

Irreversible Oberflächenverwitterung von modernem Floatglas und präventive Reinigungsstrategien

Gentiana Strugaj¹, Elena Mendoza¹, Andreas Herrmann¹, Edda Rädlein¹

¹ Technische Universität Ilmenau, Institut für Werkstofftechnik, Fachgebiet Anorganisch-nichtmetallische Werkstoffe, Gustav-Kirchhoff-Straße 5, 98693 Ilmenau, Deutschland; gentiana.strugaj@tu-ilmenau.de; ekmendoza@gmail.com; andreas.herrmann@tu-ilmenau.de; edda.raedlein@tu-ilmenau.de

Abstract

Floatglas wurde künstlicher und natürlicher Bewitterung ausgesetzt. Um die Glasbewitterung zu beschleunigen und die Auswirkungen bestimmter Verunreinigungen zu verstehen, wurden vor der Untersuchung vier Modell-Schadstoffe für organische, anorganisch nicht-metallische, metallische und salzhaltige Verunreinigungen auf die untersuchten Glasproben aufgebracht. Vor und nach der Bewitterung wurden die Proben mit drei verschiedenen Reinigungslösungen (deionisiertes Wasser, Zitronensäurelösung und kommerzieller Floatglasreiniger) gereinigt. Die Verunreinigungen verursachten unterschiedliche Verwitterungsgrade und die Reinigungslösungen boten einen unterschiedlichen Grad an Schutz. Mit Zitronensäurelösung gereinigte Proben wiesen nach der Bewitterung eine stabilere Oberfläche auf, da weniger Verunreinigungen anhafteten und die geringsten dauerhaften Schäden auftraten.

Irreversible surface weathering of modern float glass and preventive cleaning strategies. Float glass has been subjected to artificial and natural weathering. To accelerate the glass weathering and understand the impact of specific contaminants, four model pollutants (organic, inorganic non-metallic, metallic, and saline) were applied on the examined glass samples prior to the investigation. Before and after the weathering the samples have been cleaned with three different cleaning solutions (deionized water, citric acid solution, and commercial float glass cleaner). Contaminants caused different weathering degrees and cleaning solutions provided different grades of preservation. Samples cleaned with citric acid solution presented a more stable surface after weathering by adhering less contaminants and having the lowest permanent damage.

Schlagwörter: *Floatglas, Verwitterung, Reinigung, Korrosion*

Keywords: *float glass, weathering, cleaning, corrosion*

1 Einleitung

Modernes Kalk-Natron-Silikatglas ist so optimiert, dass es gegen Umwelteinflüsse stabil ist und frühe Stadien der Veränderung weitgehend verhindert werden. Studien zeigen jedoch, dass Kalk-Natron-Silikatglas unter verschiedenen Umweltbedingungen [1] relativ schnell angegriffen werden kann. Es ist bekannt, dass Wasser die Bildung von Hydratschichten auf der Glasoberfläche erheblich beeinflusst [2], wodurch sich die Härte [3] und die Festigkeit [4] des Glases verändern. Darüber hinaus gibt es viele andere äußere Faktoren, die sich auf die Glasoberfläche auswirken und in Verbindung mit Feuchtigkeit die Veränderung beschleunigen. Im Außenbereich wird Floatglas stark durch Wasserdampf [5], Verschmutzung [6, 7] und Witterungseinflüsse beeinträchtigt. Unter Verschmutzung versteht man die Ablagerung und Ansammlung von Staub, Schwebeteilchen und organischem/anorganischem Schmutz auf der Glasoberfläche. Die jeweilige Belastung kann die Leistungsfähigkeit der Verglasung hinsichtlich Transmission, Benetzung und notwendigem Reinigungsaufwand beeinträchtigen. Veränderungen, die sich entwickeln und in unvorhersehbarer Weise zu Glaskorrosion fortschreiten können, sind ein Problem für industrielle Anwendungen [8]. Irreversible Bewitterungsmerkmale wie Delaminierungseffekte sind noch nicht gut untersucht, aber in einer kürzlich durchgeführten Untersuchung wurde Delaminierung an einem modernen Floatglas festgestellt, das sechs Monate lang in einer Küstenatmosphäre auf natürliche Weise (ohne Modellschmutz) bewittert wurde [9]. Daher sind präventive Strategien zur Optimierung der Glaslebensdauer von großem Interesse. Die Entfernung von Verunreinigungen von der Glasoberfläche kann die Lebensdauer verlängern und die Alterung/Korrosion verlangsamen.

