

# Architektur und Photovoltaik

Ergänzung zu  
**Photovoltaik**  
Planungsunterlagen  
für autonome und  
netzgekoppelte  
Anlagen



Impulsprogramm PACER  
Bundesamt für Konjunkturfragen

**Trägerschaft**

SOFAS Sonnenenergie-Fachverband Schweiz

**Autor**

Lukas Herzog, dipl. Masch. Ing. ETH/SIA  
Alteno AG, Basel

**Gestaltung**

Education Design Sepp Steibli, Bern

Copyright Bundesamt für Konjunkturfragen  
3003 Bern, September 1994.  
Auszugsweiser Nachdruck mit Quellenangabe er-  
laubt. Zu beziehen bei der Eidg. Drucksachen- und  
Materialzentrale (Best.-Nr. 724.243.1 D)

Form. 724.243.1 d 10.94 1000 U19658

# Architektur und Photovoltaik

**Im Laufe der letzten Jahre hat sich die Photovoltaik als architektonisches Gestaltungselement ein neues Anwendungsgebiet erschlossen. Die Fassaden von Wohn-, Büro- und Industriebauten bieten eine Fülle von neuen Einsatzmöglichkeiten. In Fassaden können Solarpaneele nebst Stromproduktion für weitere Zwecke genutzt werden: Beschattung, Wärmegewinnung, optimierte Tageslichtnutzung.**

Bis vor wenigen Jahren wurden Solaranlagen auf Schräg- und Flachdächer aufgebaut, sehr selten in die Dachhaut integriert. Aus architektonischer Sicht konnten solche Lösungen, obwohl gut in der Funktion, nicht befriedigen. Seit mehrere Hersteller Solarpaneele nach kundenspezifischem Design anbieten, haben sich Architekten vermehrt mit der Photovoltaik auseinandergesetzt und sie neuen Anwendungsgebieten erschlossen.

## 1 Sonnenenergie im Planungsprozess

Grundlegende Entscheidungen, wie die Ausrichtung des Gebäudes oder die Anordnung der Räume, beeinflussen die Möglichkeiten zur Nutzung der Sonnenenergie weitgehend. Es ist deshalb wichtig, dass die Grundanforderungen einer optimalen Sonnenenergienutzung schon bei Projektbeginn in die Arbeit einfließen [1]. Dies gilt besonders für die intelligente Integration der Photovoltaik in das vorgesehene Energiekonzept. Die Zusammenarbeit mit den Fachplanern führt zu guten Lösungen.

## 2 Gebäudeintegration

An Fassaden von Wohn-, Büro- und Industriebauten ist es möglich, grosse Flächen mit Solarzellen zu belegen. Die Zellen erfüllen bei geschickter Planung mehrere Zwecke gleichzeitig. Die anfallende Wärme kann beispielsweise in einem Luftkollektor gefasst und für Heizzwecke eingesetzt werden. Mit Solarzellen belegte Beschattungslamellen produzieren einerseits Strom, andererseits verhindern sie die Überhitzung der Räume durch direkte Sonneneinstrahlung.

Mit der Integration und Mehrfachnutzung der Paneele ergeben sich für den Anlagenplaner einige zusätzliche Aufgaben. Im Folgenden beschränken wir uns auf die Diskussion einiger technischer Aspekte, die architektonischen Möglichkeiten sind im Ende 1993 erschienenen Buch «Photovoltaik und Architektur» [2] ausführlich dargestellt.

## 3 Stromertrag von Fassadenanlagen

Im Vergleich mit einer optimal orientierten PV-Anlage ist der Stromertrag der fassadenintegrierten Anlage, je nach Neigungswinkel der Solarmodule, um bis zu 30% geringer. Die Ertragsminderung kann aber über eine Mehrfachnutzung der Solarelemente mehr als ausgeglichen werden (Kapitel 6).

Die Ertragsminderung entsteht erstens durch die Einschränkung des offenen Horizontwinkels, wodurch die Diffusstrahlung reduziert wird. Bei steiler Anordnung der Solarzellen und knappem vertikalem Abstand wird zweitens die Sommersonne nicht optimal ausgenutzt. Die Reflexstrahlung von der Erdoberfläche (Albedo) hat wenig Einfluss auf den Ertrag.

