

# Photovoltaik-Anlagen in Gebäude integrieren

S. Rexroth, Dresden

**Photovoltaik hat sich als nachhaltige, arbeitsplatzschaffende und umweltentlastende Technologie zur Stromerzeugung etabliert und ist als Technologie zur Stromversorgung anerkannt. PV-Module überzeugen mit großen gestalterischen Möglichkeiten und bieten als netzgekoppelte dezentrale Systeme in der Architektur und im Städtebau viele Anwendungsmöglichkeiten.**

## 1 Möglichkeit für Sanierung und Neubau

Photovoltaikmodule überzeugen mit großen gestalterischen Möglichkeiten aufgrund ihrer bautechnischen Qualitäten wie die Herstellung in der bekannten und bewährten Verbundglastechnik, die Möglichkeit der Kombination mit marktgängigen Fassadenkonstruktionen oder das Ersetzen bestimmter Fassadenelemente. Das belegen zahlreiche Neubauten mit fassaden- oder dachintegrierten Photovoltaikmodulen wie zum Beispiel die Sporthalle „TÜArena“ in Tübingen (Bild ❶). Aber auch das Marktsegment der Fassaden-sanierung eignet sich für die Photovoltaik – besonders bei Elementfassaden, wie Bild ❷ zeigt. So werden beispielsweise beim mehrgeschossigen Wohnungsbau Fassaden häufiger saniert, als dass sie neu errichtet werden. Wie 2002 eine Studie des Instituts für Wohnen und Umwelt in Darmstadt darlegte, erfolgen gerade die ersten Maßnahmen bei Modernisierungs- und Sanierungsarbeiten an der Gebäudehülle.

Besondere Anforderungen an das Bauelement Photovoltaikmodul stellen Baudenkmale wie die Gebäude der „Klassischen Moderne“ oder der „Nachkriegsmode“. Hier erscheinen die Glasfassadenkonstruktionen besonders für die Integration von Photovoltaikmodulen im Denkmalschutz geeignet, die bisherigen Produkte zum Lösen solcher Integrationsaufgaben allerdings noch eingeschränkt anwendbar.

## 2 Photovoltaikmodul als Bauelement

Neubauten im Industrie- und Gewerbebau zeichnen sich meist durch großflächige, dabei in Material und Oberfläche homogene Fassaden aus. Einfache Satteldächer oder Flachdächer überdecken die oft mehrere

hundert Quadratmeter großen Flächen von Hallen und Produktionsstätten. Solche Flächen eignen sich hervorragend, um mit Sonnenlicht Energie für das Gebäude zu erzeugen. Energetisch nutzbare Sonneneinstrahlung steht auch in unseren Breitengraden ohne große regionale Unterschiede mehr als ausreichend zur Verfügung. Die Energieausbeute wird um so besser, je exponierter die Solarfläche zur Sonne steht. Die günstigste Position ist eine Ausrichtung nach Süden bei einer Neigung von rund 30°. Doch auch an West- oder Ostfassade erreichen Photovoltaikmodule noch akzeptable Energieerträge (Bild ❸). Wichtigster Teil eines Photovoltaikmoduls sind die Solarzellen, die in der Regel aus Silizium bestehen, in großer Anzahl elektrisch verschaltet und zwischen Gläsern oder Folien eingebettet werden. Im öffentlichen und gewerblichen Bereich wurden bislang Anlagengrößen von bis zu 1 MW realisiert.

### 2.1 Module für den Sonnenschutz

Isoliergläser mit einer Solarzellenzwischenlage haben die gleichen Wärmedämmeigenschaften wie eine herkömmliche Isolierverglasung. Da ein großer Teil der solaren Einstrahlung jedoch von den Zellen absorbiert wird, ist der Gesamtenergiedurchlasswert (g-Wert) geringer. Da dieser Wert rund 15 % beträgt, wenn 80 % der Scheibe mit Solarzellen belegt sind, eignen sich solche Gläser hervorragend für den Sonnenschutz. Die Lichttransmission lässt sich werkseitig individuell einstellen. Sie hängt wie beim g-Wert ebenfalls von der Belegungsichte, genauer vom Zellenabstand ab. Er bestimmt die Lichttransparenz der Zellen des Photovoltaikmoduls, wenn das Trägermaterial aus Glas besteht. Die Paneele sind dann semitransparent. Kristalline Siliziumzellen haben im Allgemeinen einen Abstand von 2 bis 5 mm zueinander. Dieser Abstand beträgt bei 1 cm breiten Dünnschichtzellen 0,2 bis 0,3 mm und ist daher optisch kaum wahrnehmbar. In Abhängigkeit von der Distanz zur Fassade oder zum Dach entstehen Effekte wie mit einem Schleier. Die einstellbare, hohe Transparenz ist im Inneren wahrnehmbar, aus der Ferne erwecken die Paneelflächen den Eindruck einer geschlossenen Hülle.

