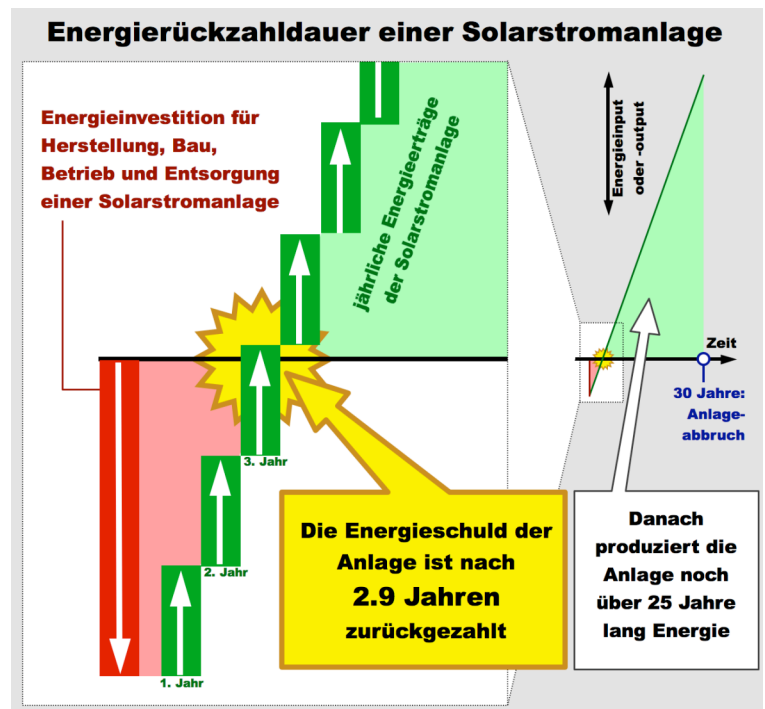


Energie- und Umweltbilanz der Solarenergie

aktualisierte Version 2008

Das Wichtigste in Kürze

1. Die aufgewendete Energie zur Herstellung einer Solaranlage für Strom- oder Wärmeproduktion wird in Bruchteilen der Betriebsdauer amortisiert, d.h. durch die erzeugte Energie kompensiert. Nach dieser Zeit (= Energierückzahldauer) erzeugen Solaranlagen aus frei verfügbarer Solarstrahlung Energie, im Gegensatz zu konventionellen Energiesystemen, die während ihrer *gesamten* Betriebsdauer eine Energiezufuhr – z.B. in Form von Erdöl oder Uran – brauchen.
2. Die Nutzung der Solarenergie erzeugt zwar wie jede Technologie Schadstoffe. In der gesamtökologischen Analyse schneidet jedoch der Solarstrom etwa 5 mal besser ab als der normale Schweizer Strom. Im Vergleich mit dem europäischen Strommix sind die Belastungen sogar viel tiefer.
3. Die wichtigsten Schadstoffbelastungen der Fabrikation von Photovoltaik(PV)-Zellen stammen bei einer Gesamtbilanz aus dem dabei konsumierten Strom (d.h. aus dem konventionellen Stromnetz) und nicht aus direkten Schadstoff-Belastungen der PV-Fertigung. Die PV-Fabrikation selbst kann daher nicht als alleiniger und direkter Verursacher der Schadstoffbelastungen verstanden werden. Vielmehr "erbt" sie den wichtigsten Teil der Belastungen aus dem konventionellen Stromnetz. Moderne Zellenfertigungen werden aber laufend weniger energieintensiv; Umweltbelastung und Energierückzahldauer sinken somit.



Energiebilanz Solarstrom (Photovoltaik)

Eine gesamthafte Bilanz der Herstellung, des Betriebs und der Entsorgung verschiedener Solaranlagen wurde im Standardwerk "Sachbilanzen von Energiesystemen" durchgeführt¹. Darin wird Rohstoffabbau, Herstellung, Montage, Rückbau und Entsorgung von Solaranlagen bilanziert. Die Herstellung einer typischen Schweizer Solarstromanlage² benötigt gemäss dieser Studie rund 90'000 Megajoule Primärenergie³. Diese Anlage kann unter Schweizer Bedingungen⁴ jedes Jahr 2760 Kilowattstunden Elektrizität ins Niederspannungsnetz einspeisen. Müsste diese jährliche Elektrizitätsmenge aus konventionellen Quellen hergestellt werden, würden dazu 34'500 Megajoule Primärenergie benötigt⁵. Somit dauert es **2.9 Jahre**, bis die Energieinvestition zur Herstellung der Anlage aufgewogen ist⁶. Nach dieser Zeit, der sogenannten Energierückzahldauer ERZ, hat die Solaranlage ihre Energieschuld vollständig abgetragen und erzeugt nun netto Elektrizität aus frei verfügbarer Solarenergie⁷. Für Dünnschichttechnologien liegen die Energierückzahlzeiten noch tiefer.

