



Peter Gehrke
Dr. med. dent.

Praxis Prof. Dr. Dhom & Kollegen
Bismarckstraße 27
67059 Ludwigshafen
E-Mail: dr-gehrke@prof-dhom.de

Nishanth Jaladi
M.Sc.

Sebastian Spintzyk
M.Sc.

Sektion Medizinische Werkstoffkunde und
Technologie
Universitätsklinikum Tübingen

Carsten Fischer
ZT

Sirius Ceramics, Frankfurt/M.

Lutz Scheideler
Dr. rer. nat.

Jürgen Geis-Gerstorfer
Prof. Dr. rer. nat.

Frank Rupp
Prof. Dr. rer. nat.

Sektion Medizinische Werkstoffkunde und
Technologie
Universitätsklinikum Tübingen

Einfluss unterschiedlicher Reinigungs- verfahren auf die Biokompatibilität von Titan-, Zirkonoxid- und PEEK-Abutmentmaterialien

Indizes

Abutmenthygiene, Reinigungsverfahren, Plasmabehandlung, Ultraschallbehandlung, Zellproliferation, Kontaktwinkel, Benetzbarkeit

Zusammenfassung

Implantataufbauten sind definitionsgemäß Medizinprodukte, deren Reinigungs- und Desinfektionsverfahren eine große klinische Bedeutung zukommt, bilden sie doch den Übergang vom Implantatkörper durch das periimplantäre Weichgewebe in die Mundhöhle. Das bloße „Abdampfen“ (heißer Wasserdampf) von Abutments im Labor ist ein unwirksames Verfahren und verfehlt die normativ geforderte Desinfektionswirkung. Nicht immer ist eine scheinbar saubere Oberfläche auch hygienisch einwandfrei. Diese Tatsache wird in der Implantatprothetik seit einigen Jahren kontrovers diskutiert. Unterschiedliche Aufbereitungsverfahren zur Desinfektion und Reinigung von Abutments wurden vorgeschlagen. Der Beitrag vergleicht die Ergebnisse einer In-vitro-Untersuchung zur Biokompatibilität von Abutmentmaterialien aus Titan, Zirkonoxid und PEEK, welche mit Sauerstoffplasma oder Ultraschall gereinigt wurden. Dabei erfolgte eine Analyse der Oberflächentopographie, der Benetzungseigenschaften, der Oberflächenenergie und der Fibroblastenproliferation. Die in den Zellkulturversuchen beobachteten Effekte bezüglich einer Förderung bzw. Hemmung der Proliferation korrelierten nicht mit den durch die Plasma- bzw. Ultraschallbehandlungen hervorgerufenen Änderungen der Hydrophilie und der Oberflächenenergie. Im Vergleich zur Plasmabehandlung bewirkte die Ultraschallreinigung zwar eine geringere Änderung der Benetzbarkeit, jedoch eine signifikant erhöhte Zellproliferation auf Zirkonoxid und Titan.

Einleitung

Implantataufbauten sind Teil der implantatprothetischen Suprakonstruktion und stehen als solche im direkten Kontakt mit dem periimplantären Gewebe. Oberflächeneigenschaften wie Topographie, Rauheit,

Grad der Hydrophilie, oberflächenenergetische Charakteristik und Kontaminationen durch Kohlenwasserstoffe sowie makromolekulare Konditionierungen beeinflussen die biologische Antwort am Knochen- und Weichgewebe-Interface auf vielfältige Weise²⁶. Diese und weitere Eigenschaften wie etwa die Form der Aufbauten wirken sich direkt auf die Weichgewebesituation um das Implantat aus²⁴. Neben präfabrizierten Standardaufbauten ermöglicht die computergestützte Konstruktion und Fertigung (CAD/CAM) von individuellen Abutments aus Titan, Zirkonoxid oder Polyetheretherketon (PEEK) (Abb. 1) die Realisierung eines auf den Patienten abgestimmten Implantataufbaus¹⁵. Individuelle CAD/CAM-Abutments erlauben den Ausgleich von Achsendivergenzen zwischen Implantat und korrespondierender Krone. Der Verlauf des Kronenrandes kann dem Weichgewebsverlauf angepasst werden, und Forderungen nach einem anatomischen Emergenzprofil sowie der Kontrollierbarkeit des Zementspaltes bei implantatgetragenen Einzelzahnersatz lassen sich individuell erfüllen. Aufgrund der guten Biokompatibilität und der geringen Farbveränderung der periimplantären Mukosa werden im ästhetisch relevanten Frontzahnbereich vermehrt CAD/CAM-Implantataufbauten aus Zirkonoxid verwendet¹⁴.

