

Ausgangslage

Alpine Photovoltaikanlagen werden durch den Solarexpress des Bundes gefördert, sofern gewisse Leistungsparameter erreicht werden. Es gibt jedoch nur sehr begrenzt Erfahrungswerte und experimentelle Daten zur Plausibilisierung der Berechnungen. Das BFE plausibilisiert Ertragsberechnungen in Fördergesuchen mit PVsyst. Diese Berechnungen sind grundsätzlich sehr komplex, da besonders bei bifazialen Modulen die Reflexion am schneebedeckten Boden relevant ist. Um den Schattenwurf korrekt abzubilden, müssen mehrere Modulreihen vorhanden sein. Dies schränkt die Flexibilität von Versuchsanlagen stark ein, da der Reihenabstand ein konstanter Designparameter ist. Zusätzlich ist die lokale Hangneigung durch den Standort vorgegeben.

Eine miniaturisierte Versuchsanlage löst dieses Problem: Durch schnell veränderbaren Reihenabstand, Modulneigung sowie Hangneigung können viele Konfigurationen simultan evaluiert werden, indem jede Position in einem regelmässigen und kurzen Zeitintervall (15–30') abgefahren wird.

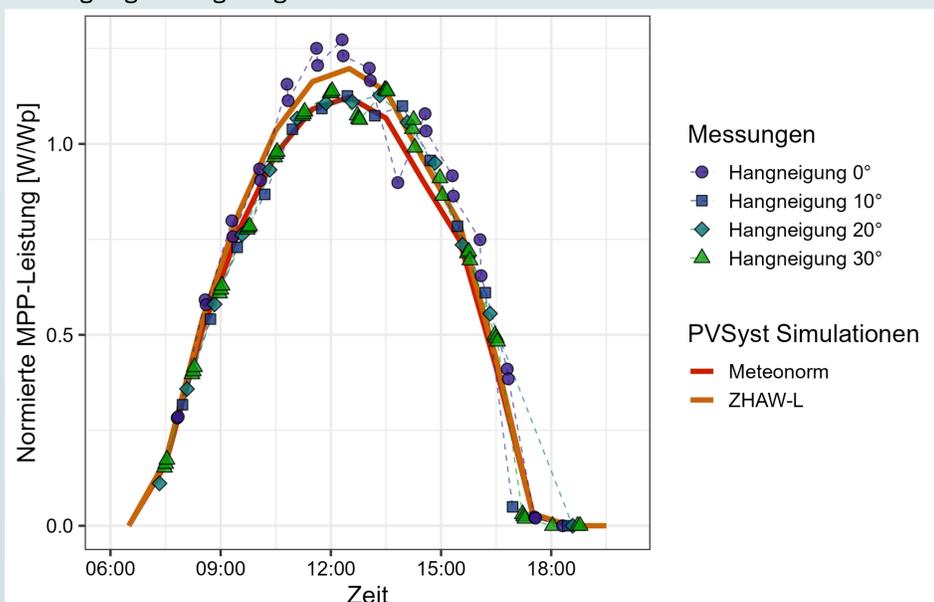


Webcam-Bild der Miniatur-Versuchsanlage an einem sonnigen Tag im März 2024.

Versuchsanlage und Messkampagne Winter 2023/24

Die miniaturisierte Versuchsanlage wurde im Spätsommer 2023 in der Totalp (Davos) auf rund 2'500 m.ü.M. aufgebaut und besteht aus drei Modulreihen à 7 Modulen, welche über einer anstellbaren Grundplatte mit bekannter Albedo ($\Omega = 0.798$) angeordnet sind. Modulneigungen (0–90°), Reihenabstand (1.2x – 7x Modulhöhe) sowie Hangneigung (0–40°) können individuell und automatisiert verändert werden. Während dem Winter 23/24 wurden 80 unterschiedliche Kombinationen dieser Parameter jeweils alle 30 Minuten erreicht. Die Qualität der Messungen wurde mithilfe der am selben Standort seit 2017 bestehenden Messanlage in Echtgrösse sichergestellt, wobei eine hohe Übereinstimmung erzielt wurde.

