen änderte sich die Haltekraft über die Kontaktflächen nach

Überwindung der maximalen Retentionskraft nur geringfügig bis zur Kontaktlosigkeit. Bei allen Materialpaarungen, unabhängig von der Anzahl der Kronen in einem Block, zeigte die PEEK-PEEK-Paarung die höchsten maximalen Haltekräfte. Eine Erhöhung der Anzahl der Kronen in einem Block führte bei allen Materialpaarungen zu höheren Retentionskräften.

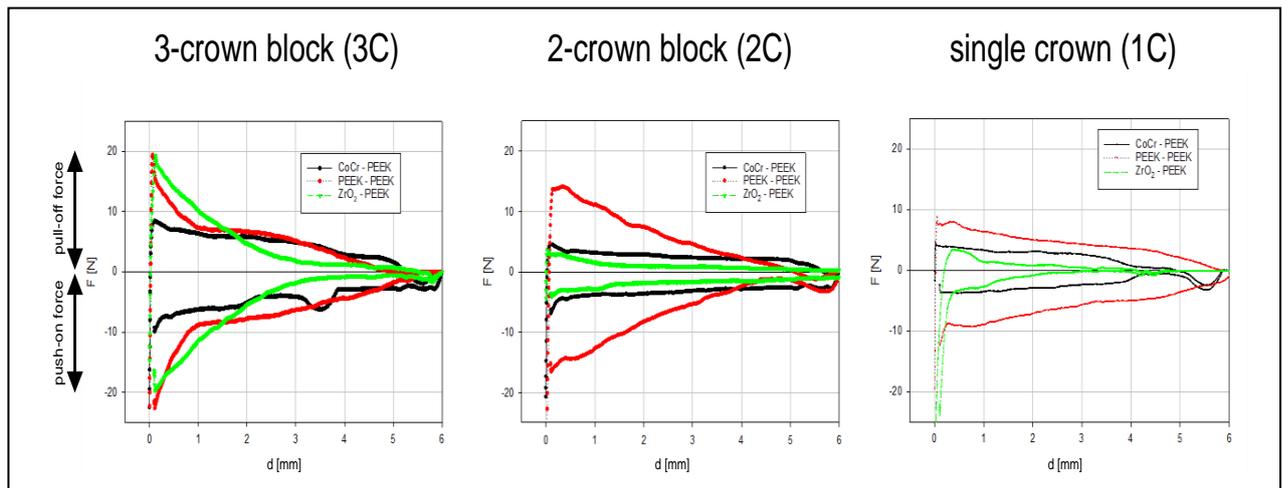


Abbildung 10: Beispiele von Kraft- (F) - Weg- (s) Kurven für 3- (3C), 2- (2C) und Einzel-Teleskop-Kronenblöcken (1C) bei 10 mm/min aus [22]

In Tabelle 4 sind die Kraftwerte der Materialpaarungen mit PEEK-Sekundärkronen und unterschiedlicher Anzahl von Kronenblöcken (1K, 2K und 3K) aufgeführt. Bei den angegebenen Kräften handelt es sich um die arithmetischen Mittelwerte der Kraftwerte an bestimmten Abstandspositionen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten (1 bis 10 mm/min), wobei bei jeder Geschwindigkeit 10 Zyklen aufgezeichnet wurden. Der Kraftwert an Position 0 entspricht der maximal aufgezeichneten Kraft F_{\max} für den Abzug der Sekundärkrone. Die Positionen 1 bis 5 entsprechen den Abständen von 1,0 bis 5,0 mm entlang der Gleitfläche. Abbildung 10 zeigt die entsprechenden Diagramme zu Tabelle 4.

Tabelle 4: Mittlere Haltekräfte der Materialpaarungen mit PEEK-Sekundärkronen von 3C, 2C und 1C; Position 0 = F_{max} . [22]

		3C	2C	1C
Material- paarung	Position [mm]	F [N] (SD)	F [N] (SD)	F [N] (SD)
CoCr + PEEK	0	10.63 (0.531)	5.713 ± 1.223	4.918 (0.257)
	1	5.15 (0.526)	2.376 (0.216)	2.770 (0.497)
	2	4.54 (0.447)	1.826 (0.103)	2.713 (0.357)
	3	3.75 (0.399)	1.525 (0.083)	2.220 (0.340)
	4	2.04 (0.257)	1.392 (0.073)	0.653 (0.220)
	5	0.97 (0.276)	0.968 (0.098)	0.000 (0.000)
PEEK + PEEK	0	19.12 (0.533)	17.78 (2.739)	9.19 (0.798)
	1	7.93 (0.568)	11.91 (0.746)	4.82 (0.529)
	2	7.21 (0.593)	7.76 (0.307)	3.84 (0.411)
	3	5.17 (0.326)	4.85 (0.377)	3.14 (0.365)
	4	2.11 (0.070)	2.18 (0.076)	2.36 (0.360)
	5	0.00 (0.000)	0.00 (0.000)	1.15 (0.306)
ZrO ₂ + PEEK	0	17.49 (1.46)	5.79 (0.78)	3.30 (1.91)
	1	9.2 (0.57)	2.71 (0.21)	1.32 (0.55)
	2	4.21 (0.37)	1.57 (0.21)	0.94 (0.44)
	3	1.81 (0.20)	1.25 (0.15)	0.50 (0.31)
	4	1.26 (0.04)	0.98 (0.14)	0.00 (0.24)
	5	0.77 (0.17)	0.47 (0.19)	0.00 (0.27)

In Abbildung 11 ist zu sehen, dass die maximale Kraft F_{\max} an Position 0 abhängig von der Materialpaarung stark variierte und sich in der Regel mit einer verringerten Anzahl von Kronen für die meisten Paarungen ebenfalls verringert.

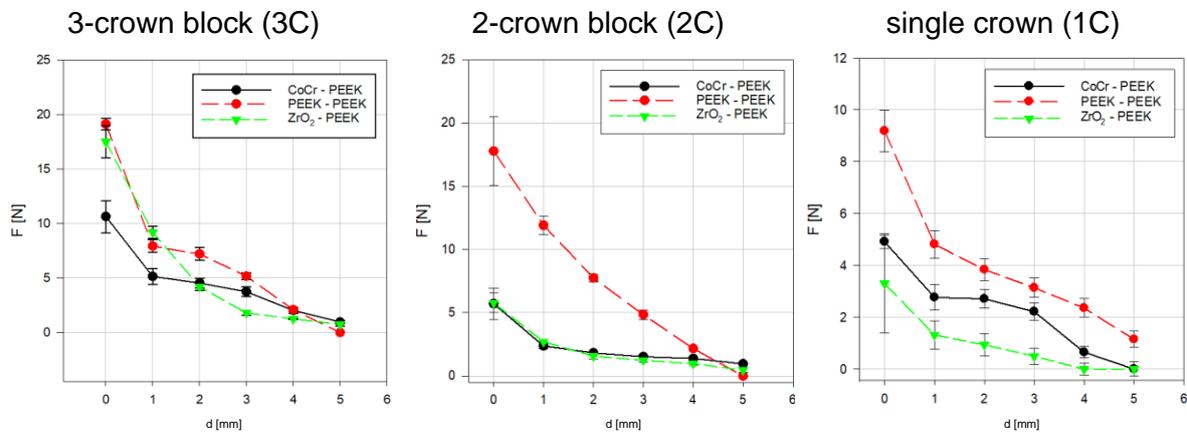


Abbildung 11: Kraft (F) vs. Abstand (d) für die Materialpaarungen CoCr + PEEK, PEEK + PEEK und ZrO₂ + PEEK, sortiert nach Anzahl der getesteten Kronen [22]

Die maximale Haltekraft F_{\max} für die verschiedenen Materialpaarungen unter Berücksichtigung der Anzahl der parallel getesteten Kronen ist in Abbildung 11 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen keine lineare Abhängigkeit der Reibungskraft von der Anzahl der Kronen, wie eigentlich erwartet wurde.

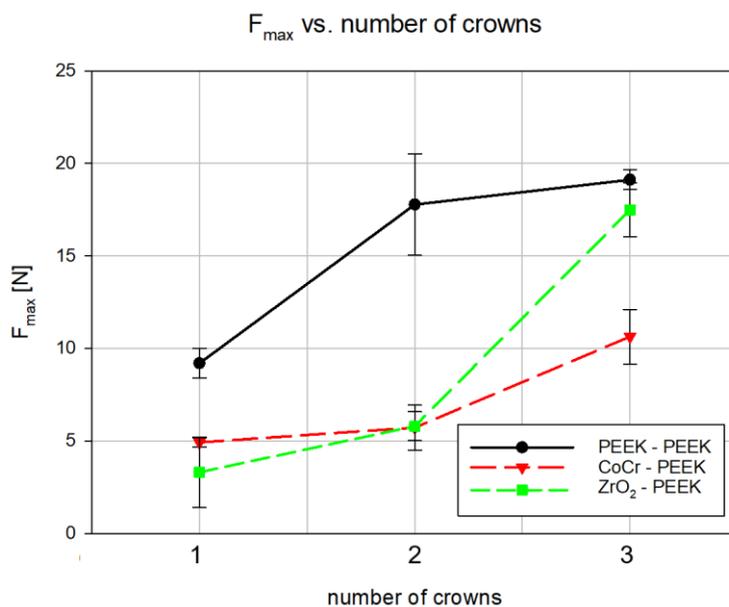


Abbildung 12: Maximale Haltekraft F_{\max} in Abhängigkeit von der Anzahl der Kronen und der Materialpaarung [22]

Die statistischen Auswertungen der F_{\max} -Werte ist in Tabelle 5 zusammengestellt und in Abbildung 13 mit Box-Plots dargestellt. Bei den Einzelkronen- (1K) und 2-Kronen-Blöcken (2K) waren die F_{\max} -Werte für die PEEK + PEEK-Paarungen signifikant höher als die Werte, die für die Paarungen ZrO_2 + PEEK und CoCr + PEEK ermittelt wurden. Die 1C- und 2C-Werte für CoCr-PEEK- und ZrO_2 -PEEK-Paarungen zeigten keine signifikanten Unterschiede. Bei 3-Kronen-Blöcken (3C) waren alle Materialpaarungen signifikant unterschiedlich.

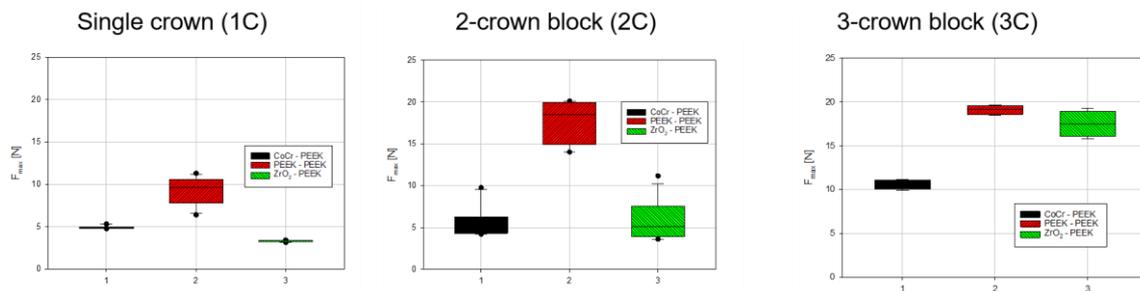


Abbildung 13: Vergleich von F_{\max} in Abhängigkeit von der Anzahl der Kronen (1C - 3C), zusammengefasst über die 4 verschiedenen Abzugsgeschwindigkeiten über 10 Zyklen [22]

Tabelle 5: „Kruskal-Wallis One Way ANOVA“ über Ränge mit allen paarweisen Mehrfachvergleichsverfahren (Holm-Sidak-Methode): $p = 0,05$. Primärkronenmaterial.

