

# Contents Inhalt

<b>Foreword Vorwort</b>	Technologiestiftung	4
<b>Introduction Einführung</b>	Claudia Lüling	7
<b>Inspiration Inspiration</b>	Gerhard Auer	13
<b>Design Gestaltung</b>	Claudia Lüling	27
<b>Material Material</b>	Claudia Lüling	53
<b>Crystalline Modules</b>		
<b>Kristalline Module</b>	Christof Erban	57
<b>Thin-film Modules</b>		
<b>Dünnschichtmodule</b>	Ilona Eisenschmidt	75
<b>Organic and Dye Solar Cells</b>		
<b>Organische und Farbstoffsolarzellen</b>	Claudia Lüling	93
<b>Energy Energie</b>	Thomas Stark	101
<b>Detail Detail</b>	Mirka Greiner, Claudia Lüling	119
<b>Roof Dach</b>		122
<b>Façade Fassade</b>		146
<b>Anti-Sun Screen Sonnenschutz</b>		172
<b>Authors Autoren</b>		190
<b>Picture Credits Bildnachweis</b>		191



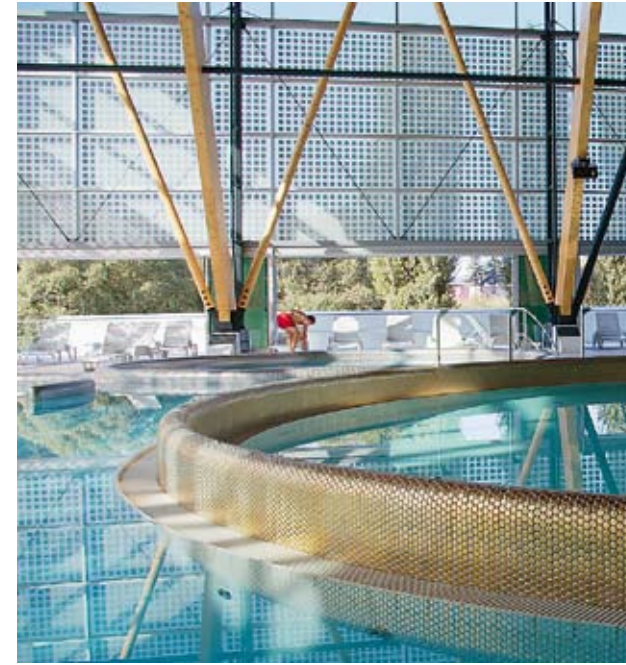
*Capri-Battery*, Joseph Beuys 1985  
*Capri-Batterie*, Joseph Beuys 1985



Sports Hall, Burgtweining (D), Regensburg Building Department, T. Ruf 2004  
Sporthalle, Burgtweining (D), Hochbauamt Regensburg, T. Ruf 2004



CIS Thin film module with silkscreen printed surface, idea and design (trademarked):  
PVACCEPT Design team UdK CIS-Dünnschichtmodule mit Siebdruckoberfläche, Idee  
und Design (geschützt): PVACCEPT Designteam UdK



Blue Sapphire, AquaCity Poprad (SK), Archstudio, Kučera & Rubáš Architects 2007  
Blue Sapphire, AquaCity Poprad (SK), Archstudio, Kučera & Rubáš Architekten 2007



Sant Celoni Kindergarten, Barcelona (E), VidurSolar 2008  
Kindergarten Sant Celoni, Barcelona (E), VidurSolar 2008

**Paul Horn-Arena, Tübingen (D)** (► Kap. 5) von Allmann Sattler Wappner Architekten, 2004. Hier wird mit eigens hergestellten, grünfarbigen Solarzellen vor weißem Modulhintergrund ein unverwechselbares Erscheinungsbild definiert, das nicht nur gestaltprägend, sondern zudem energetisch potent fast 30.000 Kilowattstunden umweltfreundlichen Strom pro Jahr erzeugen kann. Ähnlich selbstbewusst und plakativ agieren Arat Siegel Schust Architekten aus Stuttgart mit einem solaren Sonnenschutz. Ausgezeichnet mit dem Deutschen Solarpreis 2006, besticht die von ihnen konzipierte **EWE Arena in Oldenburg (D)** (► Kap. 5) durch die verfahrbare Photovoltaikanlage vor der Fassade. Sie dient neben der solaren Stromerzeugung als Sonnenschutz des großzügig verglasten Zuschauerfoyers, das so durch natürliches Tageslicht blendfrei beleuchtet ist. Eine Verdopplung der Energieausbeute wäre durch die komplette Belegung des „Solarschirmes“ möglich und gestalterisch dem prägnanten Konzept entsprechend durchaus denkbar.

