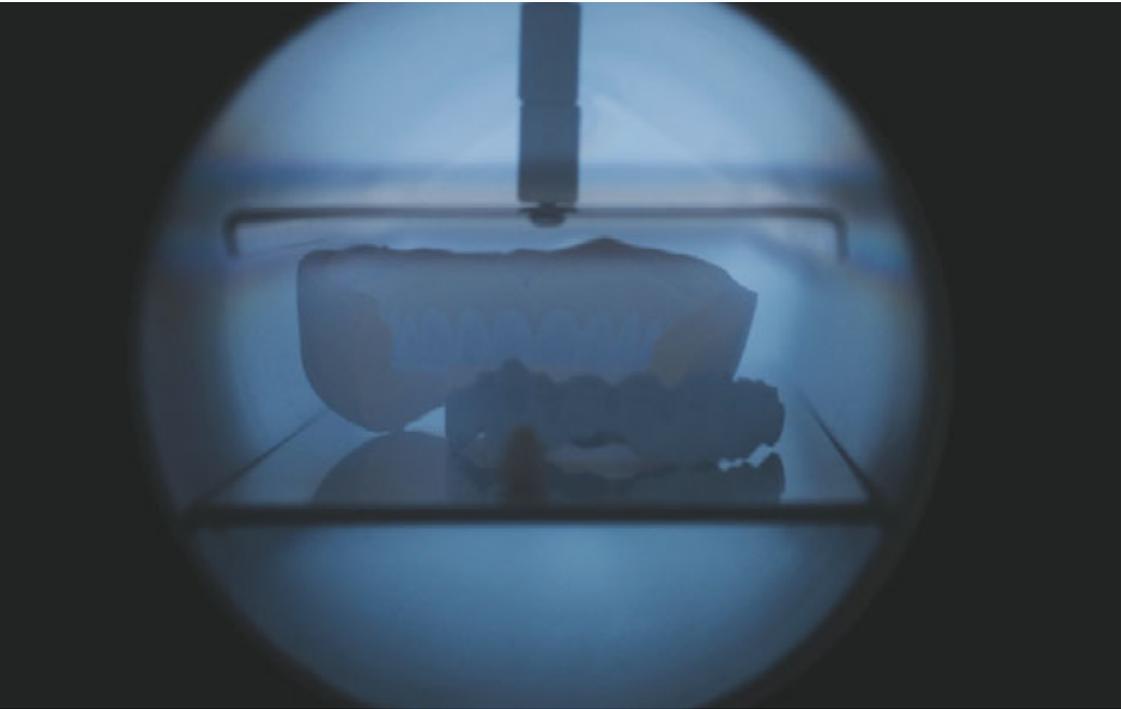


all rights reserved



Zusammenfassung

Neue CAD/CAM-Materialien besitzen z. T. andere Eigenschaften als Oxidkeramiken oder Legierungen, müssen aber mit gewohnten Materialien (Komposit, PMMA etc.) kombiniert werden. Plasma bietet dafür alternative Ver- und Bearbeitungsmethoden. In diesem Beitrag wird anhand der Plasmatechnik gezeigt, wie stark diese für die Zahntechnik neue Technologie das Interesse für noch nicht bekannte Anwendungsbereiche wecken und diese für den Arbeitsalltag interessant erscheinen lassen kann. So stößt man auf noch ungewohnte Technologien, lernt von anderen Berufen und stellt beim Blick über den Tellerrand fest, was für den eigenen Beruf interessant sein könnte, um gute Dinge eventuell besser zu machen.

Plasmatechnologie – das Multitalent für neue zahntechnische Anwendungen?

Martin Wepler

„Aber man verlangt vom Forscher, dass er Beweise liefert. Wenn es sich zum Beispiel um die Entdeckung eines großen Berges handelt, verlangt man, dass er große Steine mitbringt.“ (Saint-Exupéry)

Die Plasmatechnologie könnte eine neue, alternative und interessante Anwendung im Bereich der Prothetik werden. Aber was sollte Zahntechniker bewegen, diese Technologie in ihren Arbeitsalltag zu integrieren? Es gibt zwei Gründe, gewohnte Pfade zu verlassen – die Neugierde und die Notwendigkeit, die wiederum an die Wirksamkeit gekoppelt ist.

Es gibt beim Plasma keine großen Steine (siehe Eingangszitat), die man mitbringen könnte. Seine Wirkung kommt im industriellen Anwendungsbereich leise und in atomaren Größeneinheiten daher. Es braucht also evidente Beweise, um im zahntechnischen Berufsfeld eine Notwendigkeit für Plasmaanwendungen postulieren zu können (Abb. 1).

Alle in diesem Beitrag beschriebenen, bereits durchgeführten oder angedachten Anwendungen von Plasma in der Zahntechnik sind großteils noch nicht evidenzbasiert, gerade vor dem Hintergrund des sehr speziellen Biotops Mundhöhle mit permanentem Feuchtig-

Indizes

Plasmatechnologie, Mundgesundheit, Verfahrenstechnik, PEEK, Hochleistungskunststoffe

Einleitung

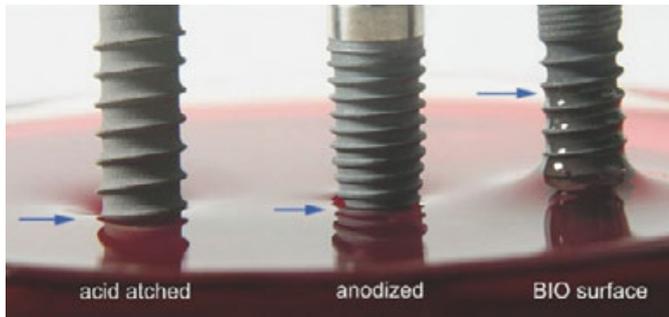


Abb. 1 Eine der Auswirkungen des Plasmas. Das rechte Implantat zeigt eine hervorragende Benetzung aufgrund einer hydrophil wirkenden Oberflächenaktivierung (Quelle: Fa. Lasak/Prag).



Abb. 2 Bei einer solchen Arbeit zeigt sich basal eine der kritischen Zonen einer prothetischen Arbeit – der Übergang vom Steg-Reiter aus PEEK (Juvora) zum Kaltpolymerisat. Im feuchten Milieu und unter frequenter Belastung ist hier die Gefahr einer Spaltbildung gegeben. Stichwort: Dauerhafter Haftverbund (Quelle: DL Bellmann&Hannker).

keitseinfluss, Schwankungen im pH-Wert, dem Vorhandensein anaerober Zonen innerhalb prothetischer Konstruktionen und vor allem der „Unberechenbarkeit“ der Einflüsse durch den Patienten.

Es liegt dem Autor fern, automatisch von bewährten, erfolgreichen Anwendungen in der Industrie (z. B. bei Oberflächenbeschichtungen im Automobil-Bereich) auf eine generelle, identisch erfolgreiche Langzeitanwendung in der Prothetik zu schließen. In-vitro-Untersuchungen müssen als erstes probates Mittel dienen, um hier eine Standortbestimmung möglich zu machen (Abb. 2).

Plasma in der Zahntechnik?

Der Autor begann, sich mit Plasma zu beschäftigen, weil er nach alternativen bzw. ergänzenden Techniken zur Vorbehandlung der Oberflächen zahntechnischer Objekte gesucht hat, die in jedweder Art mit weiteren Materialien beschichtet oder mit identischen oder andersartigen Materialien (auch Zähnen) verklebt werden müssen.

Zu Beginn lag der Fokus des Interesses nicht so sehr auf der Möglichkeit der Reinigung und Sterilisation mithilfe von Plasma. Dies sollte sich im weiteren Verlauf jedoch deutlich ändern. Je mehr sich der Autor mit dem Thema Plasmaanwendung in der Zahntechnik auseinandersetzte, desto deutlicher zeigten sich potentiell interessante und nutzbringende Anwendungen im Bereich der hochfeinen Reinigung und Sterilisation im zahntechnischen Berufsfeld.

Was ist Plasma?

