

Wie kann man Photovoltaik (PV) farblich gestalten?

Bei PV-Modulen besteht wachsende Nachfrage nach alternativen Farben und Designs. Zum Beispiel in dicht verbauten Stadt- und Ortszentren, wo historische Bausubstanz und Designanforderungen moderner Architektur aufeinandertreffen. Zahlreiche Innovationen bringen Farbe in die Welt der PV-Module.

1. Farbwahrnehmung

Die solare Strahlung auf der Erde hat eine spektrale Verteilung im Wellenlängenbereich (λ) von etwa 300 nm bis 2500 nm und kann in drei spektrale Bereiche unterteilt werden: ultraviolett (UV), sichtbar (VIS) und nahes Infrarot (NIR). Der Teil der solaren Strahlung, der für das menschliche Auge sichtbar ist, umfasst einen spektralen Bereich von 380 nm bis 780 nm.

Eine Solarzelle aus c-Si-Material kann Wellenlängen $< 1150\text{nm}$ nutzen und wandelt daher Sonnenlicht aus dem (UV)-Bereich über den gesamten sichtbaren Bereich (VIS) bis in den nahen Infrarot Bereich (NIR) in elektrische Energie um. [1]

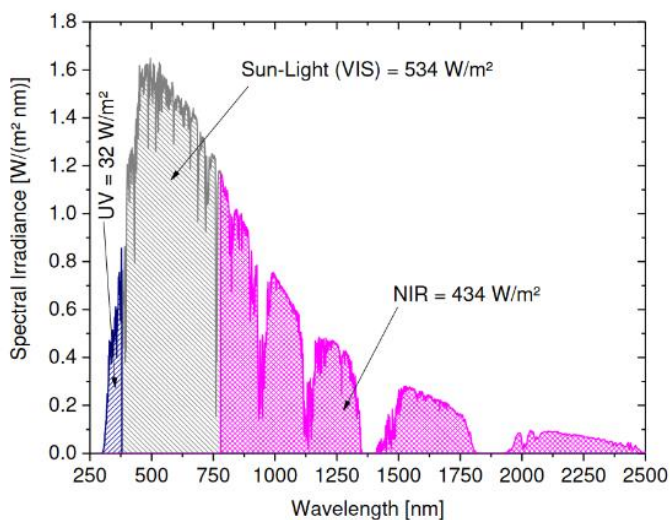


Abbildung 1: In dieser Abbildung wird ein terrestrisches solares Spektrum dargestellt, wobei das sichtbare (VIS) Sonnenlicht in Grau erscheint. Der sichtbare Teil der solaren Bestrahlung trägt etwa die Hälfte zur Gesamtintensität des dargestellten solaren Spektrums bei.

2. Beziehung zwischen Farbe und Effizienz

Wenn Licht mit Materialien interagiert, kann es entweder absorbiert, reflektiert oder durch das Material hindurch transmittiert werden. Welche Teile des reflektierten und transmittierten Lichts gestreut werden, wird durch die Oberflächenstruktur und die innere optische Struktur der Materialien bestimmt. [1] Die Wahrnehmung eines stark absorbierenden und schwach reflektierenden Objekts wie bspw. eines hoch effizienten PV-Moduls ist dunkel oder schwarz. Ein farbiges PV-Element ist gleichbedeutend mit teilweiser Reflexion der Bestrahlung im sichtbaren Bereich. Folglich ist bei einem farbigem PV-Element die Menge an Sonnenenergie, die in Elektrizität umgewandelt werden kann, im Vergleich zu einem Produkt ohne Färbung, reduziert.

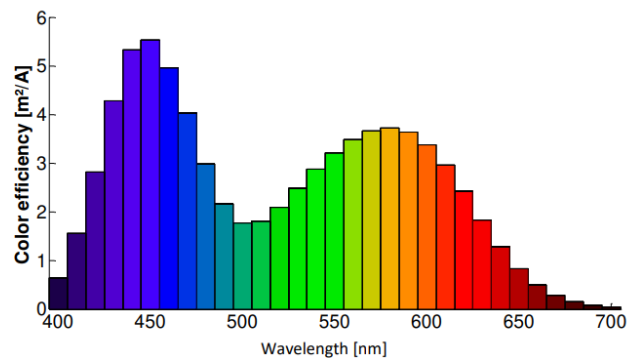


Abbildung 2: Ceff für monochromatische Farben, abgeleitet aus Reflexionsspektren mit "pill-box" Form (Breite = 40 nm und Höhe = 100%) Die effizienteste monochromatische Farbe entspricht einer Zentrumswellenlänge von etwa 450 nm (blau). Insbesondere scheint blau etwa doppelt so effizient zu sein wie grün und rot.

Absorptive Farben, erzeugen die Farbgebung durch Absorption bestimmter Wellenlängen. Der reflektierte Anteil des Spektrums definiert die Farbe. Opake absorptive Schichten ergeben kräftige Farben unabhängig von Lichteinfall und Betrachtungswinkel. Dünne Schichten ermöglichen auch mit absorptiven Farben bunte PV-Module, wenngleich Leistungseinbußen damit einhergehen. **Strukturelle Farben** hingegen erzeugen die Farbgebung durch selektive Reflexion von bestimmten Wellenlängen. Da nahezu kein Licht absorbiert wird ermöglichen diese Materialien deutlich niedrigere Leistungsverluste.