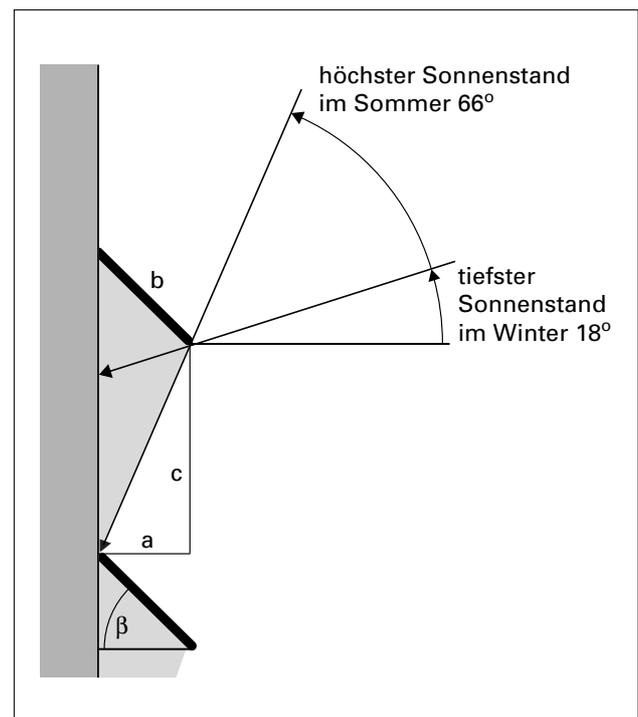


Abb. 1:  
Abschattungsproblematik

Für die Berechnung des Stromertrags wird das Modell nach Meteonorm [3] zur Berücksichtigung der obigen Verluste erweitert. Durch die Zerlegung der Globalstrahlung auf die Paneelebene  $G_{\text{Panneele}}$  in ihren diffusen und direkten Anteil können die entsprechenden Verluste getrennt eingeführt werden.

$$\begin{aligned} G_{\text{tot}} &= G_{\text{dif}} + G_{\text{dir}} \\ G_{\text{Panneele}} &= V_{\text{dif}} * G_{\text{dif}} + V_{\text{dir}} * G_{\text{dir}} \end{aligned} \quad (1)$$

Der Direktstrahlungsverlust  $V_{\text{dir}}$  bestimmt sich aus dem Sonnenbahndiagramm [3]. Für den Verlust an Diffusstrahlung  $V_{\text{dif}}$  sind wir auf eine Schätzung angewiesen. Im Beispiel nach Bild 1 reduziert die Fassade den offenen Horizont um  $45^\circ$  und damit die Diffusstrahlung um 25%. Zur Berechnung der Globalstrahlung auf die Paneelebene werden die

se Werte in Gleichung 1 eingesetzt. Tabelle 2 zeigt den Stromertrag einer Fassadenanlage im Vergleich zu einer optimal ausgerichteten Aufbauanlage.

Der zur Vermeidung gegenseitiger Abschattung minimale vertikale Abstand  $c$  berechnet sich nach Gleichung 2.

$$\begin{aligned} a &= b * \cos \beta \\ c &= a * \tan 66^\circ \\ \text{Näherungsformel:} \\ c &= 2.5 a \end{aligned} \quad (2)$$

Es bedeuten:

$b$  = Laminatbreite

$\beta$  = Neigungswinkel des Laminates

$c$  = minimaler vertikaler Abstand

<b>Anlagedaten</b>	
Paneel-Neigung [Grad] Orientierung v. Süd [Grad]	45° 20°
Paneel-Nennleistung Total [W] bei Einstrahlungsleistung [W/m <sup>2</sup> ] bei Nenntemperatur [°C] Toleranz der Paneeleleistung [±]: Temp.-koeffizient Leistung [ /°C]	17'000 1'000 25 °C 5% -0.50%
Absorptions-/Reflexionsfaktor Abschattung	93% 0%

<b>Fassadenanlage</b>	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Juni	Juli	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
G tot	33.7	55.5	91.0	124.3	141.5	147.3	161.0	138.1	113.5	74.1	36.5	25.9	1'142
G diffus	17.1	26.1	44.4	59.2	73.0	75.8	75.3	66.2	50.3	34.8	19.1	13.8	555
Verlust direkt	0%	0%	9%	25%	35%	45%	35%	25%	9%	0%	0%	0%	
Verlust diffus	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	
G Paneele	29.4	49.0	75.7	93.2	99.3	96.2	112.2	103.6	95.2	65.4	31.7	22.5	873
Mittl. Temp. [°C]	0.0	1.9	4.3	8.4	13.1	15.9	18.2	17.5	14.0	9.0	4.1	0.3	
Temp.korr. [K]	12	15	23	21	20	23	22	21	24	18	13	5	
Ertr.Paneele [kWh]	471	765	1'124	1'369	1'431	1'344	1'557	1'451	1'337	972	495	370	12'687

