

BINE-Fachbuch

Photovoltaik

7., vollständig überarbeitete Auflage

Der Autor:

Ralf Haselhuhn

LESEPROBE

Herausgeber

 **FIZ Karlsruhe**
Leibniz-Institut für
Informationsinfrastruktur

Fraunhofer IRB  **Verlag**

 **BINE**
Informationsdienst

BINE Informationsdienst berichtet über Themen der Energieforschung: Neue Materialien, Systeme und Komponenten, innovative Konzepte und Methoden. BINE-Leser werden so über Erfahrungen und Lerneffekte beim Einsatz neuer Technologien in der Praxis informiert. Denn erstklassige Informationen sind die Grundlage für richtungweisende Entscheidungen, sei es bei der Planung energetisch optimierter Gebäude, der Effizienzsteigerung industrieller Prozesse oder bei der Integration erneuerbarer Energien in bestehende Systeme.

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

Für weitere Fragen steht Ihnen zur Verfügung:

Gerhard Hirn (Redaktion)

BINE Informationsdienst, FIZ Karlsruhe, Büro Bonn

Kaiserstraße 185–197, 53113 Bonn

Tel. +49 2 28 923 79-0, E-Mail: bine@fiz-karlsruhe.de, www.bine.info

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

ISBN (Print): 978-3-8167-8737-2 | ISBN (E-Book): 978-3-8167-8738-9

Layout: Dietmar Zimmermann | Umschlaggestaltung: Martin Kjer | Herstellung: Tim Oliver Pohl

Satz: Mediendesign Späth GmbH, Birenbach | Druck: DZA Druckerei zu Altenburg GmbH, Altenburg

Alle Rechte vorbehalten.

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Titelbild: Paul Langrock, paul-langrock.de

© by FIZ Karlsruhe

Verlag und Vertrieb:

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Telefon +49 7 11 970-2500

Telefax +49 7 11 970-2508

irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

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

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	9
1 Solaraktive Flächen für die Architektur	11
1.1 Gebäude mit Solarmodulen gestalten	11
1.2 Demokratisierung der Energiewirtschaft	13
2 Neue Technik für Gebäude	16
2.1 Elektrizität aus Sonnenlicht	16
2.2 Die Solarzelle	17
2.3 Verschiedene Solarzellentypen	19
2.3.1 Monokristalline Zellen	20
2.3.2 Polykristalline Zellen	21
2.3.3 Dünnschichtzellen	22
2.4 Von der Solarzelle zum Modul	28
2.5 Speichersysteme ergänzen die Photovoltaikanlage	32
3 Am Anfang steht die Planung	37
3.1 Wie viel Energie liefert die Sonne?	37
3.2 Vorbereitung und Gebäudebegutachtung	41
3.3 Sind Standort und Gebäude geeignet?	42
3.4 Verschattungseffekte vermeiden	43
3.5 Anlage und Komponenten richtig dimensionieren	46
3.5.1 Leistung, Flächenbedarf und Wirkungsgrad	46
3.5.2 Wetterfähigkeit der Solarmodule	47
3.5.3 Schatten: Problem und Lösung	48
3.5.4 Besonderheiten von Dünnschichtmodulen	50
3.5.5 Verschaltung der Module zum Solargenerator	52
3.6 Der Wechselrichter als Anlagenzentrale	53
3.6.1 Aufbau	54
3.6.2 Wechselrichter-Konzepte	56
3.6.3 Optimale Performance – Europäischer Wirkungsgrad	57
3.6.4 Was bei der Installation zu beachten ist	58
3.6.5 Solargenerator und Wechselrichter aufeinander abstimmen	58
3.7 Ertragsabschätzung und Simulation	60
3.8 Planung von PV-Systemen zum Eigenverbrauch	62
3.9 Checkliste zur erfolgreichen Planung	68

