

Warum Solarstrom nicht klimaneutral aber trotzdem umweltfreundlich ist – aktuelle Ökobilanzen zu Fotovoltaik

Matthias Stucki, Karin Flury und Rolf Frischknecht, ESU-services GmbH

Kanzleistrasse 4, CH - 8610 Uster, Schweiz

Tel.:+41 44 940 67 94 , Fax: +41 44 940 61 94

E-Mail: stucki@esu-services.ch

Internet: www.esu-services.ch

Ist der Einsatz von Fotovoltaik – insbesondere vor dem Hintergrund des Klimawandels 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.

Im Gegensatz zum Betrieb von konventionellen Kraftwerken mit Verbrennung fossiler Energieträger entstehen beim Betrieb von Fotovoltaik-Anlagen keine Treibhausgas-Emissionen. Darum wird Solarenergie in der Öffentlichkeit als saubere und klimafreundliche Alternative wahrgenommen.

Trotzdem ist auch Solarstrom nicht klimaneutral. Bei den verschiedenen Prozessschritten der Herstellung von Ausgangsmaterial (z.B. Silizium), Wafer, Solarzellen, Modul und Montagesystem, wird Strom verbraucht. Je nach eingesetzten Strommix und dessen Anteil an Kohlestrom und Strom aus Gaskraftwerken, ist dieser Verbrauch mit mehr oder weniger hohen Treibhausgasemissionen verbunden. Zudem werden bei der Produktion von Silizium und Glas fossile Brennstoffe wie Koks oder Heizöl eingesetzt, was direkte Kohlendioxidemissionen verursacht.

Die Emissionen bei der Herstellung in der Fotovoltaik-Produktionskette zeigen, dass es für eine Gesamtbeurteilung der Umweltauswirkungen verschiedener Stromerzeugungstechnologien nicht genügt, nur den Betrieb der Kraftwerke zu betrachten. Vielmehr ist es für eine angemessene Analyse nötig eine Lebenszyklusperspektive einzunehmen und die gesamten Umweltauswirkungen der Kraftwerke „von der Wiege bis zur Bahre“ einzubeziehen.

Der Klimawandel ist eines der dringendsten Umweltprobleme unserer Zeit. Es ist jedoch nicht sinnvoll, deswegen andere Umweltauswirkungen wie der Verbrauch von

nichter erneuerbaren Ressourcen, Humantoxizität, Sommersmog, Ozonschichtabbau, Überdüngung, Versauerung, Feinstaub, etc. zu vernachlässigen. Im besten Fall werden bei Umweltentscheidungen sämtliche Umweltauswirkungen einbezogen.

Die Methode der Ökobilanz ermöglicht eine Analyse basierend auf einer Vielzahl verschiedener Umweltauswirkungen unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus einer Technologie, eines Produkts oder einer Dienstleistung.

Mit einem Anteil von weniger als 2 % an der Deutschen Stromproduktion und weniger als 1 % an der europäischen Stromproduktion sowie einem Marktpreis, der deutlich über dem Preis für konventionelle Stromprodukte liegt, spielt Fotovoltaik bisher eine untergeordnete Rolle im Elektrizitätsmarkt [1].^{i,ii} Um den Bau und Betrieb von Fotovoltaik-Anlagen zu fördern, gibt es verschiedene Unterstützungsmassnahmen, welche mit einem ökologischen Mehrwert von Solarstrom begründet werden.ⁱⁱⁱ In diesem Artikel werden mit aktuellen Ökobilanzen die Umweltauswirkungen von heutigem Solarstrom beurteilt und es wird analysiert, inwiefern Fotovoltaik die Umweltintensität der Stromproduktion vermindern kann.

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 14040ff geregelt [4]. Richtlinien für die Erstellung von Ökobilanzen zu Fotovoltaik wurden 2011 von der IEA herausgegeben [5] und in den für diesen Artikel zugrundeliegenden Modellen berücksichtigt. Die in diesem Artikel veröffentlichten Resultate basieren auf Ökobilanz-Daten desecoinvent Datenbestands v2.2 [6], Aktualisierungen dieses Datenbestands [7, 8] und den Ergebnissen des Europäischen Forschungsprojektes NEEDS, an welchem über 60 Partner beteiligt waren^{iv}. Die wichtigsten Parameter der untersuchten Fotovoltaik-Anlage sind in Tabelle 1 aufgeführt. Die Ergebnisse basieren, sofern nicht anders im Text beschrieben, auf Berechnungen für eine durchschnittliche 3 kW_p-Anlage mit Paneelen aus multikristallinen Siliziumzellen, welche auf ein Schrägdach in Deutschland montiert wurden. Die Lebensdauer der verschiedenen

Anlagekomponenten wird mit 30 Jahren abgeschätzt. Ein Grossteil der in der Siliziumproduktion eingesetzten elektrischen Energie stammt aus Wasserkraftwerken.