Andere Quellen⁸ berechnen für gegenwärtige kristalline Schweizer Anlagen Energierückzahlzeiten im Bereich von 2 bis 3 Jahren. In Südeuropa liegen die Werte noch tiefer. Weitere Produktionsverbesserungen von ca. 50% sind bereits absehbar und die Energierückzahlzeiten werden deshalb weiter sinken (Alsema & Wild-Scholten 2007).

¹ Diese Publikation (Dones et al. 2007) ist ein Teil von ecoinvent, einer Datenbank für Ökobilanzen. Sie wurde von führenden Schweizer Forschungsinstituten (ETH, PSI Villigen und anderen) erstellt. Der Autor dieses Merkblattes ist langjähriger Mitarbeiter bei ecoinvent und war Autor des Teils "Photovoltaik" 1993-1996.

² Gesamte Anlage inkl. Tragstrukturen und Elektronik (nicht nur Solarzellen), 3kW-peak Leistung, dachintegrierte multikristalline Siliziumzellen. Mitenthalten ist auch der Wechselrichter von netzgekoppelten Anlagen sowie Ersatz-Wechselrichter nach der halben Anlagelebensdauer.

³ Als Primärenergie werden die aus der Natur entnommenen energetischen Ressourcen bezeichnet. Als Primärenergieträger wurden hier alle fossilen Brennstoffe (Erdöl, Erdgas, Kohle) aber auch Uran und Wasserkraft berücksichtigt.

⁴ Jahresernte 920 kWh/kWpeak Jahr

⁵ Aus durchschnittlichem, europäischen UCTE Strommix inkl. Verluste zur Transformierung auf Niederspannungsstufe.

⁶ Dies ist ein Bruchteil der gesamten Lebensdauer von Solaranlagen von etwa 30 Jahren

⁷ Konventionelle Energiesysteme müssen dagegen während ihrer gesamten Betriebsdauer mit kommerziellen Energieträgern genährt werden. Sie können daher die gesamthafte aufzuwendende Energie nie zurückzahlen. Wird trotzdem eine Energierückzahlzeit angegeben, bezieht sie sich nur auf die Amortisationsdauer des Energieaufwandes für den Bau der Anlage allein (d.h. ohne Betrieb; und meist ohne Entsorgung).

⁸ Siehe z.B. Fthenakis & Alsema 2006, Knapp & Jester 2000.

Die Gründe für Verbesserung sind Energieeinsparungen neuer Silizium-Produktionsverfahren und weniger materialintensive Zellenfertigung. Die langfristigen Trends für nichterneuerbare Energieträger gehen dagegen in die umgekehrte Richtung: Für den Rohstoffabbau muss immer mehr Aufwand geleistet werden, da die gut abbaubaren Ressourcen bereits erschöpft sind.

Energiebilanz Solarwärme (Solarkollektor)

Eine Energiebilanzierung kann auch für wärmeproduzierende Solaranlagen (Sonnenkollektoren) durchgeführt werden. In den "Sachbilanzen von Energiesystemen" wurden vier verschiedene, für die Schweiz typische Kollektoranlagen zur Warmwasservorwärmung bilanziert. Dabei wurden alle nötigen Prozesse zur Herstellung, Bau, Betrieb und Entsorgung berücksichtigt. Die Energierückzahlzeit für Solarwärme liegt für diese Anlagen im Bereich von **1 bis 2 Jahren**.

Weitere Umweltbelastungen durch Solarstrom

Während der Betriebsphase gibt eine Solarstromanlage keine Schadstoffe an die Umwelt ab. Wird der Blickwinkel erweitert und der gesamte Lebenszyklus der Solaranlage berücksichtigt, finden sich durchaus Emissionen. Diese entstehen einerseits direkt in der Solarzellenfabrik, aber auch indirekt durch den Stromkonsum während der Fabrikation. In den "Sachbilanzen von Energiesystemen" wurden diese (und alle anderen) Emissionen der solaren Prozesskette erfasst und bilanziert (Dones et al. 2007).

