



# 7

## Photovoltaik

Zur Versorgung von Taschenrechnern und Parkscheinautomaten haben sich Solarzellen auf dem Markt etabliert. Photovoltaik trägt in Deutschland erst weniger als ein Promille zur Stromerzeugung bei. Sie gilt jedoch als Schlüsseltechnologie zur künftigen Elektrifizierung von Entwicklungsländern.

### EINLEITUNG

Sonnenenergie kommt – in gespeicherter und stark verwandelter Form – auf der Erde vielfältig vor: z. B. als Kohle, Erdöl und Erdgas, als Biomasse wie Holz oder Stroh, ebenso als Windenergie. Nicht-solare Energiequellen sind lediglich Geothermie, Kernenergie und Gezeitenenergie.

Sonnenenergie lässt sich auch direkt nutzen: zur netzgebundenen oder autarken Stromerzeugung mit Hilfe von Photovoltaikanlagen, zur passiven Unterstützung des Wärmehaushalts von Gebäuden (Solararchitektur) und um mit Hilfe von Solarkollektoren Warmwasser und Heizungswärme zu gewinnen (thermische Solarenergie).

Bei der Photovoltaik (PV) wird in Solarzellen – dies sind spezielle Halbleiterbauelemente - Sonnenlicht (Photonen) direkt in elektrische Energie umgewandelt. Physikalisch zugrunde liegt der photovoltaische Effekt: Photonen mit geeigneter Energie können in Halbleitern (z. B. Silizium) Elektronen aus dem Atomverband zeitweise lösen und damit einen Stromfluss bewirken. Um höhere Leistungen zu erzielen, werden Solarzellen zu Modulen zusammengeschaltet.

Die Wechselwirkung zwischen Licht und Elektronen wurde bereits in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts beobachtet, jedoch erst 1905 von Albert Einstein theoretisch verstanden, indem er die Quantennatur des Lichts berücksichtigte. Bereits 1883 stellte der amerikanische Erfinder Charles Fritts eine Selen-Photovoltaizelle mit einem Wirkungsgrad von 1 bis



**Abb. 1**

Von Lehrern und Schülern konstruierte Photovoltaik-Sonnenuhr (maximale Leistung 2,35 kW<sub>peak</sub>) im Schulgarten der fränkischen Volksschule Hirschau. Sie erzeugt jährlich rund 2.100 kWh Strom und erinnert den Betrachter daran, wie sehr unsere Art der Zeitmessung mit den Rhythmen der Lichtintensität verknüpft ist.

2 % her. 1954 entwickelte ein Forscherteam in den Bell Telephone Laboratories eine Zelle auf der Basis des nahezu unerschöpflichen Elements Silizium. Diese Entdeckung war der Beginn der Photovoltaik. Die weitere Entwicklung wurde durch den Bedarf der Raumfahrt nach leichten, langlebigen und autarken Stromquellen sehr gefördert.

Fortschritte in der Halbleitertechnologie sowie ein wachsender Markt für PV-Anwendungen reduzierten kontinuierlich die Kosten von Solarzellen, so dass diese seit den 80er Jahren auch für zahlreiche

Anwendungen auf der Erde attraktiv wurden. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) fördert sowohl Forschung und Entwicklung neuer Solarzelltypen als auch Breiten-tests kommerzieller PV-Anlagen: zunächst das „1.000-Dächer-Programm“ (Anfang der 90er Jahre) und aktuell das 100.000-Dächer-Programm.

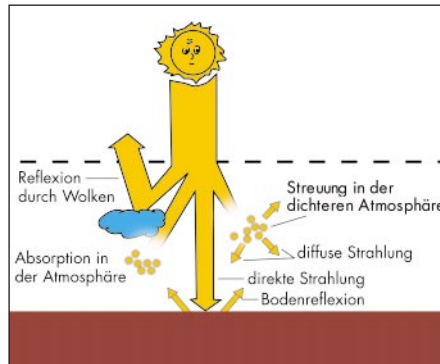
#### ZENTRALE BEGRIFFE

- > Sonnenenergie
- > Photovoltaischer Effekt
- > Solarzelle

# SOLARSTRAHLUNG

Die durch Kernfusion im Sonneninnern erzeugte Energie wird wesentlich als elektromagnetische Strahlung (Photonen) in den Weltraum emittiert und nur ein winziger Bruchteil erreicht die Erde. Die durchschnittliche Strahlungsleistung an der obersten Schicht der Erdatmosphäre beträgt  $1.370 \text{ W/m}^2$  und auf der Erdoberfläche  $1.000 \text{ W/m}^2$ . In der Lufthülle unterliegt ein Teil der Photonen Streu- und Absorptionsprozessen z. B. durch Wolken und Luftfeuchtigkeit (Abb. 2). Dieser Anteil des Lichts wird als diffus bezeichnet und macht in Mitteleuropa im Jahresdurchschnitt ca. 50% aus. Solarzellen nutzen direktes und diffuses Licht.

