

Keimarm, sicher, Sol-Gel



Quelle: Wonderful Studio - stock.adobe.com; generiert mit KI

ANTIBAKTERIELLE BESCHICHTUNG // DER BEDARF AN NEUEN TECHNIKEN ZUR MINIMIERUNG DER KEIMBELASTUNG AUF OBERFLÄCHEN IST ZU EINER DRINGENDEN WISSENSCHAFTLICHEN UND GESELLSCHAFTLICHEN PRIORITÄT GEWORDEN. PANDEMIEEN WIE COVID-19 HABEN DIE GRENZEN DER WELTWEITEN GESUNDHEITSSYSTEME AUFGEZEIGT UND DIE NOTWENDIGKEIT NEUER METHODEN ZUR BEKÄMPFUNG VON INFECTIIONSAUSBRÜCHEN UNTERSTRICHEN. UM SCHMIERINFESTION ZU REDUZIEREN, KÖNNEN OBERFLÄCHEN MIT ANTIMIKROBIELLEN BESCHICHTUNGEN MODIFIZIERT WERDEN.

Sarah Feistel, Konstantin Kraushaar und Edwin Kroke, TU Bergakademie Freiberg

Die Umwelt konfrontiert uns ständig mit zahlreichen mikrobiellen Krankheitserregern: Bakterien, Viren und Pilzen [1, 2]. Für einen gesunden Menschen stellt dies aufgrund seines funktionierenden Immunsystems keine erhebliche Gefahr dar. Es gibt jedoch Teile unserer Gesellschaft mit unreifen oder geschwächten Immunsystemen, wie Neugeborene, Menschen, die immunsupprimiert sind, oder ältere Menschen [3–5]. Pandemien wie COVID-19 haben gezeigt, wie schnell sich Infektionen weltweit ausbreiten können.

Einer der wichtigsten Übertragungsmechanismen ist die Schmierinfektion [6–10]. Krankheitserreger werden dabei über häufig benutzte Oberflächen, wie Türgriffe, Handläufe, Aufzugsknöpfe, Touchscreens oder Handtücher, übertragen [11]. Um diese Keimbelastung zu reduzieren, könnten solche Oberflächen mit einer antimikrobiell modifizierten Beschichtung versehen werden [7, 12–14]. Antimikrobielle Beschichtungen werden in der Lebensmittelindustrie häufig eingesetzt, beispielsweise bei Lebensmittelverpackungen oder Kühlschränken. In vielen Studien wurden aufgrund ihrer chemischen, mechanischen und thermischen Beständigkeit sowie der einfachen Modifizierbarkeit als Beschichtungsmatrizen Systeme auf Epoxidbasis verwendet [12, 15–18]. Andere Ansätze basieren auf Polyurethanen (PU) [11, 13, 19–21]. Ein wesentlicher Nachteil dieser Systeme liegt in ihrer Abhängigkeit von gefährlichen und in einigen Fällen giftigen Chemikalien wie Bisphenol A, dessen Verwendung in Lebensmittelverpackungen von der europäischen Kommission im Jahr 2024 aufgrund seiner endokrinen Wirkungen eingeschränkt wurde, oder 1,6-Hexamethylendiisocyanat (HDI), einem giftigen Monomer für PU-Systeme [17, 22]. Ein weiterer wichtiger Aspekt einer antimikrobiellen Beschichtung ist die Komponente, die für die antimikrobielle Wirksamkeit sorgt. Bekannte antimikrobielle Komponenten basieren beispielsweise auf Metallnanopartikeln wie Silber oder Kupfer, die Metallionen freisetzen [11, 13, 15, 18, 20, 21]. Diese Ionen dringen in die Zelle des Krankheitserregers ein und interagieren mit Enzymen oder dem Phosphatgerüst der DNA. Problematisch an Silberverbindungen als antimikrobielle Wirkstoffe ist ihre eingeschränkte Verwendung innerhalb der Europäischen Union, was beispielsweise durch Verbote von Silber-Kupfer-Zeolithen verdeutlicht wird [23]. Eine weitere bekannte Klasse von antimikrobiellen Wirkstoffen sind Imine in Form von Schiffchen Basen. Ihre Wirksamkeit kann durch Komplexbildung mit einem Metallzentrum, beispielsweise Kupfer, erhöht werden [24]. Diese Verbindungen könnten sich an Enzyme binden und deren Funktion hemmen oder mit der DNA interagieren, was ebenfalls zum Zelltod führt [25].

Der neue Ansatz

Zusammenfassend lassen sich als Hauptnachteile der derzeitigen Lösungen die Verwendung schädlicher Chemikalien und die eingeschränkte Verwendung antimikrobieller Wirkstoffe nach deren Freisetzung aus der Beschichtung nennen. Daher wurden siliciumbasierte Sol-Gel-Beschichtungen als Basissystem ausgewählt. Diese Systeme sind aufgrund ihrer hohen Kompatibilität mit Substratmaterialien, ihrer kostengünstigen Herstellung und ihrer ungiftigen Bestandteile ein vielversprechender Ansatz. Ein weiterer Vorteil von Sol-Gel-Formulierungen ist die einfache Modifizierbarkeit des optischen Erscheinungsbilds und der Oberflächeneigenschaften: durch Einarbeitung von Pigmenten, Füllstoffen oder anderen Additiven oder durch Modifizierung der Reaktanten. Sol-Gel-Systeme sind auch bereits in maritimen Antifouling-Anwendungen bekannt [26]. Eine wirksame Strategie zur Verringerung der Keimbelastung auf Oberflächen besteht darin, deren Hydrophobie zu erhöhen, wodurch

die Dehydratisierung von Mikroorganismen begünstigt wird, indem adsorbiertes Wasser auf der Oberfläche minimiert und die Adhäsion von Mikroorganismen verringert wird [27]. Zu diesem Zweck dient *n*-Octyltriethoxysilan (OTES) aufgrund seiner langen Alkylkette, die ihm hervorragende hydrophobe Eigenschaften verleiht, als ausgezeichnete Sol-Gel-Precursor. Als antimikrobielle Wirkstoffe wurden Imine ausgewählt und über funktionalisierte Silane in der Sol-Gel-Matrix immobilisiert.

