



# Hagelschäden an Photovoltaikanlagen

**Analyse des Grosshagelereignisses im Sommer 2021** | Hagelereignisse bergen ein signifikantes Risiko für PV-Anlagen. Eine umfassende Untersuchung des Grosshagelsommers 2021 in der Schweiz hat gezeigt, dass viele Schäden auf den ersten Blick unsichtbar bleiben, die Leistung aber langfristig reduzieren können. Ein genauer Blick ist daher unerlässlich.

ALEXANDRE VOIROL

**M**it dem Klimawandel nehmen die Häufigkeit und Intensität extremer Wetterereignisse zu, darunter auch Hagelstürme mit grossem Schadenspotenzial. Gleichzeitig gewinnt die Photovoltaik im Energiemix an Bedeutung.

Hier werden die Auswirkungen auf PV-Anlagen eines äusserst schweren Hagelereignisses vorgestellt, das im Sommer 2021 in der Schweiz stattfand. Grundlage der Analyse sind Daten von über 500 Anlagen, die mit dem mobilen PV-Labor des Instituts für Solartechnik der Ostschweizer Fachhochschule OST untersucht wurden. Ziel ist es, typische Schadensbilder zu identifizieren, Einflussfaktoren zu bestimmen und daraus Empfehlungen für das Vorgehen nach einem Hagelereignis, die zukünftige

Auslegung sowie die Konstruktion robuster PV-Systeme abzuleiten.

## Hagelschäden an PV-Anlagen

Die Widerstandsfähigkeit von PV-Systemen gegen Hagel ist zentral, denn Hagelschäden können an PV-Modulen in Form von Glasbrüchen oder Mikrorissen in den Solarzellen auftreten. Während Glasbrüche leicht zu erkennen sind, bleiben Zellrisse oft unentdeckt und können die Leistung über längere Zeiträume reduzieren und im schlimmsten Fall sogar zu sicherheitsrelevanten Schäden führen. Eine systematische und messtechnisch gestützte Schadensanalyse ist daher nötig, um konstruktive Schwachstellen zu identifizieren und technologische Verbesserungen anzustossen.

## Hagelanforderungen und Normensituation

Die Auslegung von PV-Systemen bezüglich ihrer Widerstandsfähigkeit gegenüber Hagel basiert in der Schweiz auf der Norm SIA 261-1. Diese wird zurzeit überarbeitet, um neue meteorologische Erkenntnisse zu berücksichtigen. Auswertungen der Hagelereignisse der letzten 20 Jahre von MeteoSCHWEIZ zeigen, dass bei Wiederkehrperioden von 20 und 50 Jahren mit wesentlich grösseren Hagelkörnern gerechnet werden muss (**Bild 1**).

Die Gebäudeversicherungen werden mit der Publikation der neuen SIA 261 fast überall den Nachweis einer Hagelresistenz von mindestens Hagelwiderstandsklasse 4 fordern (HW4 entspricht einer Korngrösse von 4 cm).

Dieser Nachweis wird mit einem Eintrag im Hagelregister erbracht [1].

Bislang ist die Anzahl entsprechend zertifizierter Module beschränkt. In den vergangenen Jahren haben besonders kleinere Hersteller reagiert und bieten bereits Produkte mit HW4- oder HW5-Zertifizierung an. Doch auch die grossen Anbieter beschäftigen sich nun mit dem Thema, da Hagelschäden nicht nur in der Schweiz zunehmen.