### IntegrativUnprärentiös

Weniger plakativ als die Solarfabrik, sondern eher unprärentiös wie die Wohnanlage von Thomas Herzog erscheint trotz ihrer Größe die ein Jahr später fertiggestellte **Fortbildungsakademie Mont-Cenis in Herne** (► Kap. 5) von Jourda & Perraudin und HHS Planer + Architekten. Das damals weltweit größte dachintegrierte Solarkraftwerk mit einer Modulfläche von 10.000 Quadratmetern und einer Spitzenleistung von einem Megawatt wirkt durch Solarmodule mit verschiedenen dicht belegten Solarzellen eher wie ein leichter, transparenter Sonnenschutz, der den großen öffentlichen Innenraum heiter überspannt – während die energetische Nutzung fast ein Abfallprodukt ist.

foyer with tilted glass façade welcomes the visitor with over 200 square meters of installed photovoltaic modules—partly integrated into the façade, as in Thomas Herzog’s project, and partly as shading elements. In unison with the modules mounted on the roof and the rest of the façade, they formed a total area of almost 600 square meters and delivered an annual electricity yield of approximately 45,000 kilowatt hours; roughly the amount used by ten four-person households.

The classical solar module, with its strikingly blue shimmering polycrystalline cells, continues to be both a design and an energy generator for projects with large-area roof and façade installations. The latter can also be partially modified in color, as in the **Paul Horn Arena, in Tübingen (D)** (► chap. 5), built in 2004 by Allmann Sattler Wappner Architects. Specially manufactured green-colored solar cells on a white module background give this building a distinctive appearance, which, apart from characterizing the design, also make it a powerful provider of energy. It can generate almost 30,000 kilowatt hours of environmentally friendly electricity per year. Arat Siegel Schust Architects from Stuttgart reacted similarly confidently and strikingly with a solar sun screen. Awarded the 2006 German Solar Prize, the moveable photovoltaic system in front of its façade makes the **EWE Arena in Oldenburg (D)** (► chap. 5) captivating. Apart from generating electricity from solar energy, it also provides sun protection to the generously glazed spectator foyer, which is thus illuminated by natural, glare-free daylight. Its energy yield could be doubled by completely covering the “sun screen” with photovoltaic modules and, from a design perspective, it would certainly do justice to the concept.



SIEEB Institute building, Peking (RC) Mario Cucinella Architects 2006  
SIEEB-Institutsgebäude, Peking (RC), Mario Cucinella Architekten 2006



Q-Cells administration, Thalheim (D), bhss Architects 2008  
Q-Cells Verwaltung, Thalheim (D), bhss Architekten 2008



Community center, Ludesch (A), Hermann Kaufmann 2005  
Gemeindezentrum, Ludesch (A), Hermann Kaufmann 2005

setzt werden können. Und pos architekten entwickeln 2008 mit dem Bürogebäude **ENERGY Base in Wien** eine fast prototypisch zu nennende Fassade, die den 70-Prozent-Faktor durch ihren sägezahnartigen Querschnitt wieder auf 100 Prozent zurückschnellen lässt. Intelligent werden Verschattung und damit Neigung der Solarmodule, Ausblick und alle wesentlichen funktionalen Anforderungen einer Fassade in dem gewählten Gestaltungskonzept kombiniert. Auch dies eine zurückhaltende Lösung, trotz der mit 400 Quadratmetern Photovoltaikfläche und 47,5 Kilowattpeak größten fassadenintegrierten Anlage der Alpenrepublik. Solarer Nutzen wird als Teil eines technisch qualitätsgeprüften Passivhauskonzepts zusammen mit einem ambitionierten Gestaltungsansatz vertreten.