Salicylidensilansynthese

Salicylaldehyd wird unter Rühren zu 3-Aminopropyltriethoxysilan (APTES) in Ethanol gegeben. Die Reaktionsmischung färbte sich sofort gelb, und nach Entfernung des Lösungsmittels liegt das Produkt (Salicyliden-APTES, s.-APTES) als gelbes Öl vor. Die Synthese wurde auch mit 3-Aminopropyltrimethoxysilan (APTMS) und 3-Aminopropylmethyldiethoxysilan (APMDES) als Silankomponenten durchgeführt, was zu den Produkten Salicyliden-APTMS (s.-APTMS) und Salicyliden-APMDES (s.-APMDES) führte. Die Produkte wurden mittels ¹H-, ¹³C- und ²⁹Si NMR-Spektroskopie unter Verwendung von deuteriertem Chloroform (CDCl₃) als Lösungsmittel und Tetramethylsilan (TMS) als Referenz analysiert. Zusätzlich wurden IR-Messungen für s.-APTES durchgeführt.

Sol-Gel-Synthese

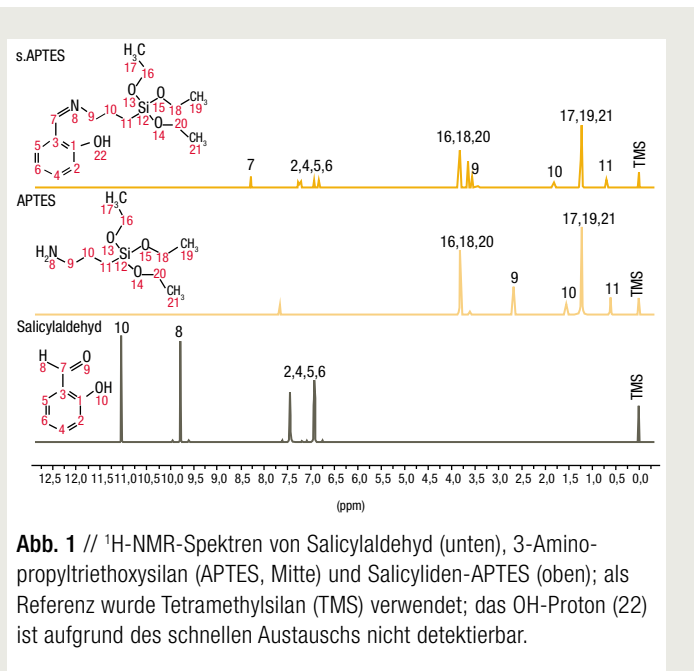
Das Sol-Gel-System besteht aus zwei Teilen: einem Sol und einem Härter. Das Sol ist eine Mischung aus Methyltriethoxysilan (MTES), *n*-Octyltriethoxysilan (OTES), Dimethyldiethoxysilan (DMDES), (3-Glycidyloxypropyl)triethoxysilan (GPTES) und Phosphorsäure als Katalysator. Der Härter enthält Tetra-*n*-butylorthotitanat (TBOT), Ethanol und GPTES. Sol und Härter wurden im Verhältnis 1:3 gemischt, um die Sol-Gel-Mischung herzustellen.

Immobilisation der Salicylidensilane in der Sol-Gel-Matrix

Um die Salicylidensilane (s.-APTES, s.-APTMS und s.-APMDES) einzubringen und zu immobilisieren, wurden diese molekularen Precursoren dem flüssigen Sol-Gel-System zugesetzt und gerührt, bis die Mischung homogen war. Die flüssigen Formulierungen wurden mit einem Pinsel auf Metallsubstrate aufgetragen, 24 h bei Raumtemperatur getrocknet und 3 h lang bei 70 °C nachgehärtet.

Ergebnisse auf einen Blick

- Sol-Gel-Beschichtungen sind aufgrund ihrer hohen Kompatibilität mit Substratmaterialien sowie ihrer Anpassungsfähigkeit hinsichtlich Matrix- und Füllstoffkomponenten vielversprechend für den antibakteriellen Einsatz.
- Die antibakteriellen Beschichtungen zeigten eine ausgezeichnete Haftung und können als Kategorie 0 beim Gitterschnitt eingestuft werden.
- Beim Vergleich der drei Beschichtungssysteme erwies sich die antibakterielle s.-APTES-haltige Beschichtung als die wirksamste gegen beide ausgewählten Mikroorganismen.

