

Die Geschichte der Photovoltaik: Teil 2



8. Warum ist Photovoltaik so preisgünstig geworden?

Nach **Swanson's Law** (Swanson war der Gründer des Solarzellenherstellers SunPower in Kalifornien) fällt der Preis der Solarmodule mit der Verdopplung der kumulierten installierten Leistung um etwas mehr als 20%.

Mit den heutigen Wachstumsraten sinken die Kosten alle 10 Jahre um 75%.

Der Preis für kristalline PV-Zellen ist von \$76.67 pro Watt im 1977 auf \$0.36 pro Watt im 2014 gefallen, also über einen Faktor 200.

1.2 Kleine Geschichte der Photovoltaik

3

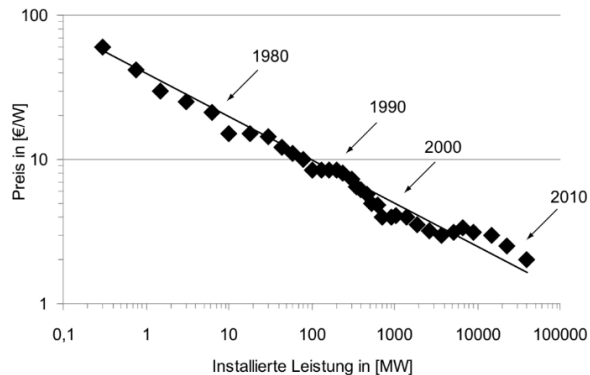
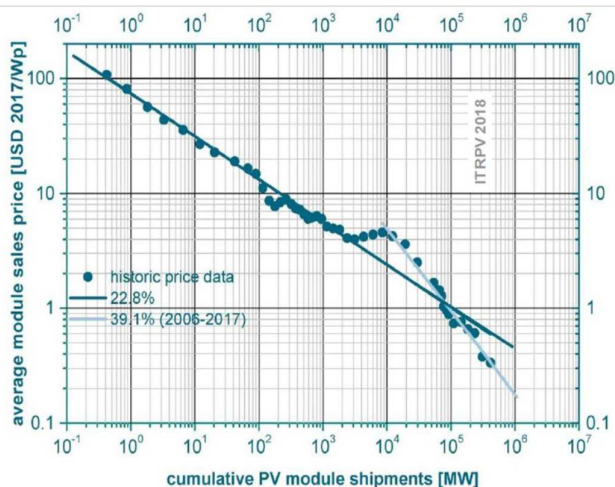


Abb. 1.2 Preis-Lernkurve von Photovoltaikmodulen aus kristallinem Silizium, nach [1]

In den letzten Jahren ist es sogar zu einem beschleunigten Preiszerfall gekommen. Von den historischen 23% sank der Preis bei einer Verdoppelung der kumulierten Leistung zwischen 2006 und 2017 um etwa 39%. Von 2011 bis 2017 sind die Kosten der Stromerzeugung aus Photovoltaik deshalb um fast 75 % gefallen.

Dieser Preiszerfall hat gewisse Ähnlichkeiten zum Gesetz von Moore, welches das Wachstum der Rechenleistung von Mikroprozessoren vorhersagt.



Welches sind nun die Gründe für diesen Preiszerfall seit den Anfängen in der Raumfahrt bis heute?

Der Preiserosion in der Photovoltaik ist das Resultat einer ganzen Sequenz von verschiedenen Aktivitäten und Entwicklungen in den letzten 70 Jahren. Dazu gehören globale und lokale Entwicklungen mit Beteiligung von staatlichen Regierungen, innovativen Firmen und individuellen Persönlichkeiten.

Diese Entwicklung hat folgende Schritte durchlaufen:

1. Wissenschaftliche Entdeckungen seit 1839, theoretisches Fundament (Einstein 1907) und erste kommerzielle Anwendungen in den USA (Bell Laboratories 1954):

Einsteins theoretisches Fundament ermöglichte eine systematische Forschung und Entwicklung. Mit Bell Lab's Durchbruch 1954 begann die Kommerzialisierung der Photovoltaik, getrieben durch die Bedürfnisse der Raumfahrt. Bis 1970 hatte sich die Photovoltaik als zuverlässige, aber immer noch sehr teure Technologie für nicht preissensitive Spezialanwendungen etabliert.

2. Staatliche Finanzierung der Technologieentwicklung in den USA (1973 – 1981):

Die erste Ölkrise 1973 war ein Schock für die Energieversorgung weltweit. Der Ölpreis hat sich innerhalb ein paar Monaten vervierfacht. Die Energiepolitik in vielen Ländern wurde grundsätzlich in Frage gestellt. Die damalige US-Regierung unter President Richard Nixon hat dies zum Anlass genommen ein gewaltiges Technologieprojekt zu lancieren, mit dem Ziel, die Kosten der Photovoltaik soweit zu reduzieren, damit sie kompetitiv zur elektrischen Energieerzeugung mit fossilen Brennstoffen wird.

Mit der Wahl von Präsident Ronald Reagan im 1980 und den anschliessend wieder fallenden Ölpreisen wurde das US PV-Programm relativ schnell aufgegeben und der Fokus vor allem auf die Kernenergie gelegt.

Als Resultat der massiv geförderten Technologieentwicklung sanken in der Zeit von 1974 bis 1981 die Modulkosten um den Faktor 5.

3. Nischenmärkte in Japan und Gebäudeprogramm in den 90er Jahren

Nach dem Rückgang der Nachfrage nach Solartechnik in den 80er Jahren entwickelte sich in Japan mit der Produktion von Solarzellen durch Sharp für solarbetriebene Taschenrechner und anderen netzunabhängigen Anwendungen ein spezieller Nischenmarkt.

Bis zu Beginn der 90er Jahre war es eher ruhig in Bezug auf Photovoltaik. Dann begannen die ersten Diskussionen zum Klimawandel und Japan lancierte Ende 1993 ein erstes Gebäudeprogramm, wobei zu Beginn eine PV-Anlage mit 50% der Entstehungskosten gefördert wurde. Diese Förderung nahm dann sukzessive ab, auch auf Grund der laufenden Abnahme der Modulpreise.