Unsere Studie zielt darauf ab, die Auswirkungen spezifischer Arten von Verunreinigungen zu verstehen, nachteilige Effekte zu identifizieren und Reinigungsmethoden zu entwickeln, die eine frühzeitige Glaskorrosion verhindern. Die mechanische Stabilität (Festigkeit) aufgrund von Partikeleinwirkung wurde in dieser Studie nicht untersucht.

2 Materialien und Methoden

2.1 Kalk-Natron-Floatglas

Für die Untersuchung wurde Floatglas der in Tabelle 1 angegebenen Zusammensetzung verwendet. Glasproben hatten eine Größe von $10 \times 10 \text{ cm}^2$ und eine Dicke von 0,3 cm.

Tabelle 1 Berechnete chemische Zusammensetzung von Kalk-Natron-Floatglas nach der Röntgenfluoreszenzanalyse von Zentrum für Glas- und Umweltanalytik GmbH [9]

Komponente	SiO ₂	Na ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	SO ₃	TiO ₂
Massenanteil %	72,80	13,07	8,80	4,21	0,48	0,28	0,066	0,24	0,018

2.2 Model-Kontaminationen

Bei den vier ausgewählten Verunreinigungen handelte es sich um Vogelkot (organisch), Zementstaub (anorganisch-nichtmetallisch), Aluminiumpartikel (metallisch) und Natriumchlorid (salzhaltige Komponente). Sie stehen für typische natürliche Verunreinigungen, vom Menschen verursachten Staub durch Bautätigkeit, abrasiven Verschleiß von Rahmen und natürliche Meeresgisch. Alle Verunreinigungen wurden mit entionisiertem Wasser gemischt und auf die Atmosphärenseite des Floatglases aufgebracht, d. h. auf die Oberfläche, die während der Floatglasherstellung nicht mit dem Zinnbad in Berührung kam.

2.3 Reinigungslösungen und Verfahren

Erste Behandlung: vor der künstlichen und natürlichen Bewitterung wurden die Glasproben mit drei verschiedenen Reinigungsmitteln behandelt und zwar: 5 ml Schukolin® SolarSoft [10] aufgelöst in einem Liter Leitungswasser, 6 g Zitronensäure-Monohydrat, aufgelöst in einem Liter Leitungswasser und reinem deionisiertem Wasser. Der erste Grund für die Reinigung der Glasoberfläche mit verschiedenen Mitteln vor der Bewitterung besteht darin, zu verstehen, ob das Reinigungsmittel die Glasgelschicht stabilisiert oder nicht. Der zweite Grund ist, zu prüfen, ob diese Reinigungslösungen die Anhaftung der Verunreinigungen auf der Glasoberfläche beeinflussen.

Zweite Behandlung: nach der Bewitterung wurden die Proben erneut mit den selben Reinigungsmitteln gereinigt, um die Entfernung von Verunreinigungen und Oberflächenveränderungen/Korrosion zu bewerten. Diese Behandlung erfolgte durch 5-minütiges Eintauchen der bewitterten Proben in die Lösung und durch mechanisches Reinigen mit vier Wischbewegungen mit einem Mikrofasertuch bei einem Anpressdruck von etwa 5 N (eine typische Kraft in der gewerblichen Reinigung von Hand).

Dritte Behandlung: aufgrund des hohen Bewitterungsgrades wurde bei Glas, das sieben Tage lang in der Klimakammer bewittert wurde, eine zusätzliche mechanische Reinigung durchgeführt (zweite Behandlung + viermaliges gezieltes Abwischen mit einem Wattestäbchen).

2.4 Exposition im Freien

Für die Freibewitterung wurden acht Proben auf dem Dach des Zentrums für Mikro- und Nanotechnologien in Ilmenau mit einer Neigung von etwa 20° (Bild 1b) auf der Westseite des Gebäudes platziert. Die Positionierung der Verunreinigungen auf den Proben ist in Bild 1a dargestellt. Um eine Kombination verschiedener Verunreinigungen zu vermeiden und eine bessere Beobachtung einzelner Reaktionsprodukte zu ermöglichen, wurden nur zwei Verunreinigungen auf einer Glasprobe angebracht. Die Proben waren vor Regen durch ein 100 cm × 20 cm großes Glasdach geschützt. Die Expositionszeit betrug 30 Tage ohne unnatürliche Oberflächenreinigung.

