

# Multifunktionale Nutzung photovoltaischer Anlagen

Dr. Christian Bendel

ISET  
cbendel@iset.uni-kassel.de

Peter Funtan

ISET  
pfuntan@iste.uni-kassel.de

Martin Ries

ISET  
mries@iste.uni-kassel.de

Prof. Dr. Heinz Hullmann

ISET  
e-mail: hullmann@hwp-hullmann-willkomm.de

## Einführung

Die Nutzung von Photovoltaikanlagen unterschiedlichster Größen und Ausführung nimmt weltweit mit kontinuierlichen Steigerungsraten zu. Im Bewusstsein der Menschen hat sich inzwischen verankert, dass man auf Basis des photovoltaischen Effekts aus der Sonnenstrahlung elektrischen Strom generieren kann: geräuschlos, verschleißlos und umweltfreundlich. Weitere Nutzungsmöglichkeiten, d. h. bereits vorhandene physikalische Eigenschaften als weitere Produktfunktionen in Kombination mit anderen Techniken und Effekten anzuwenden, sind zwar vereinzelt bekannt [2], werden aber nicht als zusätzliche Besonderheit, als Wirtschaftlichkeitsargumente vermarktet. Zum Beispiel wird der Photovoltaikintegration in die Gebäudehülle heute noch immer mit Skepsis und Vorbehalten begegnet. Sie sei angeblich zu teuer, würde insbesondere in der vertikalen Anordnung keinen ausreichenden Energieertrag bringen und sei somit unwirtschaftlich. Argumente, die derzeit immer noch bei Investitionsentscheidungen zur Anwendung kommen und oft ohne sachliche Prüfung zu „Killerkriterien“ werden. „Außerdem würde bei den heutigen Stromkosten bzw. Einspeisevergütungen eine Amortisation nicht bzw. erst“ – unter Berücksichtigung heute gültiger Wirtschaftlichkeitsberechnungen – „sehr spät zu erwarten sein“ [1], [3]. Dies gründet sich auf fatale Desinformationen und auf Behauptungen, die antiquierte Standpunkte erkennen lässt.

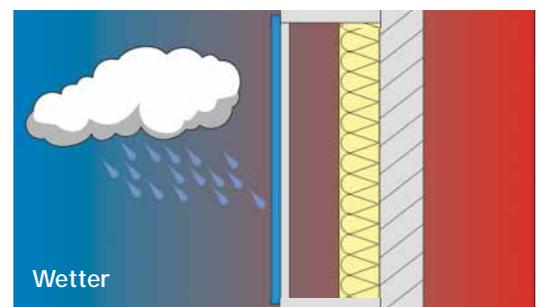
Keine andere Fassadenkonstruktion, bzw. -technologie musste sich bisher einer solchen Argumentation stellen. Wann kann beispielsweise eine Metallfassade aus Aluminium ihre Material- und Herstellungskosten erwirtschaften oder nach wie vielen Jahren rechnet sich eine hochwertige Naturwerkstein-Fassade?

Den Photovoltaikgenerator in Kombination mit anderen Technologien als Baueinheit mit neuen spezifischen Eigenschaften für die Gebäudehülle zu betrachten, ergibt bei einem gesamtheitlichen

Ansatz völlig neue Nutzungschancen und Kostenvorteile. Eine zentrale Rolle für diesen Ansatz spielt der Architekt als beratendes und koordinierendes Bindeglied zwischen Investor, PV-Modulhersteller, Montagesystemanbieter und Fachplaner. Seine entscheidungsfördernde Fachkompetenz für die Nutzung der umweltfreundlichen photovoltaischen Fassaden- und Dachelemente – bereits beim Entwerfen zu Beginn jeglicher Baumaßnahmen – bietet die Gewähr eines sinnvollen und wirtschaftlichen Einsatzes.

## Die multifunktionalen Eigenschaften der Photovoltaik

Die nachfolgende Beschreibung der Mehrfacheigenschaften von PV-Fassaden- und Dachelementen [4] gibt einen Überblick über Möglichkeiten und Machbarkeit. Die Untersuchungsergebnisse beziehen sich vor allem auf kristalline Si-Solarzellentechnologien, die derzeit den höchsten Marktanteil besitzen und vom Entwicklungsstand am weitesten vorangeschritten sind.

