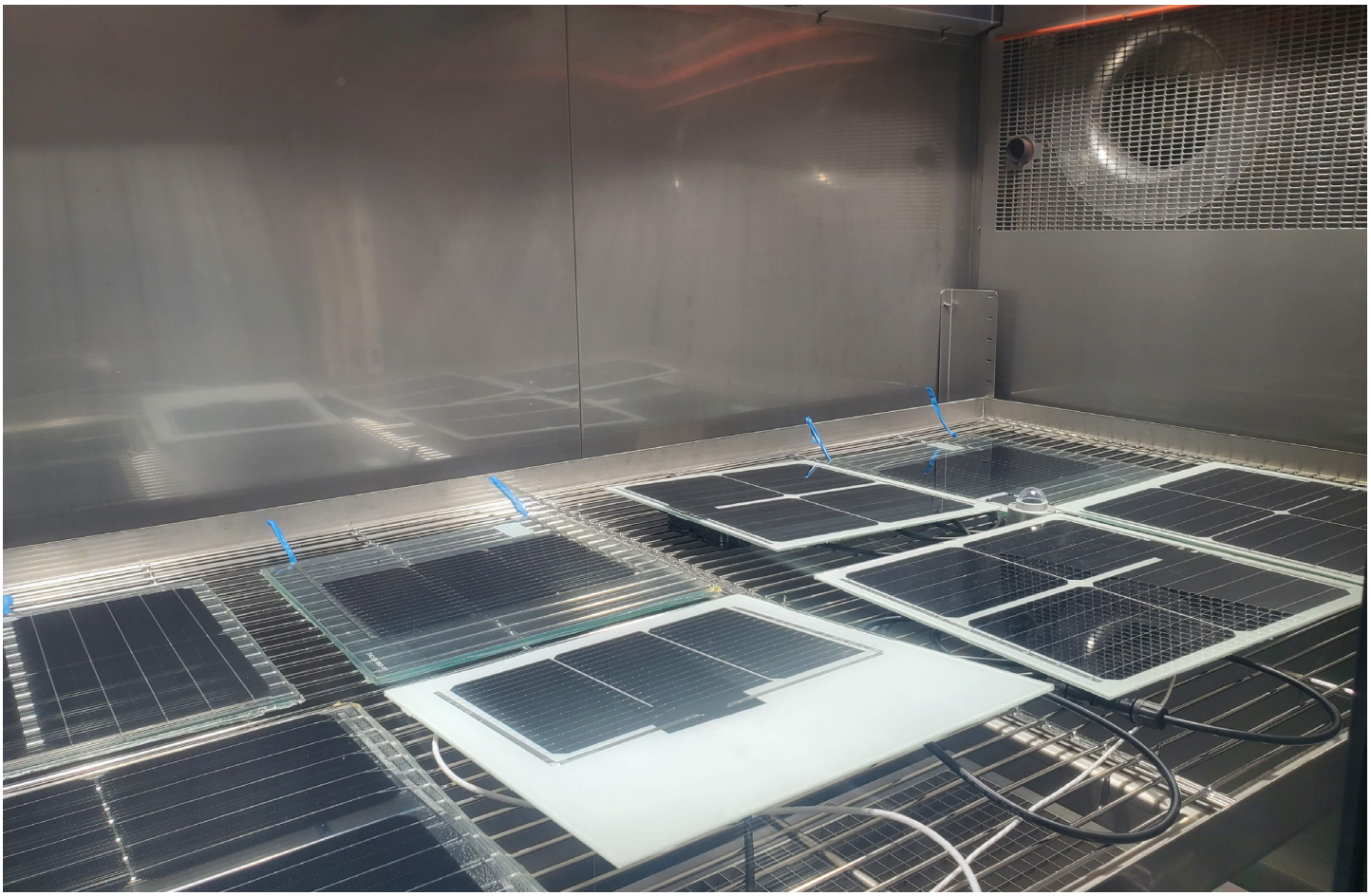
PV-MODULE, GEMACHT FÜR DEN ALPENRAUM

In den Alpen sind Photovoltaik-Module unter anderem tiefen Temperaturen sowie hohen Schneelasten ausgesetzt. Ein Team der Tessiner Fachhochschule SUPSI hat gemeinsam mit österreichischen Partnern erforscht, wie Solarmodule beschaffen sein müssen, damit sie diesen besonderen Belastungen standhalten. Zu dem Zweck haben die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler spezielle Testverfahren entwickelt, die alpine PV-Module stärkeren Stressoren aussetzen, womit Tests mitunter beschleunigt werden können.