Neben Dach- und Fassadenelementen produzieren gerade Sonnenschutzelemente, da dauerhaft der Sonne ausgesetzt, sinnvoll Solarstrom und bieten sich als traditionell architektonisches Gestaltungselement explizit für eine gestalterisch zurückhaltende und in ein Gesamtkonzept integrierte Verwendung an. Ob als nachgeführte oder feststehende Lamellelemente, wie bei der **Q-Cells Verwaltung in Thalheim (D)** (► Kap. 5) von bhss Architekten 2008, oder punktuell eingesetzt wie 2006 beim **SIEEB-Gebäude in Peking** (Sino-Italian Ecological and Energy Efficient Building) von Mario Cucinella, gibt es die unterschiedlichsten Variationsmöglichkeiten. Selbst im Dachbereich bzw. beim Thema Überdachung zeigen hervorragende Beispiele wie das **Gemeindezentrum in Ludesch (A)** von Hermann Kaufmann, 2005, wie selbstverständlich eine gestalterisch motivierte und gleichzeitig energetisch sinnvolle Lösung aussehen kann.

### ChamäleonMimikry

Offensichtlich sind die Zeiten der additiv auf Dächern montierten, gestalterisch fragwürdig platzierten und energetisch suboptimal genutzten Solarmodule vorbei.

consisting of laminated glass on the inside with PVB foil, provides shade and glare protection with the extra advantage of solar electricity generation.

The obvious use of solar elements in façades—after all, the possible yield in Central Europe is approximately 70 percent of a similarly equipped and optimally oriented roof construction—is increasing due to the above-described multifunctionality as well as steadily sinking costs. Solar elements have reduced in price by around two-thirds over the last fifteen years, making solar material competitive, even for “normal” façades. The modifications by Paunat Architects in 2007 to a 1970s **school building in Schwanenstadt (A)**, demonstrate how solar modules could be applied to the window parapet area as an integral design element of the refurbishment. And in their **ENERGY Base office building in Vienna** in 2008, pos architekten developed a façade that could almost be considered prototypical. Its saw-tooth section makes the 70 percent factor bounce back up to 100 percent. Shading and the angle of inclination of the solar modules, as well as views and all of the essential functional demands of a façade, have been intelligently combined in this design concept. This is also a low-key solution, despite the 400 square meters of photovoltaic surface and 47.5 kilowatt peak, making it the largest façade-integrated system in Austria. It demonstrates the use of solar power as part of a technically quality-proven passive house concept in conjunction with an ambitious approach to design.

Apart from roof and façade elements, sun protection elements efficiently generate solar electricity because of their constant exposure to the sun. As traditional architectural design elements, they are perfect for low-key solutions that can be well integrated into an overall concept. Whether as tracking or fixed elements, as in the 2008 **Q-Cells administration building in Thalheim (D)** (► chap. 5) by bhss Architects, or point-applied, as in the 2006 **SIEEB building in Peking** (Sino-Italian Ecological and Energy Efficient Building) by Mario Cucinella, a range of the most diverse variations is feasible. There are also excellent examples in the



Raw material granular polysilicon  
Rohstoff granulares Polysilizium



Ingot (silicon block)  
Ingot (Siliziumblock)

