

Hochleistung, aber PFAS-frei!



Quelle: Xalanx - stock.adobe.com

ANTI-EIS-, BARRIERE- UND PFANNENBESCHICHTUNGEN //
ANTIHAFT-, GLEIT- UND BARRIEREBESCHICHTUNGEN LASSEN SICH MIT
POLYSILOXAN-FORMULIERUNGEN OHNE PER- UND POLYFLUORIERTER
ALKYLVERBINDUNGEN (PFAS) HERSTELLEN.

Dr. Jonas Friebe, Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) und Dr. Sophie Versavaud, Victrex Europa

Das Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) arbeitet seit Jahren an der Entwicklung PFAS-freier Beschichtungen und bietet nachhaltige Lösungen für Antihalt-, Gleit- und Barrierebeschichtungen. Anwendungsoptimierte Formulierungen auf Basis von Polysiloxanen liefern Beschichtungen mit einem ähnlichem Eigenschaftsprofil wie dem von PFAS-haltigen Beschichtungen. Polysiloxane bzw. Silikonrohstoffe bieten mehrere Vorteile. Ihre chemische Beständigkeit, Witterungsstabilität und außergewöhnliche Hochtemperaturbeständigkeit beruhen auf ihrer Polysiloxanstruktur (Si-O-Si). Zudem weisen sie eine niedrige Oberflächenenergie (OFE) von etwa 20 bis 24 mN/m auf, was sie ebenfalls geeignet für Antihaltanwendungen macht [1]. Ein weiterer Vorteil ist die große Auswahl an Silikonen, die je nach Anwendungsfall zur Verfügung stehen. Diese Auswahl umfasst sowohl reaktive als auch unreaktive Varianten, Silikonfeststoffe mit unterschiedlichen Partikelgrößen, fließfähige Silikone mit variabler Viskosität sowie lösemittel- und wasserverdünnbare Silikonrohstoffe. In diesem Artikel werden drei funktionelle PFAS-freie High-Performance-Beschichtungen präsentiert. Durch den gezielten Einsatz von Silikonen werden Beschichtungslösungen in den Bereichen Anti-Eis-, Antihalt- und Barrierebeschichtungen ermöglicht.

PFAS-freie Anti-Eis-Beschichtungen

Die Eisbildung an Oberflächen verursacht hohe Kosten durch erhöhten Energieverbrauch und geringeren Energieertrag. Eis beeinträchtigt die Funktion und Sicherheit. Betroffen sind nicht nur Flugzeuge, Schiffe, Schienenfahrzeuge und Automobile, sondern auch Kühlaggregate und Windenergieanlagen.

Anti-Eis-Beschichtungen lassen sich mit PFAS-haltigen Additiven und PFAS-haltigen Bindemitteln formulieren. Diese funktionellen Beschichtungen werden als passive Anti-Eis-Beschichtungen bezeichnet. Die Funktion beruht auf der chemischen Zusammensetzung und / oder der mikro- und nanostrukturierten Oberfläche, die die Eisbildung verhindert oder die Eisadhäsion reduzieren kann. Häufig werden die Oberflächen über den Wasserkontaktwinkel charakterisiert. Hydrophobe Oberflächen weisen einen Kontaktwinkel größer 90° auf, superhydrophobe Oberflächen sogar größer 150°.

Ein direkter Zusammenhang zwischen Hydrophobie und Anti-Eis-Eigenschaften konnte bisher jedoch nicht eindeutig nachgewiesen werden. Daher wird auch der Abrollwinkel von Wasser zur Charakterisierung genutzt. Dieser Parameter beschreibt die Neigung, bei der Wassertropfen beginnen, von der Oberfläche abzulaufen. Ein gutes Abrollen von Wassertropfen wird häufig als Hinweis auf eisabweisende Eigenschaften interpretiert.

