

Photovoltaik am Gebäude – Stromversorgung mit Solarzellen?

Einleitung

Photovoltaik ist die direkte Umwandlung von Sonnenlicht in elektrischen Strom. Trotz immer noch hoher Investitionskosten – bei gleichzeitig schneller technischer Weiterentwicklung – erlebt die Photovoltaik derzeit in Deutschland einen massiven Ausbau. 400.000 Quadratmeter Photovoltaik wurden allein im Jahr 2000 in Deutschland installiert, für das Jahr 2001 ist nochmals eine Verdoppelung der Neuinstallation abzusehen.

Die für Deutschland beobachtete Marktentwicklung wird durch industrie- und energiepolitisch motivierte staatliche Unterstützung in Form eines Kreditverbilligungsprogramms (100.000-Dächer-Programm) sowie durch eine Vergütung für Strom aus erneuerbaren Energien im Rahmen des Erneuerbare-Energie-Gesetz (EEG) getragen.

Die Entwicklung in Deutschland sollte auf dem Hintergrund der weltweiten Entwicklung photovoltaischer Stromerzeugungstechnik gesehen werden. Seit Ende der 90er Jahre wächst der Markt für Solarmodule mit jährlichen Zuwachsraten von mehr als 20%, bei einem Gesamtvolumen von etwa 2 Milliarden Euro im Jahr 2000.

Das dominierende Anwendungsgebiet von Photovoltaik war lange Zeit die Bereitstellung kleiner Mengen elektrischen Stroms, dort wo kein Stromnetz zur Verfügung stand, sei es für Signale oder Messeinrichtungen, für portable Anwendungen oder die Grundversorgung in den Regionen der Welt, in denen ein Netzausbau noch nicht erfolgen konnte. Vor etwa 3 Jahren haben die Anwendungen, bei denen der erzeugte Strom direkt in die großen Stromverteilungsnetze eingespeist wird, die Marke von 50% der weltweit jährlich neu installierten Leistung überschritten. Bedingt durch die Struktur der Förderprogramme ist dabei der Anteil der ans Stromnetz gekoppelten Leistung in Deutschland und in Japan besonders hoch.

Auf dem deutschen Markt werden 95% der neu installierten photovoltaischen Erzeugungsleistung elektrisch an das Stromnetz gekoppelt. Diese netzgekoppelten Photovoltaikanlagen haben heute typischerweise Nennleistungen zwischen 2 kW und 100 kW, das entspricht Flächen zwischen 20 und 1000 Quadratmetern. Für die weit überwiegende Anzahl dieser Anlagen dienen Dachflächen als Tragestrukturen und in etwas geringerem Umfang Gebäudefassaden.

Umgekehrt können aber auch photovoltaische Baukomponenten verschiedenartige Funktionen für die Gebäude ausfüllen. In den besten realisierten Anlagen wurde neben der reinen Stromerzeugung eine Synergie aus architektonischer Funktion, bautechnisch funktionaler Funktion und energetischer Funktion gefunden.

Im Folgenden soll in Beispielen aus der Arbeit von Forschungsinstituten im Forschungsverbund Sonnenenergie über Aspekte der Gebäudeintegration von Photovoltaikanlagen berichtet werden.

1. Photovoltaik als Gestaltungselement

Beispiel:

Servicepavillon auf einer Badeinsel im Steinhuder Meer

Ort eines für die EXPO realisierten Bauvorhabens der Elektrizitätswerke Minden-Ravensberg (EMR) ist eine Badeinsel im Steinhuder Meer (Binnensee und Segelgewässer westlich von Hannover) [1]. Für das realisierte Gebäude mit Café, Bootshaus, Lagerräumen und Sanitäreinrichtungen plante EMR gemeinsam mit dem Institut für Solarenergieforschung Hameln/ Emmertal (ISFH) eine Energieanlage, die die vollständige Versorgung des Gebäudes aus erneuerbaren Energiequellen vorsieht.

(Abb. 1 und 2)

Dr. Hansjörg Gabler

ZSW

hansjoerg.gabler@zsw-bw.de

Dr. Christian Bendel

ISET

cbendel@iset.uni-kassel.de

Dipl.-Ing.