	Anzahl der Kronen in den Blöcken		
	1C	2C	3C
PEEK vs. ZrO_2	ja	Ja	ja
PEEK vs. CoCr	ja	Ja	ja
CoCr vs. ZrO_2	nein	Nein	nein

Die Ergebnisse des Langzeitverhaltens von einer 3C der Materialpaarungen PEEK + PEEK und ZrO_2 + PEEK zeigt die Abbildung 14. Die aufgezeichneten Kraftwerte (F) für die Paarung ZrO_2 + PEEK stiegen mit zunehmender Anzahl von Zyklen, während die Werte für PEEK + PEEK im Laufe der Zeit nahezu konstant blieben.

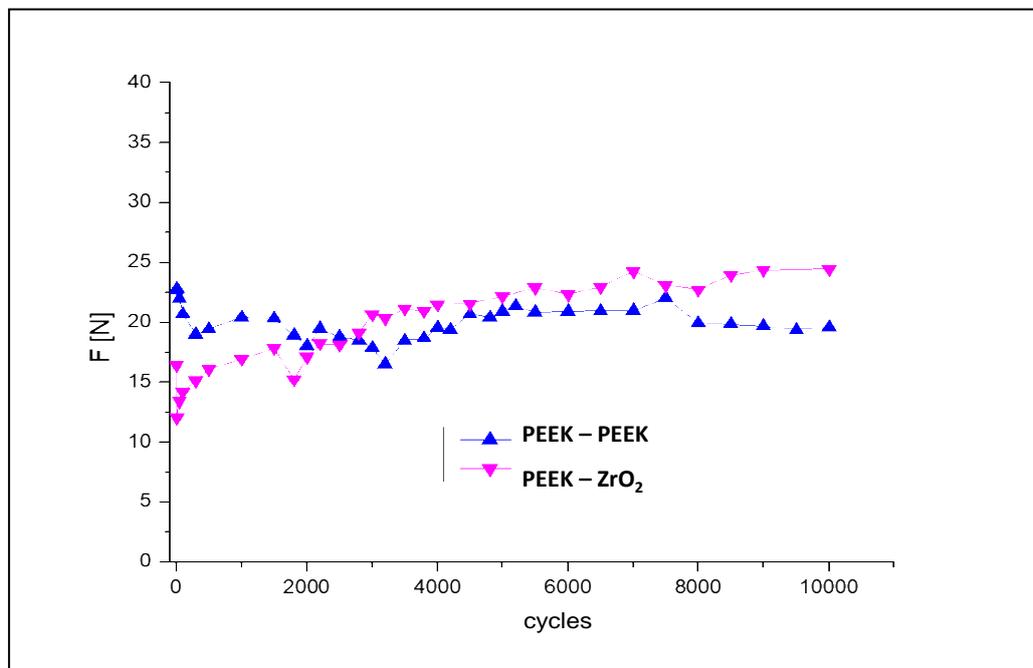


Abbildung 14: F_{max} [N] vs. Anzahl der Zyklen, getestet in einem 3-Kronen-Block (3C) für die Materialkombinationen PEEK + PEEK (blau) und ZrO_2 + PEEK (Magenta)

Die Rauheitswerte auf der Innenseite der Sekundärkronen wurden vor und nach einer Langzeitbelastung von 10.000 Zyklen aufgezeichnet (Tabelle 5). Die Rauheit änderte sich nach der zyklischen Belastung nicht wesentlich. Bei der PEEK + PEEK-Paarung nahm die Rauheit nach 10.000 Zyklen ab, was auf einen möglichen Poliereffekt im Laufe der Zeit hinweist. Bei der Paarung ZrO_2 + PEEK nahm die Rauheit leicht zu, was mit dem festgestellten Anstieg der Haltekraftwerte mit zunehmender Zyklenzahl bei dieser Materialpaarung in Verbindung gebracht werden kann (siehe Abbildung 12).

Tabelle 6: Entwicklung der Rauheitswerte (Mittelwert \pm SD(Standardabweichung)) im Inneren von Sekundärkronen vor und nach einer Langzeitbelastung von 10.000 Zyklen [22].

Rauheitsparameter	PEEK + PEEK		ZrO ₂ + PEEK	
	vorher Mittelwert (SD)	nachher Mittelwert (SD)	vorher Mittelwert (SD)	nachher Mittelwert (SD)
R _a [μm]	0.72 (0.08)	0.76 (0.16)	0.56 (0.12)	0.64 (0.29)
R _z [μm]	1.3 (0.78)	0.99 (0.26)	0.59 (0.17)	0.87 (0.39)
R _{max} [μm]	2.08 (1.15)	1.99 (0.1)	1.02 (0.61)	1.71 (0.8)

Alle bisher vorgestellten Ergebnisse basieren auf Proben, bei denen die Außenfläche der Primärkrone sowie die Innenfläche der Sekundärkrone per Hand poliert wurden, wie im Schema in Abb.6 beschrieben.

Durch den Einsatz der CAD/CAM Technik ergab sich natürlich auch die Frage nach der Möglichkeit, auf den Polierschritt für die Innenseite der Sekundärkrone verzichten zu können.

Daher wurden auch Messungen an Proben durchgeführt, wo die Sekundärkronen so genutzt wurden, wie sie aus der Maschine entnommen wurden. Exemplarisch ist der Verlauf der F-s-Kurven mit und ohne Politur beispielhaft in der Abb.15 zu sehen.

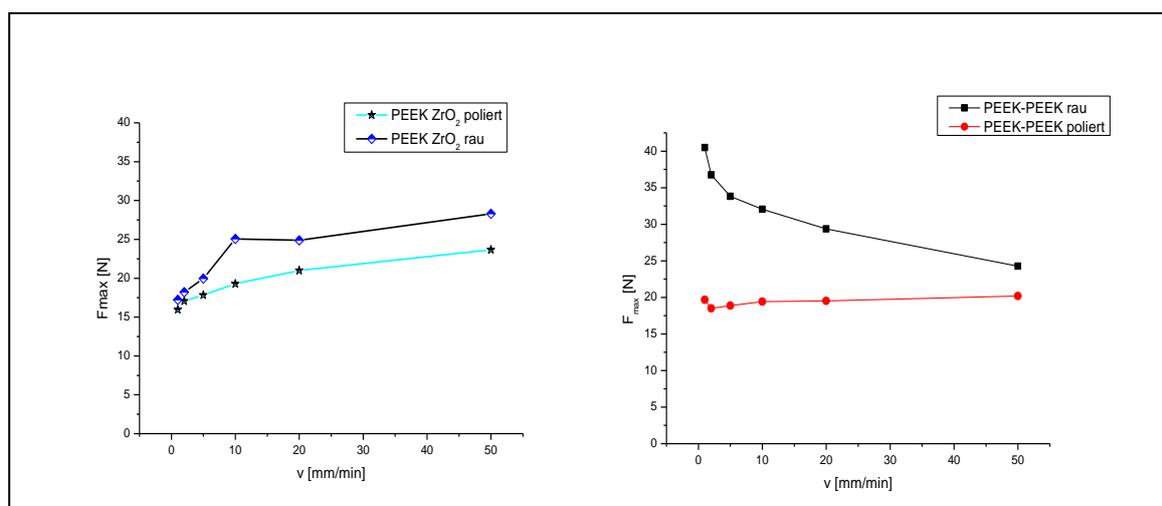


Abbildung 15: Vergleich von F_{max} in Abhängigkeit von der Abzugsgeschwindigkeit für die Paarung ZrO₂ – PEEK (links) und PEEK – PEEK (rechts) 3er Block.

Die jeweils niedrigeren Werte stehen für die Proben mit polierter Innenteleskopseite. Rau steht für den Zustand nach Entnahme aus der Maschine. Durch die manuelle Politur der Sekundärkroneninnenseite ergeben sich doch geringere Haftkräfte und ein besseres Gleiten, was hier nicht untersucht wurde. Es scheint aber möglich zu sein, durch entsprechende Wahl der Maschinenparameter zur Herstellung der Sekundärkrone letztendlich Haftkräfte im Bereich zwischen 3 und 6 N je Krone einstellen zu können.

4. Diskussion

Ziel dieser Studie war es, verschiedene Materialpaarungen PEEK + PEEK, CoCr + PEEK und ZrO₂ + PEEK für teleskopierende Doppelkronen zu untersuchen. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Verwendung von PEEK als Primär- und Sekundärkrone. In dem oben gezeigten CAD/CAM-Workflow wurden Teleskopkronen aus jeder Materialpaarung mit PEEK als Sekundärkrone hergestellt. Der letzte Schritt war eine manuelle Nachbearbeitung der Innenseiten der Sekundärkronen. Für jede Materialpaarung wurden Kronenblöcke mit einer, zwei und drei Kronen getestet, indem ihre "Retentionskurve" über die Länge der Kontaktfläche, hier 5mm, aufgezeichnet wurde. Anzumerken ist, dass zunächst auch Versuche in feuchter Umgebung durchgeführt wurden, die jedoch keinen Unterschied in der Tendenz oder in den absoluten Werten im Vergleich zu den trockenen Proben zeigten, ähnlich wie es Beyer et al. [24] beschrieben haben.

Neben den Parametern, die sich mit Hilfe der CAD-CAM-Technologie sehr gut einstellen lassen, sind vor allem die Haltekraft und deren Langzeitstabilität von großer Bedeutung, da diese die Langzeitstabilität und Gebrauchstauglichkeit eines Teleskopes bestimmt. Das Langzeitverhalten der Paarungen PEEK + PEEK und ZrO₂ + PEEK wurde über einen Simulationszeitraum von 10 Jahren untersucht, was durch Aufzeichnung der Retentionskurven über 10.000 Zyklen von Auf- und Abwärtsbewegungen der Sekundärkronen erreicht wurde, wie von Arnold et al. erwähnt [25].

Es wurde erwartet, dass erstens es geringfügige, nicht signifikante Unterschiede im Verlauf der Kraft (F) - Weg (s)- Kurven und der resultierenden Maximalkraft F_{\max} zwischen den verschiedenen Materialpaarungen geben würde, da alle Primär- und Sekundärkronen mit demselben CAD/CAM-Arbeitsablauf und Techniker hergestellt wurden und zweitens wurde erwartet, dass es eine lineare Beziehung zwischen der Anzahl der Kronen in den getesteten Blöcken und der aufgezeichneten F_{\max} für jede Materialpaarung gibt. Diese beiden Erwartungen wurden nicht erfüllt.

Die aufgezeichneten Maximalkräfte über 10 Zyklen für die PEEK + PEEK-Paarungen waren statistisch signifikant höher als die für die CoCr + PEEK- und ZrO₂ + PEEK-Paarungen über 10 Zyklen (siehe Abbildung 11). Dies wurde unabhängig von der Anzahl der Kronen pro Block festgestellt.