Allerdings ist auch der Abrollwinkel kein verlässlicher Indikator für eisabweisende Eigenschaften. Das Fraunhofer IFAM nutzt daher eine eigens entwickelte Eiskammer, in der Tests zur Klareis- und Reifeisbildung durchgeführt werden. Darüber hinaus wird mit dem standardisierten Zentrifugen-Testverfahren die Eisadhäsion auf Oberflächen quantitativ ermittelt (ISO/TS 19392-6:2023). Untersuchungen des IFAM hatten gezeigt, dass Fluor-modifizierte Bindemittel für Polyurethanbeschichtungen gute Anti-Eis-Eigenschaften aufweisen.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurden die Formulierungsansätze auf silanisierte Polyurethane (PUR) übertragen (Abb. 1, Tab. 1). Dabei ist es entscheidend, dass die Siloxangruppen chemisch in die Beschichtung eingebunden sind, um dauerhafte Oberflächeneffekte zu erzielen. Es ist bekannt, dass siloxanhaltige Additive nur vorübergehend aktive Anti-Eis-Eigenschaften aufweisen. Aus diesem Grund wurde ein siloxanhaltiges Polyacrylat-Polyol mit Polyisocyanaten umgesetzt [2]. Die silanisierte PUR-Beschichtung zeichnet sich durch eine glatte Ober-

Tab. 1 // Typische silanisierte PUR-Formulierung der Studie.

Komponente	Anteil
Siloxanhaltiges Polyacrylat-Polyol	50 – 67,5 %
Polyacrylat- oder Polyester-Polyol	0 – 12,5 %
unterschiedlich flüchtige Lösungsmittel	10 %
UV-Stabilisatoren/HALS	2 %
Tensidkomponenten	0,5 %
Katalysator	0,01 %
Aliphatisches Isocyanat (Trimer)	25 %

Tab. 2 // Vergleich der Anti-Eis-Eigenschaften von PTFE und silanisiertem PUR.

	PTFE-Tape	Silanisiertes PUR
OFE in mN/m	15,1	18,0
Wasserkontaktwinkel in °	110	100
Abrollwinkel in °	29	41
Rauheit (Rz) in µm	0,68	0,29
Eisadhäsion (Zentrifuge) Kraft in kPa	130	40

fläche (Rz = 0,29 µm) mit einer niedrigen OFE von 18,0 mN/m aus. Der Vergleich mit einem PTFE-Tape in Tab. 2 zeigt, dass die Oberfläche eine geringe OFE (15,1 mN/m) bei einer doppelt so hohen Rauheit bzw. Rautiefe (Rz = 0,69 µm) hat. Das PTFE-Tape zeigt ein leicht verbessertes Abrollen von Wassertropfen, was sich durch einen geringeren Abrollwinkel und vermutlich durch die niedrigere Oberflächenenergie erklären lässt. Bei der Untersuchung der spezifischen Anti-Eis-Eigenschaften erweist sich jedoch das silanisierte PUR als besonders leistungsstark. Die Eisadhäsionskraft, gemessen mittels Zentrifugentest, beträgt 40 kPa und liegt damit deutlich unter den 130 kPa des PTFE-Tapes [3]. Vermutlich trägt die glatte Oberfläche der silanisierten PUR-Beschichtung wesentlich zu der geringeren Eisadhäsion bei.

Ergebnisse auf einen Blick

- Anwendungsoptimierte Polysiloxane können die Funktionen von PFAS-Materialien in Lackformulierungen erfüllen.
- Glatte, silanisierte PUR-Systeme eignen sich als Grundlage für Anti-Eis-Beschichtungen und bieten eine Alternative zu fluormodifizierten Beschichtungen.
- Polymere wie Polyimid und Polyaryletherketone überzeugen durch chemische und thermische Stabilität und lassen sich durch Formulierungsanpassungen um funktionelle Eigenschaften erweitern.
- Hochleistungsbarriereschichtungen können auf Basis von Polyimid und Schichtsilikaten entwickelt werden, was im Verbund mit PFAS-freien Elastomeren eine Alternative zu Fluorelastomeren wie FKM und FFKM bietet.
- Temperaturbeständige Antihaltbeschichtungen für Pfannen lassen sich durch Kombination spezieller Polymere mit Silikonadditiven als PTFE-Alternative realisieren.

