

Vermindert Fotovoltaik die Umweltintensität des Schweizer Stroms?

Erkenntnisse aktueller Ökobilanzen zu Strom aus Solarzellen

Ist der Einsatz von Fotovoltaik in der Schweiz – insbesondere vor dem Hintergrund der sich abzeichnenden Klimaerwärmung und der Diskussionen um geeignete Standorte für die Endlagerung radioaktiver Abfälle – aus ökologischer Sicht sinnvoll? Mit aktuellen Ökobilanzen kann die Fragestellung auf eine sachliche Ebene verschoben und eine qualifizierte Antwort gefunden werden.

Matthias Stucki, Rolf Frischknecht

Mit einem Anteil von rund 0,5‰ am Schweizer Stromproduktionsmix [1] und einem Marktpreis, der deutlich über dem Preis für konventionelle Stromprodukte liegt,¹⁾ spielt Fotovoltaik bisher eine untergeordnete Rolle im Schweizer Elektrizitätsmarkt. Um den Bau und Betrieb von Fotovoltaikanlagen zu fördern, gibt es in der Schweiz jedoch verschiedene Unterstützungsmassnahmen dieser Technologie, welche mit einem ökologischen Mehrwert von Solarstrom begründet werden.²⁾ In diesem Artikel werden mit aktuellen Ökobilanzen die Umweltauswirkungen von heutigem Solarstrom beurteilt, und es wird analysiert, inwiefern Fotovoltaik die Umweltintensität des Schweizer Stroms vermindern kann.

Zwar ist der in der Schweiz produzierte Strommix aufgrund des hohen Anteils an Wasserkraft und Kernenergie im Vergleich mit anderen europäischen Strommischen mit relativ tiefen Treibhausgasemissionen verbunden. Im Rahmen von Ökobilanzen werden jedoch nicht nur die Auswirkungen auf das Klima, sondern ebenso eine Vielzahl weiterer Umweltindikatoren analysiert, wie beispielsweise die Menge radioaktiver Abfälle, humantoxische Emissionen oder der Verbrauch nicht erneuerbarer Energieressourcen.

Ökobilanz von Strom aus Solarzellen

In einer Ökobilanz werden die Umweltauswirkungen über den Lebenszyklus eines Produkts systematisch analysiert. Bei Solarstrom umfasst dieser Lebenszyklus beispielsweise die Gewinnung

der Rohstoffe für den Bau der Anlage, die Fabrikation der Solarzellen, des Montagesystems und des Wechselrichters, die Installation und den Betrieb der Anlage sowie deren Entsorgung. Im ersten Schritt, der Sachbilanz, werden die kumulierten Ressourcenentnahmen und Schadstoffemissionen des Lebenszyklus von Solarstrom ermittelt. Die Sachbilanz wird dann mit Bewertungsmethoden wie beispielsweise der Methode der Ökologischen Knappheit [2] oder der ReCiPe-Methode [3] ausgewertet. Der Ablauf einer Ökobilanz wird in den ISO-Normen 14040 ff. geregelt [4]. Richtlinien für die Erstellung von Ökobilanzen zu Fotovoltaik wurden 2009 von der IEA heraus-

gegeben [5] und in den für diesen Artikel zugrunde liegenden Modellen berücksichtigt. Die in diesem Artikel veröffentlichten Resultate basieren auf Ökobilanzdaten der Ecoinvent-Datenbank v2.01 [6] und den Ergebnissen des europäischen Forschungsprojekts Needs, an welchem über 60 Partner beteiligt waren.³⁾ Die wichtigsten Parameter der untersuchten Fotovoltaikanlage sind in der **Tabelle** aufgeführt. Die Ergebnisse basieren auf Berechnungen für eine durchschnittliche 3-kW_p-Anlage mit Paneelen aus multikristallinen Siliziumzellen, welche auf ein Schrägdach in der Schweiz montiert wurden. Die Lebensdauer der verschiedenen Anlagekomponenten wird auf 30 Jahre geschätzt. Ein Grossteil der in der Siliziumproduktion eingesetzten Energie stammt aus Wasserkraftwerken.

In einem ersten Schritt betrachten wir, welche Komponenten einer Fotovoltaikanlage die Umweltauswirkungen von Solarstrom im Hinblick auf verschiedene Umweltindikatoren beeinflussen. **Bild 1** zeigt, welche Anteile die verschiedenen Prozessstufen der Solarstromproduktion an einer Auswahl von Umweltindikatoren haben.

