

Verschmutzung von Solarmodulen - ein Problem für den wirtschaftlichen Ertrag

Wissenschaftliche Zusammenfassung aktueller Studien

Autor: Dr. Ralf Thies

Auftraggeber: PViQ GmbH

Datum: 19.01.2026

In den letzten 30 Jahren sind zahlreiche wissenschaftliche Studien entstanden zum sogenannten *soiling*, dem allmählich sich verdichtenden Schmutzfilm auf der Oberfläche von Photovoltaik-Anlagen. Ging man ursprünglich davon aus, dass natürliche Regengüsse, Staub und Schmutz hinreichend abwaschen, zeigt sich nun, dass die Ertragsverluste erheblich sind, wenn Panels nicht regelmäßig gereinigt werden.

Eines der ältesten und renommiertesten Testzentren für Photovoltaikanlagen befindet sich in der Schweiz: Die Hochschule für Technik und Architektur in Burgdorf unterhält seit 1994 einen Solargenerator auf dem Dach des Fachbereichs für Elektrotechnik. Die Wissenschaftler bemerkten nach fünf Jahren einen deutlichen Leistungsabfall der Anlage: Je nach untersuchtem Bereich zwischen 3,1 und 13,8 Prozent, im Schnitt 7,6 Prozent. Grund war die allmählich zunehmende Verschmutzung der Solarpanels.¹

Der folgende Text wertet verschiedene Studien aus, die sich mit der Frage beschäftigen, ob und in welchem Umfang eine regelmäßige Reinigung von Solaranlagen dieser Verschmutzung entgegenwirken kann und wirtschaftlich sinnvoll ist.

Solarstrom im Markt aktuell bei 15 Prozent

Zunächst einige Zahlen, um die Bedeutung des Problems für den deutschen Strommarkt aufzuzeigen: Im Jahr 2025 stammten etwa 15 Prozent des gesamten in Deutschland erzeugten Stroms aus Photovoltaikanlagen. Nach aktuellen Auswertungen des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme (ISE) wurden im Jahresverlauf insgesamt rund 87 TWh Solarstrom erzeugt, davon wurden 71 TWh ins öffentliche Netz eingespeist. Hieran waren einzelne Anlagen auf Hausdächern ebenso beteiligt wie große Freiflächen-Solarfabriken. Da die Kosten für die Herstellung von Photovoltaik-Modulen beständig

¹ Häberlin, Heinrich, und Renken, Christian: Allmähliche Reduktion des Energieertrags von Photovoltaikanlagen durch permanente Verschmutzung und Degradation, in: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins 90/1999, S. 28.

sinken, die Stromkosten hingegen steigen, zeigt der Markt für Solarstrom eine große Dynamik und rasantes Wachstum.² Um die Ausbeute von PV-Anlagen zu optimieren und den Profit zu steigern, sucht die Solarindustrie beständig nach Strategien, Energieverluste zu minimieren.

Leistungskiller Soiling

Die Leistung von Photovoltaik-Anlagen wird durch Staub, Schmutz und andere Verunreinigungen signifikant eingeschränkt. Zu den Ablagerungen gehören:

- Pflanzenpollen
- Emissionen aus Autoverkehr oder Industrie
- landwirtschaftliche Emissionen wie Ackerstaub und Ammoniak aus Tierhaltung
- Eiweißablagerungen durch Insekten, insbesondere bei Hitze
- Vogelkot

Diese Niederschläge aus der Luft lagern sich beispielsweise durch Tau oder Windeintrag auf der Oberfläche der Paneele ab, sie verdichten sich schrittweise aufgrund des Zusammenwirkens verschiedener physikalischer Mechanismen wie Resuspension, Deposition und Zementierung. Die Schmutzpartikel zerstreuen, reflektieren und absorbieren das einfallende Sonnenlicht, dies vermindert die Intensität der Energie, die letztlich in der Solarzelle ankommt. Selbst wenn keine besonderen Wetterereignisse wie Regen oder Wind einwirken, schwebt immer eine gewisse Anzahl von Partikeln in der Luft (zwischen 15 und 45 µg/Kubikmeter), durch die der Verschmutzungsgrad der Panels allmählich zunimmt. Qualität und Art der Verschmutzung sind abhängig von der geografischen und klimatischen Situation der PV-Anlage. Prinzipiell unterscheidet man zwei Arten von Verschmutzung: Das *soft soiling*, einen durchgehenden

² Vgl. Wirth, Harry, Fraunhofer ISE, Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland, Download von www.pv-fakten.de, Fassung vom 13.12.2025.