In der Literatur werden eisabweisende Oberflächen durch eine Eishaftung von unter 100 kPa definiert [4]. Für die passive Entfernung von Eis, beispielsweise auf Flugzeugtragflächen, sind noch deutlich niedrigere Werte erforderlich, bis unter 20 kPa. Die Entwicklung des silanisierten PUR erzielt Werte von 40 kPa, also nahe den Anforderungen; jedoch besteht noch Potenzial, die Werte zu verbessern.

Elastomere als Fluorpolymer-Alternative

Die Dichtungstechnik erfordert hohe thermische und chemische Beständigkeit, die bislang nur Fluorelastomere gewährleisten können. Ein Beispiel für die vielen Anwendungen, in denen hochwertige und zuverlässige Dichtungen erforderlich sind, sind Wasserstoffanwendungen oder Vakuumanlagen zur Herstellung von Photovoltaik-Modulen. Ohne diese Dichtungen könnte der Fortschritt der Energiewende erheblich beeinträchtigt werden. Fluorelastomere verbinden die chemische und thermische Beständigkeit fluorierter Kunststoffe mit den gummielastischen Eigenschaften von Kautschuk. Zu dieser Gruppe gehören

Fluorkautschuke (FKM) und Perfluorkautschuke (FFKM).

Das aktuelle Projekt HATE-Fluor (Entwicklung von Hochleistungs-Elastomeren als Substitut für Fluorpolymere in ausgewählten technischen Anwendungen) wird in Zusammenarbeit mit den Partnern Fraunhofer LBF und Fraunhofer IFAM umgesetzt. Es zielt darauf ab, das anspruchsvolle Anforderungsprofil von Dichtungsringen durch einen Multi-Material-Ansatz zu erfüllen. Die Materialentwicklung ist wie ein Baukasten zu sehen, bei dem die einzelnen Komponenten modular angepasst werden [5].

Der prinzipielle Aufbau sieht vor (Abb. 2):

- fluorfreies Elastomer mit thermo-oxidativer Beständigkeit
- Haftvermittlung durch Plasmaprozess
- Barrierebeschichtung aus Polyimid und organischen Schichtsilikaten mit gesteigerter chemischer und thermischer Stabilität
- plasmapolymere Funktionsschicht z.B. mit angepasster Haptik und verringerter Anschmutzbarkeit (Easy-to-clean-Effekt)

Die PFAS-freie funktionelle Beschichtung (türkise Schicht in Abb. 2) basiert auf dem Hoch-

leistungspolymer Polyimid (PI), das ähnlich wie Polyaryletherketone (PAEK) durch chemische und thermische Beständigkeit überzeugt. PI allein bietet jedoch keine ausreichende Barrierewirkung. Durch die organische Modifizierung von Schichtsilikaten lassen sich aber funktionelle Barriereelacke auf Polyimidbasis entwickeln. Das Barriereprinzip beruht dabei auf der Verlängerung des Diffusionswegs des Permeats. Plättchenförmige Pigmente, die in das Lacksystem integriert werden, verkleinern das freie Volumen und blockieren die Diffusionswege. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Schichtsilikate ein großes Aspektverhältnis besitzen, das heißt, sie zeichnen sich durch eine hohe laterale Ausdehnung bei minimaler Dicke aus. Im exfoliierten Zustand sind sie besonders gut geeignet, eine effektive Barriere zu bilden [6].

Permeationsmessungen für Sauerstoff und Wasserdampf belegen, dass die Barriereleistung des Polyimid-Schichtsilikat-Aufbaus verglichen mit reinem Polyimid steigt. Als Schutzbeschichtungen für elektronische Bauteile werden diese Systeme bereits eingesetzt [7].