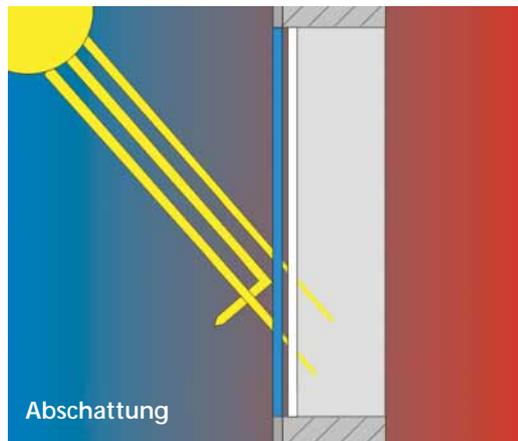


Zum **Witterungsschutz** zählen Regen- und Winddichtigkeit, Windlastfestigkeit, Klimawechselresistenz sowie Alterungsbeständigkeit. In internationalen Normen sind die dafür vorgeschriebenen Testkriterien und Prozeduren beschrieben. Verschiedene Tests gemeinsam mit Industriefirmen zeigten bei derzeit marktverfügbaren PV-Fassadenmodulen (kristallines Si mit Harz- bzw. Folieneinbettung) [1]:

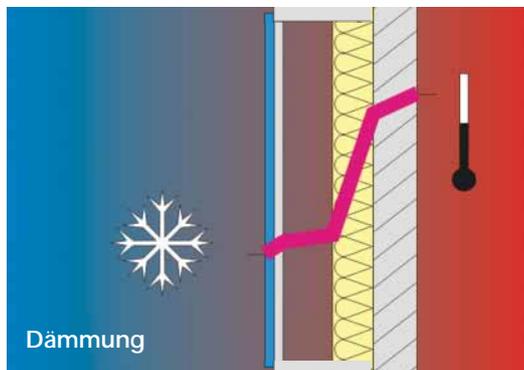
- Windwechsellasten bis max. 2400 Pa (Pascal) und 150.000 Lastwechsel (gesamt) sind ohne Schaden erreichbar (entspricht ca. 233 km/h).
- Klimawechseltests (18 Jahre simuliert) offenbarten keine signifikanten Alterungserscheinungen.
- Die elektrische Isolationsfestigkeit (Isolationswiderstand), als einer der wichtigsten Parameter in einer elektrischen Energieerzeugungsanlage, blieb im Klimawechseltest weit über den geforderten Grenzwerten von 30 MW.

Für die photovoltaische Dünnschichttechnologie werden gleichwertige Testergebnisse angestrebt. Derzeitige Dünnschichtmodule aus Vorserienproduktion (CdTe, CIS) befinden sich in entsprechenden Testphasen. Amorphe Siliciummodule (a-Si) in Ein-, Zwei- und Dreischichtstrukturen beginnen erfolgreich den Markt zu erobern, aber auch diese neuen Technologien müssen ihre Langzeitauglichkeit noch unter Beweis stellen.

Die Witterungsfestigkeit photovoltaischer Fassaden- und Dachelemente wird schon heute nicht mehr in Frage gestellt.



Die Funktion der **Abschattung** mit einer PV-Fassade oder mit einem PV-Dach kann gezielt durch das Design der photovoltaischen Anlage eingestellt werden. Üblicherweise werden die einzelnen Solarzellen in kristallinen Si-Modulen so angeordnet, dass über die „Packungsdichte“ viel oder wenig Abschattung entsteht. Bei Dünnschichtsolarmodulen werden die Zwischenräume bzw. Muster und Strukturen z. B. mit Laser bereits während des Herstellungsprozesses geschaffen, sodass Semitransparenz entsteht.



Die **Wärmedämmung** bei PV-Fassaden- und Dachelementen wird durch den eigentlichen Sandwich-Aufbau des Moduls selbst, durch die Luftschicht hinter einer PV-Vorhangfassade (Geschwindigkeit regulierbar) sowie durch die Strahlungsabsorption der kristallinen Si- und Dünnschicht-Solarzellen erreicht. In Kombination mit üblichen Wärmedämmstoffen werden sogar verbesserte Wärmedämmwerte erzielt, die den bekannten High-End-Technologien gleichwertig sind. In Isolierglasausführung übernehmen die photovoltaischen Fassaden- bzw. Dachelemente die Funktion der thermischen Trennung in der Gebäudehülle.

