

J.-O. Kliemann*, H. Gabriel**, H. Gutzmann*, F. Gärtner*, T. Klassen*

Titandioxidkeramiken gegen Bakterien – antibakterielle Oberflächen durch Photokatalyse

DIE AUTOREN



Dipl.-Phys. M.Sc. Jan-Oliver Kliemann erhielt 2004 einen Master of Science in „Geophysics and Space Physics“ von der University of California in Los Angeles und schloss sein Physik-Diplom an der Technischen Universität Braunschweig 2005 ab. Von 2006 bis 2008 arbeitete er als Unternehmensberater bei McKinsey & Company, bevor er seine Promotion in der Werkstofftechnik an der Helmut-Schmidt-Universität (HSU) der Bundeswehr in Hamburg begann.

E-Mail: kliemann@hsu-hh.de



Dr. Frank Gärtner ist als Laborleiter am Institut für Werkstofftechnik der HSU für verschiedene Projekte im Bereich des Kaltgasspritzens und Lehraufgaben in seinem Arbeitsbereich Oberflächentechnik verantwortlich. Die Grundlagen für seine inzwischen 15-jährige Praxis im Bereich des thermischen bildeten die Ausbildung und Promotion als Materialphysiker an der Georg-August-Universität Göttingen (Abschluss 1992) und eine anschließende, 3-jährige Tätigkeit am Department of Materials Science der University of Cambridge, UK.

E-Mail: frank.gaertner@hsu-hh.de



Dipl.-Biol. Henrik Gabriel (Jahrgang 1972) studierte bis zum Jahr 2002 Biologie mit Hauptfach Mikrobiologie an der Universität Hamburg. Thema seiner Diplomarbeit war: „Der Einfluss von verschiedenen Werkstoffen auf die Biofilmbildung und das Vorkommen von Legionellen in Trinkwasser“. Nach einer Zusatzausbildung zum Hygienebeauftragten 2003 ist er in der Hygieneberatung für Lebensmittelbetriebe und Betriebe im Gesundheitswesen tätig. Seit 2006 ist Herr Gabriel stellvertretender Laborleiter der Dr. Brill und Partner GmbH, einem nach DIN EN 17025 akkreditierten Prüflabor für die Wirksamkeitsprüfung von Desinfektionsmitteln.

E-Mail: henrik.gabriel@brillhygiene.com



Nach seinem Physikstudium an der Universität Dortmund konzentrierte sich **Prof. Dr. Thomas Klassen** auf die Herstellung und Eigenschaften von nanokristallinen Materialien am GKSS-Forschungszentrum Geesthacht und an der Universität von Illinois. Er promovierte und habilitierte in Materialwissenschaft an der Technischen Universität Hamburg-Harburg. Seit 2005 ist er ordentlicher Professor an der Helmut-Schmidt-Universität Hamburg und leitet ein Team für Kaltgasspritzten, das sowohl die grundlegenden Mechanismen erforscht als auch die Anlagentechnik und Anwendungen entwickelt.

2010 wurde Prof. Klassen zusätzlich zum Leiter des Instituts für Werkstofftechnologie am Helmholtz-Zentrum Geesthacht ernannt und beschäftigt sich dort mit materialwissenschaftlichen Aspekten der erneuerbaren Energien, insbesondere der Wasserstofftechnologie.

E-Mail: klassen@hsu-hh.de



Dipl.-Phys. Henning Gutzmann schloss 2008 sein Studium der Physik an der Universität Hamburg als Diplom-Physiker ab. Seit 2009 ist er im Rahmen seiner Promotion als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkstofftechnik der Helmut Schmidt Universität tätig.