Plasma ist ein Aggregatzustand von Materie. Durch Einbringen von Energie in Materie wird aus fest flüssig, aus flüssig wird gasförmig und aus Gasen entsteht dann Plasma. Die Erzeugung der drei ersten Aggregatzustände lassen sich selbst einem Kind im Vorschulalter einfach demonstrieren. Aus einem Eiswürfel wird bereits bei Temperaturen um 0° C Wasser, aus welchem durch Erhitzen Wasserdampf (Gas) entsteht. Ab hier wird es dann, mit einfachen Hausmitteln, schwieriger.

PLASMA

all rights reserved

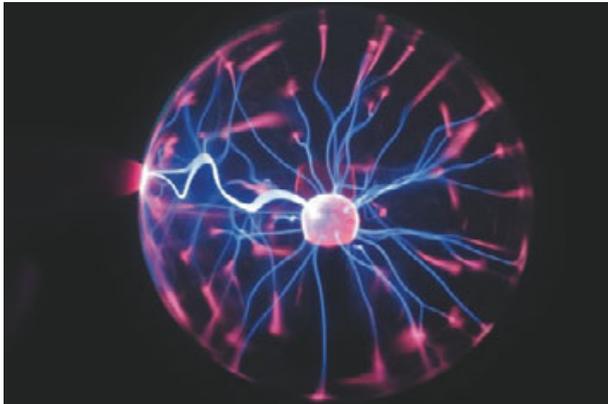


Abb. 3 Die Strahlen in der Plasmakugel richten sich nach dem Finger aus oder reagieren auf Stoßwellen durch Händeklatschen oder Musik.

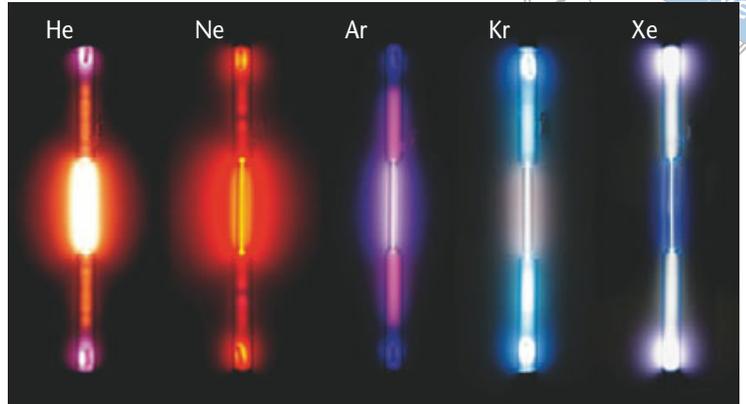


Abb. 4 Plasmen im Alltag – Edelgase in Entladungsröhren. Die unterschiedlichen Farben lassen auf das Gas schließen. Argon wird in der Zahntechnik verwendet (UV-Strahlung, Quelle: www.pse-mendelejew.de).

Plasmen können sehr unterschiedlich beschaffen sein: Je nach Temperatur und Druck existieren sie in verschiedenen Erscheinungsformen. So existiert zum Beispiel Wasserstoff als relativ dünnes Plasma in der Fotosphäre der Sonne, als metallische Flüssigkeit im Zentrum großer Planeten oder als heißes Fusionsplasma mit hoher Dichte im Inneren von Sternen. Auch im Inneren unserer Sonne herrscht ein solches Fusionsplasma, in dem Wasserstoff zu Helium verschmolzen wird. Neben diesen natürlich vorkommenden Plasmen gibt es zahlreiche Möglichkeiten, Plasma im Labor herzustellen. Zum einen erzeugen es Wissenschaftler durch starke elektrische Stromentladungen in einem Gas oder durch die Verwendung von starken Laserstrahlen.

Der Nobelpreisträger für Chemie, Irving Langmuir (1932), war einer der ersten Wissenschaftler, der mit Plasmen arbeitete. Ende der 1920er Jahren gab er diesen ionisierten Gasen ihren Namen. Den Plasmazustand erreicht Materie, wenn so viel Energie in Form von Druck und Temperatur und/oder elektrischer Entladung zugeführt wird, dass der Elektronenhülle der Atome einzelne oder alle Elektronen entrissen werden. In der Folge entsteht ein Gebilde aus freien, negativ geladenen Elektronen und positiven Ionen. Materie in diesem Zustand verfügt über völlig neue physikalische Eigenschaften: So sind Plasmen zum Beispiel in der Regel elektrisch sehr leitfähig und durch Magnetfelder stark beeinflussbar (Abb. 3).

Ein Plasma wird durch die vorhandenen Spezies (Elektronen, positive und negative Ionen, neutrale Atome, neutrale und geladene Moleküle), deren Dichten und Temperaturen (die nicht gleich sein müssen) und räumliche Struktur, insbesondere Ladung und Ströme bzw. elektrische und magnetische Felder, charakterisiert. Kennzeichnend für Plasmen ist ihr typisches Leuchten, das durch Strahlungsemission angeregter Gasatome, Ionen oder Moleküle verursacht wird. Ausnahmen sind Plasmen, die sehr kalt sind (wie oft im Weltraum) oder die so heiß sind, dass die Atome vollständig ionisiert sind (wie im Zentrum von Sternen). Eine wichtige Eigenschaft ionisierter Teilchen im Plasma ist deren hohe kinetische Energie.

Die meisten von uns haben in ihrem Leben bereits mehrfach ein Plasma gezündet – durch das Anschalten einer Neonleuchte oder mittels eines Xenonscheinwerfers im PKW (Abb. 4).

Plasma im Alltag



Und speziell bei der Neonröhre offenbart sich uns eine Eigenschaft des dort erzeugten Plasmas, welches für alle temperaturempfindlichen, zahntechnischen Werkstoffe unabdingbar ist – die geringe Temperaturentwicklung.

Plasma – in der Industrie, Medizin und Biologie bereits usus

In den letzten Jahren ist die Plasmatechnologie zu einer Schlüsseltechnologie für medizinische und biologische Applikationen geworden. Bisher nutzten vor allem die Industrie und die Medizintechnik das energiegeladene, hochreaktive Gas. Ein junger Forschungszweig arbeitet an der medizinischen Nutzung. Plasmamediziner setzen dafür auf kalte, bei Atmosphärendruck erzeugte Plasmen. Sie wirken gegen Keime und Hauterkrankungen und lassen Wunden schneller heilen. Forscher haben zudem deutliche Indizien gefunden, dass Plasma auch gegen Krebszellen wirksam ist. Der direkte therapeutische Einsatz von Plasmen unmittelbar am oder im menschlichen Körper ist ein völlig neues Gebiet, das unter der Bezeichnung Plasmamedizin zurzeit weltweit an Interesse gewinnt.

Die Nutzung von Plasmen zur Modifikation und Funktionalisierung von Oberflächen etwa von Unterlagen für die Zellkultivierung oder von medizinischen Implantaten sind zum Teil seit Jahren etablierte Anwendungsfelder. Die geringen thermischen Belastungen von Substraten machen Plasmen auch für die mikrobiologische Dekontamination/Sterilisation oder im Rahmen der Aufbereitung von Medizinprodukten interessant. Als interessantes Beispiel für die Anwendung von Plasma im chirurgischen Bereich sei die Argon-Plasma Coagulation (APC) genannt, die bereits seit den 1970er Jahren bekannt ist. Das Argonplasma-Koagulationsgerät wird im medizinischen Umgangdeutsch häufig einfach „Argonbeamer“ genannt. Seine zwei entscheidenden Funktionen sind Blutstillung und Gewebedevitalisierung. Damit kommt der Argonbeamer in der Urologie vor allem bei der nierenerhaltenden Chirurgie von Nierentumoren und bei der Operation von großen Tumoren des hinteren Bauchraums, aber auch bei Verödungen, zum Einsatz.



Abb. 5 Niederdruck-Plasmagerät MiniFlecto (Fa. plasma-technology, Herrenberg).

Mithilfe von kleinen Niederdruck-Plasmaanlagen steht und stand die Plasmatechnologie im Grunde genommen, nicht erst seit heute, auch der Zahntechnik und Zahnmedizin zur Verfügung (Abb. 5).

Was kann Plasma?