Erneuerbare Energie beispielsweise wird vorwiegend als Sonneneinstrahlung

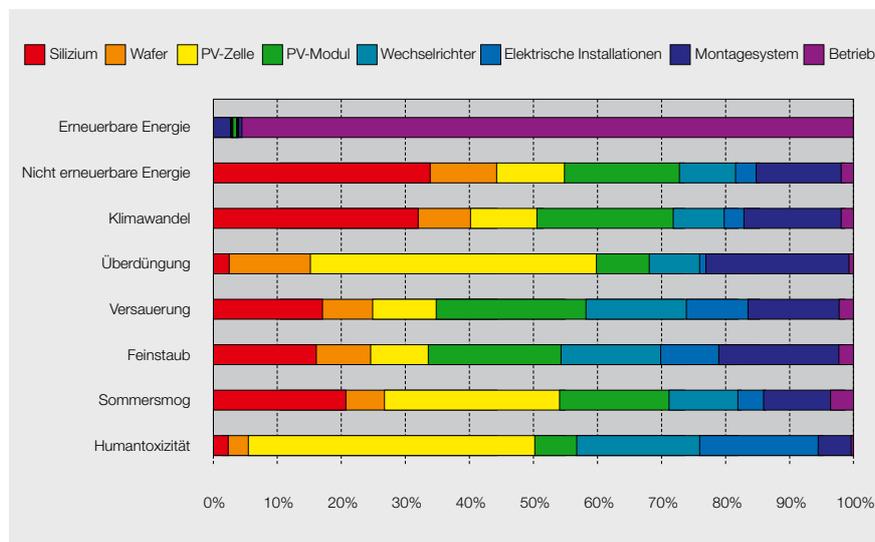


Bild 1 Umweltbelastungsanteile der verschiedenen Prozessstufen bei der Produktion von Solarstrom in einer Schweizer 3-kW_p-Schrägdach-Anlage mit multikristallinen Siliziumpaneelen. Bewertung mit ReCiPe Midpoint, World, H [3] und kumuliertem Energieaufwand [7].

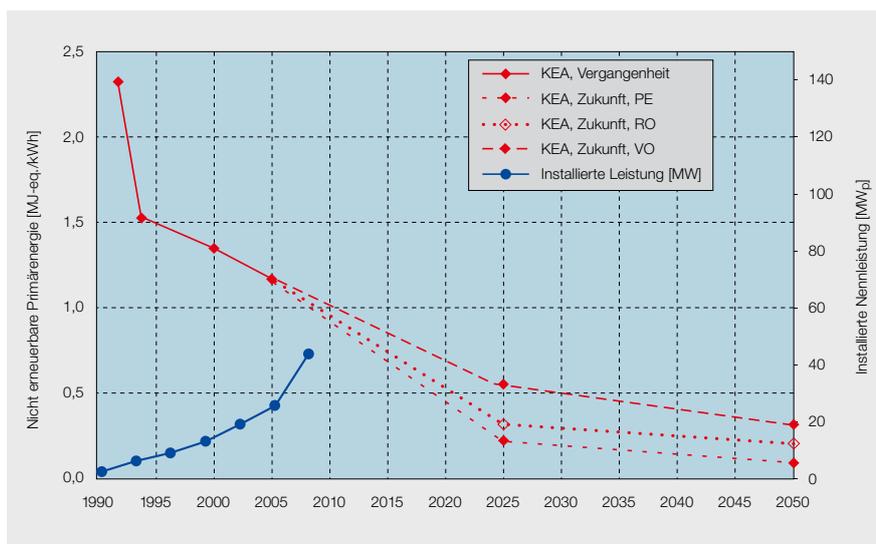


Bild 2 Kumulierter Energieaufwand (KEA) aus fossilen und nuklearen Energieträgern pro kWh Solarstrom (MJ-eq./kWh, linke Achse) in Ökobilanzstudien für die Zeit zwischen 1992 und 2050 und installierte Fotovoltaik-Netzverbundanlagen in der Schweiz (MW_p, rechte Achse) [8, 10–14]; PE: Szenario pessimistisch; RO: Szenario realistisch-optimistisch; VO: Szenario sehr optimistisch.