In den vergangenen Jahrzehnten sind für den enossalen Bereich von Implantaten klare Vorgaben zur Oberflächenbehandlung und Sterilisation aufgestellt worden, aber für implantatprothetische Aufbauten fehlen derart validierte Parameter. Entsprechend den Empfehlungen des *Robert-Koch-Instituts* (RKI-Richtlinien) und des Deutschen Arbeitskreises für Hygiene in der Zahnmedizin (DAHZ) sollte das Team aus Zahnarzt und Zahntechniker vor der klinischen Anwendung eine Risikobewertung vornehmen, ob es die geplanten Implantataufbauten als semikritisch (Kontakt mit Schleimhaut) oder kritisch (Durchdringung von Haut oder Schleimhaut und dabei Kontakt mit Blut bzw. inneren Geweben) einstuft^{8,19,21}. Während metallische Implantataufbauten (z. B. aus Titan oder mit Titanitrid beschichtet) sich bei rein theoretischer Betrachtung im Autoklav sterilisieren ließen (DIN EN ISO 14937)^{9,22,23}, könnte die Sterilisierung von keramischen Abutments bei feuchter Hitze deren



Abb. 1 Beispiele für CAD/CAM-generierte Abutments aus Titan, Zirkonoxid und PEEK (Hybridabutment) mit unterschiedlicher Anschlussgeometrie

Kristallgerüst nachhaltig schädigen (Degradation) und zu einer erhöhten Bruchgefahr führen¹⁶. Daher kommt den Reinigungs- und Desinfektionsverfahren von Abutments, insbesondere aus Keramik, eine große klinische Bedeutung zu. Die Aufbereitung von Implantataufbauten im Labor mit heißem Wasserdampf („Abdampfen“) ist ein unwirksames Verfahren und verfehlt die normativ geforderte Desinfektionswirkung (DIN EN ISO 17664). Zusätzlich zur Reinheit ist auch der Oberflächentopographie im submukosalen Bereich des Implantataufbauteils Beachtung zu schenken. Hierbei sind die Rauheit, die wässrige Benetzung und die Oberflächenenergie wichtige Eigenschaften. Diese Faktoren zeigen gewisse Korrelationen – so kann etwa die Rauheit das Benetzungsverhalten sehr stark beeinflussen²⁵. Es ist davon auszugehen, dass es für die Oberflächenrauheit einen kritischen Schwellenwert gibt, bei dem die Bakterien- und Plaqueanlagerung gering ist und zugleich die Anlagerung von Fibroblasten sowie die Adaption der periimplantären Mukosa bestmöglich unterstützt werden¹.

Zu den neuartigen Reinigungsmethoden zählt die Plasmavorbereitung von Implantataufbauten, für welche vielversprechende Pilotuntersuchungen existieren^{2-4,6,7}. Es gilt jedoch zu beachten, dass es sich dabei um keine validierte Reinigungsmethode für laborseitig hergestellte implantatprothetische Bauteile

■ IMPLANTOLOGIE

Einfluss unterschiedlicher Reinigungsverfahren auf die Biokompatibilität

handelt¹². Im Allgemeinen definiert man die Plasmaaufbereitung als Prozess, bei dem teilweise oder vollständig ionisiertes Gas mit einer ungefähr gleichen Anzahl von positiv und negativ geladenen Teilchen zum Einsatz kommt^{10,11}. Die Werkstoffoberfläche wird während der Plasmaanwendung mit ionisierten Gasen beschossen, wobei gleichzeitig freie Radikale gebildet werden. Eine Plasmavorbereitung mit Sauerstoff- oder Argonplasma erhöht die Oberflächenenergie, reduziert den Wasserkontaktwinkel und kann die Reaktionen von Zellen bei Kontakt mit der Oberfläche beeinflussen. Sie aktiviert Oberflächen auf atomarer sowie molekularer Ebene und verbessert die Oberflächenbenetzbarkeit. Studien haben gezeigt, dass durch die Vorbehandlung mit Argonplasma organische Verschmutzungen auf Metallen entfernt werden können¹³, es dabei aber zu keinen negativen Einflüssen auf die Oberflächenrauheit oder -topographie kommt². Eine klinische Studie ergab, dass Argonplasma die Zelladhäsion fördern und bakterielle Kontaminationen verhindern kann¹³. Außerdem wurden eine Abnahme des krestalen Knochenverlustes um Implantate und eine höhere Durchschnittsverstärkung bei der Weichgewebespanne festgestellt^{6,7}. Entzündungshemmende bzw. heilungssteigernde Wirkungen konnten jedoch nicht bestätigt werden³.

Da Plasmageräte in Laboren und Praxen bisher nicht sehr weit verbreitet sind und es sich um kein validiertes Reinigungsprozedere handelt²⁰, rücken Reinigungsverfahren in den Fokus, bei denen der technische Geräteaufwand und die verlässliche Reinigungswirksamkeit in einem realistischen Verhältnis

stehen. Neuere In-vitro-Studien haben gezeigt, dass Abutments aus Titan und Zirkonoxid, die einem Reinigungs- und Desinfektionsprozess im Ultraschallgerät unterzogen wurden, eine deutliche Verringerung der Oberflächenkontamination aufwiesen^{5,14}. Hierbei wurden die Abutments dreimal im Ultraschallbad für die Dauer von jeweils 10 Minuten bei 60 °C gereinigt (Ethylalkohol, antibakterielle Reinigungslösung, Reinstwasser). Herstellungs- und verarbeitungsbedingte Auf- und Einlagepartikel sowie organische und anorganische Verunreinigungen konnten durch diese Drei-Stufen-Ultraschallbadreinigung reduziert werden¹⁴.