Tabelle 1 Charakterisierung der hier diskutierten Fotovoltaik-Anlage

Anlagegrösse (Nennleistung)	3 kW _p
Zelltechnologie	Multikristalline Siliziumzellen
Zelleffizienz	14,4 %
Moduleffizienz	2025: 17 – 22% 2050: 18 – 25%
Standort	Deutschland
Modultyp	Gerahmte Paneele *
Montagesystem	Aufgesetzt auf Schrägdach *
Lebensdauer der Anlage	30 Jahre
Ertrag	809 kWh / kW _p

* Anlage 2025 und 2050: dachintegrierte, rahmenlose Lamine

In einem ersten Schritt betrachten wir, welche Komponenten einer Fotovoltaik-Anlage die Umweltauswirkungen von Solarstrom im Hinblick auf verschiedene Umweltindikatoren beeinflussen (siehe Bild 1)

Erneuerbare Energie beispielsweise wird vorwiegend als Sonneneinstrahlung 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 Solarzellen-Produktion beeinflusst. Die Versauerung wird verursacht durch die Schwefeldioxid- und Stickoxid-Emissionen in der Fotovoltaik-Produktionskette 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 Solarzellen-Produktion dar. Das Montagesystem hat bei allen Kategorien ausser der erneuerbaren Energie einen signifikanten Anteil zwischen 4 % und 22 %, der Wechselrichter zwischen 3 % und 16 %.

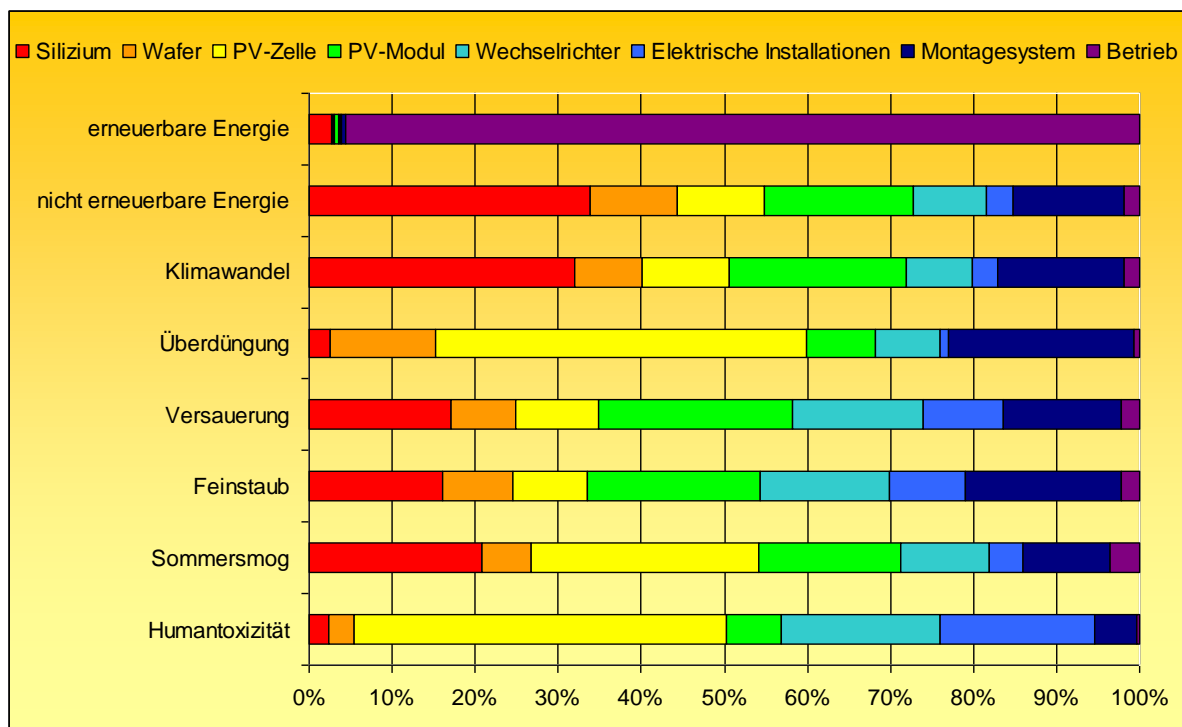


Bild 1 Umweltbelastungsanteile der verschiedenen Prozess-Stufen bei der Produktion von Solarstrom in einer 3kWp-Schrägdach-Anlage mit multikristallinen Silizium-Paneelen. Bewertung mit ReCiPe midpoint, World, H [3] und kumuliertem Energieaufwand [9]

Entwicklung seit 1992 und Szenarien bis 2050

Fotovoltaik ist eine stetig wachsende und sich entwickelnde Technologie. Zwischen 1992 und heute hat sich die gesamte Nennleistung der weltweit installierten Fotovoltaik-Anlagen um mehr als einen Faktor 300 erhöht [1]. Ökobilanzstudien 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 Neunzigerjahre (Bild 2). Knapp 50 % der weltweiten Fotovoltaik-Kapazität ist heute in Deutschland installiert, was Deutschland zum führenden Solarstromproduzenten macht [1].

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 sozio-ökonomische 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 sozio-ökonomischen 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 (multi-kristallin, dachintegriert, rahmenlos) für die Jahre 2025 und 2050 gezeigt. Auf Basis dieser Abschätzungen ist ein weiterer deutlicher Rückgang zu erwarten [10].