Ein spezielles Augenmerk verdient der Fluorwasserstoff⁹, der in der Zellenproduktion eingesetzt wird. Neben der direkten Toxizität kann diese Substanz zur Versauerung ("saurer Regen") beitragen. Zusätzlich kommen flüchtige organische Substanzen¹⁰ zum Einsatz, die bodennahes Ozon (Sommersmog) erzeugen. Die beiden Umweltschadenskategorien "Sommersmog" und "Versauerung" werden hier für einen Vergleich beigezogen. Es werden alle Emissionsquellen im Lebenszyklus betrachtet, also neben Fabrikation auch Bau, Betrieb und Entsorgung.

Eine Solarstromanlage in der Schweiz stösst demnach indirekt pro Kilowattstunde insgesamt **18 Milligramm (mg) Sommersmog-aktive Substanzen** aus¹¹. Eine Kilowattstunde aus dem Europäischen Elektri-

⁹ Fluorwasserstoff, chemische Formel HF (bzw. HF · nH₂O)

¹⁰ NMVOC (*non-methane volatile organic compounds*) flüchtige organische Verbindungen ohne Methan

¹¹ Alle Sommersmog-aktive Substanzen gewichtet zusammengefasst und ausgedrückt in Ethan-Äquivalenten. Zur Gewichtung verwendet werden POCP (Photochemical Ozone Creation Potential) der verschiedenen Substanzen.

tätmix UCTE¹² belastet die Umwelt dagegen mit 114 mg Sommersmog-aktiven Substanzen – rund die sechsfache Menge. Eine Kilowattstunde aus dem Schweizer Stromnetz¹³ erzeugt mit 20 mg unwesentlich mehr Sommersmog als Solarstrom (s. Abb. 1).

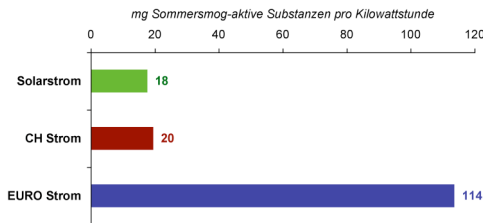


Abb. 1
Sommersmog-
belastung

Eine Solarstromanlage in der Schweiz stösst pro Kilowattstunde indirekt **330 mg versauernde Substanzen** aus¹⁴. Eine Kilowattstunde aus dem Europäischen Elektrizitätsmix UCTE belastet die Umwelt dagegen mit rund 2900 mg versauernden Substanzen – oder rund die neunfache Menge. Eine Kilowattstunde aus dem Schweizer Stromnetz erzeugt mit 430 mg 30% mehr Versauerung als Solarstrom (s. Abb. 2).

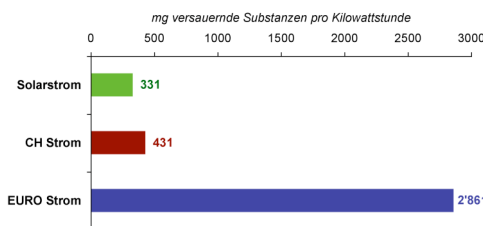


Abb. 2
versauernde
Schadstoffe

Wenn also von kritischer Seite behauptet wird, dass die Solarzellenfabrikation unakzeptabel umweltbelastend sei, so müsste die gegenwärtige Praxis der Schweizerischen Stromproduktion zu ähnlichen Einwänden führen, da die Belastung bezüglich der kritisierten Schadstoffe vergleichbar oder schlechter ist.

Bei einer *gesamtoökologischen* Analyse, in der weitere Aspekte wie Treibhauseffekt, Land- und Ressourcenverbrauch sowie Endlagerung radioaktiver Abfälle berücksichtigt werden, schneidet die Solarenergie besser als der schweizerische Strommix ab¹⁵ (s. Abb. 3).