4	Mit Photovoltaik bauen	70
4.1	Was ist bei der Statik zu beachten?	70
4.2	Montage auf dem Dach	71
4.3	In-Dach-Anlagen	78
4.4	Aufgeständerte Systeme für das Flachdach	81
4.5	Montage an der Fassade	84
4.5.1	Fassaden für die Photovoltaik-Integration	85
4.5.2	Module mit linienförmigen Halterungen	89
4.5.3	Module mit punktförmigen Halterungen	91
4.5.4	Module als Sonnenschutz	91
4.6	Weitere Montagelösungen	92
4.6.1	Wintergärten, Erschließungszonen und bauliche Anlagen	92
4.6.2	Freiflächen-Anlagen	94
5	Baurecht, Normen & Co.	95
5.1	Baugesetzgebung und Baugenehmigung	95
5.2	Bauordnung, Bauregeln, Bauprodukte und DIBt-Hinweispapier für Solaranlagen	98
5.2.1	DIBt-Hinweispapier für Solaranlagen	99
5.2.2	Statik-Normen	101
5.3	Brandschutz	103
5.3.1	Brandschutzanforderungen der Bauordnung	103
5.3.2	Anforderungen für die Brandbekämpfung	104
5.3.3	Weitere Anforderungen für den Brandschutz	106
5.4	Photovoltaik als elektrische Anlage	108
5.5	Unfallschutz und allgemeine Sicherheit	108
5.6	Gewährleistung	109
6	Elektrische Installation und Inbetriebnahme	110
6.1	Wer darf welche Arbeit durchführen?	110
6.2	Der Generatoranschlusskasten	111
6.3	Die richtigen Kabel und Leitungen	111
6.4	Schutz vor Fehlerströmen	113
6.5	Schutz vor Blitzeinwirkungen	114
6.6	Geltende Regelungen für den Netzanschluss	116
6.7	Abnahme und Inbetriebnahme	121
7	Qualität und Solarerträge	122
7.1	Modul-Prüfung und Garantien	122
7.2	Qualität und Zuverlässigkeit von Wechselrichtern	126

7.3	Was letztlich zählt: Energieerträge	127
7.4	Ertragssicherung durch Betriebsdatenerfassung und Anlagenüberwachung . . .	128
7.5	Wartung und Instandhaltung	129
8	Ökologie und Nachhaltigkeit	135
8.1	Energieversorgung – heute und morgen	135
8.2	Energiebilanz von PV-Anlagen	136
9	Kosten und Erlöse	140
9.1	Anschub durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz	140
9.2	Investitionskosten dominieren die Wirtschaftlichkeit	145
9.3	Ergänzende öffentliche Fördermittel	147
9.4	Steuerliche Nebenwirkungen	148
9.5	Risiken versichern	150
10	Trends und neue Technologien	152
10.1	Neue Zelltechnologien	152
10.2	Trends bei Solarmodulen.	154
10.3	Neue Wechselrichter- und Anlagenkonzepte	156
10.4	Auf dem Weg zum virtuellen Kraftwerk und zur solaren Mobilität	156
10.5	Weitere Trends	159
11	Zitierte Literatur und Abbildungsverzeichnis	160
11.1	Zitierte Literatur	160
11.2	Abbildungsverzeichnis	164
12	Forschungsvorhaben der Bundesregierung	166
12.1	Laufende und kürzlich abgeschlossene Forschungsvorhaben.	166
12.2	Forschungsberichte.	168
13	Weiterführende Literatur	169
13.1	Literatur	169
13.2	Software	170
13.3	Literaturtipps	170
13.4	BINE Informationsdienst	171
13.5	Forschungsportale des BMWi	171
14	Zum Autor	172

Vorwort

Überall im Land gehören Dächer mit Photovoltaik-Anlagen zum Ortsbild. Die Zahl der Anlagen wächst weiter, für die Besitzer sind sie zugleich eine sinnvolle Investition und ein Statement für umweltgerechte Energieerzeugung. Der zukunftsfähige Wirtschaftszweig nachhaltige Energieerzeugung reduziert Ressourcenverbrauch und Emissionen und schafft Einkommen und Arbeit. Die Energiebilanz der Photovoltaik ist beeindruckend: Nach zwei Jahren hat ein neues Modul die Energie geliefert, die für seine Produktion gebraucht wurde. Und es wird insgesamt 20–30 Jahre Strom produzieren.

Inzwischen sind Solarstromanlagen mit einer Gesamtleistung von etwa 34 Gigawatt in Deutschland in Betrieb (Stand Juni 2013). Mit der Produktion von 27,6 TWh elektrischer Energie im Jahr 2012 deckte die Photovoltaik etwa 5,3 % des Nettostromverbrauchs. Photovoltaik bleibt trotz jährlich sinkender Einspeisevergütungen und Förderobergrenzen interessant. Das neue Ziel ist es, einen hohen Eigenverbrauch zu erreichen – das entlastet Kasse und Stromnetz. Deshalb investieren gegenwärtig insbesondere Hausbesitzer in neue Anlagen, die durch höhere Eigenverbrauchsquoten den stark abgesenkten Einspeisetarif zum Teil ausgleichen können.