Staub- und Schmutzfilm über das gesamte Modul hinweg, und das *hard soiling*, einen festen Belag, der meist am unteren Rand des Panels entsteht. Dort siedeln sich Moose, Flechten, Pilze und Algen an, sie bilden einen festen, Licht undurchlässigen Bewuchs. Auch Vogelkot gehört zu den hartnäckigen Verschmutzungen.³

Verschmutzung und Degradation

In der eingangs erwähnten Schweizer Studie wurde beobachtet, dass sich im Laufe der Zeit am unteren Rand der Solarpanels ein permanenter Verschmutzungstreifen bildet, der eine allmähliche Reduktion des Energieertrags der Anlage bewirkt.⁴ Die durchschnittliche Reduktion (*degradation*), bezogen auf die gesamte PV-Anlage, betrug 7,6 Prozent. Auf dem beobachteten Verschmutzungstreifen etablierten sich teilweise bereits Pionierpflanzen (Moose und Flechten). Sie verstärkten die Entwicklung des Schmutzstreifens, indem sie organischen und anorganischen Staub zurückhielten. Dabei zeigte es sich, dass die Entwicklung des Schmutzstreifens im Verlauf der Zeit nicht kontinuierlich erfolgt, sondern sich nach zunächst langsamem Beginn deutlich beschleunigt.

Reinigung durch Regen?

Wie eine Studie von Marta Redondo et.al. anführt, kann ein schwacher Regen die Verschmutzung negativ beeinflussen, indem der leichte Regenfall Staubpartikel aus der Luft bindet und diese auf den

³ Ausführlicher dazu: Borah, Pankaj, Micheli, Leonardo und Sarmah, Nabin, Analysis of Soiling Loss in Photovoltaic Modules: A Review of the Impact of Atmospheric Parameters, Soil Properties, and Mitigation Approaches, in: Sustainability 2023, 15, 16669. <https://doi.org/10.3390/su152416669>

⁴ Haeblerlin, Heinrich, und Renken, Christian, Allmähliche Reduktion des Energieertrags von Photovoltaikanlagen durch permanente Verschmutzung und Degradation, in: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen 1999, Heft 10, S. 27.

Paneelen hinterlässt.⁵ Selbst starke Regengüsse können die Staub- und Schmutzansammlungen auf der Oberfläche der Paneele nicht vollständig abwaschen. Der permanente Film, das *soft soiling*, wird leicht reduziert, keinesfalls komplett entfernt. Ein Tag mit Regenfällen entfernt lediglich 10 Prozent der auf der Oberfläche akkumulierten Verschmutzung, 90 Prozent bleiben nach dem Regenfall zurück. Zudem häufen sich Schmutzpartikel an der unteren Modulkante, aus denen allmählich das *hard soiling* entsteht, der Schmutz- und Moosbesatz am unteren Rand der Module. Der Regen spült organische Bestandteile von oben nach unten, wo sie sich an der Abbruchkante sammeln und zu einer dichten Schicht verfestigen.

Auch in diesem Fall waschen Regenfälle nur einen kleinen Teil der angesammelten Schmutzmassen ab. Eine Vergleichsstudie für Solaranlagen in Europa stellt fest, dass dauerhafte Ertragsverluste durch Verschmutzung (*soiling losses*) entstehen, wenn nicht regelmäßig manuelle Reinigungen durchgeführt werden.⁶ Hartnäckige Verschmutzungen können sogar zu einer dauerhaften und irreversiblen Schädigung der Solarmodule führen: Werden Reinigungsarbeiten vernachlässigt, lassen sich Schmutzfilme, Pilze und Moose schließlich gar nicht mehr entfernen.⁷

Ertragsverluste im Milliardenbereich

Der jährliche Verlust in der Energieproduktion aufgrund von Verschmutzung liegt bei durchschnittlich 3 bis 4 Prozent. Professionelle Reinigung ist unabdingbar, weil die Verschmutzung ständig zunimmt (*soiling accumulation*) und die Paneele dauerhaft beeinträchtigt, so das Fazit einer umfangreichen Studie der

⁵ Redondo, Marta et.al., Review and Comparison of Methods for Soiling Modeling in Large Grid-Connected PV Plants. Sustainability 2024, 16, 10998. <https://doi.org/10.3390/su162410998>

⁶ Fernández Solas, Álvaro, et.al., Photovoltaic soiling loss in Europe: Geographical distribution and cleaning recommendations, in: Renewable Energy 239/2025, S. 7.