<b>Aufbauanlage</b>	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Juni	Juli	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
G Paneele	33.7	55.5	91.0	124.3	141.5	147.3	161.0	138.1	113.5	74.1	36.5	25.9	1'142
Ertr.Paneele [kWh]	539	867	1'351	1'826	2'039	2'059	2'234	1'934	1'594	1'102	570	427	16'543

**Tabelle 2:**  
Ertragsrechnung für Fassadenanlage nach Bild 1.  
Zum Vergleich eine Aufbauanlage gleicher Orientierung und Leistung

### Legende

G tot	Globalstrahlung
G diffus	Diffusstrahlungsanteil
G direkt	Direktstrahlungsanteil
Verlust direkt	geschätzter Verlust Direktstrahlung
Verlust diffus	geschätzter Verlust Diffusstrahlung
G Paneele	Total der auf die Paneelebene eintreffenden Strahlung
Mittl. Temp.	Mittel der Monatstemperatur
Temp.korr.	Temperaturkorrektur der Paneele
Ertr. Paneele	Gleichstromertrag der Paneele

## 4 Kundenspezifisches Solarlaminat

Solarpaneele können wegen ihren festen Abmessungen häufig nicht optimal in Gebäude integriert werden. Als Ausweg bietet sich das durch den Solarplaner massgeschneiderte Laminat an.

Die zur Verfügung stehende Fläche wird so mit Solarzellen belegt, dass die resultierende Strangspannung mit der Eingangsspannung des Wechselrichters übereinstimmt, gleichzeitig die Zellenzahl für alle Stränge gleich ist und Teilabschattungen einen möglichst geringen Einfluss auf den Anlagenenertrag haben. Die maximale Grösse eines Laminates darf, bedingt durch die Herstellung, 130 x 170 cm nicht überschreiten.

Leerlaufspannung	0.6 V
Kurzschlussstrom	3.3 A
Spannung im MPP	0.48 V
Strom im MPP	3.1
Zellengrösse	103 x 103 mm

Tabelle 3:  
Kennwerte kristalliner Zellen

Der Ausgangspunkt für alle weiteren Überlegungen ist eine Zelle mit den Daten nach Tabelle 3. Über jeweils 18 Zellen wird eine Bypass-Diode geschaltet.

### Schaltungsvarianten

Innerhalb eines Laminates können die Zellen sehr unterschiedlich geschaltet sein. Bild 4 zeigt zwei mögliche Varianten für ein Laminat mit 36 Zellen. Durch die Parallelschaltung von 3 Strängen wird das Laminat 1 sehr viel weniger anfällig auf Teilbeschattungen reagieren. Die Gefahr von Teilbeschattungen ist gerade bei Fassaden wegen der sehr engen Einbauverhältnissen gross. Die Parallelschaltung von mehreren Strängen innerhalb eines Laminats erhöht aber die thermische Belastung der Bypass-Dioden deutlich.

### Farbwahl und Einbettung

Die Photovoltaikanlage kann je nach Wahl der Solarzellen und des Backsheet\* einen sehr unterschiedlichen optischen Eindruck hervorrufen. Standardzellen weisen eine blaue bis grauschwarze Färbung auf. Solarzellen können beschichtet werden und erscheinen so in den Farben Goldgelb bis Grau. Die Beschichtung senkt den Wirkungsgrad der Zellen merkbar.