Plasma kann reinigen bzw. sterilisieren, aktivieren, ätzen und beschichten. Die genannten Effekte sind chronologisch der Verweildauer einer Probe z. B. in einem Niederdruck-Plasmagerät zu sehen. Angewandt werden kann das Verfahren in unterschiedlichster Wirkungsweise mit Metallen, Keramiken und Kunststoffen.

Ein Vorteil von Plasma ist, dass es ein ionisiertes Gas ist und folglich überall hinkommt, also auch in für Flüssigkeiten nicht zugängliche Hohlräume, zwischen Gitterstrukturen oder in extreme Unterschnitte.

**Reinigung und Sterilisation
Oberflächenreinigung –
Ultrafeinreinigung mit Plasma**

In der Industrie ist es wichtig, wie in der Zahntechnik auch, Oberflächen absolut fett- und ölfrei zu halten, z. B. für anschließende Beschichtungen (Lackierung) oder Verklebungen (Abb. 6). Oberflächenreinheit und Fettfreiheit sind in der modernen Zahntechnik grundlegende Voraussetzung. Auch im Labor wird seit Jahren geklebt, geätzt, verblendet oder beschichtet. Überall wo, adhäsiv oder kohäsiv, unterschiedliche Materialpartner verbunden werden müssen, braucht es eine perfekte Vorbereitung der Oberflächen. Insbesondere

PLASMA

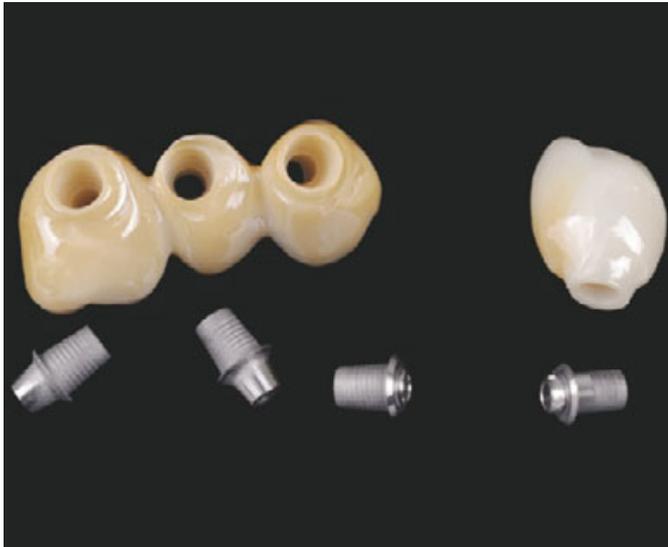


Abb. 6 Emergenzaufbauten – vor dem Verkleben im Niederdruck-Plasmagerät gereinigt, aktiviert und geätzt (Quelle: Dentallabor Wichnalek).

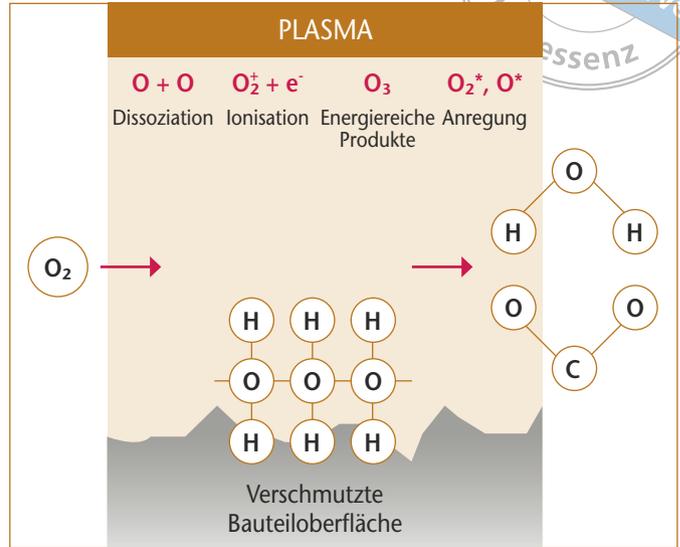


Abb. 7 Prinzip der Feinreinigung durch Plasma. Schmutzpartikel werden durch chemische Reaktion mit den ionisierten Gasen aufgespalten und abgesaugt.

dann, wenn extrem unpolare Partner, wie z. B. Kunststoffe, dauerhaft mit einem zweiten Werkstoff formschlüssig und spaltfrei kombiniert werden sollen.

Chemisches Reinigen hinterlässt Spuren. Mit der Plasmatechnologie lassen sich Oberflächen erzielen, die frei sind von organischen Verunreinigungen. Oberflächenbehandlungen von nur wenigen Minuten erzielen bereits sehr gute Ergebnisse.

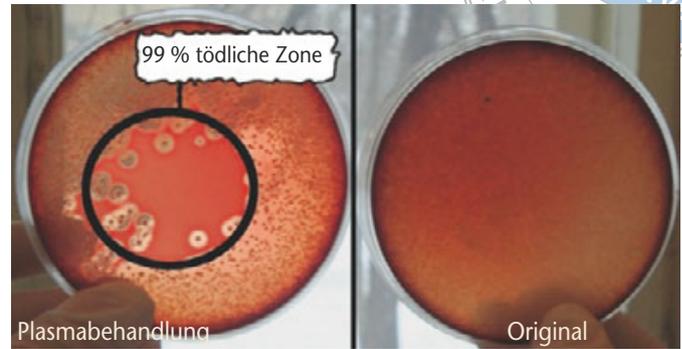
Entscheidend für den Reinigungseffekt im Plasma ist die Bildung gasförmiger und somit flüchtiger Produkte, die problemlos mithilfe des Feinvakuums aus dem Rezipienten (Vakuumkammer) entfernt werden. Die Bestandteile des Plasmas reagieren mit den organischen Verunreinigungen und werden bereits bei Raumtemperatur zu Wasser und Kohlendioxid abgebaut (Abb. 7).

Die Steigerung von Reinigung stellt, nach der Desinfektion, die Sterilisation dar. Sterilisation ist die „Abtötung sämtlicher Mikroorganismen einschließlich ihrer Dauerformen (Endosporen) durch physikalische (bes. Hitze oder ionisierende Strahlen) oder chem. Verfahren (Begasung) im Unterschied zur Desinfektion“ (Brockhaus). Die wie folgt definiert wird: „Unschädlichmachung von Krankheitserregern. Diese werden so geschädigt, dass sie nicht mehr infizieren können“ (Brockhaus). Die ebenfalls an Stelle von „steril“ verwendete Bezeichnung „keimfrei“ ist also nicht richtig, weil es sich bei der Sterilisation nicht nur um die Entfernung oder Abtötung von Krankheitserregern handelt, sondern um die Entfernung oder Abtötung aller Mikroorganismen in jedem Entwicklungsstadium.

Sterilisation

Bisherige Reinigungs- und Sterilisationsmethoden können zwar, richtig angewandt, sämtliche Keime abtöten. Auf den so behandelten Oberflächen bleiben jedoch häufig die Zellhäute der Mikroorganismen (sogenannte Endotoxine) zurück. Diese Endotoxine sind als Verursacher von Entzündungsreaktionen insbesondere in gering durchblutetem Knochengewebe bekannt.

Abb. 8 Abtötungsrate von Bazillen durch Niedertemperatur-Plasmabehandlung. Die abgebildete Petrischale mit Blut-Agar Nährboden wurde mit *Staphylococcus aureus* Bakterienstämme besiedelt. Links abgebildet die Abtötungsrate im Anwendungsgebiet (Quelle: Gizamg).



Da zunehmend temperatursensitive Werkstoffe für die Herstellung von Medizinprodukten verwendet werden, ist es oft nicht möglich, temperaturintensive Sterilisationsverfahren für alle Materialien und Anwendungsbereiche einzusetzen. Eine weitere Herausforderung stellen die komplexen Formen des Sterilisationsguts dar, also Einbuchtungen, enge Öffnungen, Hinterschnitte etc.