Der Vergleich von CoCr + PEEK und ZrO₂ + PEEK ergab keinen statistisch signifikanten Unterschied für F_{max} bei Blöcken mit einer und zwei Kronen (1C und 2C), aber einen signifikanten Unterschied bei F_{max} für Blöcke mit drei Kronen. Dies deutet zunächst auf ein besseres Gleitverhalten von PEEK auf polierten Oberflächen aus Nichtedelmetalllegierungen sowie auf polierten Keramikoberflächen hin als auf polierten PEEK-Oberflächen. Dies hängt mit den in [26] erwähnten möglichen Unterschieden im Gleitverhalten zwischen den verschiedenen getesteten Materialien zusammen, bei denen sich der Reibungskoeffizient auch in Abhängigkeit vom Anpressdruck ändert.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Verwendung von PEEK als Sekundärstruktur eine sehr gute Alternative zu den bisher verwendeten Materialien zu sein scheint. Dies steht im Einklang mit den Arbeiten der Gruppe von Stawarczyk et al. [15,19,23] und [9]. Die absoluten Haltekräfte liegen in den Bereichen, die auch für andere Teleskopkombinationen veröffentlicht wurden, Arnoldt [25] und Becker [27]. Leider wurde dort nicht erwähnt, welche PEEK-Qualität für die Primärkronen verwendet wurde. Geht man davon aus, dass es sich um das gleiche Material wie in [19] handelt, so zeigen auch die Ergebnisse dieser Untersuchungen eine sehr starke Streuung der Reibungskräfte zwischen 2 und fast 40 N, siehe Abb.2. Eigentlich zeigen nur die mit einer Übermasspassung von 30 µm gefrästen Teleskope Retentionskräfte unter 10 N, wie von Koerber empfohlen.[28]

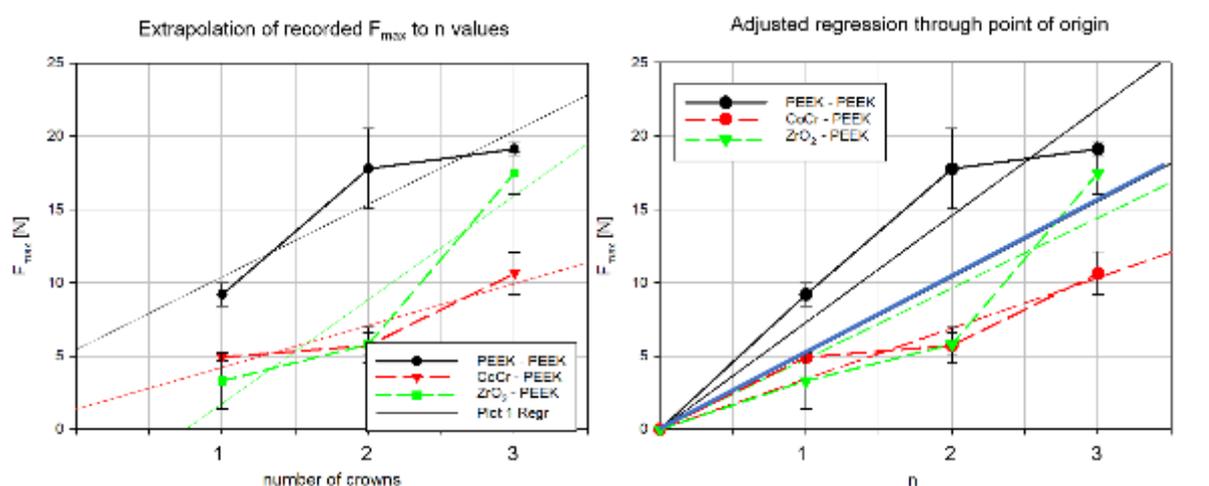


Abbildung 16: Extrapolation der maximalen Haltekraft in Abhängigkeit von der Anzahl der Kronen und der Materialpaarung (linke Seite); angepasste Regression durch den Ursprungspunkt der Diagramme (rechte Seite)

Die Kombination der F_{\max} -Werte in Abhängigkeit von der Anzahl der Kronen n für jede Materialpaarung ergab eine nicht lineare Beziehung, die sich je nach Primärmaterial unterschied. Diese bereits in Abbildung 11 gezeigte Beziehung zwischen F_{\max} und n (Anzahl der Kronen) wurde außerdem verschiedenen Extrapolationen unterzogen (siehe Abbildung 14). Das linke Diagramm zeigt die Extrapolation des Verhältnisses zwischen Kraft und Anzahl der Kronen ohne Berücksichtigung des Ursprungspunkts der Diagramme. Das rechte Diagramm zeigt die angepasste Extrapolation durch den Ursprungspunkt, d. h. Retentionskraft $F_{\max} = 0$ N bei $n=0$. Die Steigungen der in beiden Fällen erhaltenen Geraden sind in Tabelle 6 zusammengestellt. Es fällt auf, dass die CoCr-PEEK-Paarung den geringsten Anstieg mit einer Steigung von etwa 3 N/Krone für beide Berechnungen aufweist. Die Regression durch den Ursprungspunkt ist in diesem Fall vernünftig, da 0 Kronen keine Retentionskraft haben sollten. Diese Regression sollte eine Extrapolation der erwarteten Kraftwerte mit einer steigenden Anzahl von Kronen pro Block ermöglichen.

Tabelle 7: Steigung der Regressionen für jede Materialpaarung ohne Berücksichtigung des Ursprungspunkts und mit Berücksichtigung des Ursprungspunkts. (z = Anzahl der Kronen)

Primärmaterial	Regression ohne Ursprungspunkt		Bereinigte Regression mit Ursprungspunkt	
	Anstieg $m = F/z$ [N]	SD	Anstieg $m_{\text{adj}} = F_{\text{adj}}/z$ [N]	SD
PEEK	4.96	2.09	7.29	0.71
CoCr	2.86	1.19	3.44	0.29
ZrO ₂	7.90	2.66	4.81	0.79
Mittlere Regression (blaue Linie)	5,24	1,98	5.18	0.58

Alle Primärkronen aus den verschiedenen Materialien in dieser Studie wurden im selben CAD/CAM-Workflow auf der Grundlage desselben Modells eines Prämolaren hergestellt. Nach der CAD/CAM-Herstellung der Primärkronen wurden diese manuell poliert, dann mit Scanspray beschichtet und anschließend für die Herstellung der Sekundärkronen gescannt. Der Zementspalt wurde für alle Paarungen auf 20 µm festgelegt. Die Schlussfolgerung liegt nahe, dass die manuelle Bearbeitung am Ende des Arbeitsablaufs einen deutlichen Einfluss auf die Qualität des Ergebnisses hat. Es wurde eine lineare Abhängigkeit der Friktions- oder Retentionskraft von der Anzahl der Kronen angenommen, aber die tatsächlichen Ergebnisse zeigen ein anderes Verhalten. Dies sollte zu einer Diskussion über die Vorhersagbarkeit der Retentionskraft bei Arbeiten mit mehr als einer Teleskopkrone führen. Es ist wahrscheinlich, dass bei einer Prothesenerweiterung und dem Verlust eines Teleskops die Retentionskraft so reduziert werden kann, so dass die Prothese nicht mehr lagestabil genug ist.

Obwohl es das Anliegen der CAD/CAM-Technologie ist, präzise und reproduzierbare Strukturen herzustellen [29,30], ist es bisher nicht möglich, dies zu erreichen, wie die Ergebnisse von Stock et al. [15, 18, 21] und unsere eigenen zeigen. Die Schwierigkeit, gefräste PEEK-Strukturen auf CoCr-Kronen zu reproduzieren, wurde auch von [31] sowie auf ZrO₂-Kronen [25] beschrieben, wobei beide Autoren dies auf die Verwendung von Scan-Lacken für die Herstellung zurückführten.

Arnold et al. [25] versuchten mit einer "echten" Struktur, einer zirkulären Sekundärstruktur aus PEEK auf 4 Teleskopen, die Reibungskräfte sowohl unter parallelen als auch unter angulierten Abzugsbedingungen zu bestimmen. Es wurde festgestellt, dass PEEK-Strukturen nicht die gleiche Präzision erreichen wie bei der Funkenerosion an metallischen Strukturen. Dies zeigt deutlich, dass die o.g. Fehlanpassungen im CAD/CAM-Workflow vermieden werden müssen.

Doch wie hoch ist die tatsächlich erforderliche Haltekraft? In dieser Studie lagen die gemessenen Retentionskräfte für eine Einzelkrone zwischen 3 und 9 N, für einen Block von 3 Kronen stiegen die Werte auf 11 bis 18 N. Als Grenzwert für die Festigkeit von Teleskopen wurde jahrelang, basierend auf der anatomischen Beweglichkeit der Zähne nach Körber [6,28], ein Maximum von 5 N angegeben, Becker [6] nennt 3 bis 3,5 N als ausreichend, basierend auf Untersuchungen an Patienten.

Eine Übertragung auf Implantate ist nicht ohne weiteres möglich, da die Implantate ankylotisch im Knochen verankert sind. Wie sinnvoll diese Werte sind, kann nicht objektiv beurteilt werden, da die Festigkeit von vitalen Zähnen, die als primäre Kronenträger verwendet werden, nicht messbar ist und sicherlich vom Lockerungsgrad des jeweiligen Zahnes abhängt.

Die Forderung von Körper, die Abzugskräfte so zu gestalten, dass ein "Herausziehen" der Pfeilerzähne vermieden wird, liegt auf der Hand. Auch dies erfordert eine Konuskronen, um sie durch eine ideale Einfassung am Konusrand einstellbar zu machen. Dies stößt in der Zahnmedizin jedoch an seine Grenzen, da die wenigsten präparierten Zähne einen kreisrunden Querschnitt aufweisen und somit die ideale Passung der konischen Verbindung aufgrund von Unregelmäßigkeiten entlang der Friktionslinie nicht erreicht wird. Außerdem kann bei einer unzureichenden Passung, z.B. bei einer leichten Abweichung der Anforderungen, diese Passung nicht mehr nachgestellt werden, was zu einem enormen Mehraufwand im Dentallabor führt.

Dies kann mit Hilfe der Teleskopkrone besser kompensiert und eingestellt werden, wie auch die Ergebnisse der Abzugsmessungen zeigen. Bei allen Materialpaarungen nahmen die Haftkräfte zunächst ab, jedoch im Moment des Abhebens nicht so stark, dass bei einer Position von 1 bis 3 oder gar 4 mm Höhenverlust eine Retentionskraft erreicht wird, die ausreicht, um eine Prothese noch zu fixieren, wie Becker beschreibt [6]. Die in der Tabelle 8 zusammengefassten Daten aus den Untersuchungen unterstreichen dies. Sie machen aber auch deutlich, dass weitere Untersuchungen insbesondere zur möglichen vorhersagbaren Einstellung der Retentionskraft jeder Teleskopkrone notwendig sind, um so unabhängig von der Erfahrung und dem Gefühl des Zahntechnikers zu werden.

Tabelle 8: Auswertung Retentionskraft als Funktion des Weges für die drei verschiedenen Werkstoffpaarungen für Teleskope.

Paarung Anzahl Kronen	CoCr-PEEK	PEEK-PEEK	ZrO ₂ - PEEK
3	3 mm	zw. 3 – 4 mm	zw. 2 – 3 mm
2	zw. 0 – 1 mm	zw. 3 – 4 mm	zw. 1 – 2 mm
1	zw. 1 – 2 mm	3 mm	zw. 0 – 1 mm

Wie in Abb. 15 zu sehen ist, würde die aus allen Messungen ermittelte mittlere Retentionskraft in Abhängigkeit von der Kronenanzahl die bisher bekannten Randbedingungen hierfür erfüllen. Der CAD/CAM-Workflow sollte also so eingestellt werden, dass PEEK-Sekundärkronen mit vorhersagbaren Retentionskräften reproduzierbar hergestellt werden können.

Eine eindeutige Beschreibung einer zuverlässigen Retentionskraft, ob auf noch vorhandenen Zähnen oder auf Implantaten, steht noch aus, auch unter dem Gesichtspunkt, dass diese dann auch im Labor reproduzierbar umgesetzt werden kann.

