

# Die bessere Ökobilanz von Solarstrom

Wie stark belastet Solarstrom die Umwelt? Einen grossen Einfluss haben der Herstellort der Photovoltaik-Anlagen, die technologischen Fortschritte bei der Fertigung und dem Wirkungsgrad der Solarmodule sowie die Konstruktion der Modulbefestigung. Die Berücksichtigung all dieser Entwicklungen führt zu einer noch besseren Ökobilanz von Solarstrom als bisher angenommen.

Von Daniel Rufert und Arthur Braunschweig

Als Grundlage für die schweizerische Energiepolitik 2050 liess das Bundesamt für Energie (BFE) 2012 einen Ökobilanz-Vergleich verschiedener Stromerzeugungsarten erstellen [1]. Diese Studie wird durch die vorliegende Publikation bezüglich Photovoltaik-Anlagen (PV-Anlagen) in wesentlichen Punkten aktualisiert und korrigiert [2]. Als Ergebnis zeigt sich, dass die Treibhausgas-Emissionen von Solarstrom um 58 % tiefer liegen, als in der BFE-Studie dargestellt.

Angesichts der technischen Fortschritte in der Photovoltaik ist es nicht sinnvoll, künftigen Solarstrom auf Basis eines vergangenen Technologieniveaus zu beurteilen. In der vorliegenden Analyse wird deshalb davon ausgegangen, die beste heute eingesetzte Technologie stelle eine geeignete Grundlage dar, um künftige Photovoltaik zu beurteilen. Zu diesem Zweck sind einzelne Ökobilanz-Elemente überarbeitet worden.

DR. ARTHUR BRAUNSCHWEIG  
Geschäftsführender Partner,  
E2 Management Consulting AG, Zürich.

DR. DANIEL RUFER  
Geschäftsführender Partner,  
E2 Management Consulting AG, Zürich.

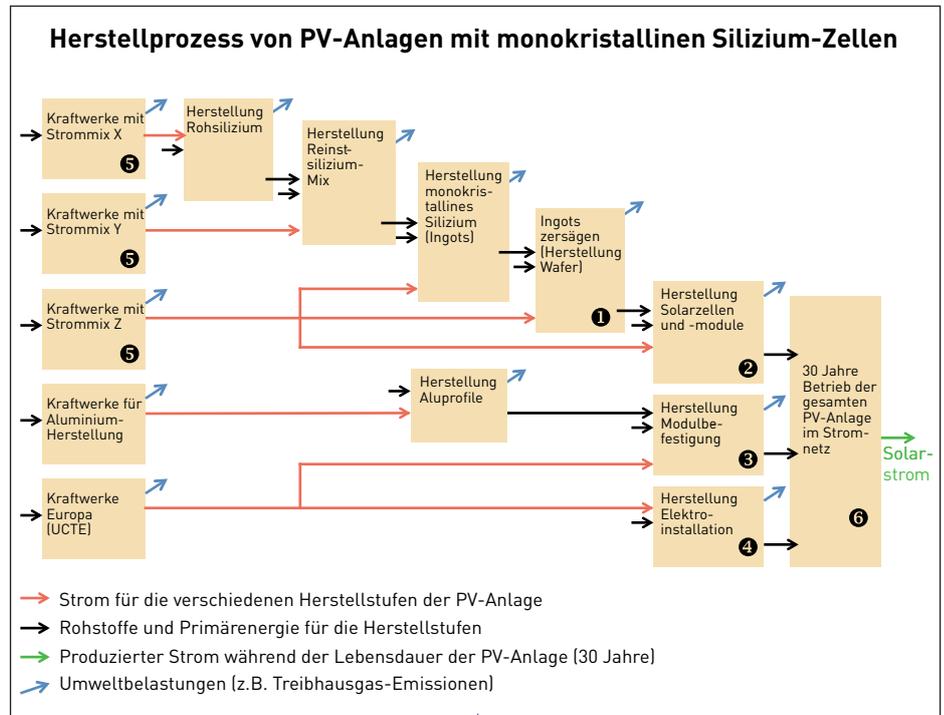


Abbildung 1: Die Umweltbelastung von Solarstrom hängt insbesondere von den Herstellstufen 1 bis 6 ab.