PFAS-freie Antihafbeschichtungen für Pfannen

PFAS-haltige Antihafbeschichtungen für Pfannen bestehen aus Polytetrafluorethylen (PTFE). PTFE überzeugt durch seine Omniphobie (hydrophobe und oleophobe Eigenschaften), eine hohe Kratzfestigkeit und eine gute Schlagfestigkeit, die auf die geringe Sprödigkeit des Materials zurückzuführen ist. Zudem ist die Beschichtung sowohl temperatur- als auch chemikalienbeständig. Eine der am häufigsten verwendeten Alternativen sind keramische Beschichtungen. Diese weisen zwar eine gute Kratzfestigkeit gegenüber scharfkantigen Küchenutensilien auf, erleiden aufgrund ihrer Sprödigkeit jedoch bei stärkerer Belastung, beispielsweise durch ein fallendes Gewichtsstück, leichter Materialbrüche (Tab. 3). Gemessen wurden die Schichtdicke nach DIN EN ISO 2178, DIN EN ISO 2360, die Oberflächenenergie

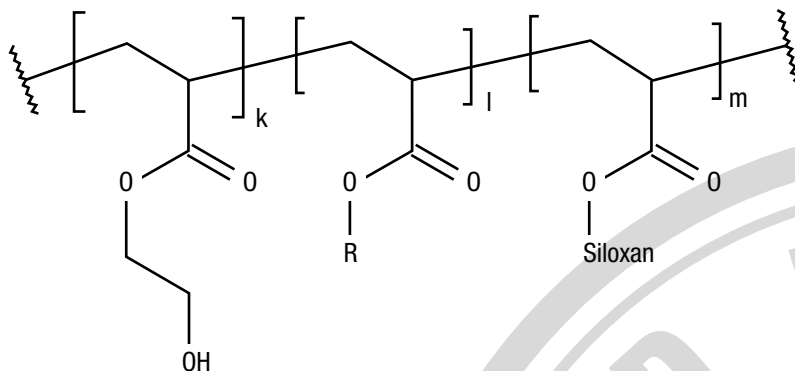
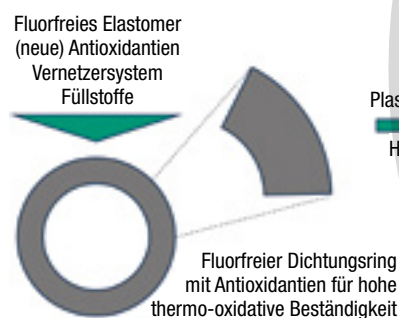


Abb. 1 // Vereinfachte chemische Strukturformel des eingesetzten siloxanhaltigen Polyacrylat-Polyols.



Plasmabehandlung
Haftvermittlung

Barrierebeschichtung
Polyimid mit
Schichtsilikat

Plasmapolymere
Funktionsschicht

Abb. 2 // Schematischer Aufbau der PFAS-freien Alternative für Fluorelastomere.

Tab. 3 // Eigenschaften kommerzieller Pfannenbeschichtungen (Sol-Gel und PTFE), der neuen PAEK-Beschichtung und des neuen Beschichtungskonzepts.
Legende: ✓ = unzureichende, ✓✓✓✓✓ = ausgezeichnete Materialeigenschaften.

	Sol-Gel	PTFE	„FG 900“	„FG 900-O“
Schichtdicke	≤ 50 µm	≤ 50 µm	≤ 50 µm	≤ 75 µm
Oberflächenenergie/Antihafteigenschaften	✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓	✓✓✓✓
Adhäsion	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓
Kratzfestigkeit	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓✓	✓✓✓✓✓
Impact-Test	versagt	besteht	besteht	besteht
Eibrattest	besteht	besteht	versagt	besteht
Eibrattest nach Soak-Test	besteht	–	–	besteht

gie nach DIN EN 828, die Adhäsion nach DIN EN ISO 2409 und die Kratzfestigkeit nach DIN EN ISO 1518-2. Der Impact-Test (Schlagfestigkeit; fallendes Gewichtsstück: 2 kg, 1 m) erfolgte nach DIN EN ISO 6272-2, der Eibrattest nach CBA 21.3.1 und der soak test/Einweich-test nach CBA 21.1.4.1.