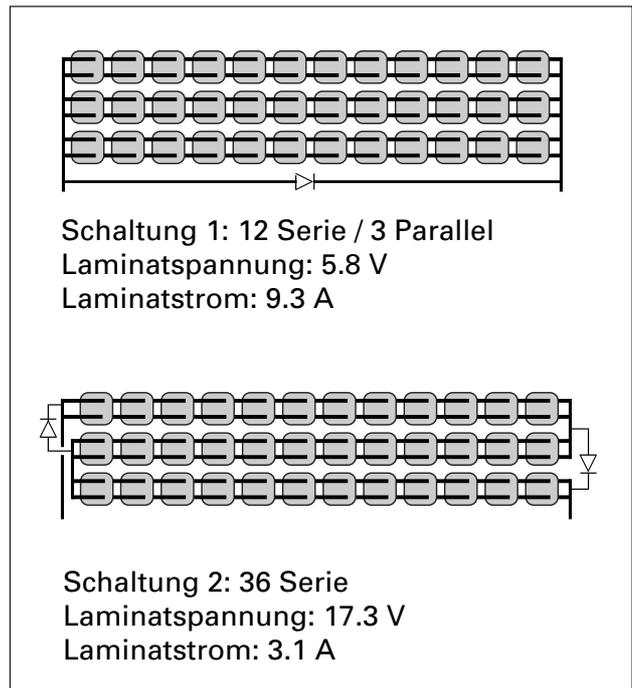


Abb. 4:  
Schaltungsvarianten

Als weitere Gestaltungsmöglichkeit bietet sich die Wahl des Backsheet\* an, welches eine (fast) beliebige Färbung aufweisen kann. Gängig sind weisse und schwarze Folien. Wird anstelle eines weissen Backsheets ein schwarzes gewählt, so ist dies mit einer Produktionseinbusse von ungefähr 3 Prozent verbunden!

Interessant ist die Verwendung von Laminaten in Glas-Glas-Technik. In dieser transluziden Bauart lassen die Laminare einen gewissen Anteil diffuses Licht durchscheinen. Bei der Montage auf Oberlichtern führt diese Konstruktion zu einem Gewinn an Tageslicht und zu einem interessanten optischen Eindruck.

\* (hintere Abdeckung der Zellen)

## 5 Befestigung

Die Befestigung der Laminate wird in Zusammenarbeit mit deren Hersteller und dem Metall- oder Fassadenbauer projektiert. Einige Montagesysteme für Fassaden können direkt für Solarelemente übernommen werden. Wichtig sind die folgenden Punkte:

- Hinterlüftung der Laminate
- Einfache Montage/Auswechslung
- Bildung von Kondenswasser
- Vermeidung von Wärmebrücken
- Abstand zwischen Befestigungselemente und Zellenfläche (Abschattung)

Die Verdrahtung mit einem Stecksystem vereinfacht die Montage und das Auswechseln der Laminate sehr.

Abbildung 5 zeigt ein mögliches Montageprinzip, bei welchem die Fassaden- durch Solarelemente ersetzt werden können. Die Elemente werden einzeln von unten in die obere Halterung eingefahren und anschliessend unten fixiert. Auf diese Weise ist jedes Element an vier Punkten befestigt. Die elektrische Verkabelung erfolgt im voraus.

Eine weitere Montagevariante zeigt Abbildung 6. Hier wird das Laminat von einer Montageeinheit durchstossen, welche den Platz einer Solarzelle einnimmt. Diese Montageart ermöglicht sehr schöne Einbaulösungen, ist allerdings teuer.

Bei allen Montagesystemen ist darauf zu achten, dass das Material des Glaslagers weder versprödet noch, bei hohen Temperaturen bis 80 °C, fließt.

## 6 Mehrfachnutzung

### 6.1 Wärme und Strom

Nur ein kleiner Teil der Solarstrahlung wird in der Zelle in Strom umgewandelt. Ein grosser Teil der eingestrahlenen Energie erwärmt die Zellen und verschlechtert so deren Wirkungsgrad. Die Abwärme verpufft normalerweise ungenutzt, könnte aber auch gewinnbringend für die Heizung oder als Prozesswärme eingesetzt werden.