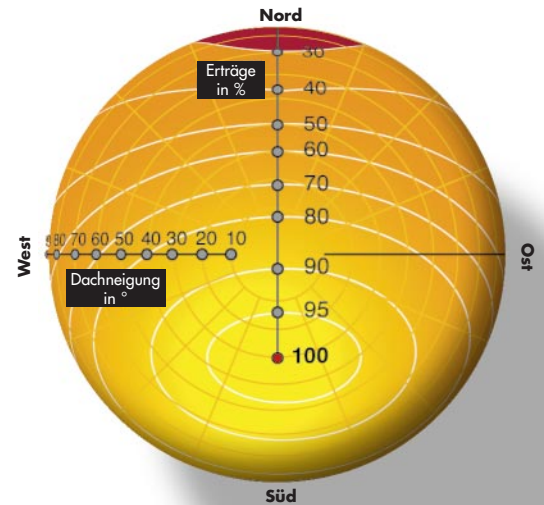
Die Dauer der jährlichen Sonnenstrahlung ist abhängig von der geografischen Breite. In Mitteleuropa liegt die Energie der Einstrahlung, bezogen auf eine horizontale Fläche, bei ca.  $1.000 \text{ kWh/m}^2$  im Jahr. Der Wert für die Sahara ist mehr als doppelt so hoch, denn aufgrund der kürzeren atmosphärischen Lichtwegstrecke in Äquatornähe und des Wüstenklimas werden weniger Photonen absorbiert oder reflektiert. Innerhalb Deutschlands schwankt dieser Jahreswert bei horizontalen Flächen zwischen ca.  $850 \text{ kWh/m}^2$  in Hamburg und ca.  $1.125 \text{ kWh/m}^2$  in Süddeutschland. Bei südorien-



**Abb. 2** Sonneneinstrahlung in der Atmosphäre; z. B. Luftmoleküle wie  $\text{O}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  und  $\text{CO}_2$  und Staub wechselwirken mit der Sonnenstrahlung.

tierten,  $30^\circ$  geneigten Flächen beträgt er  $1.050 \text{ kWh/m}^2$  (Hamburg) und  $1.350 \text{ kWh/m}^2$  (Süddeutschland).

Um unter den geografischen Bedingungen Mitteleuropas möglichst effizient Strom zu erzeugen, sollen PV-Module südwärts mit einer horizontalen Neigung von ca.  $30^\circ$  errichtet werden. Eine Nachführung der Modulflächen lohnt sich hierzulande aus wirtschaftlichen Gründen nicht, da diffuses Licht (Anteil: 50%) aus dem gesamten Himmelsraum auf die Solarzelle einfällt (Abb. 3).



**Abb. 3** Ausrichtung und Anstellwinkel der Module beeinflussen den Jahresertrag.

## ZENTRALE BEGRIFFE

- > Solare Einstrahlung
- > Direkte und diffuse Strahlung

# SOLARZELLEN

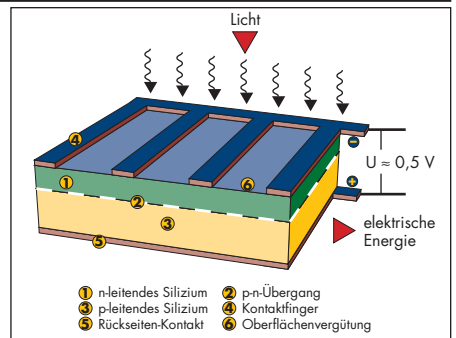
Anders als Metalle, bei denen eine äußere Spannungsquelle (z. B. Batterie) genügt, um Elektronen in eine gerichtete Bewegung zu versetzen, benötigen Halbleitermaterialien eine zusätzliche Energiezufuhr in Form von Wärme oder Licht, um stromleitend zu werden.