## Kristalline Zellen

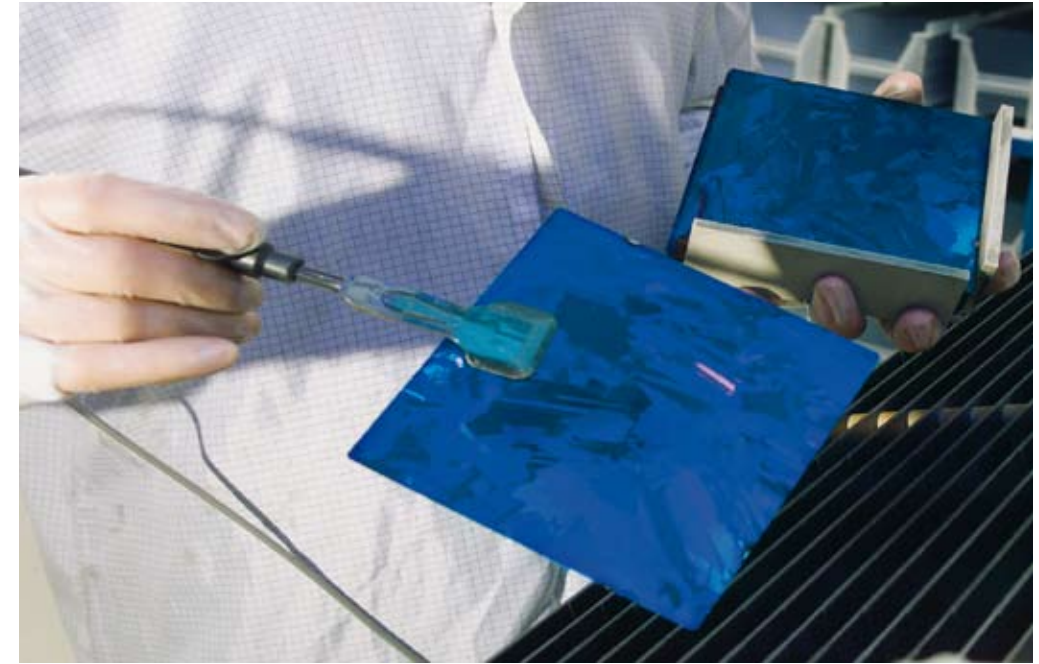
Christof Erban

Mit ca. 86 Prozent nutzt die Mehrheit der heutigen Solarmodule kristalline Solarzellen zur Stromproduktion. Diese Zellen bestehen aus Silizium, das nach Sauerstoff zweithäufigste Element auf der Erde. Allerdings ist „normales“ Silizium verunreinigt und muss über energieintensive Schritte gereinigt werden. Dann erst kann es als „Solar-Grade-Silizium“ als Grundstoff von Solarzellen genutzt werden. Kristalline Zellen werden anhand ihrer Kristallanzahl in mono- und polykristalline Zellen unterschieden.

### Matereieigenschaften

**Herstellungsverfahren** Für die Herstellung multikristalliner Zellen wird Solar-Grade-Silizium geschmolzen und in einem quaderförmigen Tiegel langsam abgekühlt. Der Ingot genannte Block wird anschließend in kleinere Stäbe mit quadratischem Grundriss und einer Kantenlänge von ca. vier, fünf oder sechs Zoll (das entspricht ca. 100, 125 und 150 Millimetern) zersägt.

Für die Herstellung monokristalliner Zellen wird extrem reines Material benötigt. An einem sich langsam drehenden und gleichzeitig aus der Schmelze aufwärtsbewegten Stab kristallisiert direkt ein einzelner zylindrischer Kristall. Dieser hat einen Durchmesser von ebenfalls meist fünf oder sechs Zoll. Er wird zur besseren Ausnutzung des Materials beschnitten, wobei die Ecken abgerundet bleiben. Sowohl das multi- als auch das monokristalline Silizium wird dann zu Scheiben von ca. 0,2 Millimetern Dicke – den sogenannten Wafern – zersägt. Alternativ werden manche polykristalline Wafer auch aus bandgezogenem Basismaterial hergestellt. Hierbei werden direkt aus der Schmelze entweder ein achteckiger



Polycrystalline cells with an anti-reflective coating  
Polykristalline Zellen mit Antireflexschicht