In den 11 Jahren dieses Förderprogramms wurden in Japan über 200'000 PV-Anlagen mit einer Gesamtleistung von 0.8 GW installiert (im Durchschnitt also kleine 4 kWp-Anlagen).

Die Anlagenpreise sanken in dieser Zeit um den Faktor 3.

Die Produzenten in Japan belieferten vor allem ihren Heimmarkt und wurden von der nachfolgenden, durch Deutschland getriebenen Entwicklung, überrascht und waren nach wenigen Jahren nicht mehr kompetitiv auf dem Weltmarkt.



4. Deutschland's Erneuerbares Energiegesetz (EEG) im 2000 bis zum Konzept der Energiewende im 2010

Deutschland trug massgeblich zur Entwicklung von noch kostengünstigeren Photovoltaik bei, indem sie einen Absatzmarkt generierten, der grösser war als was bis anhin existierte.

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), das im Jahr 2000 in Kraft getreten ist, war der Motor für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland. Das EEG hat die Grundlage für den Ausbau der erneuerbaren Energien geschaffen und sie zu einer der tragenden Säulen der deutschen Stromversorgung werden lassen.

Die erneuerbare Energiestrategie in Deutschland hat ihre Wurzeln in den Studentenunruhen von 1968, den Anti-Atombewegungen in den 70iger Jahren und den Umweltbewegungen, katalysiert durch den Reaktorunfall in Chernobyl im 1986, welche zum politischen Aufstieg der Grünen Partei führte. Dank der damaligen rot-grünen Koalition wurde das EEG angenommen. Dies war das Fundament für die deutsche Energiewende im 2010, mit dem 40-Jahr Plan zur Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energien, dem Ausstieg aus der Kernenergie und der Reduktion des CO₂ Ausstosses.

Hier ist ein Auszug aus dem EEG:

**Gesetz
für den Vorrang Erneuerbarer Energien
(Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG)
sowie zur Änderung des
Energiewirtschaftsgesetzes und des Mineralölsteuergesetzes**

Vom 29. März 2000

Der Bundestag hat mit Zustimmung des Bundesrates
das folgende Gesetz beschlossen:

**Artikel 1
Gesetz
für den Vorrang Erneuerbarer Energien
(Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG)**

§ 1

Ziel des Gesetzes

Ziel dieses Gesetzes ist es, im Interesse des Klima- und Umweltschutzes eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung zu ermöglichen und den Beitrag Erneuerbarer Energien an der Stromversorgung deutlich zu erhöhen, um entsprechend den Zielen der Europäischen Union und der Bundesrepublik Deutschland den Anteil Erneuerbarer Energien am gesamten Energieverbrauch bis zum Jahr 2010 mindestens zu verdoppeln.

§ 8

**Vergütung für Strom
aus solarer Strahlungsenergie**

(1) Für Strom aus solarer Strahlungsenergie beträgt die Vergütung mindestens 99 Pfennig pro Kilowattstunde. Die Mindestvergütung wird beginnend mit dem 1. Januar 2002 jährlich jeweils für ab diesem Zeitpunkt neu in Betrieb genommene Anlagen um jeweils fünf vom Hundert gesenkt; der Betrag der Vergütung ist auf eine Stelle hinter dem Komma zu runden.

Die deutschen Produzenten lösten die Japaner ab und dominierten den Weltmarkt. Zwischen 2000 und 2012, sind die Kosten für pV-Module um über den Faktor 6 gesunken.

Nach 2005 kam es zu einer neuen Regierungskoalition mit der CDU und der SPD, beide mit starken Banden zur Kohleindustrie. Die attraktiven Einspeisevergütungen wurden drastisch gekürzt und das anhaltende Wachstum der Photovoltaik in Deutschland kam praktisch zum Stillstand. Die grossen deutschen Produzenten Q-Cells, Sunways, Schott Solar und andere, verwöhnt durch anhaltend grosse Wachstumsraten, wurden davon überrascht und waren 2013 bankrott. Gleichzeitig drückten chinesische Firmen die Herstellkosten durch Innovationen und Skaleneffekte weiter hinunter und übernahmen 2013 die Position des Weltmarktführers.

5. Skalierung der Produktion in China seit 2001

China's Einstieg in die Photovoltaik begann im Jahre 2001 und hatte den grössten Einfluss auf den Preiszerfall der PV-Module. Zwischen 2000 und 2016 erhöhte China die Produktion um den Faktor 500. Schon 2007 haben chinesische Firmen mehr Solarmodule produziert als jedes andere Land. Seit 2013 installiert China mehr PV-Anlagen als jede andere Nation. Im 2017 produzierte China 70% des gesamten Weltmarkts.

Ursprünglich waren es die tiefen Lohnkosten, welche China von 2000 bis 2007 erlaubten, so stark zu wachsen. Das ist heute durch die enorme Automatisierung nicht mehr relevant. Der Anteil der Lohnkosten an den Gesamtkosten der Solarmodule ist verschwindend klein geworden.

6. Lokale Lerneffekte zur Kostenreduktion seit 2010

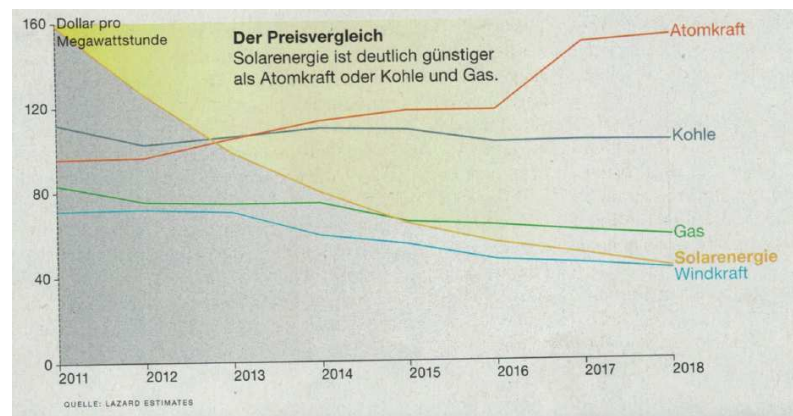
Neben den drastisch gesenkten Modulkosten und den Kosten für den Wechselrichter sind auch die anderen Kosten für eine PV-Anlage substantiell heruntergegangen. Dank verbesserten Installationstechniken und vereinfachten Bewilligungsverfahren haben wir heute für grössere PV-Anlagen Kostenparität von PV-Strom mit anderen Stromquellen, auch ohne

Einspeisevergütung. Die Installation einer PV-Anlage erfolgt durch lokale Installateure (sog. Solarteure), deren Zahl in den letzten Jahren enorm gewachsen ist.