Letzteres muss in weiteren Untersuchungen herausgearbeitet werden, da alle bisherigen Untersuchungen, auch die hier vorgestellten, verschiedene technische "Mängel" im Sinne einer reproduzierbaren Herstellung einer vorhersagbaren Retentionskraft für ein Teleskop aufweisen. Trotz der in vielen Arbeiten verwendeten CAD/CAM-Technologie wird zur Herstellung der Sekundärkronen auf polierten Primärkronen ein Scan-Spray verwendet, was zweifellos die Genauigkeit, insbesondere im Verbindungsbereich zwischen den beiden Strukturen, beeinflusst. Darüber hinaus werden in allen Fällen auch die Innenseiten der Sekundärkronen manuell nachbearbeitet, so dass eine reproduzierbare Haltekraft nicht eingestellt werden kann und die Qualitätskontrolle am Ende der Kette subjektiv ist.

Dennoch ergeben sich hier einige Besonderheiten, wenn PEEK für die Herstellung von Primär- und Sekundärkronen verwendet wird

Es wird auch notwendig sein, die Eignung der Labortests in klinischen Studien zu überprüfen.

Die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit von PEEK, die in diesen und anderen Untersuchungen gezeigt werden konnte [20], auch über längere Zeiträume, lässt hoffen, dass ein solcher wirklich alternativer Werkstoff auch für Langzeitanwendungen geeignet ist.

Kritische Wertung des Versuchsaufbaus

Nicht immer war der Verlauf der Kurven gleich. So wurden im Verlaufe der Tests 3 charakteristische F-s – Kurvenverläufe, wie in Abb. 17 schematisch dargestellt, beobachtet:

1. Kontinuierlich, exponentielle Abnahme der Haltekraft über den Gleitweg der Kronenpaarung ähnlich der Konus Paarung mit Winkeln ab 2grd, hier scheint der Spalt zwischen Primär- und Sekundärkrone etwas zu groß geraten;
2. Abnahme der Kraft mit unterschiedlichen Gradienten entlang des Kontaktweges:
 - a) exponentiell
 - b) Nahezu konstant
 - c) Linearer Abfall

Hier scheint der Spalt nahezu optimal zu sein;

3. Ein inverser Kraftabfall über den Kontaktweg = einem Pumpeffekt gleichend, was auf einen zu engen Spalt hinweist. Trat bei den PEEK-Paarungen häufiger auf.

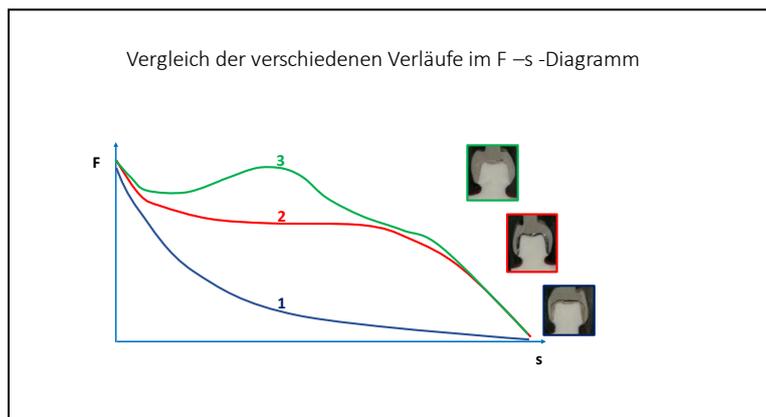


Abbildung 17: Schematischer Vergleich der verschiedenen Kurvenverläufe. Rechts im Bild Querschliffe von Kronenpaaren.

Im Zuge der Optimierung der Präparationsparameter an der CAM-Maschine scheint auch dieses Problem lösbar zu sein.

5. Schlussfolgerungen

Unter Berücksichtigung der Einschränkungen dieser Untersuchungen können die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden.

Aus PEEK hergestellte Teleskopstrukturen stehen den bisher dafür genutzten Materialkombinationen unter Verwendung von Metallen und Keramiken in ihrer Leistungsfähigkeit in nichts nach. Im Gegenteil kommen sie doch ohne zusätzliche Retentionshilfsmittel aus, ohne über einen Testzeitraum von mehr als 10 Jahren an Leistungsfähigkeit zu verlieren. Hinzukommt, dass durch diese Kombination korrosive und abrasive Effekte ausgeschlossen werden. Alleinig eine mögliche Plaque-Akkumulation muss in weiteren Untersuchungen mitberücksichtigt werden.

PEEK eignet sich eindeutig als Primärkrone, insbesondere dann, wenn auch die Sekundärstruktur aus PEEK gefertigt ist.

Eine solche Materialkombination im Teleskop kann mehr als 10.000 Zyklen ohne Verlust der Haltekraft überstehen, was einer durchschnittlichen Lebensdauer von ca. 10 Jahren entspricht.

Der Vorteil der CAD/CAM-Technologie ist, dass gerade bei dieser Kombination, PEEK - PEEK, die Reibung bereits über die Maschinenparameter eingestellt werden kann und somit eine vorhersehbare stabile Retentionskraft zur Verfügung steht.

Da die Retentionskraft über die Gleitfläche, bis zu 1 mm zur Oberkante, noch ausreichend groß ist, bietet diese Technik die Möglichkeit, Unzulänglichkeiten in der Passung von MOG-Prothesen mit Unterfütterungen o.ä. besser auszugleichen und damit den Tragekomfort zu verbessern.

Diese Untersuchungen zeigen, dass PEEK für die Herstellung von Primär- und Sekundärkronen von teleskopierenden Arbeiten als Substitut für die bisher genutzten Werkstoffe, wie CoCr-Legierungen bzw. ZrO₂-Keramiken, empfohlen werden kann.

5. Literaturverzeichnis

- [1] Weigl P, Hahn L, Lauer HC. Advanced biomaterials used for a new telescopic retainer for removable dentures: Ceramic vs. electroplated gold copings: Part I. In vitro tribology effects. *J Biomed Mater Res* 2000. [https://doi.org/10.1002/1097-4636\(2000\)53:4<320::AID-JBM6>3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/1097-4636(2000)53:4<320::AID-JBM6>3.0.CO;2-W)
- 2] Yee A, Chui Ling G. Aesthetic and Occlusal Rehabilitation Using a Telescopic Denture. *Cureus* 2020 Mar;2512(3):e7402, <http://dx.doi.org/10.7759/cureus.7402>.
- [3] Wöstmann B, Balkenhol M, Weber A, Ferger P, Rehmann P. Long-term analysis of telescopic crown retained removable partial dentures: Survival and need for maintenance. *J Dent* 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2007.09.010>.
- [4] Zahn T, Zahn B, Janko S, Weigl P, Gerhardt-Szép S, Lauer HC. Long-term behavior of double crown retained dentures with metal and metal-free secondary crowns and frameworks made of Vectris© on all-ceramic primary crowns: a prospective, randomized clinical trial up to 14 years. *Clin Oral Investig* 2016;20:1087–100. <https://doi.org/10.1007/s00784-015-1597-y>.
- [5] Hinz S, Schweyen R, Hey J, Setz J, Arnold C. Clinical performance of non-precious metal double crowns with friction pins in severely reduced dentitions. *Clin Oral Investig* 2020. <https://doi.org/10.1007/s00784-020-03228-1>.
- [6] Becker H. Investigation of the pull-off forces of removable telescopic prostheses.pdf. *Zahnärztl Prax* 1982;4:153–6. [German]
- [7] Szentpétery, V. / Setz, J. Das stark reduzierte Restgebiss Versorgung mit Teleskopprothetik 1. Auflage 2015 Buch
- [8] Böttger H., Gründler H.. Die Praxis des Teleskopsystems: Teleskopkronen - Stege - Geschiebe - Gelenke - Riegel. Das zahnärztliche und zahntechnische Vorgehen 1978

- [9] Seo J-G, Cho J-H. Clinical outcomes of rigid and non-rigid telescopic double-crown-retained removable dental prostheses: An analytical review. *J Adv Prosthodont* 2020;12:38. <https://doi.org/10.4047/jap.2020.12.1.38>. [10] Güven MÇ, Tuna M, Bozdog E, Öztürk GN, Bayraktar G. Comparison of retention forces with various fabrication methods and materials in double crowns. *J Adv Prosthodont* 2017. <https://doi.org/10.4047/jap.2017.9.4.308>.
- [11] Körber KH, Blum M. Experimental investigations on the influence of the bonding surface size on the reproducible bonding force of conical crowns. *Quintessent Zahntechnik* 2006;32:158–70. [German]
- [12] Müller W.-D.. Zum Stellenwert der Korrosion bei metallhaltigem Zahnersatz, *umwelt-medizin-gesellschaft* | 26 | 4/2013 252 – 256
- [13] Coca I, Lotzmann U, Pöggeler R. Long-term experience with telescopically retained overdentures (double crown technique). *Eur J Prosthodont Restor Dent* 2000;8(March (1)):33–7.
- [14] Schwindling FS, Stober T, Rustemeier R, Schmitter M, Rues S. Retention behavior of double-crown attachments with zirconia primary and secondary crowns. *Dent Mater* 2016. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2016.03.002>.
- [15] Wagner Chr; Stock V; Merk S; Schmidlin P; Roos M; Eichelberger M; Stawarczyk B. Retention Load of Telescopic Crowns with Different Taper Angles between Cobalt-Chromium and Polyetheretherketone Made with Three Different Manufacturing Processes Examined by Pull-Off Test Journal: *Journal of Prosthodontics* 1 . Full title of manuscript R. *J Protsthodontics* 2018;27:162–8.
- [16] Botel F, Zimmermann T, Sutel M, Müller WD, Schwitalla AD. Influence of different low-pressure plasma process parameters on shear bond strength between veneering composites and PEEK materials. *Dent Mater* n.d.;34:e246–54.
- [17] Technical Information VESTAKEEP® Dental-Grades, <https://medical.evonik.com/de/medien/downloads> 2021-11-19.
- [18] Vollmer AR, Vollmer M, Anger ZTMM, Valentin R. Double crowns made of a new high performance polymer. *Cad/Cam* 2014:24–34.