Dirk Tegtmeyer

ISFH

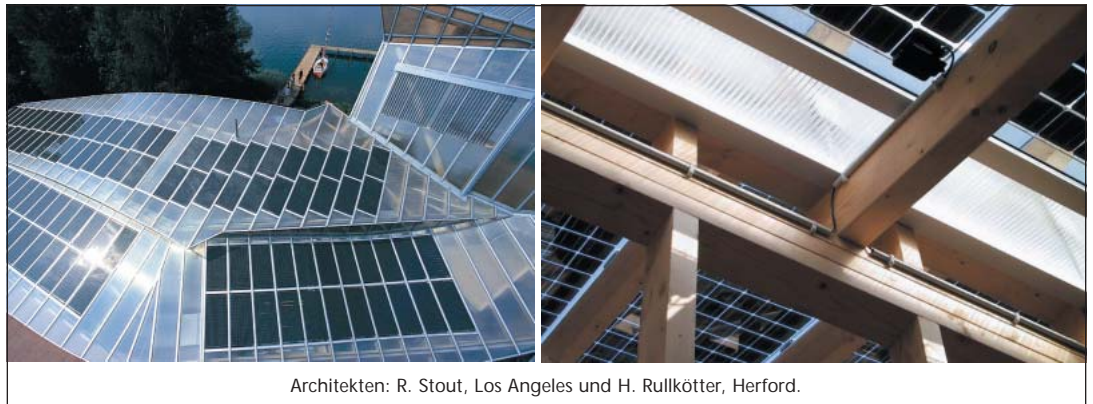
d.tegtmeyer@isfh.de

Dr. Karsten Voss

Fraunhofer ISE

kavoss@ise.fhg.de

Abbildung 1 (links)
Servicepavillon auf
einer Badeinsel im
Steinhuder Meer.



Architekten: R. Stout, Los Angeles und H. Rullkötter, Herford.

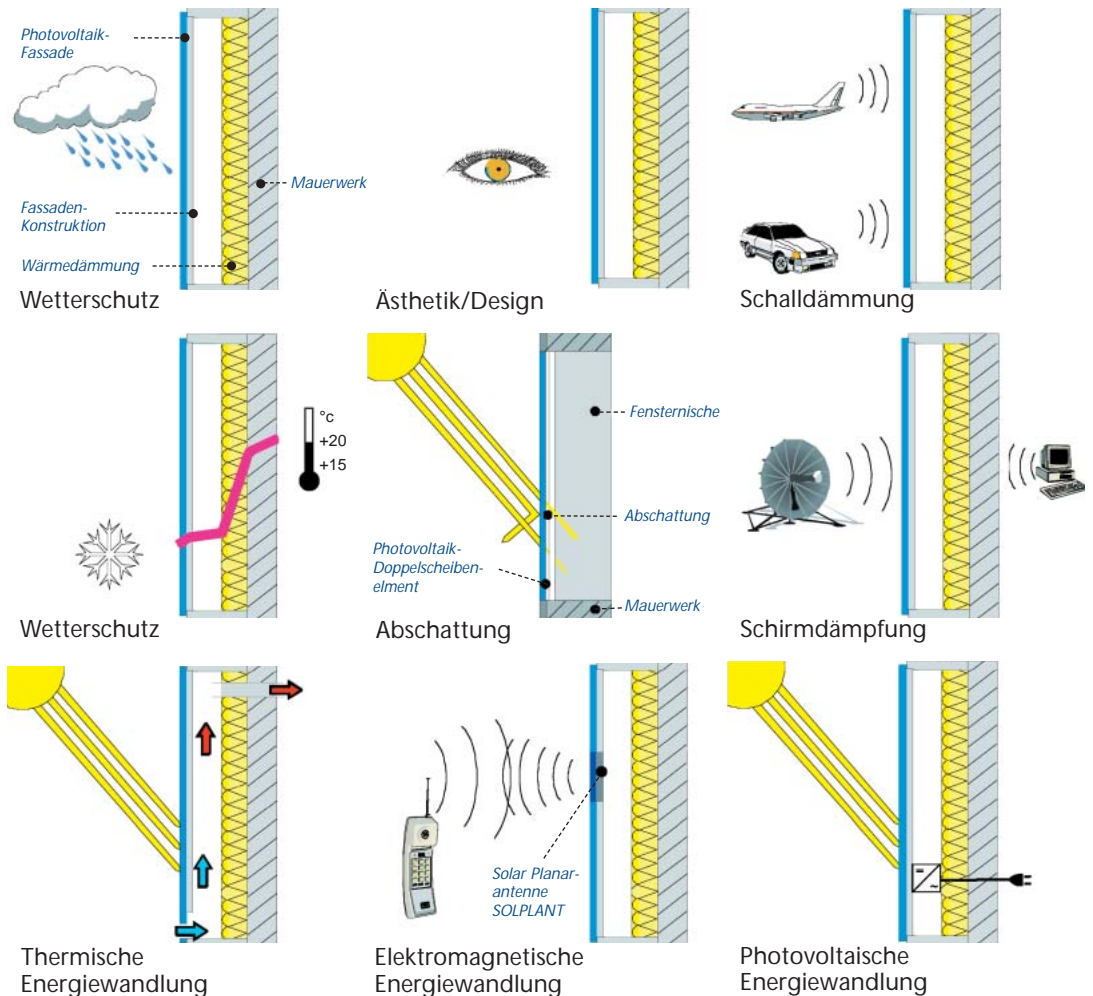
Abbildung 2 (rechts)
Holzständerkon-
struktion mit translu-
zenten Wand- bzw.
Dachelementen im
Servicepavillon.

