

# Photovoltaik-Fassaden – Technische Aspekte, Qualifizierung und Betriebserfahrungen

von Christian Bendel und Ulrich Rudolph, Burchard Decker und Detlef Mencke, Dirk Schekulin und Ingo Voigtländer

Dr.-Ing. Christian Bendel ist Abteilungsleiter und Dipl.-Ing. Ulrich Rudolph ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET), Kassel.

Dipl.-Phys. Burchard Decker ist Gruppenleiter und Dipl.-Ing. Detlef Mencke ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Solarenergieforschung GmbH Hameln/Emmerthal (ISFH), Emmerthal.

Dipl.-Ing. Dirk Schekulin und Dipl.-Ing. Ingo Voigtländer sind wissenschaftliche Mitarbeiter im Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW), Stuttgart.

## Überblick

Ein großes Potential an „PV-tauglichen“ Flächen stellen die Fassaden von Hochhäusern bzw. Bürobauten dar, wo es sich bereits heute lohnt, PV-Fassaden kostengünstig zu installieren. Voraussetzung ist eine frühzeitige Berücksichtigung in der Planungsphase, damit die Vorteile einer Mehrfachnutzung (Wetterschutz, Wärmedämmung, Tageslichtnutzung und Abschattung, Gestaltung, Schallschutz, elektromagnetische Schirmdämpfung und Energieerzeugung) in vollem Umfang zum Tragen kommen.

Betriebserfahrungen mit dezentral erzeugtem Wechselstrom in Solarmodulen (MIC's - modulintegrierten Stromrichtern bzw. MOC's - modulorientierten Stromrichtern) belegen die Vorteile einer einfachen Wechselstromverkabelung sowie die Beherrschung der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) bei einer Vielzahl von Kleinwechselrichtern. Die Verbesserung des Nutzungsgrades (Wirkungsgrad, Lebensdauer, Verfügbarkeit, Einsatzrelevanz) offenbart noch bestehende Entwicklungspotentiale.

The facades of high-rise or office buildings are useful surfaces for PV applications because it is possible to install PV-facades at relatively low prices. In order to take full advantage of aspects such as protection against weather, noise and sunshine, daylighting, thermal insulation, generation of energy and shielding against electro-magnetic waves, the early consideration of PV in the planning of the building is necessary.

Practical knowledge gained with the operation of decentralised energy processing (e. g. MIC - Modul Integrated Converter or MOC-Modul Orientated Converter) shows the advantages of a simple AC-wiring. The problems concerning EMC (Electro-Magnetic-Compatibility) can be controlled. The improvement of efficiency, reliability and lifespan are the aims of further investigations.

## 1. Einleitung

Die Aufdachmontage bzw. die Dachintegration von PV-Generatoren wurde erfolgreich im Rahmen des Bund-Länder-1000-Dächer-Programms zu einer gewissen Marktreife gebracht. Die begleitenden Meßprogramme (MAP und IMAP) demonstrieren mit ihren Ergebnissen sehr wirkungsvoll den erreichten technischen Stand und die möglichen Weiterentwicklungspotentiale.

Ein zusätzliches beträchtliches Potential an „PV-tauglichen“ Flächen stellen die Fassaden von Hochhäusern bzw. Bürobauten dar. Die Kostenstruktur der meistens als „Edelfassaden“ ausgeführten Gebäudehüllen kommt, bei konsequenter Berücksichtigung eines PV-Fassadenkonzeptes von Beginn an, dem Einsatz von PV-Fassaden überraschend gut entgegen. Dabei zeigt sich, daß PV-Fassaden mit gleicher Qualität die Aufgaben bisher üblicher Fassaden, wie z. B. Wetterschutz, Wärmedämmung, Tageslichtnutzung und Abschattung, Gestaltung und Schallschutz übernehmen können, jedoch noch zusätzlich

- elektrische und thermische Energiegewinnung ermöglichen sowie eine
- Schirmdämpfungseigenschaft gegen elektromagnetische Wellen (Elektrosmog)

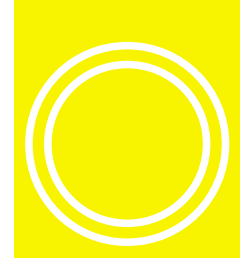
besitzen.

Die praxisnahe Umsetzung erfordert die Beachtung und Bewertung technischer Aspekte, ihre Qualifizierung zu allgemeingültigen Richtlinien und die Verifizierung durch Betriebserfahrungen.

Ein Forschungsprojekt vom ISET/Kassel, eine bewertende Übersicht von realisierten Fassaden durch das ISFH/Emmerthal sowie ein Demonstrationsprojekt vom ZSW/Stuttgart sind die fachliche Basis für die nachfolgenden Ausführungen.

## 2. Zielsetzung

Die Planung, Auslegung und Realisierung von PV-Fassaden wird heute an vielen Orten von kompetenten Firmen und Architekten erfolgreich durchgeführt. Unterschiedliche Ausführungen



demonstrieren das firmenspezifische Know-How der Beteiligten. Der Stand der Technik offenbart jedoch noch ein erhebliches Entwicklungspotential und Optimierungsansätze.

Um dieses Potential zu erschließen, wurden im Rahmen der o. g. Projekte und Vorhaben folgende Themen behandelt:

- Erarbeitung und Bewertung technischer Aspekte für die Planung, Errichtung und den Betrieb von PV-Fassaden,
- Bewertung und Qualifizierung bereits bestehender PV-Fassaden und Erarbeitung von Optimierungskriterien, sowie
- Demonstration von speziellen Lösungen in PV-Fassaden.

Das an den unterschiedlichen Institutionen erarbeitete Know-How soll, entsprechend aufbereitet, zukünftig Architekten, Fassadenbauern, Ingenieurbüros und anderen Fachleuten beim Planen, Auslegen und Realisieren von Photovoltaik in Gebäuden mehr Sicherheit geben.

### 3. Technische Aspekte (ISET)

Auf der Grundlage bisher üblich angewandter betriebswirtschaftlicher Bewertungskriterien wird heute der Einsatz der Photovoltaik in der Gebäudetechnik immer noch als zu teuer abgelehnt, obwohl immer häufiger Konzepte und Ergebnisse zum Gegenteil tendieren. Möglich wurde das durch die Berücksichtigung von Umweltverträglichkeitskriterien und neuen Vergütungsmodellen für die umgewandelte Solarenergie.

Ein mit Industrieunternehmen wie ASE/Alzenau und SCHÜCO/Bielefeld durchgeführtes Forschungsprojekt basierte auf umfangreichen praktischen Untersuchungen, um einen überzeugenden Beweis für eine preiswerte, jedoch multifunktionale Nutzung einer PV-Fassade, zu erbringen.

Die wissenschaftlich-technischen Ziele, in [Abbildung 1](#) graphisch dargestellt, verdeutlichen den Umfang und die Breite des Themenspektrums der Untersuchungsschwerpunkte. Beispielhaft sollen hier einige vorgestellt werden.

