

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

DISSERTATION

Optimierung der Verbundfestigkeit zwischen PEEK-Werkstoffen und
Verblendkompositen durch Niederdruckplasmaprozesse

zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor medicinae dentariae (Dr. med. dent.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Friederike Bötzel

aus Kiel

Datum der Promotion: 13.12.2019

Meinen Eltern

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| 1. Abstracts..... | 5 |
| a. Deutsche Version | 5 |
| b. Englische Version..... | 7 |
| 2. Manteltext | 9 |
| a. Einleitung..... | 9 |
| b. Material und Methoden..... | 12 |
| c. Ergebnisse..... | 17 |
| d. Diskussion | 27 |
| e. Quellen | 33 |
| 3. Eidesstattliche Versicherung und Ausführliche Anteilserklärung..... | 35 |
| a. Eidesstattliche Versicherung | 35 |
| b. Ausführliche Anteilserklärung an der erfolgten Publikation | 36 |
| 4. Auszug aus der Journal Summary List..... | 37 |
| 5. Druckexemplar der Publikation..... | 38 |
| 6. Lebenslauf | 49 |
| 7. Vollständige Publikationsliste | 51 |
| a. Poster | 51 |
| b. Paper..... | 51 |
| c. Paper..... | 51 |
| 8. Danksagung | 53 |

1. Abstracts

a. Deutsche Version

Zielsetzung:

Das Ziel der Studie war, die Auswirkungen der Parameter chemische Zusammensetzung und Einwirkungsdauer einer Behandlung mit einem Niederdruckplasma auf die Scherhaftfestigkeit (SBS) zwischen Verblendkompositen und PEEK Werkstoffen zu untersuchen.

Material und Methoden:

434 Proben wurden aus drei PEEK-Varianten (Juvora Dental Disk (Invibio Ltd., Lancashire, UK), DC 4420 und DC 4450 (beide Evonik Industries, Essen, Germany)) mithilfe einer Hochpräzisionssäge (IsoMet1000 Precision Cutter, Buehler, Lake Bluff, USA) unter Wasserkühlung hergestellt.

Diese wurden mithilfe einer Poliermaschine (Exakt 400 CS, EXAKT Advanced Technologies GmbH, Norderstedt, Germany) mit SiC-Schleifpapier der Körnungen 320, 800, 1200 (Hermes Schleifmittel GmbH, Hamburg, Germany) unter Wasserkühlung poliert. Ein aus 135 Proben bestehender Teil unter Wasserkühlung wurde mit SiC-Schleifpapier der Körnungen 2500 und 4000 poliert. 299 Proben wurden mit Al₂O₃ Strahlmittel von 110 µm Korngröße (Korox 110, BEGO Bremen, Bremen, Germany) 10 sec/cm² mit einem Abstand von 10 mm bei einem Druck von 2.5 bar senkrecht zur Oberfläche abgestrahlt.

Die Proben wurden in folgende Vorbehandlungsgruppen eingeteilt:

- 1a. Poliert, Kein Plasma
- 5a. Poliert, Ar/O₂-Plasma für 35 min
2. Sandgestrahlt, O₂-Plasma für 3 min
3. Sandgestrahlt, O₂-Plasma für 35 min
4. Sandgestrahlt, Ar/O₂-Plasma für 3 min
- 5b. Sandgestrahlt, Ar/O₂-Plasma für 35 min

Nach Bestimmung von Rauheit und Randwinkel wurden die Proben mit einem Haftvermittler (visio.link, Bredent GmbH & Co KG, Senden, Germany) behandelt, bevor sie mit einem von drei Verblendkompositen (Vita VM LC, Vita Zahnfabrik, Bad Säckingen, Deutschland), GC Gradia, GC Gradia Direct Flo (GC Europe, Leuven, Belgien)) verblendet wurden. Abschließend wurden die Proben über 24 h in

destilliertem Wasser bei 37°C gelagert. Die Scherhafffestigkeit wurde in einer Universaltestmaschine gemessen (Z010, Zwick GmbH, Ulm, Germany).

Ergebnisse und Diskussion:

Die Benetzbarkeit war nach allen Plasmabehandlungen signifikant höher als vor der Plasmabehandlung, unabhängig vom Plasmatyp und dem PEEK-Material.

Im Vergleich der Verblendcomposite konnten für Vita VM LC die höchsten SBS Werte auf DC 4450 gemessen werden. GC Gradia zeigte mit GC Gradia Direct Flo vergleichbare Werte (mit Ausnahme von signifikant niedrigen Werten auf DC 4450). Von den drei Verblendcomposites wurden mit GC Gradia Direct Flo die höchsten Scherhafffestigkeitswerte gemessen.

Alle Plasmaprogramme zeigten einen positiven Effekt auf die Verbundfestigkeit zwischen Verblendcomposite zu PEEK. Dies wird gefördert durch die signifikant erhöhte Benetzbarkeit unabhängig vom Plasmaprogramm. Auf den gefüllten PEEK-Compounds konnten höhere SBS-Werte gemessen werden als auf Juvora. Der Einsatz der verschiedenen Plasmavorbehandlung ist unabhängig von der PEEK-Variante vorteilhaft.

b. Englische Version

Objective:

The study presented aimed at investigating the influence of different low-pressure plasma process parameters on the shear bond strength (SBS) between different PEEK compounds and veneering resins.

Materials and Methods:

To achieve that, 434 specimens were milled out of three peek compound materials (Juvora Dental Disk (Invibio Ltd., Lancashire, UK); DC 4420; DC 4450 (both Evonik Industries, Essen, Germany) were milled with a high precision cutter (IsoMet1000 Precision Cutter, Buehler, Lake Bluff, USA) and polished following a protocol to achieve even surfaces.

They were divided into two groups: 135 specimens were polished up to 4000 grid while the remaining 299 specimens were sandblasted with 110 μm Al_2O_3 . All specimens were cleaned ultrasonically. They were allocated to seven different pretreatment groups:

- 1a. Polished, no plasma
- 5a. Polished, Ar/O₂-plasma for 35 min
2. Sandblasted, O₂-Plasma for 3 min
3. Sandblasted, O₂-Plasma for 35 min
4. Sandblasted, Ar/O₂-Plasma for 3 min
- 5b. Sandblasted, Ar/O₂-Plasma for 35 min

Surface roughness and contact angle measurements were obtained. After the application of a bonding agent (visio.link, Bredent GmbH & Co KG, Senden, Germany), one of three veneering resins (Vita VM LC (Vita Zahnfabrik, Bad Säckingen, Germany), GC Gradia, GC Gradia Direct Flo (GC Europe, Leuven, Belgium)) was applied. Specimens were stored in distilled water for 24 h at 37 °C. Shear bond strength (SBS) was measured in an universal testing machine (Z010, Zwick GmbH, Ulm, Germany).

Results and discussion:

Wettability increased significantly after all plasma pre-treatments tested. This effect occurred irrespectively of plasma type, plasma duration and PEEK material.

Vita VM LC performed best on the filled DC 4450. GC Gradia showed comparable results to GC Gradia Direct Flo apart from two significantly lower SBS results on DC 4450. Of the three veneering resins tested, GC Gradia Direct Flo performed the best and can be recommended especially for the PEEK compounds.

All pre-treatments containing plasma had a positive effect on shear bond strength to PEEK. This was surely facilitated by the significantly increased wettability which occurred on all PEEK materials tested after all plasma pre-treatments. The unfilled PEEK material lead to higher SBS values compared to the filled PEEK compounds.

Applying a low-pressure plasma pre-treatment has a favourable effect irrespectively of the PEEK material used.

2. Manteltext

a. Einleitung

Seit einigen Jahren steigt das Interesse am Werkstoff Polyetheretherketon (PEEK) für zahnmedizinische Anwendungen stetig.

Der Werkstoff ist ein polyaromatischer Thermoplast aus der Familie der Polyaryletherketone [1]. Ausgehend von medizinischen Anwendungen [2] wird er bereits in zunehmendem Maße experimentell in der zahnmedizinischen Prothetik und Chirurgie eingesetzt [3-5]. In der Literatur wurden als Anwendungsmöglichkeiten auf dem Gebiet der Zahnmedizin beispielsweise die Verwendung von PEEK als Gerüstmaterial für festsitzenden [5, 6] und herausnehmbaren Zahnersatz [4, 5, 7] sowie als Material für Implantatabutments oder Implantate [5, 8] beschrieben.

Dies ist vor allem auf die besonderen physikalischen und chemischen Eigenschaften als Hochleistungspolymer zurückzuführen. Vorteilhaft erweist sich dabei ein Elastizitätsmodul von 3-4 GPa, welches dem E-Modul des Knochens sehr nahe kommt [9, 10]. Es wird vermutet, dass sich der niedrige E-Modul von PEEK günstig auf das stomatognathe System mit seinen mechanischen Belastungen auswirkt [5, 11].

Durch seine geringe Dichte von $1,265 \text{ g/cm}^3$ im Vergleich zu Dentallegierungen ist eine Verbesserung des Tragekomforts von Zahnersatz auf PEEK-Basis zu erwarten. Seine hohe Zug- und Biege- sowie gute Abriebfestigkeit entspricht den allgemein anerkannten Anforderungen an einen zahnmedizinischen Restorationswerkstoff [1].

Durch die Verarbeitungsmöglichkeiten via CAD-CAM-gestütztem Spanabtrag können hohe Passgenauigkeiten von Werkstücken aus PEEK erzielt werden [12].

Es weist ein chemisch wie biologisch inertes Verhalten auf. Daher kann es eine hypoallergene metallfreie Alternative zu konventionellen Zahnersatzmaterialien wie z.B. zahnmedizinischen Legierungen darstellen [6, 13].

Aufgrund dieser positiven Eigenschaften stellt PEEK neben Keramik eine mögliche Alternative zu metallbasierten Werkstoffen für dentale Restaurationen dar [8].

Die Farbgebung von PEEK ist durch Additive in einem Spektrum von gräulich, weiß bis Gingivafarben in gewissem Maße steuerbar. Damit ist die Farbgebung vorteilhaft im Vergleich zu dem metallischen Schimmer konventioneller Legierungen [6].

Dennoch muss PEEK aufgrund seiner optisch opaken Eigenschaften bei der Verwendung als Gerüstmaterial für Zahnersatz mit entsprechenden Kompositen verblendet werden, um eine ästhetisch ansprechende Restauration gewährleisten zu können [6, 14].

