VON SOLARMODULEN UND KLIMABEDINGUNGEN

BEWERTUNG VON MODULTECHNOLOGIEN FÜR UNTERSCHIEDLICHE STANDORTE

Quelle: ZAE Bayern

Blick auf das Photovoltaik-Testfeld des ZAE Bayern im oberfränkischen Arzberg

Photovoltaikmodule haben, je nach Technologie, verschiedenste optische, elektrische und thermische Eigenschaften. Bedenkt man, dass weltweit unterschiedliche Bedingungen herrschen ist es durchaus von Bedeutung, welche Technologie für welchen Standort mehr oder weniger gut geeignet ist. Welchen Einfluss die Auswahl von Modultechnologien auf das Ertragsverhalten hat, wurde jetzt im Rahmen eines Projekts des ZAE Bayern untersucht.

Photovoltaik in aller Welt

Die Standortbedingungen für die Solarstromproduktion können stark voneinander abweichen: Temperatur, Einstrahlungsverhältnisse, Art und Häufigkeit von Wolken, Sandstürme, Schneelast... alles das führt zu unterschiedlichsten Erträgen. Berücksichtigt man, dass PV-Module aus verschiedenen Materialien hergestellt werden und die jeweiligen Technologien ihr jeweils eigenes physikalisches Verhalten aufweisen, ist es leicht vorstellbar, dass die Datenblattwerte für Einstrahlung, Lichtspektrum und Modultemperatur für die Auswahl der richtigen Technologie für den jeweiligen Standort nicht genügen. Vielmehr müssten alle optischen, elektrischen und thermischen Eigenschaften und ihre Wechselwirkungen berücksichtigt werden.

Bewertet man die Leistung von Solarmodulen ausschließlich nach den Kriterien, die im Datenblatt aufgeführt sind, dann geschieht dies bekanntlich gemäß den STC-Bedingungen [1] . Aber auch die Messungen bei normaler Zellentemperatur [2] der Temperaturkoeffizient und in einigen Datenblättern der Schwachlicht-Wirkungsgrad bei 200 W/m², geben nur einen unvollständigen Blick auf das Leistungsvermögen von PV-Modulen unter verschiedenen Wetter- und Klimabedingungen wieder. Daher ist eine weitergehende Untersuchung der verschiedensten Modultechnologien unter realen Witterungsbedingungen erforderlich, um die Eignung einer bestimmten PV-Technologie für ein gegebenes Klima beurteilen zu können.

Outdoor-Messungen

Um die Herausforderung zu meistern, die Auswirkungen unterschiedlicher Bedingungen an einem einzigen Standort zu untersuchen, wurden in dem Projekt Smart Grid Solar [3] auf dem PV-Testfeld des ZAE Bayern in Arzberg unterschiedliche PV-Modultechnologien unter natürlichen Bedingungen betrieben, vermessen und ein Jahr lang hinsichtlich ihres Ertrages analysiert. Dabei wurde das Wetter anhand mehrerer Kategorien auf Basis meteorologischer Kenntage des Deutschen Wetterdienstes (DWD) klassifiziert, was einen regionalen Vergleich gemäß des Einsatzes in verschiedenen Klimazonen ermöglicht. Mit Hilfe von zahlreichen Messungen sollten Aussagen über die Modulperformance an verschie-

Modultechnik	Leistung (Wp)	Wirkungsgrad (%)	Schwachlicht Wirkungsgrad (%)	Temperatur-koeffizient (%)	Gesamtleistung (kWp)
Amorphes und mikrokristallines Silizium (a-Si/µ-Si)	130	9,3	7,8	-0,24	1,56
Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIS)	125	11,6	10,4	-0,39	2,00
Kristallines Silizium mit Dünnschichtpassivierung (HIT)	240	19,0	18,2	-0,30	1,68
Monokristallines Silizium (Mono 1)	280	16,7	>16,3	-0,41	1,68
Monokristallines Silizium (Mono 2)	300	18,3	>17,6	-0,41	1,80
Monokristallin mit Silizium-Rückseitenkontakt (Mono RS)	345	20,3	19,2	-0,30	1,73
Polykristallines Silizium (Poly)	255	15,2	>14,7	-0,45	1,53
Polykristalline Silizium-Pyramide Glas (PolyPyr)	260	16,2	>15,3	-0,40	1,56