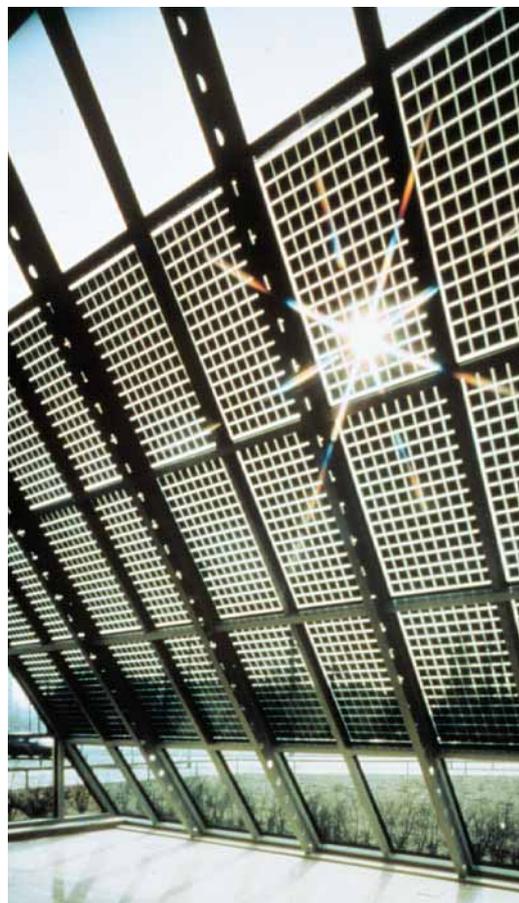
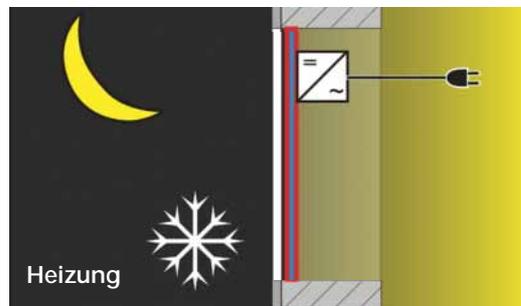


Abbildung 1  
Abschattung mit  
PV-Doppelglasscheiben  
im Atriumsbereich  
© HASTRA

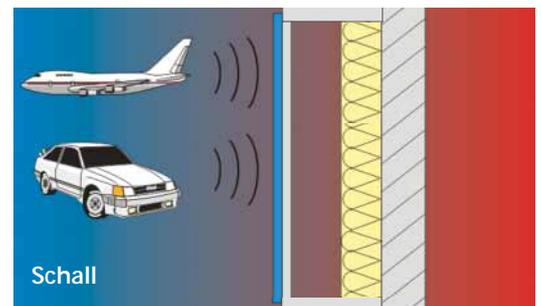
Die Semitransparenz bei kristallinen Silicium-Solarzellen (Power-Zellen) erfolgt durch mechanische Strukturierung. Abschattung bzw. Tageslichtleitung sind in den oben beschriebenen Technologien und Konstruktionen eng miteinander verknüpft. Mit der Nutzung der natürlichen Abschattung durch eine gezielte Anordnung von undurchsichtigen kristallinen Solarzellen in den photovoltaischen Fassadenelementen kann eine erhebliche Kostenreduktion in Atrium-Bereichen erzielt werden. Mit Hilfe der Abstände zwischen den Solarzellen wird der Anteil des einfallenden Tageslichts eingestellt und damit auch der Anteil der Wärmestrahlung. Somit kann das Klima in solchen kritischen Bereichen gezielt beeinflusst werden.



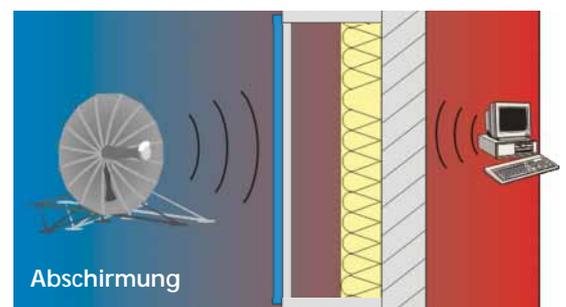
Die Nutzung von Photovoltaikerelementen in der Gebäudehülle zum **Heizen** ist relativ neu, obwohl der physikalische Effekt der Erwärmung durch Rückstrom bei der Ermittlung von Dunkelkennlinien seit langem bekannt ist. Um den Heizungseffekt auch praktisch nutzen zu können, muss der Glas-PV-Modul-Verbund aber speziell gestaltet werden: Die Reihenfolge des Aufbaus verändert sich dahingehend, dass das PV-Modul zum Innenraum in optimierter Größe angeordnet ist um Abschattungen und Transmissionsverluste zu verringern. Die PV-Module befinden sich also im Doppelglasaufbau auf der Raumseite.