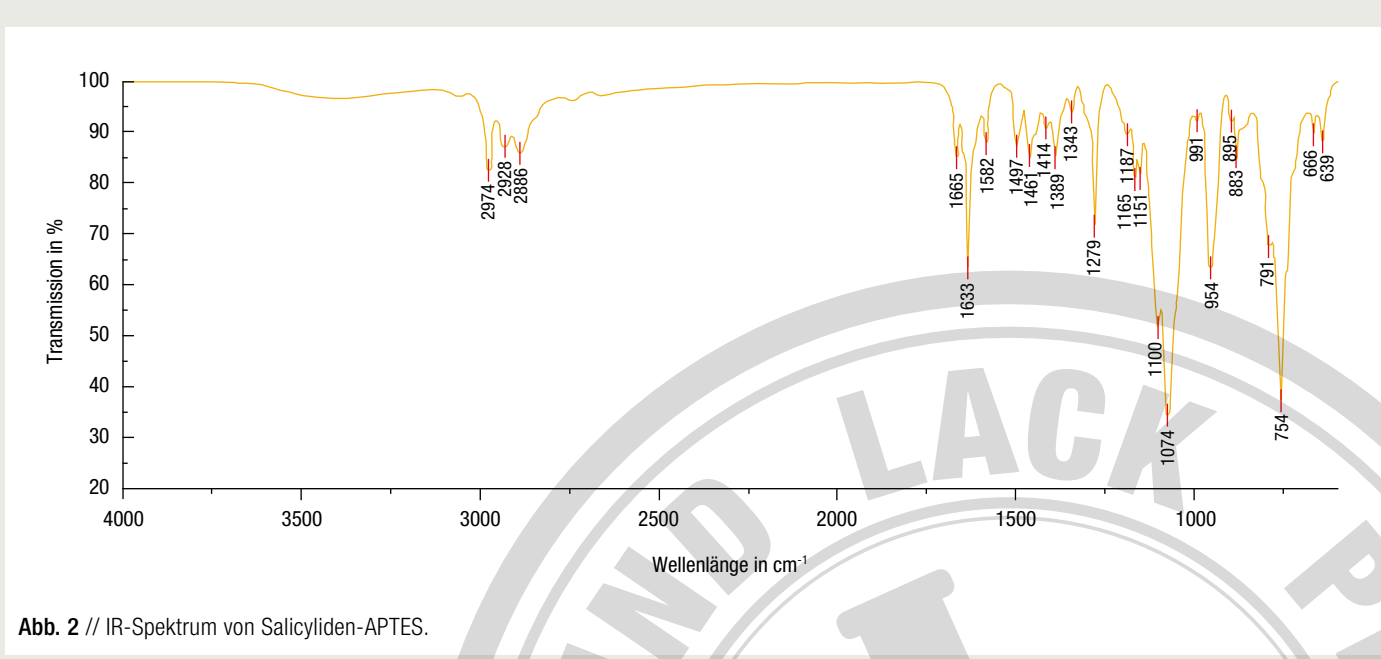


Konditionierung der Beschichtungen

Vor Durchführung der mechanischen Prüfungen wurden die Beschichtungen weitere sechs Tage bei Raumtemperatur konditioniert (DIN EN ISO 2808 [28]). Konfokale Laserscanning-Mikroskopie (CLSM) wurde zur Messung der Schichtdicken der Beschichtungen verwendet. Mit der Laserscanning-Mikroskopie war es auch möglich, die Oberflächenrauheit zu messen. Gitterschnittversuche wurden nach DIN EN ISO 2409 durchgeführt [29]. Die Haftfestigkeit wurde mittels Abzugstest nach DIN EN ISO 4624 gemessen [30]. Um Informationen über die Hydrophobie der Oberfläche zu erhalten, wurden Kontaktwinkelmessungen mit Wasser unter Verwendung eines speziell angefertigten Kontaktwinkelmessgeräts durchgeführt, das OPEN DSA als Software nutzt.

Quantifizierung der antibakteriellen Wirksamkeit

Die Norm ISO 22196 diente als Grundlage für die Quantifizierung der antibakteriellen Wirksamkeit. Allerdings mussten einige Anpassungen vorgenommen werden, um den Bedingungen in den Laboratorien gerecht zu werden. Als Mikroorganismen wurden Escherichia coli K12 (E. coli, gramnegativ) und Bacillus subtilis DSM



Tab. 1 // Beschichtungsdicke und Oberflächenrauheitswerte von unbeschichtetem Stahlsubstrat und Sol-Gel-Beschichtungen.

Beschichtungssystem	Blanker Stahl	Ohne Imine	s.-APTES	s.-APTMS	s.-APMDES
Schichtdicke in µm (Wirbelstrom)	—	4,0 ± 2,5	7,0 ± 2,1	7,6 ± 1,6	5,6 ± 1,6
Schichtdicke in µm (CLSM)	—	3,9 ± 0,1	4,1 ± 0,3	6,0 ± 0,1	5,7 ± 0,1
Oberflächenrauheit S _a in µm	3,7 ± 0,7	11,8 ± 1,4	2,1 ± 0,4	3,2 ± 0,3	1,8 ± 0,2
Oberflächenrauheit S _z in µm	49,2 ± 8,5	774,8 ± 28,9	27,7 ± 5,2	364,2 ± 56,5	23,5 ± 3,1

Tab. 2 // Zusammenfassung der Ergebnisse der Haftzugversuche nach DIN EN ISO 4624 der Beschichtungen.

Beschichtungssystem	Ohne Imine	s.-APTES	s.-APTMS	s.-APMDES	s.-APTMS (5 Monate alt)
Haftfestigkeit in MPa	3,07 ± 0,35	6,39 ± 1,68	3,07 ± 0,92	3,10 ± 1,90	9,90 ± 0,32

Tab. 3 // Kontaktwinkel von Wasser auf unbeschichtetem Stahl und den entsprechenden Beschichtungen.

Beschichtungssystem	Blanker Stahl	Ohne Imine	s.-APTES	s.-APTMS	s.-APMDES
Kontaktwinkel in °	68,2 ± 5,2	97,2 ± 1,7	101,1 ± 0,3	98,5 ± 1,1	102,8 ± 0,3

Tab. 4 // CFU-Anzahlen der 1 : 100-Verdünnungen nach Inkubation auf den beschichteten Metallsubstraten (da die Agarplatten der E. coli-Proben und der Referenzen zu stark bewachsen waren, wurde nur ein Achtel jeder Platte gezählt, um eine geschätzte CFU-Zahl zu erhalten).

	Edelstahl	s.-APTES	s.-APTMS	s.-APMDES
CFU-Anzahl für E. coli in der 1:100-Verdünnung	ca. 6500	ca. 1440	ca. 2300	ca. 2950
CFU-Anzahl für B. subtilis in der 1:100-Verdünnung	ca. 870	15	359	48

402 (B. subtilis, grampositiv) verwendet. Die Dichte des Inokulums wurde photometrisch bei einer Wellenlänge von 456 nm aus einer frischen Übernachtskultur eingestellt. Die Inkubationstemperaturen betrugen 37 °C für E. coli und 30 °C für B. subtilis.