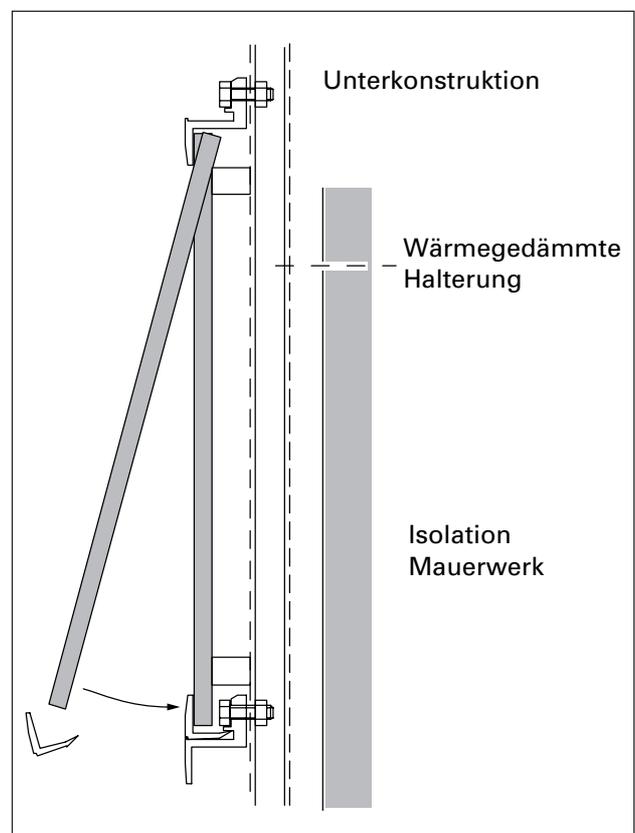


Abb. 5:  
Montage eines Solarelementes

Die Solarzellen sollen einerseits so kühl wie möglich betrieben werden, andererseits wird eine möglichst hohe Temperatur für die Wärmenutzung verlangt. Am meisten Abwärme entsteht im Sommer. Die optimale Mehrfachnutzung der Solarelemente ist schwierig.

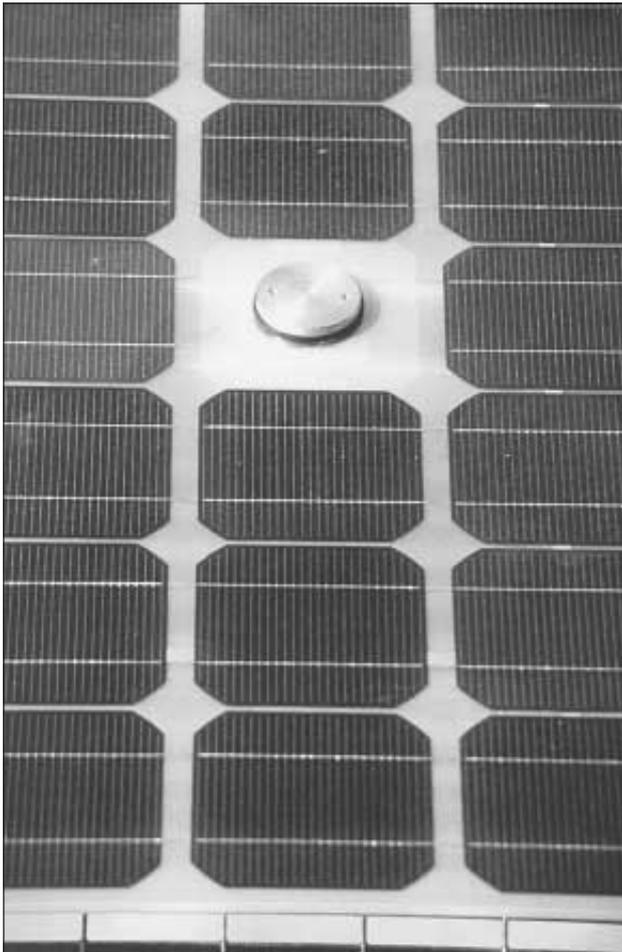


Abb. 6:  
Montagepunkt in einem Laminat

Eine Möglichkeit bietet die Verwendung der Abwärme zur Gewinnung von Niedertemperaturwärme, zum Beispiel für die Direktheizung, die Regeneration eines Erdspeichers oder die Heutrocknung [5].

### Beispiel: PV-Anlage Maisprach

Auf einem Stall in Maisprach ist eine PV-Anlage mit 9.9 kWp Leistung installiert (Abb. 7). Die Laminate sind als Oberteil eines Luftkollektors ausgeführt. Der Luftkollektor wärmt die für die Heutrocknung benötigte Aussenluft vor, wodurch sich die Laufzeit der Gebläse infolge der höheren Trocknungsleistung der vorgewärmten Luft deutlich verringert. Zusätzlich zur solaren Stromproduktion von 8'350 kWh werden 3'450 kWh Betriebsstrom eingespart. Der Gesamtertrag der Anlage erhöht sich auf total 11'800 kWh oder 1'190 kWh/kW.