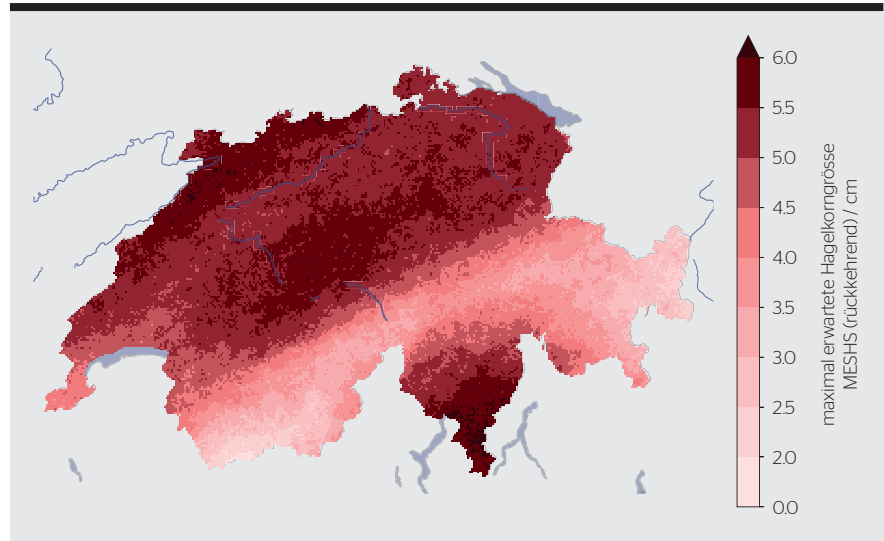
Die Entwicklung hin zu immer dünneren Gläsern (2+2 mm Doppelglas) ist in Bezug auf den Hagelwiderstand ungünstig. Gute Ergebnisse bei HW4-Prüfungen sind jedoch für Module mit verstärktem Frontglas (3,2 mm) und Rückseitenfolie oder für einen Glas-Glas-Aufbau mit mindestens 2,5 mm Frontglas möglich.

### Das Hagelereignis von 2021

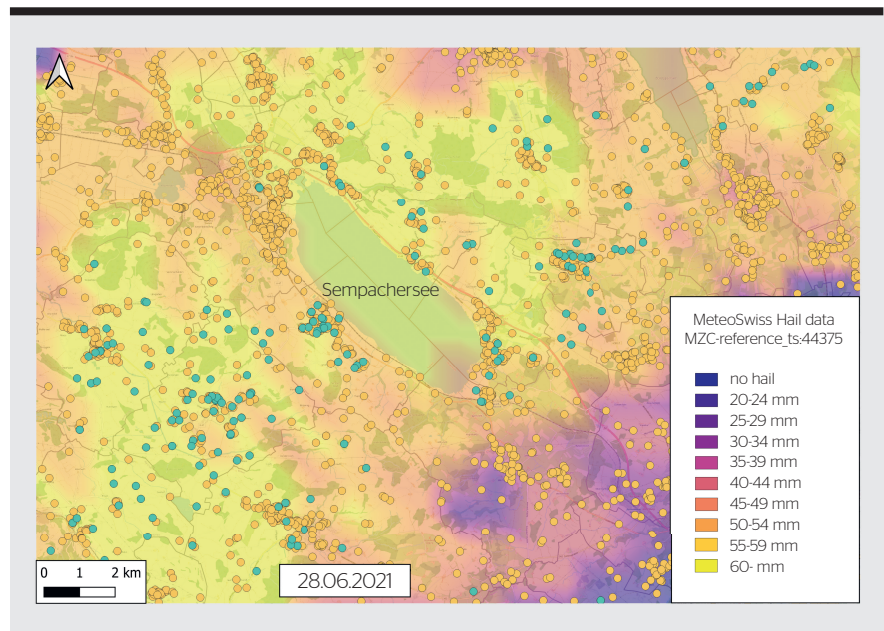
Um das Hagelereignis des Jahres 2021 einzuordnen, wurde es im Kontext des gesamten Bestands an PV-Anlagen in der Schweiz bewertet. Dazu wurden die bis Ende 2021 installierten Anlagen in einem Geoinformationssystem erfasst und mit den von MeteoSchweiz gemessenen Hagelwerten charakterisiert. Zudem wurden die gemessenen Anlagen kartiert. **Bild 2** zeigt die Region um den Sempachersee (LU) und die maximal zu erwartende Hagelkorngrösse. Die gelben Punkte repräsentieren alle bis Ende 2021 vorhandenen PV-Anlagen; die grünen Punkte stellen die gemessenen Anlagen dar. Das Bild gibt eine Vorstellung davon, wie viele Anlagen in diesem kleinen Ausschnitt der Schweiz vom Hagel betroffen waren. Für die Auswertung der betroffenen Anlagen in der gesamten Schweiz wurden die Hagelereignisse vom 18., 21. und 28. Juni sowie vom 24. Juli 2021 berücksichtigt.