E-Mail: henning.gutzmann@hsu-hh.de

KURZFASSUNG

Titandioxid mit Anatas-Struktur ist eine technische Keramik, die aufgrund ihrer Halbleitereigenschaften eine hohe antibakterielle Aktivität aufweist. Für diese Studie wurden Titandioxidbeschichtungen mittels Kaltgasspritzten auf nichtrostenden Stahl aufgebracht. Der bakterizide Effekt der Beschichtungen wurde an *Pseudomonas aeruginosa*-Bakterien getestet. Eine Tötungsrate von 99,99 % in UV-A-Licht wurde bereits nach 5 Minuten erzielt, während auf den Referenzproben aus reinem Edelstahl selbst nach 60 Min. keine nennenswerte Reduktion zu beobachten war. Die Ergebnisse zeigen, dass kaltgasgespritzte Titandioxidbeschichtungen als selbst-desinfizierende Oberflächen verwendet werden können.

ABSTRACT

Bactericidal Effect of Cold Sprayed Titanium Dioxide Coatings

Titanium dioxide in anatase phase structure has high antibacterial activity due to its photocatalytic activity. For this study, ceramic TiO₂ coatings on stainless steel were produced by cold spraying. The bactericidal effect of the coatings was tested with *Pseudomonas aeruginosa* bacteria. A kill rate of 99.99 per cent on UV-A light was already achieved after 5 minutes, while the raw stainless steel reference did not show any significant reduction even after 60 minutes. The results reveal that cold-sprayed titanium dioxide coatings can serve as self-disinfecting surfaces.

STICHWÖRTER

Titandioxid (TiO₂), Photokatalysator, antibakteriell, biozide Oberfläche, Selbstdesinfektion
Keram. Z. 63 (2011) [1]

* Institut für Werkstofftechnik, Helmut Schmidt Universität /
Universität der Bundeswehr, 22043 Hamburg

** Dr. Brill & Partner GmbH, 22339 Hamburg

1 Einleitung

Krankenhausinfektionen stellen ein immer größer werdendes gesellschaftliches Problem dar. Die seit Jahren häufiger werdenden Infektionen sind oft schwer therapierbar, denn eine Reihe von typischen Krankenhauskeimen haben wegen des unsachgemäßen Umgangs mit Antibiotika z.T. sehr weitreichende Resistenzen. Die bekanntesten Vertreter hierfür sind die weit verbreiteten Methicillin-resistenten *Staphylococcus aureus*-Stämme (MRSA)¹⁾. Neben MRSA erlangen heute weitere resistente Bakterienarten wie der gram-negative *Pseudomonas aeruginosa*²⁾ eine wachsende Bedeutung [1]. Eine Infektion mit multiresistentem *P. aeruginosa* steigert die Krankenhauskosten durchschnittlich um 245 % auf rund 40.000 EUR pro Krankheitsfall und führt im Vergleich zu nicht-resistenten Stämmen zu einer dreifachen Zunahme der Todesfälle [2, 3]. In früheren Studien wurde gezeigt, dass *P. aeruginosa* auf unbelebten Oberflächen unter günstigen Bedingungen 16 Monate lang überleben kann [4]. Obwohl die häufigste Infektionsquelle immer noch der Kontakt von Mensch zu Mensch ist, werden auch neue Lösungen für die Desinfektion von Oberflächen benötigt, um diese neue Klasse resistenter Infektionserreger erfolgreich zu bekämpfen. Statt immer mehr chemische Desinfektionsmittel zu verwenden, könnten hierbei selbstreinigende Oberflächen künftig eine wichtige Rolle spielen.

In dieser Untersuchung werden technische Keramik-Beschichtungen aus Titandioxid (TiO₂) verwendet, um selbstdesinfizierende Oberflächen zu erzeugen. Seit der ersten photochemischen Beschreibung der photokatalytischen Eigenschaften von TiO₂ durch Fujishima und Honda [5] ist bekannt, dass TiO₂ in der Anatas-Phase organische Moleküle durch Reduktion und Oxidationsreaktionen teilen kann, wenn es durch UV-Licht mit einer Wellenlänge von 385 nm bestrahlt wird. Der photokatalytische Effekt wird durch die elektronische Struktur des Halbleiters TiO₂ erzielt: Eindringende Photonen erzeugen Elektron-Loch-Paare im Leitungs- und Valenzband von TiO₂, was chemische Reaktionen auf der Oberfläche des Photokatalysators anregen kann. Schon länger ist bekannt, dass TiO₂ aufgrund seiner Oxidationseigenschaften auch Bakterien wie *Escherichia coli* und *Lactobacillus acidophilus* oder Hefepilze wie *Saccharomyces cerevisiae* abtöten kann [6]. Die Herausforderung besteht darin, TiO₂ auf Oberflächen aufzutragen, ohne seine hohe photokatalytische Aktivität zu beeinträchtigen. Anatas ist eine metastabile Phase, die leicht in die inaktive Rutilphase wechselt, wenn sie Temperaturen