Der dabei angestrebte dauerhafte Verbund zwischen PEEK und dem Verblendcomposite stellt nach wie vor eine Herausforderung dar, was u.a. auf die niedrige Oberflächenenergie von PEEK zurückzuführen ist [15].

Es wurden in der Vergangenheit bereits einige Verfahren geprüft, die einen Verbund durch primär mechanische Oberflächenmodifikation herstellen konnten. Zu nennen sind: Abstrahl- [6, 16-20] und verschiedene Säure-Ätz-Techniken [6, 16-18, 20, 21] sowie das Rocatec-Verfahren [6, 16, 17, 22], die allesamt eine mikromechanische Verankerung des Verblendcomposites auf der PEEK-Oberfläche bewirken sollten. Weiterhin wurde festgestellt, dass die Verwendung eines Haftvermittlers einen positiven Einfluss auf den Verbund haben kann [16-18, 21]. Dennoch ist fraglich, ob diese Techniken zu einem langfristig stabilen Verbund führen.

Als weitere und in dieser Studie untersuchte Methode der chemisch-mechanischen Oberflächenmodifikation besteht die Methode der Plasmabehandlung. Dessen Anwendungsmöglichkeiten werden derzeit in vielen Bereichen der Medizin untersucht, wobei es bei der jeweiligen Studie die jeweilige Plasmaart zu achten gilt [14, 23-25]. Plasma wird als vierter Aggregatzustand bezeichnet und ist ein ionisiertes Gas, welches als Hochdruck-, Normaldruck- oder Niederdruckplasma angewendet werden kann. Es besteht aus elektrisch geladenen Teilchen, UV- und Wärmestrahlung, sichtbarem Licht und reaktiven Molekülen, die je nach chemischer Komposition des Plasmas variieren können [24]. Eine Plasmabehandlung bedingt den Beschuss einer Oberfläche mit hochenergetischen Teilchen (geladene Teilchen, freie Radikale, metastabile Teilchen, Photonen im UV Spektrum) und führt so zu einer gesteigerten Benetzbarkeit der Oberfläche [26] und zu einer veränderten Oberflächenrauheit in Folge der Ätzwirkung [27, 28].

Die Behandlung einer Gerüstoberfläche aus PEEK mit einem Ar/O₂-Niederdruckplasma vor Verblenden mit einem entsprechenden Komposit scheint dabei einen positiven Effekt auf die Scherhaftfestigkeit (SBS) zwischen beiden Komponenten zu haben, wie eine frühere Studie gezeigt hat [23]. Dies wird auf die

thermische und ätzende Wirkung des Plasmas sowie die damit verbundene mechanische Modifikation der Oberfläche zurückgeführt.

Die Dauer des Plasma-Prozesses betrug in jener Untersuchung 35 min [23]. Insofern müsste theoretisch ein kürzerer Plasma-Prozess die für die SBS notwendige Oberflächenrauheit weniger beeinträchtigen.

Die vorliegende Studie untersucht nun erstmalig den Einfluss unterschiedlicher Zeiten und Gase im Plasmaprozess einer Niederdruckplasma-Vorbehandlung auf die SBS in Abhängigkeit von jeweils drei verschiedenen verwendeten Verblendkompositen und PEEK-Compounds. Dies ist in Hinsicht auf die Erzielung eines dauerhaften, möglichst chemischen Verbunds zu Verblendmaterialien klinisch relevant.

b. Material und Methoden

Es wurden aus drei verschiedenen PEEK-Basismaterialien 434 Proben mit einem Format von 10 x 15 x 2,5 mm mithilfe einer Hochpräzisionssäge (IsoMet1000 Precision Cutter, Buehler, Lake Bluff, USA) unter Wasserkühlung hergestellt. Die drei PEEK Sorten waren:

1. Juvora Dental Disk (Invibio Ltd., Lancashire, UK); gräuliche Eigenfarbe
2. DC 4420 (Evonik Industries AG, Essen, Germany); mit 20% TiO₂-Pulver gefülltes PEEK Compound, weiße Eigenfarbe,
3. DC 4450 (Evonik Industries, Essen, Germany), gefülltes PEEK Compound, beige Eigenfarbe.

Um vergleichbare Oberflächen zu erzeugen, wurden die Proben mithilfe einer Poliermaschine (Exakt 400 CS, EXAKT Advanced Technologies GmbH, Norderstedt, Deutschland) mit SiC-Schleifpapier der Körnungen 320, 800, 1200 (Hermes Schleifmittel GmbH, Hamburg, Deutschland) unter Wasserkühlung poliert. Im Anschluss wurden 135 Proben unter Wasserkühlung mit SiC-Schleifpapier der Körnungen 2500 und 4000 poliert. 299 Proben wurden mit Al₂O₃ Strahlmittel von 110 µm Korngröße (Korox 110, BEGO Bremen, Bremen, Deutschland) 10 sec/cm² mit einem Abstand von 10 mm bei einem Druck von 2.5 bar senkrecht zur Oberfläche abgestrahlt.

Die Proben wurden im Ultraschallbad in 96% Ethanol für 5 min gereinigt und anschließend an der Luft getrocknet.

Zur Bestimmung der Oberflächenrauheit und des Randwinkels wurden anschließend zufällig 12 Proben von jeder PEEK-Sorte ausgewählt. Mithilfe des Perthometers S6P (Feinprüf Perthen GmbH, Germany) wurde die Oberflächenrauheit gemessen, wobei drei Proben je PEEK-Sorte und Plasma-Vorbehandlungsgruppe jeweils vor und nach der Plasmabehandlung an jeweils drei Stellen auf ihre Rauheit hin untersucht und so pro Probekörper der durchschnittliche Ra-Wert ermittelt wurde.

Anhand des Kontaktwinkels wurde die Oberflächen-Benetzbarkeit gemessen. Dabei kam die Methode des liegenden Tropfens zur Anwendung. Ein Tropfen reinsten Wassers mit einem Volumen von 10 µL wurde auf die Oberfläche abgesetzt. Für die Messung wurde ein digitales Mikroskop (Keyence VHX-5000, Keyence GmbH, Neu-

Isenburg, Germany) benutzt, dessen horizontal eingestellte optische Achse parallel zur Oberfläche der Probe eingestellt wurde. Die Messung wurde bei Raumtemperatur 10 s nach Erstkontakt zwischen Tropfen und Oberfläche durchgeführt.

Zur Bestimmung der SBS wurden die Proben zunächst in Bezug auf die Oberflächenvorbehandlung in sieben Vorbehandlungsgruppen eingeteilt.

Die Stichprobe der polierten Proben wurde in zwei Teile geteilt, wobei ein Teil unbehandelt blieb (Kontrollgruppe 1a). Ein zweiter Teil (5a) wurde über 35 Minuten mit einem Ar/O₂-Niederdruck-Plasmaprozess behandelt.

Die sandgestrahlten Proben wurden neben einer unbehandelten Kontrollgruppe 1b entsprechend der vier verschiedenen Niederdruck-Plasmaprozesse in die Gruppen 2, 3, 4 und 5b eingeteilt. Das Niederdruckplasma wurde mittels Femto PCCE (Diener electronic GmbH & Co KG, Ebhausen, Deutschland) erzeugt.

Reiner Sauerstoff wurde für die Gruppen 2 und 3 verwendet. Zur Oberflächenmodifizierung der Gruppen 4, 5a und 5b wurde eine Mischung aus Argon- und Sauerstoffgas im Verhältnis 1:1 herangezogen. Der Plasmaprozess wurde über 3 min für die Gruppen 2 und 4 sowie über 35 min für die Gruppen 3, 5a und 5b durchgeführt, wobei die übrigen Prozess-Parameter gleich blieben (Temperatur =70 °C; Druck=0,3 mbar; Frequenz= 100 kHz; Energie=200 W).

Direkt im Anschluss an die Plasma-Vorbehandlung wurden die Proben mit einem Haftvermittler (visio.link, Bredent GmbH & Co KG, Senden, Deutschland) behandelt. Dieser wurde mit einer Eppendorfpipette in der definierten Menge von 10 µL aufgetragen und ggf. mit einem feinen Pinsel verteilt. Der Haftvermittler wurde entsprechend der Empfehlung des Herstellers für 90 s lichtgehärtet (Spektramat, Ivoklar Vivadent GmbH, Deutschland).

Alle Vorbehandlungsgruppen wurden mit den drei Verblendcomposites Vita VM LC (Vita Zahnfabrik, Bad Säckingen, Deutschland), GC Gradia, GC Gradia Direct Flo (beide: GC Europe, Leuven, Belgium. Eine Übersicht über die Verblendmaterialien findet sich in Tabelle 1.