Charakterisierung der Salicylidensilane

Die synthetisierten Salicylidensilane wurden mit umfassenden NMR-Messungen in Lösung charakterisiert. Die ¹H-Spektren in Abb. 1 zeigen, dass die gewählte Reaktion zu einer quantitativen Umwandlung der Reaktanten in das Produkt Salicyliden-APTES (s.-APTES) führt, was durch das Verschwinden des Signals bei 9,7 ppm, verursacht durch das Proton der Aldehydgruppe, belegt wird. Die Schlussfolgerung einer erfolgreichen Umwandlung wird durch die ²⁹Si-Spektren weiter untermauert, die eine Produktreinheit von 94 % anzeigen, wobei 3 % der Verunreinigungen aus dem verwendeten APTES stammen. Für s.-APTMS und s.-APMDES wurden Ausbeuten von 43 % bzw. 59 % erzielt. Das Signal bei 8,2 ppm im ¹H Spektrum von s.-APTES stammt vom Proton innerhalb der Imingruppe und weist ebenfalls auf die erfolgreiche Umwandlung hin.

Dieses Signal bei 8,2 ppm (Signal 7) wird auch in den Spektren von s.-APTMS und s.-APMDES beobachtet, was darauf hindeutet, dass die Reaktion für alle ausgewählten Reaktanten funktioniert. Die erfolgreiche Synthese geht auch aus dem in Abb. 2 dargestellten IR-Spektrum hervor. Die deutliche Bande bei 1633 cm⁻¹ kann der gebildeten Iminfunktionalität zugeordnet werden, was die Umwandlung der Reaktanten in das beabsichtigte Produkt s.-APTES bestätigt [31]. Ein weiterer Beweis für die quantitative Umwandlung ist das Fehlen der Bande bei 1700 cm⁻¹, die der C=O-Schwingung der Aldehydgruppe entsprechen würde. Die ausgeprägte Bande bei 1074–1100 cm⁻¹ wird der Si–O-Schwingung der Silanfunktion zugeschrieben, während die Bande bei 754 cm⁻¹ der Schwingung der aromatischen Protonen entspricht.

Schichtdicke und Oberflächenrauheit: Die Schichtdicke wurde mit zwei verschiedenen Methoden gemessen. Um die Schichtdicke zu ermitteln, werden zum einen Schwankungen in Wirbelströmen genutzt, was ein leitfähiges Substrat wie Stahl erfordert.

Mit dieser Methode wurden Schichtdicken im Bereich von 6–7 µm für iminhaltige Beschichtungen ermittelt (Tab. 1). Die Schichtdicke der unmodifizierten Beschichtung war mit einem Mittelwert von etwa 4 µm etwas geringer. Solche Abweichungen sind möglich und können auf die verwendete Applikationsmethode für die Beschichtung zurückgeführt werden.

Aufgrund der Transparenz der Beschichtung war es außerdem möglich, die Beschichtungsstärke mit einem konfokalen Laserscanningmikroskop (CLSM) zu messen. Die Ergebnisse dieser Messungen zeigten, dass die Beschichtungsstärke in einem Bereich von 4–6 µm liegt, was die erzielten Messergebnisse der ersten Methode bestätigt. Mit den CLSM-Messungen wird auch deutlich, dass die Sol-Gel-Beschichtung die Unebenheiten der Stahloberfläche ausgleicht (Abb. 3). Die unbeschichtete Stahloberfläche weist einen Oberflächenrauheitswert S_a von 3,7 µm auf, während die S_a-Werte der Beschichtungen zwischen 1,78 und 3,20 µm lagen (Tab. 1). Auf Edelstahls substraten mit einer glatteren Substratoberfläche (Abb. 3, C) wurden S_a-Werte von 0,26 µm (S_z = 6,33 µm) erreicht.

Gitterschnitttest: Die Beschichtungen zeigten im Gitterschnitttest eine ausgezeichnete Haftung und können als Kategorie 0 eingestuft werden, was der höchsten Bewertung entspricht. Bei keinem der getesteten Beschichtungssysteme wurde beim Entfernen des Klebebands eine Ablösung der Beschichtung vom Metallsubstrat beobachtet. Die mikroskopische Untersuchung des Schnittgitters mittels CLSM ergab nur geringfügige Abplatzungen entlang der Ritzkanten (Abb. 4). Obwohl lokal einige muschelförmige Abplatzungen sichtbar waren (C), blieb das Gesamtbild der Beschichtung in der makroskopischen Ansicht weitgehend unbeeinträchtigt (D).

Haftfestigkeit: Die Haftfestigkeitsprüfung ergab eine Woche nach dem Auftragen der Beschichtung Werte von etwa 3 MPa (Tab. 2). Damit liegen die Beschichtungen im typischen Bereich für die Haftfestigkeit. In den folgenden fünf Monaten kann dieser Wert auf bis zu 9,90 MPa ansteigen, wie anhand einer älteren s.-APTMS-haltigen Beschichtung gezeigt wurde. Dieser Anstieg ist auf die verzögerte Nachvernetzung im Inneren der Beschichtung im Laufe der Zeit zurückzuführen.