Herzstück des Versorgungskonzeptes ist die dachintegrierte Photovoltaikanlage, die mit einer Gesamtfläche von 170 m² gleichzeitig Wetterschutz, architektonisches Gestaltungselement und Energieerzeugungsanlage ist.

Das Gebäude ist Beispiel dafür, dass die Architektur, in der Photovoltaik eine tragende Rolle

in einem futuristischen, ästhetischen Konzept übernimmt. Insgesamt 16 kWp installierter Photovoltaikleistung wurde in Form teiltransparenter identischer Module im Dachbereich des Gebäudes realisiert. Die Architektur und die Energieanlage, die in ökologisch sensibler Umgebung mit Sonnenlicht und Biomasse arbeitet, wurden mehrfach preisgekrönt.

Abbildung 3
Photovoltaische
Module als integrales
Element eines
Fassadensystems mit
einer Vielzahl von
Funktionen.



Kostenvergleich verschiedener Fassadenhöhen (Investitionskosten in Euro je Quadratmeter)

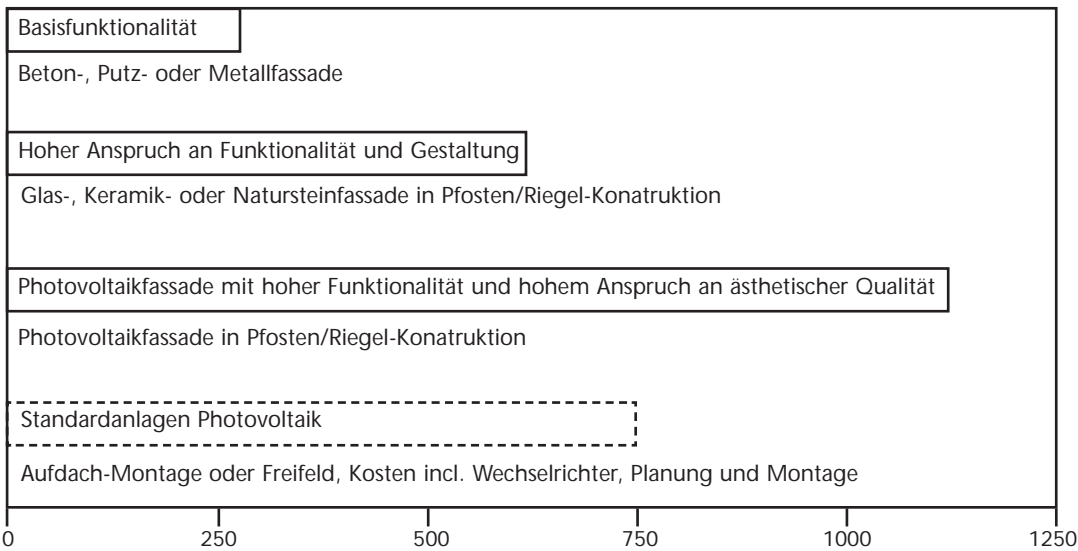


Abbildung 4
Kostenrelation verschiedener Fassadensysteme. Die Kostenangaben stellen grobe Richtwerte dar und gelten jeweils für vollständige Fassadensysteme mit Wärmedämmung, Betonbrüstung oder vergleichbaren Bauelementen, Fenstern und äußerem Abschluss.