-
- [19] Stock V, Wagner C, Merk S, Roos M, Schmidlin PR, Eichberger M, Stawarczyk B. Retention force of differently fabricated telescopic PEEK crowns with different tapers. *Dent Mater J* 2016. <https://doi.org/10.4012/dmj.2015-249>.
- [20] Merk S, Wagner C, Stock V, Eichberger M, Schmidlin PR, Roos M, Stawarczyk B. Suitability of secondary PEEK telescopic crowns on zirconia primary crowns: The influence of fabrication method and taper. *Materials (Basel)* 2016;9. <https://doi.org/10.3390/ma9110908>.
- [21] Schubert O, Reitmaier J, Schweiger J, Erdelt K, Güth JF. Retentive force of PEEK secondary crowns on zirconia primary crowns over time. *Clin Oral Investig* 2019;23:2331–8. <https://doi.org/10.1007/s00784-018-2657-x>.
- [22] Priester M, Müller W-D, Beuer F, Schmidt F, Schwitalla A D Performance of PEEK based telescopic crowns, a comparative study *Dental Materials*, Volume 37, Issue 11, November 2021, Pages 1667-1675
- [23] Stock V, Schmidlin P, Merk S, Wagner C, Roos M, Eichberger M, Stawarczyk B. PEEK Primary Crowns with Cobalt-Chromium, Zirconia and Galvanic Secondary Crowns with Different Tapers—A Comparison of Retention Forces. *Materials (Basel)* 2016;9:187. <https://doi.org/10.3390/ma9030187>.
- [24] Bayer S, Stark H, Mues S, Keilig L, Schrader A, Enkling N. Retention force measurement of telescopic crowns. *Clin Oral Investig* 2010. <https://doi.org/10.1007/s00784-009-0315-z>.
- [25] Arnold C, Hey J, Setz JM, Boeckler AF, Schweyen R. Retention force of removable partial dentures with different double crowns. *Clin Oral Investig* 2018. <https://doi.org/10.1007/s00784-017-2224-x>.
- [26] Dabrova, T; Dobrowolska, A; Wieleba, W The role of friction in the mechanism of retaining the partial removable dentures with double crown system. *Acta Bioeng. Biomech* 2013; 15: 43-48
- [27] Becker H. Pull-off forces on telescoping crowns on different alloys in endurance test. *Zahnärztl Prax* 1983;10:427–32. [German]

- [28] Körber, KH. Cone crown telescope, Dr.A.Hütig Verl.Leipzig 1969 [German]
- [29] Stüttgen U. Experimental investigation on the parallelism of milled telescoping primary anchors. Dtsch Zahnärztl Z 1983;38:538–40. [German]
- [30] Wegmann U; Maas P. The influence of manufacturing process and surface treatment on the retention force of tapered crowns. Dtsch Zahnärztl Z 1988;43:507–10. [German]
- [31] Beuer F, Edelhoff D, Gernet W, Naumann M. Parameters affecting retentive force of electroformed double-crown systems. Clin Oral Investig 2010;14(April(2)):129–35.

Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Matthias Priester, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema:

„Die Bewertung der Leistungsfähigkeit von PEEK Teleskopkronen in-vitro“

“The evaluation of the performance of PEEK telescopic crowns in vitro”

selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren/innen beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) werden von mir verantwortet.

Ich versichere ferner, dass ich die in Zusammenarbeit mit anderen Personen generierten Daten, Datenauswertungen und Schlussfolgerungen korrekt gekennzeichnet und meinen eigenen Beitrag sowie die Beiträge anderer Personen korrekt kenntlich gemacht habe (siehe Anteilserklärung). Texte oder Textteile, die gemeinsam mit anderen erstellt oder verwendet wurden, habe ich korrekt kenntlich gemacht.

Meine Anteile an etwaigen Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem/der Erstbetreuer/in, angegeben sind. Für sämtliche im Rahmen der Dissertation entstandenen Publikationen wurden die Richtlinien des ICMJE (International Committee of Medical Journal Editors; www.icmje.org) zur Autorenschaft eingehalten. Ich erkläre ferner, dass ich mich zur Einhaltung der Satzung der Charité – Universitätsmedizin Berlin zur Sicherung Guter Wissenschaftlicher Praxis verpflichte.

Weiterhin versichere ich, dass ich diese Dissertation weder in gleicher noch in ähnlicher Form bereits an einer anderen Fakultät eingereicht habe.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§§156, 161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.“

Vellmar, den 31.01.2022

Datum

Unterschrift

Anteilerklärung an den erfolgten Publikationen

Matthias Priester hatte folgenden Anteil an der folgenden Publikation:

Priester M, Müller W-D, Beuer F, Schmidt F, Schwitalla A D

Performance of PEEK based telescopic crowns, a comparative study

Dental Materials, Volume 37, Issue 11, November 2021, Pages 1667-1675

Der Promovenden hat folgende Anteile an diesem Projekt:

- Initiierung der Projektkonzeption und Erarbeitung der Fragestellungen
- Herstellung der dafür notwendigen Proben
- Vorbereitung des Versuchsdesigns und dessen Testung und Anpassung
- Koordinierung der Versuchsdurchführung und Auswertung
- Erstellung aller Tabellen
- Entwurf aller graphischen Darstellungen der Ergebnisse und Abbildungen
- wesentlicher Teil der Literaturrecherche, zur Vorbereitung der Fragestellungen sowie zur Interpretation und Beurteilung der Versuchsergebnisse
- Verfassung der Basisversion und Beteiligung an der Korrektur der Publikation

Berlin, den 31.01.2022

Unterschrift, Datum und Stempel des/der erstbetreuenden Hochschullehrers/in

Unterschrift des Doktoranden/der Doktorandin

Auszug aus der Journal Summery List

Journal Data Filtered By: **Selected JCR Year: 2020 Selected Editions: SCIE,SSCI**
Selected Categories: "DENTISTRY, ORAL SURGERY and MEDICINE"
Selected Category Scheme: WoS
Gesamtanzahl: 91 Journale

Rank	Full Journal Title	Total Cites	Journal Impact Factor	Eigenfactor Score
1	JOURNAL OF CLINICAL PERIODONTOLOGY	19,562	8.728	0.013470
2	PERIODONTOLOGY 2000	6,873	7.589	0.005870
3	JOURNAL OF PERIODONTOLOGY	20,398	6.993	0.010000
4	International Journal of Oral Science	2,890	6.344	0.002260
5	JOURNAL OF DENTAL RESEARCH	26,197	6.116	0.016830
6	CLINICAL ORAL IMPLANTS RESEARCH	15,673	5.977	0.012460
7	ORAL ONCOLOGY	13,860	5.337	0.014090
8	DENTAL MATERIALS	17,990	5.304	0.011490
9	Journal of Evidence-Based Dental Practice	899	5.267	0.001050
10	INTERNATIONAL ENDODONTIC JOURNAL	10,290	5.264	0.006960
11	Japanese Dental Science Review	618	5.093	0.000650
12	Journal of Prosthodontic Research	1,950	4.642	0.002870
13	JOURNAL OF PERIODONTAL RESEARCH	5,801	4.419	0.004260
14	JOURNAL OF DENTISTRY	12,037	4.379	0.010250
15	JOURNAL OF ORAL PATHOLOGY & MEDICINE	6,375	4.253	0.004060
16	JOURNAL OF ENDODONTICS	22,265	4.171	0.010770
17	CARIES RESEARCH	5,362	4.056	0.002940
18	Clinical Implant Dentistry and Related Research	4,918	3.932	0.006570
19	JOURNAL OF ORAL REHABILITATION	7,769	3.837	0.004710
20	JOURNAL OF THE AMERICAN DENTAL ASSOCIATION	9,187	3.634	0.005040

Druckexemplar der Ausgewählten Publikation

DENTAL MATERIALS 37 (2021) 1667–1675

Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

journal homepage: www.intl.elsevierhealth.com/journals/dema

Performance of PEEK based telescopic crowns, a comparative study



Matthias Priester^a, Wolf-Dieter Müller^{b,*}, Florian Beuer^b,
Franziska Schmidt^b, Andreas Dominik Schwitalla^b

^a Dental-Labor Werth & Priester Kassel GmbH & Co KG, Ludwigstr. 6 + 10, 34127 Kassel, Germany

^b Charité – Universitätsmedizin Berlin, corporate member of Freie Universität Berlin and Humboldt-Universität zu Berlin, Department of Prosthodontics, Geriatric Dentistry and Craniomandibular Disorders, Aßmannshäuser Str. 4-6, 141197 Berlin, Germany

ARTICLE INFO

Keywords:

Telescopic crowns
Zirconium dioxide
Cobalt-chromium alloy
PEEK

ABSTRACT

Objective. Telescopic crowns are suitable components of partial dentures to efficiently anchor dental supra-structures to teeth or dental implants and achieve high chewing performance and wear comfort.

Usually alloy- or metal-based structures are used for the primary and the secondary crowns. The advantage is the possibility to produce precise structures with a high perfection and sufficient friction force, but the disadvantage is the corrosion instability. The recent introduction of zirconia ceramics has enabled the fabrication of ceramic primary crowns, thus reducing corrodibility.

The novel application of the high-performance polymer polyetheretherketone (PEEK) as another metal-free alternative material offers a new perspective for such applications.

Therefore, the aim of this work was to assess the performance of telescopic crowns of PEEK by comparing telescopic crowns based on the combination of PEEK (prim. crown) + PEEK (sec. crown) with the pairings ZrO₂ (prim. crown) + PEEK (sec. crown) and CoCr-alloy (prim. crown) + PEEK (sec. crown).

Methods. All specimens were CAD/CAM planned and manufactured based on a model of a tooth 26. One master dental technician performed the post-treatment. For each group of material pairing, n = 9 telescopic crown pairs were manufactured and tested. Herein not only the maximum retention force was measured but also the retention force vs. pull-off distance were analyzed. As there is no commonly accepted test protocol available, the influence of various pull off speeds were tested as well. All measurements were first made with three blocks of three crowns (3C), subsequently with three blocks of two crowns (2C) and finally with nine single crowns (1C). The long-term behavior was estimated by performing 10.000 cycles, which is related to a life-time of more than 10 years.

Results. The maximum retention force in case of PEEK + PEEK was higher in comparison to the other tested material pairings. In the range between 1 and 10 mm/ min pull off speed there was no significant influence by the pull off speed. More influence on the friction force would be expected by changes of the number of the crowns acting simultaneously. The friction force was decreasing with decreasing number of crowns but not linearly in any tested case. The long-term test has shown that the friction force remained constant.

* Corresponding author.

E-mail address: wolf-dieter.mueller@charite.de (W.-D. Müller).

<https://doi.org/10.1016/j.dental.2021.08.020>

0109-5641/© 2021 The Academy of Dental Materials. Published by Elsevier Inc. All rights reserved.

Significance. The performance of PEEK + PEEK telescopes is comparable with the usually applied material pairings. Over long time no loss in retention force could be observed. The retention force - distance progression in the PEEK + PEEK pairing offers more security against a possible loss of retention during repair or relining. For further tests of the performance of telescopic crowns or to estimate of friction force limits, a setup with at least two, but preferably three, crowns tested in parallel is suggested.

© 2021 The Academy of Dental Materials. Published by Elsevier Inc. All rights reserved.

1. Introduction

Conical or telescopic Double-crowns serve to support and anchor removable dentures [1–5]. The principle is based on a primary crown, which is mounted on a tooth or implant, and a secondary crown covering the primary one, that is integrated into the removable denture.

Becker et al. [6] previously discussed the advantages of this system, such as: (a) physical circular enclosure of the anchor teeth and thus axial and physiological loading of the tooth root, (b) enabling ideal periodontal hygiene, (c) easy handling when inserting and removing of the prosthesis, (d) longevity, and (e) good technical feasibility in the laboratory.

A basic distinction is made between cylindrical and conical double crowns. The cylindrical types are characterized by parallel walls between the primary and secondary crowns, while in the latter the outer walls of the primary crown are at an angle of between 2 and 6 degrees to each other. Accordingly, with cylindrical telescopic crowns, the retention force is already established during assembly due to friction as soon as the parallel walls of the primary and secondary crowns touch, whereas with conical telescopic crowns, the retention force is only established in the final position due to the clamping fit. The retention or friction force is an essential influencing parameter for the success of such a construction [7,8]. Körber and Blum [9] suggested a retention force of 5–10 N, taking into account the possible damage to the abutment teeth. Becker et al. [6] found in measurements on patients that a retention force of 3–3.5 N is sufficient.

In any case, remarkably high demands are placed on the technical implementation. This applies to the selection of materials as well as their machining and processing. So far, metal alloys have been used based on the technical possibilities in the laboratory, especially CoCr alloys, often in conjunction with precious metal alloys due to their higher elasticity and thus better adaptation. However, tribo-corrosion occurs between the metal double crowns, especially when combining differently composed metal alloys. This additionally intensifies corrosion phenomena, which then leads to deposits on the noble metal structures of the outwardly visible superstructure [10].