Ziel der vorliegenden Studie war es, ein Plasmareinigungserfahren mit einem Drei-Stufen-Ultraschallprotokoll zu vergleichen und deren Einfluss auf die Biokompatibilität von Titan-, Zirkonoxid- und PEEK-Abutmentmaterialien zu überprüfen. Die Auswirkungen der beiden Reinigungsprotokolle auf die Oberflächentopographie, die Benetzung, die Oberflächenenergie und die Fibroblastenproliferation auf den Testkörpern wurden analysiert.

Material und Methoden

Abutmentmaterialien

In die Untersuchung wurden runde Probenplättchen (Durchmesser 10 mm, Dicke 1 mm) aus Titan-, Zirkonoxid- und PEEK-Material einbezogen (Tab. 1). Bei den Zirkonoxidproben erfolgte eine 7-stündige Sinterung im Sinterofen ZYrcomat (Fa. Vita Zahnfabrik, Bad Säckingen).

Tab. 1 Aufstellung der in dieser Studie untersuchten Materialien

Material	Name	Hersteller	LOT-Nummer	Oberfläche
PEEK	BioHPP	Bredent medical, Senden	5677021901	poliert
Titan (Grade 4)	Ti	Bredent medical, Senden	291113	poliert
Zirkonoxid (3Y-TZP)	Zenostar	Wieland Dental + Technik, Pforzheim	2013011127	poliert



Schleifen/Politur

Alle Proben wurden an der Poliermaschine Metaserv Grinder-Polisher (Fa. Bühler, Esslingen) geschliffen. Bei den Titanproben erfolgte die Bearbeitung mit den Polierpapieren P1200, P2500 und P4000, während bei den gesinterten Zirkonoxid- sowie den PEEK-Proben P2500 und P4000 zur Anwendung gelangten. Eine finale Politur wurde mit der Poliermaschine KaVo EWL (Fa. KaVo Dental, Biberach) erzielt. Für Titan kam die Polierpaste der Firma Polirapid (Singen) und für Zirkonoxid sowie PEEK die Universal Polishing Paste (Fa. Ivoclar Vivadent, Ellwangen) zum Einsatz. Bei allen Proben wurde das Polierrad Nesselschwabbel (Fa. Polirapid) verwendet.

Reinigungsverfahren

Zwei Reinigungsverfahren wurden angewendet und vergleichend untersucht. Zum einen erfolgte eine jeweils 15-minütige Behandlung der Proben mit Sauerstoffplasma unter Einsatz des Plasmasystems Dentaplas PC (Fa. Diener Electronic, Ebhausen) bei 40 °C, 0,3 mbar, 160 W und 3 sccm Sauerstofffluss. Zum anderen wurde eine Ultraschallreinigung mit der Abutment-Reinigungslösung Finevo 01 (Fa. Sirius Ceramics, Frankfurt/M.) nach Herstellervorschrift bei 60 °C im Becherglas durchgeführt (je 10 Minuten in Finevo 01, in Ethylalkohol und schließlich in destilliertem Wasser). Anschließend wurde mit destilliertem Wasser nachgespült. Die Proben wurden dann trockengeblasen und ebenso wie die plasmabehandelten Proben für 30 Minuten an Luft gelagert, bevor die Kontaktwinkelmessungen nach der Reinigung erfolgten.

Topographieanalyse

Die Topographie der Proben wurde am Rasterelektronenmikroskop LEO 1430 (Fa. Zeiss, Oberkochen) untersucht. Hierzu wurden die Proben mit dem Sputter Coater SCD 050 (Fa. Bal-Tec, Balzers, Liechtenstein) mit einer dünnen Au-Pd-Schicht beschichtet.

Rauheitsanalyse

Die Rauheit der Proben wurde jeweils an einem Profilometer S6P (Perthometer, Fa. Mahr, Göttingen) mit einer Tastnadel und einem Spitzenradius von 2 µm untersucht. Hierbei wurde ein Areal von jeweils 3 x 3 mm mit insgesamt 121 Messprofilen abgescannt. Von jedem Materialtyp wurden je fünf Proben vermessen und Rauheitsparameter mit der Software MountainsMap Universal v7.3 (Fa. Digital Surf, Besançon, Frankreich) analysiert.