im Betrieb der Anlage benötigt. Im Gegensatz dazu wird nicht erneuerbare Energie bei der Herstellung der Anlage eingesetzt, wobei die Bereitstellung von Silizium und die Produktion der Module das Resultat dominieren. Die Auswirkungen auf den Klimawandel sind über den Ausstoss von Treibhausgasen an den Konsum nicht erneuerbarer Energie gekoppelt, weshalb sich hierfür ein ähnliches Bild ergibt. Die Überdüngung wird massgeblich durch die Phosphate im Abwasser der Solarzellenproduktion beeinflusst. Die Versauerung wird verursacht durch die Schwefeldioxid- und Stickoxidemissionen in der Fotovoltaikproduktionskette und bei der Produktion des Stroms, welcher bei den einzelnen Prozessschritten verbraucht wird. Eine ähnlich gleichmässige Verteilung auf die verschiedenen Komponenten ergibt sich für die Feinstaub- und Sommersmog-Belastung. Die wichtigsten Beiträge in Bezug auf die Humantoxizität stellen die Schwermetallemissionen bei der Solarzellenproduktion dar. Das Montagesystem hat bei allen Kategorien ausser der erneuerbaren Energie einen signifikanten Anteil zwischen 4 und 22%, der Wechselrichter zwischen 3 und 16%.

Entwicklung seit 1992 und Szenarien bis 2050

Fotovoltaik ist eine stetig wachsende Technologie. Zwischen 1992 und heute hat sich die gesamte Nennleistung der in der Schweiz installierten Fotovoltaikanlagen mehr als verzehnfacht. Ökobilanz-

studien aus diesem Zeitraum zeigen, dass sich die Technologie während dieser Zeit verbessert hat und beispielsweise der kumulierte Energieaufwand, nicht erneuerbar, von Solarstrom heute weniger als ein Drittel ausmacht im Vergleich zu den Ergebnissen in den ersten Ökobilanzstudien der 90er-Jahre (Bild 2).

Im Rahmen des Needs-Projekts wurden die Umweltauswirkungen von heutigen und zukünftigen Kraftwerkstechnologien mithilfe von Ökobilanzen quantifiziert. Dazu wurden drei Szenarien definiert, mit welchen in sich stimmige Abschätzungen der Aufwendungen und Emissionen der Stromerzeugung in den Jahren 2025 und 2050 ermöglicht wurden. Das Szenario «realistisch-optimistisch» (RO) zeichnet sich durch starke sozioökonomische Treiber aus, die eine dynamische Marktausweitung und eine kontinuierliche technische Entwicklung unterstützen. Dadurch wird es wahrscheinlich, dass die Technologie für den globalen Strommarkt relevant wird. Das Szenario «pessimistisch» (PE) basiert auf sozioökonomischen Rahmenbedingungen, die weder eine signifikante Marktausweitung noch eine technologische Entwicklung stimulieren. Im Szenario «sehr optimistisch» (VO) führen technologische Durchbrüche dazu, dass die Technologie auf lange Sicht eine führende Rolle im globalen Strommarkt einnehmen kann. In Bild 2 wird die Abschätzung des kumulierten Energieaufwands von Solarstrom (multikristallin, dachintegriert, rahmenlos) für die Jahre 2025

und 2050 gezeigt. Auf Basis dieser Abschätzungen ist ein weiterer deutlicher Rückgang zu erwarten [8].

Mit den heutigen Grundlagen kann nicht zuverlässig abgeschätzt werden, wie viel variabel anfallender Fotovoltaikstrom ins zukünftige Stromnetz der Schweiz eingespeist werden kann. Deshalb hat die Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften (SATW) in ihrer Publikation «Road Map Erneuerbare Energien Schweiz» eine 2000 MW_p (kann mit heute verfügbarer Regelenergie vom Stromnetz heute aufgenommen werden) und eine 6000 MW_p (unter der Annahme, dass bis 2050 weitere frei abrufbare Stromquellen verfügbar sein werden) Fotovoltaikvariante für das Jahr 2050 vorgestellt [9]. Dies bedeutet einen Ausbau der Fotovoltaik um den Faktor 40–130 gegenüber dem Stand heute.