With the introduction of high-strength ceramics based on ZrO₂, another material was available, at least for the primary crowns [11]. However, it was found that the pairing of ZrO₂ with CoCr alloy resulted in considerable wear on the secondary crown, which accordingly led to a decrease in the retention force [12]. Due to the high demands on fitting, durability against corrosion and abrasion wear polyetheretherketone

(PEEK) appears promising as an alternative metal-free material for the manufacturing of telescopic crowns. PEEK is a high performance polymer with a relatively high elastic modulus of 3–4 GPa, good chemical resistance against almost all solvents with almost zero water uptake, in addition to a lower density of 1.32 g/cm³ compared to alloys and ceramics and exceptional tribological properties. Furthermore, a good bond strength can be achieved with veneering composites [13]. Thus, with the help of CAD/CAM technology, metal-free and lightweight prosthetic frameworks can be produced as an alternative to structures made of conventional materials [14].

Accordingly, there are already studies on the behavior of secondary crowns made of PEEK on primary crowns made of CoCr [15] or ZrO₂ [16]. On the one hand, when considering double crowns with a cone angle of 0 degrees, the manufacturing of PEEK secondary crowns by hot pressing appears to have a positive effect on the retention force compared to manufacturing by milling [15,16]. This could possibly be attributed to a certain production-related shrinkage in hot-pressed crowns. When the cone angle is increased by up to 2 degrees, the double crowns produced by machining show higher retention forces, possibly due to the higher stiffness of the PEEK type, so that a higher clamping effect comes into play here [15]. In the combination with primary crowns made of ZrO₂, however, this pattern was not confirmed [16].

In general, Schubert et al. [17] discussed retention forces of around 2.8 N from a PEEK secondary crown on a ZrO₂ primary crown, which did not change significantly even over a simulated period of 10 years. Attempts to combine PEEK secondary crowns and PEEK primary crowns have also been described [18].

Mostly single crown pairings were tested, with different pull-off speeds under various environmental conditions. In all cases only the maximum forces were analyzed and compared, but the force - distance relationship along the contact area between the primary and secondary crown was not investigated.

Therefore, the aim of present study was to compare the frictional behavior of different material pairings in different numbers of telescopic crowns tested simultaneously at different pull-off speeds, with particular reference to the material PEEK for both primary and secondary crowns. The null hypothesis therefore was that there is no difference in the retention behavior of CAD/CAM manufactured secondary PEEK crowns on primary crowns made of different materials, such as CoCr alloy, ZrO₂ and PEEK and the retention force increases linearly with the number of crown pairs.

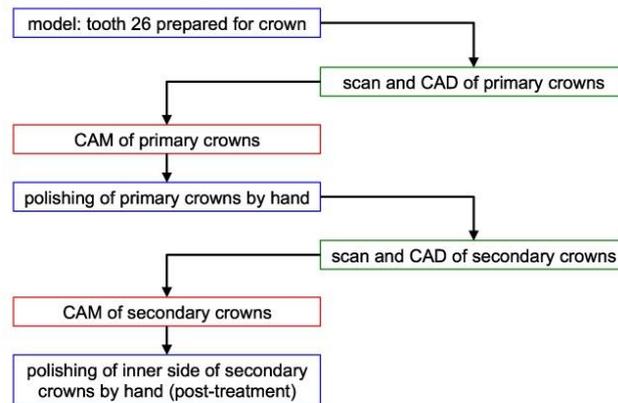


Fig. 1 – Production sequence of the test specimens.

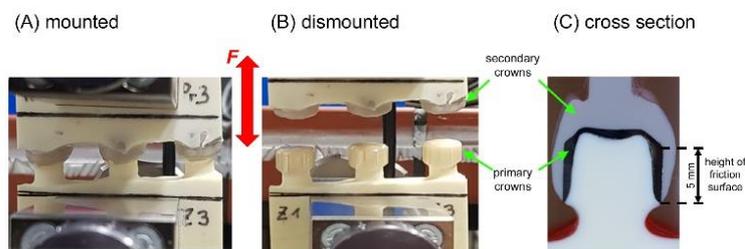


Fig. 2 – Test setup in the universal testing machine; (A) mounted and (B) dismounted positions of a block with three telescopic crowns; (C) cross section of a pair of telescopic crowns.

Additionally, the long-term behavior should be simulated to assess the frictional force over time.

2. Materials and methods

For the manufacturing of the primary crowns an idealized model of a prepared upper 1. molar (26) was used. As materials a CoCr sinter alloy (Ceramill Sintron, Amann Girrbach AG, Pforzheim, Germany) as an exemplary base metal alloy (BMA), 3Y-TZP ZrO₂ ceramic (DD Bio ZX² color, Dental Direkt GmbH, Spenge, Germany), as well as PEEK (DD PeekMED, Dental Direkt, Spenge, Germany) were used. For each material $n = 9$ primary crowns with a cone angle of 0° were manufactured according to the manufacturer's instructions as shown in the workflow in Fig. 1. For this purpose, a digital impression from the model was taken with a DD ArgusM2 HD scanner (Dental Direkt GmbH, Spenge, Germany). A primary crown was designed with the software exocad DentalCAD (exocad GmbH, Darmstadt, Germany) and manufactured from the corresponding round blanks by milling with a 5-axis milling machine (Coritec 350i, imes-icore GmbH, Eiterfeld, Germany). The primary crowns were milled in parallel. After milling, the primary crowns made of zirconia and CoCr were sintered. In

a next step, all primary crowns were polished and scanned to produce corresponding individual secondary crowns. In all cases the gap between the crowns was set to 20 μm. After completion, the inside of the secondary crowns was polished by hand. Of the following material pairings, $n = 9$ crown pairs (primary crown + secondary crown) were produced by one master dental technician: CoCr alloy + PEEK, ZrO₂ + PEEK and PEEK + PEEK. These were then each divided into 3 blocks of 3 crown pairs (3C).

The friction, i.e. the retention force was measured with a 250 N load cell in a Zwick Z005 universal testing machine (ZwickRoell GmbH & Co. KG, Ulm, Germany). For this purpose, the samples were placed on top of one another by hand similar to the practical procedure, clamped and then removed to a vertical distance of 6 mm, as shown in Fig. 2. The test program then controlled the repeated mounting and dismounting of the secondary structures onto the primary structures. The force-displacement diagrams with speeds of 1, 2, 5 and 10 mm/min for 10 cycles could then be recorded. Retention force at a distance of 0, 1, 2, 3, 4 and 5 mm were read out of the curves and compared. Initially, one 3C block of each of the two material pairings ZrO₂ + PEEK and PEEK + PEEK was subjected to a long-term test with 10.000 cycles at a speed of 10 mm/min.

Secondary crown	PEEK	PEEK	PEEK
Primary crown	CoCr	ZrO ₂	PEEK
Taper angle	0°	0°	0°
Pull-off speed [mm/min]	1; 2; 5; 10	1; 2; 5; 10	1; 2; 5; 10
Number of cycles/pull-off speed	10	10	10
Number of crowns per block (number of blocks)	3C (n = 3); 2C (n = 3); 1C (n = 9)	3C (n = 3); 2C (n = 3); 1C (n = 9)	3C (n = 3); 2C (n = 3); 1C (n = 9)
Long-term test	No	One 3-crown-block for 10.000 cycles at 10 mm/min	One 3-crown-block for 10.000 cycles at 10 mm/min

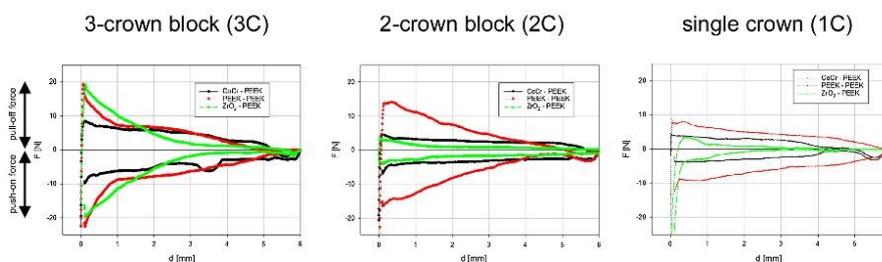


Fig. 3 – Examples of force (F) vs. distance (s) curves for 3- (3C), 2- (2C) and single telescopic-crown-blocks (1C) at 10 mm/min.

In these cases the roughness of the primary crown surfaces was also measured before and after the test using a roughness measuring device (Perthometer M2, Mahr GmbH, Göttingen, Germany) over a length of 1.7 mm along the lingual and buccal sides of the primary crowns, three times per side.

Subsequently, the 3-crown blocks were reduced by one crown so that the 3 remaining 2-crown blocks (2C) of each material pair could be subjected to the initial pull-off tests with a total of 40 cycles at 1, 2.5, and 10 mm/min. Subsequently, the 2-crown blocks were also separated so that 9 single crown pairs (1C) of each material pair could be subjected to the initial pull-off test (10 cycles each at pull-off speeds of 1, 2, 5 and 10 mm/min).

Table 1 gives an overview of the test protocol.

The statistical evaluation was carried out by Kruskal-Wallis one-way ANOVA with Holm-Sidak post-hoc test using the software Sigmaplot 14.0. The level of significance for differences between the results was set at $p < 0.05$.

3. Results

Exemplary force (F) - distance (d) curves for each pairing and number of crowns per block at a test speed of 10 mm/min for both mounting and dismounting are shown in Fig. 3. The course of the curves differed partially significantly due to the friction along the contact surfaces of each pairing. The courses of the pairings PEEK + PEEK and ZrO₂ + PEEK were similar, in the form of a linear decrease in the retention force from the maximum force at 0 mm distance to non-contact at 6 mm distance. In the case of the CoCr + PEEK-pairings the retention force over the contact surfaces only slightly changed until reaching non-contact. In all material pairings, independent of the number of crowns in a block, the PEEK-PEEK pairing

showed the highest maximum retention forces across the contact surfaces. Increasing the number of crowns in a block resulted in higher retention forces for all material pairings.

Table 2 lists force values from the material pairings with PEEK secondary crowns and different number crown blocks (1C, 2C and 3C). The given forces are the arithmetic averages of force values at specific distance positions of different speeds (1–10 mm/min) with 10 cycles recorded at each speed. The force value at position 0 corresponds to the maximal recorded force F_{max} for the pull-off of the secondary crown. Positions 1–5 correspond to distances of 1.0–5.0 mm along the gliding surface. Fig. 4 shows the corresponding graphs to Table 2.

Fig. 4 shows that the maximum force F_{max} at position 0 varied strongly depending on the material pairing and generally decreased with decreased number of crowns for most pairings.

Fig. 5 shows the maximum retention force F_{max} for the different material pairings, taking into account the number of crowns tested in parallel, whereas the results showed no linear dependence of the friction force on the number of crowns.

The results of the statistical evaluation of the mean F_{max} values are compiled in Table 3 and illustrated with box-plots in Fig. 6. In case of the single crown (1C) and 2-crown blocks (2C) F_{max} values for the PEEK + PEEK pairings were significantly higher than the values recorded for ZrO₂ + PEEK and CoCr + PEEK pairings. 1C and 2C values for CoCr-PEEK and ZrO₂-PEEK pairings showed no significant differences. For 3-crown blocks (3C) all material pairings were significantly different.

The results of the long-term behavior of one 3C of the material pairings PEEK + PEEK and ZrO₂ + PEEK are shown in Fig. 7. The recorded force (F) values for the ZrO₂ + PEEK pairing increased with an increasing number of cyclers, while the values for PEEK + PEEK remained similar over time.