Benetzungsanalyse

Die Hydrophilie der Proben wurde mittels Kontaktwinkelmessungen an einem Tropfenkonturanalysesystem (DSA-10 Mk2, Fa. Krüss, Hamburg) analysiert. Hierbei wurden Wassertropfen (Reinstwasser) mit einem Volumen von 2 µl mittels eines Tropfendosiersystems automatisiert auf den jeweiligen Oberflächen abgesetzt. Danach erfolgte eine 30-sekündige Aufzeichnung der Tropfenkontur mit Hilfe eines Videosystems. Die Gleichgewichtskontur von jeweils für 30 Sekunden auf der Oberfläche abgesetzten Tropfen wurde zur Ermittlung der Kontaktwinkel verwendet.

Oberflächenenergie

Oberflächenenergien lassen sich ebenfalls aus Kontaktwinkeldaten berechnen. Hierfür müssen Kontaktwinkel mit unterschiedlichen Lösungsmitteln bekannter Oberflächenspannung gemessen werden. Sind auch noch die polaren und unpolaren Anteile der Oberflächenspannungen bekannt, ist es möglich, aus den gemessenen Kontaktwinkeln einer Oberfläche deren aus polaren und unpolaren Anteilen zusammengesetzte Oberflächenenergie zu kalkulieren. Dies erfolgte in der vorliegenden Untersuchung mittels des *Owens-Wendt*-Verfahrens. Dazu wurden zusätzlich zu den Wasserkontaktwinkeln weitere Kontaktwinkel mit Ethylenglykol sowie Diiodmethan gemessen und auf dieser Basis die Energiedaten ermittelt.

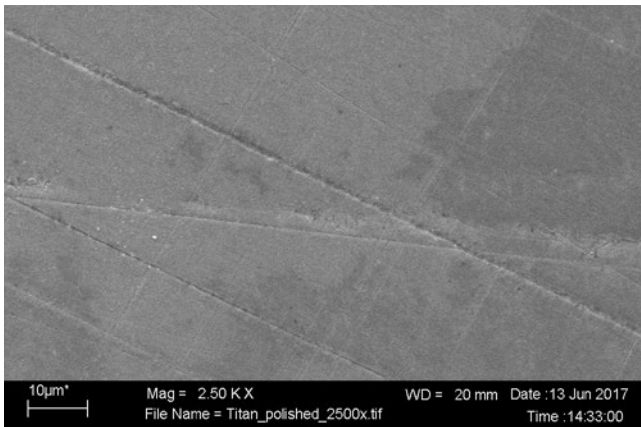


Abb. 2a Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme: Titan (2.500-fache Vergrößerung)

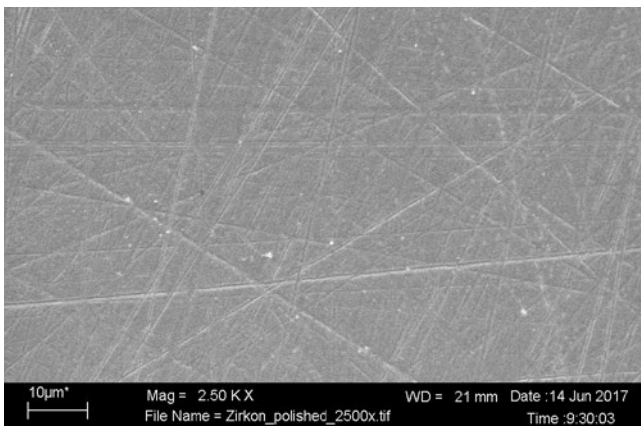


Abb. 2b Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme: Zirkonoxid (2.500-fache Vergrößerung)

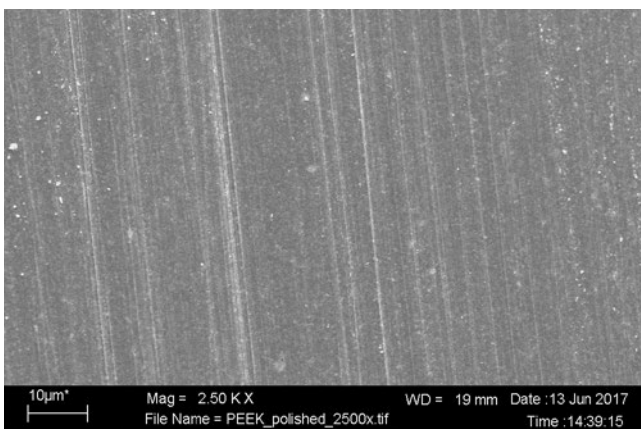


Abb. 2c Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme: PEEK (2.500-fache Vergrößerung)

Fibroblastenproliferation (XTT-Test)

Probenvorbehandlung

Nach dem finalen maschinellen Politurschritt (KaVo EWL) wurden die Proben durch eine 15-minütige Inkubation in Alkohol gereinigt und sterilisiert sowie unter der sterilen Werkbank für 1 Woche der Raumluft ausgesetzt (Hydrophobierung). Unmittelbar vor Beginn der Zellkulturversuche wurden aus jeder Materialgruppe jeweils drei Proben mit Sauerstoffplasma oder Finevo 01 gereinigt (s. o.), während je drei weitere Proben unbehandelt blieben und als Referenz dienten. Nach den Behandlungen wurden die Proben bis zum Beginn der Zellkulturversuche steril aufbewahrt.