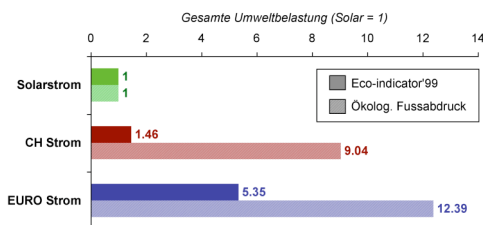


Abb. 3
gesamt-
ökologische
Belastung

Die gebräuchlichsten Solarzellen bestehen aus Silizium. Bei Dünnschichtzellen wird ebenfalls Silizium, zunehmend aber andere Materialien wie Cadmium-Tellurid (CdTe) oder Kupfer-Indium-Diselenid (CuInSe₂) verwendet, welche als Materialien nicht harmlos sind. Die enthaltenen Schadstoffmengen sind relativ gering und in sehr widerstandsfähigen Verbunden aus Glas und Kunststoff eingeschweisst. Die Materialien selbst sind nicht flüchtig, sodass ein Entweichen und eine Aufnahme durch lebende Organismen im Normalbetrieb ausgeschlossen werden können. Alle gebrauchten Solarzellen sind als Elektronikschrott kontrolliert zu entsorgen, sodass die enthaltenen Schadstoffe möglichst nicht in die Umwelt gelangen. Die CdTe-Schicht in PV-Zellen ist etwa 2 Mikrometer dick, was zum Vergleich etwa viermal dünner als die Aluminium-Schicht einer Getränkekartonverpackung ist. Ein Quadratmeter CdTe-Solarpanel enthält etwa 7 Gramm Cadmium. Der Schadstoffgehalt soll nicht verharmlost werden, aber Solarzellen sind ein über den ganzen Lebenszyklus vergleichsweise ausserordentlich gut kontrolliertes Erzeugnis. In anderen Produkten ist ebenfalls Cadmium enthalten, welches weit schlechter kontrolliert wird. So ist in Motorfahrzeug-Pneus auch Cadmium enthalten, welches durch Reifenabrieb während des Gebrauchs unkontrolliert in die Umwelt

¹² UCTE: Union for the Coordination of Transmission of Electricity

¹³ Schweizer Inlandproduktion inklusive der aus dem Ausland importierten Strommengen.

¹⁴ Alle versauernden Substanzen gewichtet zusammengefasst und ausgedrückt in Schwefeldioxid-Äquivalenten.

¹⁵ Gesamte Umweltbelastung berechnet nach Eco-indicator'99 und dem ökologischen Fussabdruck (Ecological Footprint).

emittiert wird. Ein einzelner 28t-Lastwagen emittiert während seiner Gebrauchsdauer 3 Gramm Cadmium allein durch Reifenabrieb.

Verfahren zum **Recycling von Solarzellen** werden zur Zeit entwickelt oder sind bereits in Betrieb. So verwertet zum Beispiel die Deutsche Solar AG seit 2003 alte und defekte Silizium-Solarmodule und gewinnt daraus mehrere Hundert Tonnen Silizium pro Jahr, die wieder in ihre Produktion von Solarzellen fliessen (Müller et al. 2005, Friedl 2008). Ein weltweites Rücknahme- und Verwertungssystem für Altmodule wird unter dem Programm "PVCYCLE" etabliert (www.pvcycle.org). Rezykliertes Silizium für Solarzellen kann bereits mit den existierenden Verwertungs-Verfahren günstiger und etwa drei Viertel weniger energieintensiv hergestellt werden als neues Silizium (Friedl 2008). Kostengünstige Verfahren zur Wiedergewinnung von Cadmium aus alten CdTe-Zellen sind entwickelt (Fthenakis et al. 2007). Die FirstSolar nimmt bereits auch defekte CdTe-Module zur Verwertung zurück und äufnet gleichzeitig ein Fond zur garantierten Rücknahme verkaufter Module (Wild-Scholten et al. 2005). Verfahren zur leichteren Trennung und Verwertung werden entwickelt (Design-for-Recycling) (Wild-Scholten et al. 2005).

Zusammenfassung Solarstrom: Die heute erzeugten Belastungen sind im Vergleich mit der konventionellen Stromproduktion gesamthaft besser, und selbst in den kritisierten Bereichen ("Versauerung" und "Sommersmog") gleichrangig mit dem schweizerischen Strommix. Mit zukünftigen Fabrikationsanlagen, in welchen die Solarzellenproduktion noch effizienter gestaltet ist, werden auch die – vergleichsweise geringen – Umweltbelastungen der Solarenergie weiter sinken.

Weitere Umweltbelastungen durch Solarwärme

Solarkollektoren sind vergleichsweise einfache technische Einrichtungen. Aber auch hier gibt es teilweise kritische Komponenten.