Solarzellen sind lichtdurchflutete Halbleiter, z. B. auf Siliziumbasis, mit einer „inneren Spannungsquelle“. Die notwendige Spannungsdifferenz resultiert aus zwei benachbarten Schichten, in denen jeweils negative Ladungsträger (n-Bereich) bzw. positive Ladungsträger überwiegen (p-Bereich) (Abb. 4). Um dies zu erreichen, werden in das Gitter aus Siliziumatomen in dünnen Oberflächenschichten geringe Mengen von Fremdatomen eingebaut (Dotierung). An der dem Licht zugewandten Seite (Abb. 4) werden in geringer Dosis Elemente eingebracht, durch die Halbleiter gut leiten (z. B. Phosphor, Arsen für den n-Bereich) und auf der anderen Seite solche, durch die sie Elektronen schlecht leiten (z. B. Bor, Indium). Zwischen diesen Schichten bildet sich ein schwach p-leitender Bereich aus. Die dotierten Bereiche wirken wie eine "Membran", d. h. Elektronen und

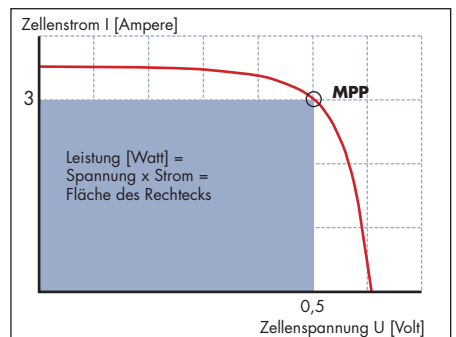
positive Ladung (Elektronenfehlstellen) können nur in unterschiedliche Richtungen abfließen.

Dringen Photonen (Licht) in diese Zelle ein, werden dabei Elektronen angeregt, nehmen Energie auf und können sich eine zeitlang frei bewegen. Diese freien Elektronen sind dann bewegte Ladung, also elektrischer (Gleich-)Strom. Sobald das freie bewegte Elektron dann auf eine Elektronenfehlstelle (positive Ladung) trifft, wird es wieder fest in die Atomgitterstruktur eingebunden. Daher fließt der Strom nur, solange ständig neue Photonen folgen.

Die Leistung einer Solarzelle ist vor allem abhängig von der Lichtintensität sowie der Flächengröße der Zelle und kann aus der Kennlinie abgelesen werden (Abb. 5). Der Wirkungsgrad  $\eta$  ist definiert als das Verhältnis der von der Zelle abgegebenen elektrischen Leistung zur senkrecht auf die Zelle einfallenden Lichtleistung. Für die Erdoberfläche liegt das Maximum des Wirkungsgrades für einfache Solarzellen bei ca. 35%.



**Abb. 4** Prinzipieller Aufbau einer Solarzelle mit einem die Ladungsträger trennenden p-n-Übergang. Über Metallkontakte an Unter- und belichteter Oberseite kann der Stromkreis geschlossen werden.



**Abb. 5** Strom-Spannungskennlinie einer Solarzelle. Diese Zelle erbringt typischerweise eine Leistung von ca.  $1,5 \text{ Watt}$  (ca.  $0,5 \text{ Volt}$  Spannung bei  $3 \text{ Ampere}$  Strom). Der „MPP“ ist der Punkt der maximalen Leistung.

## ZENTRALE BEGRIFFE

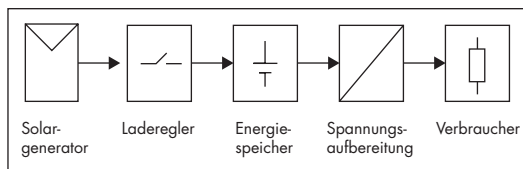
- > Halbleiter
- > Dotierung
- > Wirkungsgrad

## Solarzelltypen

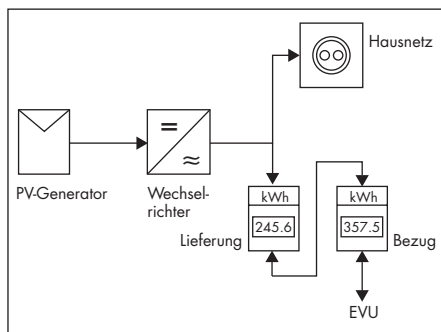
Bislang wurden fast alle Solarzellen aus Silizium gefertigt. Den größten Marktanteil (ca. 80%) haben mono- und polykristalline Siliziumzellen, bei denen aus Kristallblöcken ca. 0,3 mm dicke, häufig 10 x 10 cm große Scheiben herausgesägt werden. Sie weisen einen hohen Wirkungsgrad auf, so dass sie pro Flächeneinheit leistungsstärker sind. Solarzellen aus amorphem Silizium (Marktanteil ca. 20%) können dagegen kosten- und materialsparend hergestellt werden, indem Silizium wenige tausendstel Millimeter dick auf ein Substrat aufgedampft wird. Sie sind allerdings weniger leistungsstark. Wie alle Solarzellen, die mit Hilfe von Dünnschichttechnologien produziert werden (Abb. 6), können diese großflächig hergestellt werden, wodurch sich der Aufwand für die Verschaltung der Zellen verringert.