Durch die gezielte Auswahl einer speziellen Solarzellentechnologie (z. B. amorphes Silicium) mit speziellen spektralen und optischen Eigenschaften (z. B. semitransparent) können Funktionen in der Gebäudehülle realisiert werden, die bisher nur mit zusätzlichen Heizkörperinstallationen möglich waren. Damit sich nun durch die veränderte Anordnung des PV-Moduls keine zusätzliche Erwärmung in den Sommermonaten einstellt, werden die spektralen Besonderheiten

von bestimmten Solarzellentechnologien genutzt. Durch das „Ausblenden“ von infraroten Lichtanteilen, die z. B. bei amorphen Silicium-Solarzellen nicht an der photovoltaischen Energieumwandlung beteiligt sind, kann die langwellige Wärmestrahlung reduziert werden. Insbesondere die architektonisch anspruchsvolle Gestaltung von Atrien, Shed-Dächern und Warmfassaden gibt dem Architekten in Verbindung mit den weiteren vorteilhaften Eigenschaften der Photovoltaik einen wesentlich größeren Spielraum.



Die **Schalldämmung** durch die Gebäudehülle ist eine durch Vorschriften geregelte Selbstverständlichkeit in der Architektur. Bisher kaum beachtet und genutzt wird die Tatsache, dass PV-Fassaden- bzw. PV-Dachelemente – bedingt durch den Mehrschichtaufbau – bereits über ein Schalldämm-Maß von ca. 25 dB verfügen. Ohne funktionelle Einschränkungen können photovoltaische Warmfassaden- bzw. Dachelemente mit der Mehrscheibenisoliertechnik kombiniert werden. Die Mehrscheibenisoliertechnik mit Edelgasfüllung ist Stand der Technik um einen höheren Schalldämmwert zu erreichen.



Die **elektromagnetische Schirmdämmung** von PV-integrierten Gebäudehüllen (Fassade und/oder Dach) ergibt sich durch die meist elektrisch leitfähige Unterkonstruktion sowie die flächenhaften elektrischen Netzwerke der Photovoltaikmodule (Zellenverbund). Diese

Wirkung, bekannt durch den Effekt des Faradayischen Käfigs, kann genutzt werden zum Schutz besonders elektrosensibler Bereiche wie in Krankenhäusern, Computerzentralen, Polizei, Forschungseinrichtungen sowie Flughafengebäuden. Die Nutzung üblicher Mobiltelefone in „geschirmten“ Gebäuden ist durch spezielle Umsetzer im Gebäude aber problemlos möglich. Trotzdem sollte man in Gebäuden Festnetztelefone bevorzugen, weil alle mobilen Telefone (DECT) durch elektromagnetische Wellen (gestrahlte Energie) einen zusätzlichen „Elektrosmog“ erzeugen, dessen schädigende Langzeitwirkung auf lebende Organismen immer noch nicht ausgeschlossen werden kann [7]. Untersuchungen unterschiedlicher PV-Fassadenelemente bezüglich ihres Schirmdämpfungsverhaltens ergaben in einer Testfassade eine Dämpfung von 23 dB (mehr als Faktor 100) für eine Testfrequenz von 960 MHz.

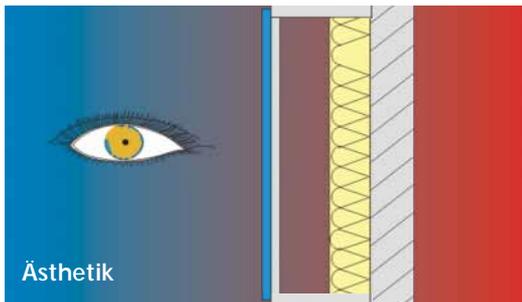
Hier besteht die Herausforderung für Planer und Architekten (Abb. 2,3).