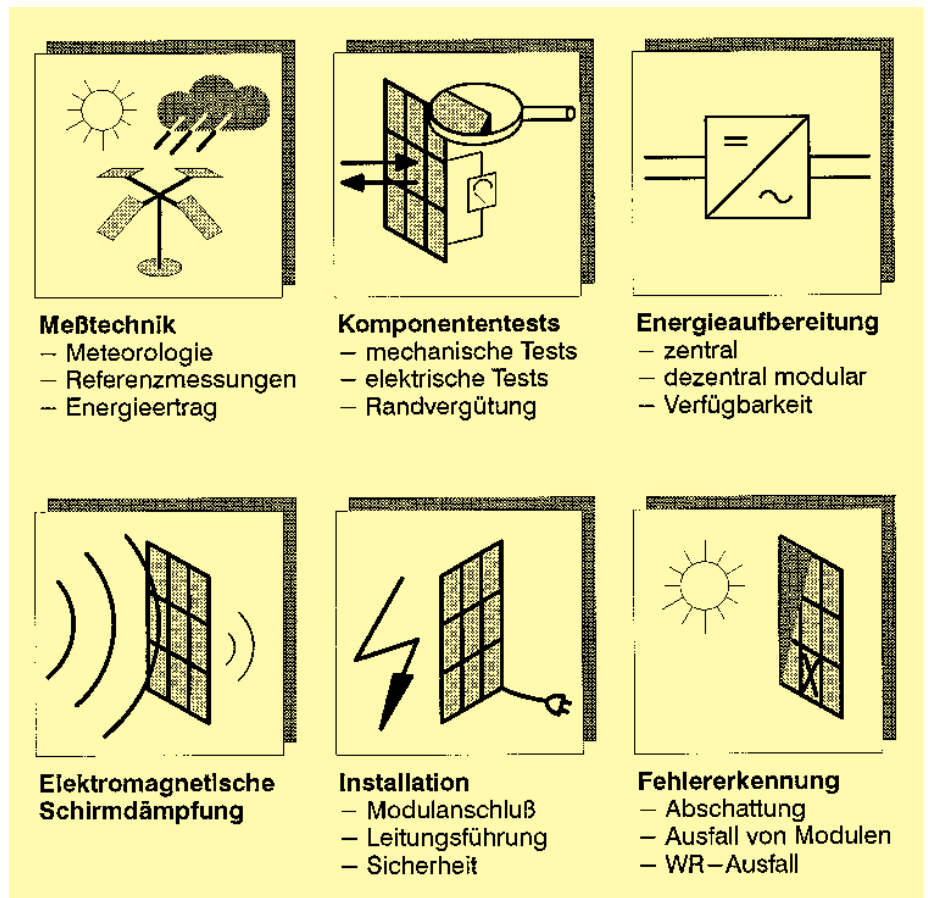


Abbildung 1: Untersuchungsschwerpunkte

#### 3.1 Komponententests

Basis für alle energetischen und klimatechnischen Untersuchungen der Komponenten bildeten begleitende meteorologische Messungen über ein computergestütztes Meßequipment [1].

Einen Schwerpunkt der Industriekooperation stellten die Komponententests dar. Gemeinsame Dauertests der speziell entwickelten Fassadenmodule, hergestellt mit unterschiedlichen Einbettungstechniken und Materialien, erbrachten bei Windlastuntersuchungen, Klimawechselprüfungen und Isolationswiderstandsmessungen den Beweis der vollen Funktionstüchtigkeit mit teilweise mehrfacher Sicherheit [2].

Die Energieaufbereitung in Photovoltaikfassaden ist auch zum jetzigen Zeitpunkt immer noch ein „heiß“ diskutiertes Thema. Im Rahmen mehrjähriger Untersuchungen an einer speziell konzipierten 50m<sup>2</sup> großen Experimentier-PV-Fassade ([Abbildung 2](#))

wurden unterschiedliche Energieaufbereitungskonzepte (zentraler Wechselrichter, dezentrale DC/DC-Wandler mit zentralem Wechselrichter, dezentrale Wechselrichter am PV-Modul / MIC und dezentrale, modulorientierte Wechselrichter / MOC) erprobt. Entscheidungskriterien, wie Verdrahtungsaufwand, Energieeffizienz, Zuverlässigkeit und Preis pro Watt, favorisierten das modulorientierte Energieaufbereitungskonzept [3] ([Abbildung 3](#)).

#### 3.2 Installations- und Diagnosesystem

Überraschend gut fügt sich der unter Pkt. 3.1 vorgestellte modulorientierte Stromrichter in das ebenfalls realisierte Konzept einer „Matrixinstallation“ ein. Gemeint ist hier die Verlegung der Elektroinstallation in senkrechten („Spalten“) und waagerechten („Zeilen“) Kabelkanälen im Wand-Brüstungsbereich. Derzeit wird intensiv an einem weiteren Stromrichterkonzept gearbeitet, das nach einer „Abmagerungskur“ (Größe, Gewicht, Verlustleistung) den RIC (Room-In-

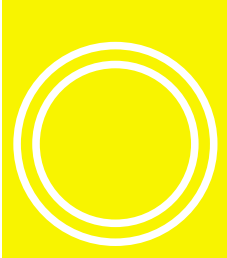


Abbildung 2: ISET-Experimentalfassade

Abbildung 4: Matrixinstallation mit modulatorientiertem Stromrichter (hier RIC - Room-In-Converter)

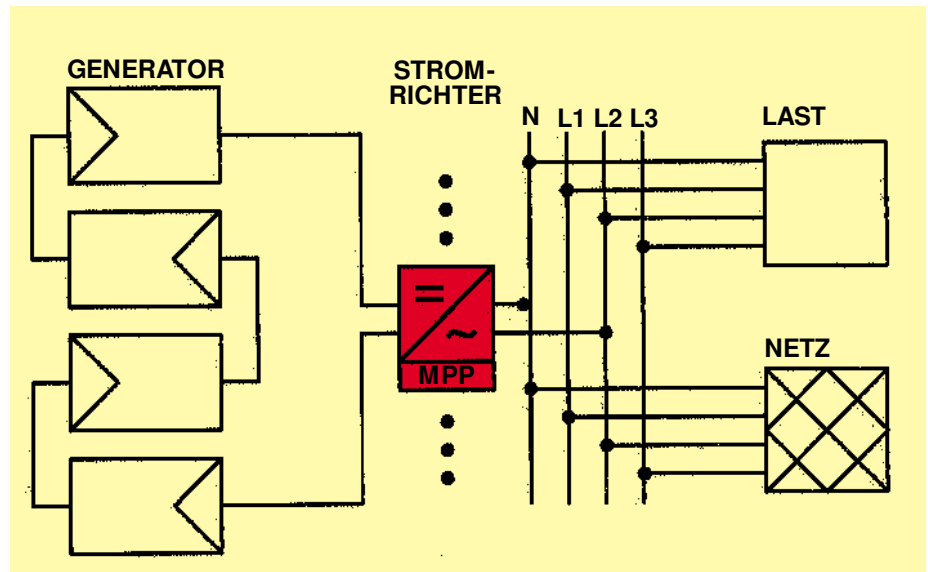


Abbildung 3: Modulatorientierte Energieaufbereitungstechnik

Converter) im Brüstungsbereich (Abbildung 4) zum Ergebnis haben wird. Aufgrund der relativ günstigen Einsatzbedingungen (geringe Temperaturwechsel, Schutzgrad IP 20, Raumklima u. a.) werden Wirkungsgrade bis über 96% und geringere spezifische Kosten erwartet.

Diese Matrixinstallation kommt zusätzlich einem optimierten Montageablauf entgegen, weil die Fassadenbauer und Elektroinstallateure unabhängig voneinander sowie kosten- und zeitoptimal arbeiten können. Die dadurch erreichbaren vorteilhaften Servicemöglichkeiten sollten besonders erwähnt werden. Diese werden durch eine weitere Entwicklung [5] unterstützt, die eine genaue Fehlererkennung, -ortung und -diagnose in Photovoltaikgeneratoren beinhaltet. Wesentliche Elemente dieses Systems sind modulatorientierte Sensoren, welche den Zustand des Moduls erfassen und über die Energieleitungen entsprechende Informationen an eine Auswerteeinheit senden. Ein einsatzfähiges Erprobungssystem soll mit Fördermitteln der DBU (Deutsche Bundesstiftung Umwelt) Ende des Jahres verfügbar sein.