Bis Ende 2021 waren etwas mehr als 136 000 PV-Anlagen errichtet. Etwa 43 000 PV-Anlagen waren in einem Gebiet, das an mindestens einem der vier Tage im Jahr 2021 von Hagelkörnern mit einem Durchmesser von über 3 cm betroffen war, und etwas mehr als 17 000 Anlagen sogar in einem Gebiet mit Korngrössen über 5 cm, also fast 15% aller bis dahin installierten Anlagen. Die Leistung dieser Anlagen entspricht mit 414 MW fast dem gesamten Zubau des Jahres 2020 [2].

Bis Juni 2023 wurden insgesamt 511 PV-Anlagen mit dem mobilen PV-



**Bild 1** Wiederkehrwerte für spezifische Hagelkorngrössen für eine 50-jährige Periode.



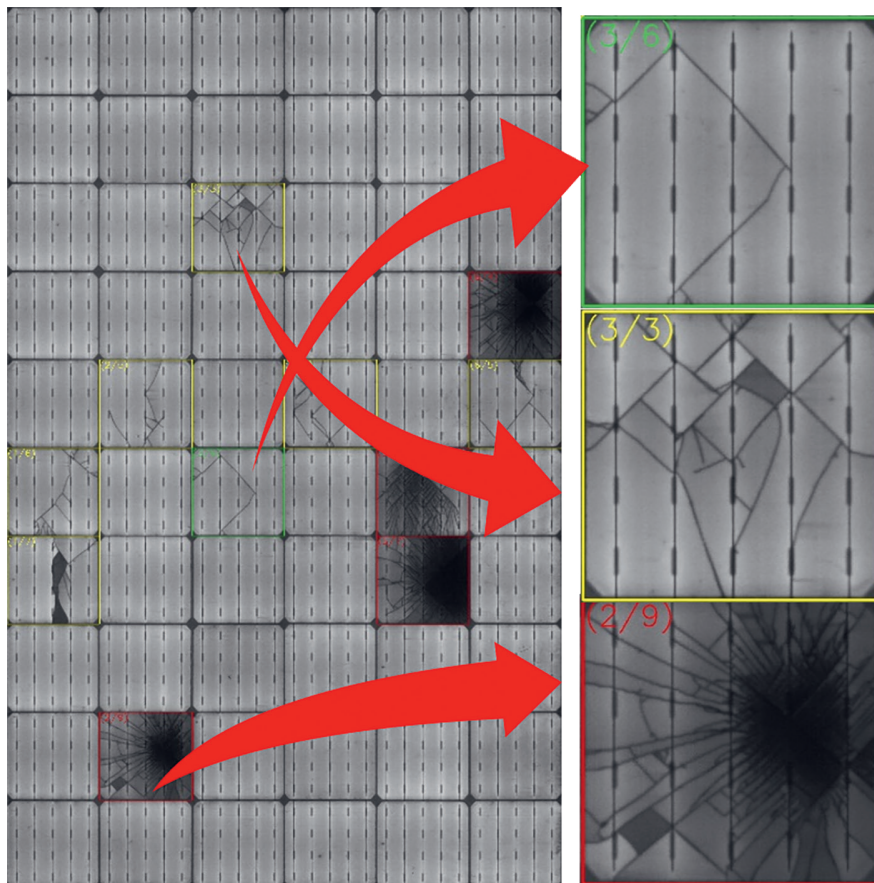
**Bild 2** Kartenausschnitt des Sempachersees im Kanton Luzern mit der maximal zu erwartenden Hagelkorngrösse in mm, die gemessenen PV-Anlagen (grüne Punkte) sowie die bis Ende 2021 gebauten PV-Anlagen (gelbe Punkte).