Photovoltaik-Module während eines UV-Tests, in dem festgestellt wird, in welchem Ausmass die Module durch ultraviolette Strahlung geschädigt werden. Foto: OFI/Gassner

Fachbeitrag zu den Erkenntnissen aus einem Forschungsprojekt im Bereich Photovoltaik, das vom Bundesamt für Energie finanziell unterstützt wurde. Der Beitrag ist unter anderem auf der Webplattform ee-news.ch (August 2026) erschienen.

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE

Grosse Teile von Österreich und der Schweiz liegen in den Alpen. Daraus ergeben sich für beide Staaten ähnliche Fragestellungen bei der Anwendung der Photovoltaik (PV). Österreich möchte in Höhenlagen mehr erneuerbaren Strom produzieren, um damit beispielsweise Tourismusgebiete zu versorgen. Im Skigebiet Sölden (Tirol) wird in diesem Jahr eine alpine Solaranlage errichtet, die aus 800 ‹Solarbäumen› besteht. Jeder dieser Bäume hat vier Flügel aus vertikal montierten PV-Modulen, die beidseitig Strom erzeugen. Mit dem für Oktober geplanten Endausbau soll die Anlage eine Leistung von bis zu 6,3 MW bereitstellen.

Die Schweiz geht beim PV-Ausbau im Alpenraum noch einen Schritt weiter, indem sie diesen mit einem dringlichen Bundesgesetz (‹Solarexpress›) beschleunigt hat. Dank dieses Förderinstruments entstanden die ersten alpinen Grossanlagen MadrisaSolar (11 MW/Graubünden) und Sidenplangg (8 MW/Uri), die seit Herbst 2025 unter anderem begehrten Winterstrom liefern. Beide Anlagen werden noch ausgebaut. Weitere Grossanlagen in den Bündner Alpen entstehen zurzeit mit SedrunSolar (20 MW) und NalpSolar (8 MW). Um neue Projekte anzustossen, ist unterdessen der Winterbonus als Nachfolgeregelung des Solarexpress in Kraft.

Hohe Lasten, tiefe Temperaturen

Grosse Solaranlagen in den Alpen sind noch rar. Weil die Stromproduktion über der Nebelgrenze aber viel Potenzial hat – gerade für die Bereitstellung von Winterstrom –, wird in dem Bereich intensiv geforscht. Dabei gelten für alpine PV-Module besondere Anforderungen: Sie müssen hohe Schnee- und Windlasten ebenso aushalten wie tiefe Temperaturen und erhöhte Ultraviolett-Strahlung. Welche Module diese Bedingungen erfüllen, hat ein schweizerisch-österreichisches Projekt mit dem Kürzel PV-DETECT untersucht. Für die Studie spannte die Tessiner Fachhochschule SUPSI mit dem Österreichischen Forschungsinstitut für Chemie und Technik (OFI) in Wien zusammen. Das Projekt wurde als Teil des europäischen Forschungsnetzwerks SOLAR-ERA.NET auf Schweizer Seite vom Bundesamt für Energie unterstützt.

Die Forscherinnen und Forscher haben in PV-DETECT eine klare Vorstellung gewonnen, wie ein PV-Modul für alpine Anwendungen aussehen sollte: Sie empfehlen die Verwendung von gerahmten Doppelglas-Modulen, wobei beide Gläser eine Stärke von 3 mm und mehr haben sollten. Als Einkapselungsmaterialien steht die Kunststoffklasse der Polyolefine im Vordergrund. «Polyolefin-Elastomere (POE) bleiben auch

TESTVERFAHREN

Damit die Stromerzeugung mittels Photovoltaik (PV) sicher und zuverlässig ist, müssen die Hersteller neu entwickelte Module einer Reihe von Tests unterziehen. Hier eine Auswahl:

UV-Tests stellen fest, in welchem Ausmass PV-Module durch ultraviolette Strahlung (UV) geschädigt werden. UV-Strahlung ist Teil des Sonnenlichts, wobei die Wellenlänge kürzer ist als diejenige des sichtbaren Lichts.

Temperaturzyklen-Tests machen deutlich, inwieweit PV-Module durch Temperaturschwankungen in Mitleidenschaft gezogen werden. Temperaturschwankungen – z.B. zwischen Tag und Nacht – führen zu unterschiedlicher Materialausdehnung, was zum Bruch von Lötverbindungen oder zum Ablösen von Modulschichten (Delamination) führen kann.