von 700 bis 1100 °C ausgesetzt wird. Folglich führen „heiße“ thermische Spritztechniken zu hohen Anteilen an Rutil in der Beschichtung. Mehrere Untersuchungen über die photokatalytischen Eigenschaften von Beschichtungen mit thermisch induzierten Rutilphasen zeigen reduzierte Aktivitäten bei steigenden Rutilanteilen [7–8]. Jeffery et al. [9] haben die keimtötenden Effekte von HVOF-gespritzten TiO₂-Beschichtungen auf *P. aeruginosa* untersucht. Sie berichten über einen Rutil-Gehalt von 83 % in den fertigen Beschichtungen, während das Pulvermaterial zu 100 % aus Anatas bestand. Eine weitere Methode zur Erzeugung von TiO₂-Beschichtungen ist die Verwendung von chemischen Bindern, auf denen beispielsweise Sol-Gel-Beschichtungen beruhen. Dabei wird jedoch die aktive Oberfläche des TiO₂-Katalysators verringert, da der Binder Teile der aktiven Oberfläche blockiert.

Bei der vorliegenden Studie wurden durch Kaltgasspritzen photokatalytisch aktive TiO₂-Beschichtungen hergestellt. Mittels Kaltgasspritzen lassen sich Monolagen keramischer TiO₂-Beschichtungen auf Metalle aufbringen, die eine hohe photokatalytische Aktivität besitzen [7,10]. Als Test-Bakterium, um die antibakteriellen Eigenschaften der Beschichtungen zu untersuchen, wurde *P. aeruginosa* eingesetzt.

2 Experimenteller Teil

2.1 Spritzparameter und Diagnostik

Anatas-TiO₂-Pulver wurde im Kaltgasspritzverfahren auf Edelstahl aufgetragen (EN 1.4301, AISI 304). Alle Beschichtungen wurden mit einem CGT Kinetiks 4000-System mit Stickstoff als Prozessgas aufgetragen.

Der Anatas-Gehalt wurde durch Röntgenbeugung (Iso Debyeflex 1001) unter Verwendung von Co-K α -Strahlung bestimmt. Bei Betriebsbedingungen von 30 kV und 30 mA wurde das Goniometer auf eine Abtastrate von 0,1°/min. für 2 θ eingestellt.

Die Schichtmikrostrukturen wurden mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) an polierten Querschliffen untersucht. Optische Mikroskopie wurde zur Darstellung der Draufsicht un behandelter Beschichtungen verwendet. Der Massengewinn wurde durch Wiegen des Trägermaterials vor und nach der Beschichtung ermittelt. Der Auftragswirkungsgrad wurde durch das Verhältnis zwischen der Auftragsrate und der Pulverförder rate bestimmt.

2.2 Aktivitätsmessungen

Die Messung der antibakteriellen Aktivität wurde in enger Anlehnung an die Industriennorm DIN EN 13697:2001 durchgeführt.

Zur Durchführung des Experiments wurde der *P. aeruginosa*-Stamm ATCC 15442 von der „Deutschen Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen“ (DSMZ) verwendet. Der Stamm wurde gemäß DIN EN 12353:2007 aufbewahrt.