Polymere der „Victrex FG 900“-Serie sind die neueste Erweiterung der Polyaryletherketon(PAEK)-Familie. Ihre Schmelztemperatur liegt um 40 °C niedriger als die von „Victrex PEEK“, während sie weiterhin herausragende Eigenschaften wie Temperaturbeständigkeit, chemische Resistenz und mechanische Festigkeit bieten [8]. Allerdings weisen PAEK-Polymere im Vergleich zu PTFE schlechtere Antihafteigenschaften auf. Aus lacktechnischer Perspektive wäre es daher sinnvoll, die hervorragenden Materialeigenschaften der PAEK-Polymere mit Antihafteigenschaften von Additiven wie Silikonen durch Formulierungen zu kombinieren. Der Einsatz niedrigschmelzender PAEK-Polymere ermöglicht ein Prozessfenster mit Schmelz-/Aushärtungsbedingungen, bei denen auch der Einsatz von Silikon-Additiven realisierbar ist. PAEK-Polymere können grundsätzlich elektrostatisch, als Pulver oder als Dispersion nass appliziert werden. Das ermöglicht eine vielfältige Verarbeitung und Applikation.

Die vorgestellten Arbeiten stellen die Ergebnisse der Pulverbeschichtung mit Polymeren der neuen Serie vor. Mit einer Zentrifugalmühle wurde eine Pulvermischung aus den PAEK-Polymeren und Silikonölen (900-O) hergestellt. Der entwickelte Zweischihtaufbau aus PAEK-Grundierung und modifizierter PAEK-Beschichtung mit Silikonöl (neue Serie plus

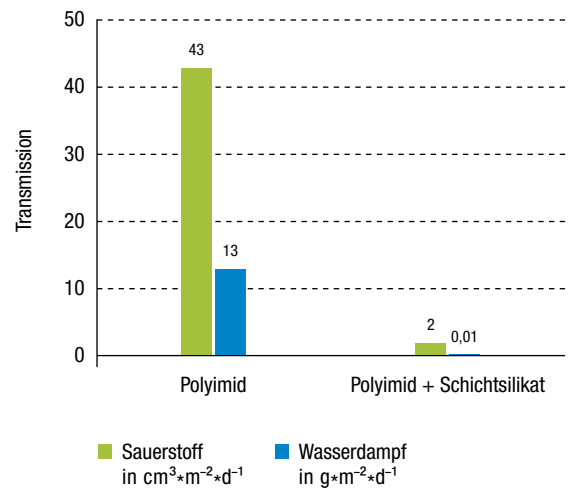
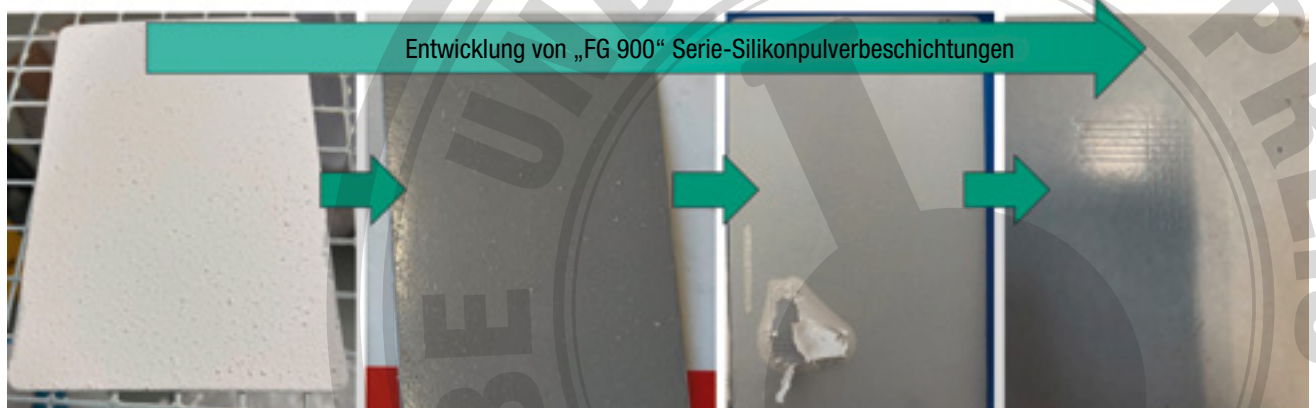