3. Photovoltaik als Funktionselement

Beispiel 1:

Die multifunktionale Gebäudefassade

In Solarmodulen wird Licht in elektrischen Strom umgewandelt. Die aktive Schicht des Solarmoduls wird im Allgemeinen von einem Glas/Glas-Verbund getragen und geschützt.

Dieses Glas/Glas-Verbundelement kann wieder als äußeres Element von Gebäudefassaden eingesetzt werden.

Eine Arbeit an der Universität Gesamthochschule Kassel und dem Institut für Solare Energieversorgungstechnik Kassel (ISET) beschreibt die mehrfachen Funktionen, die ein Photovoltaikmodul als Architekturkomponente in der Gebäudefassade erhält [2]. (Abb. 3)

Das Photovoltaikmodul übernimmt somit über seine Hauptfunktion der Stromerzeugung hinaus auch die Basisfunktionen herkömmlicher Fassadenelemente: Wetterschutz, Wärme- und Schalldämmung sowie architektonisch gestalterische Funktionen. Ein Teil der Kosten herkömmlicher Fassadenelemente kann deshalb bei sorgfältiger Planung mit den Kosten einer Photovoltaikfassade gegengerechnet werden. Hinzu kommen künftig aber noch Funktionen

mit dem Ziel der Reduktion von Heiz- bzw. Kühllasten (Thermische Energiewandlung und Abschattung), Antennenfunktionen (z. B. für Handyverkehr) oder der elektromagnetischen Abschirmung (Elektromagnetische Energiewandlung und Elektromagnetische Schirm-dämpfung).

In dieser Betrachtungsweise kann sich die Zusatzinvestition in die photovoltaische, d. h. in die stromerzeugende Eigenschaft der Solarfassade unter den gegebenen Bedingungen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) durchaus in vernünftigen Zeiträumen rein betriebswirtschaftlich gerechnet amortisieren. In Abb. 4 werden Kostenangaben für vollständige Fassadensysteme gemacht. In konkreten Fällen sind je nach Ausführung deutliche Abweichungen nach oben und nach unten möglich. Die Zahlenangaben zeigen aber, dass eine Photovoltaikfassade einen Kostenbonus für den Einsatz herkömmlicher Fassadenelemente beanspruchen kann.

Beispiel 2:

Photovoltaik und Licht

Die Gewinnung von Strom durch Photovoltaik kann in Konkurrenz treten zum Bedarf nach natürlicher Beleuchtung der Innenräume eines Gebäudes mit Tageslicht. Die Nutzung des Sonnenlichts kann aber auch Abschattungs-funktion erfüllen: Bewegliche Sonnenschutz-

lamellen, mit Solarzellen belegt, vor bzw. über den Fenstern angeordnet, verhindern sommerlichen Energieeintrag in das Gebäude und damit überhöhte Kühllasten. Eine Winkelnachführung kann gleichzeitig, dem Sonnenstand angepasst, blendfreies Licht am Arbeitsplatz sicherstellen und den Ertrag solarer Stromerzeugung auf den Lamellen optimieren. Dies kompensiert zum großen Teil den Minderertrag von photovoltaischen Stromerzeugern, die nicht immer winkeloptimiert aufgestellt werden können.

In dem vom ZSW entwickelten und von der Firma Colt International (Schweiz) realisierten System wird auch die Bewegung der Elemente thermohydraulisch durch die Sonne und damit "selbsttätig" durchgeführt [3]. Wie in *Abb. 5* und *6* gezeigt, tragen die Abschattungslamellen integrierte Photovoltaikmodule. Die insgesamt installierte Leistung beträgt 20 kWp,

sie deckt in der Jahresbilanz 60% des Stromverbrauchs des Gebäudes. Der thermohydraulische Antrieb gewährleistet zu jeder Tageszeit hohen Solarenergieertrag und gleichzeitig hohen blendfreien Tageslichteintrag in die Räume.