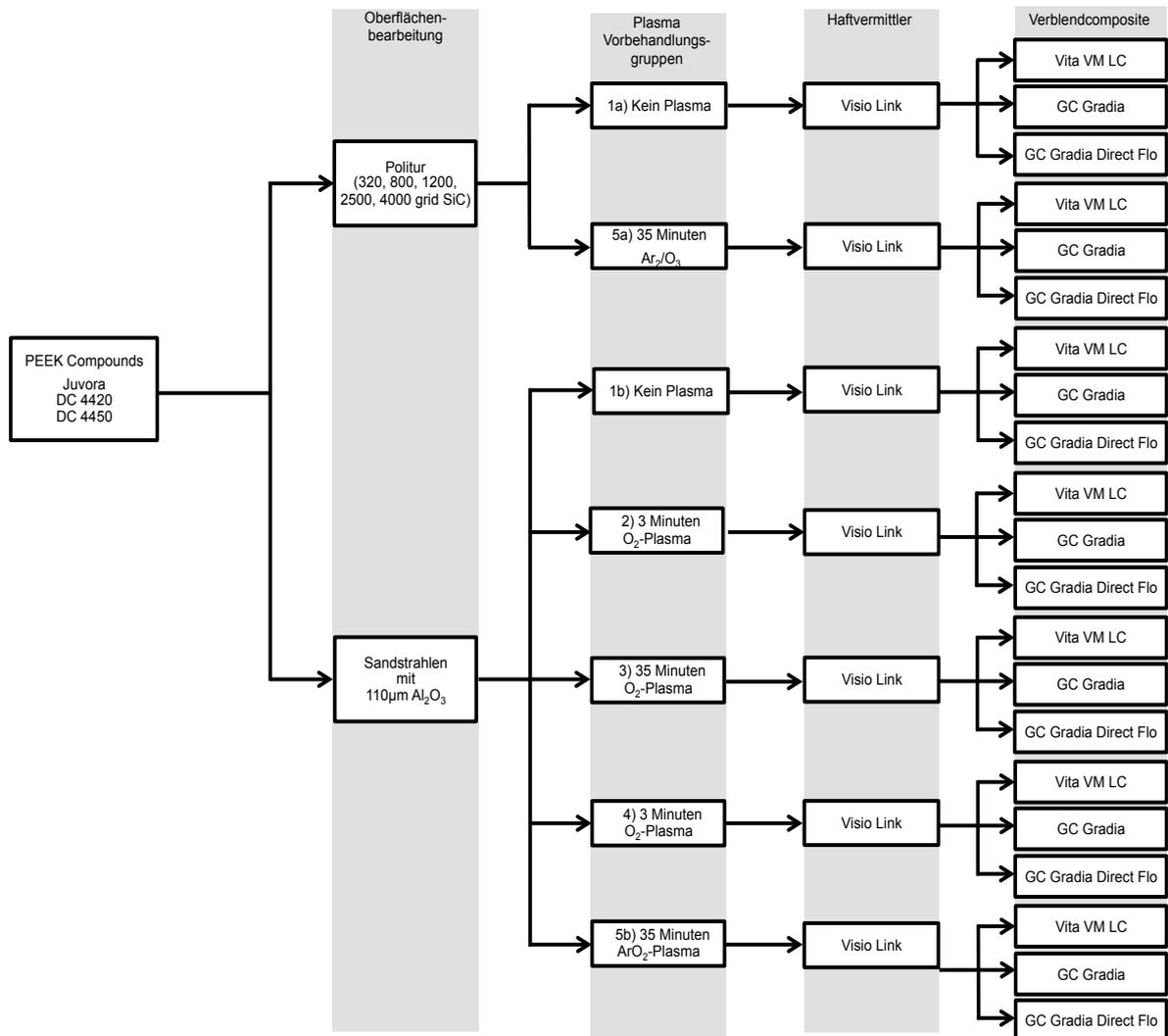


Abb. 1: Übersicht über das Verblendprotokoll

Tab.1: Übersicht über Hersteller und Inhaltsstoffe der Verblendwerkstoffe

| Materialart | Produktname | Hersteller | Inhaltsstoffe |
|----------------|----------------------------|--|---|
| Haftvermittler | visio.link | Bredent GmbH & Co KG Senden Deutschland | Methylmethacrylat Pentaerythritoltriacrylat Dimethacrylat |
| Composite | Vita VM LC | Vita Zahnfabrik Bad Säckingen Deutschland | Triethylenglycoldimethacrylat, 2-Dimethylaminoethyl- methacrylat 41-52 Gew.% Füllstoffe (SiO ₂) |
| Composite | GC Gradia | GC Europe Leuven Belgien | 7,7,9 (oder 7,9,9)-Trimethyl- 4,13-dioxo-3,14-dioxa-5,12- diazahexadekan-1,16- diylbismethacrylat Ethylendioxydiethyl- dimethacrylat 6-Tert-butyl-2,4-xylenol |
| Composite | GC Gradia Direct Flo | GC Europe Leuven Belgien | Urethandimethacrylat, Ethylendioxydiethyl- dimethacrylat 75% Füllstoffe |

Um eine reproduzierbare Formgebung der Verblendung gewährleisten zu können, wurde eine 2 mm dicke Teflon-Schablone mit einer runden Aussparung von 5 mm Durchmesser benutzt. Diese Schablone wurde zentral auf die PEEK-Oberfläche gesetzt. Dann wurde das Composite in die runde Ausnehmung eingebracht und für 40 s lichtgehärtet (Celalux 2, Voco GmbH, Cuxhaven, Deutschland). Anschließend wurden die Proben für 24 h bei 37 °C in destilliertem Wasser gelagert. Es ergab sich eine zylindrisch geformte Verblendung mit 5 mm Durchmesser und 2 mm Höhe.

Die SBS wurde in einer Universalprüfmaschine (Z010, Zwick GmbH, Ulm, Deutschland) bei einer Traversengeschwindigkeit von 1 mm/min bestimmt. Die SBS wurde durch die Division der Bruchlast F [N] durch die Verbundfläche [mm^2] berechnet.

Die Analyse der Fehlertypen wurde mit einem optischen Mikroskop bei 100-400-facher Vergrößerung vorgenommen (Keyence VHX-5000, Keyence GmbH, Neu-Isenburg, Deutschland).

Eine Ein-Weg ANOVA wurde mithilfe der Software Origin-Pro 7.5G SR2 (OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA) durchgeführt, um signifikante Unterschiede in den Ergebnissen feststellen zu können. Das Signifikanzniveau wurde auf $p < 0.05$ gesetzt.

c. Ergebnisse

Die Auswirkung der Vorbehandlung mit dem jeweiligen Niederdruck-Plasma wurde anhand der Gegenüberstellung des reinen PEEK-Materials, Juvora, zu den beiden PEEK-Compounds, DC 4420 und DC 4450, untersucht. An dieser Stelle soll zunächst der Vergleich der Oberflächenbeschaffenheit und deren Änderung als Folge des Vorbehandlungsschemas gezogen werden. Anschließend werden die Scherhafffestigkeitswerte (SBS), die auf den drei Materialien mit den verschiedenen Verblendcomposites in den jeweiligen Vorbehandlungsgruppen gemessen wurden, dargestellt.

Die Beschreibung der Oberflächenbeschaffenheit erfolgte über die Messung des Randwinkels als Parameter für die Benetzbarkeit sowie der Rauheit vor und nach Plasmabehandlung. Die Ergebnisse dazu können der nachgestellten Tabelle 2 entnommen werden.

Der Vergleich der Benetzbarkeit der nicht mit einem Plasma vorbehandelten, polierten Proben der Gruppe 1a mit den nicht plasmiierten, sandgestrahlten Proben der Gruppe 1b zeigte, dass die Benetzbarkeit der sandgestrahlten Proben geringer war, da sie einen im Mittel $23,3^\circ$ ($41,01\%$) höheren Randwinkel als die polierten Proben besaßen.

Es zeigte sich innerhalb der Gruppe 1a, dass die Benetzbarkeit des reinen PEEK (Juvora) besser war, was sich in dem gemessenen Randwinkel von $66,2 \pm 0,14^\circ$ äußerte. Erstaunlicherweise wurde innerhalb der Gruppe 1b, also nach Abstrahlen mit Korund, der höchste Randwinkel auf Juvora ermittelt, mit $108,4 \pm 11,41^\circ$. Der niedrigste Wert von $84,25 \pm 3,77^\circ$ wurde in dieser Gruppe auf dem cremefarbenen DC 4450 gemessen.

Bezüglich der Rauheit wurden auf den sandgestrahlten Proben wie erwartet signifikant höhere Ra-Werte im Vergleich zu den polierten Proben ermittelt. Es wurde festgestellt, dass die Proben aus Juvora dabei eine um 47% höhere Rauheit und damit im Vergleich zu den gefüllten Compounds ($138,03\%$ höher auf DC 4450 bzw. $140,3\%$ höher auf DC 4420) niedrigere Steigerung der Rauheit aufwiesen.

Weiterhin wurde die Auswirkung der Plasmabehandlung auf die polierte bzw. sandgestrahlte Oberfläche untersucht.

Tab. 2: Übersicht über Rauheiten der PEEK-Proben vor und nach den Plasma-Behandlungen und über die Randwinkel nach Plasmabehandlung; PEEK-Sorten: 1= Juvora, 2=DC4420, 3=DC 4450, Sand = abgestrahlt mit Al₂O₃

| PEEK-Sorte | Gruppe 1a Poliert, 35 min Ar/O ₂ [23] | | Gruppe 1b Sand, kein Plasma | | Gruppe 2 Sand, 3 Min. O ₂ -Plasma [33] | | Gruppe 3 Sand, 35 Min. O ₂ -Plasma [33] | | Gruppe 4 Sand, 3 Min. Ar/O ₂ -Plasma [33] | | Gruppe 5 Sand, 35 Min. Ar/O ₂ -Plasma [33] | |
|---------------|---|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------------|--|--------------------------|---|--------------------------|---|--------------------------|--|--------------------------|
| | Ra-Wert prae plasma [µm] | Ra-Wert post plasma [µm] | Ra-Wert prae plasma [µm] | Ra-Wert post plasma [µm] | Ra-Wert prae plasma [µm] | Ra-Wert post plasma [µm] | Ra-Wert prae plasma [µm] | Ra-Wert post plasma [µm] | Ra-Wert prae plasma [µm] | Ra-Wert post plasma [µm] | Ra-Wert prae plasma [µm] | Ra-Wert post plasma [µm] |
| 1 | 0,85 ± 0,19 | 0,927 ± 0,29 | 1,25 ± 0,36 | - | 0,77 ± 0,16 | 0,69 ± 0,22 | 0,75 ± 0,14 | 0,76 ± 0,21 | 0,88 ± 0,23 | 0,79 ± 0,23 | 0,79 ± 0,22 | 0,68 ± 0,21 |
| 2 | 0,67 ± 0,21 | 0,69 ± 0,29 | 1,61 ± 0,56 | - | 1,98 ± 0,96 | 2,0 ± 0,97 | 2,08 ± 0,89 | 2,1 ± 0,78 | 2,18 ± 0,4 | 2,27 ± 0,59 | 3,13 ± 0,15 | 2,86 ± 0,21 |
| 3 | 0,71 ± 0,05 | 0,62 ± 0,25 | 1,69 ± 0,49 | - | 0,9 ± 0,21 | 0,93 ± 0,3 | 1,1 ± 0,24 | 1,01 ± 0,22 | 1,0 ± 0,27 | 1,19 ± 0,37 | 0,95 ± 0,13 | 1,07 ± 0,31 |
| Kontaktwinkel | | 35 Min. Ar/O ₂ -Plasma | Kein Plasma | | 3 Min. O ₂ -Plasma | | 35 Min. O ₂ -Plasma | | 3 Min. Ar/O ₂ -Plasma | | 35 Min. Ar/O ₂ -Plasma | |
| 1 | 66,2 ± 6,14 | 2,4 ± 2,07 | 108,4 ± 11,41 | | 0,0 ± 0,0 | | 0,0 ± 0,0 | | 0,0 ± 0,0 | | 2,8 ± 1,3 | |
| 2 | 72,6 ± 7,27 | 6 ± 2,55 | 100,6 ± 4,56 | | 1,0 ± 0 | | 0,0 ± 0,0 | | 2,0 ± 2,0 | | 2 ± 1,6 | |
| 3 | 69,3 ± 3,77 | 3,5 ± 1,29 | 84,25 ± 3,77 | | 2,0 ± 2,0 | | 0,5 ± 0,5 | | 0,5 ± 0,5 | | 0,0 ± 0,0 | |

Die Randwinkelmessung zeigte eine signifikant höhere Benetzbarkeit der PEEK-Oberflächen nach der Plasma-Behandlung. Dabei bestand kein signifikanter Unterschied zwischen den drei PEEK-Materialien bezüglich der mechanischen Vorbehandlungsgruppen (poliert vs. sandgestrahlt) oder Plasma-Prozessparametern (chemische Zusammensetzung, Dauer).