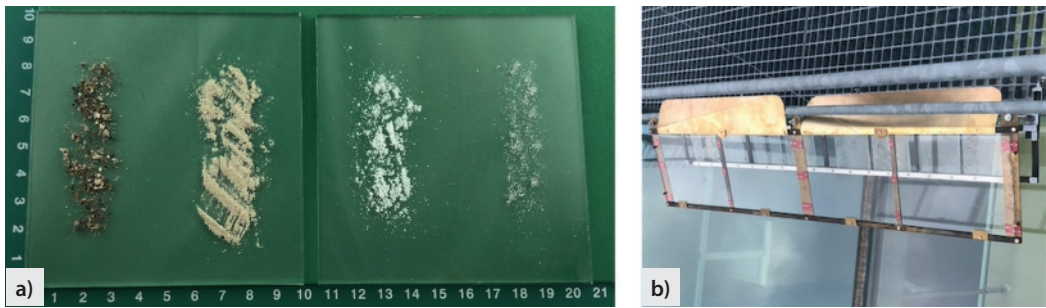


Bild 1 a) Positionierung der Verunreinigungen auf der Luftseite der Glasproben und
b) der in Ilmenau aufgestellten Proben. Maßstab auf dem linken Bild in [cm]

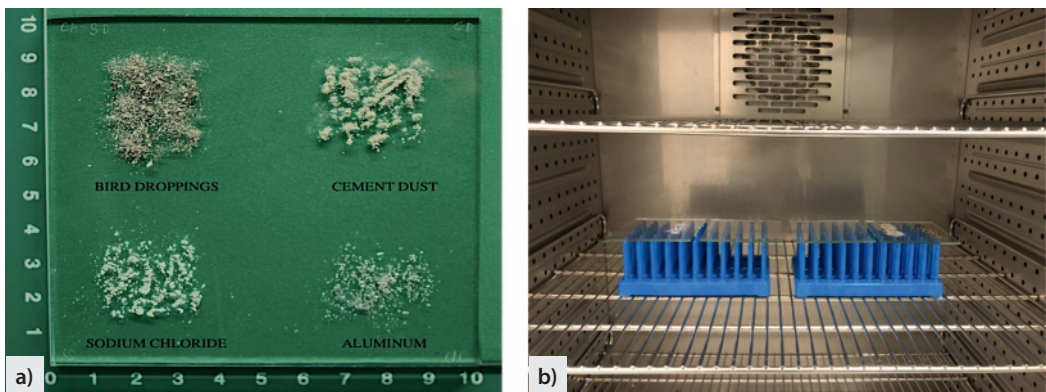


Bild 2 a) Positionierung der Verunreinigungen auf der Luftseite einer Glasprobe und
b) Glasproben in der Klimakammer

2.5 Klimakammer

Vier Glasproben wurden künstlich kontaminiert, wie in Bild 2a dargestellt. Zum Vergleich mit früheren Ergebnissen und zur Simulation möglicher langfristiger Angriffe wurden die Glasproben mit jeweils vier Flecken von Modellverunreinigungen horizontal in der Klimakammer (Bild 2b) bei einer Temperatur von 80°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 80% platziert. Die Proben wurden sieben Tage lang bewittert. Nach sieben Tagen unter diesen Bedingungen ist Floatglas auch ohne zusätzliche Verunreinigungen stets stark angegriffen.

2.6 Lichtmikroskopie

Eine AxioCam 305 Digitalkamera (Carl Zeiss Axiotech) wurde zur Lokalisierung und Identifizierung von Bewitterungsprodukten und Veränderungen der Glasoberfläche verwendet. Etwa 2350 Bilder wurden mit einer Vergrößerung von 10×5 von zwölf bewitterten Proben (30 Tage Außenbewitterung und sieben Tage Klimakammer) vor und nach der Reinigung aufgenommen. Die Auswertung der Bilder erfolgt visuell und die Ergebnisse werden nur anhand der untersuchten Fälle dieser Studie bewertet. Be-

wertungsunsicherheiten sind aufgrund des inhomogenen Bewitterungsgrades der verschiedenen Proben möglich.