4. Photovoltaik als Baustein in einem integralen Gebäudeenergiekonzept

Knapp die Hälfte der gesamten Primärenergie wird in Deutschland für den Betrieb von Gebäuden eingesetzt. Während bei Wohngebäuden der Wärmebedarf für Heizung und Warmwasser im Vordergrund steht, ist bei Bürogebäuden vor allem die elektrische Energie für die technische Gebäudeausrüstung (Beleuchtung, Lüftung, Klimakälte) und die Ausstattung der Arbeitsplätze (Computer, Kommunikationstechnik) für den externen Energiebezug maßgeblich. Wegen des hohen Primärenergieaufwands bei der Stromerzeugung kommt der Senkung des Strombezugs z. B. für Kunstlicht um 10 kWh/m²a einer Heizeneinsparung von etwa 30 kWh/m²a gleich. (*Abb. 7*)

Abbildung 5
Einzelelemente der Photovoltaik-Tageslicht-Fassade am Verwaltungsgebäude Wirtschaftshof Linz.



Abbildung 7 (rechts)
Der Primärenergiebedarf von Neubauten gemäß heutigem Standard verglichen mit einer energieoptimierten Variante.

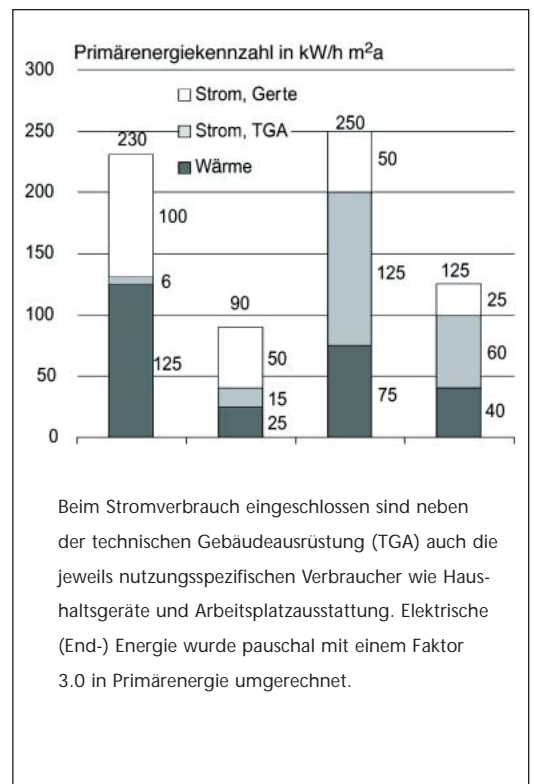
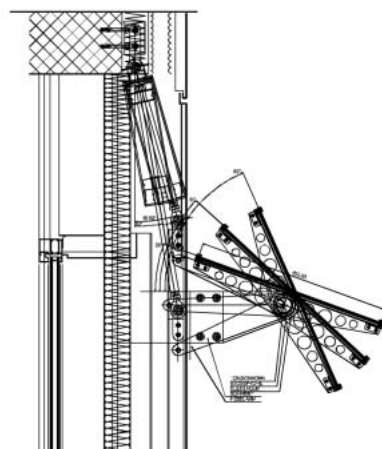


Abbildung 6
Thermohydraulische, von der Sonne angetriebene Winkelverstellung der Abschattungslamellen.



Energiekonzepte, die z. B. vom Fraunhofer ISE in Freiburg erarbeitet werden, zielen darauf ab, durch geeignete Kombinationen von baulichen und anlagentechnischen Maßnahmen den externen Energiebezug eines Gebäudes zu senken. Mehrkosten für Energiesparmaßnahmen (Wärmedämmung, tageslichtabhängige Kunstlichtsteuerung in Büros etc.) oder die Nutzung der Solarenergie (Tageslichtnutzung, Solarkollektoren, Solarstromanlagen) werden idealerweise durch Minderkosten ausgeglichen: durch Einsparung von Energiekosten während des Betriebes und durch Minderung der Baukosten. So kann z. B. der Verzicht auf die aktive Kühlung in Bürogebäuden finanzielle Spielräume für eine Optimierung des Gebäudes hinsichtlich Sonnenschutz und passiver Kühlung schaffen.