Für die polierten Proben wurde auf Juvora und DC 4420 ein aufrauhender Effekt durch das Plasma festgestellt. Auf DC 4450 wurde zwischen den Gruppen 1a und 5a eine Abnahme des Ra-Werts festgestellt.

Bei der Gegenüberstellung der lediglich sandgestrahlten zu den sandgestrahlt und zusätzlich plasmiierten Proben ergaben sich die folgenden Ergebnisse für die Rauheitsmessung:

Es konnte grundsätzlich ein signifikanter Unterschied zwischen Juvora und PEEK Compound (DC 4420 und DC 4450) sowohl vor als auch nach Plasma-Behandlung festgestellt werden. Auf den Proben des reinen PEEK wurden Ra-Werte zwischen 0,75-0,88 μm gemessen. Währenddessen ergab die Analyse der Ra-Werte auf den gefüllten PEEK-Compounds die folgenden Wertbereiche: 1,98-3,13 μm für DC 4420 und 0,95-1,1 μm für DC 4450.

Auf Juvora sorgten die Plasmaprogramme 2, 4 und 5b für niedrigere Ra-Werte: nach Behandlung mit O_2 -Plasma für 3 Minuten waren sie um 10% niedriger (Gruppe 2, von $0,77 \pm 0,16 \mu\text{m}$ auf $0,69 \pm 0,22 \mu\text{m}$); nach Behandlung mit Ar/O_2 -Plasma für 3 Minuten um 10,23% (Gruppe 4, von $0,88 \pm 0,23 \mu\text{m}$ auf $0,79 \pm 0,23 \mu\text{m}$) niedriger; nach Behandlung mit Ar/O_2 -Plasma für 35 Minuten um 13,92% niedriger (Gruppe 5b, von $0,79 \pm 0,22 \mu\text{m}$ auf $0,68 \pm 0,21 \mu\text{m}$).

Durch die Behandlung mit 35-minütigem O_2 -Plasma in Gruppe 3 wurde die Oberfläche von Juvora geringfügig rauer.

Die auf dem weißlichen, gefüllten PEEK-Compound DC 4420 gemessenen Ra-Werte zeigten mit Ausnahme der Gruppe 5b höhere Werte nach Plasma-Behandlung. Nach Behandlung mit O_2 -Plasma war der Ra-Wert um 0,2 μm (3 Minuten) bzw. 0,3 μm (35 Minuten) höher als vorher. Durch Behandlung mit Ar/O_2 -Plasma über 3 Minuten konnte eine Steigerung von 0,09 μm gemessen werden. Nach Behandlung mit Ar/O_2 über 35 Minuten wurde eine Glättung von 0,44 μm festgestellt, was einer Verringerung von 8,63% entspricht.

Das cremefarbene, gefüllte PEEK-Compound DC 4450 zeigte in den Gruppen 2, 4 und 5b höhere Ra-Werte nach Plasmabehandlung. Unter Behandlung mit O₂-Plasma war nach 3 Minuten eine Aufrauung von 0,03 µm festzustellen, während nach 35 Minuten eine Glättung von 0,09 µm eintrat. Dies entspricht einem um 8,18% niedrigeren Ra-Wert.

Im Vergleich zu Juvora wurden für die Gruppen 2, 3, 4 und 5b höhere Ra-Werte bei den beiden PEEK Compounds DC 4420 und DC 4450 gemessen.

Dabei ergab sich im Vergleich zu Juvora eine signifikant höhere Rauheit des weißen DC 4420. Die Rauheitsunterschiede zwischen Juvora und DC 4450 waren mit Ausnahme der Behandlung mit O₂-Plasma über 35 Minuten (Gruppe 3) nach Plasma-Behandlung signifikant, wobei DC 4450 jeweils die höhere Rauheit aufwies.

Innerhalb dieser Gruppe 3 (35 min O₂-Plasma) waren die Unterschiede zwischen Juvora und DC 4450 vor Plasma-Behandlung signifikant, wobei auf DC 4450 eine höhere Rauheit festgestellt wurde. Nach Plasma-Behandlung war kein signifikanter Unterschied feststellbar.

Des Weiteren konnte für Juvora und DC 4450 kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Ra-Werten nach den verschiedenen Plasmaprogrammen festgestellt werden. Lediglich für DC 4420 wurde ein signifikanter Unterschied zwischen der Gruppe 5 (Ar/O₂ 35 min) und den Gruppen mit den anderen Plasmaprozess-Parametern festgestellt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Benetzbarkeit nach Plasmabehandlung signifikant erhöht war. Diese war unabhängig von der Vorbehandlung, dem Plasmotyp und der Prozessdauer sowie vom PEEK-Compound.

Innerhalb der Gruppen 1a und 5a wurde auf Juvora der höchste, auf dem PEEK-Compound DC 4450 der niedrigste Ra-Wert gemessen. Es zeigte sich auf den polierten Proben nach Plasmabehandlung eine nicht-signifikant höhere Rauheit. Die gefüllten PEEK-Compounds (DC 4420 und DC 4450) wiesen nach Vorbehandlung mittels Sandstrahlen höhere Ra-Werte auf als das nicht gefüllte PEEK (Juvora).

In der Betrachtung der Scherhaftfestigkeit (SBS) wird zunächst der Vergleich von polierten, nicht plasmierten und polierten, plasmierten Proben gezogen. Die ermittelten Messwerte können der Tabelle 3a entnommen werden.

Diese Tabelle zeigt, dass die SBS Werte sehr schwanken können, wenn auf polierten Oberflächen gearbeitet wird und die Plasmabehandlung dies nicht automatisch ausgleicht bzw. verbessert. Denn hier war das Ziel zu zeigen, dass die Plasmabehandlung signifikant Einfluss auf die SBS nimmt.

Im Vergleich der PEEK-Compounds der Gruppe 1a und 5a wurden auf DC 4420 signifikant höhere SBS-Werte gemessen im Vergleich zu Juvora. DC 4450 zeigte SBS-Werte, die nicht signifikant höher im Vergleich zu Juvora und nicht signifikant niedriger im Vergleich zu DC 4420 waren (s. Abb.2).

Insgesamt führte die Plasmabehandlung zu einer signifikant höheren Scherhafffestigkeit (SBS). Auf Juvora zeigten sich nach Plasmierung in Verbindung mit Vita VM LC sowie GC Gradia Direct Flo niedrigere SBS-Werte (1,31% niedriger in Verbindung mit Vita VM LC nach Plasmierung; 47,19% in Verbindung mit GC Gradia Direct Flo niedriger nach Plasmierung). In Verbindung mit GC Gradia zeigte sich eine Steigerung der SBS um 50,5% auf 10,71 MPa, was eine signifikante Erhöhung der SBS darstellt.

Eine um 3,83 MPa höhere SBS nach Plasmierung ergab auf den plasmiiert-polieren Proben die Kombination des weiß pigmentierten PEEK-Compound DC 4420 mit Vita VM LC. Dies stellte eine signifikant höhere SBS dar [23]. In Verbindung mit GC Gradia konnte ebenfalls eine signifikant höhere SBS gemessen werden. Deren Wert lag bei $13,39 \pm 3,5$ MPa und war um 6,34 MPa höher als vor Plasmierung. Mit GC Gradia Direct Flo wurde auf DC 4420 eine um 1,77 MPa, nicht signifikant höhere SBS gemessen.

Auf DC 4450 wurde mit Vita VM LC eine um 2,01 MPa höhere SBS gemessen. Signifikant höher waren nach Plasmierung sowohl der mit GC Gradia als auch der mit GC Gradia Direct Flo erzielte Wert auf diesem PEEK-Compound.

Im Vergleich der Gruppen 1a und 5a konnten sowohl mit GC Gradia als auch mit GC Gradia Direct Flo signifikant höhere SBS-Werte generiert werden im Vergleich zu Vita VM LC.

Weiterhin wurde der Vergleich der sandgestrahlten Proben der Gruppe 1b zu den entsprechend der Gruppen 2-4 und 5b plasmiierten Proben gezogen (s. Tabelle 3b).

Die Proben der Gruppe 1b zeigten SBS-Werte zwischen 6-30 MPa, wobei die mittlere SBS aller Compounds bei 17,7 MPa lag.