Hier sind Sterilisationstechniken von Vorteil, welche an jeder Stelle gleich gut wirken. Ein sanfter und schneller Weg, medizinische Werkstoffe zu sterilisieren, ist die Plasmasterilisation mit niedrigem Druck (low-pressure inductively coupled plasma ICP). Verwendet werden hierbei Gasmischungen aus dem Hintergrundgas Argon (Ar) und Stickstoff (N_2), Sauerstoff (O_2) oder Wasserstoff (H_2). In einen Plasmareaktor wird ein Gasgemisch eingeleitet und durch Energiezufuhr elektrisch angeregt. Dabei entstehen Elektronen, Ionen, Atome, Radikale und UV-emittierende Photonen, die mit den biologischen Spezies oder Molekülen auf dem Sterilisationsgut interagieren und sie inaktivieren. Die Vorteile der Methode sind vor allem, dass eine Sterilisation bei niedrigen Temperaturen, also unter 70° oder sogar unter 60° C, möglich ist und gleichzeitig keine oder nur speziell gewünschte Veränderungen des zu sterilisierenden Materials auftreten.

Die sterilisierende Wirkung von Plasmen ist wissenschaftlich in einer Vielzahl von Untersuchungen prinzipiell nachgewiesen.¹⁻¹⁸ Die sterilisierende Wirkung ist dabei einerseits auf die im Plasma generierte UV-Strahlung andererseits auf die Bildung chemisch aggressiver Stoffe (freie Radikale) sowie den Beschuss der Mikroorganismen mit Ionen zurückzuführen. Trotz der prinzipiellen Eignung sind in der Realität plasmabasierte Sterilisationsverfahren noch wenig verbreitet (Abb. 8).

Entsprechende kommerzielle Systeme, die zur Sterilisation von medizinischen Gerätschaften eingesetzt werden und Plasmageneratoren enthalten, verwenden als Reagenzien z. B. dampfförmiges Wasserstoffperoxid, sodass die Sterilisationswirkung in nennenswertem Umfang auf an sich mikrobizide Gase zurückgeführt werden kann. In der Lebensmittelindustrie werden aktuell vermehrt Plasmageräte entwickelt, die in der Lage sind, bei Atmosphärendruck zu sterilisieren, z. B. Verpackungen aus Kunststoff.

Bei der Wasserstoffperoxid-Gas-Plasma-Sterilisation handelt es sich im engen Sinne nicht um eine Plasmasterilisation: Das Plasma wird nur zur Dissoziation des Wasserstoffperoxids verwendet. Die eigentliche Sterilisation basiert auf der oxidierenden Wirkung des Sauerstoffs, was jedoch auch zu Materialveränderungen führt. Ein weiteres Problem ist die Tatsa-

PLASMA

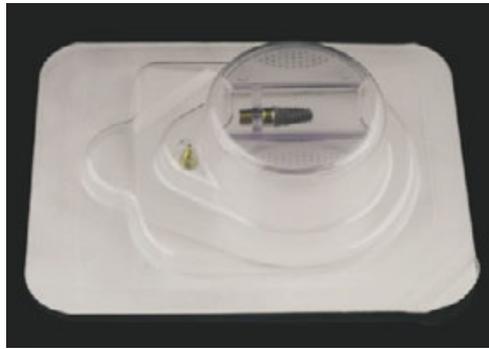


Abb. 9 a Ein weiteres Beispiel einer mithilfe von Niederdruck Plasma gefertigten und nach Politur endgereinigten, metallfreien PC-Teleskoparbeit (Temp Premium Flexible/ Zirkonzahn. Quelle: DL Wichnalek). b Implantatliefere rung an eine Praxis. Warum werden prothetische Arbeiten nicht ebenso rein geliefert?

che, dass die freien Radikale auch Polymere, wie z. B. Klebstoffe, zersetzen können. Entsprechende Materialkompatibilitätsuntersuchungen sind daher unabdingbar.

Bei der Sterilisation von Oberflächen mittels Plasma ist zu beachten, dass die Oberfläche aktiviert wird und gegebenenfalls nach dem Vorgang veränderte Eigenschaften aufweist. Dies ist besonders im Zusammenhang mit der Biokompatibilität von Implantaten etc. relevant. Speziell bei Implantaten bilden Sterilisation, Oberflächenaktivierung, Oberflächenätzung und evtl. Oberflächenbeschichtung einen Wirkkomplex.

Entzündliche Prozesse in der Mundhöhle, die sich insbesondere in Form von Parodontitis und Periimplantitis manifestieren, sind mit Sicherheit multifaktoriell bedingt. Einer der Gründe für die genannten Krankheitsbilder sind, neben mechanischen und patientenspezifischen Faktoren, bakterielle Noxen aus Biofilmen. Die Behandlung solcher entzündlichen Prozesse erfolgt in der Regel medikamentös und/oder chirurgisch (mechanisch), aber auch alternative Verfahren, wie z. B. das PDT-Verfahren (Photodynamische Therapie/Helbo) oder Plasmaverfahren, wie in der Dermatologie (Ulcer Behandlung), werden erfolgreich eingesetzt.

Zahntechniker müssen sich fragen, wie sauber der hergestellte ZE, insbesondere die implantatgetragene Suprastruktur, wirklich unser Labor verlässt, respektive inseriert wird. Was versteckt sich noch in Mikrospalten an Rückständen, vielleicht auch Keimen (Bismehl), aus Verklebungen, Schweißungen, Bearbeitungs- und Poliervorgängen, die mit den zur Verfügung stehenden Mitteln nicht erkannt bzw. entfernt werden können (Abb. 9).

Ist die gutgemeinte sorgfältige, makroskopische Reinigung, die sich in der Regel auf ein mehr oder weniger sauberes Ultraschallbad und anschließendes Abdampfen beschränkt, ausreichend oder ist hier mehr möglich und evtl. sogar nötig? Stellt der ZE, neben seinen mechanischen Einflüssen, eine unterschätzte mikrobielle Gefahrenquelle dar, die man vielleicht sehr elegant mit einer Plasmareinigung, -desinfektion, -sterilisation eliminieren könnte?

Das feuchte Biotop der Mundhöhle mit seinen anaeroben Nistplätzen stellt einen „Garten Eden“ für Keime dar. Insbesondere Prothesen älterer Patienten mit eingeschränkter Haptik, einem Nachlassen der aktiven und passiven Hygienefähigkeit und stark verändertem Mundmilieu mit Tendenz zu verstärkter Biofilmbildung zeigen eine erhöhte Keimbesiede-

Gesundheit im Mund – Plasma als unterstützende Maßnahme bei Neuanfertigung?

Gesundheit im Mund – Plasma als unterstützende Maßnahme bei „alten“ Arbeiten?



Abb. 10 Biofilm Plaque kann zur gefährlichen Bakterienbesiedelung beitragen, insbesondere bei Patienten mit nachlassender aktiver und passiver Hygienefähigkeit.

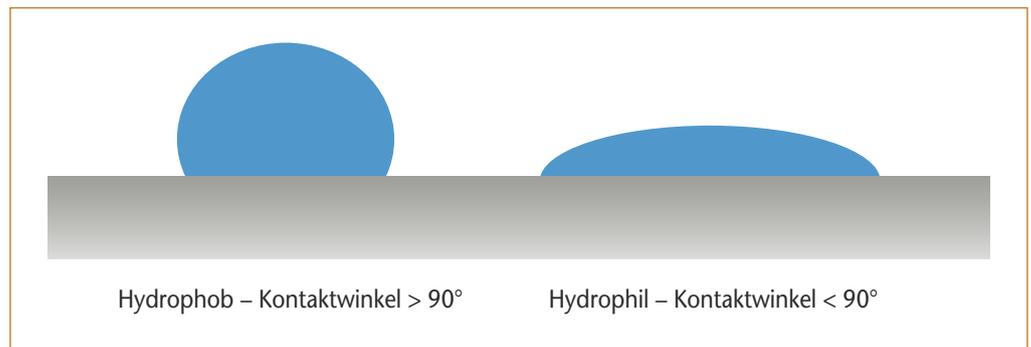


Abb. 11 Gewünschte Generierung von Hydrophilie durch Plasmabehandlung.

lung auf. Werden solche Patienten zusehends immobil oder gar bettlägerig, werden die Lungen schlechter belüftet und lebensgefährliche Keime können sogar inhaliert werden.