Zellkulturtest

Die Proben wurden in 24-Well-Platten eingelegt. Primäre humane Gingivafibroblasten (HGF, Fa. ProVitro, Berlin) wurden in Fibroblasten-Wachstumsmedium mit 1 % Glutamin und 1 % Penicillin/Streptomycin bei 37 °C und 5 % CO₂ vorkultiviert und in einer Dichte von 15.000 Zellen/cm² auf den Proben ausgesät. Nach 24 Stunden wurde die metabolische Aktivität als indirektes Maß der Zellproliferation mittels XTT-Test gemessen (Cell Counting Kit-8, Fa. Dojindo Laboratories, Kumamoto, Japan). Die Inkubation mit dem XTT-Reagenz erfolgte auf einem Rotationsschüttler für 2 Stunden.

Auswertung

Es wurden vier unabhängige Versuche mit jeweils drei Proben pro Versuchsgruppe durchgeführt. Für die zusammenfassende Auswertung aller Versuche wurden die gemessenen Absolutwerte der Extinktion in relative Änderungen, hervorgerufen durch die jeweilige Behandlung, in Bezug auf die entsprechende unbehandelte Referenzgruppe transformiert. Dazu wurden für jeden Versuch zunächst die jeweiligen Mittelwerte der unbehandelten Titan-, Zirkonoxid- und PEEK-Gruppen ermittelt und gleich 100 % gesetzt. Anschließend wurden sämtliche Absolutwerte des jeweiligen Versuchs in prozentuale Abweichungen, bezogen auf den jeweiligen Referenzwert, transformiert. Die zusammenfassende Grafik (vgl. Abb. 6) enthält vereint die

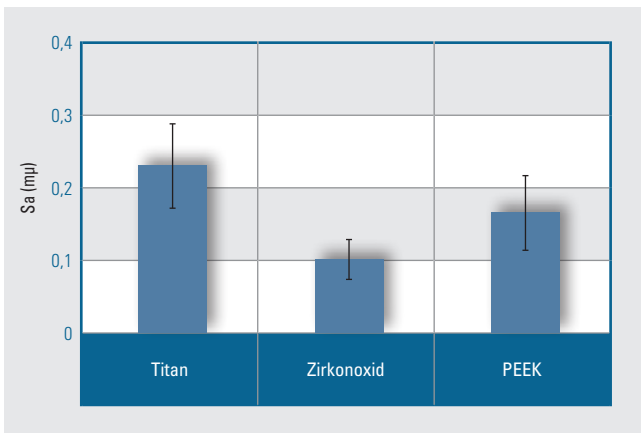


Abb. 3 Profilometrisch gemessene mittlere Rauheit

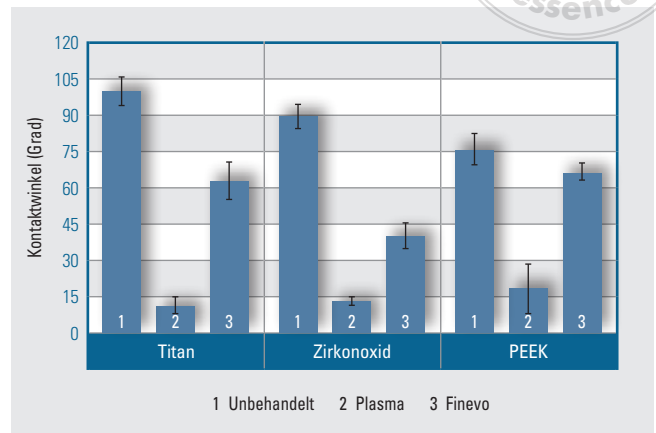


Abb. 4 Wasserkontaktwinkel der unbehandelten und der behandelten Materialien

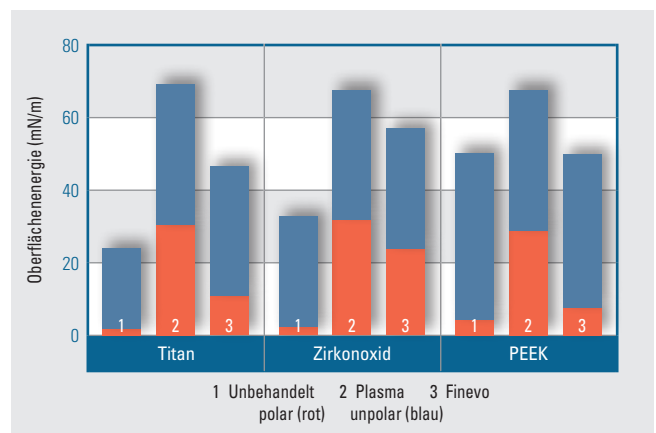


Abb. 5 Gesamte Oberflächenenergie, zusammengesetzt aus polaren und unpolaren Anteilen. Für die Kalkulation wurden Kontaktwinkeldaten von Wasser, Ethylenglykol und Diiodmethan verwendet