Labor vermessen, die von Hagel betroffen waren. Davon konnten 344 Anlagen mit Daten von MeteoSchweiz und dem Bundesamt für Energie komplett charakterisiert werden.

Mittels Elektrolumineszenzbild (EL) können bei den Untersuchungen mit dem mobilen PV-Labor unsichtbare Schäden sichtbar gemacht werden. Meist entstehen bei PV-Modulen bei Beschädigung der Zellen zuerst Mikrorisse. Diese trennen betroffene Zellbereiche zunächst nicht ab, was sich aber mit der Zeit und der Alterung der Mikrorisse ändern und zu

einem Leistungsverlust führen kann. Deshalb ist eine Leistungsmessung oder eine günstige Infrarot-Drohnen-thermografie für die Schadensaufnahme nach einem Hagelereignis nur bedingt geeignet.

Die mit dem PV-Labor getesteten Module können anhand der EL-Bilder in verschiedene Kategorien eingeteilt werden (**Bild 3**). Zunächst werden die einzelnen Zellen der Module entsprechend der potenziell durch die Risse abgetrennten Zellfläche in eine von vier Kategorien eingestuft. Zellen mit maximal 1% potenziell



**Bild 3** Einteilung der Zellen nach zukünftig potenziell abgetrennter Fläche [3].

abgetrennter Zellfläche werden grün markiert. Zellen mit einer zukünftig potenziell inaktiven Fläche von 1 bis 10% werden gelb markiert und Zellen mit sehr kritischen Rissen und einer potenziell abgetrennten Zellfläche von mehr als 10% rot markiert. Danach werden die Module basierend auf der Anzahl defekter Zellen in den Kategorien Grün, Gelb und Rot in die Modulklassen A bis D eingeteilt. Dies erfolgt gemäss den Kriterien in **Tabelle 1** [4].

### Betroffene Anlagen

Die 344 vollständig charakterisierten Anlagen (**Tabelle 2**) wurden vermessen, da sie aufgrund eines Defekts an der Anlage oder an einem Gebäude gemeldet wurden. Bei 180 der Anlagen (52%) wurde mindestens ein Modul mit einem Glasbruch festgestellt. Bei 9% der Anlagen wurde angegeben, dass kein Glasbruch vorlag. Bei den restlichen 39% wurde diese Angabe nicht erfasst, weil es keinen Glasbruch gab oder weil keine Angabe dazu gemacht wurde. Mit dem mobilen PV-Labor wurden insge-

samt 5209 Module der etwa 126 000 in diesen Anlagen verbauten Module stichprobenartig vermessen und ausgewertet. Der Median der Stichprobengrösse beträgt 7%, was durchschnittlich knapp 10 Modulen pro Anlage entspricht.

Die Daten von angebauten und integrierten PV-Anlagen auf Schrägdächern wurden ausgewertet, da sie 78% der vermessenen Anlagen ausmachen. Berücksichtigt wurden Daten über alle Baujahre mit eindeutig definierten Kategorien der Neigung und Ausrichtung. Ost-West ausgerichtete Anlagen konnten nicht berücksichtigt werden, da beide Ausrichtungen oft zusammen gemessen wurden. Die vermessenen Anlagen sind meist nach Süden ausgerichtet, mit einer Neigung zwischen 10° und 20°.

### Einflussgrößen auf das Schadensbild

Die Datenanalyse zeigt, dass ab einer Hagelkorngrösse von 4 cm eine signifikante Zunahme der Zellschäden eintritt. Besonders kritisch wird der Einfluss ab einer Grösse von 5 cm. Auffällig

ist, dass Zellrisse oft auch in PV-Anlagen ohne sichtbaren Glasbruch vorkommen. Dies unterstreicht die Notwendigkeit messtechnischer Methoden wie EL für eine vollständige Schadensaufnahme. Allgemein zeigt sich aber auch, dass die Schäden eine hohe Streuung aufweisen.