⁷ Ilse, Klemens, et.al., Techno-Economic Assessment of Soiling Losses and Mitigation Strategies for Solar Power Generation, Joule (2019), S.2, <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.08.019>

International Energy Agency aus dem Jahr 2022.⁸ Eine spanische Studie schätzt die Ertragsverluste aufgrund von Verschmutzungen auf 3 Milliarden Euro weltweit im Jahr 2018, also zu einem Zeitpunkt, als noch deutlich weniger Solaranlagen in Betrieb waren.⁹ Auch die Studie von Klemens Ilse et.al. bestätigt die Verlustrate von 3 bis 4 Prozent und beziffert den jährlichen Ertragsverlust in konservativer Schätzung auf 3 bis 5 Milliarden Euro. Diese Zahlen werden sich nach Einschätzung der Autoren in den nächsten Jahren noch deutlich steigern.¹⁰

Zu bedenken ist auch der in den zitierten Studien aufgeführte Effekt der Delamination, also dauerhaften Schädigung der Solarmodule durch Verschmutzung. Außerdem können mittels einer professionellen Reinigung sekundäre Defekte und Schäden (lose Klammern oder Kabel etc.) an den Solarmodulen entdeckt werden. Die Reinigung ist damit zugleich Teil einer kostenmindernden Wartung der gesamten Anlage, wodurch sich die Persistenz der Paneele erhöhen lässt. Dies führt zu einer längeren Lebensdauer und einer Streckung der Investitionsintervalle.¹¹

Reinigung steigert Ertrag

Der Kosteneffekt und die Profitabilität einer Reinigung hängen von drei Faktoren ab: Der Höhe des Energieverlusts durch Verschmutzung, dem Strompreis und den Reinigungskosten. Eine europaweite Studie hat mehrere europäische Länder mit unterschiedlichen klimatischen Voraussetzungen, unter anderen Spanien, Frankreich, die

⁸ International Energy Agency, Soiling Losses - Impact on the Performance of Photovoltaic Power Plants, 2022, S. 108.

⁹ Micheli, Leonardo, et.al., Economics of seasonal photovoltaic soiling and cleaning optimization scenarios, S. 2, MPRA Paper No. 105229, posted 31 Jan 2021 11:02 UTC Online at <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/105229/>

¹⁰ Ilse, Klemens, et.al., Techno-Economic Assessment of Soiling Losses and Mitigation Strategies for Solar Power Generation, Joule (2019), S.3, <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.08.019>

¹¹ International Energy Agency, Quantification of Technical Risks in PV Power Systems, 2021, S. 76 - 94.

Niederlande und Deutschland, verglichen in Hinblick auf die Effektivität von Reinigungsmaßnahmen. Sie kommt zu dem Schluss, dass unabhängig vom Strompreis, den Kosten der Reinigung und unterschiedlichen geografischen und klimatischen Verhältnissen eine regelmäßige Reinigung in der Kosten-Nutzen-Rechnung von Vorteil ist (*soiling mitigation*).¹² Auch für Deutschland kommen die Autoren zu dem Fazit, dass eine regelmäßige Reinigung den Ertrag von PV-Anlagen deutlich steigert.

Wie oft eine Reinigung erfolgen sollte, haben Leonardo Micheli et.al. anhand von Modellrechnungen untersucht, die mit unterschiedlichen Reinigungskosten und Strompreisen operieren. Auch Klemens Ilse et.al. haben sich mit der Frage bestmöglicher Reinigungsintervalle beschäftigt und diese im internationalen Vergleich für verschiedene Länder errechnet. Für Deutschland gibt Ilse eine optimale Reinigungsfrequenz von minimal einer bis maximal drei Reinigungen pro Jahr an. Zu dem gleichen Ergebnis von ein bis drei Reinigungen jährlich kommen auch Micheli et.al.¹³