Die fotodynamische Therapie zeigt hier bereits vielversprechende Ansätze. Von routinemäßiger Anwendung kann im Bereich der Prothesenreinigung allerdings noch nicht gesprochen werden. Inwiefern eine regelmäßige Behandlung solcher Prothesen mit Plasma helfen könnte, wäre von der Wissenschaft noch abzuklären. Sollte eine regelmäßige Plasmabehandlung das Problem jedoch eindämmen oder sogar eliminieren, wäre dies ein einfacher und kostengünstiger Weg, um Keime zu entfernen bzw. einer Keimbildung vorzubeugen. Plaqueablagerungen müssten jedoch nach wie vor auf mechanischem Wege entfernt werden (Abb. 10).

Oberflächenaktivierung mit Plasma

Bereits eine kurze Verweildauer von ca. 2 Min. verbessert das Benetzungsverhalten von Flüssigkeiten, z. B. auf einem Kunststoff, dramatisch. Dies kann exakt und einfach über den Benetzungswinkel mit Prüfflüssigkeiten ermittelt werden. Man sieht es jedoch auch sehr eindrucksvoll mit bloßem Auge. Ein mit einer Pipette auf poliertes PEEK aufgebrachtener Tropfen aqua dest. kugelt, währenddessen dieselbe Menge Flüssigkeit von plasmaaktiviertem PEEK regelrecht „aufgesogen“ wird und dies zu 100 % benetzt (Abb. 11).

PLASMA

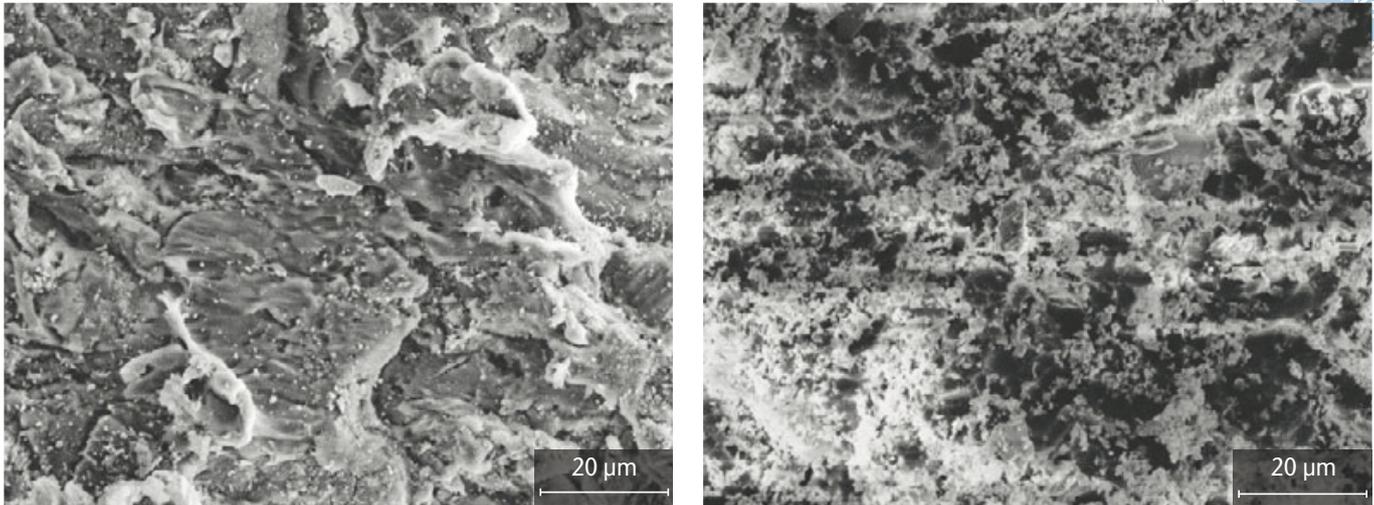


Abb. 12 Die REM-Aufnahmen wurden im Fraunhofer Institut für DL Wichnalek angefertigt. Verwendetes Material: Gerüst: PEEK tecno med (Zirkonzahn). **a** Hochglanzpolierte Oberfläche aus PEEK, die anschließend gestrahlt wurde (AlO_2 , $110\text{m}\mu$, 20s, 3 bar, Winkel 45°). **b** Die Arbeit von 12a mit Plasma behandelt. Man beachte die deutliche Vergrößerung der Oberfläche und die schmelzähnliche Morphologie.

Die Erklärung ist einfach. Durch die Plasmabehandlung wird die Oberflächenspannung extrem herabgesetzt. Die Automobilindustrie macht sich diesen Effekt zunutze, indem schlecht benetzbare Oberflächen von Kunststoffen vor dem Lackieren, Beschichten oder Verkleben (z. B. Armaturenbretter, Lenkräder etc.) in Plasmakammern vorbehandelt werden.

Dieser Effekt verbessert auch die Benetzung von Titan-Implantaten mit Eigenblut mit der Folge einer verbesserten Zelladhäsion und Osteoblastenbildung (Abb. 1).

Verlängert man die Wirkungszeit des Plasmas, findet mittels eines reaktiven Prozessgases, bspw. Sauerstoff, eine Ätzung der Oberfläche statt. Man spricht hier auch im übertragenen Sinne von atomarem Sandstrahlen. Das Ätzen mittels Plasmen ist z. B. eine wesentliche Anwendung in der Halbleiterindustrie.

Die Rauftiefe des Ätzmusters ist nicht mit einem klassischen, mechanisch erzeugten Rauheitsmuster zu vergleichen. Es sind Rauftiefen von wenigen atomaren Lagen bis zu wenigen μm gemeint. Grundsätzlich hat der Autor bei seinen zahntechnischen Anwendungen die funktionellen Oberflächen vor der Plasmabehandlung gestrahlt (Abb. 12). Ein wichtiger Aspekt beim Plasma-Ätzen ist die wesentlich vergrößerte Oberfläche. Hinzu kommt, durch die Chronologie des Prozesses, die en passant „geschenkte“ Oberflächenfeinstreinigung und die deutliche Herabsetzung der Oberflächenenergie.

Unter Einsatz der Plasmatechnologie können Materialien mit funktionellen Oberflächen beschichtet werden. In der Industrie finden sich die DLC (Diamond Like Carbon) Beschichtungen. Diese bestehen aus diamantähnlichen Kohlenstoffschichten. Eine DLC-Beschichtung kombiniert wie kein anderes Schichtsystem die Eigenschaftsmerkmale hoher Mikrohärt

Oberflächenätzung mit Plasma

Oberflächenbeschichtung mit Plasma



Abb. 13 Beispiel einer DLC Plasma Beschichtung (Diamond Like Carbon). Hochabrieb- und kratzbeständige, hauchdünne Beschichtung mit Diamant ähnlichen Eigenschaften. Die Zone, die unbeschichtet ist, war mit der Glasplatte abgedeckt (Quelle: Fa. plasmatechnology/Herrenberg).

sowie eines äußerst niedrigen Gleitreibungskoeffizienten und kommt vorwiegend in tribologischen Anwendungen im Automobilbau zum Einsatz (Abb. 13).

Die Verfahren, mit denen solche Schichten aufgebracht werden, nennen sich PVD (Physical Vapor Deposition) oder PAPVD oder PEPVD (Plasma Assisted (Enhanced) Physical Vapour Deposition) oder Plasma-unterstützte chemischen Dampfabscheidung.

Es ist auch möglich, die Oberfläche von Kunststoffen mit funktionellen Schichten zu konditionieren, um diese z. B. hydrophob, hydrophil oder kratzfest, wie bei CDs aus Polycarbonat, zu gestalten. Hierzu werden in die Plasmakammer (Rezipient-) Monomere eingeleitet. Die Schichtdicke liegt im Bereich von Mikrometern.

Eine alternative Dotierung von Implantaten für die Chirurgie stellt z. B. die Beschichtung von PEEK-Implantaten der Orthobion GmbH (Konstanz) mit Titan mithilfe der Plasmatechnologie oder mit Calciumphosphat mittels eines chemischen Sole-Verfahrens dar. Die Titanschicht ist mit ca. 250 Nanometern extrem dünn. Die mechanischen und bildgebenden Vorteile des PEEK-Grundmaterials werden so mit einer optimierten Knochenapposition kombiniert. Aus zahntechnischer und zahnärztlicher Sicht wünscht man sich hier Beschichtungen von Prothesen, die z. B. antibakteriell, hydrophob oder haftvermittelnd wären.