9. Photovoltaik als wichtigster erneuerbarer Energieträger zur Bewältigung der Klimakrise

Die Photovoltaik galt lange als die teuerste Form der Stromerzeugung mittels erneuerbaren Energien, eine Sicht, die mittlerweile durch die starken Kostensenkungen der Anlagenkomponenten überholt ist. In den USA sind bei grossen Solarparks Vergütungen von unter 5 US-Cents/kWh üblich. Ähnliche Werte sind unter günstigen Umständen auch in anderen Staaten möglich. In mehreren Staaten wurden in Ausschreibungen Rekordwerte von 3 US-Cents/kWh erreicht. In Deutschland liegen die Stromgestehungskosten von neu errichteten PV-Grossanlagen inzwischen niedriger als bei allen anderen fossilen oder erneuerbaren Energien.

Bereits 2014 lagen die Stromgestehungskosten der Photovoltaik in bestimmten Regionen der Welt auf gleichem Niveau oder sogar niedriger als bei fossilen Konkurrenten.



Inklusive Speicher, die bei hohem Anteil der Photovoltaik am Strom-Mix notwendig werden, waren die Kosten zu diesem Zeitpunkt jedoch noch höher als bei fossilen Kraftwerken. Allerdings wäre Solarstrom auch zu diesem Zeitpunkt bereits konkurrenzfähig gewesen, wenn die externen Kosten der fossilen Stromerzeugung (d. h. Umwelt-, Klima- und Gesundheitsschäden) entsprechend mitberücksichtigt worden wären. Tatsächlich waren sie jedoch nur zum Teil internalisiert.

Solarstrom verursacht geringere Umweltschäden als Energie aus fossilen Energieträgern oder Kernkraft und senkt somit die externen Kosten der Energieerzeugung.

Durch die starke Kostensenkung der Photovoltaik sind die Vermeidungskosten einer Hausdachanlage auf ca. 20 - 80 Fr. je Tonne CO₂ gefallen, womit die Solarstromerzeugung günstiger ist als die Kosten für Klimawandelfolgeschäden, die mit knapp 100 Fr. je Tonne CO₂ angenommen werden.

Der durchschnittliche Gestehungspreis für Anlagen in der Grösse von etwa 100 kWp liegen heute bei etwa Fr. 1'200/kW. Dieser Preis enthält neben den Modulen auch Wechselrichter, Montage und Netzanschluss. Eine installierte Anlage liefert je nach Lage und Ausrichtung einen Jahresertrag von etwa 800 bis 1100 kWh pro kWp Leistung und benötigt dafür bei einer Dachinstallation etwa 6.5 bis 7.5 m² Fläche.

Auch wenn es im Betrieb selbst keine CO₂-Emissionen gibt, so lassen sich Photovoltaikanlagen derzeit noch nicht CO₂-frei herstellen, transportieren und montieren. Die rechnerischen CO₂-Emissionen von Photovoltaikanlagen betragen 2015 je nach Technik und Standort durchschnittlich etwa 30 g CO₂/kWh. Verursacht werden diese Emissionen durch Verbrennung fossiler Energien insbesondere während der Fertigung von PV-Modulen. Mit weiterem Ausbau der erneuerbaren Energien im Zuge der weltweiten Transformation zu nachhaltigen Energieträgern wird sich die Treibhausgasbilanz damit automatisch verbessern. Ebenfalls sinkende Emissionen ergeben sich durch die technologische Lernkurve. Historisch betrachtet sanken die Emissionen um 14 % pro Verdopplung der installierten Leistung (Stand 2015).

Im Vergleich dazu lagen die CO₂-Emissionen von Kohlekraftwerken bei 750–1200 g/kWh, von Gaskraftwerken bei 400–550 g/kWh, von Windenergie und Wasserkraft bei 10–40 g/kWh, von Kernenergie bei 10–30 g/kWh (ohne Endlagerung), und von Solarthermie in Afrika bei 10–14 g/kWh.

Die **energetische Amortisationszeit von Photovoltaikanlagen** ist der Zeitraum, in dem die Photovoltaikanlage die gleiche Energiemenge geliefert hat, die während ihres gesamten Lebenszyklus für Herstellung, Transport, Errichtung, Betrieb und Rückbau bzw. Recycling benötigt wird.

Sie beträgt derzeit (Stand 2015) zwischen 1.8 und 3.5 Jahren, je nach Standort und verwendeter Photovoltaiktechnologie. Als Lebensdauer wurde in der entsprechenden Studie für Module auf Basis kristalliner Siliziumzellen 30 Jahre angenommen, für die Lebensdauer der Wechselrichter wurden 15 Jahre eingesetzt. Bis zum Jahr 2020 wird eine Energierücklaufzeit für südeuropäische Anlagen auf Basis von kristallinem Silizium von weniger als einem Jahr als erreichbar angesehen. Damit haben PV-Anlagen während ihrer Lebensdauer einen **Erntefaktor** von über 10 (Erntefaktor = Verhältnis der genutzten Energie zur investierten Energie).

Für fossile Kraftwerke wird neben dem energetischen Aufwand für die Errichtung und Betrieb des Kraftwerks auch der eingesetzte Brennstoff mit in die Rechnung einbezogen, da dieser zur Stromerzeugung uniderruflich verbrannt wird. Dadurch haben fossile Kraftwerke immer einen Erntefaktor kleiner Eins. Erneuerbare Energien können als einzige Kraftwerkstypen Erntefaktoren grösser Eins haben, da deren Energiequellen wie etwa Wind, Wasser oder Sonne nach menschlichem Ermessen unendlich sind, bzw. sich bei nachhaltiger Nutzung (z.B. Wasser) regenerieren.

Seitens der Hersteller werden für die Module im Regelfall Leistungsgarantien für 25 Jahre gegeben. Der energieintensiv hergestellte Teil von Solarzellen kann 4- bis 5-mal wiederverwertet werden.