## Monokristalline Zellen

Bei PV-Anlagen mit hohem Wirkungsgrad wird in [1] zwischen mono- und polykristallinen Siliziumzellen sowie Cadmiumtellurid-Zellen unterschieden. Die vorliegende Untersuchung beschränkt sich beispielhaft auf Anlagen mit monokristallinen Zellen. Die dabei getroffenen Annahmen und Aktualisierungen gelten grundsätzlich auch für polykristalline Zellen. Die Cadmiumtellurid-Technologie ist für die Schweiz kaum relevant, denn ihr Marktanteil liegt unter 1%.

## Frühere Ökobilanz-Ergebnisse

Der Herstellprozess von PV-Anlagen mit monokristallinen Zellen ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Für alle Herstellstufen existieren dank der Datenbank Ecoinvent [3] detaillierte Ökobilanzdaten, deren Grundlagen weitgehend aus den Jahren 2005 oder früher stammen. Aufgrund dieser Daten ergibt sich für Solarstrom mit europäischen Modulen eine Umweltbelas-

tung von 83 g Treibhausgas-Emissionen pro kWh (Abbildung 2, Säule A). Wichtige technologische Entwicklungen in den Herstellstufen 1 bis 6 gemäss Abbildung 1 erforderten eine Aktualisierung dieser Ökobilanz.

## Ökobilanz-Studie für das BFE

Bauer et al. [1] nahmen gegenüber der früheren Solarstrom-Ökobilanz folgende Anpassungen vor:

- Waferherstellung 1: Reduktion der Dicke der Wafer (monokristalline Silizium-Scheiben) von 270 µm auf die heute üblichen 190 µm, was den Material- und Energieverbrauch sowie die Umweltbelastungen der Vorstufen reduziert.
- Strommix 5: Aktualisierung des Strommixes für die in Europa hergestellten Solarmodule (inkl. Bezug eines Teils des Reinstsiliziums aus den USA).
- Strommix 6: Annahme, dass 34% der in der Schweiz eingesetzten Module in China und 66% in Europa produziert

werden. Der chinesische Strommix hat einen hohen Anteil an Kohlestrom, was zu bedeutend höheren Umweltbelastungen führt.

Die Solarstrom-Ökobilanz gemäss Studie [1] ist in Abbildung 2, Säule B, dargestellt. Dabei wurde bei den PV-Anlagen von 10 % Laminat (integrierte, resp. Indach-Anlagen) und 90 % Paneelen (Aufdach- und Flachdach-Anlagen) ausgegangen. Diese Ökobilanz ergibt 97 g Treibhausgas-Emissionen pro kWh Solarstrom. Da die Studie [1] explizit als Basis für die Energiestrategie 2050 der Schweiz in Auftrag gegeben wurde, passen verschiedene Annahmen nicht zu dieser Aufgabenstellung. So wurden wichtige technologische Fortschritte der letzten 5 bis 10 Jahre nicht berücksichtigt und zu erwartende Entwicklungen nicht antizipiert. Zudem wurde mit einem mittleren Netzverlust von 8,8 % des produzierten Stroms gerechnet, was der unrealistischen Annahme entspricht, dass Solarstrom künf-