Tabelle 1: Untersuchte Modultechnologien und ihre Parameter

Typ	Definition
Eistag	Maximale Lufttemperatur < 0°C
Frosttag	Mindestlufttemperatur < 0°C
Sommertag	Maximale Lufttemperatur ≥ 25°C
Tropischer Tag	Maximale Lufttemperatur ≥ 30°C
Schwüler Tag	Taupunkt ≥ 17°C
Regentag	Niederschlagsmenge innerhalb von 24 h: 0,1mm (0,1 L/m²)
Normaler Tag*	Lufttemperatur zwischen 0 und 25°C, Taupunkt < 17°C und Niederschlagsmenge < 0,1mm

* Keine Kategorie des DWD. Sie wurde eingeführt, um alle übrigen Tage einer Kategorie zuordnen zu können

Tabelle 2: Wetterklassifizierung

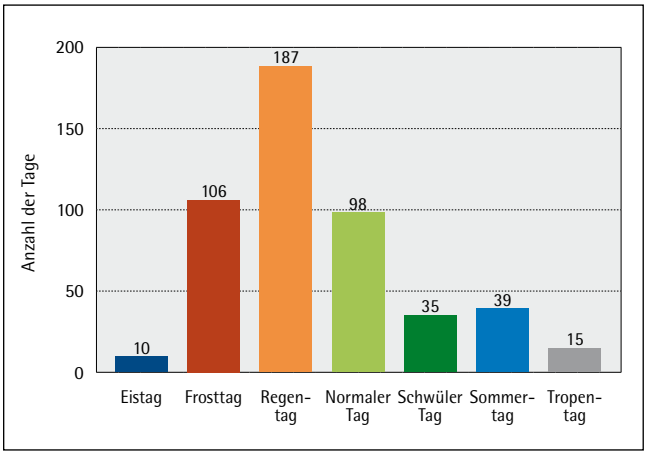


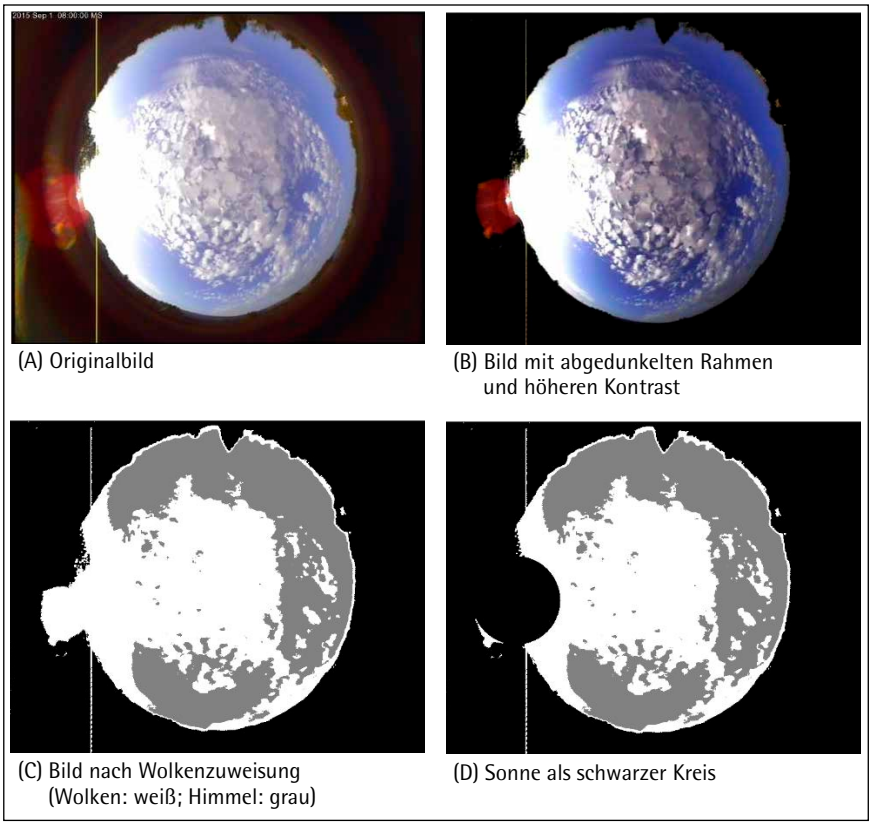
Bild 1: Anzahl der Tage mit unterschiedlichen Klima-Klassifikationen