Die Photovoltaik gehört heute zu den umweltfreundlichsten Stromquellen. Das wirtschaftliche Potential reicht aus, um das Abschalten der Atomkraftwerke mehr als zu kompensieren und zugleich die Dekarbonisierung zu ermöglichen.

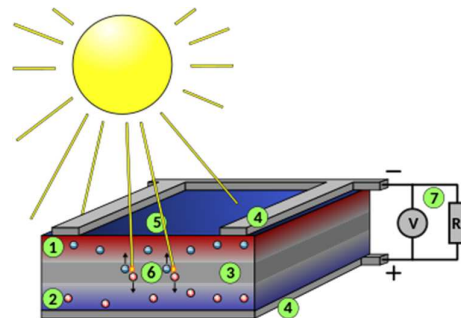
Der ökologische Fussabdruck der Photovoltaik ist wesentlich besser als derjenige fossiler Energieträger und verbessert sich dank technischer Fortschritte kontinuierlich.

10. Technische Grundlagen der Photovoltaik

Der Aufbau einer Solarzelle ist ähnlich zu einer Photodiode. Silizium ist ein Halbleiter. In Halbleitern können durch zugeführte Energie (z. B. in Form von Licht, bzw. elektromagnetischer Strahlung) freie Ladungsträger erzeugt werden.

Hier ist das **Photovoltaik-Funktionsprinzip** am Beispiel einer Silizium-Solarzelle (Erläuterungen zu den Ziffern in der Grafik):

1. Die obere Siliziumschicht ist mit Elektronenspendern (z. B. Phosphoratomen) durchsetzt – negativ dotiert. Hier gibt es zu viele Elektronen (n-Schicht).
2. Die untere Siliziumschicht ist mit Elektronen-Akzeptoren (z. B. Boratomen) durchsetzt – positiv dotiert. Hier gibt es zu wenige Elektronen, also zu viele Fehlstellen oder Löcher (p-Schicht).
3. Im Grenzbereich der beiden Schichten binden sich die überschüssigen Elektronen der Elektronenspender locker an die Fehlstellen der Elektronen-Akzeptoren (sie besetzen die Fehlstellen im Valenzband) und bilden eine neutrale Zone (p-n-Übergang).
4. Da nun oben Elektronen- und unten Fehlstellenmangel herrscht, bildet sich zwischen der oberen und unteren Kontaktfläche ein ständig vorhandenes elektrisches Feld.
5. Photonen (Lichtquanten, „Sonnenstrahlen“) gelangen in die Übergangsschicht.

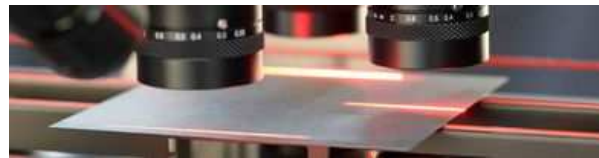


6. Photonen mit ausreichender Energiemenge übertragen in der neutralen Zone ihre Energie an die locker gebundenen Elektronen im Valenzband der Elektronen-Akzeptoren. Das löst diese Elektronen aus ihrer Bindung und hebt sie ins Leitungsband. Viele dieser freien Ladungsträger (Elektron-Loch-Paare) verschwinden nach kurzer Zeit durch Rekombination wieder. Einige Ladungsträger driften – bewegt vom elektrischen Feld – zu den Kontakten in die gleichartig dotierten Zonen (s. o.); d. h. die Elektronen werden von den Löchern getrennt, die Elektronen driften nach oben, die Löcher nach unten. Eine Spannung und ein nutzbarer Strom entstehen, solange weitere Photonen ständig freie Ladungsträger erzeugen.
7. Der „Elektronen“-Strom fließt durch den „äusseren Stromkreis“ zur unteren Kontaktfläche der Zelle und rekombiniert dort mit den zurückgelassenen Löchern.

Für die **Herstellung von Solarmodulen** braucht es drei Prozessschritte: den Wafer-Prozess, den Zell-Prozess und den Modul-Prozess.

Beim **Wafer-Prozess** wird aus dem Rohmaterial Quarzsand ein mono- oder multikristalliner Barren produziert. Monokristalline Barren werden mit einem Kristallzuchtverfahren (Czochralski-Verfahren) hergestellt. Polykristalline oder multikristalline Barren entstehen durch das Schmelzen von bestehendem Silizium-Rohmaterial. Diese werden anschliessend mit einer Diamantdrahtsäge in hauchdünne Wafer geschnitten.

Die entstandenen Siliziumwafer werden gereinigt und mit einem Wafer-Inspektionssystem auf Fehler wie Mikrorisse, Einschlüsse, Sägespuren, defekte Kanten, Dickenvariationen und sonstige Materialschäden geprüft, sowie nach Qualität in Klassen sortiert. Auch die Leitfähigkeit wird gemessen.



Wafer-Inspektionssystem

Monokristalline Wafer haben durch ihre Reinheit höhere Wirkungsgrade als multikristalline Wafer.

Durch den **Zell-Prozess** wird die Oberfläche der Siliziumwafer bearbeitet. Mittels einer Passivierung der Oberfläche wird der Energieverlust innerhalb der Zelle reduziert. Weitere Beschichtungen verhindern ein zu starkes Reflektieren der Sonnenstrahlen.

Mittels eines nasschemischen Prozesses werden Sägeschäden bei den Wafern beseitigt, sowie eine Textur erzeugt. Mittels verschiedenen Beschichtungsverfahren erhält der Solarwafer optimale Eigenschaften für die Energiegewinnung. Mit dem Zellbeschichtungsverfahren auf der Vorder- und Rückseite wird die Aufnahme des Sonnenlichts erhöht und der innere Energieverlust reduziert. Eine optimale Passivierung sorgt auch für eine lange Lebensdauer der Zelle.

Die fertige Siliziumsolarzelle wandelt nun Licht in Strom um. Damit der Strom aufgefangen und weitergeleitet werden kann, werden im Siebdruckverfahren Kontakte auf der Vorder- und Rückseite des Wafers aufgedruckt. Anschliessend erfolgt das Testen der Solarzelle.