2.7 Kontaktwinkel

Das MobileDrop Krüss ist ein halbautomatisches System zur Messung der Benetzbarkeit mittels des Kontaktwinkels. Der Messbereich liegt bei 5° – 175° , die Genauigkeit bei $\pm 0,1^{\circ}$ und die Auflösung der Oberflächenenergie bei $0,01 \text{ mN/m}$. Für diese Untersuchung wurde die Benetzbarkeit der Glasoberfläche mit der Kreismethode gemessen, bei der die gesamte Tropfenkontur und nicht nur einige signifikante Punkte ausgewertet werden. Für jede Probe wurde der durchschnittliche Kontaktwinkel von drei Tropfen berechnet. Jeder Tropfen wurde 10-mal gemessen.

3 Ergebnisse

3.1 Kontaktwinkel

Alle Expositionsbedingungen führten zu einer Vergrößerung des Kontaktwinkels zu DI-Wasser. Der Kontaktwinkel und damit die Benetzbarkeit der Oberfläche veränderte sich in Abhängigkeit von zwei Faktoren: Bewitterung und Reinigungsmittel (Tabelle 2). Die Kontaktwinkel wurden an gereinigten Glasproben gemessen (bei bewitterten Glasproben wurden die Verunreinigungen vor der Messung, wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, entfernt).

Mit Zitronensäure behandelte Glasoberflächen sind im Vergleich zu den anderen Reinigungsmitteln hydrophiler. Im Gegensatz dazu erhöht die Klimakammerbehandlung den Kontaktwinkel am stärksten, insbesondere bei mit entionisiertem Wasser behandeltem Glas. In diesen Fällen wird die Glasoberfläche hydrophober.

Tabelle 2 Durchschnittliche Wasserkontaktwinkel mit Standardabweichungen von unbewitterten und bewitterten Glasproben nach der Reinigung.

Reinigungsmittel	Unbewittert	Bewittert 30 Tage	Klimakammer 7 Tage
DI-Wasser	$43.7^{\circ} \pm 0.3$	$48.8^{\circ} \pm 0.1$	$61.1^{\circ} \pm 0.8$
Schukolin	$41.3^{\circ} \pm 0.4$	$45.8^{\circ} \pm 0.1$	$59.3^{\circ} \pm 0.7$
Zitronensäure	$38.4^{\circ} \pm 0.8$	$41.4^{\circ} \pm 0.1$	$55.6^{\circ} \pm 0.3$

3.2 Lichtmikroskopie

Unter dem Lichtmikroskop betrachtet, scheinen alle Verunreinigungen ausreichend an der Glasoberfläche zu haften. Im Gegensatz dazu wurden bei einem früheren Test, bei dem das Glas ungeschützt im Freien exponiert wurde, die Verunreinigungen aufgrund starker Regenfälle fast vollständig entfernt. Die Verschmutzung und Veränderung des Glases wurden anhand von lichtmikroskopischen Beobachtungen bewertet, von denen einige in Bild 3 dargestellt sind. Der relative Grad der genannten Auswirkungen wurde als gering (G), mittel (M) und hoch (H) eingestuft.