denen Standorten und Klimata ermittelt werden. Auf dem Testfeld kamen verschiedene, auf dem Markt erhältliche PV-Module zum Einsatz, es handelte sich um:

- Zwei monokristalline Silizium-Module (Mono 1, Mono 2)
- Ein monokristallines Silizium-Modul mit rückseitigen Kontakten (Mono RS)
- Ein polykristallines Silizium-Modul (Poly)
- Ein polykristallines Silizium-Modul mit pyramidenstrukturiertem Glas (PolyPyr)
- Ein Dünnschicht-Solarmodul auf Basis von Cu(In,Ga)(Se,S)$_2$ (CIS)
- Ein Dünnschicht-Modul auf Basis von mikro-morphem Silizium (a-Si/µ-Si)
- Kristallines Silizium mit Dünnschichtpassivierung (HIT)

Mehrere Module der acht Modultypen (Tabelle 1) wurden im Freifeld mit leicht östlicher Ausrichtung (33°) und einem Neigungswinkel von 30° fest montiert.

Die Module mit fester Ausrichtung wurden über identische Wechselrichter an das lokale Niederspannungsnetz angeschlossen. Jedem Wechselrichter wurden dabei zwei Modultechnologien zugewiesen. Die DC-Leistung wurde durch die Wechselrichter auf Nennleistung begrenzt. Lediglich bei den CIS-Modulen wurden galvanisch getrennte Wechselrichter verwendet, da für diese Technologie aus Sicherheitsgründen eine Erdung erforderlich ist.



(A) Originalbild

(B) Bild mit abgedunkelten Rahmen und höheren Kontrast

(C) Bild nach Wolkenzuweisung (Wolken: weiß; Himmel: grau)

(D) Sonne als schwarzer Kreis

Bild 2: Verschiedene Schritte zur Bestimmung der Wolkenbedeckung mit RGB-Bildern

Das kategorisierte Wetter

Um die Leistung von PV-Modulen unter spezifischen realen Witterungsbedingungen zu bewerten und einzustufen, wurde auf dem PV-Testgelände das Tageswetter in sieben verschiedene Klimatage und mehrere Wolken-Szenarien unterteilt. Diese klimatischen Klassifikationen erfolgten anhand der Definitionen des DWD (Tabelle 2). Bild 1 zeigt die Anzahl der Tage der verschiedenen Kategorien. Einzelne Tage konnten mehreren Typen zugeordnet werden, so dass die Summe der Tage (490 Tage) die Anzahl der Tage des betrachteten Zeitraums (366 Tage) überschreitet. Um noch genauere Messungen durchführen zu können, wäre es durchaus wünschenswert, dieselbe Auswertung an verschiedenen Standorten mit neuen Modulen zu machen, da man trotz Klassifizierung natürlich nur den Parameterraum abdeckt, der am Teststand innerhalb des Messzeitraums auftritt. Beispielsweise werden dort UV-Anteile wie in der Wüste in Arizona oder auch Modultemperaturen größer 70°C nicht erreicht.

Die klassifizierte Bewölkung

Um die Bewölkung zu dokumentieren, wurde die Hemisphäre mit einer Kamera mit Fischaugenobjektiv aufgenommen.