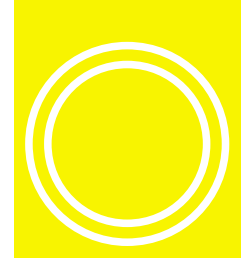
### 3.3 Energieerträge und Abschattungsverluste

Interessante Ergebnisse wurden bei einem energetischen Vergleich der möglichen Fassadenorientierungen (O, SO, S, SW, W; Neigung 90°) in unter-

schiedlichen Klimazonen erzielt. Abbildung 5 stellt einen Sonnentag im März 1996 dar. Der Unterschied der Energieerträge an diesem Frühlingstag zwischen dem Standort Almeria (Südeuropa) und Kassel (Mitteleuropa) mit 13% ist relativ gering. Relativiert wird die Aussage durch eine Gesamtjahresbetrachtung (Abbildung 6). Erste Abschätzungen der Korrelation zwischen Energieerzeugung und -bedarf, speziell für die Klimatisierung von Gebäuden, zeigen, daß diese bei Fassaden bemerkenswert hoch ist. Ein Ergebnis, das einer weiteren Detailuntersuchung bedarf, weil bauphysikalische Nebenbedingungen entscheidend das Ergebnis prägen.

In der Praxis lassen sich Abschattungen an Photovoltaikfassaden nicht immer vollständig vermeiden. Teilabschattungen können, wenn sie nicht vorher berücksichtigt werden, zu extremen Leistungseinbußen führen. Schutzbeschaltungen der Modul- bzw. Generatorstrings sind zwar möglich und sinnvoll, aber vorher geplante Verdrahtungskonzepte auf Basis der realen Abschattungsbedingungen sind effizienter.

Aufbauend auf Simulationsverfahren von Liu, Jordan und Perez wurden entsprechende Untersuchungen [2] durchgeführt. Ein Vergleich der Simulationen mit realen Versuchen überzeugte durch eine relativ gute Übereinstimmung, die durchaus belastbare Voraussagen zuläßt. Weitergehende



Möglichkeiten wird ein neues Auslegungsprogramm für PV-Fassaden bieten, das Ende dieses Jahres verfügbar sein wird. Durch die Verwendung von CAD-Tools werden die Simulationsergebnisse nicht nur als Zahlenwerte ausgegeben, sondern auch graphisch mit dem elektrischen und mechanischen Aufbau verknüpft, dargestellt.

### 3.4 Neue Gestaltung und Eigenschaften

Für Architekten und Planer ist die Funktionsfähigkeit einer PV-Fassade

ebenso so wichtig wie die konstruktive und farbliche Gestaltung. Im Rahmen von Outdoor-Tests wurden farbige PV-Module der Fa. BP-Solar/Fa. Pilkington untersucht. **Abbildung 7** zeigt einen typischen Tagesverlauf für unterschiedliche Farbmodule bei entsprechender Einstrahlung. Den höchsten Energieertrag liefert das PV-Modul mit der blauen Antireflexschicht. Energieeinbußen bis zu 4% müssen bei den verbleibenden Farben Gold und Magenta hingenommen werden, was für architektonische Ansprüche akzeptabel sein kann.

Ein überraschendes Ergebnis wurde mit den Untersuchungen zu den Schirmdämpfungseigenschaften von PV-Modulen bzw. -Fassaden erzielt. **Abbildung 8** zeigt das Absorptionsverhalten der ISET-Experimentalfassade für einen typischen Kommunikationsfrequenzbereich (D1, D2-Funktelefone). Ermittelt wurden diese Ergebnisse durch Feldmessungen außerhalb und innerhalb der Fassade mit kalibrierten Meßsystemen und darauf abgestimmten Antennen. Dämpfungen von 20 dB (Faktor 100) sind möglich, ohne daß die untersuchte Fassade optimiert wurde. Mit Interesse verfolgt das Bundesamt für Post- und Telekommunikation (BAPT) diesen Untersuchungsschwerpunkt, weil gerade in sensiblen Bereichen, wie z. B. Flughafen, Umgebung von Sendetürmen oder Krankenhäusern der Einsatz von schirmdämpfenden Photovoltaik-Gebäudehüllen viele bereits bestehende Probleme entschärfen würde.

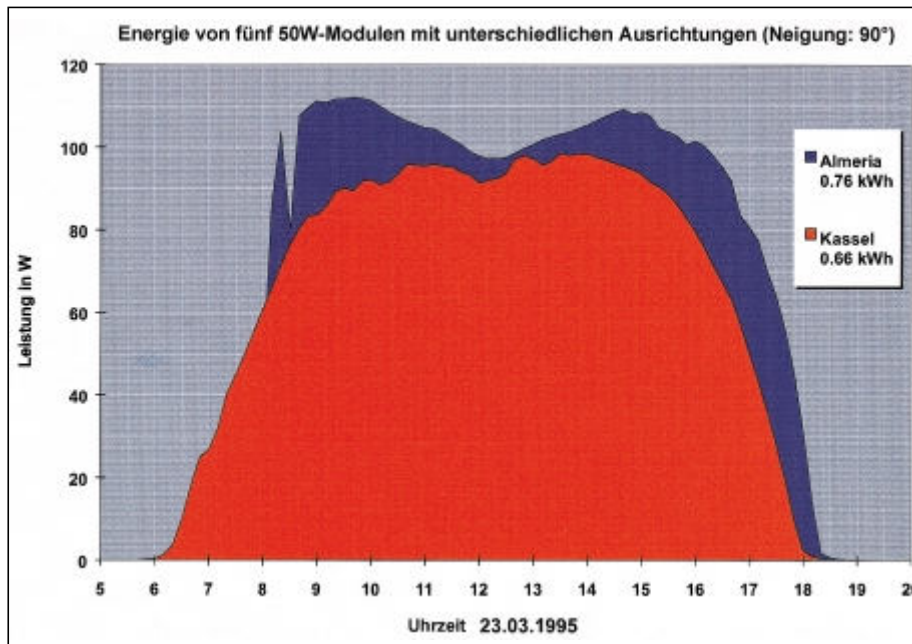
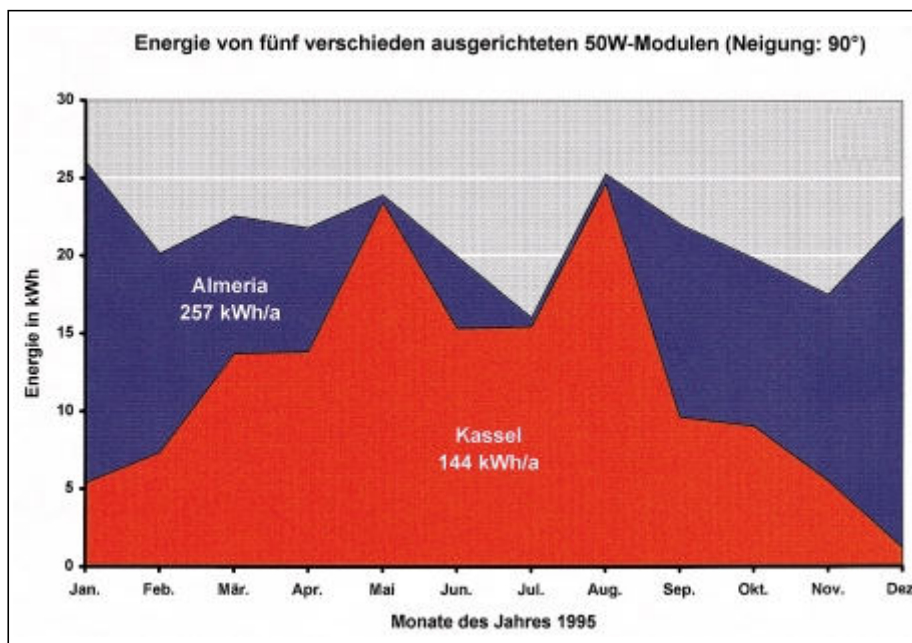


Abbildung 5: Vergleich von Tagesenergieerträgen unterschiedlicher Klimazonen

Abbildung 6: Vergleich von Jahresenergieerträgen unterschiedlicher Klimazonen



## 4. Qualifizierung von PV-Fassaden (ISFH)

### 4.1 Organisatorische und technische Voraussetzungen

Die „Qualifizierung von PV-Fassadenanlagen“ ist ein Verbundprojekt verschiedener Institutionen (GEOSOLAR, ILB, ISE, ISET, ISFH, TÜV, ZSW). Voraussetzung für eine korrekte Qualifizierung sind verlässliche Informationen und Daten von bereits existierenden Fassadenanlagen. Es wurde daher ein Umfrageblatt entworfen, daß auch von technischen Laien ausgefüllt werden kann und trotzdem ausreichend technische Daten und Informationen liefert, um die unterschiedlichen Fragestellungen zu bearbeiten. Dieses Umfrageblatt wurde an Hersteller, Planer und Betreiber von PV-Fassadenanlagen verschickt. Die Umfrage lieferte die folgenden Informationen:

- Allgemeine Angaben: Standort, Installateur bzw. Planer und Installationsdatum der Anlage.
- Technische Daten: Hersteller und Typen der eingesetzten Komponenten, Angaben zur Systemtechnik, Verschaltung der PV-Module zu Strängen, Abschattungen und Montagetechnik.
- Betriebsergebnisse: Jährliche Energieerträge.