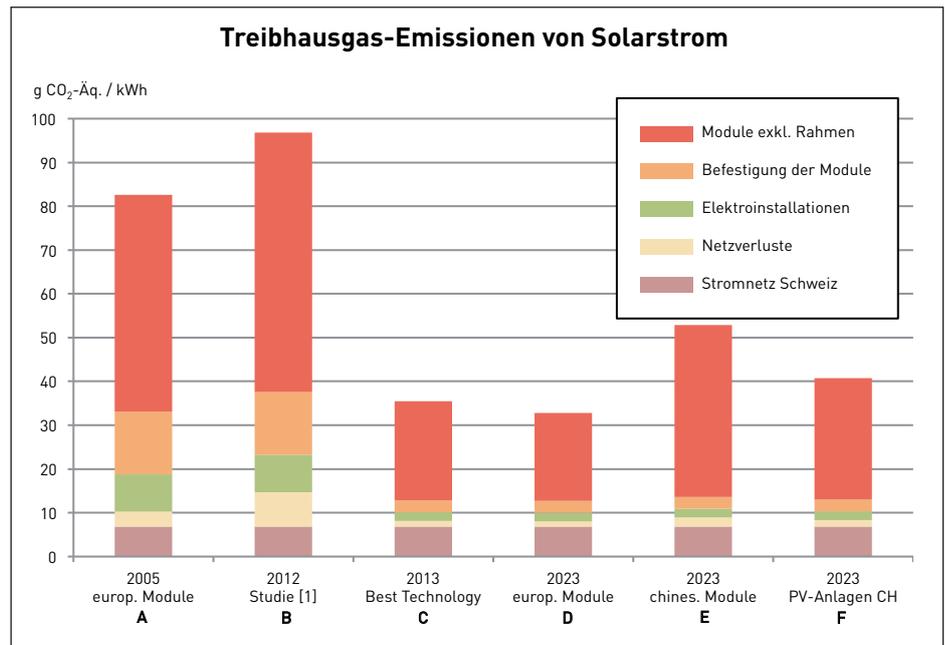


Abbildung 2: Die Technologie-Entwicklung beim Solarstrom verbessert die Ökobilanz.

## Quellen

- [1] Bauer Ch., Frischknecht R., Eckle P., Flury K., Neal T., Papp K., Schori S., Simons A., Stucki M., Treyer K. (2012) Umweltauswirkungen der Stromerzeugung in der Schweiz. Im Auftrag des Bundesamts für Energie BFE.
- [2] Braunschweig A., Rufer D. (2013) Ökobilanz von Solarstrom. [www.e2mc.com](http://www.e2mc.com) → Projekte → Publikationen.
- [3] Jungbluth N., Stucki M., Frischknecht R. (2009), Vol. ecoinvent report No. 6-XII. ESU-services Ltd., Uster.
- [4] Huber H., Metzler Th., Rufer D. (2013) Plusenergie-Haus. Faktor Verlag, ISBN 978-3-905711-21-9.
- [5] Datenblätter Solar-Module von SunPower, [www.sunpowercorp.de](http://www.sunpowercorp.de)
- [6] Itten R., Frischknecht R., Stucki M. (2013) Life Cycle Inventories of Electricity Mixes and Grid. ESU-services, Uster.
- [7] Bucher Ch. (2012) Auswirkungen eines hohen Photovoltaikanteils auf das Niederspannungsnetz. 10. Nationale PV-Tagung, Baden.
- [8] International Technology Roadmap for Photovoltaic, Results 2012, [www.itrpv.net](http://www.itrpv.net).

tig nur aus Grossanlagen ins Hochspannungsnetz eingespeist wird.

### Best Technology 2013

Wie hoch ist die Umweltbelastung von Solarstrom in der Schweiz, der durch eine PV-Anlage gemäss neuestem Stand der Technik produziert wird? Um diese Ökobilanz zu berechnen, haben die Autoren das Ökobilanz-Modell aus [3] in folgenden Punkten aktualisiert.

- Waferherstellung ❶: Wie in der BFE-Studie [1] wurde die Dicke der Wafer mit aktuell üblichen 190 µm eingesetzt.
- Zellen- und Modulherstellung ❷: Technologische Fortschritte bei der Herstellung der Solarzellen und -module bewirkten in den letzten Jahren nahezu eine Verdoppelung des pro m<sup>2</sup> produzierten Solarstroms: Während in der früheren Ökobilanz [3] und in der Studie [1] noch mit einem Jahresertrag von 125 kWh/m<sup>2</sup> gerechnet wurde, kann heute bei den leistungsstärksten Modulen von 232 kWh/m<sup>2</sup> ausgegangen werden. Dieser Wert basiert auf dem im Jahr 2012 gemessenen Jahresertrag einer PV-Anlage in CH-8700 Küsnacht [4] mit Ausrichtung nach Südwest und einer Neigung von 15°. Der gemessene Stromertrag wurde entsprechend dem Wirkungsgrad der in Küsnacht eingesetzten Module auf derzeit erhältliche, noch effizientere Module umgerechnet [2], [5]. Diese Ertragswerte entsprechen etwa dem schweizerischen Durchschnitt leistungsstarker heutiger PV-Anlagen.