Die meisten Solarkollektoren verwenden zur besseren Strahlungsausnutzung Beschichtungen. Früher enthielten diese Beschichtungen oft das problematische Schwermetall Chrom (sog. Schwarzchrombeschichtung), allerdings in sehr geringen und schwerlöslichen Mengen. Neuere Beschichtungen bestehen meist aus Titan-Nitrid-Oxid (TiN_xO_y Markenname Tinox). Diese Beschichtungen weisen eine schadstoffarme Produktion auf, besitzen bessere Absorptionseigenschaften als galvanische Beschichtungen und benötigen durch Plasmabeschichtung nur noch 10% des direkten Energieaufwandes früherer Beschichtungsverfahren.

Als Wärmeträger fliesst in den Kollektorröhren eine 40%-ige wässrige Glykollösung. Aufgrund der geringen Mengen und der guten Abbaubarkeit darf in der Schweiz die Glykollösung beim Anlagenrückbau via Kanalisation und Kläranlage entsorgt werden (Doka 2007, S.41).

Herausgeber:

SWISSOLAR 

Schweizerischer Fachverband für Sonnenenergie

Neugasse 6, 8005 Zürich

Tel: 044 250 88 33 Fax: 044 250 88 35 **Infoline: 0848 000 104**

info@swissolar.ch; www.swissolar.ch

Autor dieses Merkblattes:

Gabor Doka, Doka Ökobilanzen, Zürich, Juni 2008

Literatur:

Alsema & Wild-Scholten 2007: Alsema E.A., Wild-Scholten M. "Reduction of Environmental Impacts in Crystalline Silicon Photovoltaic Technology: An Analysis of Driving Forces and Opportunities", Energy Research Centre of the Netherlands (ECN) <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2007/m07059.pdf> (4.Feb 2008)

Doka 2007: Doka G. (2007) Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services. Ecoinvent v2.0 Schlussbericht Nr. 13, Teil I. 2007 Schweizer Zentrum für Ökoinventare, Dübendorf, CH. Doka Life Cycle Assessments, Zu rich.

Dones et al. 2007: Dones R., Bauer C., Bolliger R., Burger B., Faist M., Frischknecht R., Heck T., Jungbluth N., Röder A., Tuchschnid M.: Sachbilanzen von Energiesystemen. Ecoinvent v2.0, Schlussbericht Nr. 6.

Friedl 2008: Friedl C. "PV stärkt ihren Kreislauf" in Photovoltaik Nr.1, 2008, p.46-50, <http://www.photovoltaik.eu>

Fthenakis & Alsema 2006: Fthenakis V., Alsema E. Photovoltaics Energy payback times, Greenhouse Gas Emissions and External Costs: 2004 – early 2005 Status. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2006, Vol. 14, p. 275-280 http://www.dca.columbia.edu/papers/Photovoltaic_Energy_Payback_Times.pdf (16. Apr. 2008)

Fthenakis et al. 2007: Fthenakis V., Kim C., Wang W. (2007) Separation of Cd from Te in CdTe Recycling Presented at the DOE Solar Energy Technologies Program Peer Review meeting held April 17-19, 2007 in Denver, Colorado. National Photovoltaic (PV) EHS Research Center Brookhaven National Laboratory. http://www1.eere.energy.gov/solar/review_meeting/pdfs/sys_8_fthenakis_bnl.pdf (14. Apr. 2008)

Knapp & Jester 2000: Knapp K.E., Jester T.L. An Empirical Perspective on the Energy Payback Time for Photovoltaic Modules. Solar 2000 Conference, Madison, Wisconsin June 16-21, 2000. <http://www.hubbartpeak.com/apollo2/knapp/PVEPBTpaper.pdf> (14. Apr. 2008)

Müller et al. 2005: Müller A., Wambach K., Alsema E. (2005) Life Cycle Analysis of a Solar Module Recycling Process. In: Materials Research Society Fall 2005 Meeting, Boston, USA. <http://www.solarworld.de/solarmaterial/english/press/8AV.3.14.pdf> (29.Feb 2008) s. auch <http://www.solarworld.de/solarmaterial>

Wild-Scholten et al. 2005: Wild-Scholten M., Wambach K., Erik Alsema E., Jäger-Waldau A. (2005) Implications of EU environmental legislation for PV. 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, 6-10 June 2005. http://www.ecn.nl/fileadmin/ecn/units/zon/docs/8BP.2.5_deWild-Scholten_M.J.pdf (29.Feb. 2008)