Welche Materialien können mit Plasma behandelt werden?

Im Prinzip können alle Arten von Materialien behandelt werden, die Auswirkung der gewünschten Effekte ist jedoch innerhalb der Materialgruppen sehr unterschiedlich. So ist die Oberflächenaktivierung von Metallen sehr instabil und solche Werkstoffe müssen innerhalb weniger Minuten bis Stunden weiterverarbeitet werden, wohingegen die Oberflächen von Kunststoffen, wie z. B. PEEK, durchaus mehrere Tage aktiv bleiben.

Als Beispiel aus dem zahntechnischen Bereich sei die hydrophile SLA, active Oberfläche (chemisch aktiviert) von Straumann Implantaten, genannt. Diese Implantate werden in speziellen Behältnissen in physiologischen Flüssigkeiten bis kurz vor der Implantation gelagert, um den hydrophilen Effekt nicht zu zerstören.

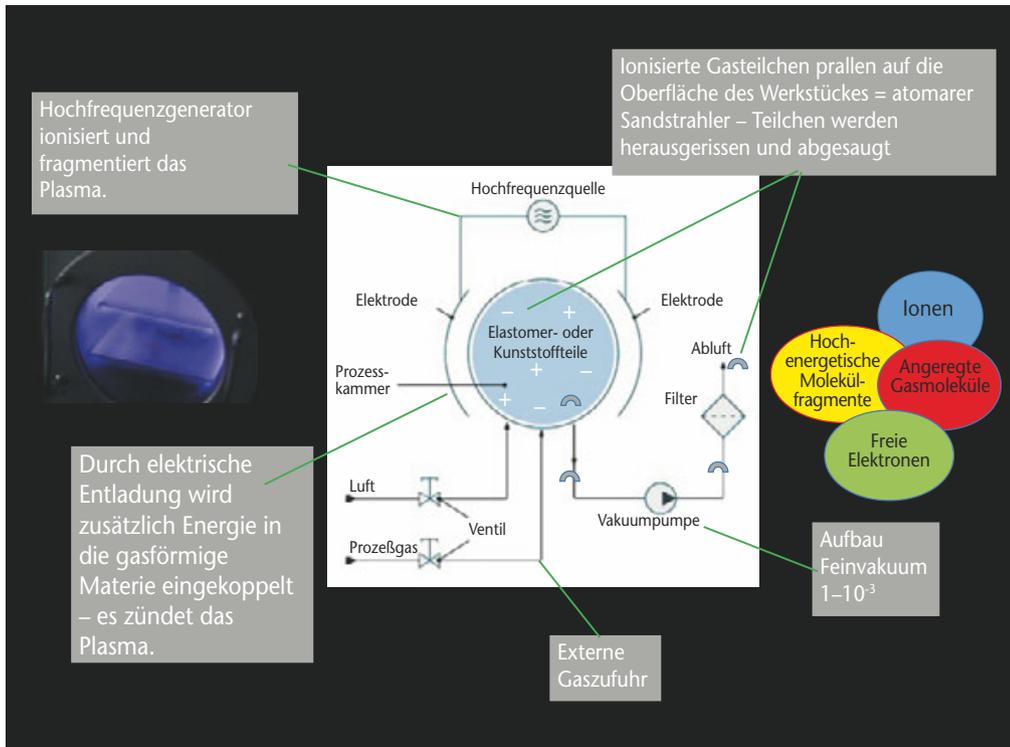


Abb. 14 Darstellung der Funktionsweise eines Niederdruck-Plasmagerätes.

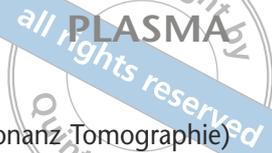
Wichtig ist also, bei sämtlichen behandelten Materialien die exakten Prozesszeiten und Halbwertszeiten der Effekte, die durch die Oberflächenkonditionierungen entstehen, zu kennen.

Das operative Zentrum stellt die Vakuumkammer, Rezipient genannt, dar. In diesen werden, nachdem die Kammer mit Feinvakuum (0,1 mBar) evakuiert wurde, ein Gas oder Gasgemische in computergesteuerten Mengen eingeleitet (Abb. 14). Es kann jedoch auch atmosphärisch gearbeitet werden. Ein Feinvakuum ist nicht mit einem Vakuum zu vergleichen, welches der Zahntechniker in seinen im Labor eingesetzten Geräten (z. B. Keramikofen) erzeugt. Ein Feinvakuum findet sich z. B. in Gasentladungslampen und es bedarf spezieller, sehr leistungsfähiger Vakuumpumpen, um ein solches dauerhaft und sicher zu erzeugen. Das Vakuum wird permanent aktiv aufrechterhalten.

Nach dem Evakuieren des Rezipienten wird mittels eines Hochfrequenzgenerators elektrische Energie in das Gas in der Kammer eingekoppelt – es zündet das Plasma. Das Gas wird ionisiert und fragmentiert. Die ionisierten Gasteilchen prallen auf die Oberfläche des Werkstücks. Es finden aber auch Oberflächenreaktionen mit dem Werkstoff statt. Herausgerissene oder, wie bei der Reinigung entstandene, umgewandelte, organische Bestandteile, werden abgesaugt.

Dass sich im Rezipienten etwas tut, erkennt man an der Farbe des Innenraumes. Die dort eingeleiteten Gase zeigen unterschiedliche Farben. Die Farbe eines Plasmas entsteht durch die Emission energetisch angeregter Atome, Ionen oder Moleküle, wenn diese nach ihrer energetischen Anregung in einen energiearmen Zustand zurückfallen. Diesen Vorgang be-

Wie entsteht und wirkt ein Niederdruck-Plasma?



zeichnet man als Relaxation und ist auch aus der MRT (Magnet Resonanz Tomographie) bekannt. Jedes Gas besitzt Energieniveaus mit unterschiedlichen Differenzen und hat somit unterschiedliche Emissionen und folglich unterschiedliche Farben. Die Farbe im Rezipienten dient also der Erkennung, welches Gas verwendet wird bzw. auch der qualitativen Abschätzung, ob das Prozessgas frei von Verunreinigungen ist. So zeigt Argon im Plasma eine violette Farbe, Sauerstoff besitzt einen orangen Farbton.

Je nach Einsatzzweck kommen unterschiedliche Gase zum Einsatz. Diese werden solitär oder in Abfolge (d. h. unterschiedliche Gase kommen nacheinander, in unterschiedlicher Wirkungsdauer zum Einsatz) oder als Gemisch eingesetzt. UV-Licht hat eine starke Auswirkung auf den Prozess, weil es chemische und physikalische Reaktionen an den Objekten bewirkt.

Weitere Beispiele verwendeter Gase sollen Wasserstoff (Reduktion von Oxiden), Wasserstoffperoxid (Bleich- und Desinfektionsmittel), Tetrafluorkohlenstoff (Ätzen) oder Stickstoff (Ätzen) sein, um nur einige zu nennen.

Welche Gase kommen in der Zahntechnik zum Einsatz

Ein klassisches Gas zum Reinigen, aber auch Ätzen ist Sauerstoff. Bei Reinigungsprozessen kommt zudem Argon zum Einsatz. Der Autor hat primär diese beiden Gase für zahntechnische Anwendungen solitär, aber auch als Gemisch, eingesetzt. Anzunehmen ist, dass für zukünftige, heute noch nicht angedachte Anwendungen, auch im zahntechnischen Berufsfeld alternative Gase und Werkstoffe Verwendung finden.