## Photovoltaik-Module

Um nutzbare Leistungen zu erzielen, werden typischerweise 20 – 40 Solarzellen zu einem Modul (Größe ca. 1 m x 0,5 m) zusammengeschaltet. Bei einer Parallelschaltung der Zellen vergrößert sich die Stromstärke bei gleichbleibender Spannung. Durch Serienschaltung wird eine Spannungserhöhung bei gleichbleibender Stromstärke erreicht. Hierbei bestimmt die Solarzelle, die der geringsten



**Abb. 7** Prinzipieller Aufbau einer autarken Anlage



**Abb. 8** Prinzipieller Aufbau einer netzgekoppelten Anlage

Lichtintensität ausgesetzt ist, den Stromfluß und damit die Leistung des gesamten Moduls. Schon kleine Schatten, z. B. von Antennen, führen daher zu deutlichen Ertragseinbußen. Auf dem deutschen Markt wurden 1999 rund 170 verschiedene Modultypen deutscher und internationaler Hersteller angeboten.

## Autark und netzgekoppelt betriebene Systeme

Photovoltaikanlagen werden autark oder netzgekoppelt betrieben. Autark betriebene Systeme (Abb. 7) benötigen in der Regel einen Akku (wiederaufladbare Batterie). Mittlerweile gibt es Energiespeichersysteme, welche die durch unstete Einstrahlung und Energienachfrage bedingten unregelmäßigen Lade- und Entladeströme unabhängig vom jeweiligen Ladezustand gut verkraften. Ein solcher Speicher beansprucht jedoch 30-40% der Gesamtinvestitionskosten einer PV-Anlage.

Netzgekoppelte Anlagen (Abb. 8) werden mit einem Wechselrichter ausgestattet, der die Modul-Gleichspannung in 230 Volt-Wechselspannung umformt. Im Bereich kleiner Anlagenleistungen von 1-5 kW<sub>peak</sub> werden PV-optimierte Wechselrichter mit Wirkungsgraden um 90% angeboten.

Seit 1991 wurden im Rahmen des „1000 Dächer Programms“ ca. 2.250 netzgekoppelte PV-Anlagen getestet. Die Auswertung ergab, dass in Deutschland der durchschnittliche Jahresertrag einer solchen Anlage bei 720 kWh pro installierter Modulleistung kW<sub>peak</sub> liegt.

Bezeichnung	Kristallin	Dünnschicht	Maximaler Zell-Wirkungsgrad im Labor (1-4 cm <sup>2</sup> )	Maximaler Zell-Wirkungsgrad - Serienfertigung (100-150 cm <sup>2</sup> )
Monokristallines Silizium	x		25%	15-17,5%
Polykristallines Silizium	x		21%	14-15%
Amorphes Silizium		x	12%	5-7%
Kupfer-Indium-Selenid CIS (CIGS)		x	11-18%	10-13% Pilotproduktion
Cadmium-Tellurid (CdTe)		x	8-15%	8-9% Pilotproduktion
Galliumarsenid (GaAs)		x	23-30%	Kleinserienproduktion (Weltraumnutzung)

**Abb. 6** Wirkungsgrade marktrelevanter Solarzellentypen mit unterschiedlichen Halbleitermaterialien (technischer Stand 1999)

## ZENTRALE BEGRIFFE

- > PV-Modul
- > Autarkie
- > Netzkopplung

## UMWELT

Die Herstellung von Solarzellen ist aufwendig. Der Einsatz giftiger Produktionsstoffe, wie z. B. Cadmium oder Arsen bei