Im **Modul-Prozess** werden die einzelnen Solarzellen mit der SmartWire Connection Technology (SWCT) mit einer Folien-Draht-Elektrode zu einem Strang (String) verbunden.

Die Solarzellenstrings werden nun auf einem Glas und dem Einkapselungsmaterial positioniert und mittels Laminationsverfahren zu einem Solarmodul vereint. Mehrere Strings bilden die Solarzellenmatrix. Im nächsten Schritt erfolgt die elektrische Verbindung der Strings sowie der Zusammenbau aller Komponenten.

So sind die Solarzellen vor Umwelteinflüssen geschützt und garantieren eine lange Lebensdauer. Um über Jahrzehnte hinweg zuverlässig Strom erzeugen zu können, müssen die Photovoltaikmodule beständig gegenüber allen Witterungseinflüssen sein.

Im Anschluss erhält jedes Modul noch eine Rückseitenfolie mit elektrischer Anschlussdose und wird anschliessend hochspannungssicher auf Leistung und Elektrolumineszenz geprüft und klassifiziert.

Die schweizer Firma **Meyer Burger Technology** ist ein führender Hersteller von Präzisionsmaschinen für die Herstellung hocheffizienter Solarzellen und PV-Modulen.



11. Aktuelle und zukünftige technische Entwicklungen

Photovoltaik tritt derzeit weltweit ihren Siegeszug an.

Die drei gebräuchlichsten Anlageformen sind die Anlage auf dem Dach, an der Fassade oder die Freiflächenanlage. Solardächer und Fassaden werden vorzugsweise hinterlüftet ausgeführt, was pro Jahr bis zu 10% mehr Ertrag verspricht. Die Hinterlüftungsebene sollte dabei nicht weniger als 10 cm betragen, ideal wären 15 cm.

Bei Dachneigungen von 20 bis 50 Grad werden die Solarmodule in der Regel parallel zur Dachfläche montiert. Der Vorteil der Satteldachanlage ergibt sich aus der Nutzung einer im Grunde brachliegenden Fläche, die zudem schon die geeignete Schräge hat. Die parallele Montage hat neben der konstruktiven Effizienz durchaus auch eine optische Qualität.

Bei Flachdächern bzw. nur leicht geneigten Dächern ist es ergiebiger, die Solarmodule nicht parallel zur Dachfläche, sondern in einem Winkel von 25 bis 35 Grad anzubringen. Sind die Solarmodule weniger als 15 Grad geneigt, werden sie von Regen und Schnee nicht mehr ausreichend gesäubert. Ein weiterer Vorzug dieser geschrägten Aufdachmontage liegt in der natürlichen Hinterlüftung. Ausserdem bleibt die bestehende Dachhaut unangetastet im Gegensatz zur gebäudeintegrierten Installation, bei der die Unterkonstruktion der Solaranlage fest mit der Dachkonstruktion verankert wird.

Eine Fassadensolaranlage ist fester Bestandteil des Gebäudegesichtes. Sie sollte demnach behutsam als Gestaltungselement in das Design der Architektur integriert werden. Senkrecht angebracht, gegen Süden orientiert und ausreichend hinterlüftet reduziert sich der Ertrag auf 70 % gegenüber Solarmodulen, die 30 Grad geneigt sind. Senkrechte Fassadenmodule gegen Südosten oder Südwesten bringen nur noch 65 % Energieausbeute.

Freiflächenanlagen sind Photovoltaikanlagen, die nicht am Gebäude, sondern auf einer freien Fläche installiert sind. Eine Freiflächenanlage kann starr montiert oder der Sonne nachgeführt installiert werden.

GIPV, gebäudeintegrierte Photovoltaik, ist die konstruktive Integration der photovoltaischen Zellen in die Gebäudehülle. Hier produzieren die Solarmodule nicht nur Strom, sondern übernehmen gleichzeitig eine Gebäudefunktion wie Wetterschutz, Sonnenschutz oder andere konstruktive Aufgaben.



Romande Energie testet im Wallis die erste schwimmende Solarenergieanlage im Gebirge:

Falls das Pilotprojekt auf dem Stausee Lac des Toules beim Grossen St. Bernhard erfolgreich ist, soll ab 2021 Strom für über 6000 Haushalte erzeugt werden.

Das Westschweizer Energieunternehmen hat im Oktober 2019 mit der Installation der Testanlage beim Stausee Lac des Toules in der Gemeinde Bourg-St-Pierre im Val d'Entremont begonnen, der sich auf 1810 Metern über Meer befindet. Der Stausee in den Walliser Alpen eignet sich laut Romande Energie unter anderem deshalb gut für das Pilotprojekt, weil der See nach Süden ausgerichtet ist.



Die Anlage besteht aus einem Teppich von 36 Photovoltaik-Elementen, die im Seegrund verankert sind und sich mit dem Seespiegel heben und senken. Die Module bedecken eine Fläche von 2'240 Quadratmetern und sollen 800'000 Kilowattstunden Strom pro Jahr produzieren. Dies entspricht dem Jahresverbrauch von 220 Haushalten.

Dünne Luft gut für Produktivität:

Laut Romande Energie handelt es sich um eine Weltpremiere. Das Besondere an der Anlage ist der Standort im Gebirge. Versuche haben gezeigt, dass auf dieser Höhe 50 Prozent mehr Sonnenenergie generiert werden kann als im Flachland. Zurückzuführen ist dies unter anderem auf die dünnere Luftschicht und die dadurch höhere UV-Strahlung. Ausserdem reflektiert der Schnee im Winter das Licht.

Das Energieunternehmen will die Anlage während zwei Jahren testen. Wenn die Ergebnisse positiv ausfallen, ist ab 2021 ein Vollausbau auf einer Fläche von gut einem Drittel des Sees vorgesehen. Diese Anlage könnte 23 Millionen Kilowattstunden Strom für 6'400 Haushalte liefern.

Die Investitionskosten belaufen sich auf 2,35 Millionen Franken. Das Projekt wird vom Bundesamt für Energie unterstützt. Neben der technischen Machbarkeit will Romande Energie auch die Frage klären, ob sich schwimmende Solarenergieanlagen bei den vor allem im Winter schwierigen Wetterbedingungen im Gebirge auch finanziell rechnen.