Der Boom der Solarenergie wurde im Jahr 2000 durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) angestoßen. Durch die Förderung der Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Quellen ermöglichte es enorme Fortschritte bei Forschung, Entwicklung und Produktion von Solarzellen, Modulen und anderen Anlagenkomponenten, z. B. Wechselrichtern. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeit der deutschen Solarbranche wird von der Bundesregierung auch im Rahmen der Innovationsallianz Photovoltaik unterstützt. Dank effizienterer und kostengünstigerer Herstellungsprozesse kann (und muss) die Industrie von Jahr zu Jahr leistungsfähigere und günstigere Photovoltaikmodule und -anlagen anbieten.

Die Anlagenpreise sinken nicht nur durch technischen Fortschritt, sie stehen zusätzlich durch internationale Konkurrenz sowie Deckelung des Zubaus unter Druck. Im ersten Halbjahr 2013 wurde nur noch etwa halb so viel neue PV-Leistung installiert wie im Jahr davor. Die Kombination von Preisdumping und Absatzdeckelung bringt die Zukunftsindustrie Photovoltaik in ernste Schwierigkeiten.

In seiner siebten, völlig überarbeiteten Auflage fasst dieses Fachbuch das aktuelle Wissen für eine optimale Planung und Erstellung von Photovoltaik-Anlagen kompetent und kompakt zusammen. Es richtet sich vor allem an Bauherren, Handwerker, Planer und Investoren, also an die Akteure und Berufsgruppen, die mit der neuen Gebäudetechnik Photovoltaik zu tun haben. Neben den Aktualisierungen werden neue Schwerpunkte gesetzt, zum Beispiel bei Baurecht, Normen und Brandschutz, Eigenverbrauch sowie bei der wirtschaftlichen Bewertung eines Anlagen-Neubaus.

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 über Wirtschaftlichkeit bis zu aktueller Forschung.

FIZ Karlsruhe GmbH
BINE Informationsdienst

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 entstanden schlanke hohe Glaspaläste mit hohen Kühl- und Wärmelasten, mit entsprechend hohem Energiebedarf für den Betrieb von Heizungen und Klimaanlage. Die Fenster müssen oft bei Tag verdunkelt werden, um Arbeit an den PC-Arbeitsplätzen zu ermöglichen, zusätzlich wird das Licht angeschaltet. Zielvorgabe für heutige Architektur ist es, Gebäude nutzer- und umweltfreundlich sowie ressourcenschonend zu planen und zu errichten. Einen besonderen Stellenwert hat dabei die Verringerung des Verbrauchs fossiler Energieträger und der damit verbundenen CO₂-Emissionen. Deshalb 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? Hierzu kann die Solarenergie einen beträchtlichen Beitrag leisten.

1.1 Gebäude mit Solarmodulen gestalten

So zeugen blau schimmernde Dächer in Deutschland von der weiten Verbreitung dieser ökologischen Energietechnologie. Solaranlagen an Gebäuden tragen überall in der Welt dazu bei, 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. Photovoltaikstrom ist schon heute billiger als der Haushaltstrom. Diese sogenannte »Grid-Parity« macht den PV-Strom vom Dach wirtschaftlich konkurrenzfähig und führt dazu, dass weltweit immer mehr Strom dezentral erzeugt wird.

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. 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: Während heute auf höchsten Solarertrag ausgelegte südorientierte, um ungefähr 30° geneigte Anlagen dominieren, werden in Zukunft wegen des über den Tag verteilten Strombedarfs nach allen Richtungen orientierte Solaranlagen wichtig sein. So werden zunehmend nach Osten ausgerichtete Anlagen gebraucht, die am Vormittag ihren maximalen Strom erzeugen, sowie nach Westen orientierte Anlagen, die am Nachmittag ihr Maximum erreichen. Aber auch Anlagen an Fassaden, die ihr Maximum erreichen, wenn die Sonne im Winter schräg steht, werden einen wichtigen Beitrag zu wechselnden Stromlastprofilen leisten, ebenso solche, die nach Norden orientiert sind und im Sommer in den Früh- und Abendstunden mehr Strom erzeugen.

