

BINE-Informationspaket

# Photovoltaik

Gebäude liefern Strom

6., vollständig überarbeitete Auflage

Ralf Haselhuhn

LESEPROBE

Herausgeber

 FIZ Karlsruhe

**Beuth**  
Berlin · Wien · Zürich

 **BINE**  
Informationsdienst

Der BINE Informationsdienst bietet Kompetenz in neuen Energietechniken. Der intelligente Umgang mit knappen, wertvollen Energieressourcen, insbesondere in Gebäuden und der Gebäudetechnik, sowie die Nutzung erneuerbarer Energien sind die BINE-Kernthemen. Zu diesen Inhalten vereinen wir vielfältiges Know-how aus Forschung, Technik und Anwendung. Eine Übersicht über unser komplettes Produkt- und Dienstleistungsangebot finden Sie unter [www.bine.info](http://www.bine.info). Gerne senden wir Ihnen die Informationen auch zu.

BINE ist ein Informationsdienst von FIZ Karlsruhe und wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert.

Für weitere Fragen steht Ihnen zur Verfügung:

Gerhard Hirn (Redaktion)

BINE Informationsdienst, FIZ Karlsruhe, Büro Bonn

Kaiserstr. 185–197, 53113 Bonn

Tel. 0228 923 79-0, E-Mail: [bine@fiz-karlsruhe.de](mailto:bine@fiz-karlsruhe.de), [www.bine.info](http://www.bine.info)

2010 Beuth Verlag GmbH

Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin

Telefon: +49 30 2601-0, Telefax: +49 30 2601-1260

Internet: [www.beuth.de](http://www.beuth.de), E-Mail: [info@beuth.de](mailto:info@beuth.de)

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechts ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung in elektronischen Systemen.

Die im Werk enthaltenen Inhalte wurde vom Verfasser und Verlag sorgfältig erarbeitet und geprüft. Eine Gewährleistung für die Richtigkeit des Inhalts wird gleichwohl nicht übernommen. Der Verlag haftet nur für Schäden, die auf Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit seitens des Verlages zurückzuführen sind. Im Übrigen ist die Haftung ausgeschlossen.

Gedruckt auf säurefreiem, alterungsbeständigem Papier nach DIN ISO 9706

ISBN 978-3-410-20354-4

© by FIZ Karlsruhe, 2010

Gestaltung: Solarpraxis AG

Titelfoto: Wagner & Co Solartechnik GmbH, Cölbe

Hinweis zu den Abbildungen: Soweit nachfolgend keine anderen Quellen genannt werden, stammen die Abbildungen vom Autor.



<b>Vorwort</b> .....	5
<b>1 Solaraktive Flächen für die Architektur</b> .....	<b>7</b>
<b>2 Neue Technik für Gebäude</b> .....	<b>12</b>
2.1 Direkt: Elektrizität aus Sonnenlicht .....	13
2.2 Elementar: Die Solarzelle .....	14
2.3 Vielfalt: Verschiedene Solarzellentypen .....	16
2.4 Auf dem Weg zur Größe: Das Solarmodul .....	28
2.5 Eine Erfolgsgeschichte .....	34
<b>3 Am Anfang steht die Planung</b> .....	<b>36</b>
3.1 Wie viel Energie liefert die Sonne? .....	37
3.2 Vorbereitung und Gebäudebegutachtung .....	40
3.3 Sind Standort und Gebäude geeignet? .....	41
3.4 Licht und Schatten in Bewegung .....	42
3.5 Anlage und Komponenten richtig dimensionieren .....	46
3.6 Ertragsabschätzung und Simulation .....	61
3.7 Eine Checkliste zur erfolgreichen Planung .....	65
<b>4 Mit Photovoltaik bauen</b> .....	<b>66</b>
4.1 Was ist bei der Statik zu beachten? .....	66
4.2 Montage auf dem Dach .....	68
4.3 Schönheit fürs Dach: Die In-Dach-Lösung .....	78
4.4 Ertragsoptimiert: Aufgeständerte Systeme für das Flachdach .....	82
4.5 Montage an der Fassade .....	86
4.6 Weitere Montagelösungen .....	96
<b>5 Baurecht, Normen &amp; Co</b> .....	<b>99</b>
5.1 Baugesetzgebung und Baugenehmigung .....	99
5.2 Photovoltaik als Gebäudebestandteil .....	102
5.3 Photovoltaik als elektrische Anlage .....	105
5.4 Unfallschutz und allgemeine Sicherheit .....	106
5.5 Gewährleistung .....	107
<b>6 Elektrische Installation und Inbetriebnahme</b> .....	<b>108</b>
6.1 Wer darf? .....	108
6.2 Kasten mit Bedeutung .....	109
6.3 Von Kabeln und Leitungen .....	110
6.4 Schutz vor Fehlerströmen .....	110
6.5 Schutz vor Blitzeinwirkungen .....	112