Tab.3a: Scherhafffestigkeiten in [MPa] der Gruppen 1a und 5a PEEK-Sorten: 1= Juvora, 2=DC 4420, 3=DC4450

| PEEK-Sorte | Poliert | | | | | |
|------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|--|------------------------------|------------------------------|
| | Kein Plasma (Gruppe 1a) | | | Ar/O ₂ -Plasma 35 Min (Gruppe 5a) | | |
| | Vita VM LC | GC Gradia | GC Gradia Direct Flo | Vita | GC Gradia | GC Gradia Direct Flo |
| 1 | 3,81 ± 2,71 (n=15) | 7,11 ± 5,13 (n=5) | 10,32 ± 7,61 (n=5) | 3,76 ± 2,42 (n=10) | 10,705 ± 4,88 (n=5) | 5,45 ± 1,64 (n=5) |
| | 3,8 ± 1,9 (n=10) | 7,05 ± 3,95 (n=5) | 17,55 ± 1,67 (n=5) | 7,63 ± 3,79 (n=10) | 13,39 ± 3,5 (n=5) | 19,32 ± 4,76 (n=5) |
| 3 | 3,26 ± 3,82 (n=10) | 3,18 ± 2,36 (n=5) | 11,76 ± 7,6 (n=5) | 5,3 ± 1,61 (n=10) | 12,07 ± 4,87 (n=15) | 17,69 ± 10,55 (n=5) |

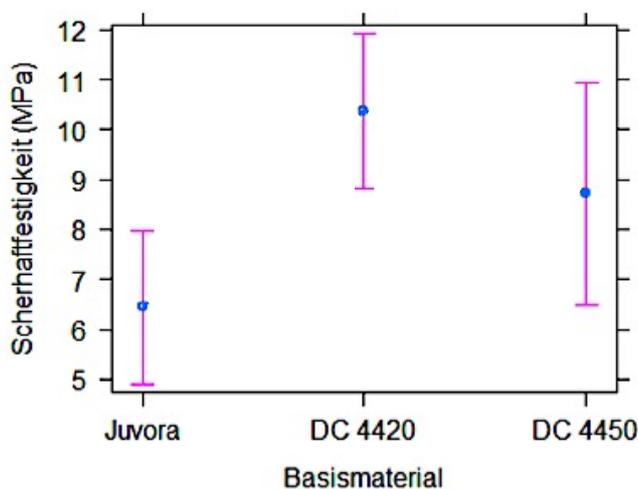


Abb. 2: Scherhafffestigkeit in [MPa] in Abhängigkeit zum verwendeten PEEK Material innerhalb der Gruppen 1a und 5a; Mittelwerte aus allen drei Verblendungsgruppen, polierte Oberfläche

Tab. 3b: Übersicht über die SBS-Werte der Gruppen 1b, 2, 3, 4, 5b

| PEEK-Sorte | Kein Plasma | | | O ₂ -Plasma | | | | | | Ar/O ₂ -Plasma | | | | | |
|------------|---------------------------|--------------------|---------------------|---|---------------------|---------------------|--|--------------------|---------------------|--|--------------------|---------------------|--|--------------------|---------------------|
| | Gruppe 1b Sandgestraht | | | Gruppe 2 Sandgestraht 3 Min. O ₂ | | | Gruppe 3 Sandgestraht 35 Min. O ₂ | | | Gruppe 4 Sandgestraht 3 Min. Ar/O ₂ | | | Gruppe 5b Sandgestraht 35 Min. Ar/O ₂ | | |
| | Vita VM LC [23] | GC Gradia | GC Gradia Flo | Vita VM LC | GC Gradia | GC Gradia Flo | Vita VM LC | GC Gradia | GC Gradia Flo | Vita VM LC | GC Gradia | GC Gradia Flo | Vita VM LC [23] | GC Gradia | GC Gradia Flo |
| 1 | 18,29 | 18.25 | 21.16 | 18.29 | 21.65 | 20.52 | 21.37 | 28.69 | 29.57 | 19.63 | 25.66 | 28.79 | 19,8 | 24.48 | 28.06 |
| | ± 1,84 (n=10) | ± 5.15 (n=5) | ± 4.22 (n=10) | ± 5.14 (n=5) | ± 5.31 (n=10) | ± 7.56 (n=5) | ± 2.39 (n=5) | ± 4.2 (n=5) | ± 3.71 (n=5) | ± 4.17 (n=10) | ± 2.81 (n=5) | ± 3.12 (n=8) | ± 2,46 (n=10) | ± 3.22 (n=5) | ± 4.56 (n=13) |
| 2 | 9,96 | 17.31 | 18.38 | 23.33 | 30.95 | 22.96 | 22.86 | 30.38 | 34.2 | 22.53 | 31.88 | 33.83 | 15,86 | 31.54 | 29.31 |
| | ± 8,46 (n=10) | ± 1.93 (n=5) | ± 12.11 (n=5) | ± 2.56 (n=10) | ± 6.35 (n=5) | ± 6.14 (n=5) | ± 2.08 (n=5) | ± 5.56 (n=5) | ± 1.87 (n=5) | ± 0.85 (n=5) | ± 3.08 (n=5) | ± 1.47 (n=5) | ± 4,39 (n=10) | ± 3.49 (n=5) | ± 2.6 (n=5) |
| 3 | 6,72 | 19.08 | 30.14 | 26.11 | 19.26 | 34.92 | 27.7 | 10.4 | 33.44 | 26.16 | 10.99 | 32.19 | 9,06 | 25.04 | 28.19 |
| | ± 3,66 (n=10) | ± 3.37 (n=5) | ± 3.94 (n=6) | ± 1.83 (n=5) | ± 5.87 (n=5) | ± 6.55 (n=5) | ± 2.15 (n=10) | ± 2.88 (n=5) | ± 7.15 (n=5) | ± 1.17 (n=5) | ± 3.24 (n=5) | ± 4.82 (n=5) | ± 3,1 (n=10) | ± 4.77 (n=5) | ± 4.28 (n=5) |

Die höchsten gemittelten SBS-Werte in dieser Gruppe konnten auf Juvora gemessen werden, wobei diese nicht-signifikant höher zu den gefüllten DC 4450 und DC 4420 waren.

Beim Vergleich der SBS-Werte für Juvora in Verbindung mit Vita VM LC wurde der sandgestrahlten Proben der Gruppen 1b mit den Gruppen 2, 3, 4 und 5 b eine geringfügige SBS-Erhöhung festgestellt. Die höchste SBS-Steigerung wurde für dieses Verblendsystem nach 3 minütigem Ar/O₂ festgestellt.

Für die Verbindung von Juvora mit GC Gradia wurden signifikant höhere Werte nach Behandlung mit dem 35 minütigen O₂-Plasma (28,69 ± 4,2 MPa) und 3 minütigem Ar/O₂-Plasma (25,66 ± 2,81 MPa) gemessen. Dies entspricht einer maximalen SBS-Erhöhung von 57% nach dem 35-minütigen O₂-Plasma.

Ebenso war eine signifikant höhere SBS nach Plasmabehandlung mit 35 minütigem O₂-Plasma (29,57 ± 3,71 MPa), 3 minütigem Ar/O₂-Plasma (28,79 ± 3,12 MPa) sowie 35 minütigem Ar/O₂-Plasma (28,66 ± 4,56 MPa) für die Juvora Proben in Verbindung mit GC Gradia Direct Flo zu detektieren.

Für DC 4420 zeigten sich grundsätzlich höhere SBS-Werte nach Plasmierung. Signifikant höhere Unterschiede wurden in Verbindung mit allen drei Verblendkompositen festgestellt. Verblendet mit Vita VM LC wurden nach allen Plasmaprozessen signifikant höhere SBS-Werte gemessen. Es zeigte sich die stärkste prozentuale Steigerung innerhalb dieser, mit Vita VM LC verblendeten Proben, wobei hierbei der Referenzwert signifikant niedriger war als die Referenzwerte der beiden anderen Verblendkomposite.

Absolut wurde der höchste SBS Wert auf DC 4420 nach 35 minütigem O₂-Plasma in Verbindung mit GC Gradia Direct Flo erzielt. Im Mittel aller Plasmabehandlungen war die Verblendung mit GC Gradia mit dem höchsten SBS-Wert auf DC 4420 assoziiert.

DC 4450 zeigte in Verbindung mit Vita VM LC die insgesamt stärkste Steigerung der SBS nach Plasmabehandlung, wobei der Maximalwert nach Behandlung mit 35 minütigem O₂-Plasma auftrat.

Innerhalb der sandgestrahlten Proben wurden auf den Compounds DC 4420 und DC 4450 höhere SBS-Werte gemessen als auf Juvora.

Die Verblendung mit GC Gradia Direct Flo führte zu den durchschnittlich sowie auch absolut höchsten gemessenen SBS-Werten. Die Fehlertypen können der Tabelle 5 entnommen werden.

Tab. 5: Übersicht über die Fehlertypen

| PEEK Material | Plasma Vorbehandlungsgruppen | | | | | | | | | | | | |
|---|------------------------------|---------------------|--|-------------------------|-------------------------|---|-------------------------|-------------------------|---|-------------------------|-----------------------------|--|------------------------------|
| | 1 (kein Plasma) | | 2 (O ₂ -Plasma für 3 min.) | | | 3 (O ₂ -Plasma für 35 min.) | | | 4 (Ar/O ₂ -Plasma für 3 min.) | | | 5 (Ar/O ₂ -Plasma für 35 min.) | |
| | b (Gradia) | c (Gradia Flo) | a (Vita) | b (Gradia) | c (Gradia Flo) | a (Vita) | b (Gradia) | c (Gradia Flo) | a (Vita) | b (Gradia) | c (Gradia Flo) | b (Gradia) | c (Gradia Flo) |
| Juvora Adhesive Cohesive Mixed | 2 (40%) 0 3 (60%) | 0 0 10 (100%) | 0 0 5 (100%) | 0 0 10 (100%) | 0 0 5 (100%) | 0 0 5 (100%) | 0 0 5 (100%) | 3 (60%) 0 2 (40%) | 0 0 10 (100%) | 0 0 5 (100%) | 5 (62,5%) 0 3 (37,5%) | 1 (20%) 0 4 (80%) | 2 (16,7%) 0 10 (83,3%) |
| DC4420 Adhesive Cohesive Mixed | 0 0 5 (100%) | 0 0 5 (100%) | 0 0 10 (100%) | 0 0 5 (100%) | 3 (60%) 0 2 (40%) | 0 0 5 (100%) | 0 0 5 (100%) | 2 (40%) 0 3 (60%) | 0 0 5 (100%) | 1 (20%) 0 4 (80%) | 0 0 5 (100%) | 0 0 5 (100%) | 2 (40%) 0 3 (60%) |
| DC4450 Adhesive Cohesive Mixed | 0 0 5 (100%) | 0 0 6 (100%) | 0 0 5 (100%) | 1 (20%) 0 4 (80%) | 0 0 5 (100%) | 4 (40%) 0 6 (60%) | 4 (80%) 0 1 (20%) | 2 (40%) 0 3 (60%) | 0 0 5 (100%) | 5 (100%) 0 0 | 1 (20%) 0 4 (80%) | 3 (60%) 0 2 (40%) | 0 0 5 (100%) |

d. Diskussion

Anliegen dieser Arbeit war es, die SBS zwischen PEEK und verschiedenen Verblendcomposites in Abhängigkeit von der Vorbehandlung mit einem Niederdruck-Plasma zu untersuchen.