Wolkenbedeckung	Kategorie
0/8	Wolkenlos
1/8 – 3/8	Leicht bewölkt
4/8 – 6/8	Wolkig
7/8	Stark bewölkt
8/8	Bedeckt

Tabelle 3: Klassifizierung der Wolkenbedeckung

Somit war es möglich die Bewölkung ohne übermäßige Verzerrungen auf Bildebene abzubilden. Durch unterschiedliche Bildbearbeitungsschritte konnten die Wolken digital erkannt und aus den gewonnenen Bildern die Wolkenbedeckung abgeleitet werden (Bild 2). Um die Fehler bei der Bestimmung der Wolken zu minimieren wurden nur die Zeiten zwischen 10 und 16 Uhr berücksichtigt. Die Klassifizierung der Wolken zeigt Tabelle 3. Die verschiedenen Kombinationen von Wetterszenarien und Wolkenbedeckungswerte sind in Bild 3 zu sehen. Alternativ wurde eine zweite Methode zur Bewölkungsklassifizierung gewählt. Mit ihr wurde das Verhältnis von extraterrestrischer und tatsächlicher Einstrahlung ermittelt [4]. Tatsächlich erwies sich diese Methode als deutlich robuster.

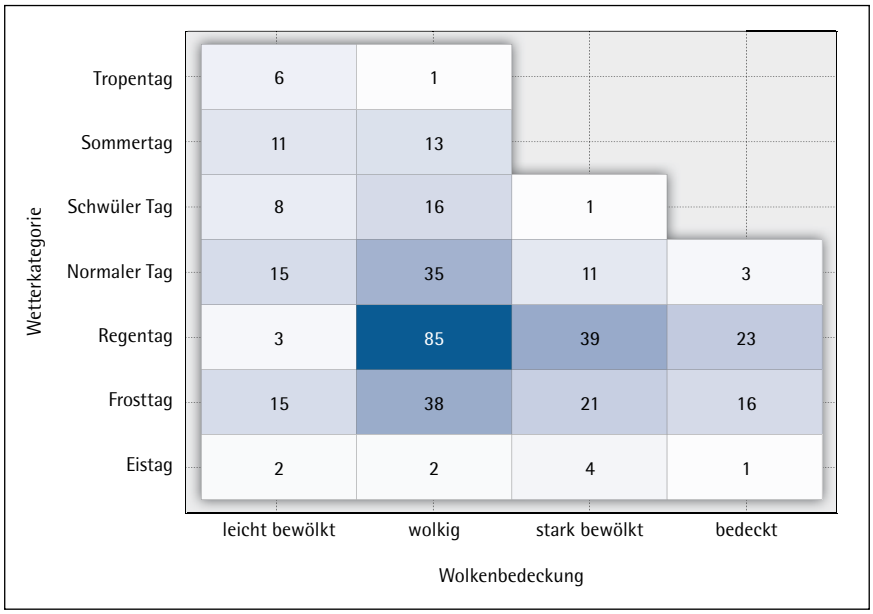


Bild 3: Anzahl der Tage der verschiedenen Wetterszenarien unter Verwendung der Wolkenbedeckungswerte

Jahreserträge und Modultechnologie

Aufgrund ihrer individuellen Technologie ergeben sich für die einzelnen Modultypen bei unterschiedlichen Bedingungen durchaus Unterschiede in den Jahreserträgen. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich die Mono-Module bezüglich ihres Ertrags für fast alle Wetterkategorien als überlegen erwiesen haben. Nur bei hohen Temperaturen dominiert die Heterojunction-Technologie. Den größten Einfluss auf die Erträge haben Schwachlicht und Temperaturverhalten. Auch wenn man grundsätzlich Unterschiede erwartet hatte, waren die großen Unterschiede unter Bedingungen mit geringer Einstrahlung sowie die geringe Performance von CIS-Modulen durchaus überraschend. Gerade CIS-Modulen wird häufig ein besonders gutes Schwachlichtverhalten unterstellt, dieses konnte in den Arbeiten aber nicht gezeigt werden. Die Untersuchung zeigt, dass siliziumbasierte Modultechnologien unter den ausgewählten Modulen über eine bessere Performance als Dünnschichttechnologien verfügen.