- Modulbefestigung ❸: In der vorliegenden Ökobilanz [2] wurde von 50 % Flachdächern, 40 % Montagen auf bestehenden Schrägdächern und 10 % Dach-integrierten PV-Anlagen ausgegangen. Bei all diesen Typen von Montagesystemen konnte durch Konstruktionsoptimierung die eingesetzte Materialmenge (Alu-Profilen) in den letzten Jahren stark gesenkt werden. Zudem ist es heute möglich, den Anteil von Recycling-Aluminium im eingesetzten Material von 32 % auf 80 % zu erhöhen, was eine zusätzliche kleine Verbesserung der Gesamtbilanz ergibt.
- Elektroinstallationen ❹: Diese umfassen die Elektrokabel sowie den Wechselrichter, welcher den Gleichstrom in Wechselstrom umwandelt. Die technische Entwicklung ermöglichte, die Gleichspannung von 50 auf über 600 Volt zu erhöhen, was die für die Kabel notwendige Kupfermenge um über 80 % reduzierte. Auch die heute wesentlich kleineren Wechselrichter senken die Umweltbelastungen durch Elektroinstallationen.
- Strommix ❺: Für die Ökobilanz «Best Technology 2013» wurde für Solarmodule mit dem Herstellort Europa, d.h. mit europäischem Strommix, gerechnet. Weitere Herstellorte sind in den Ökobilanzen für das Jahr 2023 berücksichtigt.
- Stromnetz ❻: Wie in der früheren Ökobilanz [3] und der Studie [1] wird davon ausgegangen, dass die PV-Anlage während 30 Jahren Strom herstellt und ins schweizerische Netz einspeist. Erstel-

lung, Betrieb und Entsorgung des Stromnetzes verursachen eine mittlere Umweltbelastung von knapp 7 g CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro verbrauchte kWh des heutigen, konventionell erzeugten Stroms [1]. Im Vergleich dazu beansprucht dezentral eingespeister Solarstrom – selbst bei hohem Solarstromanteil – das Hoch- und Mittelspannungsnetz nur kurzzeitig und das Niederspannungsnetz nur teilweise. Da Solarstrom auf das Netz angewiesen ist, wird diesem trotzdem die volle Netz-Umweltbelastung (6,8 g CO<sub>2</sub>-Äq./kWh) angerechnet.

- Netzverluste ⑥: Im schweizerischen Stromnetz fallen zudem Netzverluste in Höhe von 8,8% des von den Kraftwerken auf Hochspannungsebene produzierten Stroms an [6]. Wesentlich geringer sind diese Verluste bei Solarstrom, der dezentral ins Niederspannungsnetz eingespeist und weitgehend im gleichen Netzabschnitt verbraucht wird. Die Abbildung 3 gemäss der Studie Bucher [7, Seite 24] zeigt: Bei einer Einspeisung von bis zu 15% Solarstrom durch moderne Wechselrichter entstehen im Niederspannungsnetz keine Netzverluste durch Solarstrom. Bei einem 30%-igen Solarstromanteil sind die Netzverluste noch immer weniger als halb so hoch wie bei

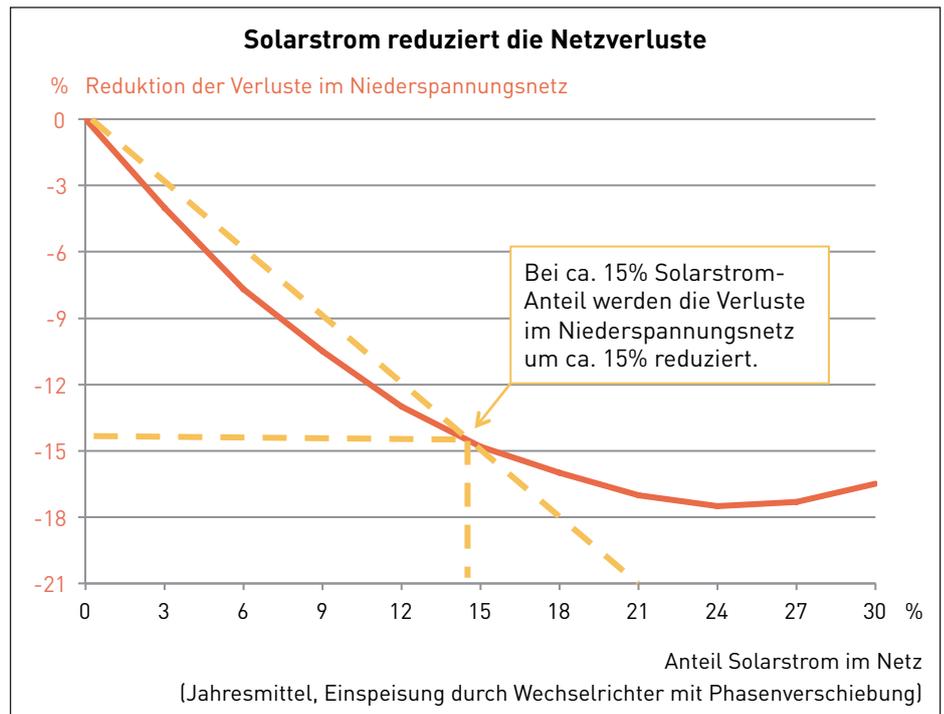


Abbildung 3: Ein Solarstrom-Anteil bis 15% verursacht keine Netzverluste, sondern reduziert sie [7].

zentral eingespeistem Strom. In der vorliegenden Ökobilanz [2] wird beim Solarstrom deshalb mit Netzverlusten von 4,4% gerechnet.