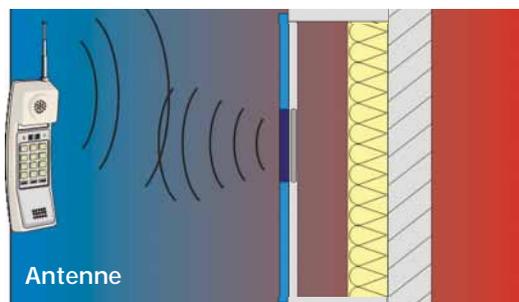
Abbildung 2  
PV-Dach und Fassade  
© Fabrimex



Abbildung 3  
Hochhausfassade  
© Flabeg

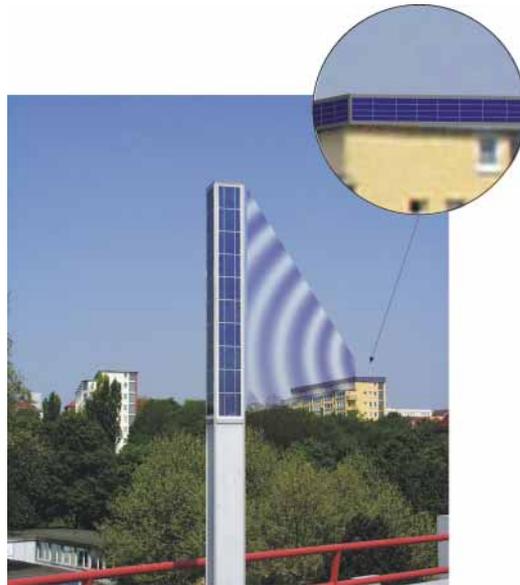


Die **Ästhetik** und das **Design** einer Gebäudehülle werden durch die Einflussnahme des Investors und durch den Architekten bestimmt. Photovoltaische Fassaden- bzw. Dachelemente gehören zu den hochwertigsten Baumaterialien und -elementen. Sie werden bestimmt durch die verwendeten Solarzellentechnologien (kristallines Silicium, amorphes Silicium, Dünnschichtszellen), die farbliche und konstruktive Gestaltung (Antireflexschicht, Solarzellenabstand, Solarzellengeometrie, Solarzellenanordnung und deren Oberflächenstruktur und Einbettungsfolien) die äußere Geometrie und das Befestigungssystem (Standardabmessungen, Sondermaße, die Gestaltung mit und ohne Rahmen), bewegliche Elemente zur Nachführung, Abschattung und Lichtlenkung (Lamellen, Markisen) sowie den ein- oder mehrschichtigen Aufbau (Überkopf- bzw. Isolierverglasung). Die Verwendung von PV-Elementen erfordern eine besondere Kompetenz im Planungs- und Gestaltungsprozess.



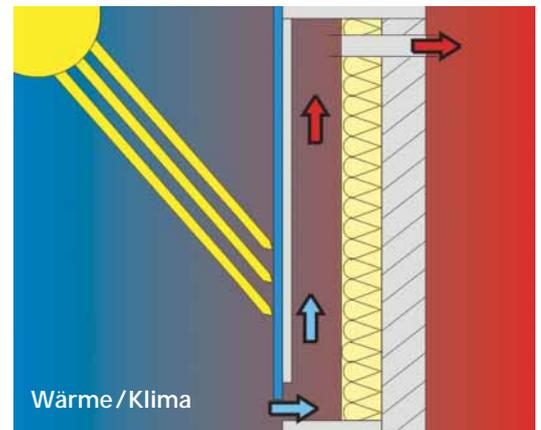
Die **elektromagnetische Energiewandlung** in der Gebäudehülle bezieht sich auf ein speziell gestaltetes photovoltaisches Fassaden- bzw. Dachelement bzw. eine Baugruppe aus diesen Elementen. Unter dem Fachbegriff „solare Planar-Antenne“ wurde eine neue Baugruppe entwickelt und unter dem geschützten Namen SOLPLANT® bekannt gemacht.

Abbildung 4 (links)  
Nachrichtenübertragung mit solarer Planar-Antenne als PV-Fassadenelement (Computersimulation © ISET)