Ein Vergleich nach Installationsjahr zeigt, dass neuere Module (Baujahr ab 2018) tendenziell weniger kritische Zellrisse der Klasse D aufweisen. Gleichzeitig treten bei diesen Modulen öfter Glasbrüche auf. Diese Beobachtung könnte auf Fortschritte in der Zellverschaltung und -herstellung hinweisen, bei gleichzeitiger Stagnation im Bereich der Glasmechanik. Besonders bei monokristallinen Modulen ist dieser Trend ausgeprägt.

Deutliche Glasbrüche wurden überwiegend ab einer Korngrösse von 5 cm registriert. Bei noch grösseren Körnern (über 6 cm) nahmen sowohl die Häufigkeit als auch die Intensität der Glasbrüche signifikant zu. Bei kleineren Hagelkörnern (unter 5 cm) spielten die Ausrichtung und Neigung der Module eine wichtigere Rolle: Betroffen waren vor allem Anlagen mit geringen Neigungen sowie Anlagen, die der Sturmfront ausgesetzt waren.

Begleitende Langzeitmessungen zeigen, dass Module mit Hagelschäden in der Klasse D kontinuierlich an Leistung verlieren können. Eine exemplarische Anlage mit Jinko-Modulen vom Typ JKM260PP-60 verzeichnete zwischen 2022 und 2024 eine Leistungsreduktion von durchschnittlich 4,8% auf den gemessenen Modulen. Dies verdeutlicht die Relevanz frühzeitiger Diagnostik und kontinuierlicher Ertragsüberwachung nach Extremereignissen.

### Handlungsempfehlungen und Ausblick

Die Auswertung des Hagelereignisses von 2021 liefert wertvolle Hinweise für eine resiliente Weiterentwicklung der PV-Technologie. Momentan empfiehlt es sich, nach dem Swissolar-Merkblatt Nr. 17 «Umgang mit Hagelschäden an Solaranlagen» [4] vorzugehen. Wenn nach einem starken Hagel (>40 mm) ein Glasbruch erfolgt ist, muss das beschädigte Modul ersetzt und der Rest der Anlage auf Hagelschäden untersucht werden. Auch ohne Glasbruch sollte eine Meldung an die Versicherung erfolgen, damit diese weitere Schritte

zur Identifizierung von möglichen Schäden unternehmen kann.

Aktuell wird im Auftrag der Präventionsstiftung der Kantonalen Gebäudeversicherungen in einem Projekt mit dem Supsi untersucht, unter welchen Bedingungen eine genauere Prüfung der Anlage und eventuell ein Ersatz nötig sein könnte [5].

Bei PV-Anlagen sollte in mehrfacher Hinsicht auf eine robuste Auslegung geachtet werden. Dies betrifft nicht nur die Dimensionierung des Glases, sondern auch die Zellarchitektur, Laminaaufbauten und Montagesysteme. Betreibende, Installationsbetriebe und Versicherungen sind daher aufgefordert, Hagelresistenz systematisch in die Anlagenkonzeption zu integrieren.

Die Revision der SIA 261 sowie der Trend zu zertifizierten HW4-Modulen zeigen eine wachsende Sensibilisierung für diese Thematik. Langfristig sollte die Hagelbeständigkeit als eigenständige Designanforderung neben elektrischen und thermischen Kriterien etabliert werden. Zudem sind weitere empirische Studien nötig, um die Wechselwirkungen zwischen Alterung, Mikrorissbildung und Leistungsverlusten noch besser zu verstehen.

| Modulklasse | Zellkategorie |       |       | Total markierte Zellen |
|-------------|---------------|-------|-------|------------------------|
|             | grün          | gelb  | rot   |                        |
| A           | <10 %         | 0 %   | 0 %   | <10 %                  |
| B           | <20 %         | <10 % | 0 %   | <20 %                  |
| C           | ≥20 %         | ≥10 % | <10 % | <30 %                  |
| D           | –             | –     | ≥10 % | ≥30 %                  |