Ergebnisse für Solarstrom in der Schweiz und in Europa

Im Vergleich zum Schweizer Strommix weist Solarstrom verschiedene Umweltvorteile auf. Der Schweizer Niederspannungs-Strommix (Versorgungsmix 2007, unter Ausklammerung der separat verkauften, zertifizierten Stromprodukte) ist, beeinflusst von den Stromimporten, mit Treibhausgasemissionen von 148 g CO₂-eq/kWh verbunden, wohingegen es beim heutigen Solarstrom nur 50–100 g CO₂-eq/kWh sind, abhängig von der eingesetzten Technologie der Ausrichtung der Panels und dem Montagesystem. Zudem verursacht eine durchschnittliche kWh Schweizer Niederspannungsstrom 6,1 mm³ hoch radioaktive und 21,1 mm³ schwach radioaktive Abfälle. Bei Solarstrom sind dies nur 0,1–0,3 mm³ hoch radioaktive respektive 0,6–1,4 mm³ schwach radioaktive Abfälle pro kWh, verursacht durch den Strombedarf entlang der Fotovoltaikproduktionskette.

Bild 3 zeigt die Energie-Rückzahldauer von Fotovoltaikanlagen in verschiedenen Regionen Europas. Die Energie-Rückzahldauer entspricht der Zeit, bis eine Fotovoltaikanlage durch ihre Stromproduktion den Verbrauch nicht erneuerbarer Primärenergie um so viel reduziert hat, wie für die Herstellung der Anlage benötigt wurde. Für alle europäischen Länder wurde der vermiedene Bedarf an nicht erneuerbarer Primärenergie auf Basis der Strombereitstellung im UCTE-Netzverbund ermittelt (Referenzsystem). Die in Bild 3 erkennbaren deutlichen Unterschiede können deshalb auf die unter-

schiedliche Sonneneinstrahlung zurückgeführt werden. In Spanien, Italien und Griechenland beträgt die Energie-Rückzahldauer etwa die Hälfte derjenigen von Fotovoltaikanlagen in Skandinavien oder Island. Aufgrund der geografischen Lage mit mittlerem Breitengrad und entsprechend mittlerer Sonneneinstrahlung liegen Fotovoltaikanlagen in der Schweiz mit einer Energie-Rückzahldauer von 2,5–3 Jahren im Mittelfeld.

In vielen Ländern Europas kann der Bau von Fotovoltaikanlagen den Ausstoss von CO₂-Emissionen vermindern. **Bild 4** zeigt, wie viele Tonnen CO₂ eine installierte Leistung von 1 kW_p über die Nutzungsdauer von 30 Jahren einspart. Als Referenzmix wird jeweils derjenige Landesstrommix zugrunde gelegt, in welchem die Anlage installiert wird. Staaten mit einem hohen Anteil an CO₂-intensiven Kohlekraftwerken wie Polen und Griechenland haben ein besonders hohes CO₂-Einsparpotenzial. Demgegenüber haben Staaten mit hohen Anteilen an Kernenergie oder Wasserkraft, wie Frankreich, Schweden und Norwegen, lediglich ein geringes CO₂-Einsparpotenzial. Auch das CO₂-Einsparpotenzial von Fotovoltaikanlagen in der Schweiz ist relativ gering, jedoch aufgrund der Stromimporte, insbesondere derjenigen aus Deutschland, deutlich höher als dasjenige grosser Teile Frankreichs.

Analog zum CO₂-Einsparpotenzial in **Bild 4** zeigt **Bild 5**, wie viel radioaktive Abfälle vermieden werden können, wenn Solarstrom den durchschnittlichen Strommix in verschiedenen Ländern Europas ersetzt. Am meisten radioaktive Abfälle können in Frankreich eingespart werden, demjenigen Land mit dem höchsten Kernenergieanteil Europas. Auch in der Schweiz besteht für Solarstrom ein grosses Potenzial, radioaktive Abfälle zu vermeiden. Anders sieht es in Ländern wie Polen, Norwegen oder Irland aus, wo durch Solarstrom nur sehr wenig radioaktive Abfälle vermieden werden können, da die dortigen Strommixe nur einen geringen Anteil (importierter) Kernenergie aufweisen.