P. aeruginosa wurde 24 Stunden lang bei 36 °C auf einem Trypton-Soja-Agar-Medium (TSA)³⁾ angezogen. Die zweite Subkultur wurde für die Experimente verwendet und in Wasser mit standardisierter Härte (WSH) gegeben. Die Eingangskonzentration wurde auf 1,8 x 10⁷ koloniebildende Einheiten (KBE)⁴⁾ pro ml eingestellt. 50 μ l dieser Bakterienlösung wurden auf die Probe-stücke pipettiert und bis zu 1 Stunde lang bei Raumtemperatur bis zur optischen Trockenheit getrocknet.

Für die Bestimmung der Bakterizidie wurden die beschichteten Proben mit UV-Strahlen behandelt. Kontrollen an beschichteten und unbeschichteten Proben wurden bei Tageslicht durchgeführt. Weitere Kontrollen unbeschichteter Proben wurden ebenfalls UV-Beleuchtung ausgesetzt.

Nach den Kontaktzeiten von 5, 15, 30 und 60 Minuten wurden die Proben in 10 ml Neutralisierungslösung aus 3,0 Masse-%

1) Methicillin ist der Trivialname für ein Penicillin-Antibiotikum, welches in der Therapie von Wundinfektionen und bei Resistenztests eingesetzt wird. Bei solchen Prüfungen sind gegen Ende der 1960er Jahre in den USA die ersten *Staphylococcus aureus*-Stämme entdeckt worden, bei denen Methicillin nicht mehr wirksam waren. Heute sind viele weitere Resistenzen auch gegen Antibiotika-Gruppen bekannt, weswegen das „MR“ in MRSA heute für „Multiresistent“ steht.

2) *Pseudomonas aeruginosa* kann insbesondere beim immungeschwächten Menschen schwere Infektionskrankheiten verursachen und ist daneben ein wichtiger Lebensmittelverderber. Häufig sind Infektionen der Atemwege, der Harnwege oder von Wunden (insbesondere Brandwunden), die einen charakteristischen süßlichen Geruch verströmen. Das Bakterium ist ein sogenannter „Nasskeim“ der natürlicherweise in Oberflächengewässern oder in Böden vorkommt, aber alle feuchten Bereiche besiedelt und z. B. in Leitungswasser gefunden wird.

3) TSA ist ein Nährboden, der zur mikrobiologischen Analytik verwendet wird. Auf den Nährboden aufgetragene Bakterienzellen wachsen durch wiederholte Zellteilung bei der Bebrütungstemperatur von 36 °C während 24 Stunden zu mit dem bloßen Auge sichtbaren „Kolonien“ an.

4) Als „koloniebildende Einheit“ (KBE) werden in der Mikrobiologie diejenigen Bakterienzellen bezeichnet, die auf Nährböden zu einer „Kolonie“ auswachsen können. Mit einem Desinfektionsmittel behandelte oder durch Austrocknung abgetötete Bakterien bilden hingegen keine Kolonien. In der klassischen Mikrobiologie kann mit der Plattierungsmethode damit bei einer bekannten Ausgangskeimzahl die Abtötungsrate von bakteriziden Verfahren ermittelt werden. Durch direkte Betrachtung mit einem Mikroskop kann dagegen nicht ohne weiteres zwischen lebensfähigen und toten Zellen unterschieden werden.

FORSCHUNG UND TECHNIK

Tween 80, 3,0 Masse-% Saponin, 0,1 Masse-% Lecithin, 0,1 Masse-% Histidin und 0,5 Masse-% Natriumthiosulfat in 0,2 mmol Natriumdihydrogenphosphat-Puffer eingetaucht. Anschließend wurden sie 2 Minuten lang mit 5 g Glasperlen ($d = 4\text{--}5\text{ mm}$) in einen Schüttler gegeben, um die Zellen wieder zu suspendieren.

Nach 5 Minuten Inaktivierungszeit wurde die Zellzahl bestimmt, indem aufeinanderfolgende Verdünnungen und abgestrichene Proben mithilfe des Plattengussverfahrens ausplattiert wurden. Die Neutralisierung und Toxizität des Neutralisierers wurde gemäß DIN EN 13697 ermittelt. Alle Experimente wurden in zwei Parallellinien durchgeführt.