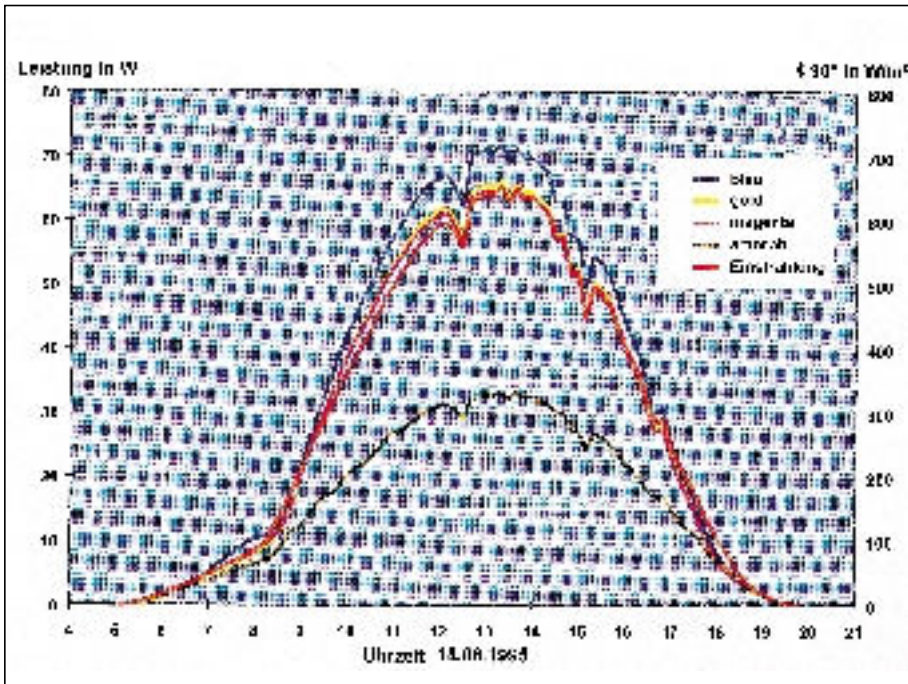
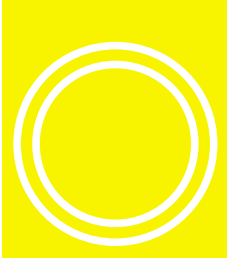
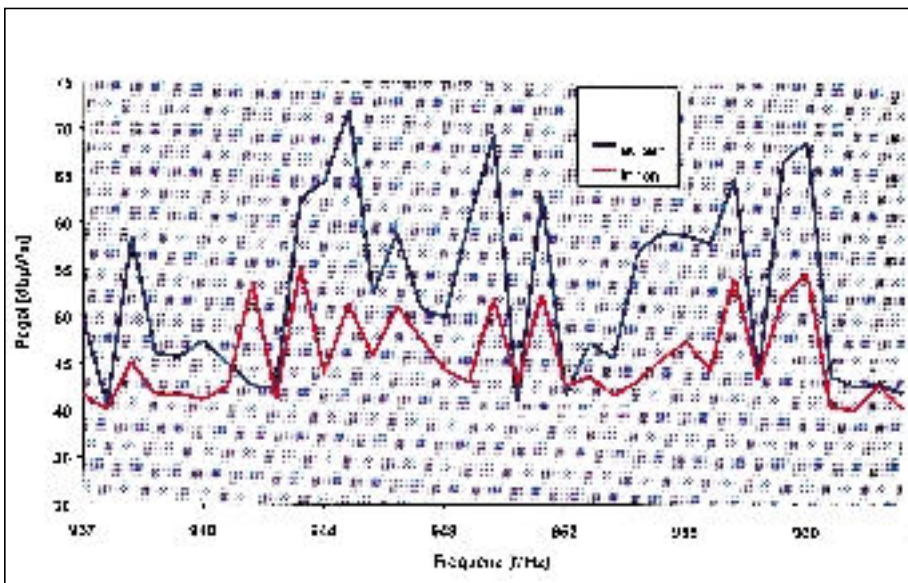


Abbildung 7: Einstrahlung und Leistung von farbigen PV-Modulen (Neigung: 90°)

Abbildung 8: Schirmdämpfungsmessungen an der ISET-Experimentalfassade



Detaillierte technische Daten von PV-Fassadenanlagen im Leistungsbereich von 8 kW<sub>p</sub> bis 55 kW<sub>p</sub> wurden bis zum August 1996 zusammengetragen. Auf Grundlage der erhaltenen Informationen wurde eine Datenbank entworfen, die einen schnellen Überblick über die wesentlichen Kriterien der PV-Fassadenanlagen gibt. Die in der Datenbank gespeicherten Informationen werden für die weitere Bearbeitung herangezogen. Sollte eine PV-Fassadenanlage z. B. aufgrund einer vorhandenen Abschattung besonders interessant erscheinen, können weite-

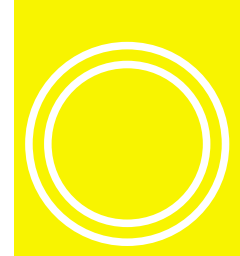
re Informationen entweder direkt vor Ort oder durch eine gezielte Recherche eingeholt werden. Beispielsweise kann der Einfluß der Abschattung durch ein Photo mit einem Fischaugen-Objektiv analysiert werden.

#### 4.2 Erste Ergebnisse

Für eine ausgewählte PV-Fassadenanlage, die erhebliche Abschattungen durch ein naheliegendes Gebäude aufweist, wurde eine Berechnung der solaren Einstrahlung vorgenommen. Die Berechnung wurde mit dem am

Institut für Solarenergieforschung GmbH (ISFH) entwickelten Programm STASOL (Simulation teilabgeschatteter Solaranlagen) durchgeführt [6]. Das Simulationsprogramm STASOL ist ein raumwinkelorientiertes Programm, welches die solare Einstrahlung für die einzelnen Raumwinkelbereiche berechnet. Der Himmelshalbraum wird in ein Raster von 5°-Schritten für Azimuth- und in Elevationswinkel aufgeteilt. Die Abschattung wird für den Halbraum vor der Generatorebene (180° Azimuthwinkel, 90° Elevationswinkel) eingegeben. Die Lage des schattenwerfenden Gebäudes relativ zum PV-Generator wurde in diesem Fall nicht mit einer Fischaugen-Photographie, sondern ausschließlich durch geometrische Angaben ermittelt. Zusätzlich werden die Ausrichtung und die Neigung der Generatorebene benötigt. Für die Berechnung der Abschattungsverluste wird sowohl der Einfluß der Direkt- als auch der Diffusstrahlung berücksichtigt. Zum Vergleich berechnet STASOL aber auch die Verluste bei ausschließlicher Berücksichtigung der Abschattung von Direktstrahlung. Da zunächst die relative Verteilung der solaren Einstrahlung an der Fassade bestimmt werden sollte, wurde mit gemessenen Strahlungsdaten vom Standort des ISFH in Hannover aus dem Jahr 1992 gerechnet.