**Tabelle 1** Einteilung der Module nach Swissolar Merkblatt Nr. 17: Umgang mit Hagelschäden an Solaranlagen [4].

|   |             |
|---|-------------|
| Gesamtleistung der gemessenen Anlagen             | 34,96 MW    |
| Median der Anlagenleistung                        | 30 kW       |
| Anzahl Anlagen                                    | 344         |
| Anzahl verbaute Module                            | 126 124     |
| Anzahl Anlagen mit gemeldetem Glasbruch (Minimum) | 180         |
| Anzahl Module mit Glasbruch                       | 4283        |
| Anzahl im PV-Lab gemessene Module                 | 5209 (4 %)  |
| Anzahl Module mit Zellen in der Klasse C oder D   | 3037 (58 %) |
| Anzahl Module Klasse C                            | 1725 (33 %) |
| Anzahl Module Klasse D                            | 1312 (25 %) |

**Tabelle 2** Details der ausgeführten Messungen mit dem mobilen PV-Labor.

**Referenzen**

- [1] [www.hagelregister.ch](http://www.hagelregister.ch)
- [2] [www.swissolar.ch/de/angebot/news-und-medien/fakten-und-zahlen/infografiken](http://www.swissolar.ch/de/angebot/news-und-medien/fakten-und-zahlen/infografiken)
- [3] MBJ PV-Module Judgement Criteria, rev. 5.0, 2022
- [4] Swissolar Merkblatt Nr. 17: Umgang mit Hagelschäden an Solaranlagen, Juni 2022.
- [5] [www.ost.ch/spf/achilles](http://www.ost.ch/spf/achilles)

**Links**

- [www.pv-lab.ch](http://www.pv-lab.ch)
- [www.spf.ch](http://www.spf.ch)

**Autor**

**Alexandre Voirol** ist Projektleiter am Institut für Solartechnik SPF der OST.  
 → OST, 8640 Rapperswil  
 → [alexandre.voirol@ost.ch](mailto:alexandre.voirol@ost.ch)

RÉSUMÉ

**Dommages causés aux installations photovoltaïques par la grêle**

Analyse de la violente chute de grêle survenue durant l'été 2021

Les effets sur les installations photovoltaïques (PV) de la chute de grêle exceptionnellement violente qui s'est produite en Suisse durant l'été 2021 ont été analysés afin d'en tirer des conclusions pour les futures installations PV et les rendre plus résistantes aux grêlons. Cette analyse se base sur les données de plus de 500 installations examinées systématiquement à l'aide du laboratoire PV mobile de l'Institut pour la technique solaire de la Haute école spécialisée de Suisse orientale OST.

La grêle peut endommager les modules PV en brisant le verre ou en provoquant des microfissures dans les cellules solaires. Si les bris de verre sont faciles à détecter, les fissures des cellules passent souvent inaperçues. Elles peuvent néanmoins avoir un impact négatif sur les performances au fil du temps et, dans le pire des cas, entraîner des dommages compromettant la sécurité. Une analyse métrologique des dommages est donc indispensable pour identifier les points faibles en matière de conception et parvenir ainsi à des améliorations technologiques.

L'imagerie par électroluminescence réalisée au moyen du laboratoire PV mobile permet de rendre visibles les dom-

mages qui passent inaperçus lors des inspections. Dans la plupart des cas, les cellules endommagées des modules PV ne présentent dans un premier temps que des microfissures. Celles-ci ne séparent pas immédiatement les ensembles de cellules concernés, mais cela peut se produire avec le temps et le vieillissement des microfissures. C'est pourquoi une mesure de la puissance ou une thermographie infrarouge bon marché par drone ne sont que partiellement adaptées à l'évaluation des dommages après une chute de grêle.

L'analyse des données montre qu'à partir d'une taille de grêlon de 4 cm, on constate une augmentation significative des dommages causés aux cellules. L'impact devient particulièrement critique à partir d'une taille de 5 cm. De plus, des fissures apparaissent souvent au niveau des cellules des installations PV sans que le verre ne soit brisé.

Il convient donc de veiller à une conception robuste des installations PV, que ce soit en termes de dimensionnement du verre, d'architecture des cellules, de structure des différentes couches, ou encore de systèmes de montage. La résistance à la grêle doit ainsi être prise en compte dès la conception de l'installation.