Feuchtigkeitstests erfassen die Beeinträchtigung von PV-Modulen durch hohe Luftfeuchtigkeit.

Mechanische Belastungstests stellen sicher, dass PV-Module statischen Belastungen durch Schnee und dynamischen Belastungen durch Wind standhalten.

Hotspot-Tests untersuchen die Entstehung sogenannter Hotspots, also lokaler Erhitzung im Modul. Schäden entstehen typischerweise, wenn Teile eines Moduls zeitweilig z.B. durch Kamine oder Bäume verschattet werden und in der Folge einzelne Solarzellen oder Zellbereiche durch Sperrbetrieb überhitzen. Bei alpinen Modulen entsteht Verschattung mitunter durch andere Module, wenn diese vergleichsweise steil montiert werden, um hohe Wintererträge zu erzielen (Reihe-zu-Reihe-Verschattung).

Bypass-Dioden-Tests prüfen, wie gut Bypass-Dioden hohe Ströme und Temperaturen aushalten. Bypass-Dioden sind ein Sicherheitselement, das in PV-Modulen dafür sorgt, dass Strom nicht durch verschattete Solarzellen fliesst. Durch die Umleitung des Stromflusses werden Überhitzungsschäden vermieden.

bei tiefen Temperaturen elastisch und schützen die Zellen bei mechanischer Belastung besser als das in Standardmodulen verbreitete Ethylen-Vinylacetat (EVA)», sagt Anika Gassner, die am OFI ihre Doktorarbeit zu dem Thema verfasst hat.

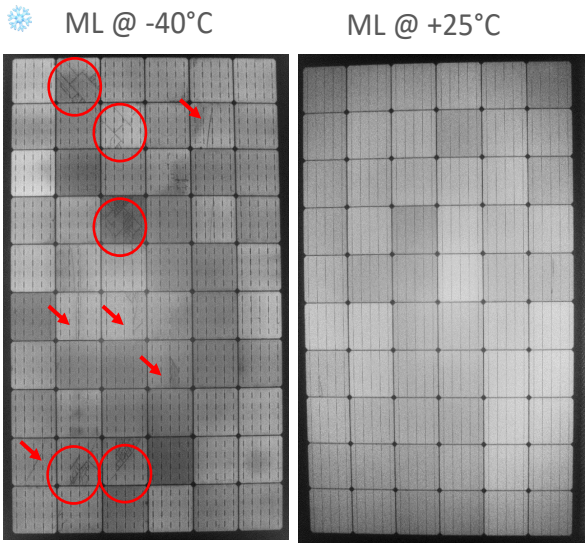
Testbedingungen angepasst

Derzeit müssen Hersteller von PV-Modulen Zertifizierungstests durchführen, bevor sie neue Module auf den Markt bringen können. Diese gewährleisten die Sicherheit und Robustheit der PV-Anlagen. Die eingesetzten Tests (vgl. Textbox S. 2) richten sich nach den Normen der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC). Die IEC-Teststandards sind auf herkömmliche PV-Anwendungen für Hausdächer oder Freiflächenanlagen zugeschnitten. «Werden Module hingegen für ‹unkonventionelle› Anwendungen in alpinen Anlagen oder an Hauswänden/Dächern (gebäudeintegrierte Photovoltaik/BIPV) eingesetzt, sind die Tests nicht optimal», sagt SUPSI-Wissenschaftler Ebrar Özkalay.

Im Projekt PV-DETECT wurden die Testverfahren so angepasst, dass sie auf die spezifischen Einsatzbedingungen von alpinen und gebäudeintegrierten Modulen zugeschnitten sind. BIPV-Module entwickeln tendenziell mehr Wärme, weil sie diese rückseitig weniger gut abstrahlen können als klassische, aufgeständerte Module. Um der höheren Wärmeentwicklung gerecht zu werden, wurden die Testtemperaturen in PV-DETECT angehoben, zum Beispiel bei den UV-Tests von 60 °C (gemäss IEC-Norm) auf 110 °C (PV-DETECT). Auch die Testbedingungen für alpine Module wurden gezielt angepasst: Um die winterlichen Verhältnisse nachzuahmen, führten OFI-Forschende statische mechanische Belastungstests in der Klimakammer bei Temperaturen bis zu -40 °C durch (und nicht bei 25 °C wie in der IEC-Norm vorgesehen). So gelangten die beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler unter anderem zu der Erkenntnis – wie oben erwähnt –, dass für den alpinen Raum das Einkapslungsmaterial POE besser geeignet ist als EVA.