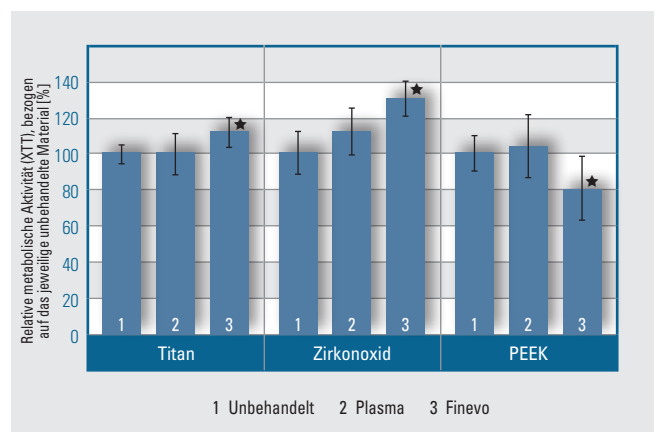


Abb. 6 Einfluss der Plasma- bzw. Finevo-01-Behandlung auf die Zellproliferation von Gingivafibroblasten, gemessen anhand der metabolischen Aktivität (XTT-Test). Die Grafik fasst die Ergebnisse von vier Einzelversuchen als Mittelwerte mit Standardabweichungen zusammen. Statistisch signifikante Unterschiede durch die Behandlung gegenüber dem unbehandelten Ausgangsmaterial sind mit einem Stern gekennzeichnet (*Student's-t-Test*; $p < 0,05$, $n = 12$)

■ IMPLANTOLOGIE

Einfluss unterschiedlicher Reinigungsverfahren auf die Biokompatibilität

Ergebnisse aller vier Einzelversuche (12 Werte pro Versuchsgruppe). Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen wurden mit dem *Student's-t-Test* auf Signifikanz ($p < 0,05$) geprüft.

Ergebnisse

Oberflächenbearbeitung

Die Oberflächen der Titan-, Zirkonoxid- und PEEK-Proben zeigten nach der Politur noch am Rasterelektronenmikroskop nachweisbare Schleifspuren (Abb. 2a bis c). Die Präparation führte zu relativ glatten Oberflächen mit geringen mittleren Rauheiten unter $0,3 \mu\text{m}$ (Abb. 3).

Benetzbarkeit und Oberflächenenergie

Ungereinigt sind alle untersuchten polierten Materialien mit mittleren Wasserkontaktwinkeln über 70 Grad als nur gering hydrophil einzustufen. Titan zeigte unbehandelt Kontaktwinkel über 90 Grad und ist demnach hydrophob. Beide Reinigungsverfahren hatten eine deutliche Hydrophilierung zur Folge. Wie aus Abbildung 4 hervorgeht, führte die Behandlung mit Sauerstoffplasma zu einer sehr starken Absenkung der Kontaktwinkel auf sämtlichen Materialien. Dieser Effekt war nach der Reinigung mit Finevo 01 im Vergleich zur Plasmabehandlung jeweils geringer ausgeprägt, aber auch hier konnten insbesondere bei Zirkonoxid und Titan erhebliche Verbesserungen der Benetzbarkeit beobachtet werden. Die Plasmareinigung erhöhte bei allen Materialien die gesamte Oberflächenenergie. Nach dem Einsatz von Finevo 01 zeigte sich dieser Effekt bei Titan und Zirkonoxid, wohingegen PEEK keine signifikante Veränderung erfuhr (Abb. 5).

Bemerkenswert sind die Ergebnisse zur Untersuchung der polaren/unpolaren Anteile der Oberflächenenergie. Während die unbehandelten Materialien im Wesentlichen unpolar waren, was auf unpolare Kohlenstoffkontaminationen zurückzuführen sein dürfte, stieg die Polarität der Proben nach der Reinigung stark an. Wiederum stärker ausgeprägt war dieser Effekt nach der Plasmabehandlung – hier ergab sich bei allen Materialien gleichermaßen eine Erhöhung der Po-

larität. Die Reinigung mit Finevo 01 zeigte eine ähnlich starke Wirkung bei Zirkonoxid, aber schwächere Einflüsse auf die Polarität der Oberfläche bei Titan und die geringste Wirkung bei PEEK.

Zellproliferation

Die Reinigungsbehandlungen hatten je nach Material unterschiedliche Auswirkungen auf die initiale Proliferation der Gingivafibroblasten (Abb. 6). Die Plasmabehandlung bewirkte auf dem Grundmaterial Zirkonoxid eine geringfügige, statistisch jedoch nicht signifikante Steigerung der Proliferation ($112 \pm 13 \%$), während die Proliferationsraten auf Titan und PEEK kaum beeinflusst wurden. Die Behandlung mit Finevo 01 führte auf Titan und Zirkonoxid zu einer Steigerung der Proliferation auf $112 \pm 8 \%$ bzw. $130 \pm 10 \%$, auf PEEK dagegen zu einer Proliferationshemmung ($80 \pm 17 \%$). Diese Änderungen waren ebenfalls vergleichsweise geringfügig, jedoch statistisch signifikant.