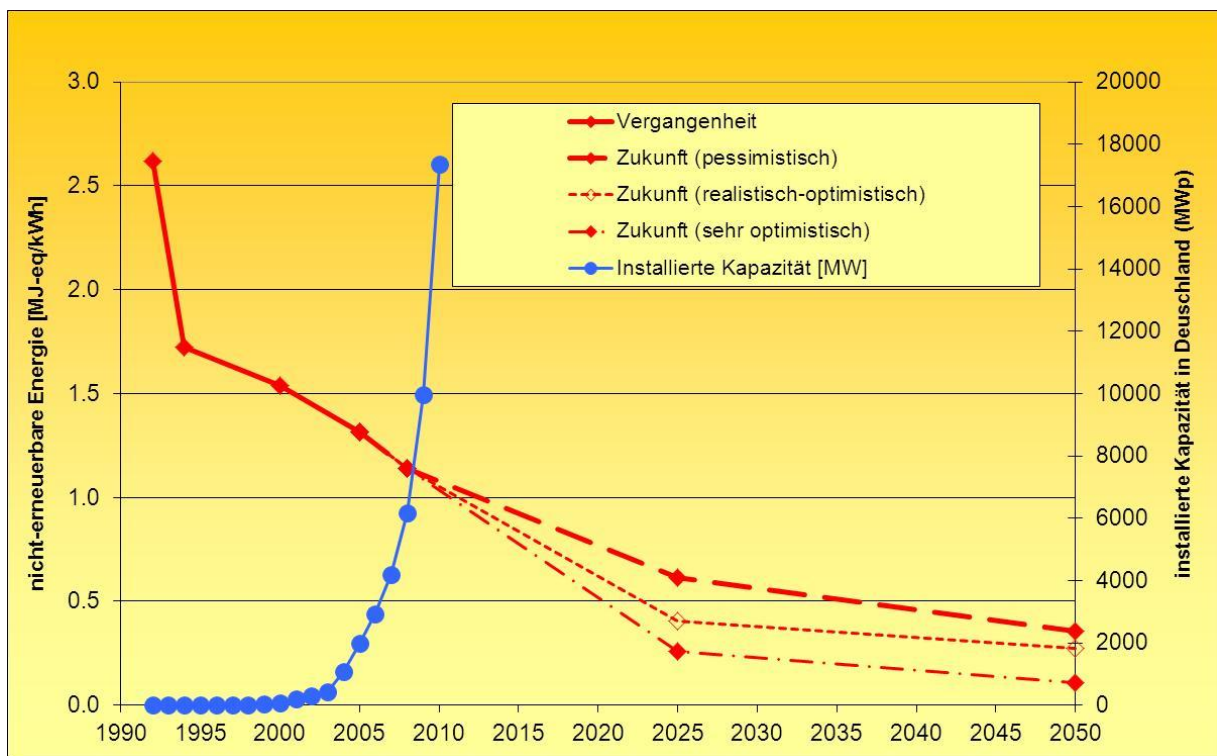


Bild 2 Kumulierter Energieaufwand (KEA) aus fossilen und nuklearen Energieträgern (MJ-eq. / kWh, linke Achse) in Ökobilanz- Studien für die Zeit zwischen 1992 – 2050 und installierte Fotovoltaik-Anlagen in Deutschland (MW_p , rechte Achse) [10-15]

Vergleich verschiedener Fotovoltaik-Technologien

Ein Vergleich der Treibhausgasemissionen pro kWh Solarstrom aus Schrägdachanlagen mit verschiedenen Fotovoltaik-Technologien ist in Bild 3 dargestellt. Dachintegrierte Anlagen verursachen tiefere Umweltbelastungen, da diese Module keinen Aluminiumrahmen und keine Dachaufständerung benötigen. Während die siliziumbasierten Module und die Kupfer-Indium-Selenide-Technologie

(CIS) ähnlich hohe Treibhausgasemissionen verursachen, schneiden dachintegrierte Anlagen mit Cadmiumtellurid-Modulen (CdTe) deutlich besser ab.

Flachdachanlagen und Freiflächenanlagen verursachen höhere Umweltbelastungen pro kWh als Schrägdachanlagen, da sie mehr Material für die Aufständigung benötigen. Fassadenanlagen verursachen höhere Umweltbelastungen, da sie nicht optimal auf die Sonne ausgerichtet sind und darum weniger Strom pro installierte kWp Solarmodule produzieren.