Komponente	Inhaltsstoffe (typische Werte)	Ungefährer Massenanteil (ohne Rahmen)
Glas (2-10 mm)	SiO <sub>2</sub> ; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; CaO; MgO; Na <sub>2</sub> O; K <sub>2</sub> O; SO <sub>3</sub>	30-60%
Einbettmasse (1-2 mm)	EVA, Acrylate, (PVB)	5-10%
Solarzelle 200-300 µm	Silizium	5-10%
Verbinder 0,04x2-0,2x5 mm <sup>2</sup>	Cu (Sn, Pb, Ag), Al (Mg, Si)	1%
Kabel 1,5-2,5 mm <sup>2</sup>	Cu, PVC, Gummi, Silikon, PTFE	1%
Versiegelung, Kleber	Silikone, Butyl, Polysulfide, Cyanacrylate	0-10%
Rückseitenmaterial	fluorierte Kohlenwasserstoffe, Polyester	0-10%

**Abb. 9** Ungefähre Massenanteile bei PV-Modulen aus Silizium (Auswahl)

Dünnschichtsolarzellen, erfordert sichere Verfahren zum Schutz der Umwelt und der Gesundheit der Beschäftigten. Die Produktion kristalliner Siliziumzellen ist vergleichsweise material- und energieintensiv. Diese Zellen benötigen 2 – 6 Jahre, um so viel Energie zu erzeugen wie zu ihrer Herstellung benötigt wurde. Bei amorphen Zellen reichen hierfür 1 – 3½ Jahre. Bei der von den Herstellern garantierten Mindest-Lebensdauer der Solarzellen von 20 - 25 Jahren bedeutet dieses für beide Zelltypen eine positive Energiebilanz.

Trotzdem werden auch PV-Module irgendwann zu Abfall. Im Labor wurden bereits Recyclingstrategien erprobt. Bei einer Sammlung der PV-Module, sortiert nach Herstellern, ließen sich diese – bei einer geringfügigen Verschlechterung des Wirkungsgrades – zurückgewinnen, was die Ökobilanz des Produkts verbessern würde. Andere Studien sehen eine einfache Trennung und Wiederverwertung der Modulbestandteile vor (Abb. 9, insbesondere Glas, Silizium).

## ZENTRALE BEGRIFFE

- > Ökobilanz
- > Modulrecycling

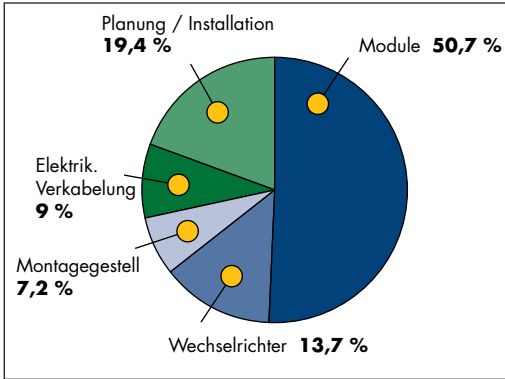
Solarzellen können zu Modulen beliebiger Leistungsklassen verschaltet werden. Als Batterieersatz in Kleingeräten wie Uhren und in Kombination mit einem Akku in Lampen, Wasserpumpen, Verkehrssignalen und Telekommunikationseinrichtungen haben PV-versorgte Geräte bereits heute einen festen Marktanteil erobert.

Bei der Stromversorgung entlegener Gebäude oder Dörfer ohne Netzanschluss ist eine PV-Anlage häufig die wirtschaftlich günstigste Lösung. In Deutschland ist ein Anschluss über längere Distanzen an das öffentliche Stromnetz kostspielig und in den nicht-elektrifizierten, ländlichen Gebieten Asiens, Afrikas und Lateinamerikas oft überhaupt nicht realisierbar.

Hier ist das Konkurrenzsystem nicht das Stromnetz, sondern ein Dieselgenerator mit Stromgestehungskosten auch in günstigen Fällen von mindestens 2,50 DM je kWh. PV-Anlagen haben in diesem Wettbewerb einen Kostenvorteil und für die Umwelt vorteilhaften, geräusch- und schadstofffreien Betrieb.