## Crystalline Cells

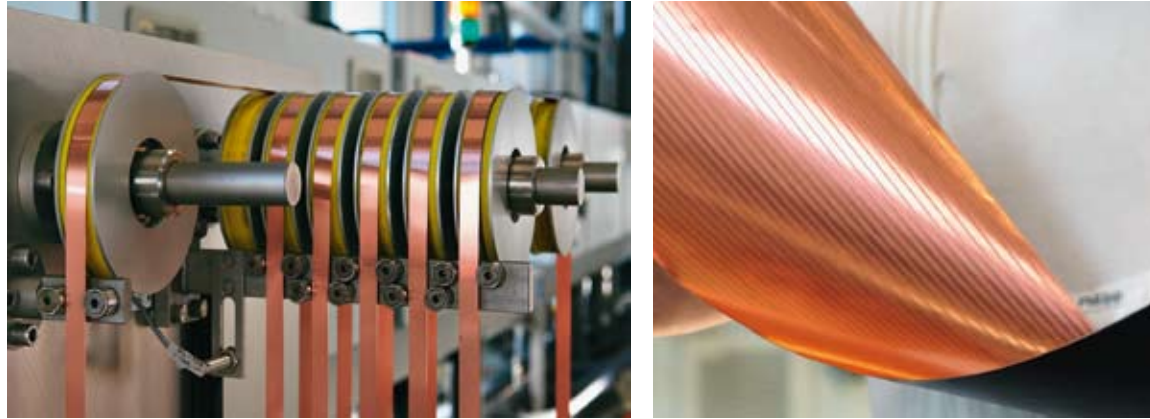
Christof Erban

Most contemporary solar modules—86 percent—are equipped with crystalline solar cells for electricity production. These cells are made of silicon, the second most common element on earth after oxygen. “Normal” silicon, however, is impure and must be purified through various energy-intensive processes. Only after this is done can “solar-grade silicon” be used as the basic material of solar cells. Depending on the amount of crystals they contain, crystalline cells are known as either mono- or polycrystalline cells.

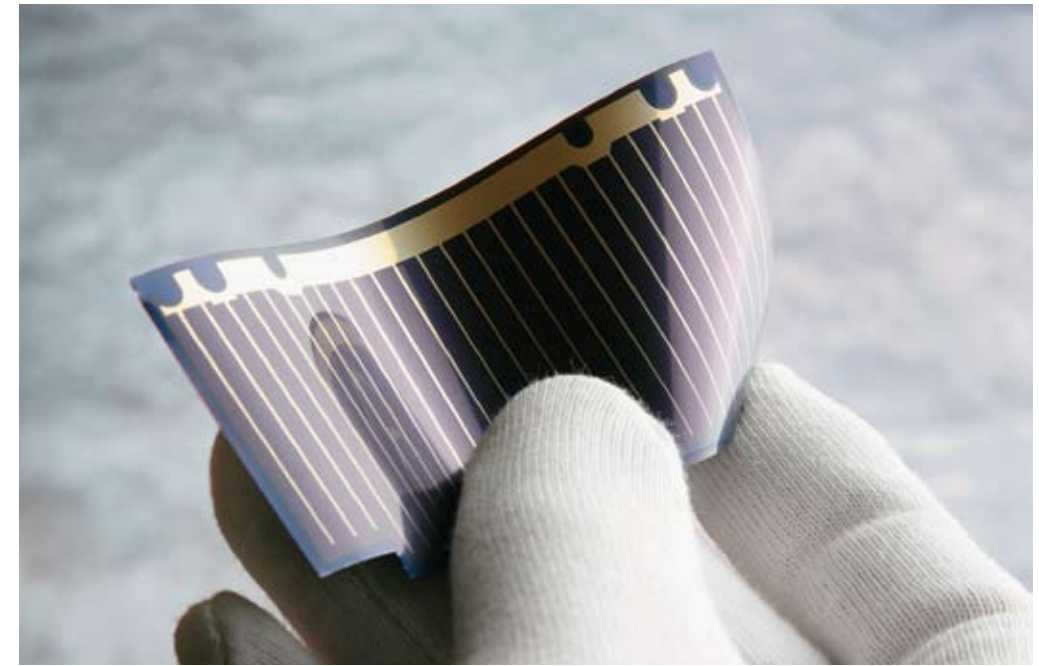
### Material Properties

**Production Process** During the production of multicrystalline cells solar-grade silicon is melted and then slowly cooled in a cuboidal crucible. The blocks, known as ingots, are then sawn into smaller square-shaped bars of approximately four, five, or six inches in length (roughly 100, 125, or 150 millimeters).

Extremely pure material is required for the production of monocrystalline cells. A single cylindrical crystal crystallizes on a bar that turns slowly as it simultaneously leaves the kiln. Such crystals are usually five or six inches in diameter. They are clipped to ensure optimal use of material although the corners remain rounded. Both multi- and monocrystalline silicon is then sawn into approximately two-millimeter-thick slices—so-called wafers. Alternatively, polycrystalline wafers are also produced by stretching the basis material into strips. In such a process, either an octagonal hollow cylinder, or a flat, infinite band of silicon is extracted straight from the kiln. In both cases, crystals develop perpendicular to the direction of tensile force and parallel to one another. The wafers are then cut, using a laser, into their final



“Roll-to-roll”: CIS thin-film cells on copper strips are bonded to modules  
 „Rolle zu Rolle“: CIS-Dünnschichtzellen auf Kupferband werden zu Modulen verklebt