Die Ergebnisse dieser Ökobilanz «Best Technology 2013» sind in Abbildung 2,

Säule C, dargestellt. Gegenüber der früheren Ökobilanz [3], die ebenfalls auf dem Produktionsstandort Europa basiert (Säule A), reduziert sich die Umweltbelastung von Solarstrom um 57% auf 36 g Treibhausgas-Emissionen pro kWh.

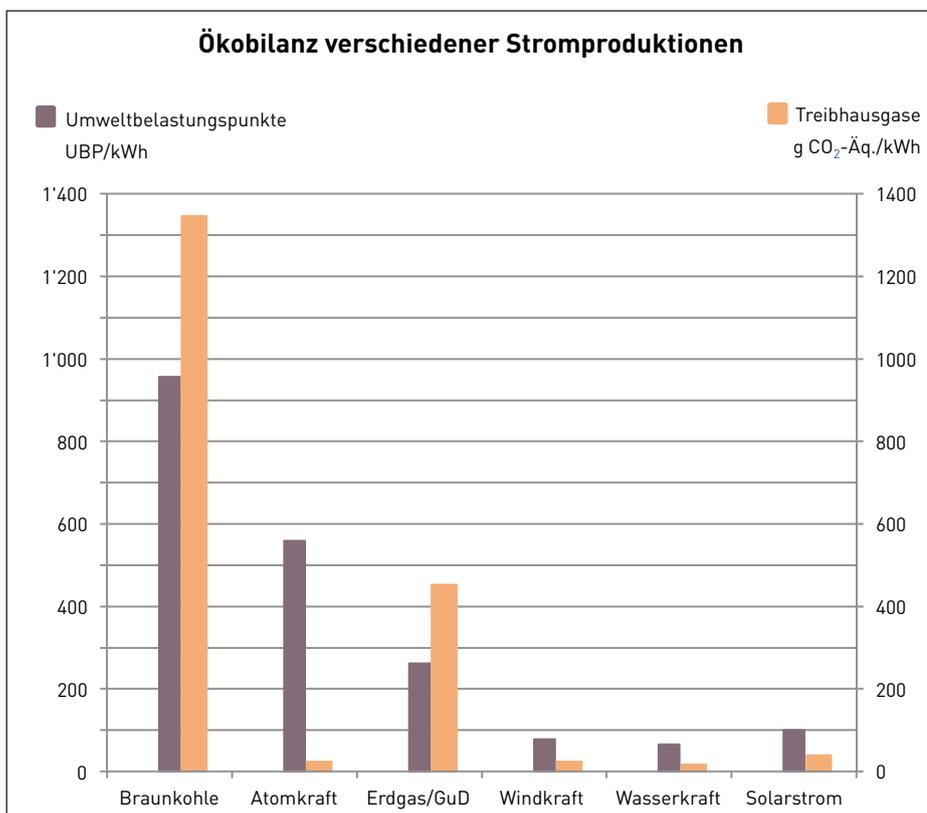


Abbildung 4: Solarstrom gehört zu den umweltschonendsten Energien. Quellen: Solarstrom [2]; Braunkohle [3]; übr. Werte für Umweltbelastungspunkte [3]; übr. Werte für Treibhausgase [1]

### PV-Anlagen im Jahr 2023

Gemäss der neuen Energiestrategie des Bundes soll der Solarstromanteil von heute 0,6% bis im Jahr 2050 auf 20% steigen. Die dafür notwendigen PV-Anlagen werden also erst in den nächsten Jahrzehnten erstellt. Massgeblich für die Umweltauswirkungen des Solarstroms wird somit die PV-Technologie in zehn Jahren und später sein. Zur Abschätzung einer Solarstrom-Ökobilanz 2023 werden die folgenden Annahmen getroffen:

- Die in [1] erwähnten Projekte zum Recycling des Sägestaubes, der beim Sägen der Silizium-Wafer entsteht, sind bis 2023 umgesetzt. Dies reduziert den Einsatz von monokristallinem Silizium um 50%. Weitere erwartete Verbesserungen gemäss der Studie [8] sind nicht berücksichtigt.
- Bezüglich Wirkungsgrad der Solarmodule, d.h. der pro m<sup>2</sup> erzeugten Strommenge, wird die «Best Technology 2013» bis 2023 zum Branchendurchschnitt. Dies ist eine vorsichtige Annahme, denn Studie [8] zeigt, dass bei der Modul-Ef-

fizienz weiteres Verbesserungspotenzial besteht.