Gesamtbeurteilung und Ausblick

Der Bau von Fotovoltaikanlagen in der Schweiz und der Konsum von Solarstrom sind aus Umweltsicht sinnvoll, insbesondere dann, wenn Solarstrom Elektrizität aus Kohle-, Gas- oder Kernkraftwerken im In- oder Ausland ersetzen kann. Als Ersatz für Elektrizität aus

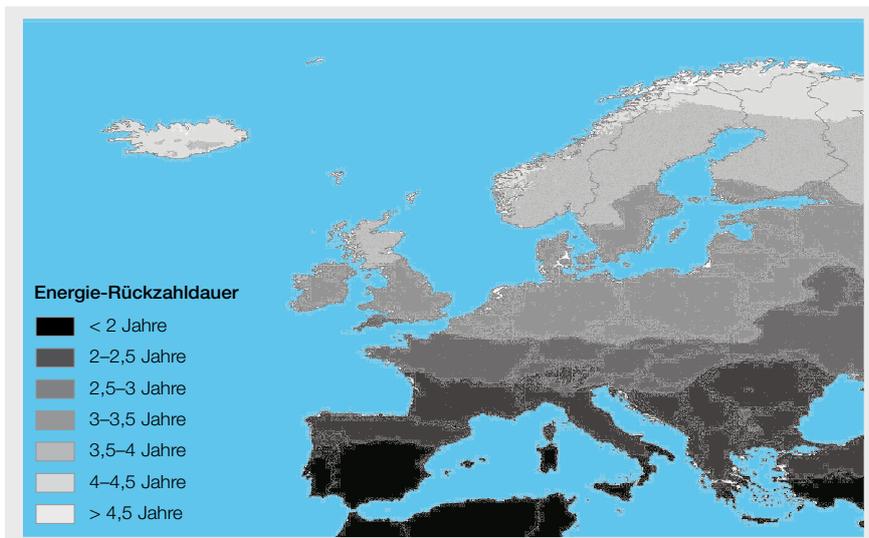


Bild 3 Energie-Rückzahldauer von Fotovoltaikanlagen in Europa (Stromproduktion von 1 kW_p Kapazität über 30 Jahre).

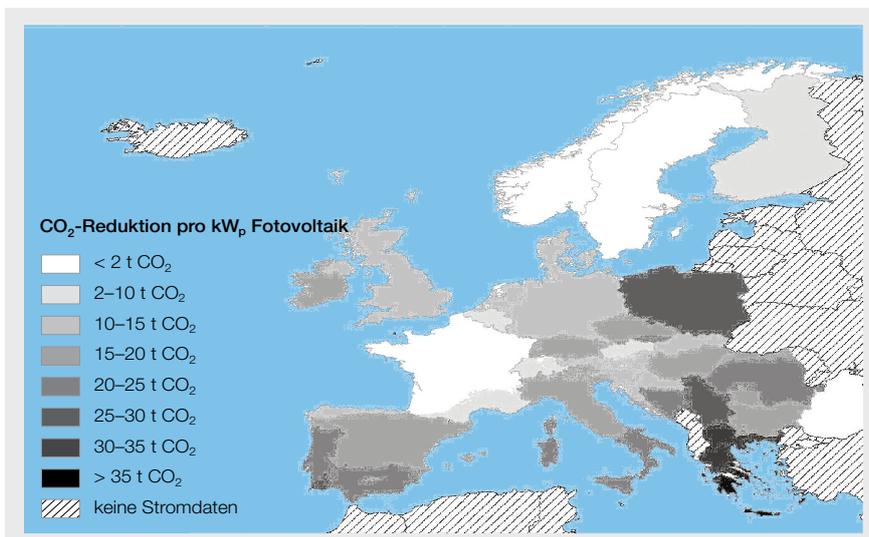


Bild 4 Länderspezifisches Reduktionspotenzial der Treibhausgase mit Fotovoltaikanlagen (Stromproduktion von 1 kW_p Kapazität über 30 Jahre).