#### Autor

Dr.-Ing. Susanne Rexroth ist Architektin und wissenschaftliche Mitarbeiterin in Forschung und Lehre am Institut für Baukonstruktion, TU Dresden.

Je nach Abstand der Zellen können die Paneele zur Tageslichtnutzung eingesetzt werden. Der Lichtdurchlassgrad muss mit der Wirksamkeit des Moduls abgestimmt werden, denn je höher die Transparenz, desto geringer ist die elektrisch wirksame Fläche eines Moduls. Die Photovoltaikmodule werden zum Lichtfilter, die – in Abhängigkeit von den optischen Eigenschaften der Abdeckscheiben – farbneutrales Licht durch die Zellzwischenräume ins Rauminnere lassen. Ein Standardmodul, in dem die normalerweise 100 x 100 mm<sup>2</sup> großen Siliziumzellen im gebräuchlichen Abstand von 2 bis 3 mm verlegt sind, hat eine Lichttransmission von rund 10 %. Das genügt, um Bereiche ohne besondere Tageslichtanforderungen, beispielsweise Treppenhäuser oder Foyers, partiell ausreichend zu belichten. Wesentliche bauphysikalische Kennwerte zeigt Tafel 1.

**2.2. Dünnschichtmodule als Blendschutz**

Die noch verhältnismäßig junge Dünnschichttechnologie eröffnet den größten Spielraum, was die Erzeugung einer kontrastarmen Beleuchtung und homogenen Leuchtdichteverteilung im Rauminneren anbelangt. Die elektrisch aktive Beschichtung wird mittels Laserstrahlen, je nach der erwünschten Transparenz des Moduls entfernt. Es entsteht der optische Eindruck eines Blicks durch eine Gardine. Die Dünnschichtmodule eignen sich besonders gut für einen wirksamen Blendschutz. Einen Eindruck vermittelt das Büro- und Verwaltungsgebäude des Würth-Konzerns in Chur, bei dem erstmalig semitransparente Dünnschichtmodule als Sonnenschutz eingesetzt wurden. Die strukturierten Dünnschichtzellen aus Kupfer-Indium-Diselenid (CIS) in der Isolierverglasung der Oberlichter modulieren das Tageslicht blendfrei (Bild 4).

**3 Integration der Bauteile**

Bei der Integration von solaren Energiesystemen in die Gebäudehülle geht es um die Grundproblematik, ein technisches Element in eine neue oder bestehende Außenwandkonstruktion einzufügen. Wie angemessen dies geschieht, wird bei dieser Aufgabe zu dem bestimmenden Maß der architektonischen Ergebnisbewertung. Diese Anpassarbeit beeinflussen Material und Konstruktion des Gebäudes sowie Größe und Proportionen der Elemente. Auf der gestalterischen Seite wird darüber hinaus die Wirkung der Photovoltaikfläche sehr stark bestimmt, sei es durch die strukturelle Erscheinung und die Oberfläche, durch die Anlehnung, Ähnlichkeit und Harmonie von Textur, Farbe etc., oder die gezielte Kontrastierung und Störung bis zur Thematisierung formaler Brüche. In Hinblick auf die Installation der Anlagen unterscheidet man integrierte und additive Lösungen. Bei letzterer

stellt die Solaranlage ein zusätzliches Bauteil auf oder am Gebäude dar. Bei der integrierten Installation ersetzt das Photovoltaikmodul dagegen Bauteile der Fassade. Die Solarfläche wird zum Bestandteil der Gebäudehülle und

schützt es, über die Funktion der Stromerzeugung hinaus, vor Wettereinflüssen, Schall oder Sonne wie andere Fassadenmaterialien auch. Ziel einer Planung mit Photovoltaikmodulen sowohl im Fassaden- als auch im Dachbereich



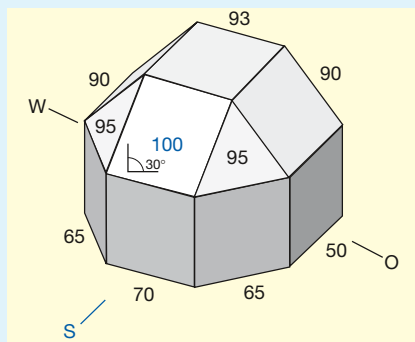
1 TüArena in Tübingen mit grün gefärbten, semitransparenten Solarzellen