Für jede Kategorie wurden die ertragsreichsten bzw. die Technologien mit den geringsten Stromgestehungskosten ermittelt (Tabelle 4). Die beobachteten Unterschiede sind vor allem auf das Temperatur- (Temperaturkoeffizient) und Schwachlichtverhalten zurückzuführen. In höhergelegenen Gebieten ist zusätzlich das Abrutsch- und Abtauverhalten bzgl. Schneebedeckung entscheidend. Bezüglich der Ertragsstabilität zeigten sich die Module der Technologie CIS und Mono-Si als am konstantesten.

Die höchsten Degradationsraten wurden für a-Si/µ-Si und Poly-Silizium ermittelt (Tabelle 5). Bei a-Si/µ-Si traten unter Verschattungen bereits im ersten Jahr deutliche Delaminationen auf. Sowohl anhand der Testfeldmodule als auch bei einer forcierten Alterung im Feld zeigte sich, dass Module oftmals durch Einmalereignisse beschädigt werden. Die verursachten Schäden weisen jedoch unter moderaten Standortbedingungen nur wenige Veränderungen beim Ertrag auf. Verluste durch Reflexionen waren für alle Technologien vernachlässigbar.

Bezüglich des Jahresertrags liegt die Ausbeute der HIT- und Poly-Module nicht wesentlich hinter der Ausbeute der Mono-Module zurück, da die Differenz der Tageserträge relativ gering ist. Die CIS-Module schneiden dagegen unter fast allen Bedingungen am schlechtesten ab. Das liegt zudem auch daran, dass die Energieverluste der CIS-Technologie unter kälteren Bedingungen nur geringfügig abnehmen. Die Jahresausbeute der Mono und PolyPyr-Module ist aufgrund der beständig schlechteren Leistung bei Allwetterbedingungen niedriger. Der Jahresertrag des a-Si/µ-Si-Module liegt fast auf dem Niveau der Mono und PolyPyr-Module, fällt aber wegen der schlech-

Wetter-kategorien [1]	Hohe Quantität [2]	Mittlere Quantität [2]	Geringere Quantität [2]
Eistag	CIS	aSi/µ-Si	aSi/µ-Si
Frosttag	Mono 2	Mono-Si B	Mono-Si B
Normaler Tag	Poly	Mono-Si B	Mono-Si B
Regentag	Mono 2 HIT / Poly	Mono-Si B	Mono-Si B
Schwüler Tag	HIT	Mono-Si B / HIT	Mono-Si B
Sommertag	HIT	Mono-Si B	n.a.
Tropentag	HIT	Mono-Si B HIT / Poly-Si A	n.a.

[1] Basierend auf Kenntagen des DWD
[2] Basierend auf K-POP-Methode: Koumparou et al.; 31st EUPVSEC, Hamburg, 2015

Tabelle 4: Auswertung der ertragsreichsten Modultechnologie je Wetterkategorie

Technologie	1-Jahres-Degradationsrate [1] [%/a]	Messunsicherheit [%/a]
Mono 1	– 2.4	± 0.5
Mono 2	– 1.7	± 0.5
Mono RS	– 1.8	± 0.5
Poly	– 3.0	± 0.4
PolyPyr	– 6.0	± 0.4
HIT	– 2.1	± 0.4
CIS	– 1.5	± 0.4
a-Si/µ-Si	– 4.7	± 0.3

[1] 1-Jahres-Degradationsrate: temperatur- & einstrahlungskorrigiert

Tabelle 5: Degradationsraten und Messunsicherheit der im Projekt betrachteten Modultechnologien

teren Energieproduktion an Frosttagen, normalen Tagen und Regentagen zurück.

Unsicherheiten und praktischer Nutzen

Die Genauigkeit der Ergebnisse ist im Wesentlichen durch die der Wechselrichter (3%) bedingt. Eine weitere, jedoch schwer zu quantifizierende Unsicherheit kommt dadurch zustande, dass immer ganze Tage klassifiziert wurden, d.h. ein Regentag kann vollständig verregnet aber auch größtenteils sonnig sein. Bereits eine Stunde Platzregen macht ihn auch zu einem Regentag. Um diese Unsicherheit zu verringern, hätte man über einen noch längeren Zeitraum messen müssen. Dies hätte dann aber den Nachteil gehabt, dass die Module noch weniger den Stand der Technik widerspiegeln und dass die Degradation über mehrere Jahre nicht mehr vernachlässigbar wäre.