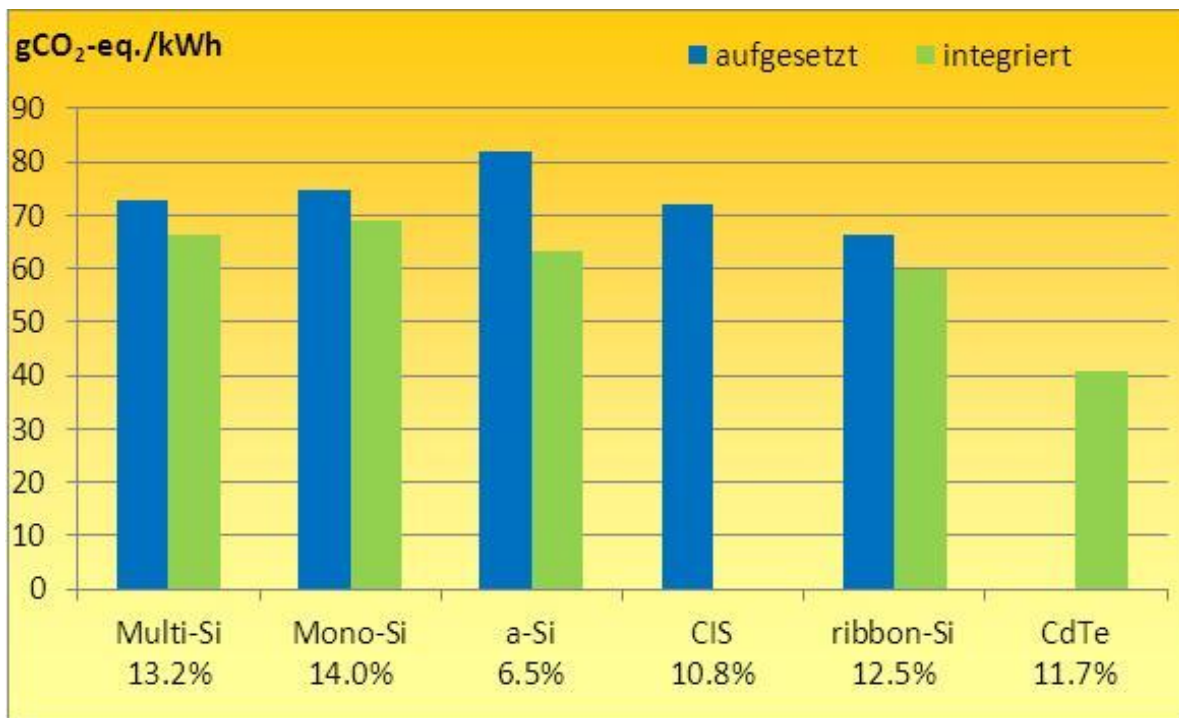


Bild 3 Vergleich der Treibhausgasemissionen (IPCC 2007, 100 Jahre) von Solarstrom aus Deutschen 3kW_p-Schrägdach-Fotovoltaik-Anlagen mit aufgesetzten oder integrierten Modulen verschiedener Fotovoltaik-Technologien und einem jährlichen Stromertrag von 809 kWh/kW_p. Die aufgeführten Prozentzahlen entsprechen der jeweiligen Moduleffizienz. Die Lebensdauer der Anlage wird mit 30 Jahren abgeschätzt und das System umfasst Herstellung, Installation und Entsorgung bzw. Recycling der Modulbestandteile, des Rahmens, der Verkabelung, des Wechselrichters und des Montagesystems.

Ergebnisse für Solarstrom in Deutschland und in Europa

Im Vergleich zum Deutschen Strommix weist Solarstrom verschiedene Umweltvorteile auf. Der Deutsche Niederspannungs-Strommix (Versorgungsmix 2008) ist mit Treibhausgasemissionen von 680 g CO₂-eq/kWh verbunden, wohingegen es beim heutigen Solarstrom nur 40 bis 120 g CO₂-eq/kWh sind,

abhängig von der eingesetzten Technologie, der Ausrichtung und dem Montagesystem. Zudem verursacht eine durchschnittliche kWh Deutscher Niederspannungsstrom 2,4 mm³ hoch-radioaktive und 11,4 mm³ schwach-radioaktive Abfälle. Bei Solarstrom sind dies nur 0,1 bis 0,4 mm³ hoch radioaktive, respektive 0,5 bis 1,6 mm³ schwach radioaktive Abfälle pro kWh, verursacht durch den Strombedarf entlang der Fotovoltaik-Produktionskette.

Bild 4 zeigt die Energie-Rückzahldauer von Fotovoltaik-Anlagen in verschiedenen Regionen Europas. Die Energie-Rückzahldauer entspricht der Zeit, bis eine Fotovoltaik-Anlage 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, heute ENTSO-E). Die in Bild 4 erkennbaren deutlichen Unterschiede können deshalb auf die unterschiedliche Sonneneinstrahlung zurückgeführt werden. In Spanien, Italien und Griechenland beträgt die Energie-Rückzahldauer etwa die Hälfte derjenigen von Fotovoltaik-Anlagen in Skandinavien oder Island. Aufgrund der geographischen Lage mit mittlerem Breitengrad und entsprechend mittlerer Sonneneinstrahlung liegen Fotovoltaik-Anlagen in Deutschland mit einer Energie-Rückzahldauer von 2,5 bis 3,5 Jahren im Mittelfeld.