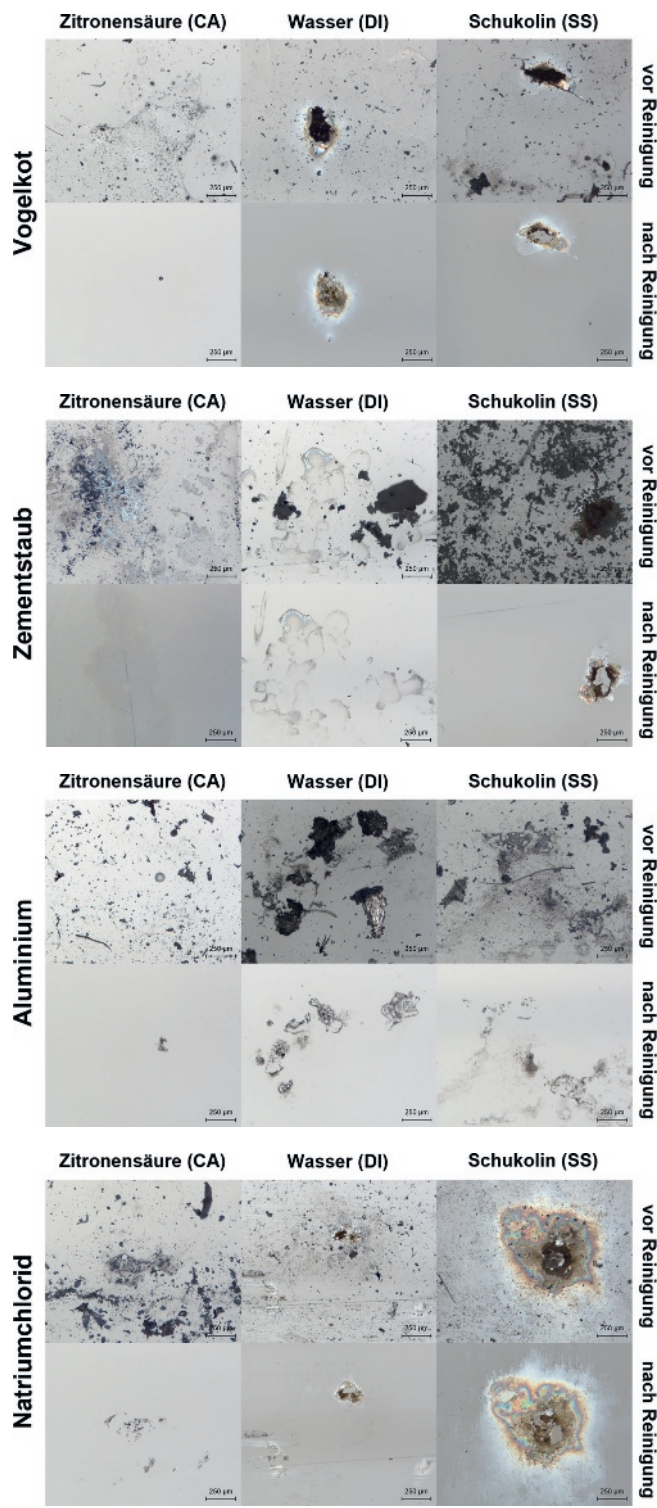


Bild 3 Floatglasproben, die einen Monat lang im Freien bewittert und mit Vogelkot, Zementstaub, Aluminiumpartikeln und Natriumchlorid verunreinigt wurden, vor (oben) und nach (unten) der Reinigung mit Zitronensäure (CA), deionisiertem Wasser (DI) oder Schukolin SolarSoft (SS).

3.2.1 Freibewitterung

Tabelle 3 zeigt die typischen, durch Verunreinigungen verursachten Bewitterungseffekte auf Glas, das mit Zitronensäure (CA), deionisiertem Wasser (DI) und Schukolin SolarSoft (SS) behandelt wurde. Entfärbungseffekte, schillernde Filme, bräunliche Oberflächen, Wülste und Ränder sind Merkmale, die sich während der natürlichen Bewitterung des Floatglases entwickelt haben und in den meisten Fällen auch nach der Reinigung noch vorhanden sind. Die in Bild 3 dargestellten Bilder zeigen einige der typischen Merkmale, die auf den verwitterten Proben vor und nach der Reinigung zu erkennen sind. Delaminationen wie bei den mit Natriumchlorid kontaminierten und mit Schukolin behandelten Proben gelten als schwere Korrosion und sind mit bloßem Auge sichtbar (gelbliche Flecken, Bild 3 NaCl SS). Wie aus Tabelle 3 und Bild 3 hervorgeht, weisen mit Zitronensäure behandelte und mit Vogelkot verunreinigte Glasproben geringere Bewitterungseffekte auf und die Oberfläche ist nicht korrodiert. Im Gegensatz dazu verursachten Zementstaub und Natriumchlorid einen stärkeren Verwitterungsgrad bei Floatglas im Freien, und die Oberfläche ist auch nach der Reinigung noch stark korrodiert. Bräunliche Oberflächen und Wölbungen sind auf im Freien bewittertem Glas immer vorhanden, aber diese Effekte können durch Reinigung entfernt werden, wenn auch nicht vollständig.