In [7] werden die geometrischen Abmessungen der ausgewählten Fassade und des schattenwerfenden Objektes dokumentiert. Die wesentlichen geometrischen Daten sind in [Abbildung 9](#) skizziert. Auf der Grundlage dieser Angaben wird eine Umrechnung der Geometrie des schattenwerfenden Gebäudes auf die von der Abschattung betroffenen Raumwinkelbereiche im Halbraum vor der Generatorebene durchgeführt. Die betroffenen Raumwinkelbereiche werden im Abschattungseditor von STASOL eingegeben. Für relevante Punkte an der ausgedehnten Fassade wird die solare Einstrahlung in der Generatorebene als Monatswert berechnet. Der PV-Generator besitzt eine Südausrichtung und eine Neigung von 30°. In [Abbildung 10](#) wird der jahreszeitliche Verlauf der Einstrahlung im unabgeschatteten Fall und für sechs ausgewählte abgeschattete Standorte an der Fassade dargestellt. Es ist zu erkennen, daß die ab-



soluten Einbußen für ein Jahr deutlich unter 10 % liegen, da in den Monaten mit hoher Einstrahlung aufgrund des größeren Sonnenhöhenwinkels die Verluste gering ausfallen. Für die untere Modulreihe (Standort S8, siehe Abbildung 9) reduziert sich die Einstrahlung im Dezember durch die vorhandene Abschattung um maximal 30 %. Trotz dieses Maximalwertes ergibt sich für den Standort S8 über ein Jahr gemittelt ein Verlust in Höhe von ca. 5%.

Die relativen jährlichen Abschattungsverluste der solaren Einstrahlung werden in [Abbildung 11](#) dargestellt, wobei zum einen die Abschattung der Direkt- und Diffusstrahlung und zum anderen nur die Abschattung der Direktstrahlung berücksichtigt wird. Wenn ausschließlich die Abschattung der Direktstrahlung zur Berechnung der Verluste herangezogen wird, ergeben sich deutlich geringere Verluste als bei Berücksichtigung der Abschattung von Direkt- und Diffusstrahlung. Die Diskrepanz der beiden Berechnungsmethoden wird anhand der [Abbildung 11](#) verdeutlicht.

#### 4.3 Schlußfolgerung

Die Verteilung der solaren Einstrahlung an der Fassade und die daraus resultierenden Abschattungsverluste können für die Planung der Zusammenschaltung der einzelnen PV-Module zu Strängen genutzt werden. Bei der Stringerschaltung ist ein Kompromiß zwischen der Minimierung der Abschattungsverluste, den baulichen Gegebenheiten und den resultierenden Installationskosten zu treffen. Es zeigt sich, daß trotz des massiven Schattenwurfs die jährlichen Abschattungsverluste der Einstrahlung zwischen 2,4 % und 5,6 % liegen. Durch eine angepaßte Stringerschaltung können die Abschattungsverluste der photovoltaischen Energieerzeugung auf ein vergleichbares Maß reduziert werden.

#### 5. Betriebserfahrungen mit Wechselstrom-Solarmodulen (ZSW)

Im Oktober 1995 wurde in Chemnitz im Gewerbepark „SOLARIS“ eine ausschließlich aus privaten Mitteln finanzierte 10 kW<sub>p</sub> PV-Fassade in Betrieb genommen. Aufgrund der komplizier-

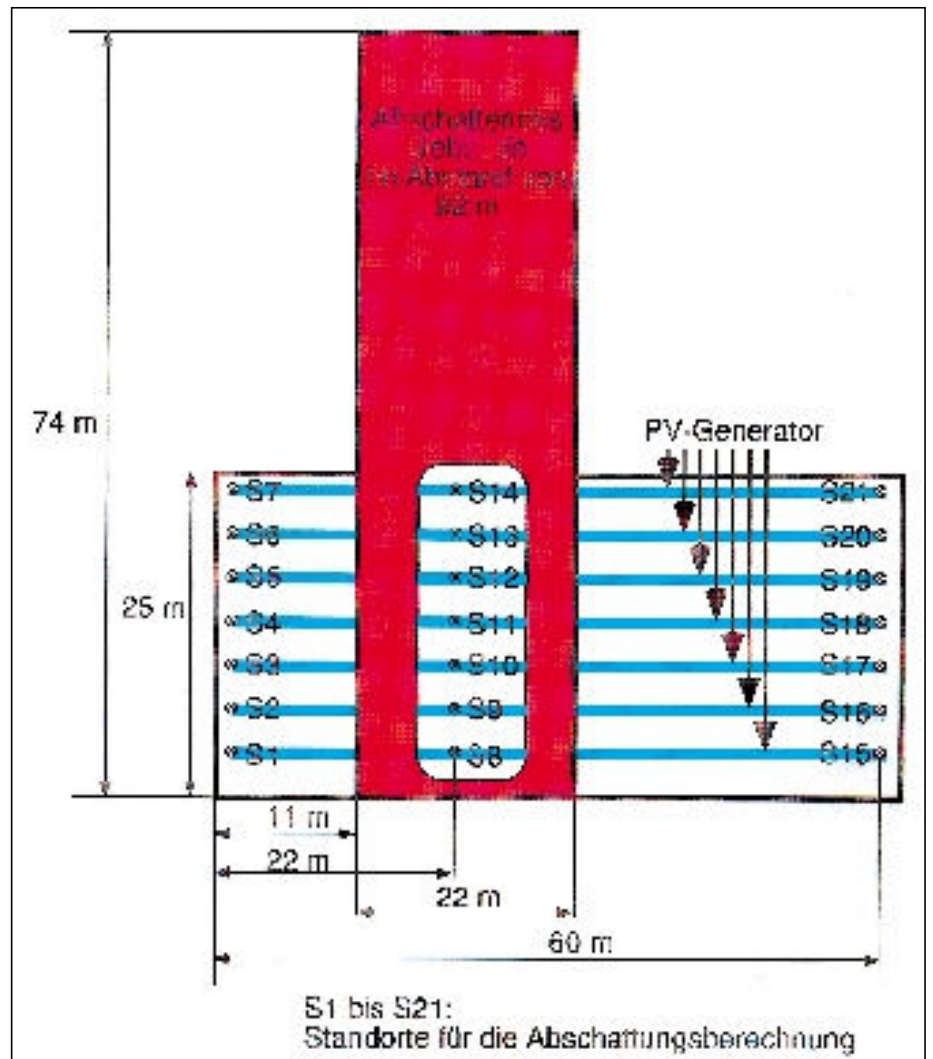
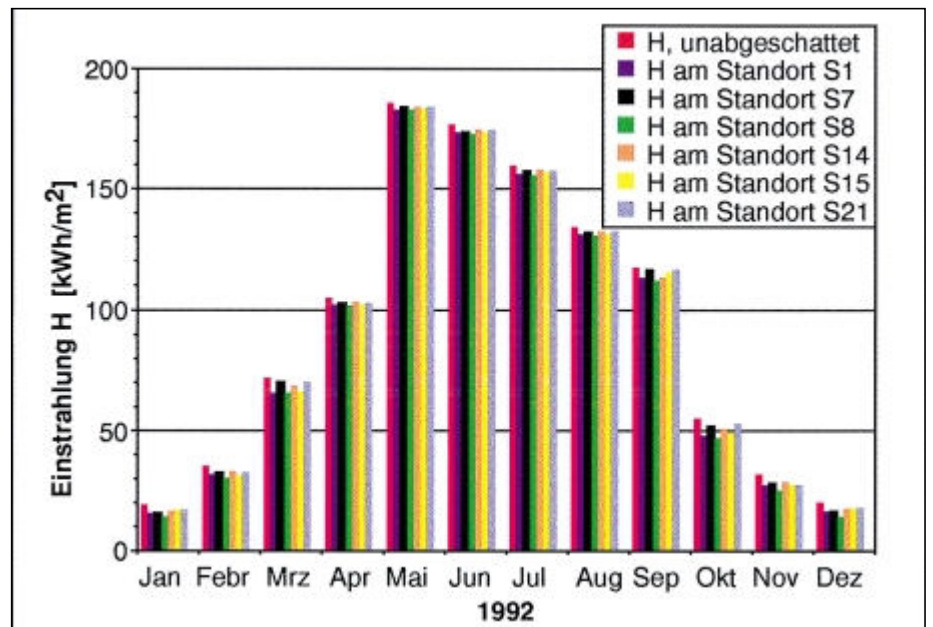
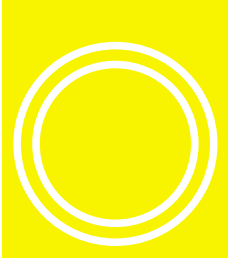