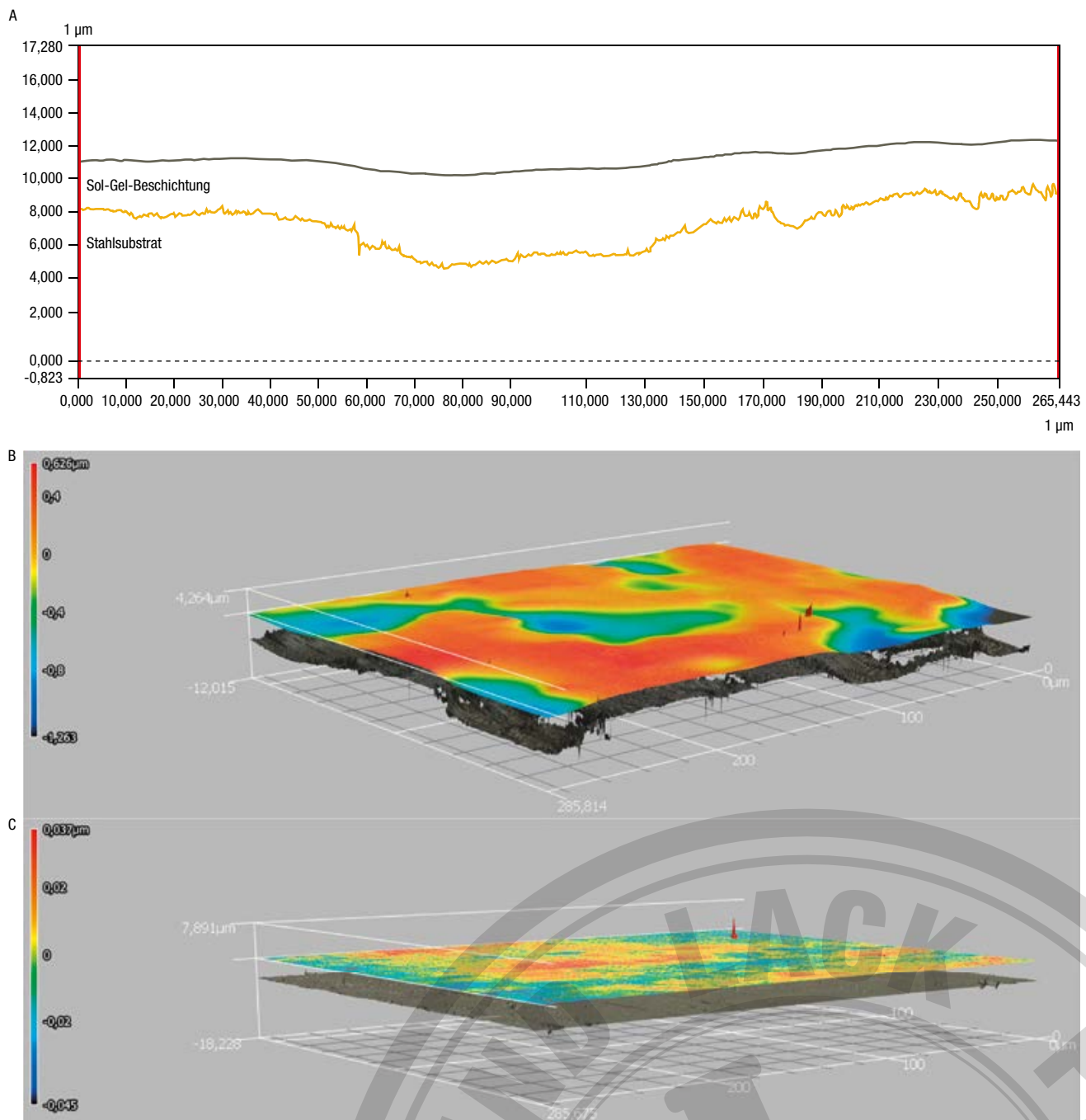


Abb. 3 // A: CLSM-Querschnittsbild des beschichteten, relativ rauen Stahls (Stahloberfläche (orange), Sol-Gel-Beschichtung (blau)), B: 3D-Modell der Beschichtung auf Stahl, C: 3D-Modell der Beschichtung auf einer wesentlich glatteren Edelstahloberfläche.

Kontaktwinkelmessungen: Aufgrund der langen organischen *n*-Octylkette des enthaltenen OTES wurde angenommen, dass die Beschichtungen hydrophobere Oberflächen besitzen als das unbeschichtete Stahlsubstrat. Diese Annahme wurde durch die Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen bestätigt. Wie in Abb. 5 dargestellt, betrug der Kontaktwinkel von Wasser auf unbeschichtetem Stahl etwa 68° . Im Gegensatz dazu wiesen die beschichteten Oberflächen meist Kontaktwinkel von mehr als 100° auf, wie in Tab. 3 dargestellt. Die s.-APTES-haltige Beschichtung erreichte einen Wert von 101° , während die s.-APMDES-haltige Beschichtung einen Kontaktwinkel von 103° besaß. Diese Ergebnisse

zeigen, dass die Beschichtung die Oberflächenhydrophobie im Vergleich zum unbeschichteten Stahlsubstrat deutlich erhöht hat. Gleichzeitig deuten die Daten darauf hin, dass die immobilisierten Iminderivate einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Hydrophobie hatten, da die Gesamtabweichung nur etwa 4° betrug.

Antibakterielle Wirksamkeit

Die antibakterielle Wirksamkeit wurde unter Verwendung von *E. coli* K12 (gramnegativ) und *B. subtilis* DSM 402 (grampositiv) als Modellorganismen durchgeführt. Bei Kontakt mit den Beschichtungen

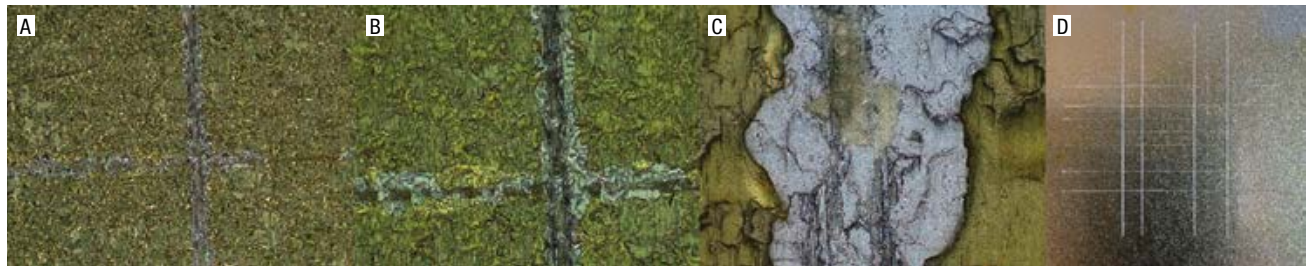


Abb. 4 // CLSM-Aufnahmen der Schnittkanten bei 5-facher (A), 10-facher (B) und 50-facher (C) Vergrößerung und makroskopische Ansicht (D).