Floatglas verhält sich je nach Verunreinigung oder Reinigungsmittel sehr unterschiedlich. Alle Verunreinigungen haben die Veränderung befördert, ob gering oder stark. Delaminierungseffekte und schillernde Filme traten immer bei Proben auf, die mit deionisiertem Wasser und Schukolin behandelt wurden, und wurden auch durch Zementstaub und Natriumchlorid stark begünstigt. Aluminiumpartikel hinterlassen Flecken, die durch die Reinigungsmittel nicht entfernt werden können. In allen Fällen zeigt sich jedoch, dass die mit Zitronensäure behandelten Proben eine stabilere Oberfläche aufweisen, weniger irreversible Effekte entwickeln und die Glasoberfläche weniger stark beschädigt ist.

Tabelle 3 Bewitterungseffekte durch Vogelkot, Zementstaub, Aluminiumstaub und Natriumchlorid auf Floatglasproben, die einen Monat lang in Ilmenau im Freien gelagert wurden. Die Proben wurden vor und nach der Bewitterung mit Zitronensäure (CA), deionisiertem Wasser (DI) oder Schukolin SolarSoft (SS) behandelt; Der Bewitterungsgrad wurde mittels drei Stufen, gering (G), mittel (M) und hoch (H) bewertet

Freibewitterung	Vogelkot			Zementstaub			Aluminium			NaCl		
	CA	DI	SS	CA	DI	SS	CA	DI	SS	CA	DI	SS
Delamination	–	G	M	M	H	H	–	G	M	G	M	H
Schillern	–	M	M	H	H	H	–	M	M	G	G	H
braune Flecken	G	M	M	M	H	M	G	H	M	G	M	M
Beulen	G	G	G	G	M	M	G	H	G	G	H	M
Ränder	–	–	G	G	G	M	G	G	G	G	M	G
Degradation nach der Reinigung	G	M	M	G	H	H	G	M	M	G	M	H

3.2.2 Klimakammer

Die durch die Behandlung in der Klimakammer erzeugten Verwitterungsmerkmale sind homogener und weniger gut definiert als die durch die Freibewitterung erhaltenen. Tabelle 4 ist ein Vergleich der Merkmale nur innerhalb der Proben, die sieben Tage nach der ersten Reinigung in der Klimakammer bewittert wurden. Der durchschnittliche relative Bewitterungsgrad wird auf der Grundlage von Mehrfachbeobachtungen durch Lichtmikroskopie beurteilt. Die Ausschnitte in Bild 4 können diesen nicht repräsentativ wiedergeben.

Die in Tabelle 4 aufgeführten Merkmale sind bei den in der Klimakammer bewitterten Glasproben immer vorhanden. Vogelkot scheint wiederum die geringsten Schäden am Glas zu verursachen. In der Klimakammer haben jedoch Aluminiumpartikel die stärkste Verwitterung verursacht, die durch einen zusätzlichen mechanischen Reinigungsschritt etwas verringert werden kann. Hohe Luftfeuchtigkeits- und Temperaturwerte könnten die Auswirkungen dieses Schadstoffs auf die in der Klimakammer bewitterten Proben verstärkt haben. Zementstaub, der ebenfalls eine starke Verunreinigung darstellt, ist mechanisch schwer zu entfernen und kann manchmal Kratzer auf der Glasoberfläche verursachen (siehe Bild 4). Natriumchlorid scheint sich bereits nach der ersten Reinigung aufgelöst zu haben, so dass eine zusätzliche mechanische Reinigung nicht erforderlich wurde.

Bild 4 zeigt drei Stufen der Glasbewitterung in einer Klimakammer über sieben Tage. Stufe 1: Das Glas ist verwittert, aber nicht gereinigt. Die Verteilung der Partikel ist im Wesentlichen gleichmäßig, es gibt keine Anzeichen für eine Aggregation, und Zementierung (chemischer Niederschlag) ist kaum zu erkennen. Stufe 2: Das Glas wird nach der Bewitterung durch 5-minütiges Eintauchen in das Reinigungsmittel und viermaliges Abwischen mit einem Mikrofasertuch gereinigt. Stufe 3: Gezieltes Abwischen mit einem Wattestäbchen (viermal) wird auf den in Stufe 2 festgestellten, nicht entfernten Schmutz angewandt. Auch wenn die Partikel meist schon durch die zweite Reinigungsstufe entfernt werden, hilft die zusätzliche mechanische Reinigung in den meisten