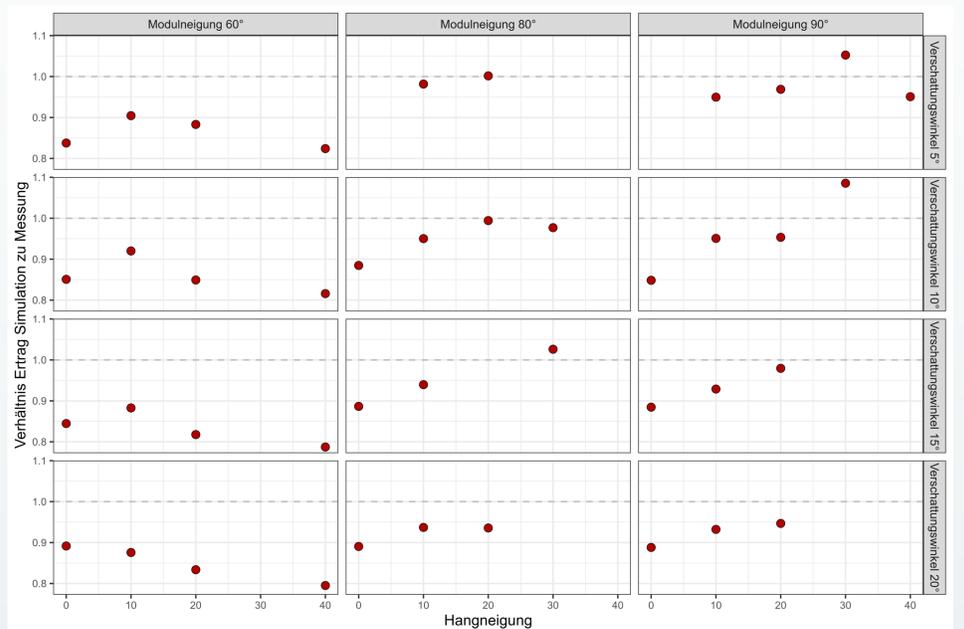
Die kontinuierlich aufgezeichneten Wetter- und Einstrahlungsdaten wurden als Randbedingungen für PVsyst-Simulationen all dieser Konfigurationen verwendet, wodurch Vergleiche über kurze Zeitintervalle und bei spezifischen Bedingungen möglich gemacht wurden.



Beispielhafter Vergleich von Messdaten (Datenpunkte) und korrespondierenden PVsyst-Simulationen (durchgezogene Linien) am 7. März 2024 für ein bifaziales Modul bei einer Modulneigung von 90° und einem Eigenverschattungswinkel von 10°. Die Simulationen wurden mit zwei unterschiedlichen Albedo-Szenarien durchgeführt, wobei «Meteonorm» an diesem Tag eine Albedo von 0.56 annimmt, «ZHAW-L» einen Wert von 0.7.