Diskussion

Aktuelle In-vitro-Studien untersuchten die Oberflächentopographie und Reinheit von CAD/CAM-Implantataufbauten unterschiedlicher Hersteller aus Titan und Zirkonoxid^{5,14}. Alle getesteten CAD/CAM-Abutments wiesen bei Anlieferung verfahrenstechnisch bedingte Aufrauungen, Auf- und Einlagepartikel (Debris) sowie organische und anorganische Verunreinigungen auf. Diese Verunreinigungen (verfahrensbedingte Rückstände) können durch Fräsespan, Kühlflüssigkeit oder chemische Waschprotokolle als Rückstände der Oberflächenbearbeitung in der zentralen Fertigung entstehen. Die laborseitige Fertigung unterliegt grundsätzlich denselben Verunreinigungsquellen wie die zentrale Fertigung. Zusätzlich ist die Gefahr von Strahlgut, Klebeüberschüssen, Handfett, Poliermitteln und Gummiererückständen in Betracht zu ziehen^{17,18}.

Das Ziel der vorliegenden In-vitro-Untersuchung war ein Vergleich der Ergebnisse zur Biokompatibilität von sauerstoffplasma- und ultraschallgereinigten Abutmentmaterialien aus Titan, Zirkonoxid und PEEK. Im Rahmen der Limitationen dieser Laborstudie zeigten



beide Reinigungsverfahren eine deutliche Hydrophilisierung der Oberfläche, hatten jedoch je nach Material unterschiedliche Auswirkungen auf die initiale Proliferation der Gingivafibroblasten. Die in den Zellkulturversuchen beobachteten Effekte bezüglich Förderung bzw. Hemmung der Proliferation korrelierten nicht mit den durch die Plasma- bzw. Ultraschallbehandlungen hervorgerufenen Änderungen der Hydrophilie oder der Polaritätsdaten aus den oberflächenenergetischen Analysen. Während die Plasmabehandlung bei allen getesteten Materialien zu einer stark erhöhten Benetzbarkeit der Oberflächen führte, waren die Auswirkungen des Plasmas auf die Zellproliferation statistisch nicht signifikant. Im Gegensatz dazu bewirkte die Ultraschallbehandlung eine geringere Änderung der Benetzbarkeit, jedoch eine signifikant erhöhte Zellproliferation auf Zirkonoxid und Titan sowie eine ebenfalls signifikante Proliferationshemmung auf PEEK.

Weitere Untersuchungen mit einer größeren Anzahl an Testkörpern sind notwendig, um die vorliegenden Ergebnisse zu validieren. Hierbei ist auch entscheidend, den Grad an Verunreinigung nach unterschiedlichen Reinigungsverfahren zu quantifizieren, um entsprechende Korrelationen zwischen Reinheitsgrad, Rauheit einschließlich Nanorauheiten sowie Benetzbarkeit bzw. Oberflächenenergiedaten und biologischer Antwort herauszuarbeiten.

Danksagung

Die Autoren danken den Firmen Bredent medical (Senden) und Wieland Dental + Technik (Pforzheim) für die Unterstützung im Hinblick auf die untersuchten Abutmentmaterialien. Weiterhin sei *Ernst Schweizer* für die Untersuchungen am Rasterelektronenmikroskop gedankt.