Thin-film cells on titanium foil  
 Dünnschichtzellen auf Titanfolie

**Herstellung eines amorphen Silizium-Moduls** Während bei CIS- und CdTe-Modulen Prozesstemperaturen um die 500–600 Grad Celsius erreicht werden, sind bei der Produktion von amorphen Siliziummodulen im Durchlaufverfahren mittels chemischer Abscheidung von gasförmigem Silan Prozesstemperaturen von 200 bis 300 Grad Celsius ausreichend. Da dotiertes amorphes Silizium eine zu kurze Lebensdauer aufweist, um in einem direkten Übergang von p- und n-dotierter Schicht zur Stromerzeugung beizutragen, wird eine zusätzliche undotierte (intrinsische) Zwischenschicht aufgebracht. Hier findet die Ladungsträgererzeugung statt, während die beiden äußeren Schichten das elektrische Feld bilden. Das Auftragen der einzelnen Schichten des insgesamt einen Mikrometer dicken Überzugs erfolgt bei starren Trägermaterialien nach dem „pin“-Prinzip, immer von der Richtung der Lichteinstrahlung aus gesehen. Im Rolle-zu-Rolle-Verfahren verläuft die Abscheidung der einzelnen Schichten nach dem „nip“-Prinzip auf der flexiblen Modulrückseite.

Wie bei Cadmium-Tellurid-Modulen wird auch bei amorphen Solarmodulen als erstes der Frontkontakt bestehend aus Zinnoxid, Indium-Zinnoxid oder Zinkoxid und abschließend der Rückkontakt aus Aluminium aufgetragen.

## Gestaltungsmöglichkeiten

**Geometrie** Starre CIS- und CdTe-Standardmodule werden meist in Abmessungen von 0,6 x 1,2 Metern mit und ohne Rahmen angeboten, definiert durch die Abmessungen der Produktionsmaschinen und des Laminators. Größere Abmessungen bis 2,2 x 2,6 Meter gibt es bei a-Si-Einzelmodulen, geringere Abmessungen gibt es bei a-Si- und CIS-Modulen für Kleinanwendungen. Größenmodifikationen sind durch das Einlaminieren mehrerer (zugeschnittener) Module zwischen zwei Glasscheiben in Abhängigkeit von der Kapazität des Laminators möglich (zum Beispiel derzeit bei CIS 1,8 x 2,4 Meter). Sonderformen wie Dreiecke

oxide coating is removed from the edges of each cell in a mechanical cutting process. Lastly, after the addition of the electrical contact, the raw module is sealed with a polymer film and a second sheet of glass in a lamination process, making it resistant to environmental conditions.

**Manufacture of a CdTe Module** While a high vacuum is required for CIS modules, the vacuum used to manufacture cadmium-telluride modules in continuous processes with comparable temperature requirements require much lower levels of vacuum. In contrast to CIS technology, the manufacture of cadmium-telluride modules begins with the deposit of the front contact onto a glass substrate after which a metallic back contact is applied. The transparent front-side contact forms a 0.25-micrometer-thick transmission layer made of indium-zinc oxide. The hot glass substrate is steamed using a hot vapor source consisting of cadmium telluride and cadmium sulfide. It is then re-crystallized through targeted heating to form a double layer of cadmium sulfide-cadmium telluride.

**Manufacture of an Amorphous Silicon Module** While temperatures reach about 500–600 degrees Celsius during CIS and CdTe module processing, the production of amorphous silicon modules in continuous processes, using chemical precipitation from gaseous silane, requires a process temperature of only 200-300 degrees Celsius. As the life span of doped amorphous silicon is too short to be conducive to producing electricity via a direct conversion from p- and n-doped layers, an additional undoped (intrinsic) interlayer is inserted. At this point, the generation of charge carriers occurs, while the two outer layers form the electrical field. The application of the individual layers of the one-micrometer-thick coat takes place, with rigid carrier materials, according to the “p-i-n” principle, i.e., is always from the



CIS-Module with silkscreen surface, idea and design (trademarked) PVACCEPT Designteam UdK  
 CIS-Module mit Siebdruckoberfläche, Idee und Design (geschützt) PVACCEPT Designteam UdK

Aufgrund des metallischen Rückkontakts bei Dünnschichtsolarzellen haben diese im Glas-Glas-Verbund eine metallisch glänzende Rückseite, im Glas-Folien-Verbund ist die Rückseite, abhängig von der Folienfarbe, meist schwarz.