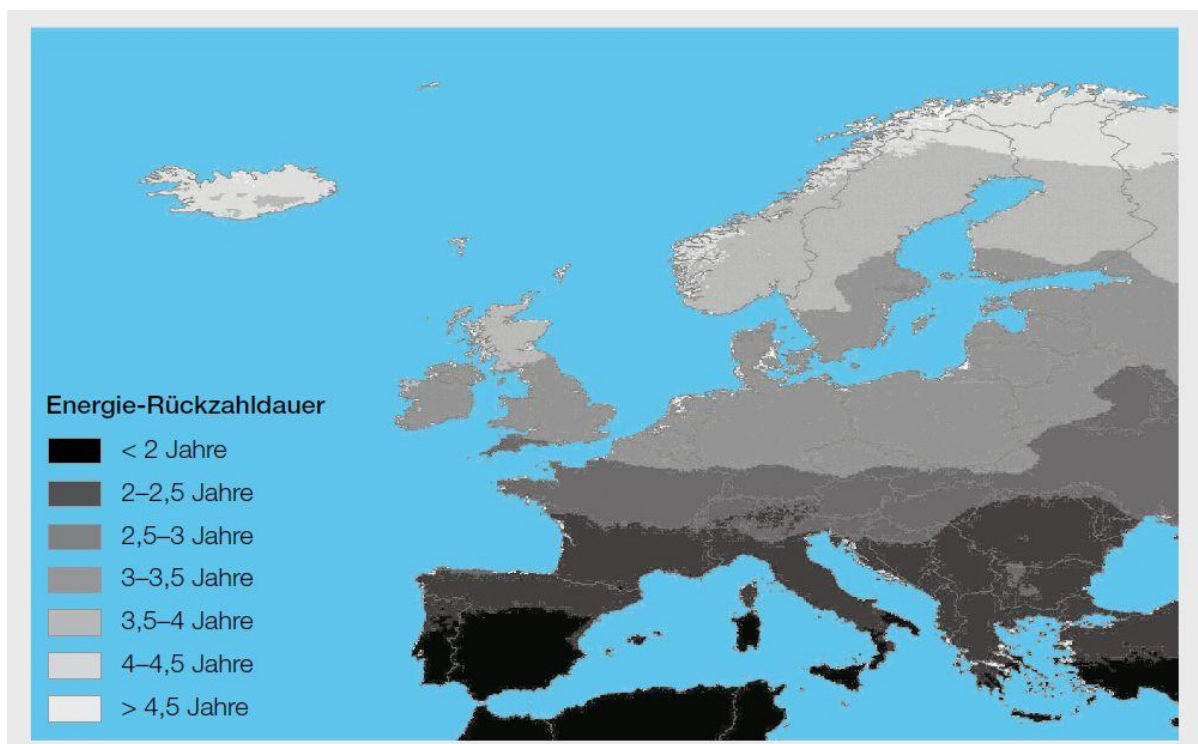


Bild 4 Energie-Rückzahldauer von Fotovoltaik-Anlagen in Europa (Stromproduktion von 1 kW_p Kapazität über 30 Jahre) [16]

In vielen Ländern Europas kann der Bau von Fotovoltaik-Anlagen den Ausstoss von CO₂-Emissionen vermindern. Bild 5 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-Einsparspotential. Demgegenüber haben Staaten mit hohen Anteilen an Kernenergie oder Wasserkraft, wie Frankreich, Schweden und Norwegen, lediglich ein geringes CO₂-Einsparpotential. [16]

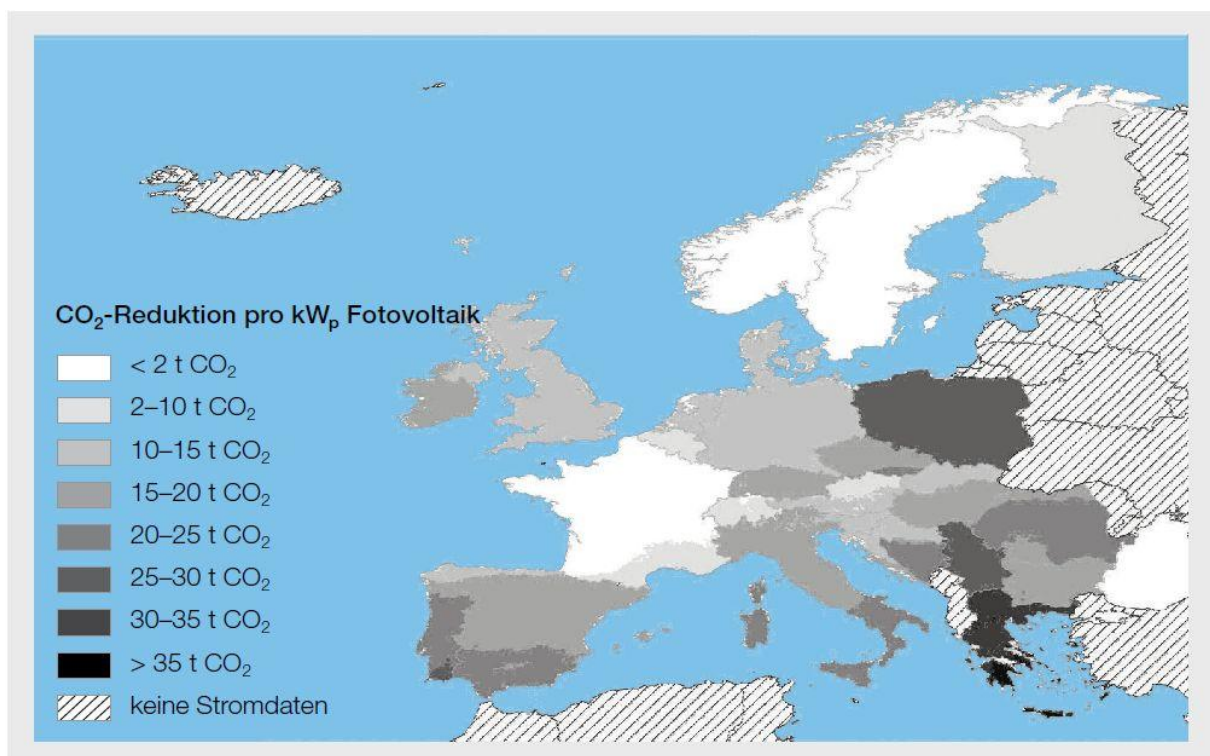


Bild 5 Länderspezifisches Reduktionspotenzial der Treibhausgase mit Fotovoltaik-Anlagen (Stromproduktion von 1 kW_p Kapazität über 30 Jahre) [16]

Analog zum CO₂-Einsparpotential in Bild 5 zeigt Bild 6 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 Kernenergie-Anteil Europas. 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.