Indikationen in der Zahntechnik – Anwendungen aus dem Laboralltag

Seit mehr als einem Jahr wird die Niederdruck-Plasmatechnologie im Labor des Kollegen Wichnalek, Augsburg, konsequent angewendet. Das Dentallabor Wichnalek hat sich auf metallfreien und ganzheitlichen Zahnersatz spezialisiert. Insbesondere beim herausnehmbaren Zahnersatz steht man auch hier vor der Herausforderung, Materialien in Form einer Verblendung, Beschichtung oder Verklebung miteinander kombinieren zu müssen, die dies aufgrund ihrer chemischen und physikalischen Struktur nur schwer zulassen. Hierzu zählen Materialien wie z. B. PEEK, Polycarbonat oder Polyamide. Aber auch hochvernetzte Prothesenzähne oder Emergenzaufbauten aus Zirkonoxid sind zu nennen. Unterschiedliche Sprödigkeiten der Materialien und die niedrigen E-Module der Trägermaterialien aus Polymeren, mit einer in der Folge eingeschränkten Steifigkeit, bedingen optimale Verbundmechanismen. Es existieren Bondingsysteme bzw. Silanverbundsysteme, die bei sachgerechter Anwendung funktionieren. Auf der Suche nach Alternativen vor einem ganzheitlichen Ansatz kam die Plasmatechnik zur Anwendung.

In Ermangelung anwendungstechnischer Studien wurden, quasi „auf eigene Faust“, beim Fraunhofer Institut werkstoffkundliche Tests durchgeführt bzw. Tests aus dem Labor mit REM Aufnahmen dokumentiert und bewertet.³ Dies stellt bei weitem keine In-vitro-Testung dar, geschweige denn darf hier automatisch auf eine langzeitige In-vivo-Bewährung gefolgert werden. Die initialen Versuche zeigen jedoch ein sehr positives Potential. Insbesondere die Reinigung und Sterilisation genießt einen hohen Stellenwert im täglichen Laborablauf und im Service für die Zahnarztpraxis.

In der Folge werden exemplarisch alltägliche Arbeiten gezeigt. Alle CAD/CAM-Arbeiten werden im Labor mit dem Zirkonzahn, Gais, Italien, Frässystem gefertigt (Abb. 15 bis 19).

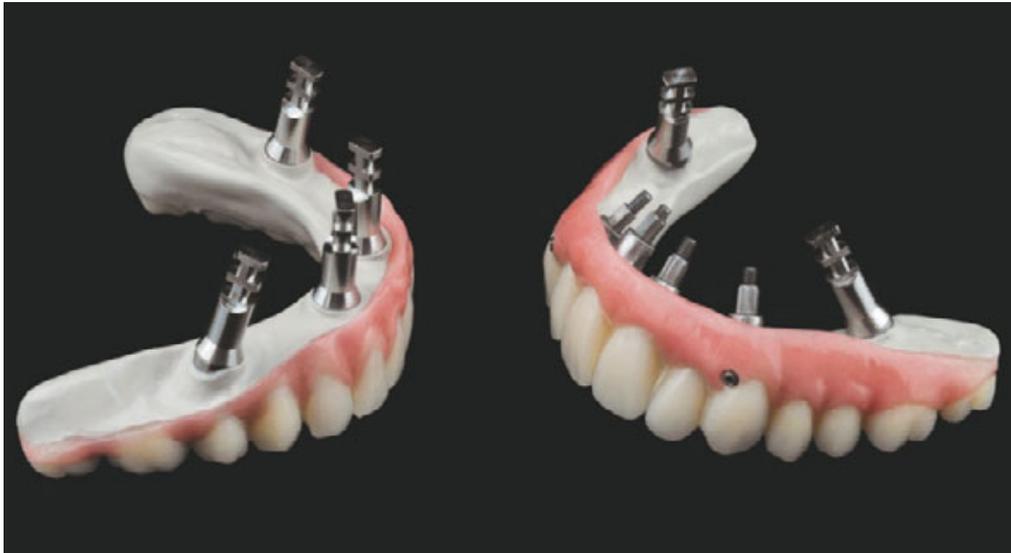


Abb. 15 Implantatarbeit aus PEKKTON (Cendres & Metaux, Biel, Schweiz). Das Gerüst und die Konfektionszähne wurden mit Plasma vorbehandelt und ohne Opaker verbunden.



Abb. 16a bis c Teleskoparbeit: Primärteile Zirkonoxid 0°, Sekundärgerüst: PEKKTON (Cendres & Metaux) und Konfektionszähne gestrahlt und mit Plasma konditioniert. Es wurde kein Opaker verwendet.

PLASMA
all rights reserved

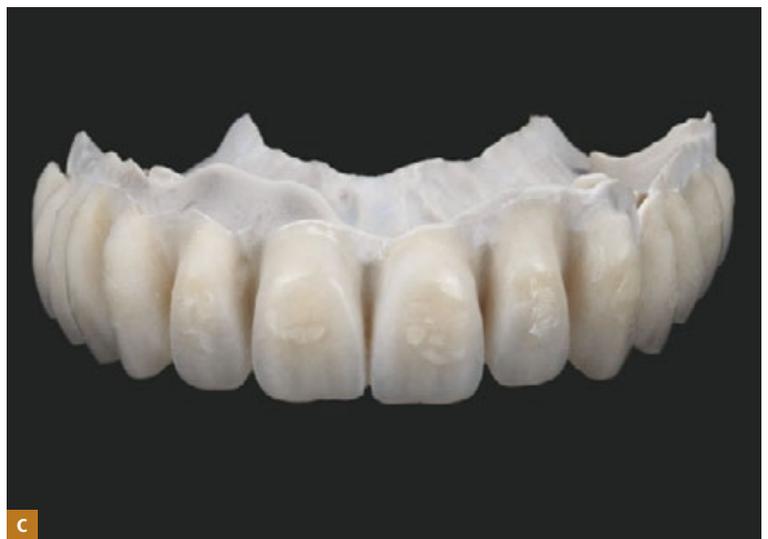
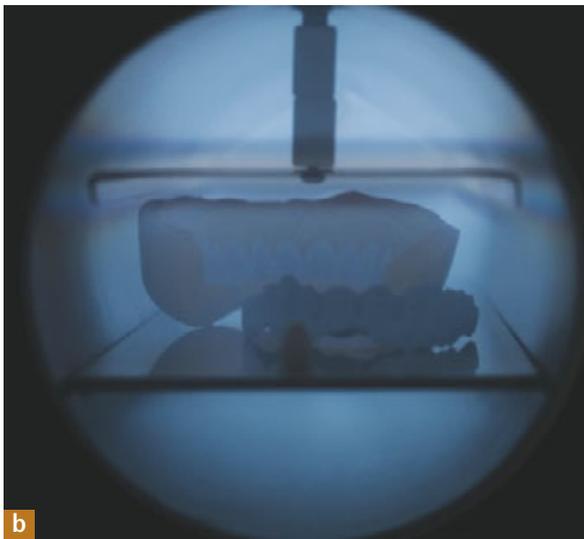


Abb. 17a bis e Verwendete Materialien wie Bildreihe 16. Der Vorwall mit den Garniturzähnen und die Suprastruktur wurden vor der Fertigstellung mit Kaltpolymerisat im Plasmagerät gereinigt, aktiviert und geätzt. Sehr schön zu erkennen ist die Emission von UV-Licht im Rezipient (Kammer) des Gerätes.



Abb. 18a und b Einstück Teleskopgerüst aus eingefärbtem Polycarbonat (Temp Premium Flexible/ Zirkonzahn), alles mit Plasma konditioniert.

Abb. 19 Mit Plasma behandelte Zirkonoxidkrone vor dem Zementieren.

Bei allen abgebildeten Patientearbeiten wurden die Objekte, bei denen verklebt, verblendet oder z. B. ein Kaltpolymerisat angetragen wurde, für ca. 30 Min. in der Plasmakammer mit Plasma behandelt. In der Regel wurden unterschiedliche Gemische aus Argon und Sauerstoff aus externen Flaschen eingeleitet. Die Mischungsverhältnisse der beiden Gase sind abhängig vom zu behandelnden Material. Wenn nur eine Reinigung oder Aktivierung, also keine Ätzung einer Oberfläche gewünscht wurde, wurde 100 % Sauerstoff eingesetzt und die Prozessdauer kann dann auf ca. 15 Min. verkürzt werden. Bereits nach 5 Min. zeigt sich, je nach Material, eine Aktivierung der Oberfläche. Je nach verwendeter Anlage ist es möglich, auch atmosphärisch, also ohne externe Gaszufuhr zu arbeiten. Alle Prozesse wurden vom Hersteller (plasmatechnology/Herrenberg) voreingestellt und laufen computergesteuert automatisch ab.