Vergleich mit PVsyst

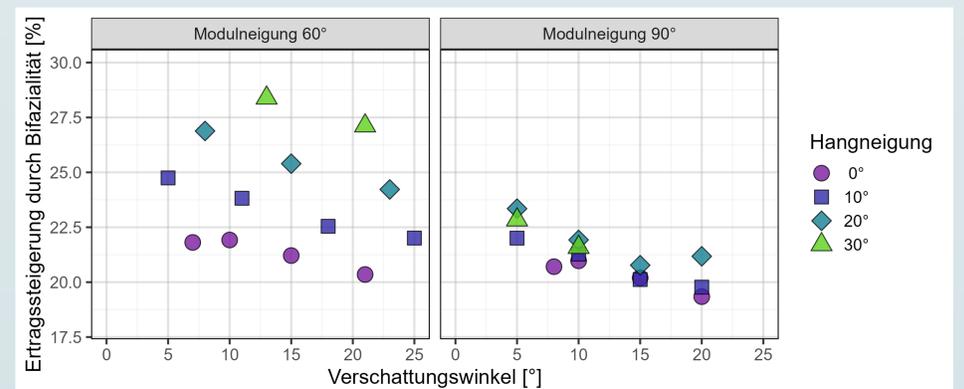
Für alle ausgemessenen Konfigurationen wurden die kumulierten Erträge mit den berechneten Erträgen über dieselben Zeiträume verglichen. Für die Berechnung von Anlagen in Hanglagen wurden Konfigurationen in der Ebene mit demselben Verschattungswinkel verwendet, was der Industriepraxis entspricht. Es zeigt sich, dass zwei teils gegenläufige Fehlerquellen existieren: Bei Simulationen von Anlagen in der Ebene (ohne Umrechnung) zeigt sich der Einfluss der Albedo, wobei Meteonorm am Standort Davos im Messzeitraum vermutlich einen zu tiefen Wert vorschlägt (<0.56 über den gesamten Winter). Die Umrechnung in Verschattungswinkel-äquivalente Anlagen führt zu einem tendenziellen Überschätzen, da grössere Reihenabstände nötig werden, was zu mehr Einstrahlung pro Modulreihe führt.



Vergleiche der Erträge für bifaziale Module aus PVsyst-Simulationen (unter Annahme der Albedo gem. Meteonorm) sowie Messdaten der Miniatur-Versuchsanlage in Davos über das Winterhalbjahr 2023/24, aufgeschlüsselt nach Modulneigungswinkel, Eigenverschattungswinkel und Hangneigung. Werte unter 1 (gestrichelte Linie) korrespondieren mit einer Unterschätzung des Ertrages durch die Simulation.

Rückseitige Erträge

Durch die Verwendung von Rücken-an-Rücken monofazialen Modulen in allen Modulreihen ist eine Evaluation des rückseitigen Ertrages über den gesamten Messzeitraum möglich. Bei einem rechnerischen Bifazialitätsfaktor von 0.8 konnte eine Ertragssteigerung im Bereich von 19–28% beobachtet werden, abhängig der Konfiguration. Eine Verringerung des Eigenverschattungswinkels (entspricht einer Vergrößerung des Reihenabstandes) erhöht tendenziell den Mehrertrag durch die rückseitige Einstrahlung. Die gezeigten Datenpunkte stellen eine ertragsgewichtete Aggregation der Messwerte aus dem Winter 24/25 (Oktober – Mitte März) dar, wobei pro Konfiguration rund 5'500 Messungen durchgeführt wurden.



Mehrertrag durch rückseitige Einstrahlung bei einem Bifazialitätsfaktor von 0.8. Die hier dargestellten Daten sind aggregiert über das gesamte Winterhalbjahr, wobei die Erträge der Vorder- und Rückseite eines Datenpunktes (d.h. Kombination aus Modulneigung, Hangneigung sowie Verschattungswinkel) zuerst einzeln summiert wurden, bevor das hier gezeigte Verhältnis gebildet wurde. Lesebeispiel: Bei einer Modulneigung von 60°, einem Verschattungswinkel von 11° sowie einer Hangneigung von 10° wurde ein Mehrertrag von ca. 23.5% gegenüber einem monofazialen Modul beobachtet.

Dank

Wir danken der Hauser-Stiftung für die Finanzierung dieses Projektes und das entgegengebrachte Vertrauen. Wir danken den EKZ für die Unterstützung.



Link zum umfassenden Bericht:
<https://doi.org/10.21256/zhaw-2520>



Link zu Publikation in *Solar Energy*:
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.113228>



Weitere Informationen zur Versuchsanlage (inkl. Zeitraffervideo der Anlage im Normalbetrieb) finden sich auf der Projektwebsite.