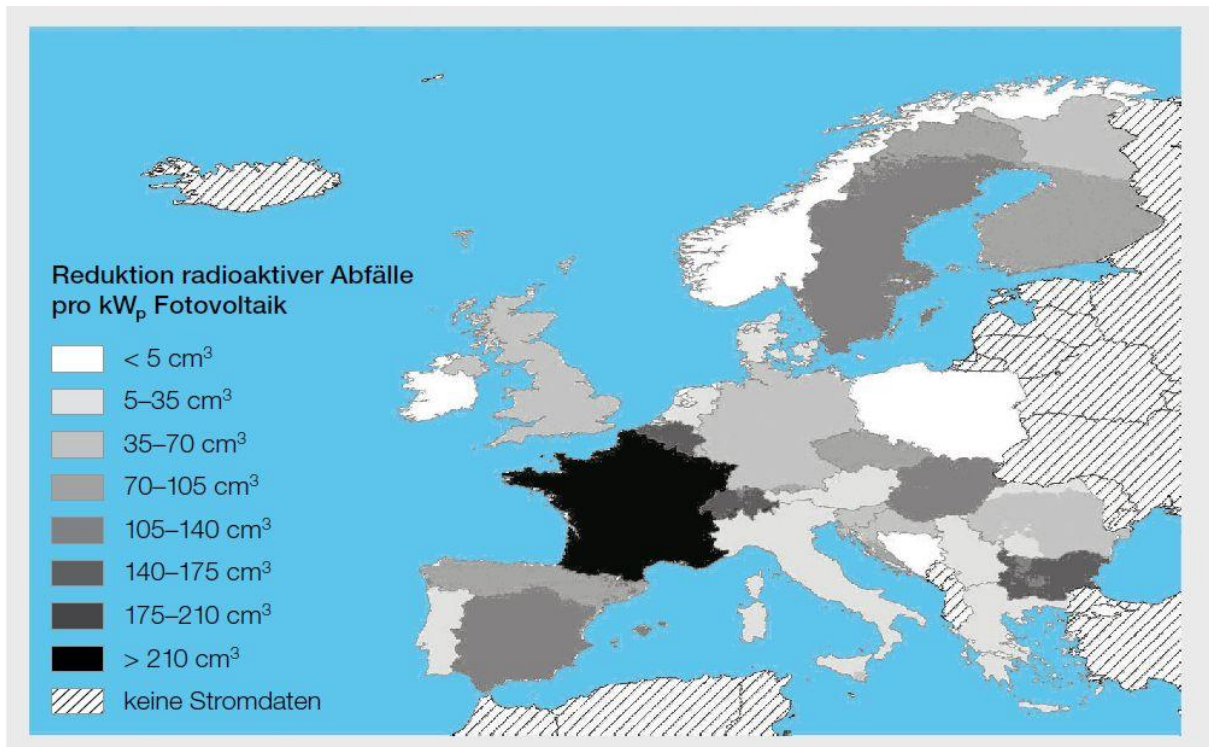


Bild 6 Länderspezifisches Reduktionspotenzial radioaktiver Abfälle mit Fotovoltaik-Anlagen (Stromproduktion von 1 kW_p Kapazität über 30 Jahre) [16]

Chinesische Module auf dem europäischen Markt

Ökobilanzstudien zu Solarstrom in Europa konzentrierten sich bisher hauptsächlich auf eine europäische Photovoltaik-Herstellungskette. In den letzten Jahren entwickelte sich jedoch China zum weltgrössten Hersteller von Wafern, Solarzellen und Modulen, sowie nach den USA zum zweigrössten Hersteller von Polysilizium [17]. Heute stellt China den grössten Exporteur von Solarmodulen für den europäischen Markt dar.

Trotz der Bedeutung der chinesischen Fotovoltaik-Produktion, fehlt es an detaillierten Sachbilanzdaten der Chinesischen Fotovoltaik-Industrie. Um diejenigen Fotovoltaik-Module zu beurteilen, welche von China nach Europa exportiert werden, extrapolieren wir die europäischen Sachbilanzdaten zur Produktion von Silizium, Ingots, Wafers, Solarzellen und Modulen, indem für den Stromverbrauch in den einzelnen Prozessstufen der chinesische Strommix eingesetzt wird und der Transport der Module per Frachtschiff nach Europa mitberücksichtigt wird.