Foto: F. Kuyas



2 Südfassade mit einer 70 m hohen PV-Anlage

Foto: WBG Marzahn



3 Sonneneinstrahlung in Abhängigkeit zum Neigungswinkel und zur Ausrichtung einer PV-Fläche

Quelle: S. Rexroth



4 Oberlichter mit semitransparenten Dünnschichtzellen filtern das Tageslicht gleichmäßig

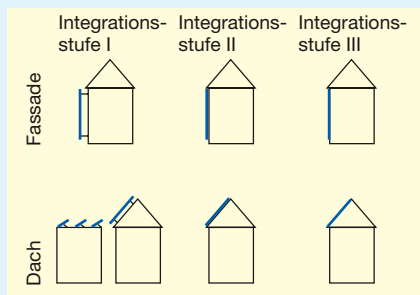
Foto: Würth

Tafel 1 Produktcharakteristika und bauphysikalische Kennwerte für ein PV-Modul in Isolierverglasung

Quelle: Schüco

|   |  |
|---|--|
| <b>Aufbau äußere Scheibe</b>                    | TVG (Teilvorgespanntes Glas), eisenarm, 5 mm               |
| <b>Solarzellen</b>                              | kristallinen Silizium, 200 x 200 mm <sup>2</sup>           |
| <b>Verbundmaterial</b>                          | Gießharz   |
| <b>Rückscheibe</b>                              | TVG, 5 mm  |
| <b>Scheibenzwischenraum</b>                     | 15 mm, Argonfüllung  |
| <b>innere Scheiben</b> (raumseitig)             | Floatglas, 6 mm, low-e-Beschichtung (niedrige Emissivität) |
| <b>Scheibenabmessung</b> (Modul)                | 1523 x 1000 mm <sup>2</sup>                                |
| <b>Flächenspezifisches Gewicht</b>              | 45 kg/m <sup>2</sup>                                       |
| <b>Flächenspezifische Leistung</b>              | 66,3 W <sub>p</sub> /m <sup>2</sup>                        |
| <b>Modulleistung</b>                            | 101 W <sub>p</sub>   |
| <b>Durchsicht</b>                               | partiell, insgesamt 37 %                                   |
| <b>Belegungsichte</b>                           | 63 %   |
| <b>Zellabstand</b> horizontal/vertikal          | 35 mm/35 mm  |
| <b>Lichttransmission T<sub>v</sub></b>          | 28 %   |
| <b>Gesamtenergiedurchlasswert g</b>             | 0,27   |
| <b>Wärmedämmung U</b> bis (W/m <sup>2</sup> ·K) | 1,2  |
| <b>Schallschutz</b>                             | > 39 dB  |

sollte eine möglichst weit reichende konstruktive und gestalterische Einbindung in das Gebäude sein. Die Hierarchie der baulichen Integration in den Fassaden- und Dachbereich folgt entsprechend Bild 5 drei Stufen.



### 5 Stufen zur Gebäudeintegration von Photovoltaikmodulen

- I: Applikation (visuelle Integration);
- II: konstruktive Addition;
- III: konstruktive Integration