PV-Module können als Dach für Auto- und Velounterständen, für ÖV-Wartehäuschen oder Teil einer Schallschutzmauer dienen.



Andere, kreative Realisierungen:

Mit geneigt aufgeständerten PV-Modulen ist eine darunterliegende Wiese als Schafweide nutzbar.



«**Agro-Photovoltaik**» mit Doppelnutzung der Äcker für Energie- und Bioernte:

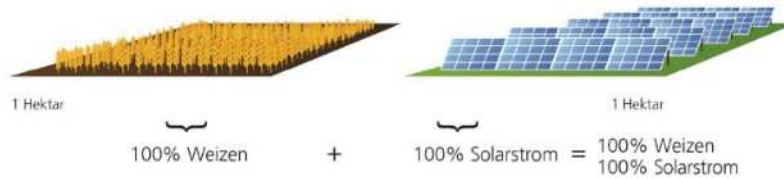
Durch eine Mischung von Lichtdurchlässigkeit der Module selbst und einer lockeren Anordnung können Lichtverhältnisse geschaffen werden, von denen einige Ackerfrüchte sogar profitieren.

Je nach Pflanzenart ergeben sich durch eine lockere Beschattung mit PV-Anlagen sogar erhöhte – oder zumindest keine niedrigeren Ernteerträge. Grossblättrige Pflanzen wie Spinat, Salat oder Kartoffeln und einige Obstsorten profitieren vom Halbschatten.

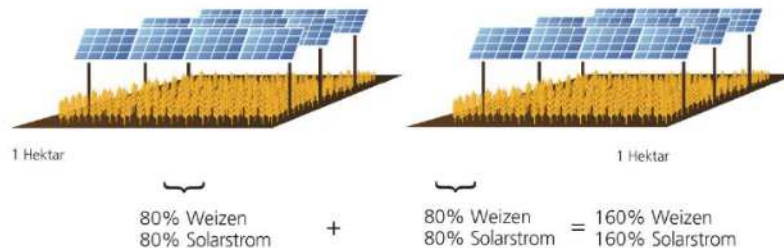
Die Flächeneffizienz liesse sich bei der kombinierten Agro+PV-Lösung um 60 Prozent steigern gegenüber der getrennten Flächennutzung von Acker auf der einen und Freiflächenanlagen auf der anderen Seite.

Steigerung der Landnutzungsrate um über 60 %

Getrennte Flächennutzung auf 2 Hektar Ackerland



Gemischte Flächennutzung auf 2 Hektar Ackerland: Effizienz > 60% gesteigert



Quelle:
Fraunhofer ISE

In heissen Ländern werden heute schon Gewächshäuser mit Photovoltaik zur Beschattung bestückt.



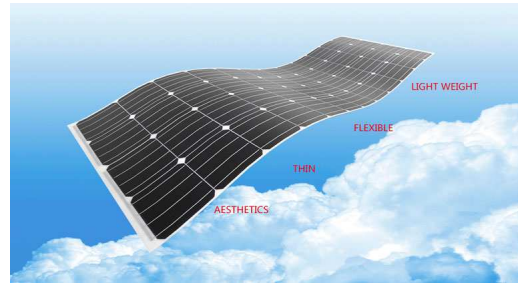
Der Kreativität sind kaum Grenzen gesetzt.



Industrieunternehmen haben meist einen grossen Energiebedarf und entsprechend hohe Stromkosten. Einen Grossteil davon können sie theoretisch durch Photovoltaik auf den Dächern ihrer Fabrikhallen und Gebäudekomplexe selbst decken.

Industriegebäude verfügen über viel Platz auf dem Dach für Photovoltaik-Anlagen, doch oft ist die Statik nicht auf das hohe Gewicht (15 – 20 kg/cm²) herkömmlicher Solarmodule ausgerichtet. Für solche Fälle hat die Firma **SunMan** aus China nun neuartige Photovoltaik-Module ohne eine Glasscheibe entwickelt: die „**eArche**“-Module. Sie sind um ein Vielfaches dünner und leichter als übliche Solarmodule aus Glas, haben aber die gleiche Witterungsbeständigkeit und Leistung wie Standardmodule mit kristallinen Siliziumzellen. Erste Projekte im südbadischen Waldkirch, der Schweiz und Spanien lieferten gute Ergebnisse.

Die ultraleichten PV-Module von SunMan lassen sich mit einer Gesamtlast von 3.5 - 5 kg/m² einfach aufs Dach bringen. Damit sind die PV-Module 10 - 15 kg/m² leichter als herkömmliche Solarmodule samt Unterkonstruktion. Die leichten eArche-Module bieten Installateuren zahlreiche Vorteile. Denn das geringe Gewicht und die dünne Bauart ermöglichen einen einfachen und kostengünstigen Transport und die Lagerung grosser Modulmengen. Zusätzlich gewährleisten sie eine schnelle Installation, da keine schwere Unterkonstruktion notwendig ist. Das schützt das Dach vor Beschädigungen und gewährleistet die Wasserdichtigkeit nach der Installation der Solarmodule.



Selbst bei neuesten Solarzellen geht drei Viertel der Sonnenenergie bislang ungenutzt verloren. Doch dies könnte sich bald ändern: Ein neuer Ansatz steigert deren Effizienz womöglich auf 80 Prozent – dank der zusätzlichen Aufnahme von Wärme.

Die herkömmlichen Solarzellen können die Wärme aus den Sonnenstrahlen nicht aufnehmen. Schlimmer noch: Grosse Hitze verringert Effizienz und Wirkungsgrad von Solarzellen, denn wenn Solarzellen heiss werden, nimmt ihre Spannung ab. Dabei besitzt gerade Wärme sehr viel Energie, die bislang ungenutzt verloren geht.

Bislang, denn Forscher der US-amerikanischen **Rice University in Houston** haben eine Methode entwickelt, bei der Solarzellen auch die Energie aus Wärme aufnehmen können. Und zwar mit Hilfe einer speziellen Anordnung von Kohlenstoff-Nanoröhrchen in den Solarzellen, die kleine Hohlräume umgeben.