6.6	Netzanschluss und Stromzähler.....	114
6.7	Abnahme und Inbetriebnahme.....	117
<b>7</b>	<b>Qualität und Solarerträge .....</b>	<b>119</b>
7.1	Module: Prüfung und Garantien.....	119
7.2	Wechselrichter: Qualität und Zuverlässigkeit.....	123
7.3	Was letztlich zählt: Energieerträge.....	124
7.4	Vertrauen ist gut . . . ..	125
7.5	Wartung und Instandhaltung .....	128
<b>8</b>	<b>Ökologie und Nachhaltigkeit .....</b>	<b>134</b>
<b>9</b>	<b>Kosten und Erlöse .....</b>	<b>140</b>
9.1	Investitionssicherheit per Gesetz.....	140
9.2	Investitionskosten dominieren die Wirtschaftlichkeit.....	142
9.3	„Rechnen sich“ Photovoltaik-Anlagen? .....	144
9.4	Kosten-Entwicklung.....	145
9.5	Ergänzende öffentliche Fördermittel .....	147
9.6	Steuerliche Nebenwirkungen.....	147
9.7	Risiken versichern .....	150
<b>10</b>	<b>Trends und neue Technologien .....</b>	<b>152</b>
10.1	Neue Zelltechnologien.....	152
10.2	Trends bei Solarmodulen .....	156
10.3	Neue Wechselrichter- und Anlagenkonzepte .....	157
10.4	Weitere Trends .....	158
10.5	Auf dem Weg zum virtuellen Kraftwerk und zur solaren Mobilität.....	159
<b>11</b>	<b>Zitierte Literatur und Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>161</b>
11.1	Zitierte Literatur .....	161
<b>12</b>	<b>Energieforschung der Bundesregierung.....</b>	<b>166</b>
12.1	Laufende und kürzlich abgeschlossene Forschungsvorhaben .....	166
12.2	Forschungsberichte.....	167
<b>13</b>	<b>Weiterführende Literatur.....</b>	<b>169</b>
13.1	Literatur.....	169
13.2	Software.....	171
13.3	Zeitschriften .....	173
13.4	BINE Informationsdienst.....	174
<b>14</b>	<b>Zum Autor.....</b>	<b>175</b>



## Vorwort

Auf immer mehr Dächern zeigen sich Photovoltaik-Anlagen. Solarmodule werden mehr und mehr zu gestaltenden Elementen für Dach und Fassade. Und sie werden immer besser: Forscher, Entwickler und Hersteller präsentieren und produzieren in enormer Geschwindigkeit immer leistungsfähigere und preiswertere Module und Komponenten. Die Anlagenpreise sind nicht nur dank effizienterer und kostengünstigerer Herstellungsprozesse im Sinkflug, die europäischen PV-Hersteller stehen zusätzlich durch Wirtschaftsflaute und asiatische Konkurrenten unter Druck.

Der Trend zu Photovoltaik verstärkt sich, denn Solarenergie ist nicht nur sauber, sondern auch lukrativ. Die Bedingungen für den Neubau von PV-Anlagen sind sehr gut. Dank Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) und sinkender Modulpreise wird der Einstieg immer attraktiver, auch jährlich sinkende Einspeisevergütungen können daran so schnell nichts ändern.

5

Die Stromerzeugung aus Photovoltaik-Anlagen steigt weiter an; so wurde in Deutschland im Jahr 2008 mit rund 4,0TWh 29% mehr Strom produziert als im Vorjahr. Damit stellte die Photovoltaik immerhin bereits 0,7% der Bruttostromerzeugung.

Der zukunftsfähige Wirtschaftszweig nachhaltige Energieerzeugung schafft Einkommen und Arbeit: allein in der Photovoltaik-Industrie arbeiten hierzulande inzwischen fast 60.000 Beschäftigte. Und für die Baubranche bedeutet die Photovoltaik ein neues, wachsendes Aufgabenfeld. Damit diese fortschrittliche Technologie an der Schnittstelle zwischen Gebäudehülle und Energietechnik erfolgreich weiterverbreitet werden kann, ist es erforderlich, dass alle beteiligten Akteure über das aktuelle Wissen für optimale Planung und Erstellung von Photovoltaik-Anlagen verfügen.

Dieses Wissen fasst das Fachbuch in seiner sechsten, völlig überarbeiteten Auflage kompetent und kompakt zusammen. Es wendet sich vor allem an Bauherren, Handwerker, Planer, Entscheider, Investoren, also an die Akteure und Berufsgruppen, die mit der neuen Gebäudetechnik Photovoltaik zu tun haben.