Abbildung 9: Ansicht des PV-Generators aus der Südrichtung und Lage des schattenwerfenden Gebäudes

Abbildung 10: Jährliche solare Einstrahlung an der Fassade unter Berücksichtigung der Abschattungsverluste für sechs ausgewählte Standorte an der Fassade





ten Abschattungsverläufe der Südseite des mechanischen Parkhauses, wurden 102 Wechselstrom-Solarmodule mit einer Nennleistung von 100 W eingesetzt. **Abbildung 12** zeigt die Südansicht des Parkhauses mit integrierter Photovoltaikfassade. Mit diesem Projekt wird erstmals in dieser Größenordnung der Einsatz von in das Solarmodul integrierten Kleinwechselrichtern demonstriert.

Das neu errichtete vollautomatische Parksystem stellt eine große Innovation auf diesem Sektor dar. Die Vorteile des neuen Systems sind geringer Flächenbedarf und eine erhöhte Sicherheit für die Benutzer. Nachteilig für den Betreiber ist der höhere Energieaufwand während des Betriebes. Mit der Installation einer Photovoltaikanlage soll ein Teil des Energiebedarfs umweltgerecht gedeckt werden. Im Bereich photovoltaischer Anlagen stellen Wechselstrom-Solarmodule eine Innovation dar. Nach eingehenden Untersuchungen verschiedener Wechselrichterkonzepte [8] wurde am ZSW ein Kleinwechselrichter entwickelt und mit Hilfe eines Industriepartners zu einem Serienprodukt umgesetzt.

### 5.1 Anlagenkonzept mit Wechselstrom-Solarmodul

Für die Anlage wurden in Anlehnung an den Modultyp ASE-PS94 Sonderlamine mit erhöhter Glasstärke, zur Gewährleistung der geforderten mechanischen Festigkeit, verwendet. Anstelle der Anschlußdose wurde eine Aluminiumplatte auf das Rückglas geklebt, die das Gegenstück zum Wechselrichtergehäuse darstellt. Installiert wurden insgesamt 102 Wechselstrom-Solarmodule in drei horizontalen Reihen zu je 34 Modulen.

Bei dem eingesetzten Kleinwechselrichtertyp handelt es sich um einen spannungsgespeisten Vollbrückenwechselrichter mit Niederfrequenztransformator zur Spannungsanpassung. Mit dieser Schaltungsvariante können die Kosten für die Umrichter-technik in Grenzen gehalten werden. Eine Beschreibung des Wechselrichter-konzepts ist in [9] dargestellt.

Ein grundlegendes Problem bei Photovoltaikanlagen mit verteilten Wechselrichtern stellt die Anlagenüberwa-

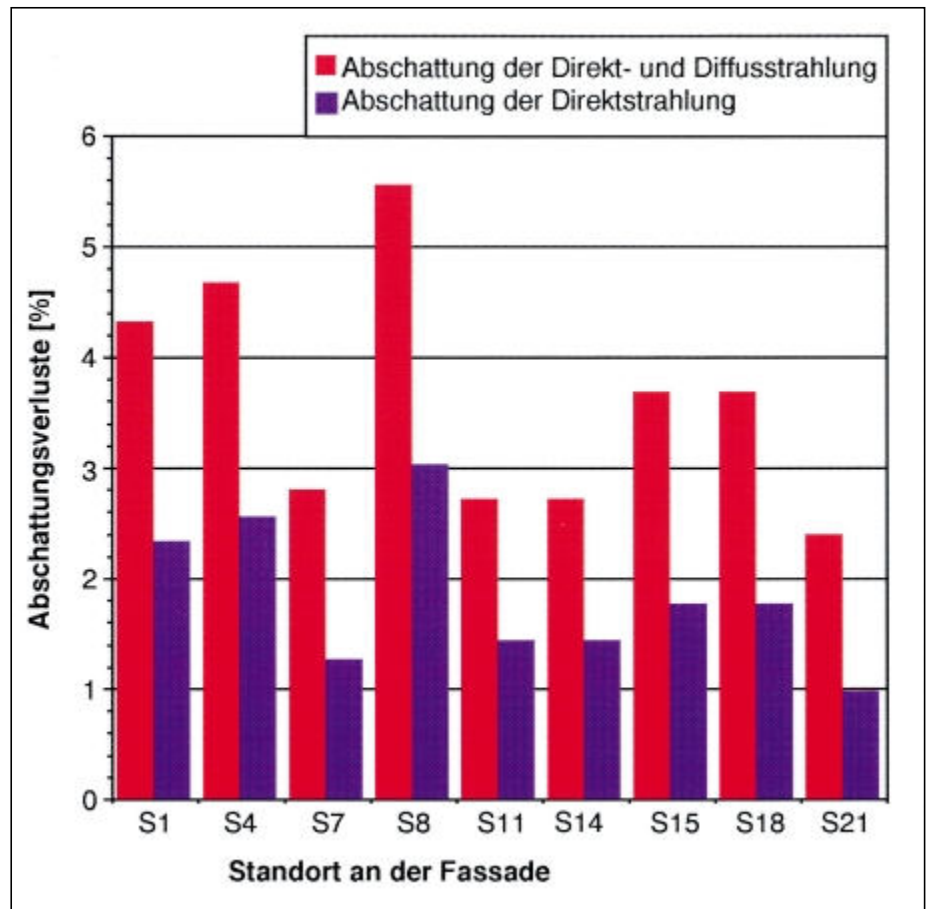


Abbildung 11: Jährliche Abschattungsverluste für neun ausgewählte Standorte an der Fassade

Abbildung 12: Südansicht des vollautomatischen Parkhauses in Chemnitz mit in die Gebäudehülle integrierter 10 kW<sub>p</sub> Photovoltaik-Fassade



chung dar. Aus diesem Grund wurde ein speziell für Kleinwechselrichter entwickeltes Bussystem als Kommunikationsmedium eingesetzt. Einzige Voraussetzung für den Anschluß der Datenabfrage innerhalb der Solaranla-

ge sind vieradrige Verbindungskabel zwischen den Wechselrichtern, anstatt der Minimalanforderung von drei Adern. In Verbindung mit einem handelsüblichen Computer können sowohl einzelne Kleinwechselrichter als

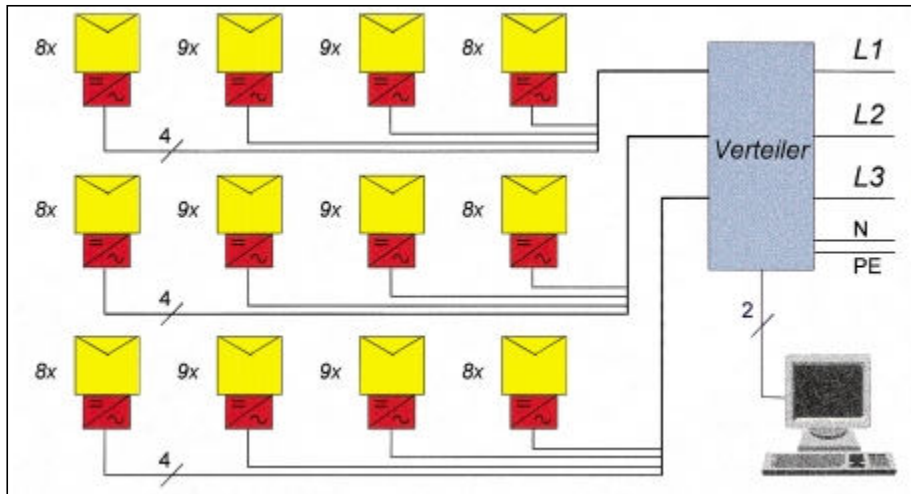
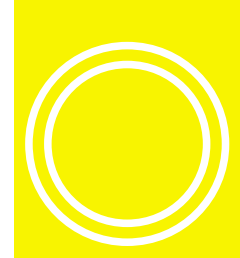