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 geeigneten Dächern und Fassaden etwa 2 000 Quadratkilometer Fläche genutzt werden. Diese Fläche erscheint riesig, entspricht aber gerade mal 5 % der 41 000 Quadratkilometer bebauten Fläche in Deutschland. Mit dieser Fläche lässt sich eine Solarleistung von etwa 300 Gigawatt realisieren, die eine jährliche Energie von etwa 300 Terrawattstunden liefern könnte. Das würde ausreichen um über die Hälfte des gesamten Stromverbrauchs Deutschlands zu decken, unter der Voraussetzung, dass dann saisonale Speicher eingesetzt werden.

	Dächer	Fassaden	Verkehrsflächen	Freiflächen
Kaltschmidt und Wiese (1993)	800 km ²	200 km ²	–	4 140 km ²
Nitsch (1999)	838 km ²	150 km ²	350 km ²	300 km ²
Quaschnig (2000)	1 300 km ²	200 km ²	39 km ²	250 km ²
Enquete Kommission (2003)	1 100 km ²	800 km ²	–	–
IEA Task 7 (2006)	1 480 km ²	530 km ²	–	–
Ecofys (2007)	1 760 km ²	584 km ²	–	–
Biohaus (2008)	2 360 km ²	640 km ²		
IWES (2012)	1 200 km ²	233 km ²	742 km ²	670 km ² *
* nur versiegelte Freiflächen				

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

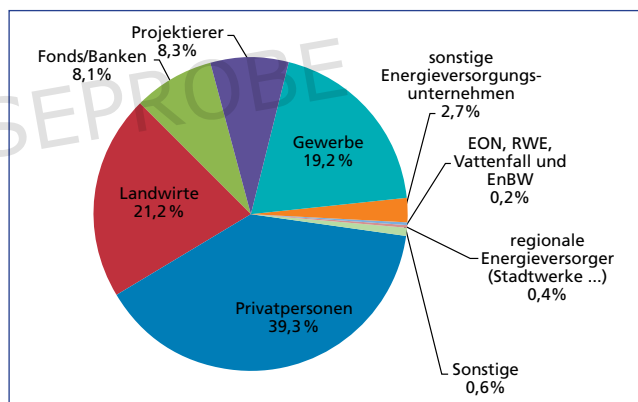
Die Möglichkeiten der Photovoltaik in der Architektur lassen sich an vielen Projekten überzeugend dokumentieren, dies zeigen auch die folgenden Abbildungen aus den Bereichen Wohnungsbau und Nichtwohnungsbau:



■ **Abb. 2:** Photovoltaik-Anlagen mit Auf-Dach-Montage (links), komplettes In-Dach-Montage-System (rechts)

1.2 Demokratisierung der Energiewirtschaft

Die leitungsgebundene Versorgung hat im 20. Jahrhundert zu einer monopolistischen zentralistischen Energieversorgung geführt. Seit Ende der Neunziger Jahre wurde politisch EU-weit mit mehr oder weniger Erfolg versucht, die Verflechtung zwischen Energieversorgung, Netzbetrieb und Stromhandel aufzulösen. Für eine dezentrale Energieversorgung mit z. B. PV-Anlagen, BHKW und Windkraftanlagen ist diese Entflechtung Schlüssel zum Erfolg. Weit über 1 Million Photovoltaikanlagen wurden in Deutschland im vergangenen Jahrzehnt errichtet. Sie deckten im Jahr 2012 5,7 % des deutschen Strombedarfes [2]. Fast 40 % der installierten Leistung haben Privatpersonen errichten lassen, gefolgt von Landwirten und dem Gewerbe mit