Abb. 7:  
Bau der PV-Anlage Maisprach mit Blick in die Kanäle des Luftkollektors

## 6.2 Tageslichtnutzung

Sheddächer und Oberlichter eignen sich sehr gut für die Montage von Laminaten. Um störende Schlagschatten durch die direkte Sonnenstrahlung zu verhindern, werden Oberlichter üblicherweise nur auf der Nordseite verglast. In die Räume gelangt ausschliesslich diffuses Tageslicht.



Abb. 8:  
*Oberlicht mit transluziden Laminaten*

Auf der Südseite der Oberlichter montierte transluzide Lamine lassen zusätzlich weiches Tageslicht eintreten. Neben der Stromproduktion tragen sie zur besseren Nutzung des Tageslichts und zum rationellen Einsatz der Beleuchtung bei. Die Überhitzung der Räume kann allenfalls problematisch sein.

Aus dem Gebäudeinnern betrachtet, bilden die Solarzellen einen interessanten Anblick. Die Lamine sind für den Architekten ein reizvolles Gestaltungselement.

Ein Beispiel für den Einsatz von transluziden Laminaten zeigt Abbildung 8.

### 6.3 Beschattung

Sonnenschutzeinrichtungen sind nötig, um im Sommer angenehme Temperaturen in den Gebäuden gewährleisten zu können. Als Beschattungselemente werden häufig bewegliche oder feste auskragende Lamellen eingesetzt. Diese Lamellen eignen sich vorzüglich zur Montage von Solarzellen, da sie optimal zur Sonne ausgerichtet sind. In der Fachsprache hat sich für die Kombination Beschattungselement-Photovoltaik der Begriff «Shadowvoltaic» gebildet. Die Funktion «Beschattung» kann zusätzlich mit der Funktion «optimale Tageslichtnutzung» verknüpft werden. Sind die Lamine translu­zid ausgeführt und zusätzlich auf der Gebäudeseite verspiegelt, so ermöglichen sie eine Verkürzung der Beleuchtungszeit in den angrenzenden Räumen um mehrere 100 Stunden pro Jahr und eine entsprechende Energieeinsparung.



Abb. 9:  
Solarelemente zur Beschattung eingesetzt

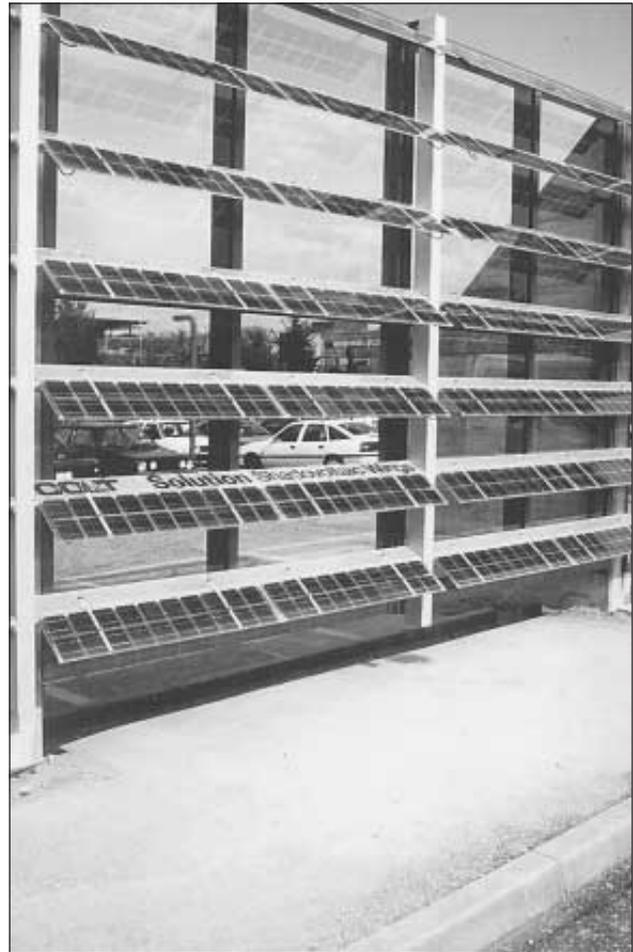


Abb. 10:  
Beschattungslamellen mit Zellen auf dem  
Testgelände Demosite [6]