Abbildung 13: Schematische Darstellung der Anlagenverschaltung mit 34 Wechselstrom-Solarmodulen in einer Phase

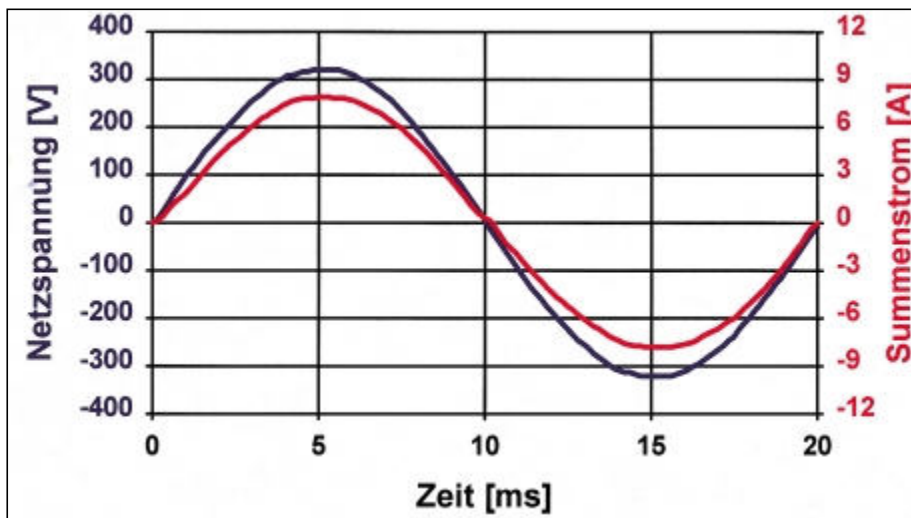
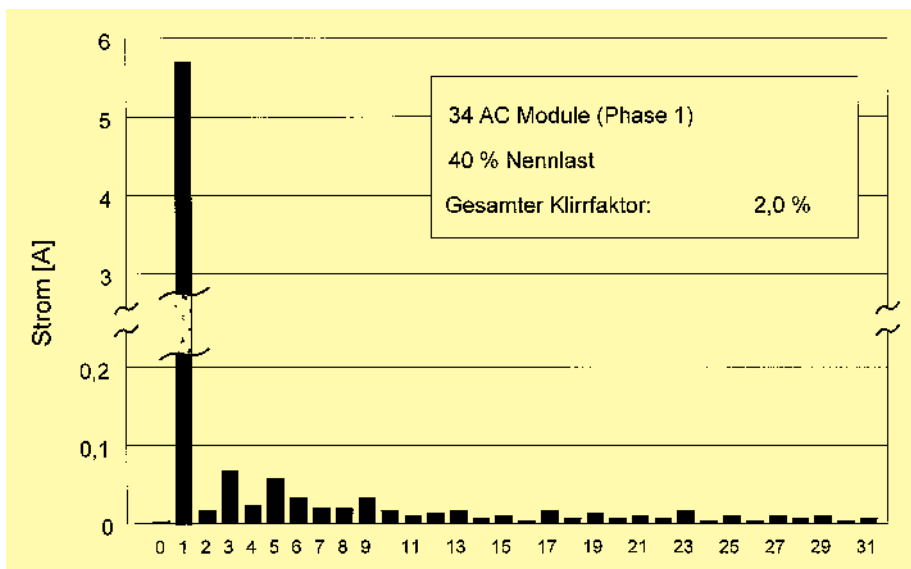


Abbildung 14: Gemessener Verlauf von Netzspannung und dem Summenstrom von 34 Kleinwechselrichtern (eine Phase) im Teillastbetrieb

Abbildung 15: Gemessenes Oberschwingungsspektrum des Summenstroms von 34 Kleinwechselrichtern (eine Phase) im Teillastbetrieb



auch die gesamte Anlage „angesprochen“ werden und/oder der Rechner dient als Datenlogger für einzelne Wechselrichter bzw. für die gesamte Anlage. Für diese Anlage wurde eine Datenerfassung über einen Zeitraum von zwei Jahren vereinbart.

Einen der Hauptvorteile stellt die einfache Wechselstromverkabelung dar. Die Wechselrichter werden untereinander mit vorgefertigten Kabeln parallel verdrahtet und an einem Ende befindet sich der Hausanschluß. Damit die elektrischen Verluste der Leitungen gering ausfallen und der Querschnitt der Verbindungskabel klein gehalten werden kann, wurde eine „baumartige“ Verkabelungsstruktur mit 8 bzw. 9 Wechselstrom-Solarmodulen an einem Leistungsbus realisiert [9]. In einem Verteiler, der unmittelbar bei den Modulen installiert wurde, werden die einzelnen Strings zusammengeführt und der dreiphasige Abgang zur Übergabestation realisiert. Ein separates zweiadriges Kabel ist zum Serviceraum verlegt und dient der Datenübertragung. Die schematische Darstellung der Anlagenverdrahtung ist in [Abbildung 13](#) dargestellt. Jeweils 34 Module wurden einer Phase zugeordnet, so daß sich im Idealfall ein symmetrisches Dreiphasensystem ergibt.

### 5.2 Gegenseitige Beeinflussung der Wechselrichter

Von besonderem Interesse war die Problematik der gegenseitigen Beeinflussung der Wechselrichter und die daraus resultierende Stromqualität des eingespeisten Stroms. Hierbei muß zwischen den Harmonischen, also den Vielfachen von 50 Hz und den vom Steuerungsverfahren zur Stromformung erzeugten höherfrequenten Stromspektren unterschieden werden. Im Gegensatz zu den Harmonischen, die sich quasi linear überlagern, sind die hochfrequenten Spektren bei dem verwendeten Modulationsverfahren unkorreliert. Dadurch ergibt sich theoretisch eine Erhöhung der Rauschleistung des Summenstroms mit der Wurzel der parallelgeschalteten Wechselrichter. In der Praxis ist die Erhöhung jedoch deutlich geringer, da konventionelle Klemmstellen eine erhebliche Dämpfung für höhere Frequenzen darstellen.



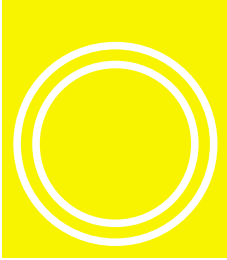


Abbildung 14 zeigt die gemessene Netzspannung und den Summenstrom einer Phase mit 34 Kleinwechselrichtern im Netzparallelbetrieb. In [Abbildung 15](#) ist der Oberschwingungsgehalt des Summenstroms bei ca. 40% der Nennleistung der Anlage dargestellt. Der dazugehörige Klirrfaktor der Netzspannung betrug zum Zeitpunkt der Messung 1,5 %. Aufgrund der hohen Qualität des eingespeisten Stroms ergibt sich in keinem Betriebspunkt der Anlage ein ungünstiges Verhalten in Bezug auf Netzrückwirkungen.