Wie schon in einer voran gegangenen Publikationen beschrieben wurde [23], konnte auch in den hier untersuchten Serien eine signifikante Erhöhung der SBS nach Behandlung mit einem Niederdruckplasma festgestellt werden.

Um dies zu verdeutlichen, wurden die Ergebnisse aller Prüfreihe zusammengefasst und in Abbildung 3 (s. unten) dargestellt.

In allen Versuchsreihen wurde sowohl der Vergleich zwischen polierter und poliert-plasmierter als auch zwischen aufgerauter, abgestrahlter und dann auch anschließend plasmierter PEEK Oberfläche angestellt.

In diesem Vergleich wird unberücksichtigt gelassen, dass die PEEK Proben ohne Füllstoffe (Juvora) und die mit unterschiedlichen Mengen an TiO₂ gefüllten PEEK Compounds (DC 4420 und DC 4450) Unterschiede in ihrer Zusammensetzung aufweisen. Ebenfalls vernachlässigt wird, dass die Verblendcomposites in ihrer Zusammensetzung nicht identisch sind.

Allerdings kann diese Vereinfachung durch folgende Überlegung erklärt werden: Die chemischen Strukturelemente, welche auf der Struktur des PEEK-Moleküls beruhen, sind identisch. Die Proben wurden in allen Fällen gleich behandelt, so dass beim Abstrahlen mit Korund davon ausgegangen werden kann, dass eine gewisse Menge an Al₂O₃ in die Oberfläche impaktiert wurde [31]. Zur Herstellung des Verbundsystems wurde weiterhin immer mit ein und demselben Haftvermittler (visio.link, Bredent GmbH & Co KG, Senden, Deutschland) gearbeitet.

Die Verblendkomposite selbst unterschieden sich in ihrer Konsistenz und in ihrer Zusammensetzung bezüglich der Monomere, jedoch sind sie allesamt Acrylate. Dies ist hier insbesondere von Bedeutung, da diese in die Bildung von polymeren Netzwerken mit dem Haftvermittler, der auch Acryl-Strukturen enthält, eingehen.

Bezüglich der Rauheit der Proben waren die Ra-Werte sowohl der polierten als auch der polierten-plasmierter Proben signifikant niedriger als die der sandgestrahlten Proben, was der mechanischen Oberflächenmodifikation obliegt [30].

Unter den polierten Proben zeigten die gefüllten Compounds eine bessere Polierbarkeit. Durch die Plasmierung wurde auf dem reinen PEEK Material eine Aufrauung festgestellt. Währenddessen zeigte sich auf dem gefüllten PEEK eine gleichbleibende bis glättende Tendenz durch das Plasma.

Das Sandstrahlen führte auf den gefüllten Proben zu höheren Ra-Werten als auf den Juvora Proben. Nach Plasmierung der Gruppen 2, 3, 4 und 5b wurden zwar auf den PEEK-Compounds höhere Rauheiten gemessen als auf dem reinen PEEK, insgesamt zeigte sich jedoch kein einheitlich aufrauender oder glättender Effekt.

Eine Abnahme der Oberflächenrauheit, welche vor allem durch die Anwendung von Ar/O₂-Plasma über 35 Minuten an Juvora und DC 4420 sowie auch auf DC 4450 durch 35 minütiges O₂-Plasma gemessen wurde, kann auf die Ätzwirkung des Plasmas zurückgeführt werden [33]. Dieselbe Wirkung zeigte sich bereits in einer früheren Untersuchung des Einflusses einer 35-minütigen Ar/O₂-Plasmabehandlung der vorliegenden PEEK-Sorten vor Verblendung mit Vita VM LC [23].

Die Ra-Werte korrelierten größtenteils mit den gemessenen SBS-Werten. Allerdings gibt es einige Ausnahmen dieser Korrelation, sodass keine alleinige Kausalität der Rauheit für die SBS zu finden ist.

Vielmehr scheint der Anstieg der SBS von der chemischen Interaktion nach Plasmabehandlung abzuhängen, welche einen festeren Verbund ermöglicht. Dies kann dadurch belegt werden, dass die Benetzbarkeit in allen getesteten Kombinationen signifikant erhöht war.

In Abbildung 3 ist der Plasmaeffekt, d.h. die Verbesserung der SBS nach Plasmabehandlung grafisch dargestellt. Die Steigerung der SBS betrug für die polierten Proben 40%. Innerhalb der sandgestrahlten Gruppen betrug die Steigerung durchschnittlich 41 %.

Dies illustriert, dass der Plasmaeffekt auf einer polierten Oberfläche wie auf einer vorher mit Korund (Al₂O₃) abgestrahlten gleich ist. Somit spielt die Impaktierung von Strahlgut in die PEEK Oberfläche eine untergeordnete Rolle.

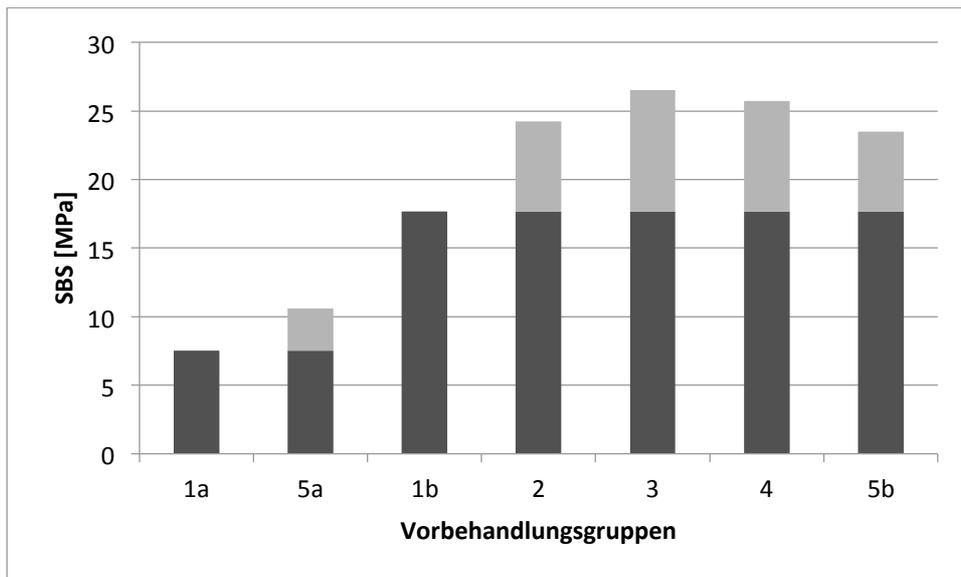


Abb. 3: Zusammenfassung der Mittelwerte der Serien 1a, 5a, 1b, 2, 3, 4 und 5b hinsichtlich der PEEK Materialien sowie der verwendeten Verblendkomposite, grau schraffiert der Plasmaeffekt

Weiterhin ist interessant, dass durch alleiniges Abstrahlen mit Korund eine ausreichende SBS, d.h. eine SBS höher als 5 MPa, erreicht werden kann. Allerdings ist das im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit dieser Verbindung, also für eine langfristige Nutzung, zu hinterfragen [30].

Betrachtet man den Einfluss der verschiedenen Plasmaqualitäten und Belastungszeiten, so wird deutlich, dass für die hier untersuchten Kombinationen weder Zeit noch Plasmazusammensetzung von Bedeutung sind.

Durch die Behandlung mit einem Niederdruckplasma kommt es zu einer Vergrößerung der Oberfläche, in welche funktionelle Gruppen eingebunden werden. Auf der so modifizierten Oberflächenstruktur ist die Benetzbarkeit erhöht, welche wiederum für die Funktion des Haftvermittlers vorteilhaft ist. Eine gesteigerte Oberflächenenergie sowie Wechselwirkungen auf der Oberfläche mit freien Plasmaradikalen können ebenfalls zuträglich wirken [28, 29]. So lässt sich der insgesamt positive Effekt auf die SBS erklären. Grundsätzlich hat sicherlich die Entfernung von organischen Verunreinigungen der PEEK-Oberfläche durch das Plasma ebenfalls einen gewissen positiven Einfluss auf die SBS [32].

Sowohl Benetzbarkeit als auch SBS-Werte unterschieden sich zwischen den Gruppen 2-5 nicht signifikant, sodass trotz verschiedener chemischer Plasmazusammensetzungen und unterschiedlich langer Zeitintervalle vergleichbare Werte der SBS gemessen wurden. Die Oberflächenbehandlung mit einem O₂-Plasma über 35 min zeigte besonders hohe SBS-Werte, die im zeitlichen Verlauf ggfs. einen Trend anzeigen. Es sollte eine weitere Untersuchung angestellt werden, die eine noch längere Plasmaeinwirkungsdauer untersucht, um diesen Trend zu verifizieren.

Ebenso könnte die Verwendung reinen Argon-Plasmas zum Gegenstand von Untersuchungen werden um zu eruieren, ob die Sauerstoffkomponente im Ar/O₂-Plasma für die gleichwertige SBS ursächlich ist oder die Oberflächenbehandlung mit Plasma-Gas unabhängig vom chemischen Element zuträgliche Auswirkungen hat.

Aus den vorliegenden Daten kann jedenfalls geschlossen werden, dass sowohl das reine O₂-Gas als auch das Gasgemisch Ar/O₂ gleich gut geeignet sind, um einen Verbund zwischen PEEK und Verblendcomposite aufzubauen. Dabei scheint die längere Einwirkdauer keinen signifikant besseren Verbund zu gewährleisten. Somit kann mit einer dreiminütigen Plasmabehandlung ein ausreichender Reinigungs- und

Modifizierungseffekt erreicht werden. Einschränkend sei darauf verwiesen, dass dies für den Einsatz eines Haftvermittlers im Verbund gilt.

In Bezug auf die Art des Verblendcomposites scheint GC Gradia Direct Flo die effektivste Haftung auf den PEEK-Oberflächen zu generieren. Die Handhabung dieses dünnfließenden Composites setzt ggf. eine gewisse technische Übung voraus. Alternativ kann auf das höher visköse GC Gradia zurückgegriffen werden, da sich dessen Werte nicht signifikant von den SBS-Werten auf Basis des GC Gradia Direct Flo unterscheiden. Eventuell ist die genaue Zusammensetzung der GC Produkte günstiger für die Interaktion von Verblendcomposite mit Haftvermittler, wobei beim GC Gradia Direct Flo auch die niedrige Viskosität eine günstige Auswirkung zu haben scheint.