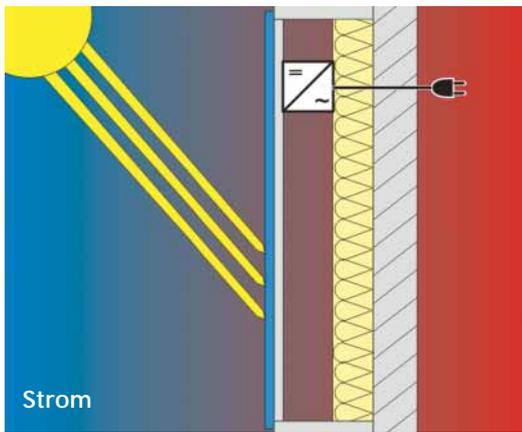


Hier wird die photovoltaische Stromerzeugung und das Senden bzw. Empfangen von hochfrequenten Signalen (z. B. für die Kommunikation über Handy) in **einer** Baueinheit ermöglicht. Die Nutzung dieser speziellen Anordnung von photovoltaischen Zellen als separates – äußerlich kaum unterscheidbares – Fassadenelement z. B. an einem Hochhaus (Abb. 4), ermöglicht die Vermeidung bzw. Reduzierung von „Funkschatten“ bei gleichzeitiger Reduzierung der Feldstärke von zentralen Sendestationen. Insbesondere für die in Zukunft erforderliche hohe Qualität der UMTS-Nachrichtenübertragung wird eine höhere Verdichtung von Sendeanlagen erforderlich werden. Die „solare Planar-Antenne“ kann diese Anforderungen in beispielhafter Weise miterfüllen, bei gleichzeitiger Reduzierung der Sendefeldstärke – auch als „Elektrosmog“ bekannt. Mit der Einführung des terrestrischen digitalen Rundfunks und Fernsehens ergeben sich mit oben beschriebener Lösung weitere neue Anwendungen. Bisherige Antennen lassen sich durch modifizierte PV-Module ersetzen, die zur Stromgenerierung ebenso verwendet werden, wie zum Radio- bzw. Fernsehempfang.

Abbildung 5  
Luftkollektoren mit Photovoltaik im Industriebau © Grammer-Solar-Bau



Die **thermische Energiewandlung** in der Gebäudehülle ist eine eingeführte Technologie, die lediglich für das photovoltaische Fassaden- bzw. Dachelement fachkompetent modifiziert werden muss. Physikalisch gesehen wirken die kristallinen Solarzellen bzw. die photovoltaischen Dünnschichtzellen auch als Wärmestrahlungsabsorber. Dies wirkt sich eher nachteilig auf die Effizienz der photovoltaischen Energiewandlung (Stromerzeugung) aus. Diese „Verlustwärme“ ist mit dem entsprechenden technischen und physikalischen Know-how nutzbar: durch Hinterlüftung einer photovoltaischen Vorhangfassade und damit Kühlung der Solarzellen und der Gebäudewand – bei gleichzeitiger Verbesserung des photovoltaischen Umwandlungsgrades – oder durch die Nutzung des warmen bewegten Luftstromes zur Gebäudeklimatisierung. Die Verknüpfung von photovoltaischer Stromerzeugung und Warmwassergewinnung in einer Baueinheit (Hybridkollektor) wird, obwohl in Fachkreisen umstritten, als Produkt bereits auf dem Markt angeboten. In Verbindung mit Niedertemperaturanwendungen (z. B. Schwimmbad) erfolgt hier eine sehr rationelle Energienutzung. Zur Brauchwassernutzung müsste über eine zusätzliche Energiewandlungseinheit (z. B. Wärmepumpe) das Temperaturniveau angehoben werden. Hybridkollektoren auf der Basis von Photovoltaik und Lufterwärmung werden sehr erfolgreich bereits industriell genutzt (Abb. 5). Durch die Abkühlung der Solarzellen wird die Effizienz der photovoltaischen Energiewandlung so verbessert, dass sich damit zusätzlich – quasi kostenlos – Lüfter betreiben lassen. Übrig bleiben in der Kostenbilanz ein warmer, bewegter Luftstrom sowie die Investitionskosten der Be- bzw. Entlüftungsanlage.



bei Modulen, Wechselrichtern, Installations- und Montagesystemen zu Verbesserungen, die auf die Gesamtsysteme übertragen werden konnten. Entwicklungsetappen wie z. B. zentraler Wechselrichter, Modulwechselrichter, Stringwechselrichter, Multistringwechselrichter kennzeichnen die Evolution der verschiedenen Anlagenkonzepte.