Verkürzte Dauer

Das schweizerisch-österreichische Projektteam verfolgte noch eine zweite Stossrichtung: Auch hier wurden die Tests so verändert, dass die Solarmodule besonders hohen Belastungen – zum Beispiel hohen oder tiefen Temperaturen – ausgesetzt waren. Auf dem Weg kann es gelingen, Testzeiten zu verkürzen: Man muss in der Folge nur noch eine geringere Zahl von Testzyklen durchführen, um zum Beispiel ein Schadensbild oder bestimmte Verschleisserscheinungen feststellen zu



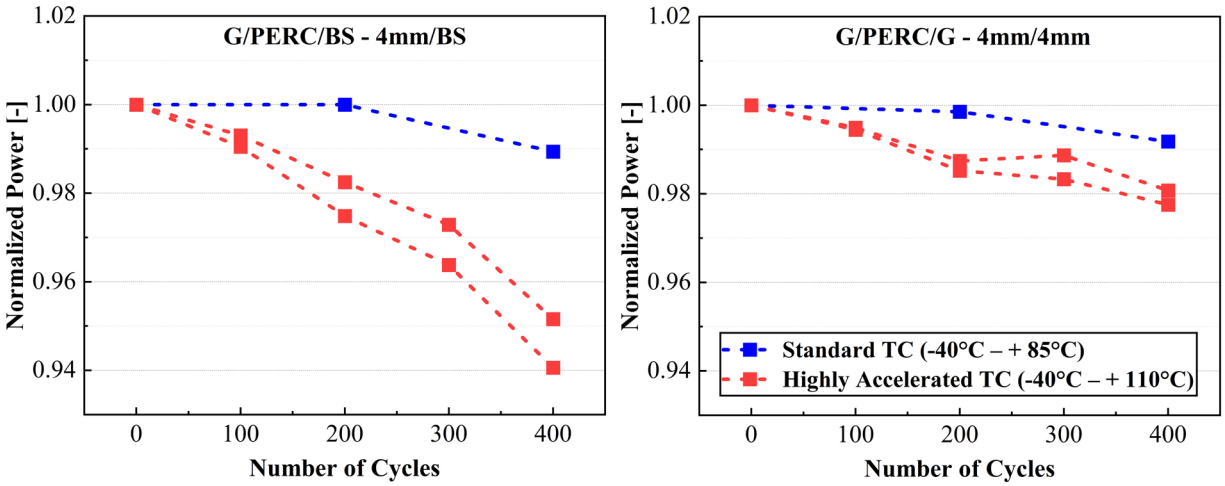
PV-Modul nach einem einstündigen Belastungstest bei -40 °C (links) bzw. bei 25 °C (rechts). Bei tiefen Temperaturen entstehen Schäden, die durch Elektrolumineszenz festgestellt werden können (rote Markierungen). Die Schäden befinden sich in den Solarzellen. Foto: OFI/Gassner, auch verwendet im Artikel ‹Enhanced mechanical load testing of photovoltaic modules for cold and snowy climates› in EES Solar (RSC Publishing)

können. Eine Beschleunigung ist wünschbar, weil Tests für neu entwickelte Module heute mitunter mehrere Monate in Anspruch nehmen. Dazu SUPSI-Wissenschaftler Özkalay: «Wenn wir die Dauer der einzelnen Tests verkürzen können, schaffen wir die Voraussetzung, dass Modulhersteller mit ihren Produkten schneller auf den Markt kommen.»

Gelungen ist die Beschleunigung von Tests in PV-DETECT zum Beispiel beim Temperaturzyklen-Test, mit dem untersucht wird, welche Auswirkungen die täglichen Temperatur-



Bei den mechanischen Belastungstests am Forschungsinstitut OFI in Wien wurden die PV-Module für einstündige Tests mit Sandsäcken beladen. Die Versuche fanden in einer Klimakammer statt, in der Temperaturen bis zu -40 °C erzeugt wurden. Foto: OFI/Gassner, auch verwendet im Artikel ‹Enhanced mechanical load testing of photovoltaic modules for cold and snowy climates› in EES Solar (RSC Publishing)



Jede der beiden Grafiken zeigt die normierte Leistung eines bestimmten PV-Moduls in der Anfangs-, Zwischen- und Endphase vom Temperaturzyklen-Tests (blau: Standardtest; rot: stark beschleunigte Tests). Beide Module zeigen während der Temperaturzyklen-Tests unter der Testbedingung ‹stark beschleunigt› einen schnelleren Leistungsabfall als bei beim Standardtest. Grafik: Schlussbericht PV-DETECT

schwankungen auf ein PV-Modul haben. Im IEC-Standardtest werden PV-Module während 200 Zyklen einer Temperaturschwankung zwischen -40 °C und 85 °C ausgesetzt. Indem die Temperatur von 85 °C auf bis zu 110 °C angehoben wurde, konnte die Testdauer auf ein Drittel verkürzt werden. Auch der mechanische Belastungstest und der Hotspot-Test konnten verkürzt werden. Bei anderen Tests gelang nur eine teilweise oder gar keine Beschleunigung.