- Bei den Befestigungssystemen und Elektroinstallationen für die Solarmodule werden gegenüber dem heutigen Branchenstandard keine Verbesserungen angenommen.
- Beim Strommix zur Herstellung der Solarmodule geht die Studie [1] von 66 % europäischer und 34 % chinesischer Produktion aus. Vorliegend wird nur 50 % europäische, aber 10 % philippinische und 40 % chinesische Herstellung angenommen. Diese Annahmen sind vorsichtig, denn es bestehen Anzeichen, dass chinesische PV-Produktionen in andere Länder verlagert werden. Zudem wird die in mehreren Ländern geplante Förderung umweltschonender Stromproduktion im Strommix nicht berücksichtigt.

Die Säulen D, E und F in Abbildung 2 zeigen die Ergebnisse dieser Solarstrom-Ökobilanz 2023. Säule E zeigt im Vergleich zu Säule D den Einfluss des Produktions-

standortes China mit hohem Anteil an Kohlekraftwerken im Strommix. Die Säule F basiert auf dem oben erwähnten Herkunftsmix für PV-Anlagen in der Schweiz und ergibt 41 g CO<sub>2</sub>-Äq./kWh Solarstrom. In Studie [1] wird dem Solarstrom ein hoher Verbrauch seltener Rohstoffe angelastet: 53 mg Sb-Äq./kWh bei Cadmiumtellurid-Zellen. Da solche Zellen in der Schweiz kaum eingesetzt werden, vermindert sich der Wert auf 14 mg Sb-Äq./kWh bei heutigen Siliziumzellen. Der Silberbedarf zur Herstellung von Siliziumzellen wird aber gemäss Studie [8] in den nächsten Jahren um 75 % reduziert und in den Jahren ab 2015 durch das weniger seltene Kupfer ersetzt. Somit wird der Verbrauch seltener Rohstoffe bei Solarstrom etwa gleich gross sein wie bei allen anderen Stromerzeugungsarten (1-2 mg Sb-Äq./kWh).

#### Fazit

Die vorliegenden Ökobilanz-Berechnungen ergeben, dass für die künftige Solarstrom-Versorgung der Schweiz mit Treib-

hausgas-Emissionen von 41 g pro kWh zu rechnen ist. Die in Studie [1] aufgeführte Umweltbelastung von 97 g pro kWh ist wesentlich zu hoch, weil wichtige technologische Entwicklungen bei den Photovoltaik-Anlagen und Besonderheiten der dezentralen Stromeinspeisung nicht berücksichtigt wurden. Im Gegensatz zu den Schlussfolgerungen von Studie [1] wird sich zudem der Verbrauch seltener Rohstoffe bei Solarstrom künftig kaum von demjenigen anderer Stromerzeugungsarten unterscheiden.

Energiepolitische Schlussfolgerungen können der Abbildung 4 entnommen werden: Der Ökobilanz-Vergleich verschiedener Stromproduktionen zeigt, dass Strom aus Wind, Wasser und Photovoltaik die tiefsten Umweltbelastungen aufweist. Die Unterschiede zwischen diesen drei erneuerbaren Stromerzeugungsarten sind erheblich kleiner geworden. Es gilt, insbesondere das grosse Potenzial von Solarstrom in der Schweiz rasch zu erschliessen, um die Produktion von nicht erneuerbarem, umweltbelastendem Strom zu ersetzen. ■

Anzeige

## Die Baumesse. Wo man schaut, bevor man baut.

Quelle: arento.ch

 modernisieren  
**bauen**

5.–8.9.2013  
Messe Zürich

Do–So 10–18 | [bauen-modernisieren.ch](http://bauen-modernisieren.ch)

**25% RABATT** auf Onlineticket

Gutschein-Nr. **BM13PRANZ0049** nur online  
einlösbar unter [www.bauen-modernisieren.ch/ticket](http://www.bauen-modernisieren.ch/ticket)