2.3 UV-Bestrahlung der Proben

Für die UV-Bestrahlung der Proben wurde eine OSRAM EVERSUN UV-Lampe verwendet. Das Spektrum reicht von 300 bis 420 nm (Herstellerangaben), bei einem Maximum von 360 nm. Die Lichtintensität wurde konstant auf 1 mW pro cm^2 gehalten.

3 Ergebnisse

3.1 Eigenschaften der Beschichtungen

Das kaltgasgespritzte TiO_2 -Pulver bildet eine ungleichmäßige, raue Oberfläche auf dem Trägermaterial aus nichtrostendem Stahl, wie anhand der rasterelektronischen Mikrostrukturaufnahme der gespritzten Beschichtung ersichtlich ist (siehe Bild 1). Mit einer Oberflächenbelegung von nur $1,2\text{ mg/cm}^2$ TiO_2 ist die Schicht vergleichsweise dünn.

Bild 2 zeigt eine Draufsicht der TiO_2 -Beschichtung auf Edelstahl. Das TiO_2 bildet weiße „Inseln“ auf der Oberfläche, während das Trägermaterial immer noch sichtbar ist. Die Sichtbarkeit des Trägermaterials bedeutet nicht notwendigerweise, dass kein TiO_2 vorhanden ist, da TiO_2 bei sichtbarem Licht transparent ist. Der Eindruck der weißen Farbe entsteht nur durch die Lichtbrechung und Reflexion an den Korngrenzen.

Röntgenbeugungsmessungen zeigen keinerlei Rutilspuren in der Beschichtung (hier nicht gezeigt). Weitere Details über das Bindungsverhalten und die Eigenschaften der Beschichtung wurden an anderer Stelle beschrieben [10].

3.2 UV-Empfindlichkeit der Bakterienstämme

Titandioxid ist nur photokatalytisch aktiv, wenn es mit UV-Licht mit einer Wellenlänge von 385 nm oder weniger bestrahlt wird. Bakterien könnten jedoch auch ohne Einfluss von UV-Licht zurückgeführt werden, da die Bakterien vom UV-Licht allein nicht abgetötet werden (Bild 3). Folglich kann der

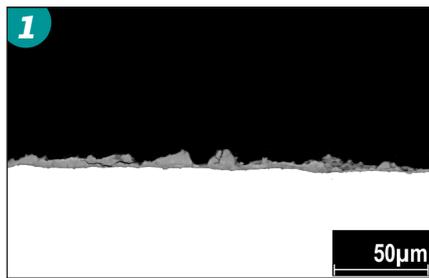


Bild 1 • Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Mikrostruktur einer kaltgasgespritzten TiO_2 -Beschichtung auf nichtrostendem Stahl. Das Trägermaterial ist im unteren Teil der Abbildung zu sehen (weiß). Im oberen Teil ist eine unebene, 1–10 μm dicke TiO_2 -Beschichtung (grau) zu erkennen

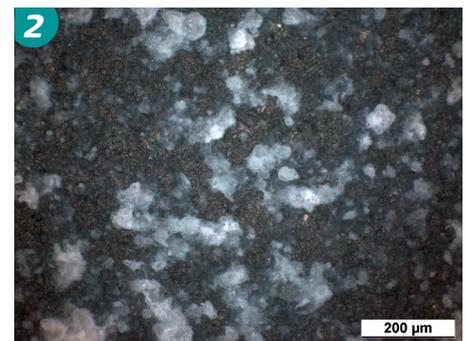


Bild 2 • Draufsicht (optische Mikroskopie) auf eine kaltgasgespritzte TiO_2 -Beschichtung auf Edelstahl. Die weißen Flecken sind etwas dickere Bereiche der TiO_2 -Beschichtung auf der Oberfläche. TiO_2 selbst ist im sichtbaren Spektrum transparent. Der helle Kontrast der dickeren TiO_2 Bereiche entsteht durch Lichtbrechung und Reflexion an den Korngrenzen

ausschließlich der photokatalytischen Aktivität der TiO_2 -Beschichtungen zuschreiben zu können, musste zuerst die UV-Beständigkeit von *P. aeruginosa* getestet werden.