Aufgrund öffentlicher Fördermittel des Bundes und der Länder, des Stromeinspeisegesetzes sowie mit Hilfe der kostenorientierten Vergütung einiger Dutzend

Stadtwerke haben in Deutschland netzgekoppelte Hausdach-Anlagen in den 90er Jahren eine größere Verbreitung gefunden. Eine netzgekoppelte Photovoltaikanlage auf einem Einfamilienhaus liegt typischerweise in der Leistungsklasse von 2 bis 3 kW<sub>peak</sub> und kostet insgesamt ca. 22.000 – 30.000 DM (Stand 1999, Abb. 10). Daraus errechnen sich Stromerzeugungskosten, die aktuell zwischen 1,40 DM und 1,80 DM (ohne Fördermittel) pro erzeugter Kilowattstunde liegen. Durch Massenfertigung von Zellen und Modulen ist mittelfristig jedoch eine Kostenreduktion von 50% - 80% möglich. So haben in den vergangenen beiden Jahren große internationale Öl- und Energiekonzerne, wie z. B. Shell und BP, beträchtliche Mittel in die PV-Massenfabrikation investiert. Die produzierenden Firmen sind vorwiegend in den USA, Deutschland und Japan beheimatet. Die Weltjahresproduktion wird für 1998 auf 135 MW<sub>peak</sub> bzw. 2,5 Millionen PV-Module geschätzt.



**Abb. 10** Die Investitionskosten einer netzgekoppelten PV-Anlage betragen je nach Anlagengröße ca. 10.000 bis 16.000 DM pro kW<sub>peak</sub>

## ZENTRALE BEGRIFFE

- > Kosten
- > Marktentwicklung

## LITERATUR

Ein ausführliches Literaturverzeichnis kann kostenlos bei BINE angefordert werden

- Arbeitskreis Schulinformation Energie, Frankfurt/Main (Hrsg.): 11 Experimente zur Photovoltaik. Schülerheft. Lehrerheft. Juni 1996
- Staiß, F.; Knaupp, W.: Photovoltaik – Ein Leitfaden für Anwender. BINE-Informationspaket, TÜV Verlag, Köln 1999, ISBN 3-8249-0519-1, 29,- DM
- Forum für Zukunftsenergien, Bonn (Hrsg.): Informationsmaterialien für Lehrer und Schüler, 10 Arbeitsblätter und Arbeitsvideo, Bonn 1998, 79,- DM

## Bildung & Energie im Web

<http://bine.fiz-karlsruhe.de/>

Unsere Informationen für Schule, Beruf und Erwachsenenbildung finden SIE unter: <http://bine.fiz-karlsruhe.de/> Dort ist in der Rubrik "Service" (Infoplus) eine aktuelle Linkliste zum Thema Windenergie eingestellt.

## Ergänzende Informationen

Info-Mappen / Download

Zu den behandelten Themen ist jeweils eine kostenlose Mappe mit vertiefenden Informationen bei BINE erhältlich. Alle Abbildungen stehen für Bildungszwecke unter <http://bine.fiz-karlsruhe.de> in der Rubrik "Service" kostenlos zum Download zur Verfügung oder können gegen eine Bearbeitungsgebühr von 30,-DM (V-Scheck) bei BINE angefordert werden.

## Herausgeber



**FACHINFORMATIONSZENTRUM  
KARLSRUHE**

Gesellschaft für wissenschaftlich-technische Information mbH

76344 Eggenstein-Leopoldshafen

## Redaktion

Uwe Milles

## ISSN

1438-3802

## Nachdruck

Nachdruck des Textes zulässig bei vollständiger Quellenangabe und gegen Zusendung eines Belegexemplares - Nachdruck der Abbildungen nur mit Zustimmung der jeweils Berechtigten.

## Stand

Oktober 1999

## BINE - INFORMATIONEN UND IDEEN ZU ENERGIE & UMWELT

BINE ist ein vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderter Informationsdienst des Fachinformationszentrums Karlsruhe.

BINE informiert über neue Energietechniken und deren Anwendung in Wohnungsbau, Industrie, Gewerbe und Kommunen.

BINE bietet Ihnen folgende kostenfreie Informationsreihen

- Projekt-Infos
- Profi-Infos
- Bildung & Energie

### Nehmen Sie mit uns Kontakt auf,

wenn Sie vertiefende Informationen, spezielle Auskünfte, Adressen etc. benötigen, oder wenn Sie allgemeine Informationen über neue Energietechniken wünschen.



**BINE**

Informationsdienst

Fachinformationszentrum Karlsruhe

Büro Bonn

Mechenstr. 57

53129 Bonn

Fon: 0228 / 9 23 79-0

Fax: 0228 / 9 23 79-29

eMail: [bine@fiz-karlsruhe.de](mailto:bine@fiz-karlsruhe.de)

Internet: <http://bine.fiz-karlsruhe.de>