3. Methoden zur Implementierung von Farbe in die PV

Die Herausforderungen, die ästhetische Qualität optimal mit Energieeffizienz, Zuverlässigkeit und Sicherheit in Einklang zu bringen, sind Treiber der Innovation. Im Folgenden werden einige Techniken erläutert, mit denen gefärbte oder strukturierte BIPV-Module entwickelt werden können: [1,3]

1) Gefärbte polymere Einbettungsfolien: Neben eigenen Zwischenschichten können auch die polymeren Einbettungsfolien eingefärbt werden. Dies stellt eine materialsparende und flexible Lösung dar, bei der der Modulproduktionsprozess nicht umgestellt werden muss. In der amorphen Siliziumtechnologie kann mit farbigen Polyvinylbutyralfolien (PVB) als rückseitige Einbettungsschicht PV-Farbglass mit verschiedenen Transparenzgraden erhalten werden.

2) Gefärbte und/oder halbtransparente PV-aktive Schichten: Halbtransparente PV-Schichten können beispielsweise bei amorphem Silizium PV-Modulen (a-Si) durch die Laserbehandlung der aktiven Schicht erreicht werden, wobei diese teilweise entfernt wird, um die Lichtdurchlässigkeit zu erhöhen. Eine mögliche Anwendung ist in vollverglasteten Gebäuden zu sehen, in denen die verfügbare Fläche für BIPV sehr groß ist und daher oft keine hochleistungsfähigen Lösungen gefordert sind. Andere Solarzellen der dritten Generation (z.B. Farbstoffsolarzellen oder organische Solarzellen) können durch geschickte Wahl der verwendeten Materialien von Grund auf verschiedenfarbig aussehen.

3) Beschichtungen oder Zwischenschichten mit Farben oder Mustern: Eine Zwischenschicht mit einer bestimmten Farbe/Muster kann mit Hilfe einer zusätzlichen Einbettungsschicht im Modul laminiert werden, was im Vergleich zum Glasdruck größere Flexibilität in der Produktion von verschiedenen großen BIPV-Elementen mit sich bringt.

4) Modifiziertes Frontglas durch Drucken oder Beschichten: Es können verschiedene Oberflächenbehandlungen auf die Frontglasscheibe angewendet werden, üblicherweise auf der Innenseite: Durch Siebdruck oder digitalen Tintenstrahldruck können keramische Pigmente auf Glas aufgetragen werden und anschließend durch Brennen im Ofen mit dem Glassubstrat zu einer Emaillebeschichtung verschmolzen werden. Auf Grund der hohen Flexibilität, die auch das Auftragen von verschiedensten Mustern erlaubt, ist dies eine der am häufigsten angewandten Methoden zur Farbgebung in der BIPV.[4] Alternativ können auch die zuvor erwähnten Dünnschichten für strukturelle Farben auf Glas aufgetragen werden, zum Beispiel mittels Kathodenzerstäubung.

5) Gefärbtes Frontglas durch Additive: Für PV-Anwendungen ist es üblich, Flachglas mit einem geringen Eisenoxidgehalt zu verwenden, welches bei normalem Flachglas zu einer leicht grünen Farbe führt, um die Lichtdurchlässigkeit zu maximieren. Alternativ können jedoch zusätzliche Bestandteile zur Glaszusammensetzung hinzugefügt werden, zum Beispiel kann zusätzliches Eisen verwendet werden, um eine grüne Farbe zu erzeugen, Kobalt und Eisen für eine blaue Farbe, Kobalt und Selen für eine bronzene oder graue Farbe. Diese Methode der Farbgebung ist allerdings auf Grund der hohen Kosten für Kleinserien und hoher Leistungsverluste nicht sehr verbreitet.

6) Antireflexbeschichtungen auf Solarzellen: Da unbeschichtetes kristallines Silizium (c-Si) hohe Reflexionswerte aufweist (ca. 30 %), sind sowohl monokristalline als auch multikristalline PV-Zellen mit Antireflex-Beschichtungen auf ihren Oberflächen versehen. Die optimierte Dicke der AR-Beschichtung verleiht den Zellen ihre typische blaue Farbe. Durch Änderung der Beschichtungsdicke können Farben wie Grün, Gelb, Orange und Pink erzielt werden, wobei sich das Reflexionsminimum in den nahen Infrarotbereich verschiebt und die Reflexion im sichtbaren Spektrum verstärkt wird.

4. Links

[1] IEA Photovoltaic Power Systems Programme (PVPS) Task 15: Coloured BIPV: Market, Research and Development. Feb. 2019. [Download: Coloured BIPV \(iea-pvps.org\)](#)

[2] Gerhard Peharz, Andreas Ulm, "Quantifying the influence of colors on the performance of c-Si photovoltaic devices," Renewable Energy (2018) 129, 299-308;

[3] Erika Saretta, Pierluigi Bonomo, Francesco Frontini, "Active BIPV Glass Facades: Current Trends of Innovation"; GPD Glass Performance Days 2017 - Conference Proceedings, pp.2-7; <https://www.glassonweb.com/article/active-bipv-glass-facades-current-trends-innovation>

[4] Philipp Krampe, "Zur Festigkeit emailierter Gläser/On the Solidity of Enamelled Glazing Units"; Doctoral Thesis, Technische Universität Dresden (2013); <http://tud.gucosa.de/api/gucosa%3A28115/attachment/ATT-0/>

[5] PV@fassade (2014-2017) "Facade-elements with PV-active layers"; Energieforschung Austria; Project ID: FFG 843803; <https://www.energy-innovation-austria.at/article/pvfassade>