Der praktische Nutzen liegt darin, dass man nun, experimentell belegt, Aussagen darüber treffen kann, welche Module für welche Bedingungen besonders geeignet sind. Natürlich gilt die Einschränkung, dass die Module den technologischen Stand ihrer Produktion (ca. 2014) widerspiegeln und nur von jeweils einem Hersteller stammen. Die Hypothese, dass sich Module gleicher Technologie und unterschiedlicher Hersteller ähnlich verhalten gilt es in zukünftigen Arbeiten noch zu überprüfen. Um adäquate Ergebnisse für weitere, künftige Produkte zu erhalten, hält sich der Aufwand im Übrigen in Grenzen. Es müssten lediglich Module beschafft und installiert, die Messergebnisse überwacht und kontrolliert werden. Die angewandte Methodik und Auswertung wäre aber 1:1 übertragbar.

Ein weites Feld

Die vorgestellte Untersuchung erlaubt es, die Leistung verschiedener Modultechnologien unter verschiedenen Realwetterbedingungen zu vergleichen. Zudem verdeutlicht es die Wechselbeziehung zwischen Klima und den spezifischen Moduleigenschaften. Darüber hinaus können über den entwickelten Ansatz auch die Auswirkungen der Alterung bestimmt werden. Da der Nachweis auf den genauen Einfluss der spezifischen Eigenschaften von Modultechnologien beschränkt ist sind weitere Forschungsarbeiten erforderlich, um den Einfluss der spektralen Empfindlichkeit, der Temperatureffekte und der Schneeschmelzverhalten zu quantifizieren.

Das Team der Untersuchung: J. Bogenrieder, M. Hüttner, P. Luchscheider, J. Hauch, C. Camus, C.J. Brabec. Institute: ZAE Bayern, E. Buchta, T. Wagner, Adrian (Hof, Erlangen) und i-MEET/FAU (Erlangen).

Der Artikel ist ein Auszug aus dem Beitrag „Technology-specific yield analysis of various photovoltaic module technologies under specific real weather conditions“, erstmals erschienen in „Progress Photovoltaics“ im August 2017: http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pip.2921/full
sowie aus dem SGS-Bericht „Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt Smart Grid Solar, 10 Fragen 10 Antworten“

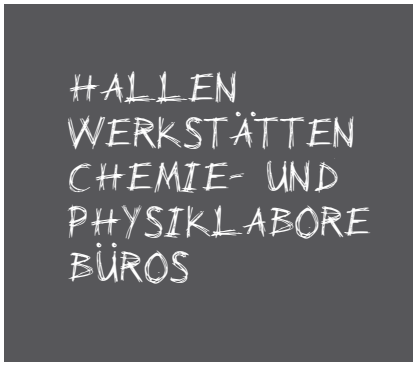
Fußnoten

1) STC: Einstrahlung: 1.000 W/m², Lichtspektrum: AM 1.5, Temperatur: 25°C
2) 800 W/m², AM 1,5, 20°C, 1 m/s
3) Das Forschungsprojekt Smart Grid Solar wurde durch das Bayerische Wirtschaftsministerium und den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung unterstützt: www.smart-grid-solar.de
4) k-POP Methode: Verfahren zur Charakterisierung und Klassifizierung der täglichen Himmelslage aufgrund bodengestützter Sonneneinstrahlungsdaten

ZUM AUTOR:
▶ *Matthias Hüttmann*
Chefredakteur SONNENENERGIE

Berlin Adlershof

ZENTRUM FÜR PHOTOVOLTAIK UND ERNEUERBARE ENERGIEN
Nachhaltig gute Ideen mit Sonne, Wind & Co.



Adlershof. Science at Work.

www.adlershof.de