#### Beispiel: Betriebsgebäude Gaswerk

Die lange Süd-Ost-Fassade des Betriebsgebäudes «Gaswerkareal» wird mit Photovoltaik-Glaslamellen, welche der Sonne nachgeführt werden, vor zu starker Einstrahlung geschützt [1] [4]. Die Lamellen sind gebäudeseitig mit einer Reflexionsbeschichtung versehen. Der äussere Teil ist als translu­zides Laminat ausgeführt. Bei hohem Sonnenstand produzieren die Zellen Strom und schatten die Räume wirkungsvoll ab. Zusätzlich fällt diffuses Licht in die Büroräume. Bei tiefem Sonnenstand leitet die Reflexionsbeschichtung Licht in die Tiefe des Raumes (Abb. 10). Die Solarelemente erfüllen so einen dreifachen Zweck: Stromproduktion, Beschattung und Tageslichtnutzung. Der Gesamtertrag der Anlage liegt über 1'200 kWh/kW.

## 7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

Bei allen vorgestellten Beispielen für kombinierte und/oder integrierte PV-Anlagen werden bestehende Strukturen genutzt oder durch eine weitere Anwendung ergänzt. Von den Investitionskosten für die PV-Anlage können deshalb die Kosten der ersetzten Elemente oder ergänzten Strukturteile abgezogen werden. Die solare Stromproduktion und die kombinierten Erträge verbessern die Rechnung zusätzlich. Die Lebensdauer der Solarelemente liegt in der gleichen Grössenordnung wie diejenige des restlichen Gebäudes.

Eine PV-Fassade liegt in der Preiskategorie einer mittleren konventionellen Fassade, etwa bei Fr. 1'500.-/m<sup>2</sup>. Für die oben beschriebene Anlage «Gaswerkareal» wird ein Preis von Fr. 18.90/W ausgewiesen, also etwas höher als bei einer traditionellen Flachdachanlage mit Fr. 14.-/W. Die Gestehungskosten für eine kWh Strom, ob eingespart oder solar produziert lässt sich nicht unterscheiden, liegen bei Fr. 1.75, was dank der Mehrfachnutzung in der Grössenordnung konventioneller Anlagen liegt.

## 8 Ausblick

Kundenspezifisch konstruierte Solarelemente lassen dem Planer in Bezug auf Farbe, Abmessungen und elektrischer Verschaltung grosse Freiheiten. Eine der letzten Einschränkungen, die dreidimensionale Form, wird in Zukunft ebenfalls wegfallen. Dazu werden heute die notwendigen Technologien, auch neue Zellsysteme, entwickelt.

Ein weites Feld von Anwendungsmöglichkeiten für die Photovoltaik wird durch die Integration von Solarelementen in die Gebäudehülle eröffnet. Das von Energie 2000 gesteckte Ziel, die Montage von 50 MW Solarzellen bis ins Jahr 2000, wird realistisch.

Heute gilt es, die Möglichkeiten der Solarelemente vermehrt im Planungsalltag anzuwenden.

## 9 Literatur und Bildnachweis

- [1] Rita Contini Knobel/Willy Weber  
**Sonne und Architektur**  
Impulsprogramm PACER  
BfK, Bern 1992
- [2] Othmar Humm/Peter Toggweiler  
**Photovoltaik und Architektur**  
Impulsprogramm PACER BfK, Bern  
Birkhäuser, Basel 1993
- [3] Lukas Herzog/Urs Muntwyler  
**Photovoltaik - Planungsunterlagen für autonome und netzgekoppelte Anlagen**  
Impulsprogramm PACER  
BfK, Bern 1992
- [4] Photovoltaik-Anwendungen im Alltag  
**Tagungsband**  
SOFAS, Bern 1993
- [5] Kurt Egger et al.  
**Erneuerbare Energien in der Landwirtschaft: Planungsgrundlagen**  
Impulsprogramm PACER  
BfK, Bern 1991
- [6] **Demosite Testgelände**  
c/o EPFL Lausanne, LESO  
Jean Graf

Abb. 6:  
Solution AG, Härkingen

Abb. 7:  
Alteno AG, Basel

Abb. 8:  
Solution AG, Härkingen

Abb. 9:  
Solution AG, Härkingen

Abb. 10:  
Solution AG, Härkingen