Das Buch ist modular aufgebaut – das macht es Ihnen als Leser einfacher, sich entweder gezielt über einzelne Fragestellungen zu informieren oder sich einen Überblick über Photovoltaik auf Gebäuden zu verschaffen, von Planung und Bau bis zu aktuellen Ansätzen der Forschung.



LESEPROBE

# 1 Solaraktive Flächen für die Architektur

Wie steht es um unsere derzeitige Architektur? Formale und ästhetische Aspekte stehen bei vielen modernen Gebäuden im Vordergrund, oft wurden sie weitgehend unabhängig von den Standortgegebenheiten entworfen und gebaut. Die Funktionalität wurde in vielen modernen Häusern jedoch erst mit Technik ermöglicht. Vielfach wurden schlanke hohe Glaspaläste mit hohen Kühl- und Wärmelasten gebaut, mit entsprechend hohem Energiebedarf für den Betrieb von Heizungen und Klimaanlage. Die Fenster müssen oft tags verdunkelt werden, um Arbeit an den PC-Arbeitsplätzen zu ermöglichen, zusätzlich wird das Licht angeschaltet. Zielvorgabe für moderne Architektur ist es, Gebäude nutzer- und umweltfreundlich sowie ressourcenschonend zu planen. Dabei müssen folgende Fragen gestellt werden: Wie fügt sich das Gebäude in die Umwelt ein? Greift es die klimatischen Bedingungen des Standortes auf und setzt diese mit kreativen Mitteln um und optimiert so die Nutzung und den Energieverbrauch? Berücksichtigt schon der Entwurf die Versorgung des Hauses? Trägt das Gebäude zu seiner Energieversorgung bei oder stellt es sogar mehr Nutzenergie her als es Primärenergie verbraucht?

Überall in Deutschland finden sich mehr und mehr Bürger bereit, Solarstrom zu erzeugen. So zeugen blau schimmernde Dächer gerade in Süddeutschland von der weiten Verbreitung dieser ökologischen Energietechnologie. Solaranlagen an Gebäuden können überall in der Welt dazu beitragen, umweltfreundlich Energie zu erzeugen. Der Einstieg in einen Wandel weg von fossilen Energieträgern ist durch die dynamische Entwicklung der regenerativen Energien der letzten Jahre gelungen. Strom aus Windenergieanlagen ist derzeit schon konkurrenzfähig mit konventionellem Strom. In ein paar Jahren wird Photovoltaikstrom billiger als der Haushaltstrompreis sein. Diese sogenannte „Grid-Parity“ wird dazu führen, dass weltweit ein Großteil des Stromes dezentral erzeugt wird und es wird normal sein, dass Dächer Solarstrom erzeugen.

Solarmodule sollten sich in die Farb- und Formgebung der Gebäude einfinden. Hier ist die Solarbranche allerdings noch gefordert, oft werden die Ansprüche der Architekten an die Ästhetik der Solarelemente als zu hoch angesehen. Aus Kostengründen hat sich die Standardproduktion, unabhängig von den ästhetischen und funktionalen Bedürfnissen, durchgesetzt. Wer bestimmte Maße benötigt, eine In-Dach- oder Dachersatzlösung bevorzugt, wer Solarelemente an die Fassade bringen will, auf eine bestimmte Farbe oder Struktur bzw. Oberfläche Wert legt, muss tiefer in die Kasse

greifen. Bestimmte Wünsche können noch gar nicht erfüllt werden. Etwa 95 % der Solarmodule werden heute in Deutschland in klassischer Auf-Dach-Montage, in Flachdachaufständerung sowie Freiflächenanlagen erstellt. Auch bei diesen Anlagen gibt es gestalterisch überzeugende Lösungen. Durch neue Produktionstechnologien werden Solarmodule entwickelt, die sehr viel mehr auf ihren Einsatz auf unseren Dächern und unsere gestalterischen Wünsche abgestimmt sind. Für 2020 erwartet der Autor einen Anteil von gebäudeintegrierten PV-Anlagen (GIPV) von etwa 20 %. Mit solaraktiven Flächen lassen sich verschiedene, sehr moderne Formensprachen für die Architektur entwickeln. Die Anmutung von Solarmoduloberflächen fasziniert ebenso wie der lautlose, saubere und umweltfreundliche Betrieb der gesamten Anlage. Für viele ist das Kraftwerk auf dem eigenen Dach auch ein Schritt in Richtung Unabhängigkeit. Energie wird dezentral vor Ort erzeugt, so werden Leitungs- und Verteilungsverluste vermieden oder verringert. In Zukunft werden viele, über das öffentliche Stromnetz verknüpfte Stromerzeuger kleinerer Leistung eine wesentliche Säule der Energieversorgung sein. Die Struktur ähnelt dann dem heutigen Informationsnetz, dem Internet. Je höher der Anteil der Photovoltaik in der Stromerzeugung steigt, desto wichtiger wird, dass mehr Anlagen in die Gebäudehülle integriert werden: Dominieren heute wegen dem höchsten Solarertrag südorientierte um ungefähr 30° geneigte Anlagen - so werden in Zukunft wegen dem über den Tag verteilten Strombedarf nach allen Richtungen orientierte Solaranlagen wichtig sein. So werden zunehmend Anlagen nach Osten, die also am Vormittag ihren maximalen Strom erzeugen, oder Anlagen nach Westen, die am Nachmittag ihr Maximum erreichen, erforderlich sein. Aber auch Anlagen an Fassaden, die ihr Maximum erreichen, wenn die Sonne im Winter schräg steht oder die nach Norden orientiert sind und im Sommer in den Früh- und Abendstunden mehr Strom erzeugen, werden einen wichtigen Beitrag zu wechselnden Stromlastprofilen leisten.