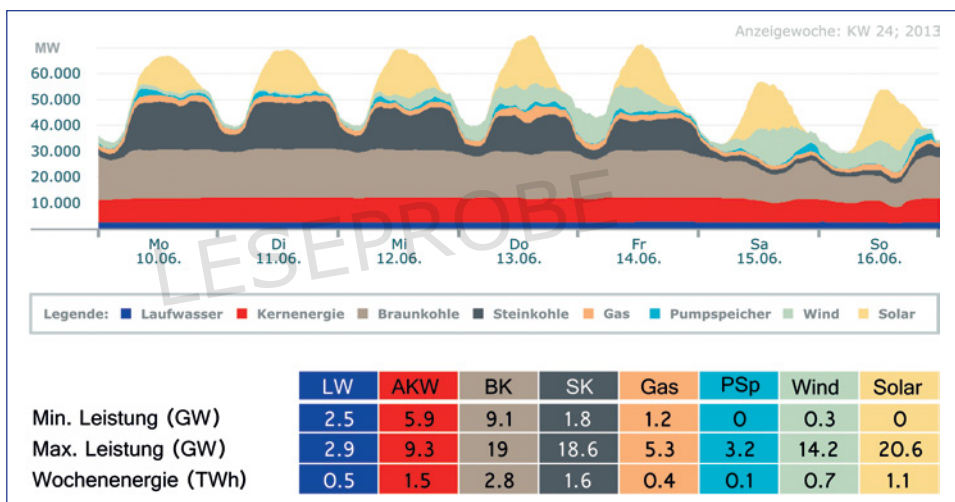


■ **Abb. 3:** Anteil der Eigentümer an der bis 2011 installierten Leistung von 17 GW

jeweils etwa 20 % [3]. Dagegen wurden nur 3,3 % von Energieversorgungsunternehmen errichtet. Bei der Photovoltaik zeigen sich am deutlichsten die Dezentralisierung und damit die Demokratisierung der Energiewirtschaft.

Während 1990 nur wenige Prozente des Strombedarfs von Deutschland durch Erneuerbare Energien gedeckt wurden, beträgt deren Anteil derzeit schon fast ein Viertel. Doch ist dies, bezogen auf den weltweiten Anstieg des fossilen Energieverbrauchs verschwindend gering (siehe Kap. 8). Denn nur durch eine weltweite Energiewende lässt sich der Klimawandel noch aufhalten. Die Bundesregierung plant für das Jahr 2050 einen Anteil erneuerbarer Energien von 80 %. Wird die dynamische Entwicklung der letzten Jahre beibehalten, könnte Deutschland sogar schon 2040 vollständig mit regenerativem Strom versorgt werden. Die größte technische Herausforderung hierbei ist, das schwankende Angebot von Wind- und Solarstrom mit dem Strombedarf abzustimmen. Obwohl sich Wind- und Solarstrom gut ergänzen, gibt es Zeiten mit zu wenig oder zu viel regenerativem Strom. Derzeit füllen fossile Kraftwerke noch die Lücken mit zu wenig Regenerativstrom. Steinkohle- und Kernkraftwerke sind jedoch nicht sehr flexibel einsetzbar, sie lassen sich nur langsam und aufwendig abregeln. Besser eignen sich hierzu gut regelbare Gaskraftwerke. Zunehmend übernehmen Wind- und PV-Anlagen neben der Spitzenlast auch die Mittellast und am Wochenende auch Teile der Grundlast. Der beispielhafte Verlauf der Stromproduktion der Juniwoche 2013 zeigt die Schwankungsbreiten der Leistungen der Kraftwerksarten. Die Integration von hohen Solar- und Windanteilen stellt zwar eine technische Herausforderung dar, wird aber durch verschiedene Maßnahmen zur besseren Netzintegration beherrscht.

Bei einem Überangebot werden zuerst fossile Kraftwerke, sofern sie abregelfähig sind, und dann nachrangig Erneuerbare-Energien-Anlagen abgeregelt. Letzteres war selten und insbesondere bei größeren Windparks in norddeutschen Netzbereichen der Fall. 2011 betrug die abgeregelte regenerative Energie nach den Daten der Bundesnetzagentur ca. 0,35 % bezogen auf den gesamten Wind- und Solarstrom. Bei höheren Anteilen von PV- und Windstrom nimmt dieser Anteil zu. Eine Analyse des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE zu den Abregelverlusten in der Zukunft ergab selbst bei hohen Anteilen von Wind- und PV-Leistungen im Stromnetz nur geringe Abregelverluste.