Abb. 3 // Vergleich der Permeation zwischen Beschichtungen aus reinem Polyimid und Polyimid mit Schichtsilikaten auf einer durchlässigen PET-Folie basierend auf der Transmission von Sauerstoff und Wasserdampf.



Pulverbeschichtung mit hohem Silikonanteil (>10 Gew. %).

Pulverbeschichtung mit niedrigem Silikonanteil (<10 Gew. %).

Homogenisierte Pulverbeschichtung mit Silikonanteil (<10 Gew. %).

Zweischihtaufbau: „FG 900“ Serie+ „FG 900“-O

Abb. 4 // Entwicklung der neuen Beschichtung.

900-O) überzeugt durch gute Haftfestigkeit, Kratzfestigkeit, Schlagfestigkeit und einen guten Verlauf. Dabei sind die optimale Einstellung des Mischungsverhältnisses von PAEK-Pulver und Silikonöl, die Homogenisierung der Mischung sowie der PAEK-Grundierung zur Haftvermittlung und zur Erzeugung von Beschichtungen mit gutem Verlauf zentrale Aspekte (Abb. 4).

Die reine PAEK-Beschichtung überzeugt durch ihre Materialeigenschaften, wohingegen die Oberflächenenergie größer ist als die von PTFE- und Sol-Gel-Beschichtungen (Tab. 3). Die Sol-Gel-Beschichtung weist eine geringere Kratzfestigkeit auf und zeigt auch im Impact-Test keine ausreichende Widerstandsfähigkeit, wodurch sie diesen Test nicht besteht. Im praktischen Eibrattest unterliegt die Pfannenbeschichtung der neuen Serie den kommerziellen Produkten. Die Ausrüstung der PAEK-Polymere mit Silikonölen führt jedoch zu einer verbesserten Antihaftwirkung. Das ließ sich über die Oberflächenenergie über den Eibrattest (Abb. 5) nachweisen, ohne dass die Materialeigenschaften dabei signifikant beeinträchtigt wurden. Die Antihaftigenschaften dieser neuen Pulverbeschichtung blieben selbst nach einem Soak-Test, bei dem die Beschichtung in einer Spülmaschinenreinigerlösung bei 70 °C gelagert wurde, in einem Eibrattest erhalten. Als Referenz wurde eine Pfanne mit keramischer Sol-Gel-Beschichtung untersucht, die diesen Test ebenfalls bestand.

Im Rahmen eines erweiterten Materialtests wird derzeit die Langlebigkeit der Beschichtungen anhand einer Untersuchung zur Spülmaschinenbeständigkeit geprüft. Dabei stehen sowohl die Materialeigenschaften als auch die Antihaftigenschaften im Fokus. Entscheidend ist, dass das Material intakt bleibt und es zu keinen visuellen Veränderungen, Abplatzungen oder Enthaltungen kommt.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Fraunhofer-Gesellschaft für die Unterstützung, insbesondere beim IFAM-Team für seine engagierte Arbeit während dieser Zusammenarbeit. Wir danken auch den Teams von Victrex für ihre kontinuierliche Unterstützung, insbesondere bei der Bereitstellung von Materialien.