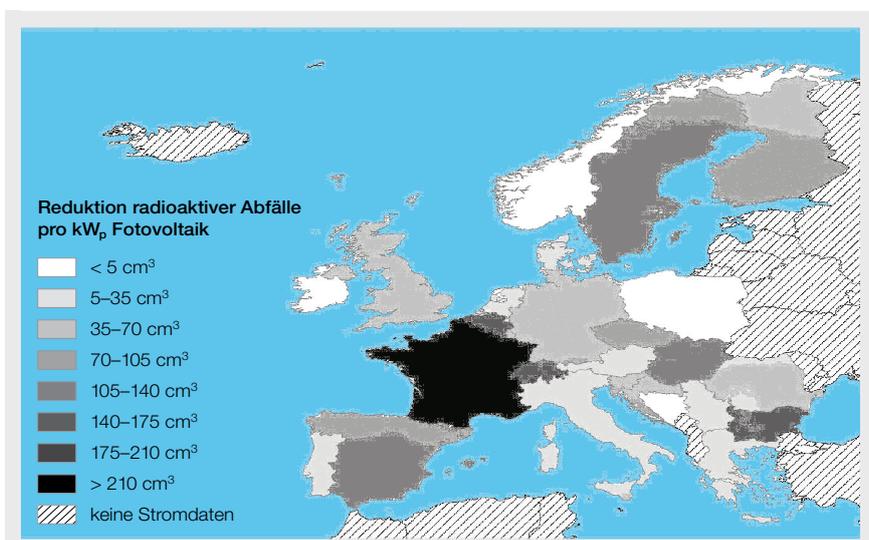


Bild 5 Länderspezifisches Reduktionspotenzial radioaktiver Abfälle mit Fotovoltaikanlagen (Stromproduktion von 1 kW_p Kapazität über 30 Jahre).

Bilder: ESU-Services GmbH

Anlagegrösse (Nennleistung)	3 kW _p
Zelltechnologie	Multikristalline Siliziumzellen
Zelleffizienz	14,4 %
Moduleffizienz	2025: 17–22 %. 2050: 18–25 %
Standort	Schweiz
Modultyp	Gerahmte Paneele ¹⁾
Montagesystem	Aufgesetzt auf Schrägdach ¹⁾
Lebensdauer der Anlage	30 Jahre
Ertrag	922 kWh/kW _p

¹⁾ Anlage 2025 und 2050: dachintegrierte, rahmenlose Laminate

Tabelle Charakterisierung der hier diskutierten Fotovoltaikanlage.

Kohle- und Gaskraftwerken kann Solarstrom Bestandteil einer Klimaschutzstrategie von Entscheidungsträgern in Politik, Wirtschaft oder Haushalten sein. Im Hinblick auf den hohen Anteil von Kernenergie im Schweizer Elektrizitätsmix kann der Bau von Fotovoltaikanlagen zudem zur Vermeidung von radioaktiven Abfällen aus Kernkraftwerken beitragen.

Die Umweltbelastung von Solarstrom hängt vom Standort, der Technologie und dem Montagesystem der betrachteten Fotovoltaikanlagen ab. Die Wahl und das Verwenden strahlungsintensiver Standorte, effizienter Module und ressourcenschonender Montagesysteme können dazu beitragen, die Umweltpartenance von Solarstrom weiter zu verbessern.

Die Fotovoltaiktechnologien haben sich in den letzten 20 Jahren markant weiterentwickelt, und weitere Umweltverbesserungen sind möglich. Die Effizienz der Solarzellen wurde stetig optimiert, und der Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energiequellen in der Produktion der Fotovoltaikkomponenten könnte die Umweltintensität von Solarstrom weiter reduzieren. Durch die Steigerung der Umwelteffizienz der Solarzellen ist die relative Bedeutung des Montagesystems und des Wechselrichters angestiegen, weshalb Optimierungsmöglichkeiten dieser Aspekte beim Bau von Fotovoltaikanlagen geprüft werden sollten.

Ein Ausbau von Fotovoltaik in der Schweiz kann seinen Teil dazu beitragen, die Umweltintensität des Schweizer Strommixes zu vermindern. Insbesondere lassen sich mit Solarstrom die Treibhausgasemissionen und die radioaktiven Abfälle reduzieren.

Aktuell laufen verschiedene Arbeiten, um die Qualität der Ökobilanzmodelle für Fotovoltaik weiter zu verbessern. Diese umfassen neue Sachbilanzen zu gebäudeunabhängigen Fotovoltaikanlagen auf Freiflächen und zu Fotovoltaik-

grossanlagen im In- und Ausland sowie Aktualisierungen in den bestehenden Modellen. Die aufdatierten Sachbilanzdaten werden voraussichtlich mit der Veröffentlichung der nächsten Version der Ecoinvent-Datenbank publiziert [6].