Der **photovoltaische Energieertrag** hängt neben der Art der Solarzellen (Material- und Zellentechnologie) von Rahmenbedingungen ab wie Wetter, Alterung und Verschmutzung. Auch das planerische Know-how und das Design der Anlage wie Neigung, Ausrichtung, Aufbau, Installation und Komponenten wirken sich auf den Stromertrag des Gesamtsystems aus und müssen optimiert werden. Entwicklungskriterien, wie Erhöhung der Zuverlässigkeit, Wirkungsgradsteigerung sowie Kostenreduktion führten

Auch die Solarzellentechnologien entwickelten sich, und zwar hinsichtlich der Dünnschicht-solarzellen und der Effizienzsteigerungen von Silicium-Wafer-Solarzellen. Die photovoltaische Komponenten- und Anlagenentwicklung war und ist sehr stark von Bemühungen geprägt, die Effizienz der Energiewandlung zwecks Nutzung im elektrischen Netz mit PV-Wechselrichtern (Umwandlung von Gleich- in Wechselstrom) zu steigern [5]. Am effektivsten kommen heute sogenannte Stringkonzepte zu Einsatz (Abb. 6).

Zunehmend werden neue Hybridkonzepte, d. h. Kombinationen mit anderen umweltfreundlichen Energiewandlungssystemen wie z. B. Brennstoffzelle, BHKW oder Mikrogasturbinen insbesondere

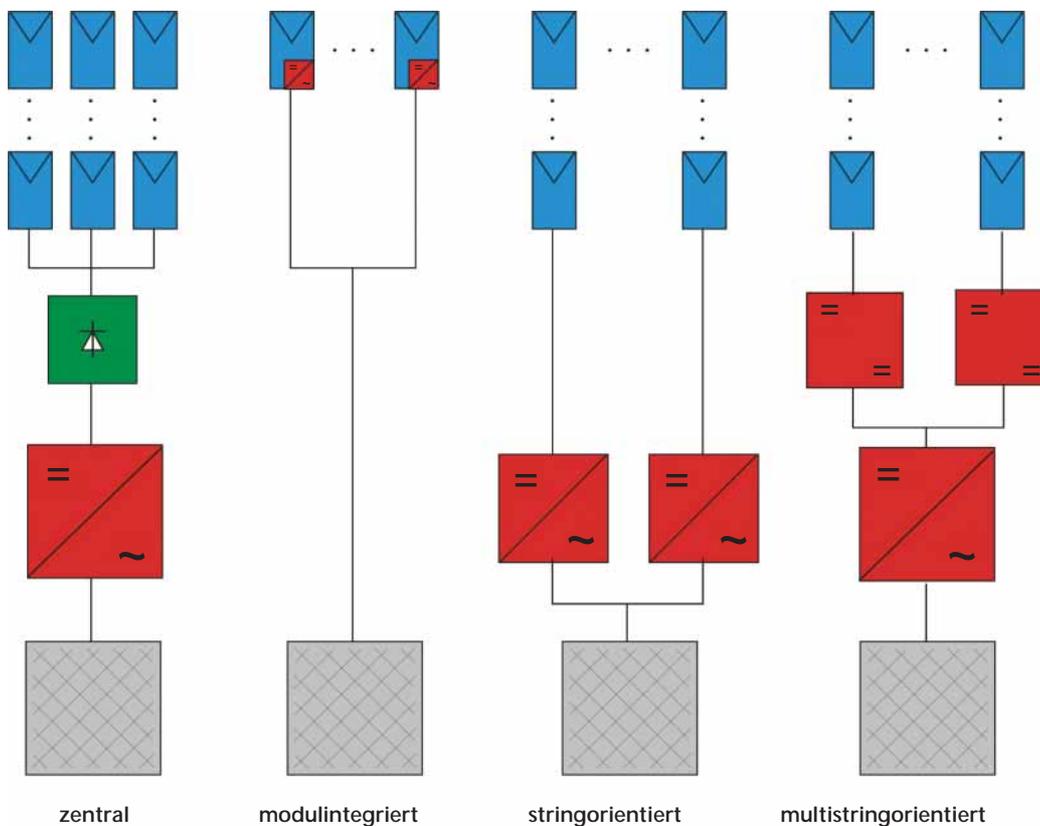


Abbildung 6  
Wechselrichterkonzepte  
als „Spiegel“ der  
Entwicklung photo-  
voltaischer Anlagen  
© ISET

für den Gebäudebereich entwickelt. Hintergrund ist die zuverlässige Energiebereitstellung von dezentralen netzgekoppelten Energieerzeugungsanlagen (DEA), die im Falle eines schwachen Netzausläufers den Netzanschlusspunkt „stützen“ und im Falle einer Netzabschaltung sogar zu einer Inselversorgung übergehen können. Sie sind bereits als USV-Anlagen (unterbrechungsfreie Stromversorgung) bekannt. Um solche neuen Energieversorgungskonzepte aber wirtschaftlich zu betreiben, sind noch umfangreiche Entwicklungsarbeiten erforderlich, denn die DEA im Niederspannungsnetz benötigen bidirektionale Kommunikations- und Energietransfer-Managementeinrichtungen, um die wichtigen Voraussetzungen wie Beobachtbarkeit und Steuerbarkeit überhaupt erst zu ermöglichen.