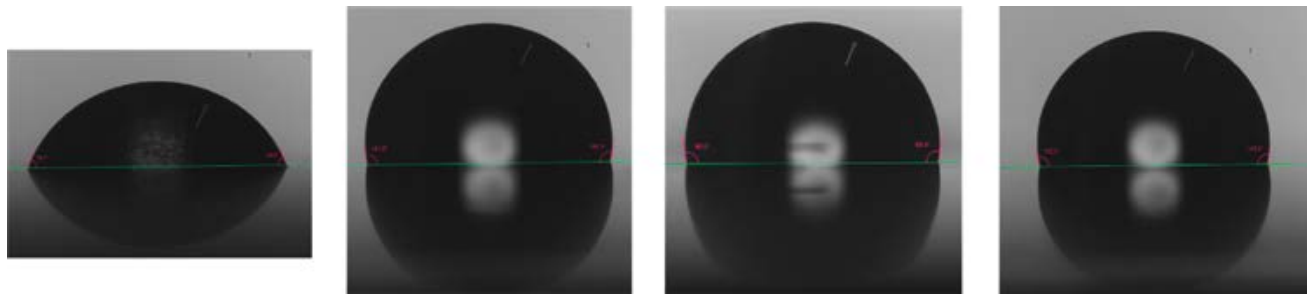


Abb. 5 // Kontaktwinkel von Wasser; von links nach rechts: auf unbeschichtetem Stahl, s.-APTES-haltiger Sol-Gel-Beschichtung, s.-APTMS-haltiger Sol-Gel-Beschichtung und s.-APMDES-haltiger Beschichtung.

wurde für beide Stämme im Vergleich zur Referenz (unbeschichteter Edelstahl) die erwartete Verringerung der Anzahl koloniebildender Einheiten (colony forming units, CFU) beobachtet (Abb. 6).

Auch wenn die Verringerung der CFU auf den ersten Blick für *E. coli* weniger stark ausgeprägt ist als für *B. subtilis*, zeigt Tab. 4 eine deutliche Abnahme der CFU, was darauf hindeutet, dass die Beschichtungen dennoch eine signifikant hemmende Wirkung hatten.

Abb. 6 und Tab. 4 veranschaulichen die unterschiedliche Empfindlichkeit der beiden Organismen. Hierbei kann festgestellt werden, dass bei Exposition gegenüber der iminhaltigen Beschichtung eine höhere Anzahl an CFU für *E. coli* als für *B. subtilis* verblieb. Diese Beobachtung legt nahe, dass *B. subtilis* empfindlicher auf die antimikrobiellen Komponenten reagiert. Dieses Phänomen lässt sich durch die unterschiedlichen Zellwandstrukturen der Mikroorganismen erklären. Obwohl die Zellwand des grampositiven *B. subtilis* aufgrund mehrerer Peptidoglycanschichten dicker ist, bleibt sie dennoch durchlässiger als die Doppelmembranzellwand des gramnegativen *E. coli*. Die äußere Membran des letzteren verhindert das Eindringen aktiver Beschichtungskomponenten in die Zelle und blockiert so deren antimikrobielle Wirkung, was zu höheren CFU-Werten führt [32].

Beim Vergleich der drei Beschichtungssysteme erwies sich die s.-APTES-haltige Beschichtung als die wirksamste gegen beide ausgewählten Modellmikroorganismen. Dieser Effekt lässt sich wahrscheinlich auf geringfügige Unterschiede in der Wirkstoffkonzentration auf der Oberfläche zurückführen, die sich aus Unterschieden in der Mikrostruktur der jeweiligen Beschichtungen ergeben.

Zusammenfassung

Ziel war es, siliciumbasierte Hybrid-Sol-Gel-Beschichtungen zu modifizieren, sodass diese antibakterielle Eigenschaften erhalten. Als antibakterielle Komponente wurden drei Iminderivate ausgewählt und mit einer Silangruppe funktionalisiert, um eine kovalente Einbindung in das Sol-Gel-Netzwerk zu ermöglichen. Die erfolgreiche

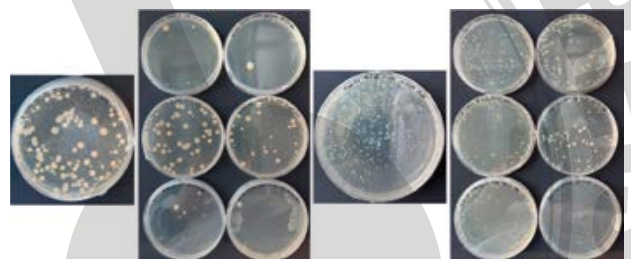


Abb 6. // 1:100-Verdünnungen nach Inkubation auf den beschichteten Metallsubstraten; von links nach rechts: Referenz *B. subtilis*, Beschichtungen gegen *B. subtilis*, Referenz *E. coli* und Beschichtungen gegen *E. coli*.

Synthese wurde durch NMR- und IR-Spektroskopie überprüft, wodurch bestätigt wurde, dass alle Reaktionen wie beabsichtigt abliefen.

Die mechanische Charakterisierung zeigte eine ausgezeichnete Beschichtungsleistung mit der höchstmöglichen Gitterschnittkategorie von 0. Die Beschichtungen führten zu einer Hydrophobierung der Oberflächen wie die Wasserkontaktwinkel von etwas über 100° belegt. Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass die Immobilisierung der Iminderivate keine negativen Auswirkungen auf die mechanische Performance der jeweiligen Beschichtungen hatte. Die antibakterielle Aktivität wurde anhand der Modellorganismen *Escherichia coli* K12 als gramnegativer Organismus und *Bacillus subtilis* als grampositiver Organismus bewertet. Die Ergebnisse zeigten, dass *B. subtilis* wesentlich empfindlicher auf die beschichteten Oberflächen reagierte als *E. coli*, bei dem nur eine geringe antibakterielle Wirkung beobachtet wurde. Ein Vergleich zwischen den verschiedenen Beschichtungen zeigte, dass das Salicyliden-APTMS-haltige System eine geringere antibakterielle Wirksamkeit aufwies als die beiden anderen Systeme. Dieses Phänomen könnte möglicherweise durch Schwankungen in der Konzentration des Wirkstoffs innerhalb und auf der Oberfläche der Beschichtung erklärt werden.