Bild 3 zeigt die Überlebensraten von *P. aeruginosa* auf nichtrostendem Stahl unter UV-Lichtbestrahlung im Vergleich zu einer unbestrahlten Referenzprobe. Beginnend mit 4×10^7 KBE stagniert die Bakterienkonzentration bei beiden Proben bei rund 5×10^6 KBE. Zwischen der UV-bestrahlten Probe und der Referenzprobe war kein signifikanter Unterschied zu beobachten.

3.3 Bakterizide von kaltgasgespritztem TiO_2

Um die keimtötende Wirkung der TiO_2 -Beschichtungen zu messen, wurden TiO_2 -beschichtete und unbeschichtete Referenzproben mit Bakterien kontaminiert und UV-Licht ausgesetzt. Bild 4 zeigt die Überlebensraten während der Experimente.

Die erste Messung erfolgte nach 5 Minuten. Hier zeigte die mit TiO_2 beschichtete Probe bereits eine deutlich geringere Menge lebender Bakterien, die von $1,8 \times 10^7$ KBE in der Bakterien suspension auf weniger als 500 Bakterien auf der Probe gesunken war. Auf der Referenzprobe überlebten nach 5 Minuten noch 5×10^6 KBE.

Nach 5 Minuten stagnierten die Überlebenskurven beim TiO_2 -beschichteten wie auch beim rostfreien Trägermaterial bei 10^3 KBE bzw. 5×10^6 KBE.

4 Diskussion

Die TiO_2 -Beschichtungen erzielten einen durchschnittlichen Reduktionsfaktor von 3 bis 4 Log-Stufen bei *P. aeruginosa*. Dieser Reduktionseffekt kann nicht auf den Einfluss von UV-Licht zurückgeführt werden, da die Bakterien vom UV-Licht allein nicht abgetötet werden (Bild 3). Folglich kann der

Desinfektionseffekt ausschließlich den photokatalytischen Eigenschaften des TiO_2 zugeschrieben werden. Im Durchschnitt überlebt nur eins von 10.000 Bakterien auf der photokatalytisch aktivierten TiO_2 -Oberfläche. Das entspricht einer Abtötungsrate von 99,99 %. Jeffery et al. [9] haben den keimtötenden Effekt von HVOF-gespritzten TiO_2 -Oberflächen untersucht.

Sie berichteten von einer Tötungsrate von 24 % bei *P. aeruginosa*. Jedoch verwendeten sie eine Bestrahlung mit weißem Licht und eine weitaus geringere Bakterienkonzentration. Obwohl es kaum möglich ist, die Ergebnisse aufgrund der unterschiedlichen Parameter quantitativ zu vergleichen, ist es wahrscheinlich, dass die höhere Tötungsrate der kaltgasgespritzten Proben dem viel höheren Anatas-Gehalt in kaltgasgespritzten TiO_2 -Beschichtungen zugeschrieben werden kann.

Eine weitere Studie von Kühn et al. [11] mit Sol-Gel-präparierten TiO_2 -Proben zeigte eine Reduzierung von 2 Log-Skalen nach 60 Minuten und liegt damit ebenfalls unter der Aktivität der kaltgasgespritzten Schichten.

Ein interessanter Punkt ist die Stagnation der Reduktion bei der TiO_2 -beschichteten Probe in Bild 4. In ihrer Studie beobachteten Kühn et al. [11] eine kontinuierliche exponentielle Verringerung der Bakterienkonzentration auf der Beschichtung. Eine derartige Verringerung würde man auch bei dem hier beschriebenen Experiment erwarten. Eine mögliche Erklärung sind kleine, TiO_2 -freie „Inseln“ auf der Edelstahloberfläche, die den Bakterien das Überleben ermöglichen.