Quelle: S. Rexroth



### 6 Kombination verschiedener Glas-techniken. Die Verbundgläser haben eine Lichttransmission von rund 20 %

Foto: K. Jansen



### 7 Treppenhaus Leertouwer in Barnefeld, Niederlande

Foto: Schüco

## 3.1 Photovoltaikmodule als Fassadenelemente

Die Einbindung von Photovoltaikmodulen als Verglasungsbauteil in Fassaden bietet sich an. Photovoltaikmodule werden in fast beliebiger Größe und Form mit oder ohne Rahmen hergestellt und lassen sich – ausgestattet mit allen funktionalen Eigenschaften von Verbundgläsern – wie Glasscheiben einbauen. Ein- oder mehrseitige Lagerungen sind ebenso möglich wie punktförmige Befestigungen oder die geklebte Montage in Structural-Glazing-Systemen. Geeignet sind alle Standardfassaden, selbsttragende (zum Beispiel Pfosten-Riegel-Konstruktionen) genauso wie nichtselbsttragende, das heißt zusätzlich ausgesteifte Konstruktionen. In der Kaltfassade ersetzen die Photovoltaikmodule die Außenwandbekleidung, in der Warmfassade sogar die komplette Außenhaut. Je nach Abstand und Anordnung der Zellen erlauben die durchscheinenden Module in Warmfassaden einen effektiven Blendschutz (wie in Bild 4) oder führen zu reizvollen Schattenmustern im Rauminneren. Ein Beispiel, wie man die Gestaltungspotentiale der Solarzellen und -paneele kreativ und über die alleinige Funktion als technisches Bauelement zur Stromerzeugung hinaus nutzen kann, zeigt der Glasgestalter *Klaus Jansen* mit seinen Isolierglasscheiben für das Bürogebäude der Firma Biohaus in Paderborn (Bild 6). In Zusammenarbeit mit dem Photovoltaikmodulhersteller Schüco, den Solarzellenherstellern Sunways und Q-Cells sowie dem Architekten *Franz-Josef Huxol* entwickelte er sechs verschiedene Isolierverglasungen, zusammengesetzt aus einer VSG-Scheibe (Verbundsicherheitsglas) mit innen liegenden Solarzellen aus kristallinem Silizium und einer raumseitigen, eigens gestalteten Glasscheibe. Zum Teil sind diese Gläser mit Emaillefarbe bemalt, teilweise kombiniert er sie mit Echtantikglas, punktwise werden sie sandgestrahlt. Das herkömmliche Erscheinungsbild der sonst grauglänzenden Rückseite einer konventionellen Solarzelle weicht einer ausdrucksstarken Fläche, bei der das Thema Raster und Quadrat wirkungsvoll interpretiert wurde.

## 3.2 Photovoltaikmodule im Dach

Bei der Indachmontage ersetzen Photovoltaikmodule als Überkopfverglasung wie in Bild 7 die Dacheindeckung. Diese Montageart bedeutet eine gleichmäßigere Gesamtoberfläche, da die Module in das Dach „versenkt“ sind. Die Leitungen werden direkt nach innen geführt, weshalb die Dachhaut unversehrt bleibt. Es sind keine durch die Dacheindeckung führenden Halteklammern wie Sparrenanker oder Dachhaken nötig. Wirtschaftliche Vorteile ergeben sich durch das Ersetzen der Dacheindeckung mit Kollektoren. Für die Einbindung in die Dachhaut wurden Photovoltaikmodule entwickelt, die eine Dachbahn-, Metall- oder Dachsteineindeckung ersetzen können. Die „Solardachsteine“ umfassen so

gut wie alle Dacheindeckungsarten – von der Biberschwanzdeckung über Dachpfannen bis zu Schieferplatten. Dabei werden von den Photovoltaikmodulen entweder kleinteilig einzelne oder großflächig mehrere Dachsteine ersetzt. Die Regendichtigkeit kann dabei auf unterschiedliche Weise erreicht werden. Entweder überlappen sich die Module nach dem Schindelprinzip oder die Module liegen in einem Kunststoffgehäuse mit speziellen Abdeckleisten. Bei Kleinmodulen vergrößert sich einerseits der Montage- und Verkabelungsaufwand, andererseits können Dachdecker auch komplizierte Dachflächen belegen.

### 3.3 Photovoltaikmodule auf dem Dach

Mögliche Varianten beim Dacheinbau sind Aufdach- oder Indachsysteme oder aber konstruktiv eingebundene Lösungen. Bei der Montage auf das Schrägdach werden die Photovoltaikmodule mit einer Metallunterkonstruktion oberhalb der bestehenden Dacheindeckung montiert. Schienensysteme aus Aluminium oder Edelstahl ermöglichen eine schnelle Montage und machen die Lage der Elemente unabhängig vom Raster des Dachtragwerks. Die Befestigung der Unterkonstruktion auf einer Dachziegeleindeckung erfolgt mittels Sparrenanker oder Dachhaken. Auch modifizierte Befestigungsriegel – ursprünglich zur Aufnahme von Schneefanggittern oder ähnlichen Elementen gedacht, sind geeignet, Module aufzunehmen und stellen den Anschluss zur Dacheindeckung her. Für Stehfalzdächer wurden spezielle Falzdachklammern entwickelt. Bei Nachrüstungen auf bestehenden Dächern ist die Aufdachmontage in der Regel die kostengünstigste Variante, vorausgesetzt, die Dacheindeckung bleibt auch noch in den nächsten 20 Jahren intakt. Die Elemente sind relativ leicht demontierbar, was eine denkmalschutzrechtliche Erlaubnis erleichtern dürfte. Als ein Nachteil erweist sich dagegen, neben gestalterischen Mängeln, dass alle Teile des Systems der Witterung ausgesetzt sind.