Photovoltaikanlagen können, sorgfältige Gebäudeenergieplanung vorausgesetzt, wesentliche Beiträge zur Energieversorgung individueller Gebäude leisten. Dies gilt sowohl im Wohnungs- als auch im Büro- und Gewerbebau [4].

Optimale Solarstromanlagen erreichen einen Jahresertrag zwischen 800 kWh/kW_p (Norddeutschland) und 900 kWh/kW_p (Süddeutschland). Damit werden pro Kilowatt installierter Photovoltaikleistung (kW_p) 2.400 bis 2.700 kWh Primärenergie substituiert. Pro Kilowatt wird bei kristallinem Silizium eine Modulfläche von 8 bis 10 m² benötigt. Glas/Glas- oder Isolierglasmodule für gleichzeitige Tageslichtnutzung benötigen wegen der geringeren Dichte der Zellenbelegung entsprechend größere Flächen. Die Systemkosten von kleinen Solarstromanlagen mit Standardmodulen liegen heute bei etwa 7500 €/kW_p brutto; bei Großanlagen sinken die Preise auf 6000 €/kW_p. Anlagen mit PV-Dachziegeln, Module als Überkopfverglasungen oder als Bestandteil von Funktionsisolierglas führen zu höheren Kosten, wobei je nach Anwendung eine Kostengutschrift durch die Übernahme von baulichen Funktionen berücksichtigt werden kann. Im Idealfall einer Großanlage mit Standardmodulen liegen die Kosten pro substituiertes Primärenergie damit bei knapp 20 ct/kWh¹.

Beispiel 1:

Bürogebäude Hans Lamparter GbR, Weilheim

Ein bezüglich rationeller Energienutzung und Solaroptimierung vorbildlich realisiertes Vorhaben ist das Bürogebäude der Firma Lamparter in Weilheim. Durch eine konsequente Strategie der Energieeinsparung ist der elektrische Energieeinsatz mit knapp 15 kWh/m²a so gering, dass bei 1.000 m² Nettogrundfläche (NGF) der Ertrag der 67 m² großen Solarstromanlage (8 kWp) 45% des elektrischen Energiebedarfs deckt. Betrachtet man den Primärenergiebezug einschließlich Heizung, beträgt der Beitrag der Photovoltaik zur Gesamtenergiebilanz des Gebäudes 40%. (Abb. 8)



Architektur: Werkgemeinschaft Maier-Weinbrenner-Single, Nürtingen.

Energiekonzept: Fraunhofer ISE, Messung: Hochschule für Technik, Stuttgart

Das dazu realisierte Maßnahmenpaket umfasst in erster Linie entwerferische und bauphysikalische Qualitäten. Darüber hinaus sind es die effiziente Beleuchtung mit tageslichtabhängiger Regelung und der Ersatz der aktiven Klimatisierung durch eine passive Kühlung (Nachtlüftung, Luft-/ Erdregister), die bei hohem Nutzungskomfort nur wenig Energie benötigen. Die Kosten der Solarstromanlage betragen etwa 5% der Bauwerkskosten von knapp 1000 €/m² NGF, brutto.

Abbildung 8
Bürogebäude des Hans Lamparter GbR, Weilheim. Die Solarstromanlagen mit insgesamt 8 kWp befinden sich aufgeständert auf dem Pultdach und als baulicher Abschluss der Attika.

¹ Nutzungsdauer 25 Jahre, 2% Wartungs-/ Instandhaltungs-/ Versicherungskosten, 4% Realzins, keine Fördermittel, keine Vergütung, Anlagenjahresstromertrag 900 kWh/kW_p, Primärenergiefaktor für Strom 3

Beispiel 2:

Gewerbebau mit rein solarer Energieversorgung

Ein anderer Weg für ein nachhaltiges Energiekonzept, hier im Gewerbebau, wurde bei der Realisierung der Solarfabrik in Freiburg eingeschlagen [5]. Zielsetzung war die "Nullemissionsfabrik" für die Produktion von Photovoltaik-Modulen, aus zugelieferten Solarzellen. Der nach der energetischen Optimierung des Gebäudes verbleibende Energiebedarf wird ausschließlich aus erneuerbarer Energie gedeckt.