■ **Abb. 4:** Stromproduktion aufgeteilt nach Stromerzeugern in der 24. Kalenderwoche 2013

Deshalb müssen Anreize gesetzt werden, um innerhalb der regionalen Netzstruktur Verbrauch und Erzeugung stärker in Übereinstimmung zu bringen. Gegebenenfalls sollten auch räumlich-/netzorientierte Anreize für den weiteren Zubau entwickelt werden. Zunehmend kommt auf die Stadtwerke und Regionalversorger die Aufgabe zu, ein Netzmanagement im Nieder- und Mittelspannungsnetz aufzubauen. Dazu werden bidirektionale Netzschnittstellen der dezentralen Stromerzeugungsanlagen im Niederspannungs- und Mittelspannungsnetz benötigt. Ein immer höherer Anteil von erneuerbarem Strom erfordert Speicher. Bei diesen muss man zwischen Kurzzeitspeicherung (Stunden, Tage, Wochen) und saisonalen Speicherung unterscheiden. Kurz- und mittelfristig können Kurzzeitspeicher mit dezentralen Akkumulatoren und Netzmanagementfunktionen der Solarwechselrichter (wie Blindleistungsreglung und Frequenzhaltung) die Netzausbaukosten deutlich verringern. Durch die Kopplung von Strom- und Wärmesystemen können nicht benötigte Erzeugungsspitzen von PV- und Windstrom kostengünstig in Wärme umgewandelt werden. Längerfristig kommen auch saisonale Speicher wie Power-to-Gas in Betracht (siehe Kapitel 10.4).

LESEPROBE

2 Neue Technik für Gebäude

Bisher verbrauchten Gebäude Energie vor allem auf Basis endlicher Rohstoffe. Die Zeichen weisen in Richtung Ressourcenschonung durch umweltverträgliche Energienutzung. Ein stetig wachsendes ökologisches Bewusstsein und neue Technologien bieten uns heute die Chance, nachhaltig und umweltverträglich zu wirtschaften. Mit der Solartechnik können Gebäude die benötigte Energie vor Ort mit weit geringerem Rohstoffbedarf gewinnen – und dies mit in der Lebenszyklusbilanz nur geringen Schadgas- oder Treibhausgasemissionen. Sie tragen also zur Klimaentlastung bei. Ein Ziel heutiger Architektur sind Gebäude mit minimalem Wärmeverbrauch. Dies kann erreicht werden mit neuen Wärmedämmstandards, mit der Niedrigenergie- oder Passivhausbauweise und durch solares Bauen. Immer mehr Gebäude werden mit solarthermischen Kollektoren zur Warmwassererzeugung oder Heizungsunterstützung ausgestattet. In wärmeoptimierten Gebäuden tritt dann der elektrische Energiebedarf in den Vordergrund. Primärenergetisch bewertet wird hier der Strombedarf von elektrischen Geräten, Beleuchtung, Lüftung und Klimatisierung zum wesentlichen Posten in der Energiebilanz. Mit Solarstrom kann diese Bilanz ausgeglichen werden, ja es kann sogar ein Überschuss erwirtschaftet werden.



■ **Abb. 5:** Dachintegration von PV-Modulen und solarthermischen Kollektoren in Mirow



■ **Abb. 6:** Doppelglasmodule an der Solarfabrik in Freiburg

2.1 Elektrizität aus Sonnenlicht

In der Solarzelle findet die direkte Umwandlung von Licht (Photo- von griechisch: Licht) in elektrische Energie (-voltaik von Volt, Einheit der elektrischen Spannung) statt. Der photovoltaische Effekt wurde 1839 von dem französischen Physiker Alexandre Becquerel entdeckt. Die Umwandlung beruht auf einem physikalischen Effekt, der lautlos ohne Emissionen und Stoffverbrauch innerhalb des solaraktiven Materials abläuft. Solarzellen bestehen aus Halbleitern, in den meisten Fällen aus Silizium. Halbleiter sind Stoffe, deren elektrische Leitfähigkeit zwischen der eines Metalls und eines Isolators liegt. Halbleiter können durch Energiezufuhr leitend werden. Die vier Außenelektronen des Siliziumatoms gehen Elektronenpaarbindungen mit den Nachbaratomen ein. Bei kristallinen Solarzellen entsteht dabei ein regelmäßiges Kris-

tallgitter. In der Zelle grenzen zwei elektrisch verschieden dotierte¹ und damit unterschiedlich leitfähige Halbleiterschichten aneinander. Zwischen der positiv dotierten (p-) und der negativ dotierten (n-) Schicht entsteht ein inneres elektrisches Feld, das durch die Wanderung (Diffusion) überschüssiger Elektronen aus dem n-Halbleiter in den p-Halbleiter im Bereich des pn-Übergangs verursacht wird. Es entsteht ein Gebiet mit wenig freien Ladungsträgern, die sogenannte Raumladungszone. Im n-Gebiet der Raumladungszone bleiben positive, im p-Gebiet negativ geladene Dotieratome zurück. Es entsteht ein elektrisches Feld, das der Bewegung der Ladungsträger entgegen gerichtet ist, sodass die Diffusion nicht endlos fortgesetzt wird.