### 3.4 Aufständigung von PV-Anlagen

Die einfachste Art, eine Photovoltaikanlage in ein Gebäude zu integrieren, ist die Aufständigung auf dem Flachdach, denn sie ist kostengünstig und erfordert den geringsten Planungs- und Ausführungsaufwand. Anforderungen an die Integration bestehen hauptsächlich in einer visuellen Einpassung in das Erscheinungsbild des Gebäudes, denn eine konstruktive Verbindung besteht nur an wenigen Punkten. Der Markt bietet zahlreiche Montagesysteme, die als Unterkonstruktion eine Aufständigung im optimalen Anstellwinkel von 30° ermöglichen.

### 3.5 Norm DIN 1055 wurde novelliert

Im März 2005 wurde der Weißdruck der neuen DIN 1055-4 (Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 4: Windlasten) veröffentlicht, im Juli 2005 folgte die neue Schneelastnorm DIN 1055-5 (Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 5: Schnee- und Eislasten). Für Teil 4 lautet der Eurocode EN 1991-1-4, für Teil 5 heißt er EN 1991-1-3. Teil 4 wurde im März 2006 berichtigt. Seit dem 01.01.2007 ist die neue DIN 1055 vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) bauaufsichtlich eingeführt, wobei die Umsetzungen in den einzelnen Bundesländer zu berücksichtigen sind. Teil 4 gliedert sich in einen Hauptteil mit allen erforderlichen Festlegungen und in die Anhänge A – F, welche die Besonderheiten beschreiben (Windzonenkarte, dynamische Grundlagen, Böenreaktionsfaktor, wirbelerregte Schwingungen, etc.). Teil 5, seit 1975 unverändert bis auf die Erweiterung der Schneelastzonen-Karte für die Neuen Bundesländer, wurde ebenfalls einer grundlegenden Überarbeitung unterzogen. Er basiert auf EC 1 Teil 1-3 [ENV 1991-2-3-95]. Der Hauptteil enthält die wesentlichen Festlegungen. Anhang A enthält die aktualisierte Schneezonenkarte sowie Erläuterungen zum Hauptteil, der Anhang B betrifft den Eislastansatz. Neu ist, dass sich die Schneelastangaben auf den Bodenschnee beziehen. Als charakteristischer

Wert wird heute der 50-Jahres-Schnee (98 %-Fraktile) im Gegensatz zum bisherigen 20-Jahres-Schnee angesetzt. Außerdem basieren die neuen Schneezonenkarten nicht mehr auf der empirisch ermittelten Rohwichte, sondern auf gemessenen „Wasseräquivalenten“, d. h. der Schnee wird ausgestochen und das durch Schmelzen entstandene Wasser gewogen. Der Formbeiwert  $\mu_i$  ermöglicht es, Lastbilder für verschiedene Dachformen sowie für Schneeanhäufungen und -verwehungen zu erfassen. Die DIN 1055 gilt auch für Freilandanlagen.

## 4 Baurechtliche Rahmenbedingungen

Bauelemente mit Solarzellen gehören nach Bauregelliste A des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) in Berlin zu den so genannten unregulierten Bauprodukten. Werden sie in eine tragende Glaskonstruktion eingesetzt, so brauchen sie eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, ein allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis oder eine Zustimmung im Einzelfall. Zu den Bauarten aus Glas (mit und ohne Solarzellen), die bauaufsichtliche Anforderungen erfüllen müssen, zählen unter anderem:

- Überkopferverglasungen (Dächer, Sonnenschutzlamellen),
- Vertikalverglasungen (Fassaden, Fenster),
- absturzsichernde Verglasungen (Fassaden, Brüstungen),
- „Structural-Glazing“-Fassaden und
- zu Reinigungs- und Wartungsarbeiten betretbare Verglasungen (Dächer).

Für Glaskonstruktionen für Vertikal- und Überkopferverglasungen sowie für Absturzsicherungen gibt es bauaufsichtlich eingeführte Ausführungsregeln, nämlich die „Technischen Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen“ (TRLV) in der Fassung vom September 1998 und die „Technischen Regeln für die Verwendung von absturzsichernden Verglasungen“ (TRAV) in der

Tafel 2 Deutsche und EU-weite Regelungen zur Anwendung von geregelten und unregulierten Bauprodukten