Innovations- und Weiterentwicklungspotenziale. Architekten und Fachplaner bestimmen mit ihrer Fachkompetenz und ihrer Einstellung zu Innovationen in der Architektur wesentlich die Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz der Photovoltaik [8].

Kostenreduktionspotenziale werden bei systemtechnischen Komponenten wie z. B. bei Wechselrichtern gesehen, die sich bis zum Jahre 2005 um 50% verbilligen können [5]. Auch die Modulindustrie prognostiziert nennenswerte Kostenreduktionen [6], die sich dann letztlich auf das gesamte photovoltaische System auswirken werden.

## Zusammenfassung

Die Photovoltaik ist eine außerordentlich umweltfreundliche Energiewandlungstechnologie, weil die PV-Anlagen weder Schadstoffe noch Strahlung emittieren. Sie funktionieren geräuschlos und ohne Verschleiß, wobei sie die hochwertigste Energieform – elektrische Energie – erzeugen. Die saisonale Verfügbarkeit (täglich, jahreszeit- und/wetterabhängig, jährlich) sowie die relativ niedrige Energiedichte (Flächenbedarf) sind nachteilige Kriterien gegenüber Windenergie und Wasserkraft, oder fossilen Energieträgern. Dafür steht die solare Energie praktisch unbegrenzt zur Verfügung (4 Mrd. Jahre), fossile Energieträger hingegen nur noch für 50–120 Jahre.

Gemeinsam mit Energieeinsparungen im Gebäude, der forcierten Einführung von energieoptimierten Anlagen sowie einem neuen Verbraucherverhalten – „weil Energie kostbar ist“ – wird die photovoltaische Energiewandlung im täglichen Umfeld an Bedeutung gewinnen [9], [10]. Die Investitionskosten der Photovoltaikintegration in die Gebäudehülle werden durch die ganzheitliche und konsequente Nutzung der vorteilhaften physikalischen Eigenschaften von Photovoltaik-Elementen bestimmt. Eine mit diesen Vorteilen in die Gebäudehülle integrierte Photovoltaik bietet derzeit eines der größten

## Literatur

- [1] C. Bendel et al., Abschlussbericht „Entwicklung und Erprobung eines photovoltaischen Fassadenelementes“, ISET/ Kassel, 1996
- [2] F. Sick, T. Erge (Hrsg.), „Photovoltaics in Buildings“, Verlag James and James, London, 1996
- [3] C. Bendel et al., „Multifunktionale Fassaden im Vergleich“, 14. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein, 1999
- [4] H. Hullmann (Hrsg.), „Photovoltaik in Gebäuden – Handbuch für Architekten und Ingenieure“, Fraunhofer IRB Verlag, 2000
- [5] M. Meinhardt et al., „Kostenreduktion durch neue PV- Systemtechnik“, SMA Regelsysteme GmbH, 5. Kasseler Symposium, Kassel, 2000
- [6] T. Weller, „Photovoltaik im Wettbewerb der verteilten Energieerzeugung“, 16. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein, 2001
- [7] H. Bartsch et al., „Langzeit- Exposition mit einem GSM- ähnlichen Signal (Mobilfunk)“, NEWS-letter, Forschungsgemeinschaft Funk e.V., April 2002
- [8] F. Hasheider, „Architektonische und technische Aspekte bei der Integration von Photovoltaik in die Gebäudehülle“, Praktikumsbericht, ISET, 2002
- [9] H.-J. Gabler et al., „Photovoltaik am Gebäude – Stromversorgung mit Photovoltaik?“, Jahrestagung des Forschungsverbunds Sonnenenergie (FVS), Potsdam, Sept. 2002
- [10] I. B. Hagemann, „Gebäudeintegrierte Photovoltaik (GIPV). Innovative Technik für das Baugewerbe“, 18. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein, März 2003