So könnten Solarzellen mit der technologischen Entwicklung der Rice University, künftig sowohl Licht als auch Wärme aus den Sonnenstrahlen absorbieren und in Energie umwandeln. Das Forschungsteam geht dabei von einem Wirkungsgrad bis zu 80 Prozent aus. Ein weiterer Vorteil sei darüber hinaus die enorme Hitzebeständigkeit der Kohlenstoff-Nanoröhrchen. Die spezielle Legierung kann Temperaturen von bis zu 1'700 °C standhalten.



© Fotolia.com | Petair | Große Hitze verringert Effizienz und Wirkungsgrad von Solarzellen, denn wenn Solarzellen heiß werden, nimmt ihre Spannung ab. Dabei besitzt gerade Wärme sehr viel Energie, die bislang ungenutzt verloren geht. Bislang, denn Forscher der US-amerikanischen Rice University in Houston haben eine Methode entwickelt, bei der Solarzellen auch die Energie aus Wärme aufnehmen können.

Sollte die neue Technologie zur Serienreife gelangen, könnte sie die den weltweiten Photovoltaik-Ausbau noch einmal revolutionieren.

Flexible CIGS-Solarzellen

CIGS-Solarzellen bestehen aus Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (chemisch: Cu(In,Ga)Se₂) und ermöglichen die Herstellung von flexiblen, leichten Solarzellen auf Polymerfolien.

Das **EMPA-Labor für Dünnschichten und Photovoltaik** unter der Leitung von Ayodhya N. Tiwari verbesserten den Wirkungsgrad der Energieumwandlung bei CIGS-Solarzellen auf flexiblem Polymersubstrat auf 20.8%. Das ist 0.4% höher als ihre bisher erreichte Marke.

Flexible CIGS-Solarmodule sind bereits im Handel erhältlich, insbesondere vom Empa-Spin-off **Flisom**, das von Tiwari mitgegründet wurde.



Die flexible Solarzelle auf Polymerfolie. Bild: empa.

Künftige Entwicklungen werden insbesondere darauf abzielen, diese neuen Verfahren vom Labor- auf den industriellen Massstab zu übertragen, um die Stromerzeugung und Rentabilität von Photovoltaikanlagen zu steigern.

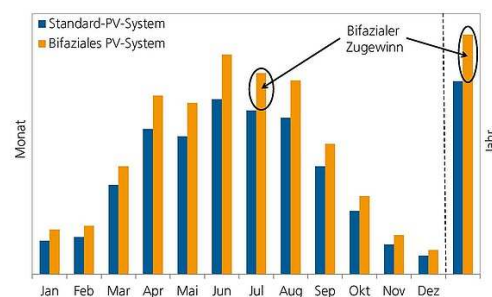
Bifaziale Solarmodule

Skifahrer kennen das nur zu gut: An einem sonnigen Tag nicht richtig eingecremt - und schon glüht abends der Sonnenbrand. Das passiert schnell, weil der Schnee die Solarstrahlung reflektiert.

Diesen Effekt macht sich die Solarindustrie jetzt zunutze, um den Ertrag von Fotovoltaikmodulen zu steigern. Die üblicherweise verwendeten Module haben nämlich ein Manko: Sie können nur aus den Sonnenstrahlen Strom erzeugen, die von vorne auf sie treffen. Was von der Umgebung auf die Rückseite reflektiert wird, lässt sich nicht verwerten.



Forschungsinstitute und Unternehmen haben nun Silizium-Modulen entwickelt, die auch mit der von hinten einfallenden Sonnenenergie Strom produzieren können. Abhängig von Installationsort und -art sollen diese sogenannten bifazialen Module bis zu 25 Prozent mehr Strom liefern als konventionelle Solarpanels.



Ähnlich gross ist der Gewinn bei Solarparks, die in Wüsten oder in anderen Landschaften mit hohem Sandanteil im Erdboden stehen. Montiert man die Module auf Gestelle, die der Sonne folgen, beträgt der Mehrertrag in solchen Regionen gar rund 25 Prozent. Dabei sind die Kosten für die zusätzlich produzierten Kilowattstunden gering. Bifaziale Module sind inklusive der sogenannten Aufständigung heute nur 4 – 7% teurer als Standardsysteme. Bereits bei zehn bis fünfzehn Prozent Mehrertrag lohnt sich das.

Das Konzept der bifazialen Fotovoltaik hat aber auch noch aus einem anderen Grund Charme: Die Module machen es möglich, zwei Mal am Tag Strom zu erzeugen. Die Module sind hier nicht wie üblich nach Süden geneigt, sondern senkrecht stehend in Ost-West-Ausrichtung installiert. Die Vorderseite liefert vormittags, die Rückseite nachmittags Strom. Zudem sorgt die Ost-West-Ausrichtung dafür, dass das lokale Netz weniger stark belastet wird.

Allerdings benötigt die Anlage mehr Platz als übliche Solarparks - die Modulreihen müssen Abstand halten, damit sie sich nicht gegenseitig verschatten. Wegen der weit auseinander stehenden Reihen sowie der senkrechten Montage ist die Fläche aber nicht verloren. Sie kann ökologische Funktionen übernehmen oder aber landwirtschaftlich genutzt werden. So können solche Solarparks zum Beispiel als Kuhwiese oder als Mähwiese für Futtermittel dienen.



Perowskit-Zellen

Silizium bildet heute das Rückgrat der Stromproduktion mittels Photovoltaik. Als kostengünstige Alternative ist seit einiger Zeit der Halbleiter Perowskit im Gespräch. Die Forschung an Perowskit-Zellen hat in den letzten Jahren enorme Fortschritte erzielt.

Im Wettkampf um die besten Ideen mischt auch die Schweiz mit: Die Materialprüfungs- und Forschungsanstalt **Empa** arbeitet im Verbund mit dem Industriepartner **Solaronix SA** (Aubonne/VD) an einer Perowskit-Zelle, die zwar einen begrenzten Wirkungsgrad aufweist, allerdings das Potenzial für eine günstige Industriefertigung hat.