Quelle: DIBT

| Bauprodukt Produkte        | Deutsche Regelungen          |  |   |   | Europäische Regelungen                  |  |
|----------------------------|------------------------------|--|---|---|---|--|
|                            | Geregelte Produkte           | Nicht geregelte Produkte   |   | Andere Produkte                         | Geregelte Produkte                      | Nicht geregelte Produkte   |
|                            |                              | Allgemein  | Keine erheblichen Anforderungen, allg. anerkannte Prüfverfahren | Bauaufsichtlich untergeordnet Bedeutung |   |  |
| Veröffentlichung           | Bauregelliste (BRL) A Teil 1 |  | BRL A Teil 2  | BRL C                                   | Allgemein anerkannte Regeln der Technik | BRL B  |
| Nachweis der Anwendbarkeit | Technische Regeln BRL A      | Zustimmung im Einzelfall (ZiE) oder allgemein bauaufsichtliche Zulassung (AbZ) | Allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis AbP                   | Kein Verwendbarkeitsnachweis            | Kein Verwendbarkeitsnachweis            | Harmonisierte europäische Normen (hEN) mit Verwendbarkeitsbeschränkung |
| Nachweis                   | Übereinstimmungsnachweis     |  | Kein Übereinstimmungsnachweis                                   |   | Konformitätsnachweis mit CE-Zeichen     |  |

Fassung vom Februar 2003. Die Bauart benötigt keine Zustimmung im Einzelfall, wenn diese Vorschriften eingehalten sind. Linienförmig gelagerte Scheiben in Pfosten-Riegel-Konstruktionen fallen zum Beispiel unter die TRLV. Beide Vorschriften erfordern aber die Verwendung definierter und geregelter Glasprodukte aus Verbundsicherheitsglas (VSG). Um diese Qualität zu erreichen, muß entweder eine bauaufsichtlich zugelassene Folie auf oder unter das Modul zusammen mit einem Spiegelglas laminiert werden. Für dieses Produkt ist dann eine bauaufsichtliche Zulassung vom DIBT erforderlich. Vertikale hinterlüftete Fassaden mit punktuellen, außen sitzenden Klammern fallen unter die DIN 1851 Teil 1, auch sie sind insofern geregelt. Für Fassadensysteme mit punktförmig durch Bohrungen gehaltenen Scheiben sowie für jede begehbare Verglasung sind Zustimmungen für den Einzelfall nötig. „Structural-Glazing“-Fassaden mit geklebter Verglasung brauchen ebenso eine allgemeine bauaufsichtliche Zustimmung für den Einzelfall, wenn sie höher als 8 m und die Scheiben nicht nach den Verglasungsrichtlinien befestigt sind.

Die allgemeine bauaufsichtliche Zustimmung für den Einzelfall wird durch die Landesbauordnung geregelt. Sie wird von der obersten Bauaufsichtsbehörde (Innenministerium) erteilt. Ein allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis darf eine vom Innenministerium anerkannte Prüfstelle ausstellen. Diese Verwendbarkeitsnachweise sind mit hohem finanziellem und zeitlichem Aufwand verbunden. Es ist jedoch möglich, die Zustimmung für den Einzelfall des einen Projekts für ein anderes Projekt genehmigen zu lassen, wenn Bauprodukte und Bauart gleich bleiben. **2** gibt einen Überblick über das Vorgehen mit geregelten und ungeregelten Bauprodukten in Deutschland und die analog für die Europäische Union geltenden Regelungen. Ihre funktionalen, z. B. mechanischen und elektrischen Qualitäten müssen die Photovoltaikmodule nach IEC bzw. EN 61215 oder 61646 unter Beweis stellen.

## 5 Möglichkeit für Sanierung und Neubau

Außer den herkömmlichen dunkelblauen (kristalline Zellen) oder rot-braunen (amorphe Zellen) Solarzellen aus Silizium sind auch farbige Zellen auf dem Markt. Der Farbton führt jedoch zu einem Effizienzverlust. Viel versprechend sind die jüngsten Entwicklungen der Dünnschichttechnologie, die versuchen, Alternativen zum Silizium als Halbleitermaterial zu etablieren. Derzeit gehen die Dünnschichtmodule der Marktreife entgegen. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeit verläuft bislang weitgehend getrennt von baulichen Planungs- und Realisierungsmaßnahmen. Üblicherweise wird das neue Produkt, ausgestattet mit einer bestimmte Leistungscharakteristik, weitgehend

ohne Einbeziehung von formalästhetischen Aspekten des Zielobjektes „Gebäude“ technisch optimiert und verfeinert und anschließend auf dem Markt eingeführt.

Einen neuen, alternativen Entwicklungsansatz verfolgen interdisziplinäre Arbeitsgruppen, die Anforderungsprofile in der Produktentwicklung sowie der Gebäudeplanung parallel und Fragen baukonstruktiver sowie gestalterische Art als eine Integrationsaufgabe betrachten. In diesen Arbeitsgruppen experimentieren Architekten mit den Werkstoffen und nehmen Einfluß auf die Materialentwicklung.