Alle drei Verblendcomposites zeigten auf den beiden Compounds DC 4420 und DC 4450 eine höhere SBS als auf Juvora. Nur schwer ist beurteilbar, inwieweit dies an dem Füllstoffgehalt und dessen Interaktion mit den Vorbehandlungen liegen kann.

Aufgrund der geringen Anzahl an Proben pro Versuchsgruppe ist insgesamt lediglich ein Trend abzusehen, zumal sich in Bezug auf die GC Gradia-Reihe mit DC 4450 wegen der stark abweichenden SBS-Werte innerhalb der Gruppen 3 und 4 keine eindeutige Aussage treffen lässt. Fraglich ist, ob dies durch eine Fehlfunktion des Plasmagerätes verursacht worden sein kann. Jedoch wurde eine Fehlfunktion mittlerweile durch Wiederholung ausgeschlossen.

Weiterhin ist bezüglich der schwankenden Werte zu diskutieren, inwieweit die wachsende Erfahrung der Untersucherin Einfluss auf die Ergebnisse hatte. In einem frühen Stadium der Untersuchung wurden vor allem Proben der Serien 1a, 1b, 5a und 5b in Verbindung mit Vita VM LC untersucht. Die anfänglich geringe handwerkliche Erfahrung könnte zu einer Beeinflussung der Ergebnisse geführt haben, welche sich bspw. in der mit Gruppe 5b niedergeschlagen haben könnte, in welcher der Plasmaeffekt um etwa 10% geringer ausgeprägt war.

Insofern sind weitere Untersuchungen mit einer höheren Anzahl Proben sinnvoll, um die These zu untermauern, dass eine 35-minütige O₂-Niederdruckplasmabehandlung auf einem gefüllten PEEK-Compound den besten Haftverbund nach sich zieht. Da überwiegend eine Steigerung der SBS von der 3-minütigen zu der 35-minütigen O₂-Plasmabehandlung erkennbar war, ist in der Zukunft außerdem noch der Einfluss

von Prozesszeiten dieser Plasmasorte, die mehr als 35 min betragen, auf die SBS zu prüfen. Auch sollte geprüft werden, inwiefern die Haftung über einen längeren Zeitraum Bestand hat.

Abschließend kann gesagt werden, dass die Plasmabehandlung ein risikoarmes Verfahren ist, um einen sicheren Verbund zwischen verschiedenen PEEK-Materialien und Verblendkompositen herzustellen, vergleicht man sie mit bisher experimentell untersuchten Säure-Ätz-Verfahren. Die Oberflächenvorbehandlung mit den getesteten Niederdruckplasma-Gasen O_2 und Ar/O_2 vor Verblendung eines PEEK-Materials mit Verblendcomposites hat einen positiven Einfluss auf den Haftverbund des Composites auf PEEK.

Es konnte sowohl nach 3 minütiger als auch nach 35 minütiger Einwirkdauer eine normgerechte Scherhaftfestigkeit über 5 MPa erzielt werden. Am geeignetsten scheint dabei ein Niederdruckplasmaverfahren mit Sauerstoff als Prozessgas für die Dauer von 35 Minuten, obgleich es lediglich nicht signifikant höhere SBS-Werte bedingte.

Alle getesteten Verblendcomposites lieferten höhere SBS-Werte auf gefüllten PEEK-Compounds. In Bezug auf das verwendete Verblendcomposite scheint das Flowable GC Gradia Direct Flo in Bezug auf die SBS am effektivsten zu sein. Alternativ kann GC Gradia mit höherer Viskosität verwendet werden, was ggf. die Handhabung deutlich erleichtert. Für die Verblendung mit Vital VM LC bietet sich DC 4450 an, auf welchem günstige SBS-Werte mit diesem Verblendcomposite generiert werden konnten.

e. Quellen

- [1] Hellerich WH, Günther; Haenle, Siegfried. Werkstoff Führer Kunststoffe 8ed: Carl Hanser Verlag München Wien; 2001.
- [2] Kurtz SM, Devine JN. PEEK biomaterials in trauma, orthopedic, and spinal implants. *Biomaterials*. 2007;28:4845-69.
- [3] Costa-Palau S, Torrents-Nicolas J, Brufau-de Barbera M, Cabratosa-Termes J. Use of polyetheretherketone in the fabrication of a maxillary obturator prosthesis: a clinical report. *J Prosthet Dent*. 2014;112:680-2.
- [4] Hahnel S, Scherl C, Rosentritt M. Interim rehabilitation of occlusal vertical dimension using a double-crown-retained removable dental prosthesis with polyetheretherketone framework. *J Prosthet Dent*.
- [5] Najeeb S, Zafar MS, Khurshid Z, Siddiqui F. Applications of polyetheretherketone (PEEK) in oral implantology and prosthodontics. *J Prosthodont Res*.60:12-9.
- [6] Stawarczyk B, Beuer F, Wimmer T, Jahn D, Sener B, Roos M, Schmidlin PR. Polyetheretherketone-a suitable material for fixed dental prostheses? *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*.101:1209-16.
- [7] Tannous F, Steiner M, Shahin R, Kern M. Retentive forces and fatigue resistance of thermoplastic resin clasps. *Dent Mater*. 2012;28:273-8.
- [8] Schwitalla A, Muller WD. PEEK dental implants: a review of the literature. *J Oral Implantol*. 2013;39:743-9.
- [9] Moon S-M, Ingalhalikar A, Highsmith JM, Vaccaro AR. Biomechanical rigidity of an all-polyetheretherketone anterior thoracolumbar spinal reconstruction construct: an in vitro corpectomy model. *Spine J*. 2009;9:330-5.
- [10] Eichner K. Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. 6 ed: Hüthig GmbH, Heidelberg; 1996.
- [11] Andrikopoulou E, Zoidis P, Artopoulou, II, Doukoudakis A. Modified PEEK Resin Bonded Fixed Dental Prosthesis for a Young Cleft Lip and Palate Patient. *J Esthet Restor Dent*.28:201-7.
- [12] Arnold C, Hey J, Schweyen R, Setz JM. Accuracy of CAD-CAM-fabricated removable partial dentures. *J Prosthet Dent*. 2017.
- [13] Sagomyants KB, Jarman-Smith ML, Devine JN, Aronow MS, Gronowicz GA. The response of human osteoblasts to polyetherether ketone (PEEK) substrates compared to commercially pure titanium. *Biomaterials*. 2008;29:1563–72.
- [14] Stawarczyk B, Bahr N, Beuer F, Wimmer T, Eichberger M, Gernet W, Jahn D, Schmidlin PR. Influence of plasma pretreatment on shear bond strength of self-adhesive resin cements to polyetheretherketone. *Clin Oral Investig*. 2014;18:163-70.
- [15] Kruse A, Krüger G, Baalman A, Hennemann OD. Surface pretreatment of plastics for adhesive bonding. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 1995;9:1611-21.
- [16] Rosentritt M, Preis V, Behr M, Sereno N, Kolbeck C. Shear bond strength between veneering composite and PEEK after different surface modifications. *Clin Oral Investig*. 2015;19:739-44.
- [17] Stawarczyk B SP, Jordan P, Roos M, Eichberger M, Gernet W, Keul C. Peek surface treatment effects on tensile bond strength to veneering resins. *Journal of Prosthetic Dentistry*. 2014;112:1278-88.
- [18] Silthampitag P, Chaijareenont P, Tattakorn K, Banjongprasert C, Takahashi H, Arksornnukit M. Effect of surface pretreatments on resin composite bonding to PEEK. *Dent Mater J*. 2016;35:668-74.
- [19] Stawarczyk B, Keul C, Beuer F, Roos M, Schmidlin PR. Tensile bond strength of veneering resins to PEEK: impact of different adhesives. *Dent Mater J*. 2013;32:441-8.
- [20] Zhou L, Qian Y, Zhu Y, Liu H, Gan K, Guo J. The effect of different surface treatments on the bond strength of PEEK composite materials. *Dent Mater*.30:e209-15.
- [21] Stawarczyk B, Jordan P, Schmidlin PR, Roos M, Eichberger M, Gernet W, Keul C. PEEK surface treatment effects on tensile bond strength to veneering resins. *J Prosthet Dent*.112:1278-88.
- [22] Kern M, Lehmann F. Influence of surface conditioning on bonding to polyetheretherketon (PEEK). *Dent Mater*.28:1280-3.

- [23] Schwitalla AD, Botel F, Zimmermann T, Sutel M, Muller WD. The impact of argon/oxygen low-pressure plasma on shear bond strength between a veneering composite and different PEEK materials. *Dent Mater.* 2017;33:990-4.
- [24] Hartwig S, Doll C, Voss JO, Hertel M, Preissner S, Raguse JD. Treatment of Wound Healing Disorders of Radial Forearm Free Flap Donor Sites Using Cold Atmospheric Plasma: A Proof of Concept. *J Oral Maxillofac Surg.* 2017;75:429-35.
- [25] Preissner S, Kastner I, Schutte E, Hartwig S, Schmidt-Westhausen AM, Paris S, Preissner R, Hertel M. Adjuvant antifungal therapy using tissue tolerable plasma on oral mucosa and removable dentures in oral candidiasis patients: a randomised double-blinded split-mouth pilot study. *Mycoses.* 2016;59:467-75.
- [26] Ozden N, Akaltan F, Suzer S, Akovali G. Time-related wettability characteristic of acrylic resin surfaces treated by glow discharge. *J Prosthet Dent.* 1999;82:680-4.
- [27] Tsougeni K, Vourdas N, Tseripi A, Gogolides E, Cardinaud C. Mechanisms of Oxygen Plasma Nanotexturing of Organic Polymer Surfaces: From Stable Super Hydrophilic to Super Hydrophobic Surfaces. *Langmuir.* 2009;25:11748-59.
- [28] Yavirach P, Chaijareenont P, Boonyawan D, Pattamapun K, Tunma S, Takahashi H, Arksomnukit M. Effects of plasma treatment on the shear bond strength between fiber-reinforced composite posts and resin composite for core build-up. *Dent Mater J.* 2009;28:686-92.
- [29] Zhang S, Awaja F, James N, McKenzie DR, Ruys AJ. Autohesion of plasma treated semi-crystalline PEEK: Comparative study of argon, nitrogen and oxygen treatments. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.* 2011;374:88-95.
- [30] Rosentritt M1, Preis V, Behr M, Sereno N, Kolbeck C. Shear bond strength between veneering composite and PEEK after different surface modifications. *Clin Oral Investig.* 2015 Apr;19(3):739-44. doi: 10.1007/s00784-014-1294-2.
- [31] Hallmann L, Mehl A, Sereno N, Hämmerle CHF. The improvement of adhesive properties of PEEK through different pre-treatments. *Applied Surface Science.* 2012;258:7213-8.
- [32] Liston EM, Martinu L, Wertheimer MR. Plasma surface modification of polymers for improved adhesion: a critical review. *Journal of Adhesion Science and Technology.* 1993;7:1091-127.
- [33] Fricke K, Koban I, Tresp H, Jablonowski L, Schroder K, Kramer A, Weltmann KD, von Woedtke T, Kocher T. Atmospheric pressure plasma: a high-performance tool for the efficient removal of biofilms. *PLoS One.* 2012;7:e42539.