Tabelle 4 Bewitterungseffekte durch Vogelkot, Zementstaub, Aluminiumstaub und Natriumchlorid auf Floatglasproben, die sieben Tage lang in einer Klimakammer ausgesetzt waren. Die Proben wurden vor und nach der Bewitterung mit Zitronensäure (CA), entionisiertem Wasser (DI) oder Schukolin SolarSoft (SS) behandelt; Der Bewitterungsgrad wurde mittels drei Stufen, gering (G), mittel (M) und hoch (H) bewertet

Klimmakammer	Vogelkot			Zementstaub			Aluminium			NaCl		
	CA	DI	SS	CA	DI	SS	CA	DI	SS	CA	DI	SS
Degradation nach der Reinigung	M	M	H	M	H	H	H	H	H	M	M	M
Delamination	G	G	M	G	M	H	H	H	H	M	M	H
Schillern	M	M	H	M	H	H	M	H	H	G	M	H
Ränder	M	M	H	M	M	H	H	H	H	H	H	H
+ zusätzliche mechanische Reinigung	G	G	G	G	H	H	M	M	M	G	M	M

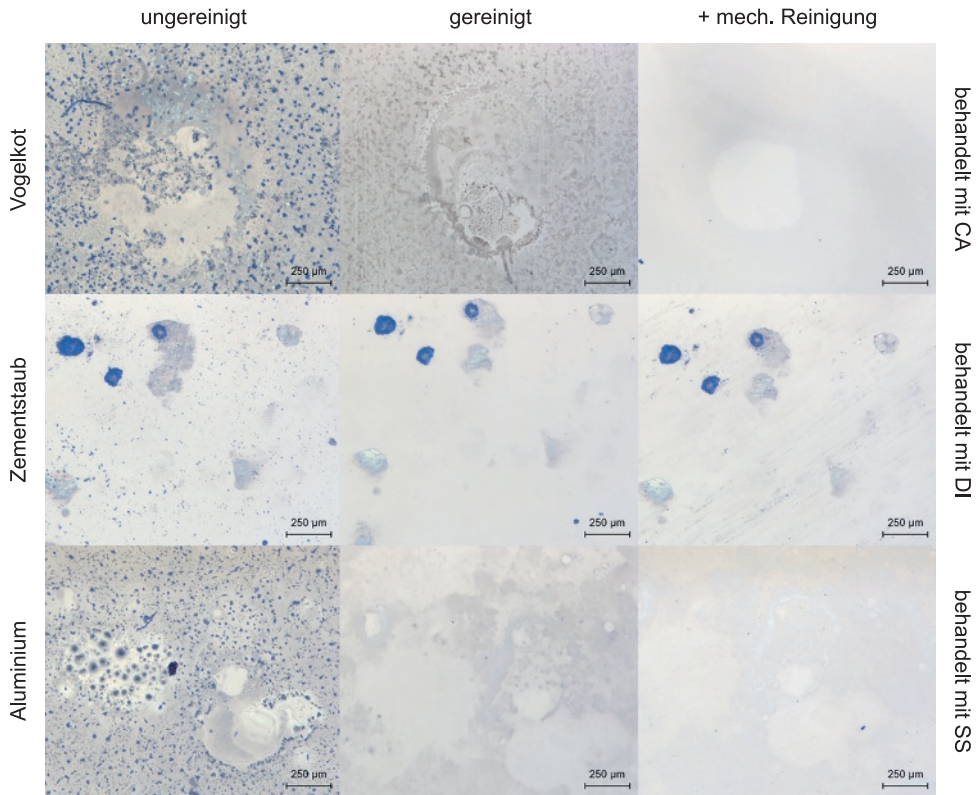


Bild 4 Floatglas, welches sieben Tage in einer Klimakammer bei 80 °C und 80 % r.H. bewittert wurde. Vorher verunreinigt mit Vogelkot (oben), Zementstaub (mittig) und Aluminium (unten); Die linke Spalte zeigt die Glasoberflächen vor der Reinigung, die mittlere Spalte nach der Reinigung und die rechte Spalte nach der mechanischen Reinigung mit einem Wattestäbchen

Fällen, weiteren anhaftenden Schmutz zu entfernen. Wenn der Schmutz stark an den Oberflächen haftet, kann die mechanische Reinigung Kratzer verursachen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Partikuläre Belastung von Glasoberflächen beeinflusst lokal die Alterung. Selbst wenn die auslösenden größeren Partikel von der Oberfläche entfernt sind, sind Agglomeration und Zementation kleiner Teilchen durch die Kapillarwirkung von an den großen Teilchen kondensiertem Wasser so stark, dass die üblichen Reinigungsvorgänge nicht alle kleinen Teilchen und anderen Oberflächenveränderungen entfernen können.