Zukünftige Untersuchungen sollen sich auf antibakterielle Tests mit einem stärker verdünnten Inokulum konzentrieren, um eine quantitative Bewertung der Wirksamkeit in Form einer prozentualen Reduktion zu ermöglichen. Darüber hinaus soll die langfristige Beschichtungswirkung und ein mögliches Leaching von Iminen aus dem Netzwerk untersucht werden.

Kontakt // Konstantin.Kraushaar@chemie.tu-freiberg.de

Literatur

- [1] Panthee, B.; Gyawali, S.; Panthee, P.; Techato, K. Environmental and Human Microbiome for Health. *Life*, 2022, 12 (3), 456
- [2] Selway, C. A.; Mills, J. G.; Weinstein, P.; Skelly, C.; Yadav, S.; Lowe, A.; Breed, M. F.; Weyrich, L. S. Transfer of Environmental Microbes to the Skin and Respiratory Tract of Humans after Urban Green Space Exposure. *Environ. Int.*, 2020, 145, 106084
- [3] Semmes, E. C.; Chen, J.-L.; Goswami, R.; Burt, T. D.; Permar, S. R.; Fouda, G. G. Understanding Early-Life Adaptive Immunity to Guide Interventions for Pediatric Health. *Front. Immunol.*, 2021, 11, 595297
- [4] Goyani, P.; Christodoulou, R.; Vassiliou, E. Immunosenescence: Aging and Immune System Decline. *Vaccines*, 2024, 12 (12), 1314
- [5] Longbottom, E. R.; Torrance, H. D. T.; Owen, H. C.; Fragkou, P. C.; Hinds, C. J.; Pearse, R. M.; O'Dwyer, M. J. Features of Postoperative Immune Suppression Are Reversible With

- Interferon Gamma and Independent of Interleukin-6 Pathways. *Ann. Surg.*, 2016, 264 (2), 370–377
- [6] Schweitzer, R. Infektionskrankheiten: Mit Infektionsschutzgesetz (IfSG), 3. Auflage.; Die Heilpraktiker-Akademie; Elsevier: München, 2018; Vol. Band 12
- [7] Ko, S.; Lee, J.-Y.; Park, D.; Kim, K. Antimicrobial Polymer Coatings on Surfaces: Preparation and Activity. *Macromol. Res.*, 2025, 33 (2), 137–151
- [8] Beck, E. G.; Schmidt, P. Nosokomiale Keime. In *Hygiene in Krankenhaus und Praxis*; Beck, E. G., Schmidt, P., Eds.; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 1986; pp 91–104
- [9] Schilling-Loeffler, K.; John, R. Stabilität von Hepatitis A-Viren, Herpes simplex-Viren und murinen Noroviren auf Glas und deren Eliminierung durch Detergenzien und ein manuelles Gläserspülergerät; Berlin, 2024
- [10] Herrmann, K.; Trinkeller, U. Erkrankungen durch Viren. In *Dermatologie und medizinische Kosmetik*; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2020; pp 171–176
- [11] Behzadinasab, S.; Williams, M. D.; Falkinham Iii, J. O.; Ducker, W. A. Antimicrobial Mechanism of Cuprous Oxide (Cu₂O) Coatings. *J. Colloid Interface Sci.*, 2023, 652, 1867–1877
- [12] Bertani, R.; Bartolozzi, A.; Pontefisso, A.; Quaresimin, M.; Zappalorto, M. Improving the Antimicrobial and Mechanical Properties of Epoxy Resins via Nanomodification: An Overview. *Molecules*, 2021, 26 (17), 5426
- [13] Yin, L.; Zhang, B.; Tian, M.; Ning, N.; Wang, W. Synthesis and Applications of Bio-Based Waterborne Polyurethane, a Review. *Prog. Org. Coat.*, 2024, 186, 108095
- [14] Gravius, S.; Wirtz, D. C. Antimikrobielle Prothesenbeschichtungen. *Orthop.*, 2015, 44 (12), 952–960
- [15] Saeed, Ashraf.; Abd El-Fattah, M.; Azzam, A. M.; Dardir, M. M.; Bader, M. M. Synthesis of Cuprous Oxide Epoxy Nanocomposite as an Environmentally Antimicrobial Coating. *Int. J. Biol. Macromol.*, 2016, 89, 190–197
- [16] Sheng, M.-Q.; Cui, Y.-Y.; Wu, A.-J.; Song, M.-X.; Zhang, M.-Y.; Feng, Y.; Li, H.-J.; Wu, Y.-C. Fabrication of Medetomidines/Epoxy Coatings for Marine Anticorrosion and Antifouling. *Prog. Org. Coat.*, 2025, 200, 109033
- [17] Manjumeena, R.; Venkatesan, R.; Durairabu, D.; Sudha, J.; Rajendran, N.; Kalaichelvan, P. T. Green Nanosilver as Reinforcing Eco-Friendly Additive to Epoxy Coating for Augmented Anticorrosive and Antimicrobial Behavior. *Silicon*, 2016, 8 (2), 277–298
- [18] Kang, F.; Zhu, G.; Yin, C.; Zheng, D.; Wu, M.; Tan, Y.; Liu, F.-Q. In Situ Growth of Nanoporous Covalent Organic Frameworks on Metal–Organic Framework Surfaces for Epoxy Coating Applications. *ACS Appl. Nano Mater.*, 2024, 7 (9), 9991–10002
- [19] Wang, Y.; Du, J.; Guo, H.; Liu, R.; Li, Z.; Yang, T.; Ai, J.; Liu, C. The Antibacterial Activity and Mechanism of Polyurethane Coating with Quaternary Ammonium Salt. *J. Polym. Res.*, 2022, 29 (2), 47
- [20] Cheng, L.; Ren, S.; Lu, X. Application of Eco-Friendly Waterborne Polyurethane Composite Coating Incorporated with Nano Cellulose Crystalline and Silver Nano Particles on Wood Antibacterial Board. *Polymers*, 2020, 12 (2), 407
- [21] Lin, B.; Yuen, A. C. Y.; Oliver, S.; Liu, J.; Yu, B.; Yang, W.; Wu, S.; Yeoh, G. H.; Wang, C. H. Dual Functionalisation of Polyurethane Foam for Unprecedented Flame Retardancy and Antibacterial Properties Using Layer-by-Layer Assembly of MXene Chitosan with Antibacterial Metal Particles. *Compos. Part B Eng.*, 2022, 244, 110147
- [22] European Commission. Nach Zustimmung der EU-Staaten: Kommission beschließt Verbot von Bisphenol A in Lebensmittelkontaktmaterialien; Pressemitteilung/Press release; Representation of the European Commission in Germany: Frankfurt, 2024
- [23] European Commission. Nichtgenehmigung von Silber-Kupfer-Zeolith als alten Wirkstoff zur Verwendung in Biozidprodukten der Produktart 4 gemäß der Verordnung (EU) Nr. 528/2012 des Europäischen Parlaments und des Rates; 2023
- [24] Memišević, M.; Zahirović, A.; Višnjevac, A.; Osmanović, A.; Žilić, D.; Kralj, M.; Muratović, S.; Martin-Kleiner, I.; Završnik, D.; Kahrović, E. Copper(II) Salicylideneimine Complexes Revisited: From a Novel Derivative and Extended Characterization of Two Homologues to Interaction with BSA and Antiproliferative Activity. *Inorganica Chim. Acta*, 2021, 525, 120460
- [25] Ünaldi, E.; Demir, N. Investigation of Biological Activities of 4-Hydroxy-3-(2-Hydroxy-5-Methylbenzylideneamino)Benzenesulphonic Acid. *Health Sci. Q.*, 2019, 3 (4), 379–388
- [26] Bös, M.; Gabler, L.; Leopold, W. M.; Steudel, M.; Weigel, M.; Kraushaar, K. Molecular Design and Nanoarchitectonics of Inorganic–Organic Hybrid Sol–Gel Systems for Antifouling Coatings. *Gels*, 2024, 10 (12), 768
- [27] Zeng, Y.; Wolf, M. O. Antimicrobial Textiles Based on Photocrosslinked Poly(Ethylene-Co -Acrylic Acid). *RSC Appl. Polym.*, 2024, 2 (6), 1057–1061