Dieser Ansatz wird zum Beispiel in dem europäischen Forschungsprojekt BIPV-CIS (Gebäudeintegrierte PV-Module auf der Basis von CIS-Dünnschichttechnologie) realisiert. Forschung und Entwicklung neuer Photovoltaikmodule erfolgen in diesem Projekt, das sich mit dem alternativen Solarzellenmaterial Kupfer-Indium-Diselenid (CIS) beschäftigt, bedarfsorientiert. Sie richten sich unter anderem nach den gestalterischen Anforderungen aus dem Bauen im Bestand, respektive aus dem Denkmalschutz. Dieses Prinzip unterscheidet sich von der herkömmlichen Entwicklung, die oftmals allein nach funktions- und technikoptimierten Kriterien wie z. B. der Ertragsoptimierung eines PV-Systems entschieden wird. Das Projektkonsortium ist nicht nur europaweit, sondern auch aus verschiedenen Fachdisziplinen besetzt. Naturwissenschaftler, Ingenieure und Architekten aus Forschungseinrichtungen und Herstellerfirmen arbeiten gemeinsam an der Entwicklung und Erprobung neuer Lösungen für Photovoltaikmodule auf der Basis von Dünnschichttechnologie.

Die Dünnschichttechnologie eröffnet mehr Möglichkeiten als die herkömmliche Produktionsweise von Solarzellen aus Silizium. Ein Standardmodul aus Dünnschichtzellen hat eine gleichmäßige dunkelgraue, homogene Oberfläche, wodurch ein ruhiges Erscheinungsbild entsteht. CIS-Dünnschichtzellen haben inzwischen einen ähnlich guten Wirkungsgrad wie polykristalline Siliziumzellen in Wafertechnologie (ca. 12 - 14 %). Je installiertem kW<sub>p</sub> ist mit einem jährlichen Ertrag von ca. 700 kWh zu rechnen. Er hängt von Faktoren wie Standort (Einstellung), Anstellungswinkel und Modultemperatur ab. Kombiniert mit gefärbten Gläsern erhält man farbige Photovoltaikmodule. Ein breites Spektrum an Oberflächenmodulationen steht zu Verfügung. Die neuen Photovoltaikmodule können in ihren Texturen und Strukturen dem baulichen Kontext angepasst werden. Erste Eindrücke vermitteln die farbigen CIS-Dünnschichtmodule in **Bild 8**.

## 6 Ausblick

Verglichen mit herkömmlichen Fassadenbekleidungen sind Photovoltaikmodule und deren Systeme noch relativ teuer. Liegen die



⑧ **Mustermodule in Verbundglas-technik mit optisch entkoppelten, farbig strukturierten Deckgläsern und einer Zwischenschicht aus CIS-Dünnschichtsolarzellen.**

Foto: ZSW Stuttgart

Produktionskosten bei kristallinen Siliziumzellen zur Zeit bei rund drei Euro/W<sub>peak</sub>, so haben die Produkte der Dünnschichttechnologie das Potential, die Produktionskosten zukünftig auf unter einen Euro/W<sub>peak</sub> zu senken. PV-Anlagen rechnen sich aufgrund der finanziellen Anreize des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) nach rund 10 bis 15 Jahren. Die Rücklaufzeit der bei der Modulproduktion eingesetzten Energie beträgt durchschnittlich drei bis fünf Jahre. In den vergangenen zwei Jahrzehnten haben sich Photovoltaikmodule in der Architektur mehr und mehr vom technischen Fremdkörper am Gebäude zum fassadenintegrierten Bauelement entwickelt. Gerade die noch junge Dünnschichttechnologie hat die besten Aussichten, ästhetisch hochwertige Photovoltaik-Bauteile hervorzu- bringen.

#### Literatur

[1] *Rexroth, S.: Gestalten mit Solarzellen, C. F. Müller, Heidelberg 2002*

# Elektro-Thermografie

A. Lühr, Berlin

**Die Thermografie findet in vielen Gebieten Anwendung. Sie ist ein schnelles und kostengünstiges Messverfahren, da sie berührungslos arbeitet und mit ihr auch schwer zugängliche Stellen erreicht werden können. Die Thermografie stellt daher besonders in der Elektrotechnik und bei der Untersuchung von Gebäudehüllen eine verlässliche Methode der Schadenfrüherkennung und Schadenverhütung dar.**

## 1 Temperatur exakt messen

Thermografische Aufnahmen machen Wärmestrahlung sichtbar. Auf Grundlage der physikalischen Eigenschaft, dass jeder Körper Energie in Form von Lichtwellen im Infrarotbereich abstrahlt, können Temperaturen gemessen werden. Schon bei Temperaturen ab dem absoluten Nullpunkt ( $-273\text{ °C}$ ) sind diese Strahlen nachweisbar. Diese Eigenschaft macht sich die Thermografie zu Nutze, die über die Messung der Abstrahlungsintensität die Temperaturen von Oberflächen bestimmt. Die Intensität der Infrarot-Abstrahlung ist sehr stark von der Temperatur abhängig. Nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz beeinflusst die Temperatur die Intensität sogar in der vierten Potenz.