Fazit und Resumée Die Plasmatechnologie scheint, auch für den zahntechnischen Berufszweig, eine hochinteressante, breit einsetzbare und vielversprechende Möglichkeit zu sein, die fabrizierten Objekte mit den aktuell verfügbaren Materialien sicherer und perfekter herstellen zu können bzw. dieselben mit einer größeren Nachhaltigkeit zu versehen. Denken wir nur an die Optimierung der Oberflächen vor einer Beschichtung oder Verklebung oder an die Reinigung und Sterilisation vor Inkorporation bzw. eventuell begleitend im Verlauf der Tragezeit.

Es wurde gezeigt, dass in anderen Berufszweigen die Plasmatechnologie bereits mit großem Erfolg angewandt, prospektiv zunehmend eingesetzt werden wird und teilweise bereits eine *conditio sine qua non* im Verlauf eines Fertigungsprozess darstellt.

Die meisten potentiellen Anwender im zahntechnischen Bereich wünschen sich jedoch noch ein Quantum mehr an Beweisen, dass sich die Investition in ein Plasmagerät refinanziert bzw. einen Wettbewerbsvorsprung bringt, was mittelfristig auch einer Refinanzierung gleichkommt. Dies ist dann valide, wenn bei Herstellungsprozessen Materialien und/oder Prozesszeit eingespart werden können, die hergestellten Objekte besser und nachhaltiger sind und/oder für den Patienten einen Benefit beinhalten und sich all dies, wie gesagt, mittelbar oder unmittelbar rechnet. Schließlich arbeiten Zahntechniker und Zahnärzte für den Mund und im Mund und für einen nur sehr bedingt nach Schema F ausrechenbaren Patienten, der unsere Objekte nicht immer sanftmütig benutzt. Noch handelt es sich bei der Anwendung von Plasma im zahntechnischen Bereich um eine absolute Nischentechnik, die klinisch weder erprobt noch ausreichend *in-vivo* getestet ist. Trotz positiver Anwendungen ist sich der Autor nicht abschließend sicher, ob alle Materialien unbeschadet für einen späteren klinischen Einsatz aus dem Plasma herauskommen.¹⁰

Noch spannender könnte die Geschichte werden, wenn Zahntechniker, weil ihnen eine solche neue Technik zur Verfügung steht, völlig neue, in ihrem Arbeitsprozess noch unbekanntere Verarbeitungsschritte bzw. neue oder modifizierter Materialien einsetzen oder miteinander kombinieren könnten.

Es wäre dann Aufgabe der Entwickler von Plasmageräten hier innovative Verfahren in die Zahntechnik bzw. Zahnmedizin zu integrieren. Dies geschieht natürlich nur dann, wenn sich die Zahntechnik, wie schon so oft, als Innovationsträger anbietet. Wieder einmal, wie bei CAD/CAM auch, wird es *first follower* geben müssen, die den ersten Pfad austreten werden.

Die CAD/CAM-Technik hat gezeigt, wie massiv und irreversibel neue Materialien und Technologien einen Beruf verändern, maßgeblich befeuert durch immer kürzer werdende Informationsverbreitungszyklen aufgrund des Internets. Aber auch Malfunktionen werden mit rasender Geschwindigkeit offensichtlich.

Im Zeitalter des allzeit und in großen Spektren verfügbaren Wissensaustausches ist mehr denn je eine Corporate Foresight gefragt – die systematische Auseinandersetzung mit Zukunft. Diese hilft Unternehmen, Umfeldveränderungen im Auge zu behalten, neue Märkte und veränderte Bedarfe wahrzunehmen, neue Technologien und Innovationsfelder zu erkennen und dieses Wissen über die Zukunft in unternehmerisches Handeln zu übersetzen. Vor diesem Hintergrund hat sich der Autor mit der Plasmatechnologie auseinandergesetzt. Er denkt, dass es sich lohnt, diese Technologie weiter zu verfolgen.



Der Autor bedankt sich ganz herzlich für die kollegiale und kompetente Hilfe und Zusammenarbeit des DL Norbert Wichnalek, Augsburg.

Danksagung

1. Argon-Plasma-Coagulation. <https://www.klinikum.uni-heidelberg.de/Argon-Plasma-Coagulation-APC.105016.0.html> (Abruf 28.04.2015).
2. Arora V, Nikhil V, Suri NK, Arora P. Cold Atmospheric Plasma (CAP) in Dentistry. Dentistry 4:189. doi: 10.4172/2161-1122.1000189.
3. Beauvais S, Decaux O. Plasma Sprayed Biocompatible Coatings on PEEK Implants. http://www.tlsmedical.com/docs/TLS_Abstract_ITSC2007.pdf (Abruf 28.04.2015).
4. 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. Clin. Oral Impl. Res 2015;26:8–14.
5. Duske K, Koban I, Kindel E, Schröder K, Nebe B, Holtfreter B, Jablonowski L, Weltmann KD, Kocher T. Atmospheric plasma enhances wettability and cell spreading on dental implant metals. J Clin Periodontol 2012;39: 400–407.
6. Fraunhofer IGB. Anwendungsbeispiel: Plasmafeinreinigung von Metalloberflächen. <http://www.igb.fraunhofer.de/de/kompetenzen/grenzflaechentechnik/plasmaverfahren/plasma-feinreinigung.html> (Abruf 28.04.2015).
7. von Keudell A. Vorlesungsskript – Plasma-Oberflächen-Wechselwirkung, Wintersemester 2004/05, Ruhr-Universität Bochum, <http://reaktiveplasmen.rub.de/files/skripten/skriptPWW.pdf> (Abruf 28.04.2015).
8. Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie e.V. Mit Plasma auf den Zahn geföhlt. <http://www.inp-greifswald.de/web3.nsf/index?OpenPage&Eintrag=F3539B90E75A773CC125776C00321751> (Abruf 28.04.2015).
9. Marple BR, Hyland MM, Lau YC, Li CJ, Lima RS, Montavon G. Thermal Spray 2007: Global Coating Solutions. ASM International®, Materials Park, Ohio, USA, 2007.
10. Nationales Zentrum für Plasmamedizin. Positionspapier zum Risikopotential und zu Anwendungsperspektiven von kaltem Atmosphärendruckplasma in der Medizin. http://www.plasma-medicin.de/downloads/plasma_positionspapier.pdf (Abruf 28.04.2015).
11. Research Department: Plasmas with complex Interactions. Ruhr-Universität Bochum: <http://www.rd.ruhr-uni-bochum.de/plasma/> (Abruf 28.04.2015).
12. Schmidlin PR, Stawarczyk B, Wieland M, Attin T, Hämmerle CHF, Fischer J. Effect of different surface pretreatments and luting materials on shear bond strength to PEEK. Dent Mater. 2010;26:553–559.
13. Stawarczyk B, Bähr 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 Jan;18:163–70.
14. Stawarczyk B, Nicoleta I. Befestigung und Verblendung von PEEK-basierten Restaurationen – eine aktuelle Übersicht. ZMK 2014;30(9).
15. Trechow P. Kaltes Plasma tötet Keime und schließt offene Beine. VDI Nachrichten 2013;47:22.11.2013.
16. Weiß A. Orthobion – Ein „Titan-Kunststoff“ für die Wirbelsäule. BIOPRO Magazin, http://www.biopro.de/magazin/wirtschaft/archiv_2013/index.html?lang=de&artikelid=/artikel/09224/index.html (Abruf 28.04.2015).
17. Weppler M, Bogdalik M, Leußner P. PEEK und Cer-stabilisiertes Zirkonoxid als zahnmedizinische Werkstoffe am Beispiel einer Oberkiefer-Stegarbeit und andere Indikationen. Quintessenz Zahntech 2014;40:1002–1014.
18. 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 Mat 2014;30:e209–e215.

Literatur



ZTM Martin Weppler

Kantstr. 6
76356 Weingarten
E-Mail: humanpolymer@gmail.com