Diese Hypothese wird durch die Oberflächenmorphologie der Beschichtung gestützt (siehe Bild 2). Folglich können sogar höhere Bakterien-Reduktionsraten erwartet wer-

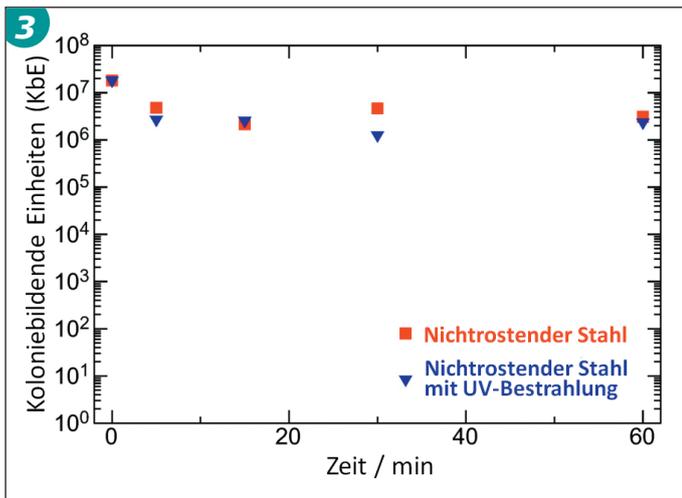


Bild 3 • Überlebende *Pseudomonas aeruginosa*-Bakterien unter UV-Bestrahlung auf unbeschichteten Trägermaterialien aus Edelstahl und einer Tageslichtreferenz. Die überlebenden Zellen werden anhand der Menge der koloniebildenden Einheiten (KbE) ermittelt

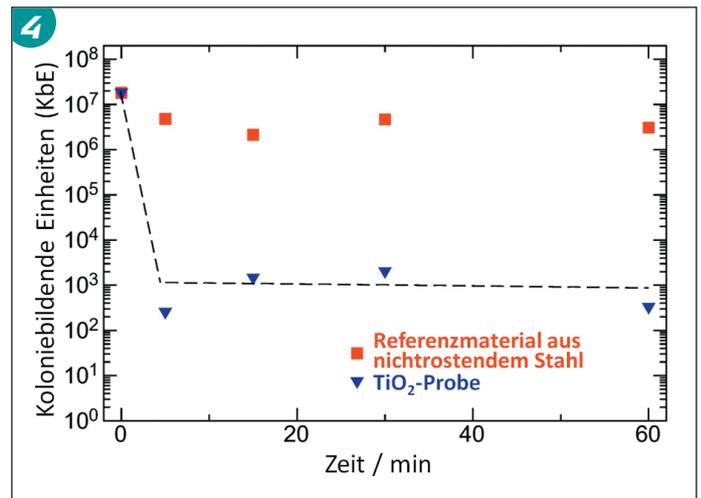


Bild 4 • Keimtötende Wirkung der TiO₂-beschichteten Proben bei *Pseudomonas aeruginosa* im Vergleich zu einer Edelstahlreferenzprobe. Die überlebenden Zellen werden anhand der Menge der koloniebildenden Einheiten (KbE) ermittelt

den, wenn durch eine weitere Prozessoptimierung die Oberflächenbedeckung mit TiO₂ vergrößert werden könnte.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Kaltgasgespritzte TiO₂-Keramik-Beschichtungen zeigen mit einer Reduktion um 99,99 % eine hohe bakterizide Wirksamkeit gegenüber *P. aeruginosa* nach nur 5 Minuten, wenn sie mit UV-Licht bestrahlt werden. Die hohe Abtötungsrate resultiert aus der photokatalytischen Aktivität der Beschichtung und wurde nicht durch die UV-Bestrahlung allein ausgelöst. Schon eine wenige Mikrometer dünne, kaltgasgespritzte TiO₂-Beschichtung reicht aus, um diesen Effekt zu erzielen.