Hersteller und Installateure profitieren

Die Ergebnisse von PV-DETECT sind relevant für Unternehmen, die PV-Module für alpine oder gebäudeintegrierte Anwendungen herstellen. Bedeutsam sind sie auch für Installateure, die PV-Module in den Alpen verbauen wollen: Sie können mit den Projektergebnissen besser beurteilen, welche PV-Module sich für den alpinen Raum eignen. Sie profitieren zudem von den neuen Testverfahren, weil sie bei Bedarf sel-

PV-ANLAGEN MIT EINER LEBENSDAUER VON ÜBER 30 JAHREN

Im Rahmen des Projekts PV-DETECT wurde auch die langfristige Leistung von PV-Anlagen untersucht, dies in Zusammenarbeit mit der Berner Fachhochschule, CSEM und dem Helmholtz-Institut Erlangen-Nürnberg. Im Zentrum standen sechs PV-Anlagen, die seit den späten 1980er bzw. den frühen 1990er Jahren mit AM55- und SM55-Solarmodulen Solarstrom produzieren (Jungfraujoch, Birg, Mont-Soleil, Burgdorf-Fink, Burgdorf-Tiergarten, Möhlin). Durch Auswertung der verfügbaren Daten wurde die jährliche Leistungseinbusse (Leistungsverlustrate/PLR) bestimmt: Diese betrug im Durchschnitt -0,24 %/a und lag damit deutlich tiefer als in der Literatur üblicherweise angenommen (-0,75 bis -1%/a). Die meisten Module hatten nach 30 bis 35 Jahren Betriebsdauer noch mindestens 80 % ihrer Nennleistung.

Die untersuchten Module sind Vorläufer der heutigen PV-Modulkonstruktionen. Die ermittelten Leistungsverlustraten lassen sich daher nicht direkt auf neuere PV-Anlagen übertragen. Moderne Module, wie sie seit den 1990er Jahren weiterentwickelt wurden, haben höhere Wirkungsgrade, sind aber auch komplexer – und mitunter weniger zuverlässig als die früheren Module. «Die starke Langzeitleistung der älteren Module belegt, dass die Solarbranche fähig ist, Module herzustellen, die selbst unter rauen alpinen Bedingungen sehr zuverlässig arbeiten», sagt Ebrar Özkalay. «Sie unterstreicht zudem die entscheidende Rolle der Materialauswahl und der Fertigungsqualität für die Gewährleistung der Langlebigkeit über Jahrzehnte hinweg.»

↗ Three decades, three climates: environmental and material impacts on the long-term reliability of photovoltaic modules. DOI 10.1039/D4EL00040D.



Um die Folgen von Verschattung zu testen, werden an den PV-Modulen Verschattungsmasken angebracht (die drei länglichen Metallbleche im Bild). Die Tests finden unter freiem Himmel statt oder im Labor, wo dank Lichtsimulatoren kontrollierbare Testbedingungen herrschen. Foto: Özkalay/SUPSI

ber Tests durchführen können, um die eigenen Risiken beim Einbau von Modulen zu minimieren. Dazu Ebrar Özkalay: «Photovoltaik hat im Alpenraum hohe Installationskosten. Vor diesem Hintergrund ist es wichtig, hochwertige Module zu verwenden, um eine lange Lebensdauer sicherzustellen und so Folgekosten für Wartung oder gar Austausch zu vermeiden.»

- Weitere Informationen zum **Forschungsprojekt** ‹PV-DETECT – Accelerated product development for unconventional PV-applications through advanced reliability testing combined with early degradation detection›.
- **Auskünfte** erteilt Stefan Oberholzer, Leiter des BFE-Forschungsprogramms Photovoltaik.
- Weitere **Fachbeiträge** über Forschungs-, Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekte im Bereich Photovoltaik.

Autor: Benedikt Vogel, im Auftrag des Bundesamts für Energie (BFE)
Stand: August 2026