Kontakt // jonas.friebel@ifam.fraunhofer.de, sversavaud@victrex.com

Literatur

- [1] Colas, A.: Silicones: preparation, properties and performance. Dow corning, life sciences 2005
- [2] Rehfeld, N.; Speckmann, B.; Schreiner, C.; Stenzel, V.: Assessment of Icephobic Coatings—How Can We Monitor Performance Durability? *Coatings* 2021, 11 (6). DOI: 10.3390/coatings11060614
- [3] Rehfeld, N.; Speckmann, B.; Stenzel, V.: Parameter Study for the Ice Adhesion Centrifuge Test. *Applied Sciences* 2022, 12 (3). DOI: 10.3390/app12031583
- [4] Golovin, K.; Kobaku, S. P. R.; Lee, D. H.; DiLoreto, E. T.; Mabry, J. M.; Tuteja, A.: Designing durable icephobic surfaces. *Science Advances*, 2 (3), e1501496. DOI: 10.1126/sciadv.1501496
- [5] Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. HATE-Fluor (PREPARE-Programm): Entwicklung von Hochleistungs-Elastomeren als Fluorpolymere-Substitut. <https://www.hate-fluor.de/> (accessed 2025-07-01)
- [6] McKeen, L. W.: Introduction to permeation of plastics and elastomers. *Permeability properties of plastics and elastomers* 2012, 1–20
- [7] Lommes, J.; Patzelt, G.; Stenzel, V. UV-curable polyimide/layered silicate films with improved barrier properties for the protection of semiconductor chips. *Microelectronic Engineering* 2023, 277, 112014. DOI: 10.1016/j.mee.2023.112014
- [8] Victrex. LMPAEK™ Polymere: Präzise entwickelt für bessere Verarbeitung und erstklassige Ergebnisse. <https://www.victrex.com/de/lmpaek> (accessed 2025-07-01)

„FG 900“-Serie



„FG 900“-O



Abb. 5 // Eibrattest ohne zusätzliches Öl bei 170 – 180 °C für 5 Minuten. Oben: Das Ei klebt beim Braten an der Pfanne. Unten: Das Ei und Rückstände lassen sich nach 5 Minuten mit einem trockenen Tuch entfernen.

DR. JONAS FRIEBEL

hat Chemie mit den Schwerpunkten Synthese und Katalyse an der TU Berlin studiert und am Max-Planck-Institut in

Mainz im Bereich Polymerchemie promoviert. Seit 2023 ist er als Projektleiter in der Abteilung Lacktechnik am Fraunhofer IFAM in Bremen tätig und arbeitet im Bereich funktioneller Beschichtungen.

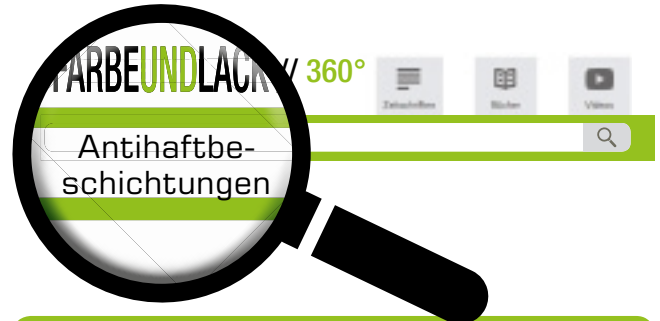


DR. SOPHIE VERSAUD

hat Materialwissenschaft mit den Schwerpunkten Thermoplaste und Polymere studiert und an der Arts et Métiers in Paris promoviert. Im Jahr 2014 trat sie bei Victrex Europa als Ingenieurin der technischen Abteilung ein. Seit 2021 unterstützt sie den Bereich Energie und Industrie als Anwendungsentwicklungsingenieurin mit Schwerpunkt auf Anwendungen in der Lebensmittelindustrie, insbesondere auf Beschichtungsanwendungen in Kochgeschirr.



Mehr zum Thema!



15 Ergebnisse für Antihaftbeschichtungen!
Jetzt testen: www.farbeundlack.de/360



KGM



ADV



KBM



KDV