Table 2 – Mean retention forces of the material pairings with PEEK secondary crowns of 3C, 2C and 1C; position 0 = F_{max} .

Material Pairing	Position [mm]	3C	2C	1C
		F [N] (SD)	F [N] (SD)	F [N] (SD)
CoCr + PEEK	0	10.63 (0.531)	5.713 ± 1.223	4.918 (0.257)
	1	5.15 (0.526)	2.376 (0.216)	2.770 (0.497)
	2	4.54 (0.447)	1.826 (0.103)	2.713 (0.357)
	3	3.75 (0.399)	1.525 (0.083)	2.220 (0.340)
	4	2.04 (0.257)	1.392 (0.073)	0.653 (0.220)
	5	0.97 (0.276)	0.968 (0.098)	0.000 (0.000)
PEEK + PEEK	0	19.12 (0.533)	17.78 (2.739)	9.19 (0.798)
	1	7.93 (0.568)	11.91 (0.746)	4.82 (0.529)
	2	7.21 (0.593)	7.76 (0.307)	3.84 (0.411)
	3	5.17 (0.326)	4.85 (0.377)	3.14 (0.365)
	4	2.11 (0.070)	2.18 (0.076)	2.36 (0.360)
	5	0.00 (0.000)	0.00 (0.000)	1.15 (0.306)
ZrO ₂ + PEEK	0	17.49 (1.46)	5.79 (0.78)	3.30 (1.91)
	1	9.2 (0.57)	2.71 (0.21)	1.32 (0.55)
	2	4.21 (0.37)	1.57 (0.21)	0.94 (0.44)
	3	1.81 (0.20)	1.25 (0.15)	0.50 (0.31)
	4	1.26 (0.04)	0.98 (0.14)	0.00 (0.24)
	5	0.77 (0.17)	0.47 (0.19)	0.00 (0.27)

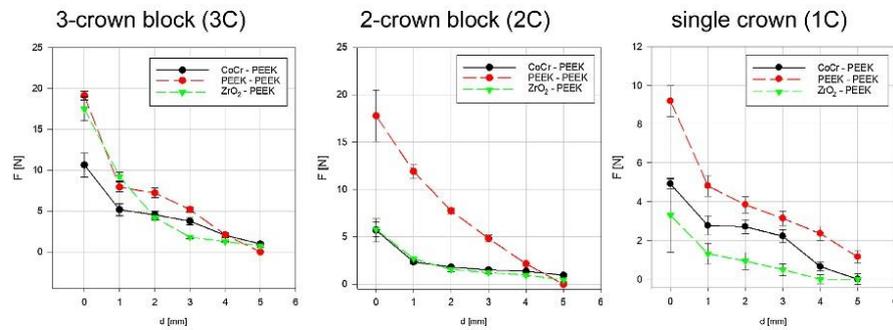


Fig. 4 – Force (F) vs. distance (d) for the material pairings CoCr + PEEK, PEEK + PEEK and ZrO₂ + PEEK, sorted by number of crowns tested.

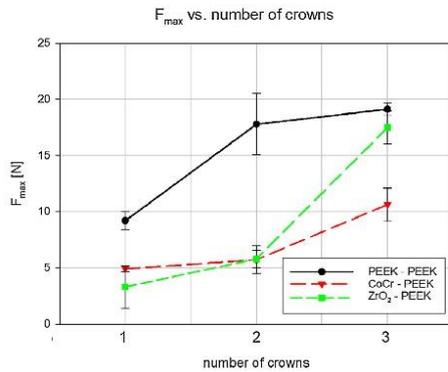


Fig. 5 – Maximum retention force F_{max} depending on number of crowns and material pairing.

Roughness values from the inner side of the secondary crowns were recorded before and after long-term exposure of 10,000 cycles (Table 4). The roughness did not change substantially after the cyclic loading. In case of the PEEK + PEEK pairing, the roughness decreased after 10,000 cycles, indicating a possible polishing effect over time. In case of the ZrO₂ + PEEK pairing the roughness increased slightly, which can be related to the noted increase in retention force values with increased number of cycles in this material pairing (see Fig. 7).

4. Discussion

The aim of this study was to investigate different material pairings PEEK + PEEK, CoCr + PEEK and ZrO₂ + PEEK for telescopic double crowns. The focus hereby was on the application of PEEK as primary as well as secondary crown. Telescopic crowns of each material pairing with PEEK as secondary crown were produced in the above shown CAD/CAM workflow (Fig. 1).

Table 3 – Kruskal-Wallis One Way ANOVA on ranks with all pairwise multiple comparison procedures (Holm-Sidak method): $p = 0,05$.

Primary crown materials	Number of crowns in block		
	1C	2C	3C
PEEK vs. ZrO ₂	Yes: < 0,001	Yes: < 0,001	Yes: 0,038
PEEK vs. CoCr	Yes: 0,028	Yes: < 0,001	Yes: < 0,001
CoCr vs. ZrO ₂	No: 1,00	No: 0,932	Yes: < 0,001

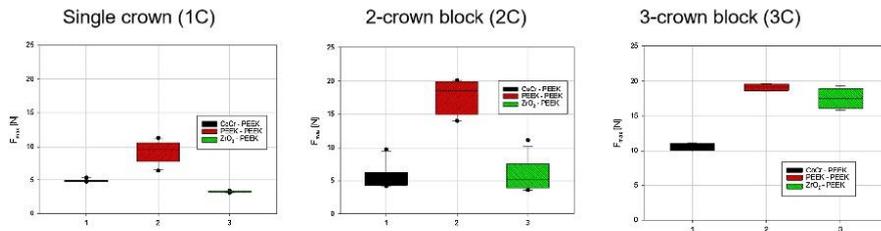


Fig. 6 – Comparison of F_{max} depending on the numbers of crowns (1C-3C) summarized over the 4 different pull-off speeds over 10 cycles.

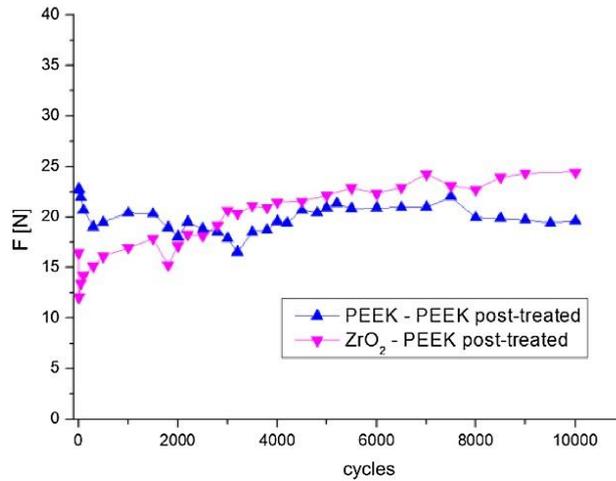


Fig. 7 – F_{max} [N] vs. Number of cycles, tested in a 3-crown block (3C) for the material combinations PEEK + PEEK (blue) and ZrO₂ + PEEK (pink). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article).

Table 4 – Development of roughness values (MEAN ± SD) inside secondary crowns before and after long-term exposure of 10,000 cycles.

Roughness parameter	PEEK + PEEK		ZrO ₂ + PEEK	
	Before mean (SD)	After mean (SD)	Before mean (SD)	After mean (SD)
R _a [μm]	0.72 (0.08)	0.76 (0.16)	0.56 (0.12)	0.64 (0.29)
R _z [μm]	1.3 (0.78)	0.99 (0.26)	0.59 (0.17)	0.87 (0.39)
R _{max} [μm]	2.08 (1.15)	1.99 (0.1)	1.02 (0.61)	1.71 (0.8)

The final step was a manual post processing of the inner sides of the secondary crowns. For each material pairing crown blocks of one, two and three crowns were tested by recording their retentive force over the length of the contact surface. It should be noted that prior to the main experiments, preliminary tests were carried out in a moist environment with wetted sliding surfaces, which, however, showed no difference in trend or in absolute values compared to the dry samples, similar to what Bayer et al. [19] described.

In addition to the marginal parameters that can be set very well with the aid of CAD/CAM technology, especially the retention force and its long-term stability are of great importance, as this determines the long-term stability and usability of the telescope. The long-term behavior of the pairings PEEK + PEEK and ZrO₂ + PEEK were investigated over a simulation period of 10 years, which was achieved by recording the retentive force over 10,000 cycles of up and down movements of the secondary crowns, as mentioned by Arnold et al. [20].

It was expected that i) there would be minor, not significant differences in the course of the force (F) to distance (s) curves and the resulting maximum force F_{max} between the different material pairings, as all primary and secondary crowns were produced by the same CAD/CAM workflow and technician. And ii) we further expected a linear relation between number of crowns in the tested blocks and the recorded F_{max} for each material pairing. Both of these expectations were not met.

The recorded maximum forces for the PEEK + PEEK pairings were significantly higher ($p < 0.05$) than those for the CoCr + PEEK and ZrO₂ + PEEK pairings over 10 cycles (see Fig. 6). This was found independent of the number of crowns per block. Comparing CoCr + PEEK and ZrO₂ + PEEK showed no statistically significant difference for F_{max} in single and 2-crown blocks (1C and 2C), but showed a significant difference in F_{max} for 3-crown blocks. This initially indicates a better sliding behavior of PEEK on polished non-precious metal alloy surfaces as well as on polished ceramic surfaces, than on polished PEEK surfaces. This is related to the possible differences in the sliding behavior between the different tested materials as mentioned in [21], where the friction coefficient is changing depending on the contact pressure.

Based on the results, the use of PEEK as a secondary structure seems to be a viable alternative to conventional materials. This is in agreement with the work of the group of Stawarczyk et al. [12,15,18] and [7]. The absolute retentive forces are in the ranges that were also published for other telescope combinations, Arnold [20] and Becker [22]. Unfortunately, they did not discuss which PEEK quality was used for the primary crowns. Assuming that this is the same material as in [15] the results of these investigations also show very strong scattering of the friction forces between 2 and almost 40 N. Actually only those with an overfit of 30 μm milled telescopes show retention forces below 10 N, as recommended by Körber [23].

All primary crowns of the different materials in this study were produced in the same CAD/CAM workflow based on the same model of a first upper molar. After the CAD/CAM production of the primary crowns they were manually polished, then coated with scan spray and subsequently scanned for the production of the secondary crowns. The cement gap was set at 20 μm for all pairings. It is reasonable to conclude that

the manual treatment at the end of the workflow has a dramatic impact on the quality of the result. A linear dependency of the friction or retention force on the number of crowns was assumed, but the actual results show a different behavior. This should lead to a discussion about the predictability of the retention force for devices with more than one telescopic crown. It is probable that in case of an extension of a prostheses and loss of a telescope the friction force can be dramatically reduced and the device can be not stable enough.

Although the concern of CAD/CAM technology is to produce precise and reproducible structures [24,25], it is not possible to achieve this, as the results from Wagner et al. [12] and Stock et al. [15,18]. The deviations of the present study could be attributed to the hand polishing.

The difficulty of reproducing milled PEEK structures on CoCr crowns was also described [26] as well as on ZrO₂ crowns [20], where the authors attributed this to the application of scan varnishes for the production.

Arnold et al. [20] attempted to determine the frictional forces under parallel as well as angulated withdrawal conditions with a real structure, a circular secondary structure made of PEEK on 4 telescopes. It has been found that PEEK structures do not achieve the same precision as when using spark erosion at metallic structures. This shows clearly that the a.m. misfits in the CAD/CAM workflow has to be avoided.