FRAGEN SIE DIE KI!
360°-RECHERCHE MIT DEM KI-CHATBOT

Wie wurden die Salicylidensilane in der Sol-Gel-Matrix immobilisiert?



www.farbeundlack.de/360

- [28] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Beschichtungsstoffe – Bestimmung Der Schichtdicke, 2019
- [29] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Beschichtungsstoffe – Gitterschnittprüfung, 2020
- [30] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Beschichtungsstoffe – Abreißversuch Zur Bestimmung Der Haftfestigkeit, 2023
- [31] Luo, Y.; Han, Y.; Lin, J. Synthesis and Luminescent Properties of Europium (III) Schiff Base Complexes Covalently Bonded to Silica Xerogels. J. Lumin., 2007, 122–123, 83–86
- [32] Goszczyńska, A.; Kwiecień, H.; Fijałkowski, K. Synthesis and Antibacterial Activity of Schiff Bases and Amines Derived from Alkyl 2-(2-Formyl-4-Nitrophenoxy)Alkanoates. Med. Chem. Res., 2015, 24 (9), 3561–3577

SARAH FEISTEL

Dipl.-Chem., TU Bergakademie
Freiberg, Jahrgang 2000,
studierte Chemie an der
Technischen Universität
Bergakademie Freiberg.



DR. KONSTANTIN KRAUSHAAR

Jahrgang 1987, studierte Chemie an der Technischen
Universität Bergakademie Freiberg.



PROF. EDWIN KROKE

TU Bergakademie Freiberg, Jahrgang 1966, studierte
Chemie an der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg.



Jetzt online weiterlesen mit FL PLUS:

Interview mit Sarah Feistel

Lesen Sie, wie die Auswahl und das Verhältnis verschiedener Alkoxysilan-Precursoren Vernetzungsgrad, Flexibilität und Hydrophobie steuern. Sarah Feistel beschreibt, welche Herausforderungen bei Aushärtung und Applikation für Formulierer:innen relevant sind.

Ihr FARBE UND LACK-Abo bietet ab sofort mehr: Einfach einloggen, Abo-Kundennummer im Profil hinterlegen und Zugriff auf exklusive PLUS-Inhalte nutzen!



Ihr Marktplatz für Fein- und Spezialchemie

Europas Fachmesse Nr. 1 für
Fein- und Spezialchemie kommt
nach Köln. Vernetzen Sie sich mit
führenden globalen Anbietern und
Tausenden Experten – alle unter
einem Dach.

Im Fokus

- Pharmazeutika
- Agrochemie
- Farben & Beschichtungen
- Auftrags- & Lohnfertigung
- Bauwesen
- Öl & Gas
- Haushalts- & Industriereinigung
- Metalloberflächenbehandlung
- Elektronik & Batterien
- Aromen & Duftstoffe
- Körperpflege & Kosmetik
- Druckfarben, Pigmente & Farbstoffe
- Recycling
- Beratung & Services
- Labor- & Anlagentechnik
- Nahrungs- & Futtermittel
- Kunststoffe & Gummi
- Zellstoff & Papier
- Wasseraufbereitung
- Automobil
- CDMO & Auftragssynthese

- ✓ 430+ Anbieter aus aller Welt
- ✓ Gezieltes Matchmaking
- ✓ Vorab vereinbarte meetings
- ✓ Erweiterte Produktsuche
- ✓ Fachvorträge
- ✓ Expertenrunden



10% SPAREN
MIT CODE
FARBE

JETZT TICKET KAUFEN

www.chemspeceurope.com/ip

Built by
RX
In the business of
building businesses