Strom in der Herstellungskette stellt der wichtigste Faktor für die Umweltperformance von Solarmodulen dar. Manche Hersteller von Polysilizium in Europa, den USA und Japan verwenden Wasserkraft oder Strom aus Wärme-Kraft-Kopplung, was tiefere

Umweltbelastungen verursacht als der konventionelle Strommix in den meisten Staaten [17]. Hingegen gibt es keine Hinweise, dass die chinesischen Hersteller von Polysilizium einen anderen Strommix verwenden als der konventionelle chinesische Strommix mit einem hohen Anteil an Kohlekraft.

Die Autoren schätzen, für den europäischen Markt von poly-Si und mono-Si Modulen, dass 66 % aus europäischer Produktion stammen und 34 % aus China importiert werden. Diese Anteile wurden unter der Annahme berechnet, dass sämtliche in Europa produzierten Module auch in Europa installiert werden und der verbleibende Bedarf an Modulen durch chinesische Importe gedeckt wird.

Bild 7 zeigt, dass Solarstrom aus einer Anlage mit multikristallinen Silizium-Paneelen importiert aus China mehr als 70 % höhere Treibhausgasemissionen verursacht als eine Anlage mit europäischen Paneelen. Diese höheren Emissionen resultieren aus dem in der chinesischen Fotovoltaik-Industrie eingesetzten Strom mit einem hohen Anteil an Kohlekraft.

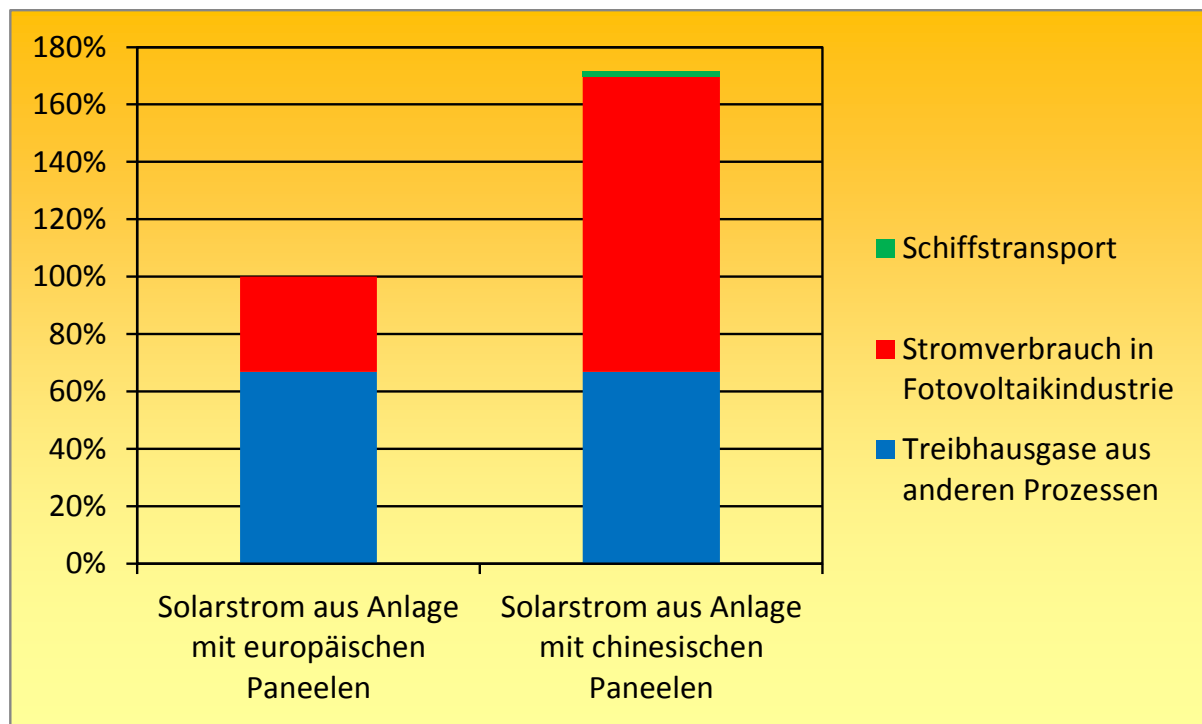


Bild 7 Treibhausgasemissionen (IPCC 2007, 100 Jahre) von Solarstrom aus einer europäischen 3kW_p-Schrägdach-Fotovoltaik-Anlage mit multikristallinen Silizium-Paneelen importiert aus China im Vergleich mit einer Anlage mit europäischen Paneelen.

Gesamtbeurteilung

Solarstrom ist nicht klimaneutral, denn jede Stromproduktion verursacht Treibhausgasemissionen und weitere Umweltbelastungen. Verschiedene Stromerzeugungstechnologien weisen jedoch deutliche Unterschiede in der Höhe der Treibhausgasemissionen pro produzierte Strommenge auf. Im Vergleich ergeben sich für Solarstrom deutlich geringere Umweltbelastungen als für Strom aus konventionellen Stromtechnologien.

Im Unterschied zu fossilen Kraftwerken fallen bei Solaranlagen die Umweltbelastungen nicht im Anlagebetrieb an, sondern mehrheitlich bei der Herstellung der Anlagebestandteile und deren Ausgangsmaterialien. Einzelne Anlagen können grosse Unterschiede bei der Umweltbelastung pro produzierte Strommenge aufweisen in Abhängigkeit davon, was für ein Strommix in der Herstellungskette eingesetzt wird, was für eine Fotovoltaik-Technologie und was für ein Montagesystem verwendet wird, welche Effizienz die Module erreichen und wie hoch die Sonneneinstrahlung am Installationsort ist (geographische Lage, Schattenwurf und Ausrichtungswinkel).