Fazit: Ein bis drei Reinigungen pro Jahr

Demgegenüber können vorbeugende Technologien wie etwa Abdeckungen (*anti-soiling coatings*) zwar die Verschmutzungsrate reduzieren, aber nicht die Reinigung ersetzen, so die Autoren der Studien. Klemens Ilse gibt den Reduktionsgrad der Verschmutzung durch *anti-soiling coatings* mit 20 bis 50 Prozent an, wohingegen eine professionelle Reinigung einen Effekt von 95 Prozent erzielt. Seine Schlussfolgerung: Keine passive *anti-soiling*-Technologie kann die regelmäßige Reinigung ersetzen. Auch Michele konstatiert: Selbst bei

¹² Fernández Solas, Álvaro, et.al., Photovoltaic soiling loss in Europe: Geographical distribution and cleaning recommendations, in: Renewable Energy 239/2025, S. 12.

¹³ Ilse, Klemens, et.al., Techno-Economic Assessment of Soiling Losses and Mitigation Strategies for Solar Power Generation, Joule (2019), S.4, <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.08.019>

Micheli, Leonardo, et.al., Economics of seasonal photovoltaic soiling and cleaning optimization scenarios, S. 15, MPRA Paper No. 105229, posted 31 Jan 2021 11:02 UTC Online at <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/105229/>

einem jährlichen prozentualen Verlust durch Verschmutzung von nur 2,8 Prozent erzielte die regelmäßige Reinigung einen signifikanten wirtschaftlichen Überschuss mit einer Profitsteigerung bis zu 3,6 Prozent.¹⁴

Sämtliche Studien belegen, dass eine regelmäßige Reinigung die effektivste Methode gegen Verschmutzungen ist. Dies gilt auch für regenreiche Länder wie Deutschland, da Regen allein nicht die nötige Reinigungskraft besitzt und langfristig sogar zur Verschmutzung beitragen kann. Die Strategie, durch regelmäßige professionelle Reinigung Verschmutzungen zu minimieren, birgt mehrere Vorteile: Sie steigert die Gewinne der Anlagen-Besitzer, erhöht die Effektivität der Stromerzeugung und vergrößert den Anteil von Solarstrom an der Energieerzeugung.

Ausgewertete Studien:

Bessa, Joao Gabriel et.al., Monitoring photovoltaic soiling: assessment, challenges, and perspectives of current and potential strategies, in: *iScience* 24 (3) / 2021.

Borah, Pankaj, Micheli, Leonardo und Sarmah, Nabin, Analysis of Soiling Loss in Photovoltaic Modules: A Review of the Impact of Atmospheric Parameters, Soil Properties, and Mitigation Approaches, in: *Sustainability* 2023, 15, 16669.

<https://doi.org/10.3390/su152416669>

Fernández Solas, Álvaro, et.al., Photovoltaic soiling loss in Europe: Geographical distribution and cleaning recommendations, in: *Renewable Energy* 239 / 2025.

Gostein, Michael, Riley Caron, J. und Littmann, Bodo, Measuring Soiling Losses at Utility-scale PV Power Plants, in: *Scispace* 2014, <https://scispace.com/pdf/measuring-soiling-losses-at-utility-scale-pv-power-plants-1v9tu8imqk.pdf>

Häberlin, Heinrich, und Renken, Christian: Allmähliche Reduktion des Energieertrags von Photovoltaikanlagen durch permanente Verschmutzung und Degradation, in: *Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins* 90/1999.

¹⁴ Micheli, Leonardo, et.al., Economics of seasonal photovoltaic soiling and cleaning optimization scenarios, S. 14, MPRA Paper No. 105229, posted 31 Jan 2021 11:02 UTC Online at <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/105229/>

Ilse, Klemens, et.al., Techno-Economic Assessment of Soiling Losses and Mitigation Strategies for Solar Power Generation, Joule (2019), <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.08.019>

International Energy Agency, Soiling Losses - Impact on the Performance of Photovoltaic Power Plants, 2022.

International Energy Agency, Quantification of Technical Risks in PV Power Systems, 2021.

Micheli, Leonardo, et.al., Economics of seasonal photovoltaic soiling and cleaning optimization scenarios, MPRA Paper No. 105229, posted 31 Jan 2021 11:02 UTC Online at <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/105229/>

Wirth, Harry, Fraunhofer ISE, Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland, Download von www.pv-fakten.de, Fassung vom 13.12.2025.