Trifft nun Licht auf die Solarzelle, so kann die Strahlungsenergie der Photonen² Elektronen aus ihren Bindungen im Atomgitter des Halbleiters herauslösen. Die Photonen werden dabei absorbiert. Die (negativ geladenen) herausgelösten Elektronen sind dann frei beweglich und lassen an ihrem ursprünglichen Platz eine positive Ladung, ein sogenanntes Loch, zurück. Das innere elektrische Feld der Solarzelle bewirkt, dass die beiden beweglichen Ladungen (Elektronen und Löcher) in unterschiedliche Richtungen angezogen werden. Die Ladungen gehen getrennte Wege: die negativen Ladungen wandern zur Frontseite der Zelle, die positiven zur Rückseite. Durch die unterschiedliche Polarität zwischen Front- und Rückseite resultiert ein Potenzialunterschied, der als elektrische Spannung gemessen werden kann. Diese Leerlaufspannung liegt bei kristallinen Solarzellen üblicherweise zwischen 0,6 und 0,7 Volt. Wird der Stromkreis geschlossen, fließt ein Strom über einen Verbraucher (Lampe in Abb. 7). Einige Elektronen erreichen die Kontakte nicht, sondern rekombinieren³. Ein rekombiniertes Elektron nimmt nicht mehr am Stromfluss teil.

Die Diffusion von Ladungsträgern hin zu den elektrischen Kontakten bewirkt, dass eine Spannung an der Solarzelle anliegt.

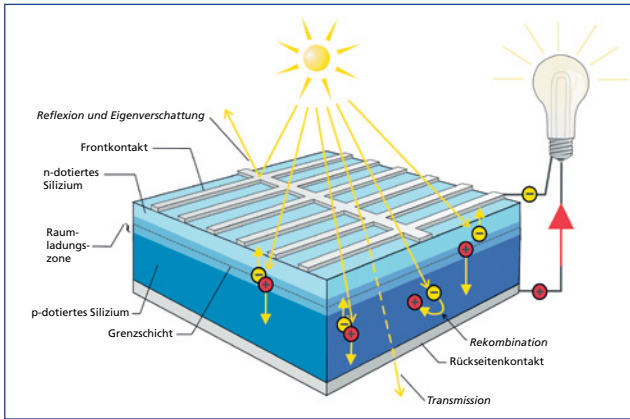
2.2 Die Solarzelle

Die klassische kristalline Silizium-Solarzelle setzt sich aus zwei unterschiedlich dotierten Silizium-Schichten zusammen. Die dem Sonnenlicht zugewandte Schicht ist mit Phosphor negativ dotiert, die darunter liegende Schicht ist mit Bor positiv dotiert. Um der Solarzelle Strom entnehmen zu können, werden auf der Front- und Rückseite metallische Elektroden als Kontakte aufgebracht. Auf der Rückseite geschieht dies meist vollflächig. Die Vorderseite hingegen muss möglichst gut lichtdurchlässig sein. Hier bestehen die Kontakte meist aus einem dünnen Gitter, das nur einen geringen Teil der Zelloberfläche abdeckt. Auf der Rückseite ist das Aufbringen einer ganzflächigen Kontaktschicht durch Aluminium- oder Silberpaste möglich. Das Aufbringen der Kontakte erfolgt meist in Siebdrucktechnik. An der Zelloberfläche sollte das Licht möglichst wenig reflektiert werden, sodass möglichst viele Photonen absorbiert werden. Dazu wird auf die Zelloberfläche eine Antireflexschicht aufgebracht, welche den grauen Siliziumzellen ihre typische schwarze Farbe bei monokristallinen Zellen bzw. blaue Farbe bei polykristallinen Zellen gibt.

¹ Dotierung: der Einbau von Fremdatomen in einen Halbleiter, um dessen elektrische Leitfähigkeit und Eigenschaften gezielt zu verändern.