Die Fotovoltaik-Technologien haben sich in den letzten zwanzig 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 Fotovoltaik-Komponenten 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 Fotovoltaik-Anlagen geprüft werden sollten.

Mit zunehmenden Importen von Fotovoltaik-Modulen aus asiatischer Herstellung zum Beispiel in China verschlechtert sich die Klimabilanz von Solarstrom und eine Reduktion der Umweltauswirkungen durch Technologiefortschritte wird durch die höheren Umweltbelastungen des chinesischen Strommixes kompensiert.

Die Wahl von strahlungsintensiven Standorten, und das Verwenden effizienter Module und ressourcenschonender Montagesysteme können dazu beitragen, die Umweltperformance von Solarstrom weiter zu verbessern.

Der Bau von Fotovoltaik-Anlagen 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 Kohle- und Gaskraftwerken kann Solarstrom Bestandteil einer Klimaschutzstrategie von Entscheidungsträgern in Politik, Wirtschaft oder Haushalten

sein. Im Hinblick auf den Anteil von Kernenergie im Elektrizitätsmix kann der Bau von Fotovoltaik-Anlagen zudem zur Vermeidung von radioaktiven Abfällen aus Kernkraftwerken beitragen.

Ein Ausbau der Fotovoltaik kann seinen Teil dazu beitragen, die Umwelt-Intensität der Stromproduktion zu vermindern. Insbesondere lassen sich mit Solarstrom die Treibhausgasemissionen und die radioaktiven Abfälle reduzieren.

Verdankung: Die hier vorgestellten Arbeiten wurden ermöglicht dank finanzieller Unterstützung durch das Schweizerische Bundesamt für Energie (BFE).

Literatur

1. IEA-PVPS, *Trends in Photovoltaic Applications, Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2010*, 2011, International Energy Agency (IEA).
2. Frischknecht, R., R. Steiner, and N. Jungbluth, *Methode der ökologischen Knappheit - Ökofaktoren 2006*, 2008, Bundesamt für Umwelt (BAFU): Bern.
3. Goedkoop, M., et al., *ReCiPe 2008 - A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint 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. Fthenakis, V., et al., *Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity, 2nd edition*, 2011, IEA PVPS Task 12, International Agency Photovoltaic Power Systems Programme.
6. ecoinvent Centre, *ecoinvent data v2.2, ecoinvent reports No. 1-25*, 2010, Swiss Centre for Life Cycle Inventories: Dübendorf, Switzerland.
7. Itten, R. and R. Frischknecht, *Electricity Mixes and Electricity Grid*, in *Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz, in Vorbereitung*, R. Dones, Editor 2012, ESU-services Ltd., Swiss Centre for Life Cycle Inventories: Uster, CH.
8. Jungbluth, N., et al., *Photovoltaics*, in *Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz; in Vorbereitung*, C. Bauer and R. Dones, Editors. 2012, ESU-services Ltd.: Uster, CH.
9. Frischknecht, R., et al., *Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods*, 2007, Swiss Centre for Life Cycle Inventories: Dübendorf, CH.
10. Frankl, P., 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.

11. Frischknecht, R., 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 - Umwelt (ESU), Eidgenössische Technische Hochschule Zürich und Sektion Ganzheitliche Systemanalysen, Paul Scherrer Institut Villigen: Bundesamt für Energie (Hrsg.), Bern.
12. Frischknecht, R., 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, CH.
13. Jungbluth, N., *Photovoltaik*, 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, CH.
14. Jungbluth, N. and R. Frischknecht, *Literaturstudie Ökobilanz Photovoltaikstrom und Update der Ökobilanz für das Jahr 2000*, 2000, ESU-services for Bundesamt für Energie: Uster. p. 43.
15. Hostettler, T., *Markterhebung Sonnenenergie 2008: Teilstatistik der Schweizerischen Statistik der erneuerbaren Energien*, 2009, SWISSOLAR Schweizerischer Fachverband für Sonnenenergie im Auftrag des Bundesamtes für Energie: Bern.
16. Stucki, M. and R. Frischknecht, *Vermindert Photovoltaik die Umweltintensität des Schweizer Stroms? Erkenntnisse aktueller Ökobilanzen zu Strom aus Solarzellen*, in *Bulletin SEV/VSE2010*.
17. de Wild-Scholten, M.J. *Environmental Profile of PV Mass Production: Globalization*. in *26th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. 2011. Hamburg, Germany: SmartGreenScans.

ⁱ Beispielsweise beim EWZ: <http://www.stadt-zuerich.ch/ewz/de/index/energie.html>, Zugriff am 8. Januar 2010

ⁱⁱ <http://iea.org/stats/>, Zugriff am 21. Dezember 2011

ⁱⁱⁱ <http://www.bfe.admin.ch/energie/00559/00564/>, Zugriff am 8. Januar 2010

^{iv} <http://www.needs-project.org>, Zugriff am 11. Dezember 2009