Referenzen

- [1] BFE, Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2008. 2009, Bundesamt für Energie: Bern.
- [2] R. Frischknecht, R. Steiner, N. Jungbluth: The Ecological Scarcity Method – Eco-Factors 2006: A method for impact assessment in LCA. 2009, Federal Office for the Environment FOEN: Zürich und Bern.
- [3] M. Goedkoop et al.: ReCiPe 2008 – A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the mid-point and the endpoint level. First edition. Report I: Characterisation. 2009: NL.
- [4] International Organization for Standardization (ISO), Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. 2006: Geneva.
- [5] E. Alsema et al.: Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity. 2009, Subtask 20 «LCA», IEA PVPS Task 12.
- [6] Ecoinvent Centre, Ecoinvent data v2.1, Ecoinvent reports No. 1–25. 2009, Swiss Centre for Life Cycle Inventories: Dübendorf, Switzerland.
- [7] R. Frischknecht et al.: Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. 2007, Swiss Centre for Life Cycle Inventories: Dübendorf.
- [8] P. Frankl et al.: Final report on technical data, costs and life cycle inventories of PV applications, Research Stream 1a, Deliverable 11.2.2006, Ambiente Italia: Italy.
- [9] M. Berg, M. Real: Road Map Erneuerbare Energien Schweiz. 2006, Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften, SATW: Zürich.
- [10] R. Frischknecht et al.: Ökoinventare für Energiesysteme. Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. 1994, Gruppe Energie – Stoffe – Um-

welt (ESU), Eidgenössische Technische Hochschule Zürich und Sektion Ganzheitliche Systemanalysen, Paul-Scherrer-Institut, Villigen: Bundesamt für Energie (Hrsg.), Bern.

- [11] R. Frischknecht et al.: Ökoinventare von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. 1996, Gruppe Energie – Stoffe – Umwelt (ESU), Eidgenössische Technische Hochschule Zürich und Sektion Ganzheitliche Systemanalysen, Paul-Scherrer-Institut, Villigen: Bundesamt für Energie (Hrsg.), Bern.
- [12] N. Jungbluth: Fotovoltaik, in Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz, R. Dones, Editor. 2003, Paul-Scherrer-Institut, Villigen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories: Dübendorf.
- [13] N. Jungbluth, R. Frischknecht: Literaturstudie Ökobilanz Fotovoltaikstrom und Update der Ökobilanz für das Jahr 2000. 2000, ESU-Services für Bundesamt für Energie: Uster. p. 43.
- [14] T. Hostettler: Markterhebung Sonnenenergie 2008: Teilstatistik der Schweizerischen Statistik der erneuerbaren Energien. 2009, Swissolar, Schweizerischer Fachverband für Sonnenenergie, im Auftrag des Bundesamtes für Energie: Bern.

Angaben zu den Autoren

Matthias Stucki, dipl. Natw. ETH, studierte an der ETH Zürich Umweltnaturwissenschaften mit Schwerpunkt Mensch-Umwelt-Systeme. Seit Juni 2008 arbeitet Matthias Stucki bei der ESU-Services GmbH als Projektleiter. Er ist Mitglied der Schweizer Delegation der Task 12 (Umweltgesundheit und Sicherheit von Fotovoltaik) im IEA Photovoltaic Power Systems Programme (PVPS).

ESU-Services GmbH, 8610 Uster,
stucki@esu-services.ch

Rolf Frischknecht, Dr. sc. techn. ETH, Gründer des Unternehmens ESU-Services. Von 1998 bis 2008 hat er die Entwicklung, den Aufbau, die Markteinführung und die Erweiterung der heute international führenden Ecoinvent-Datenbank geleitet, deren Wurzeln in den Arbeiten an der ETH Zürich liegen. Nebst seiner Tätigkeit als geschäftsführender Partner der ESU-Services GmbH ist er Lehrbeauftragter für Ökobilanzen an der ETH Zürich auf Stufe Bachelor und Master. Er ist Mitglied der Schweizer Delegation der Task 12 im IEA Photovoltaic Power Systems Programme.

ESU-Services GmbH, 8610 Uster,
frischknecht@esu-services.ch

¹⁾ Beispielsweise beim EWZ: www.stadt-zuerich.ch/ewz/de/index/energie.html, Zugriff: 8. Januar 2010.

²⁾ www.bfe.admin.ch/energie/00559/00564/, Zugriff: 8. Januar 2010.

³⁾ www.needs-project.org, Zugriff: 11. Dezember 2009.

Résumé

L'énergie photovoltaïque réduit-elle l'impact environnemental du courant électrique suisse ?

Résultats des bilans écologiques actuels du courant fourni par les cellules solaires
Alors que le réchauffement climatique s'amorce et que des discussions sont en cours au sujet de sites appropriés pour le stockage définitif des déchets radioactifs, il est temps de se demander si l'utilisation en Suisse de l'énergie photovoltaïque est judicieuse du point de vue écologique. Les bilans écologiques actuels permettent d'obtenir une réponse fiable en utilisant une approche objective.

No