Die für das menschliche Auge unsichtbaren Wärmestrahlen werden also mit Hilfe einer Wärmebildkamera (Thermografiekamera) erfasst und auf einem Monitor als sichtbares Bild dargestellt, dem Thermogramm. Die Darstellung erfolgt durch unterschiedliche Färbungen der gemessenen Temperaturen. Für die heutige konventionelle Anwendung werden pro Thermogramm je nach Kameratyp bis zu 300000 Temperaturen zwischen  $-40$  und  $+2000\text{ °C}$  mit einer thermischen Empfindlichkeit von bis zu  $0,03\text{ °K}$  gemessen. Das ist die kleinste Temperaturdifferenz, die noch gemessen werden kann.

Wichtig für eine exakte Temperaturmessung ist allerdings die Kenntnis des Emissionsgrades der Oberflächen.

Die emittierte Strahlung ist abhängig vom Material, der Farbgebung und der Oberflächenbeschaffenheit. Oberflächen mit hohem Emissionsgraden wie schwarzer Kunststoff oder Ruß lassen gute Ergebnisse zu. Gegenstände mit kleinen Emissionsgraden, wie blankes Metall, lassen sich nur schwer und mit viel Erfahrung messen. Hier kann der Einfluss der Reflexion oft viel größer sein als die emittierte Strahlung. Bei Oberflächen mit unbekanntem Emissionsgrad muss vor der Thermografie erst der Emissionsgrad des zu messenden Objektes anhand von Tabellenanga-

ben oder Referenzpunkten bestimmt werden. Nicht immer ist die absolute Temperatur von Bedeutung, für qualitative Aussagen reichen bei einigen Anwendungen die gemessenen Temperaturdifferenzen aus.

Die Messungenauigkeit der angebotenen Thermografie-Systeme beträgt bei etwa  $30\text{ °C} \pm 2\%$ . Die Genauigkeit der gemessenen Temperatur nimmt in Richtung extrem hoher oder niedriger Temperaturen ab.

## 2 Schwachstellen frühzeitig aufzeigen

Die Thermografie-Untersuchung elektrischer Anlagen dient der vorbeugenden und zustandsorientierten Instandhaltung von elektrischen Systemen. Sie kann an Nieder-, Mittel- und Hochspannungsanlagen durchgeführt werden.

Elektrische Betriebsmittel, wie beispielsweise Kabelkanäle und Steigetrassen, komplette Schaltschrankanlagen inklusive Schalt- und Steuergeräte, Verteileranlagen, Stromschielen, Transformatoren, Kompensationsanlagen, Trennschalter, Generatoren und Elektromotoren können gefahrlos und ohne viel Aufwand untersucht werden.

So lassen sich Anlagenzustände dokumentieren, Schwachstellen und Schäden frühzeitig aufzeigen und durch die regelmäßige thermografische Überwachung Schäden, verursacht durch schadhafte elektrische Betriebsmittel, vermeiden.

Im Rahmen solcher Qualitätssicherungsmaßnahmen ist das spezielle Ziel die thermische Früherkennung von bereits vorliegenden Mängeln und Defekten. Bestehen Heißstellen unerkannt und betriebsbedingt über längere Zeit, können sie Brandschäden hervorrufen. Eigenen Recherchen nach werden etwa 35 % der industriellen Brandschäden durch elektrische Mängel ausgelöst. Durch regelmäßige thermografische Untersuchungen lassen sich diese auf 5 % reduzieren. Einige Industrieversicherer wünschen nicht nur, sondern fordern zur Risikominderung thermografische Inspektionen der elektrischen Anlagen oder gewähren bei regelmäßiger Überwachung einen Rabatt auf den Versicherungsbeitrag. Unabhängig davon, ob ein Versicherungsunternehmen die Thermografie-Inspektion vorschreibt,

#### Autor

Dipl.-Ing. *Andreas Lühr* ist Geschäftsführer des Ingenieurbüros M.UT.Z GmbH, Berlin.