Reichen die Dach- und Fassadenflächen in Deutschland denn dafür aus, dass die dort installierte Photovoltaik einen relevanten Beitrag zur Stromversorgung Deutschland leisten kann? Wissenschaftliche Untersuchungen bestätigen, dass die technisch und wirtschaftlich nutzbaren Gebäudeflächen ausreichen, um mindestens 30 % des Stromverbrauches in Deutschland zu decken. So können auf Dächern und Fassaden bis zu 2.000 Quadratkilometer Fläche genutzt werden. Diese Fläche erscheint riesig, entspricht aber gerade mal 5 % der 41.000 Quadratkilometer bebauten Fläche in Deutschland.

	Dächer	Fassaden	Verkehrsflächen	Freiflächen
Kaltschmidt und Wiese (1993)	800 km <sup>2</sup>	200 km <sup>2</sup>	--	4.140 km <sup>2</sup>
Nitsch (1999)	838 km <sup>2</sup>	150 km <sup>2</sup>	350 km <sup>2</sup>	300 km <sup>2</sup>
Quaschnig (2000)	1.300 km <sup>2</sup>	200 km <sup>2</sup>	39 km <sup>2</sup>	250 km <sup>2</sup>
Enquete Kommission (2003)	1.100 km <sup>2</sup>	800 km <sup>2</sup>	--	--
IEA Task 7 (2002)	1.300 km <sup>2</sup>	486 km <sup>2</sup>	--	--
Ecofys (2007)	1.760 km <sup>2</sup>	584 km <sup>2</sup>	--	--
Biohaus (2008)	2.360 km <sup>2</sup>	640 km <sup>2</sup>		

Abb. 1: Nutzbares Flächenpotenzial in Deutschland nach verschiedenen Studien [1]

Je mehr Photovoltaik-Anlagen das Gesicht unserer Städte und Gebäude prägen werden, desto wichtiger wird es, die PV-Module über die Energieerzeugung hinaus gestalterisch und funktional in die Gebäude zu integrieren. Dadurch können PV-Anlagen neben der solaren Stromerzeugung weitere Gebädefunktionen wie Witterungsschutz, Verschattung, Licht, Dacheindeckung, Fassadenbekleidung, Wärmedämmung und Sichtschutz übernehmen. Entscheidend ist hier die Wahl des Materials, also Form, Farbe und Oberfläche. Hier stehen uns inzwischen viele unterschiedliche Materialien zur Auswahl. Die Solartechnik hat ihren Weg in die moderne Architektur gefunden.

Das Kölner Modehaus Zara (Abb. 3) entschied sich bei seiner Filiale in der Kölner Innenstadt für eine repräsentative Solarstromfassade mit ultramarinblau schimmernden Solarzellen. Neben dem ästhetischen Effekt gewährleisten die Solarmodule im Isolierglasverbund einen guten Wärme- und Schallschutz. Mögliche Einbußen durch Verschattung werden durch eine abgestimmte Verschaltung der Module minimiert.

LESEPROBE



Abb. 2: Servicepavillon der Badeinsel Steinhuder Meer mit Photovoltaik-Modulen und solarthermischen Vakuumröhrenkollektoren



Abb. 3: Links: Das Bürogebäude der Firma Juwi mit PV-Fassade, rechts: Die polykristalline Solarfassade am Modehaus Zara in Köln.

Die Möglichkeiten der Photovoltaik in der Architektur lassen sich an vielen Projekten überzeugend dokumentieren, dies zeigen auch die folgenden Abbildungen aus den Bereichen Wohnungsbau und Nichtwohnungsbau:



Abb. 4: Photovoltaik-Anlagen mit a) Auf-Dach-Montage, b) komplettes In-Dach-Montage-System



Abb. 5: Bürogebäude in der japanischen Stadt Kobe mit in die Fassade integrierten Solarmodulen



Abb. 6: Amorphe Photovoltaik-Module an der Fassade des Bayerischen Umweltministeriums