Die Ergebnisse zeigen, dass kaltgasgespritzte TiO₂-Beschichtungen ein hohes Anwendungspotenzial als selbstdesinfizierende Oberflächen aufweisen.

Zu unseren nächsten Schritten gehören die Untersuchung unterschiedlicher Bakterienarten, um die breite Wirksamkeit der Beschichtung zu überprüfen. Um die Anwendbarkeit unter Praxisbedingungen sicherzustellen ist zudem die Durchführung von

Tests in viel besuchten, alltäglichen Umgebungen mit hoher bakterieller Verunreinigung (z. B. Flughäfen, Lebensmittelbetriebe, Bahnhöfe oder Krankenhäuser) geplant.

Danksagung

Die Autoren danken dem Laborteam an der HSU für seine Unterstützung bei den beschriebenen Versuchen. Dies sind in alphabetischer Reihenfolge: Thomas Breckwolfdt, Herbert Hübner, Dieter Müller, Norbert Németh, Camilla Schulze, Matthias Schulze und Uwe Wagener.

Literatur

- [1] Obritsch, M. D., Fish, D.N., MacLaren, R., Jung, R.: Nosocomial infections due to multidrug-resistant *Pseudomonas aeruginosa*: Epidemiology and treatment options. *Pharmacotherapy* 25 (2005) (10) 1353-1364
- [2] Harris, A., Torres-Viera, C., Ventkataraman, L., De-Girolami, P., Samore, M., Carmeli, Y.: Epidemiology and clinical outcomes of patients with multiresistant *Pseudomonas aeruginosa*. *Clin. Infect. Dis.* 28 (1999) 1128-1133
- [3] Carmeli, Y., Troillet, N., Karchmer, A.W., Samore, M.H.: Health and economic outcomes of antibiotic resistance in *Pseudomonas aeruginosa*. *Arch. Intern. Med.* 159 (1999) 1127-1132

- [4] Kramer, A., Schwebke, I., Kampf, G.: How long do nosocomial pathogens persist on inanimate surfaces? A systematic review. *BMC Infectious Diseases* 6 (2006) 130
- [5] Fujisima, A., Honda, K.: Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode. *Nature* 238 (1972) 37-38
- [6] Matsunaga, T.: Sterilization with particulate photo-semiconductor. *J. Antimicrob. Chemother.* 13 (1985) 211-220
- [7] Gutzmann, H., Kliemann, J.-O., Albrecht, R., Gärtner, F., Klassen, T., Toma, F.-L., Berger, L.-M., Leupolt, B.: Evaluation of the photocatalytic activity of TiO₂-coatings prepared by different thermal spray techniques. *Conference Proceedings ITSC (2010)*
- [8] Toma, F.-L., Sokolov, D., Bertrand, G., Klein, D., Coddet, C., Meunier, C.: Comparison of the Photocatalytic Behavior of TiO₂ Coatings Elaborated by Different Thermal Spraying Processes. *J. Thermal Spray Technol.* 15 (2006) [4] 576-581
- [9] Jeffery, B., Peppler, M., Lima, R.S., McDonald, A.: Bactericidal Effects of HVOF-Sprayed Nanostructured TiO₂ on *Pseudomonas aeruginosa*. *J. Thermal Spray Technol.* 19 (2010) [1-2] 344-349
- [10] Kliemann, J.-O., Gutzmann, H., Gärtner, F., Borchers, C., Klassen, T.: Layer formation of cold-sprayed ceramic titanium dioxide layers on metal surfaces. *Journal of Thermal Spray Technology* 20 (2010) [1-2] 292-298
- [11] Kühn, K.P., Chaberny, I.F., Massholder, K., Stickler, M., Benz, V.W., Sonntag, H.-G., Erdinger, L.: Disinfection of surfaces by photocatalytic oxidation with titanium dioxide and UVA light. *Chemosphere* 53 (2003) [1] 71-77

Eingegangen: 10.02.2011