Solaronix-Geschäftsführer Toby Meyer zeigt ein 20 x 30 cm grosses Perowskit-Solarmodul, welches von Solaronix mit Siebdruck hergestellt wurde. Im Nachfolgeprojekt UPero werden derartige Module mit Schlitzdüseverfahren entwickelt. Foto: B. Vogel



An der Empa in Dübendorf stellen Wissenschaftler mit dieser Anlage im Schlitzdüsen-Verfahren Perowskit-Solarzellen in der Grösse von 10 x 10 cm her. Im Zuge des aktuell laufenden Forschungsprojekts UPero soll das Herstellungsverfahren auf eine Zellgrösse von 30 x 30 cm hochskaliert werden. Foto: Empa

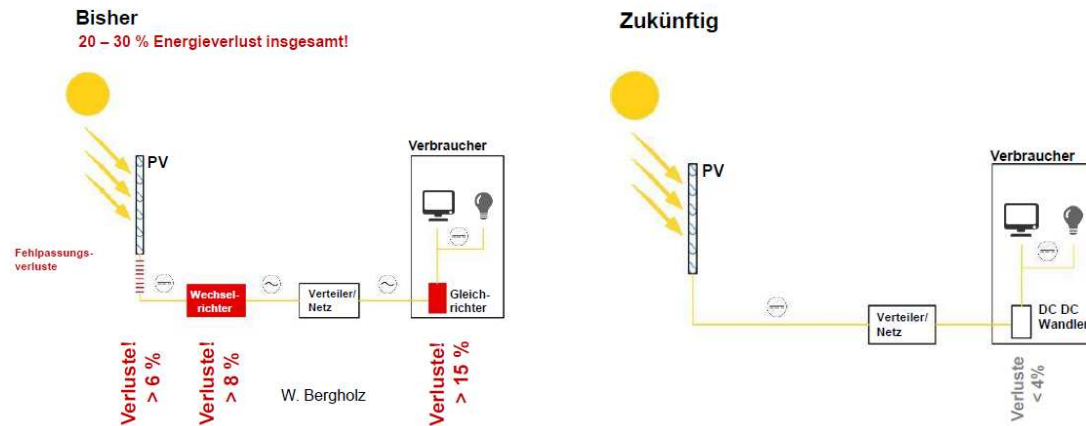
Die Faszination von Perowskit-Solarzellen reicht über das aktuelle Forschungsprojekt hinaus. Heute gilt es als besonders aussichtsreich, Perowskit-Zellen gemeinsam mit Siliziumzellen zu Tandemzellen zu verbauen. Da Perowskit-Zellen vor allem die grünen und blauen Anteile des Lichts nutzen, Siliziumzellen aber die roten und infraroten Anteile, könnten Tandemzellen zu einem besonders hohen Wirkungsgrad führen. Unter Laborbedingungen wurden bisher 28% erreicht, Wissenschaftler halten sogar Wirkungsgrade von 32.5% für erreichbar. Solarzellen mit hohem Wirkungsgrad und tiefen Herstellungskosten würden der Photovoltaik einen weiteren Schub verleihen.

An der Vision solcher Tandemsolarzellen arbeiten Forscher des **Institut de microtechnique der EPFL** am Standort Neuenburg bzw. des **Centre Suisse d'Électronique et de Microtechnique SA (CSEM)** in Neuenburg, aber auch ausländische Firmen wie beispielsweise Oxford PV, Wonder Solar oder GCL. Um Tandemzellen geht es auch an der Empa in der Abteilung von Prof. Ayodhya Tiwari. Hier werden hocheffiziente Tandemzellen mit Perowskit/CIGS-Dünnschichttechnologie erforscht.

Solarmodule auf Perowskit-Basis empfehlen sich unter anderem für Anwendungen der gebäudeintegrierten Photovoltaik, weil individuelle Formen damit leichter hergestellt werden können als bei Siliziumwafern. Denkbar sind beispielsweise auch glasbasierte Solarziegel.

Umstellung auf Gleichstrom (24V bzw. 48V)

Die zentrale Stromversorgung wird durch die Dezentralisierung immer mehr an Bedeutung verlieren. Eine direkte Verwendung des durch die Solarmodule erzeugten Gleichstroms würde eine grosse Vereinfachung mit weniger Energieverlusten erlauben.



Eine Gleichspannungs-Photovoltaik ist besonders wertvoll in Entwicklungsländern für eine lokale Erzeugung und Verbrauch von Solarstrom, ohne auf eine Stromversorgung angewiesen zu sein. Dazu ist wenig Startkapital nötig und eine Anlage ist bei Bedarf sukzessive ausbaubar.



Anhang: Physikalische Einheiten im Zusammenhang mit der Photovoltaik:

Leistung allg.:

1 W	Watt	1.5 W: durchschnittliche Leistung eines Handys
1 kW = 1'000 W	kilowatt	3 – 10 kW: Leistung einer Hausdach PV-Anlage
1 MW = 1'000 kW	Megawatt	8 MW: Antriebsleistung eines ICE 3 Zugs
1 GW = 1'000 MW	Gigawatt	1 GW: Leistung eines typischen AKW's
1 TW = 1'000 GW	Terawatt	1.7 TW: durchschn. elektrische Leistung weltweit

Leistung von Solarmodulen:

1 Wp Watt peak

Mit Watt peak bezeichnet man die von Solarmodulen abgegebene elektrische Leistung unter Standard-Testbedingungen mit folgenden Parametern:

- Zelltemperatur = 25 °C
- Bestrahlungsstärke = 1'000 W/m²

Gebräuchlich sind auch kWp, MWp, GWp

Strommenge (Leistung pro Zeiteinheit):

1 kWh kilowattstunde

Kilowattstunden sind eine Masseinheit für Energie. Eine Kilowattstunde entspricht der Energie, die eine Photovoltaikanlage mit der Leistung von 1 kW in einer Stunde erzeugen kann. Somit ist die Einheit Kilowattstunde ein Mass für den Stromertrag oder die Stromproduktion einer Photovoltaikanlage.

Mit einer kWh Strom können Sie:

- 1 Waschmaschine Wäsche waschen
- 50 Stunden lang mit einer Energiesparlampe einen Raum beleuchten
- einen Kuchen backen
- 7 Stunden fernsehen
- Essen für 4 Personen kochen

Eine 1 kWp Photovoltaikanlage mit einem idealen Standort (Südlage, keine Verschattung) in der Schweiz kann im Durchschnitt jährlich etwa 1'000 kWh erzeugen.