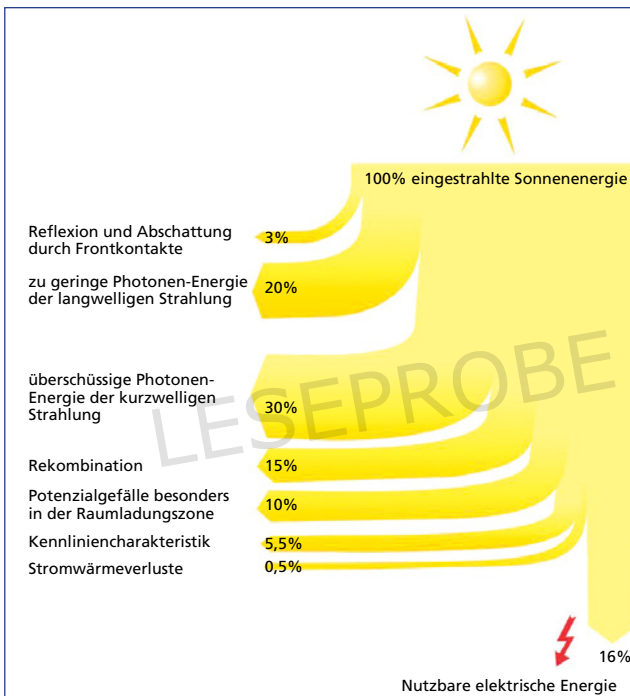
² Photon oder auch Lichtquant: in der Quantenphysik werden so die kleinsten Energieteilchen der elektromagnetischen Strahlung bezeichnet.

³ Mit Rekombination (Rückkehrprozess) wird die Bindung eines freien Elektrons mit einem Atom mit fehlendem Außenelektron bezeichnet. Ein gebundenes Elektron kann nicht zum Stromfluss beitragen.



■ **Abb. 7:** Aufbau und Energieumwandlung einer kristallinen Silizium-Solarzelle

Fällt Licht auf die Solarzelle, kommt es, wie oben beschrieben, zur Ladungsträgertrennung und bei Anschluss eines Verbrauchers zum Stromfluss. An der Solarzelle treten Verluste durch Rekombination und Reflexion sowie durch Abschattung der Frontkontakte auf. Der größte Energieanteil geht in Form von lang- und kurzwelliger Strahlung, die nicht genutzt werden kann, verloren. Langwellige Strahlung wandert so zum Beispiel durch die Zelle hindurch (Transmission) und trägt nicht zur Ladungsträgererzeugung bei. Solarzellen können aufgrund der materialtechnischen Eigenschaften nur einen Teil des gesamten Spektrums des Sonnenlichtes nutzen (siehe Abb. 30). Ein anderer Teil der ungenutzten Energie wird absorbiert und in Wärme umgewandelt. Am Beispiel einer kristallinen Silizium-Solarzelle werden in der folgenden Energiebilanz die einzelnen Verlustmechanismen dargestellt:



■ **Abb. 8:** Energiefluss in der Solarzelle

14 Zum Autor



Dipl.-Ing. Ralf Haselhuhn

Studium der Elektrotechnik an der Technischen Universität Dresden sowie von Energie- und Umweltmanagement an der Technischen Universität Berlin, danach als Energieberater und Fachplaner tätig. Seit 1995 Mitarbeiter des Berliner Büros der Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie (DGS) e. V. Tätigkeit als Gutachter, Sachverständiger, Fachplaner, Autor und Referent mit dem Schwerpunkt Photovoltaik. Vorsitz des Fachausschusses Photovoltaik der DGS. 2000 bis 2010 nebenberuflich Lehrtätigkeit für Photovoltaik an der Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin.

Veröffentlichungen: DGS-Leitfaden Photovoltaische Anlagen sowie diverse Konferenzbeiträge und Fachartikel zur Photovoltaik.

Mitarbeit in verschiedenen Arbeitsgruppen zu Fachregeln, Richtlinien und Normung bei der Deutschen Kommission Elektrotechnik (DKE) im DIN/VDE, BSW-Fachgruppen, im Redaktionsteam der Fachzeitschrift SONNENENERGIE, bei der EEG-Clearingstelle, fachliche Beratung im Bereich Photovoltaik zum Erneuerbare-Energien-Gesetz, ab 2010 Tagungsbeirat beim OTTI-Symposium Photovoltaische Solarenergie in Kloster Banz, ab 2009 Fachgremium Photovoltaik des Inter-Solar-AWARD.

Kontakt:

Ralf Haselhuhn

DGS – Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie Landesverband Berlin Brandenburg e. V.

Wrangelstraße 100

D-10997 Berlin

rh@dgs-berlin.de

LESEPROBE