But what is the actually required retention force? In this study, the measured retention forces for a single crown ranged from 3 to 9 N, for a block of 3 crowns the values increased to 11–18 N. For many years, the boundary value for the strength of telescopes based on Körber's anatomical mobility [6,23] of the teeth was given as maximum 5 N, Becker [6] lists 3–3.5 N as sufficient, based on examinations on patients. A transfer to implants is not easily possible, since the implants are ankylotically anchored in the bone. How sensible these values are cannot be objectively considered, as the strength of vital teeth that are used as primary crown carriers cannot be measured and certainly depends on the degree of loosening of the respective tooth. Körber's requirement to design the withdrawal forces in such a way that an "extraction" of the abutment teeth is avoided is obvious. Also this requires a conical crown to make it adjustable by an ideal enclosure on the conical edge. However, this has its limits in dentistry, as very few prepared teeth have a circular cross-section and thus the ideal fit of the conical connection is not achieved due to irregularities along the friction line. In addition, in the event of an insufficient fit, such as a slight deviation in the requirements, this fit can no longer be readjusted, which leads to enormous additional work in the laboratory.

This can be better compensated and adjusted with the help of telescopic crowns, which was underlined by the results of the deduction measurements. In all material pairings, the retentive forces initially decreased, but remained relatively stable between the distance of 1–3, and even 4 mm, with the retention force still being sufficient to hold a prosthesis in place according to Becker et al. [6].

The mean friction force vs. the number of crowns determined from all measurements would satisfy the previously known boundary conditions for this. Therefore, the CAD/CAM workflow should be set to reproducibly produce PEEK secondary crowns with predictable friction forces.

A clear description of a reliable retention force, whether on teeth that are still present or on implants, is still pending, also from the point of view that this can then also be reproducibly implemented in the laboratory.

The latter has to be worked out in further investigations, since all previous investigations, including those presented here, show various technical “defects” in the sense of a repeatable production of a predictable retention force for a telescope. Despite the CAD/CAM technology used in a lot of work, scanning spray is used to manufacture the secondary crowns on polished primary crowns, which undoubtedly influences the accuracy, especially in the connection area between the two structures. In addition, in all cases the insides of the secondary crowns are also reworked manually, with the result that a reproducible retention force cannot be set and the quality check is subjective at the end of the chain.

Nevertheless, some very special facts emerge here when PEEK is used for the manufacturing of primary and secondary crowns.

It will also be necessary to check the suitability of the laboratory tests in clinical studies.

The flexibility and adaptability of PEEK, which could be shown in these and other investigations [16], even over longer periods of time, gives hope that such a really alternative material is also suitable for long-term applications.

5. Conclusion

Taking into account the limitations of these investigations, the following conclusions can be drawn.

The combination of primary and secondary PEEK crowns showed adequate performance comparable to conventional material combinations, with this material combination being able to undergo 10,000 pull-off cycles without loss of retention force, corresponding to an average service life of approximately 13 years. Therefore, PEEK seems suitable for the fabrication of primary crowns in combination with secondary crowns made of PEEK.

By using CAD/CAM technology, the friction cannot be set automatically by selecting the correct machine parameters. Therefore, further investigations are required, e.g. including the geometric data. Reliable predictability should be the goal and seems to be feasible when using PEEK as secondary crown material. The aspect of time saving is given if it is possible to prepare the inner side of the secondary crown based on PEEK only with the CAD/CAM machine.

Since the retention force via the sliding surface is still sufficiently large up to 1 mm below the upper edge of the primary crown, the telescopic crown design offers the possibility of better compensating for inaccuracies in the fit of RPDs, for example, due to excessive relining, and thus improving wear comfort.

Acknowledgment

The authors would like to thank Christiane Schöpf for conducting experiments.

REFERENCES

- [1] Weigl P, Hahn L, Lauer HC. Advanced biomaterials used for a new telescopic retainer for removable dentures: ceramic vs. electroplated gold copings: part I. In vitro tribology effects. *J Biomed Mater Res* 2000;53:320–36, [http://dx.doi.org/10.1002/1097-4636\(2000\)53:4<320::AID-JBM6>3.0.CO;2-W](http://dx.doi.org/10.1002/1097-4636(2000)53:4<320::AID-JBM6>3.0.CO;2-W).
- [2] Yee A, Chui Ling G. Aesthetic and Occlusal Rehabilitation Using a Telescopic Denture. *Cureus* 2020 Mar;2512(3):e7402, <http://dx.doi.org/10.7759/cureus.7402>.
- [3] Wöstmann B, Balkenhol M, Weber A, Ferger P, Rehm P. Long-term analysis of telescopic crown retained removable partial dentures: survival and need for maintenance. *J Dent* 2007;35:939–45, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jdent.2007.09.010>.
- [4] Zahn T, Zahn B, Janko S, Weigl P, Gerhardt-Szép S, Lauer HC. Long-term behavior of double crown retained dentures with metal and metal-free secondary crowns and frameworks made of Vectris® on all-ceramic primary crowns: a prospective, randomized clinical trial up to 14 years. *Clin Oral Investig* 2016;20:1087–100, <http://dx.doi.org/10.1007/s00784-015-1597-y>.
- [5] Hinz S, Schweyen R, Hey J, Setz J, Arnold C. Clinical performance of non-precious metal double crowns with friction pins in severely reduced dentitions. *Clin Oral Investig* 2020;24:3567–75, <http://dx.doi.org/10.1007/s00784-020-03228-1>.
- [6] Becker H. Investigation of the pull-off forces of removable telescopic prostheses.pdf. *Zahnärztl Prax* 1982;4:153–6 [German].
- [7] Seo J-G, Cho J-H. Clinical outcomes of rigid and non-rigid telescopic double-crown-retained removable dental prostheses: an analytical review. *J Adv Prosthodont* 2020;12:38, <http://dx.doi.org/10.4047/jap.2020.12.1.38>.
- [8] Güven MÇ, Tuna M, Bozdağ E, Öztürk GN, Bayraktar G. Comparison of retention forces with various fabrication methods and materials in double crowns. *J Adv Prosthodont* 2017;9:308–14, <http://dx.doi.org/10.4047/jap.2017.9.4.308>.
- [9] Körber KH, Blum M. Experimental investigations on the influence of the bonding surface size on the reproducible bonding force of conical crowns. *Quintessenz Zahntechnik* 2006;32:158–70 [German].
- [10] Coca I, Lotzmann U, Pöggeler R. Long-term experience with telescopically retained overdentures (double crown technique). *Eur J Prosthodont Restor Dent* 2000;8(March (1)):33–7.
- [11] Schwindling FS, Stober T, Rustemeier R, Schmitter M, Rues S. Retention behavior of double-crown attachments with zirconia primary and secondary crowns. *Dent Mater* 2016;32:695–702, <http://dx.doi.org/10.1016/j.dental.2016.03.002>.
- [12] Wagner C, Stock V, Merk S, Schmidlin P, Roos M, Eichelberger M, et al. Retention load of telescopic crowns with different taper angles between cobalt-chromium and polyetheretherketone made with three different manufacturing processes examined by pull-off test. *J Prosthodontics* 2018;27:162–8.
- [13] Bötel F, Zimmermann T, Sütel M, Müller WD, Schwitalla AD. Influence of different low-pressure plasma process parameters on shear bond strength between veneering composites and PEEK materials. *Dent Mater* 2018;34(9):e246–54, <http://dx.doi.org/10.1016/j.dental.2018.06.004>.
- [14] Vollmer R, Vollmer M, Anger M, Valentin R. Double crowns made of a new high performance polymer. *Implants* 2014;3:24–34.

- [15] Stock V, Wagner C, Merk S, Roos M, Schmidlin PR, Eichberger M, et al. Retention force of differently fabricated telescopic PEEK crowns with different tapers. *Dent Mater J* 2016;35:594–600, <http://dx.doi.org/10.4012/dmj.2015-249>.
- [16] Merk S, Wagner C, Stock V, Eichberger M, Schmidlin PR, Roos M, et al. Suitability of secondary PEEK telescopic crowns on zirconia primary crowns: the influence of fabrication method and taper. *Materials (Basel)* 2016;9, <http://dx.doi.org/10.3390/ma9110908>.
- [17] Schubert O, Reitmaier J, Schweiger J, Erdelt K, Güth JF. Retentive force of PEEK secondary crowns on zirconia primary crowns over time. *Clin Oral Investig* 2019;23:2331–8, <http://dx.doi.org/10.1007/s00784-018-2657-x>.
- [18] Stock V, Schmidlin P, Merk S, Wagner C, Roos M, Eichberger M, et al. PEEK primary crowns with cobalt-chromium, zirconia and galvanic secondary crowns with different tapers—a comparison of retention forces. *Materials (Basel)* 2016;9:187, <http://dx.doi.org/10.3390/ma9030187>.
- [19] Bayer S, Stark H, Mues S, Keilig L, Schrader A, Enkling N. Retention force measurement of telescopic crowns. *Clin Oral Investig* 2010;14:607–11, <http://dx.doi.org/10.1007/s00784-009-0315-z>.
- [20] Arnold C, Hey J, Setz JM, Boeckler AF, Schweyen R. Retention force of removable partial dentures with different double crowns. *Clin Oral Investig* 2018;22:1641–9, <http://dx.doi.org/10.1007/s00784-017-2224-x>.
- [21] Dąbrowa T, Dobrowolska A, Wieleba W. The role of friction in the mechanism of retaining the partial removable dentures with double crown system. *Acta Bioeng Biomech* 2013;15(4):43–8.
- [22] Becker H. Pull-off forces on telescoping crowns made of different alloys in endurance test. *Zahnärztl Prax* 1983;34:427–32 [German].
- [23] Körber K. Cone crown telescope. Heidelberg: Hüthig; 1969 [German].
- [24] Stüttgen U. Experimental investigation on the parallelism of milled telescoping primary anchors. *Dtsch Zahnärztl Z* 1983;38:538–40 [German].
- [25] Wegmann U, Maas P. The influence of manufacturing process and surface treatment on the retention force of tapered crowns. *Dtsch Zahnärztl Z* 1988;43:507–10 [German].
- [26] Beuer F, Edelhoff D, Gernet W, Naumann M. Parameters affecting retentive force of electroformed double-crown systems. *Clin Oral Investig* 2010;14(April (2)):129–35, <http://dx.doi.org/10.1007/s00784-009-0271-7>.

Lebenslauf

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

Publikationsliste

1. Priester M, Müller W-D, Beuer F, Schmidt F, Schwitalla A D

Performance of PEEK based telescopic crowns, a comparative study

Dental Materials, Volume 37, Issue 11, November 2021, Pages 1667-1675

Danksagung

Mein Dank gilt an dieser Stelle den Personen, die mich während der Bearbeitung meiner Dissertation unterstützt haben und ohne die diese Promotionsschrift nicht zustande gekommen wäre:

Mein großer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. (UH) Dr. Wolf-Dieter Müller für seine große Geduld und seine exzellente Unterstützung bei dieser Arbeit.

Ich danke Herrn Prof. Dr. Andreas Schwitalla für seine Unterstützung bei der Veröffentlichung des Papers.

Mein weiterer Dank gilt den Koautoren des Papers für ihre Hilfestellung.

Ich danke meiner Frau für ihre Geduld mit mir auf meinem Weg zu dieser Arbeit und meiner lieben Familie.

Ich bedanke mich bei Frau Christiane Schöpf für die Unterstützung bei der Durchführung der Versuche.

Ich danke Herrn Zahntechniker Alexander Kellner für die Unterstützung bei der Herstellung der zahntechnischen Proben.