3. Eidesstattliche Versicherung und Ausführliche Anteilserklärung

a. Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Friederike Bötzel, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema

„Optimierung der Verbundfestigkeit zwischen PEEK-Werkstoffen und Verblendkompositen durch Niederdruckplasmaprozesse“

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 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) entsprechen den URM (s.o.) und werden von mir verantwortet.

Mein Anteil an der ausgewählten Publikation entspricht dem, der in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem/der Betreuer/in, angegeben ist. Sämtliche Publikationen, die aus dieser Dissertation hervorgegangen sind und bei denen ich Autor bin, entsprechen den URM (s.o.) und werden von mir verantwortet.

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

Datum

Unterschrift

b. Ausführliche Anteilserklärung an der erfolgten Publikation

Als ich anfang, mich mit dem dargestellten Thema auseinanderzusetzen begann ich zunächst selbstständig mit der Literaturrecherche. Genutztes Medium war PubMed sowie die Bibliothek des Charité Campus 03, dem Institut für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde. Die Planung der zu verwendenden Materialien erfolgte in Absprache mit Prof. Dr. Müller und Dr. Schwitalla. Im Rahmen der vorgelegten Arbeit führte ich den Versuch in allen Teilschritten selbstständig durch und wurde bei technischen Problemen durch Frau Mona Sütel, Frau Christiane Schöpf und Prof. Dr. Müller unterstützt.

Der Versuch beinhaltete das Sägen der PEEK-Proben, daraufhin die Politur mit Schleifpapier verschiedener Körnungen und die Vorbehandlung mittels Sandstrahlverfahren. Daran schloss sich die Reinigung der Oberflächen im Ultraschallbad an. Weiterhin führte ich selbstständig die Plasmabehandlung mit den verschiedenen Programmen sowie die Beurteilung der beschriebenen Parameter Rauheit und Randwinkel und die sich anschließende Verblendung der Proben durch. Zeitpunkt der Inkubation vermerkte ich im Laborbuch genauso wie den Zeitpunkt der Exkubation.

Auch die Prüfung der Scherhafffestigkeit in der Universaltestmaschine führte ich selbstständig durch. Abschließend dokumentierte und archivierte ich die Oberflächen mittels eines digitalen Mikroskops. Die Daten verwaltete ich selbstständig in Excel Dokumenten. Weiterhin arbeitete ich sie tabellarisch auf, was von Dr. Schwitalla modifiziert wurde. Die statistische Auswertung der Daten führte Dr. Schwitalla durch. Die Literaturrecherche zum Paper führte ich selbstständig durch. Das Verfassen der Publikation erfolgte gemeinschaftlich durch mich und Dr. Schwitalla. Herr Tycho Zimmermann übersetzte das Manuskript aus dem Deutschen ins Englische.

Publikation:

Autoren: Friederike Bötzel, Tycho Zimmermann, Mona Sütel, Wolf-Dieter Müller, Andreas Dominik Schwitalla

Titel: Influence of different low-pressure plasma process parameters on shear bond strength between veneering composites and PEEK materials.

Journal: Dental materials, 34 (2018), e246-e254

Erscheinungsdatum: 20.06.2018

Impact Factor: 4.070 (Journal Impact Score); 0,015200 (Eigenfactor Score)

Beitrag im Einzelnen:

Unterschrift, Datum und Stempel des
betreuenden Hochschullehrers

Unterschrift des Doktoranden/der
Doktorandin

4. Auszug aus der Journal Summary List

Journal Data Filtered By: **Selected JCR Year: 2016** Selected Editions: SCIE,SSCI
 Selected Categories: **“DENTISTRY, ORAL SURGERY and MEDICINE”**
 Selected Category Scheme: WoS
Gesamtanzahl: 90 Journale

| Rank | Full Journal Title | Total Cites | Journal Impact Factor | Eigenfactor Score |
|------|--|-------------|-----------------------|-------------------|
| 1 | ORAL ONCOLOGY | 8,242 | 4.794 | 0.014210 |
| 2 | JOURNAL OF DENTAL RESEARCH | 17,285 | 4.755 | 0.022250 |
| 3 | PERIODONTOLOGY | 3,575 | 4.072 | 0.004180 |
| 4 | DENTAL MATERIALS | 11,915 | 4.070 | 0.015200 |
| 5 | International Journal of Oral Science | 827 | 3.930 | 0.002400 |
| 6 | CLINICAL ORAL IMPLANTS RESEARCH | 12,295 | 3.624 | 0.017630 |
| 7 | European Journal of Oral Implantology | 812 | 3.567 | 0.002450 |
| 8 | JOURNAL OF CLINICAL PERIODONTOLOGY | 12,144 | 3.477 | 0.014430 |
| 9 | JOURNAL OF DENTISTRY | 7,248 | 3.456 | 0.012310 |
| 10 | JOURNAL OF PERIODONTOLOGY | 14,843 | 3.030 | 0.013210 |
| 11 | INTERNATIONAL ENDODONTIC JOURNAL | 5,705 | 3.015 | 0.009220 |
| 12 | Clinical Implant Dentistry and Related Research | 3,412 | 2.939 | 0.009430 |
| 13 | Molecular Oral Microbiology | 630 | 2.908 | 0.002020 |
| 14 | OPERATIVE DENTISTRY | 2,930 | 2.893 | 0.003600 |
| 15 | JOURNAL OF ENDODONTICS | 13,456 | 2.807 | 0.015730 |
| 16 | Journal of Oral & Facial Pain and Headache | 221 | 2.760 | 0.000930 |
| 17 | JOURNAL OF PERIODONTAL RESEARCH | 3,907 | 2.662 | 0.005030 |
| 18 | Journal of Prosthodontic Research | 551 | 2.561 | 0.001480 |
| 19 | Journal of Evidence-Based Dental Practice | 408 | 2.477 | 0.001280 |
| 20 | Clinical Oral Investigations | 3,979 | 2.308 | 0.010990 |
| 21 | COMMUNITY DENTISTRY AND ORAL EPIDEMIOLOGY | 4,092 | 2.302 | 0.004620 |
| 22 | INTERNATIONAL JOURNAL OF ORAL & MAXILLOFACIAL IMPLANTS | 8,314 | 2.263 | 0.009590 |
| 23 | JOURNAL OF THE AMERICAN DENTAL ASSOCIATION | 6,024 | 2.150 | 0.005190 |
| 24 | JOURNAL OF ORAL REHABILITATION | 4,824 | 2.098 | 0.005280 |

5. Druckexemplar der Publikation

Autoren: Friederike Bötel, Tycho Zimmermann, Mona Sütel, Wolf-Dieter Müller,
Andreas Dominik Schwitalla

Titel: Influence of different low-pressure plasma process parameters on shear
bond strength between veneering composites and PEEK materials

Journal: Dental materials, 34 (2018), e246-e254

Erscheinungsdatum: 20.06.2018

DOI-Verlinkung: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2018.06.004>

6. Lebenslauf

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

7. Vollständige Publikationsliste

a. Poster

Poster: Shear bond strength between veneering composites and PEEK after plasma pre-treatment
Autoren: Friederike Bötzel, Wolf-Dieter Müller, Andreas Dominik Schwitalla, Tobias Spintig
Kongress: DG Pro in Halle, 2016

b. Paper

Titel: The impact of argon/oxygen low-pressure plasma on shear bond strength between a veneering composite and different PEEK materials.
Autoren: Andreas Dominik Schwitalla, Friederike Bötzel, Tycho Zimmermann, Mona Sütel, Wolf-Dieter Müller;
Journal: Dental Materials 2017; 33: 990-994

c. Paper

Titel: Influence of different low-pressure plasma process parameters on shear bond strength between veneering composites and PEEK materials
Autoren: Friederike Bötzel, Tycho Zimmermann, Mona Sütel, Wolf-Dieter Müller, Andreas Dominik Schwitalla;
Journal: Dental materials, 2018; 33: e246-e254

8. Danksagung

Am Ende der Dissertation stehen Erleichterung und Freude über das Erreichte auf einer Stufe mit dem Dank!

Zunächst möchte ich Prof. Dr. rer. nat. Müller einen großen Dank dafür aussprechen, dass er mir die Chance gab, in der Werkstoffkunde zu promovieren. Er stand immer mit unterstützenden Gedanken zur Seite, wenn es darum ging, in eine dem Selbst noch unbekanntere Richtung zu denken.

Ein besonderer Dank gebührt Dr. Andreas Schwitalla für seine großartige Unterstützung im Prozess des Auswertens und des Schreibens, ohne welche die rasche Transduktion der gesammelten Daten ins Geschriebene nicht möglich gewesen wäre.

Weiterhin gedankt sei Christiane Schöpf, Mona Sütel und Tobias Spintig für die Hilfe bei jedweder Problematik in den Bereichen der Logistik, der Administration oder des Technischen im Labor.

Auch meinen Eltern möchte ich einen riesigen Dank aussprechen: Dafür, dass sie mir stets bei allen großen und kleinen Projekten, Ideen und Abenteuern Unterstützung haben zuteilwerden lassen und dies auch weiterhin tun.