Literatur

1. Bollen CM, Papaioanno W, van Eldere J, Schepers E, Quirynen M, van Steenberghe D. The influence of abutment surface roughness on plaque accumulation and peri-implant mucositis. *Clin Oral Implants Res* 1996;7:201-211.
2. Canullo L, Cassinelli C, Götz W, Tarnow D. Plasma of argon accelerates murine fibroblast adhesion in early stages of titanium disk colonization. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2013;28:957-962.
3. Canullo L, Dehner JF, Penarrocha D, Checchi V, Mazzoni A, Breschi L. Soft tissue response to titanium abutments with different surface treatment: preliminary histologic report of a randomized controlled trial. *Biomed Res Int* 2016;2016:2952530.
4. Canullo L, Genova T, Tallarico M, Gautier G, Mussano F, Botticelli D. Plasma of argon affects the earliest biological response of different implant surfaces: an in vitro comparative study. *J Dent Res* 2016;95:566-573.
5. Canullo L, Micarelli C, Lembo-Fazio L, Iannello G, Clementini M. Microscopical and microbiologic characterization of customized titanium abutments after different cleaning procedures. *Clin Oral Implants Res* 2014;25:228-236.
6. Canullo L, Penarrocha D, Clementini M, Iannello G, Micarelli C. Impact of plasma of argon cleaning treatment on implant abutments in patients with a history of periodontal disease and thin biotype: radiographic results at 24-month follow-up of a RCT. *Eur J Oral Implantol* 2013;6:251-260.
7. Canullo L, Tallarico M, Penarrocha-Oltra D, Monje A, Wang HL, Penarrocha-Diago M. Implant abutment cleaning by plasma of argon: 5-year follow-up of a randomized controlled trial. *J Periodontol* 2016;87:434-442.
8. Deutscher Arbeitskreis für Hygiene in der Zahnmedizin (Hrsg). *Hygieneleitfaden*, 10. Ausgabe 2016. Dresden: DAHZ, 2016: 47-48.
9. DIN EN ISO 14937: 2010-03. Sterilisation von Produkten für die Gesundheitsfürsorge – Allgemeine Anforderungen an die Charakterisierung eines sterilisierenden Agens und an die Entwicklung, Validierung und Lenkung der Anwendung eines Sterilisationsverfahrens für Medizinprodukte (ISO 14937: 2009); Deutsche Fassung EN ISO 14937: 2009.
10. Duske K, Jablonowski L, Koban I et al. Cold atmospheric plasma in combination with mechanical treatment improves osteoblast growth on biofilm covered titanium discs. *Biomaterials* 2015;52:327-334.
11. Duske K, Koban I, Kindelm E et al. Atmospheric plasma enhances wettability and cell spreading on dental implant metals. *J Clin Periodontol* 2012;39:400-407.
12. Esposito M. On cleaning and sterilisation of customised abutments and disappearing implant failures. *Eur J Oral Implantol* 2013;6:211.
13. Garcia B, Camacho F, Peñarrocha D, Tallarico M, Perez S, Canullo L. Influence of plasma cleaning procedure on the interaction between soft tissue and abutments: a randomized controlled histologic study. *Clin Oral Implants Res* 2017;28:1269-1277.
14. Gehrke P, Tabellion A, Fischer C. Microscopical and chemical surface characterization of CAD/CAM zirconia abutments after different cleaning procedures. A qualitative analysis. *J Adv Prosthodont* 2015;2:151-159.
15. Hahnel S, Wieser A, Lang R, Rosentritt M. Biofilm formation on the surface of modern implant abutment materials. *Clin Oral Implants Res* 2015;26:1297-1301.
16. Hallmann L, Mehl A, Ulmer P et al. The influence of grain size and air-abrasion on low temperature degradation of dental zirconia. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater* 2012;100:447-456.
17. Happe A, Röling N, Schäfer A, Rothamel D. Effects of different polishing protocols on the surface roughness of Y-TZP surfaces used for custom-made implant abutments: a controlled morphologic SEM and profilometric pilot study. *J Prosthet Dent* 2015;113:440-447.
18. Holyoak GR, Wang S, Liu Y. Toxic effects of ethylene oxide residues on in vitro production of bovine embryos. *Theriogenology* 1995;43:237.
19. Jatzwauk L, Al-Nawas B. Müssen Implantat-Aufbauten sterilisiert werden?

■ IMPLANTOLOGIE

Einfluss unterschiedlicher Reinigungsverfahren auf die Biokompatibilität

- Stellungnahme des Deutschen Arbeitskreises für Hygiene in der Zahnmedizin. Internet: www.dahz.org/faqs. Abruf: 27.10.2018.
20. Kern M. On the scientific evidence that the sterilisation of customised implant abutments is required. *Eur J Oral Implantol* 2015;8:111.
 21. Kommission für Krankenhaushygiene und Infektionsprävention (KRINKO) beim Robert Koch-Institut (RKI) und des Bundesinstitutes für Arzneimittel und Medizinprodukte (BfArM). Anforderungen an die Hygiene bei der Aufbereitung von Medizinprodukten. Bundesgesundheitsbl Gesundheitsforsch Gesundheitsschutz 2012;55:1244-1310. Ergänzung von 2018: Empfehlung der KRINKO beim RKI und des BfArM: Ergänzung zur Empfehlung „Anforderungen an die Hygiene bei der Aufbereitung von Medizinprodukten“. *Epid Bull* 2018;6:6-68.
 22. Lausmaa J, Kasemo B, Hansson S. Accelerated oxide growth on titanium implants during autoclaving caused by fluorine contamination. *Biomaterials* 1985;6:23-27.
 23. Park JH, Olivares-Navarrete R, Baier RE et al. Effect of cleaning and sterilization on titanium implant surface properties and cellular response. *Acta Biomater* 2012;8: 1966-1975.
 24. Pietruski JK, Skurska A, Bernaczyk A et al. Evaluation of concordance between CAD/CAM and clinical positions of abutment shoulder against mucosal margin: an observational study. *BMC Oral Health* 2018;18:73.
 25. Rupp F, Gittens RA, Scheideler L et al. A review on the wettability of dental implant surfaces I: theoretical and experimental aspects. *Acta Biomater* 2014;10: 2894-2906.
 26. Rupp F, Liang L, Geis-Gerstorfer J, Scheideler L, Hüttig F. Surface characteristics of dental implants: A review. *Dent Mater* 2018;34:40-57.