Die Bewitterung von Floatglas ist bei Glasproben, die im Freien exponiert wurden, inhomogen und bei Glas, das in einer Klimakammer exponiert wurde, überwiegend homogen. Delaminierungseffekte und schillernde Filme wurden bei Proben, die einen Monat lang im Freien exponiert waren, von allen Modellschmutzarten verursacht. Zementstaub ist eine korrosive Verunreinigung, die zu einem stärkeren Oberflächen-

abbau beiträgt und nur schwer zu entfernen ist, was manchmal zu einer zusätzlichen Beschädigung des Glases bei der mechanischen Reinigung führt. Aluminiumpartikel haben keinen großen Einfluss auf Glasproben, die für kurze Zeit im Freien gelagert werden. Beobachtungen mittels Lichtmikroskopie und Kontaktwinkelmessungen zeigen, dass mit Zitronensäure behandeltes und gereinigtes Glas die geringsten Oberflächenschäden und die höchste Schmutzentfernungsrate aufweist. Eine zusätzliche mechanische Reinigung optimiert in einigen Fällen die Reinigungseffizienz. Bei Natriumchlorid ist eine verstärkte mechanische Reinigung jedoch möglicherweise nicht erforderlich, bei stark anhaftenden Partikeln wie Zementstaub könnte sie zu Oberflächenkratzen führen.

5 Literatur

- [1] Putaud, J.-P. et al. (2010) *A European aerosol phenomenology – 3: Physical and chemical characteristics of particulate matter from 60 rural, urban, and kerbside sites across Europe* in: *Atmospheric Environment* 44, H. 10, S. 1308–1320. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.12.011>
- [2] Conradt, R. (2008) *Chemical Durability of Oxide Glasses in Aqueous Solutions: A Review* in: *Journal of the American Ceramic Society* 91, H. 3, S. 728–735. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2007.02101.x>
- [3] Soares, P. et al. (2011) *Aqueous corrosion of a commercial float glass studied by surface spectroscopies and nanoindentation* in: *Physics and Chemistry of Glasses – European Journal of Glass Science and Technology Part B* 52, H. 1, S. 25–30.
- [4] Wiederhorn, S.M. et al. (2013) *Water Penetration—Its Effect on the Strength and Toughness of Silica Glass* in: *Metallurgical and Materials Transactions A* 44, H. 3, S. 1164–1174. <https://doi.org/10.1007/s11661-012-1333-z>
- [5] Majérus, O. et al. (2020) *Glass alteration in atmospheric conditions: crossing perspectives from cultural heritage, glass industry, and nuclear waste management* in: *Materials Degradation* 4, H. 1, S. 27. <https://doi.org/10.1038/s41529-020-00130-9>
- [6] Ilse, K.K. et al. (2018) *Fundamentals of soiling processes on photovoltaic modules* in: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 98, S. 239–254. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.015>
- [7] Reiß, S. et al. (2021) *Chemical changes of float glass surfaces induced by different sand particles and mineralogical phases* in: *Journal of Non-Crystalline Solids* 566, S. 120868. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2021.120868>
- [8] Ullah, A. et al. (2020) *Investigation of soiling effects, dust chemistry and optimum cleaning schedule for PV modules in Lahore, Pakistan* in: *Renewable Energy* 150, S. 456–468. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.090>
- [9] Strugaj, G.; Herrmann, A.; Rädlein, E. (2021) *AES and EDX surface analysis of weathered float glass exposed in different environmental conditions* in: *Journal of Non-Crystalline Solids* 572, S. 121083. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2021.121083>
- [10] HERWETEC® GmbH (2013) *Technisches Merkblatt: TMB Schukolin SolarSoft*.