Architektur: Werkgemeinschaft Maier-Weinbrenner-Single, Nürtingen. Energiekonzept: Fraunhofer ISE, Messung: Hochschule für Technik, Stuttgart

Abbildung 9
Photovoltaikfassade des Verwaltungs- und Produktionsgebäudes Solarfabrik Freiburg. Die Solarstromanlagen mit insgesamt 56 kW_p decken 15% des Primärenergieverbrauchs.

Basis dafür sind ein mit Pflanzenöl betriebenes Blockheizkraftwerk (45 kW_{el}, 65 kW_{th}), Solarstromanlagen unterschiedlicher Bauart mit insgesamt 56 kW_p elektrischer Spitzenleistung und ein mit Rapsöl betriebener 200 kW Heizkessel. Die Verbrauchszahlen im Betrieb lagen 1999 bei rund 96 kWh/m²a Heizwärme und 62 kWh/m²a Strom, beides vollständig regenerativ gedeckt (Bezugsfläche: 3442 m²NGF). Die Solarstromanlagen decken etwa 23% des Stromverbrauchs oder 15% des gesamten Primärenergieverbrauchs (Abb. 9).

5. Fazit

Die weitaus überwiegende Anzahl der netzgekoppelten solaren Stromerzeugungsanlagen in Deutschland ist auf Gebäuden montiert. Die Gebäude können hierbei eine reine Funktion als Tragstruktur übernehmen. Interessantere Konzepte und Realisierungen weisen aber in eine Zukunft, in der die Photovoltaik deutliche gestalterische, ästhetische Akzente setzt, in der die Photovoltaik funktionale Komponenten der Gebäudehülle substituiert und in der die Photovoltaik wesentliche Anteile des Gesamtenergiebedarfs von Gebäuden deckt.

Solarstromanlagen können, bei sehr energieeffizienten Gebäuden, einen großen Teil des Primärenergiebezugs in der Bilanz ausgleichen, ihre Kosten können, unter Berücksichtigung der Gutschriften für die Substitution konventioneller Bauteile, den Kosten für Energieeinsparmaßnahmen im Rahmen eines "least cost planning" in vielen Fällen vorteilhaft gegenübergestellt werden.

Derzeit wird eine ganzheitliche Betrachtung zum Energieverbrauch von Gebäuden allerdings noch behindert durch die gängige Planungspraxis, Regelwerke (Wärmeschutz- und Energieeinsparverordnung), fehlende gesetzliche Grenzwerte für den elektrischen Energiebedarf von technischen Anlagen und die Honorarordnung der Planer. Der Anspruch von Gesamtenergiekonzepten, in denen die Photovoltaik in Zukunft eine größere Rolle spielen kann, muss die gewerkeübergreifende Bearbeitung energetischer Fragestellungen in Kontext von Architektur, Technik, Ökonomie und Nachhaltigkeit sein.

Literatur

- [1] Tegtmeier, D., Rabeneck, D. und Friede, D. (2001)
Integration von Photovoltaik in der Architektur.
In: Tagungsband des 16. Symposium Photovoltaische Solarenergie Staffelstein 2001, Seite 528 – 532, OTTI, Regensburg.

- [2] Bendel, C., Menges, O. und Weißner, M. (1999)
Multifunktionale Photovoltaik-Fassaden im Vergleich.
In: Tagungsband des 14. Symposium Photovoltaische Solarenergie Staffelstein 1999, Seite 229 – 233, OTTI, Regensburg.

- [3] Klotz, F. (1998)
Autarke Sonnenschutz- und Lichtlenksysteme.
In: ForschungsVerbund Sonnenenergie Themen 97/98, ForschungsVerbund Sonnenenergie (Hrsg.), Berlin.

- [4] Voss, K., Kiefer, K. und Reise, C. (2001)
Gebäudeenergiekonzepte mit Photovoltaik.
In: Tagungsband des 16. Symposium Photovoltaische Solarenergie Staffelstein 2001, Seite 172 – 178, OTTI, Regensburg.

- [5] www.solarfabrik.de/deutsch/produktion/nullemissionsfabrik