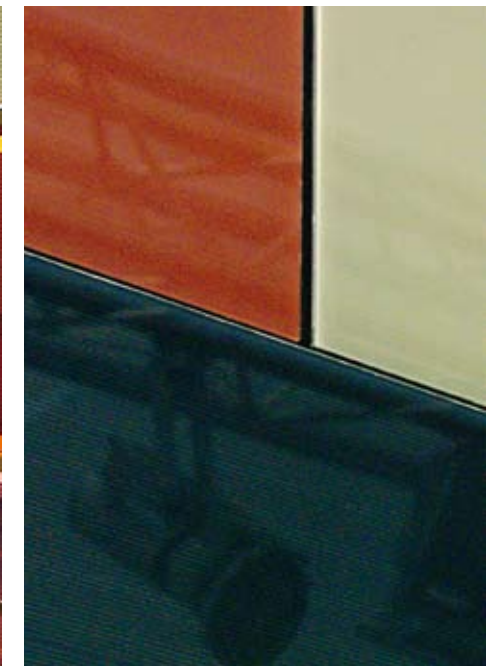
## Ausblick

Neu auf dem Markt sind inzwischen mikromorphe Dünnschichtsolarmodule, die sich ebenfalls im „klassischen“ Durchlaufverfahren als Tandemzelle aus mikrokristallinem ( $\mu$ -Si) und amorphem (a-Si) Silizium produzieren lassen.

Die Modulherstellung und der Modulaufbau sind dem der amorphen Technik sehr ähnlich. Durch die Kombination der insgesamt 4,5 Mikrometer dicken Schicht aus mikrokristallinem und amorphem Silizium ergibt sich die Möglichkeit einer Wirkungsgradsteigerung auf 8–10 Prozent, eine erheblich geringere lichtinduzierte Degradation und eine bessere Ausnutzung des Sonnenspektrums im Vergleich zur rein amorphen Zelle. Das äußere Erscheinungsbild der Module ähnelt dem von amorphem Material, ist jedoch etwas dunkler. Allerdings muss die mikrokristalline Schicht aufgrund ihrer schlechteren Absorptionseigenschaften ungefähr 6-mal dicker als die amorphe Schicht sein. Die dadurch längeren Durchlaufzeiten in der Produktion verursachen im Vergleich zum rein amorphen Modul deutlich mehr Herstellungskosten, weshalb die mikromorphe Technik weiter mit Skepsis betrachtet wird.



Schott office building Sant Adrià de Besòs (ES): thin-film modules, back side with colored glass Schott Verwaltung, Sant Adrià de Besòs (E): Dünnschichtmodule, rückseitig mit farbigen Gläsern



„ARTLine Invisible“ CIS-Module mit color glass cover  
 „ARTLine Invisible“ CIS-Module mit farbigen Deckgläsern

Surfaces vary depending on materiality. CIS modules take on a dark-gray or dark-blue to black appearance, CdTe modules are dark green to black in appearance, and a-Si modules are reddish to brown-black.

Apart from material color, there are many ways to color thin-film modules. One option is to print color on the front glass surface using silkscreen printing. This technology is currently only available for CIS modules; it is being developed under the auspices of a EU research project called PVACCEPT. Because the CIS-area underneath the printed area is not photoactive, the pattern should consist of many one-millimeter dots, evenly distributed across the module's surface area. This prevents "hot spots" from developing, which would result from completely covering a cell, also leading to reduced module output and cell damage. Depending upon the desired clarity of a motif, a print level of between 10 and 20 percent is sufficient.

In combination with insulation glass, colored modules can be built for integration into buildings by coloring the rear glass sheet of the insulation glass compound. Another way of coloring thin-film solar modules is to combine a raw module with a colored front glass sheet. However, such solar modules still appear black, despite colored glass cover. For this reason, a process is underway under the auspices of the EU at the Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW), to develop a method of preserving the chromaticity of the glass cover by inserting a layer of air between the colored front glass pane and the CIS raw module. Modules of this type can incur output losses of about 10 to 30 percent in comparison with opaque black modules. Power fluctuations are strongly dependent on the chosen front glass color. Modules of this type are not yet available on the market, although the Würth Company already produces colored CIS modules. They are marketed under the name "ARTLine Invisible" and, in addition to the "original" black, also