### 5.3 Zuverlässigkeit

Ein allgemeiner Kritikpunkt bei Wechselstrom-Solarmodulen ist die Kombination einer langlebigen Systemkomponente (Solarmodul) mit einer „kurzlebigen“ Systemkomponente (Wechselrichter). Die Kleinwechselrichter wurden zwar thermisch optimiert, jedoch spielen für die Lebensdauer noch weitere Langzeiteffekte wie z. B. mögliche Korrosion von Lötstellen etc. eine Rolle. Ein großer Vorteil dieser Fassadenanwendung liegt in diesem Zusammenhang darin begründet, daß die Photovoltaikanlage zwar in die Gebäudehülle integriert ist, die Geräte jedoch von hinten her zugänglich sind. So wurden die Wechselrichter erst nach Beendigung der Montagearbeiten an der Fassade vor Ort mit den Solarmodulen verschraubt. Zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme wurden drei defekte Geräte festgestellt. Nach zwei weiteren Monaten Betriebszeit mußten drei weitere Kleinwechselrichter getauscht werden. Schwachstelle war insbesondere die Kommunikationseinrichtung. Seither arbeitet die Anlage nahezu störungsfrei.

Aufgrund der hohen Zuverlässigkeit der Geräte wird demnächst an einem benachbarten Gebäude eine 20 kWp Photovoltaikfassade mit Wechselstrom-Solarmodulen mit modifizierten Leistungsbereich von 200 W und 400 W Kleinwechselrichtern realisiert.

### 6. Resümee

Der Einsatz von Photovoltaik in Gebäuden im Rahmen eines Gesamtkonzeptes, d. h. durch eine Mehrfachnutzung der Eigenschaften ([Abbildung 16](#)) von Photovoltaikmodulen, stellt

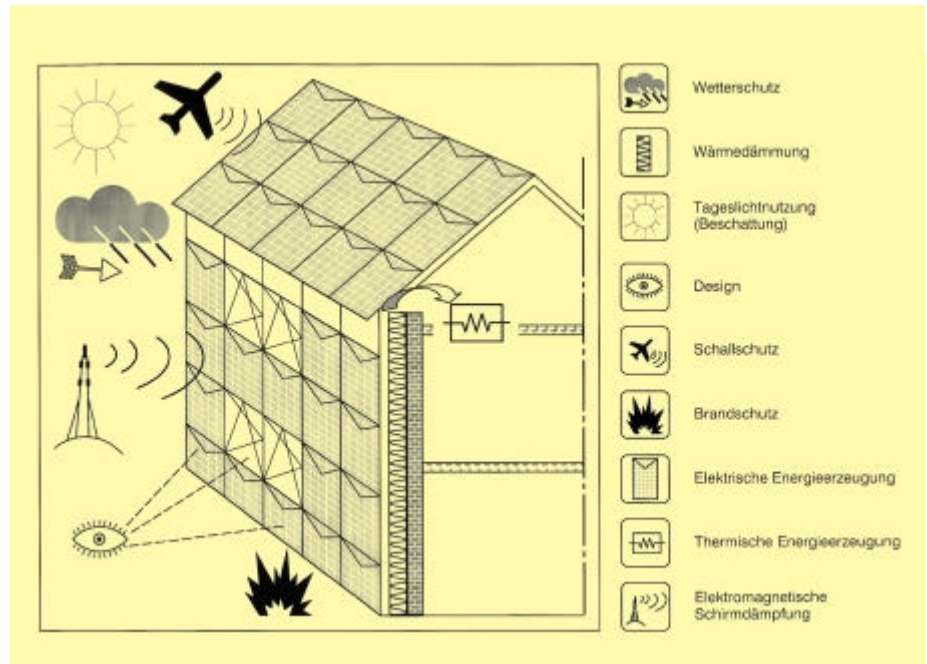


Abbildung 16: Photovoltaik-Fassade als multifunktionale Gebäudehülle

eine innovative Herausforderung an die Architekten und Fassadenplaner dar; die Kostenproblematik wird demgegenüber zukünftig eine untergeordnete Rolle spielen.

Bisherige PV-Fassadenanlagen zeigen nach vergleichenden technischen Untersuchungen ein noch erhebliches Weiterentwicklungspotential. Das betrifft nicht nur die Abschattungsverluste, sondern auch die Zuverlässigkeit der Energieaufbereitung sowie den Quadratmeterpreis.

Der Einsatz von großen Stückzahlen kleiner Wechselrichter ist praktikabel und unter dem Gesichtspunkt der EMV möglich.

Ende dieses Jahres wird ein Auslegungsprogramm für Photovoltaik-Fassaden zur Verfügung stehen, welches durch Implementierung von CAD-Tools die Simulationsergebnisse nicht nur als Zahlenwerte, sondern auch graphisch mit dem elektrischen und mechanischen Aufbau verknüpft ausgegeben wird. Zusätzliche Schnittstellen erlauben weiterhin das „Andocken“ von kundenspezifischen Programmen.

### 7. Dank

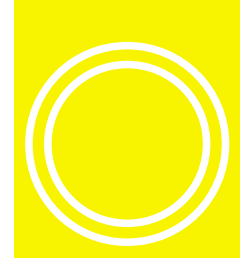
Den Herren Dirk Gummich und Herrn Michael Viotto, Mitarbeiter des ISET, sei für ihre wertvollen Beiträge gedankt.

Die Forschungsarbeiten für die „Entwicklung eines photovoltaischen Fassadenelementes“ wurden gefördert vom Hessischen Ministerium für Umwelt, Energie, Jugend, Familie und Gesundheit.

Im Zusammenhang mit der Entwicklung der Kleinwechselrichter und die Realisierung der Parkhausfassade sei den ZSW-Mitarbeitern A. Bleil und C. Binder gedankt. Die Entwicklungsarbeiten für den Kleinwechselrichter werden von der Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg gefördert.

### Literatur

- [1] C. Bendel, U. Rudolph, M. Viotto Photovoltaische Experimentalfassade – Vorstellung eines Forschungsprojektes und erste Arbeitsergebnisse, 9. Symp. Photovoltaische Solarenergie, Kloster Banz / Staffelstein (1994) 297-308.
- [2] C. Bendel, U. Rudolph Entwicklung eines photovoltaischen Fassadenelementes, Abschlußbericht für das Hessische Ministerium für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheit (HMUEB), Förderkennzeichen IV C 3a-78a-15/91-10P, Kassel (1996).
- [3] G. Keller, U. Kregel, T. Krieger, M. Viotto „Module Oriented Photovoltaic Inverters – A Comparison of Different Circuits“,



- 1st World Conf. on Photovoltaic-Energy Conversion, Hawaii (1994) 929-932.
- [4] C. Bendel, U. Rudolph, M Viotto  
Technische Aspekte multifunktionaler PV-Fassaden, 10. Symp. Photovoltaische Solarenergie, Kloster Banz / Staffelstein (1995) 143-149.
- [5] M. Viotto  
Modulare Fehlererkennungssystem für Photovoltaikgeneratoren, 9. Symp. Photovoltaik Solarenergie, Kloster Banz / Staffelstein (1994).
- [6] U. Fuge  
„Entwicklung eines Programms zur Solarstrahlungssimulation unter Berücksichtigung von Teilabschattungen der Direkt- und Diffusstrahlung“, Diplomarbeit, FH Wilhelmshaven (1996).
- [7] A. Mayer  
„Bewertung der Abschattungseffekte an einer photovoltaischen Solarfassade“, Diplomarbeit, FH München (1994).
- [8] D. Schekulin  
„Konzepte und Problemstellungen bei der Realisierung von modulintegrierbaren Kleinwechselrichtern“, Tagungsband 9. Intl. Sonnenforum, Stuttgart (1994) 542-549.
- [9] D. Schekulin, A. Bleil, C. Binder, G. Schumm  
„Module-Integratable Inverters in the Power Range of 100 - 400 Watts“, Proc. 13th European PV Solar Energy Conf., Nice (1995) 1993-1996.
- [10] D. Schekulin, G. Schumm  
„AC-Modules - Technology, Characteristics and Operational Experience“, Proc. 13th European PV Solar Energy Conf., Nice (1995) 1889-1892.

*Thermographieaufnahme der ISET-Experimentalfassade. Die Auswertung der Fehlerbilder erfordert praktische Erfahrung beim Umgang mit der entsprechenden Meßtechnik, den Meßbedingungen und der Auswertesoftware.*

