

Umweltbilanz der Solarenergie

Das Wichtigste in Kürze

1. Die zur Herstellung einer Photovoltaik (PV)-Anlage aufgewendete Energie wird innert weniger Betriebsjahre amortisiert, d.h. durch Solar-Stromproduktion kompensiert. Nach dieser Zeit (= Energierückzahldauer) erzeugen PV-Anlagen aus frei verfügbarer Solarstrahlung Energie, im Gegensatz zu konventionellen Energiesystemen, die während ihrer *gesamten* Betriebsdauer eine Energiezufuhr (z.B. in Form von Erdöl) brauchen.
2. Die Nutzung der Solarenergie erzeugt zwar Schadstoffe (wie jede Technologie). In der gesamtökologischen Analyse schneidet jedoch der Solarstrom rund 3 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 PV-Fabrikation 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; die Energierückzahldauer sinkt somit.

Einführung/Problemstellung

Immer wieder wird die Behauptung gehört, dass Solaranlagen – insbesondere Solarstromanlagen (Photovoltaik) – so aufwändig hergestellt seien, dass sie die zur Herstellung benötigte Energie während ihrer Lebensdauer gar nicht mehr aufwiegen könnten. Die Energiebilanz von Solaranlagen sei somit negativ und Solarenergie sei aus diesem Grund eine ineffiziente Technologie. Es soll hier gezeigt werden, dass bei einer sorgfältigen und umfassenden Betrachtung diese Behauptungen gegenstandslos werden.

Aufwand und Ertrag von Solaranlagen

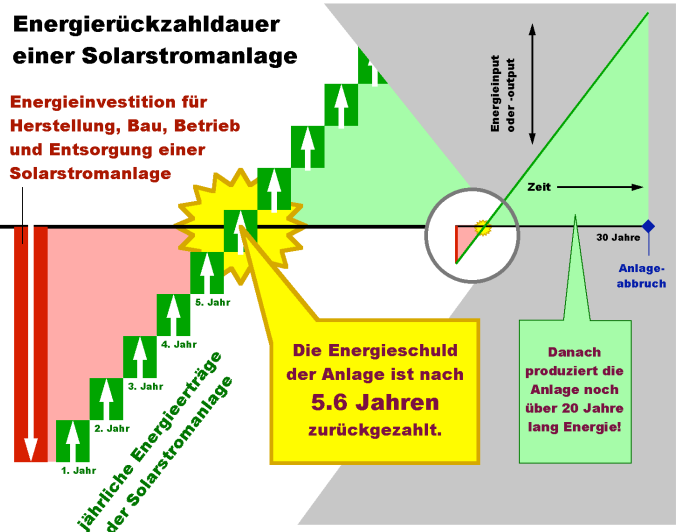
Mit Solarzellen kann Strom direkt aus Sonnenlicht gewonnen werden – ohne Lärm, ohne Verschmutzung während des Betriebs. Allerdings sind solche Zellen relativ aufwändig in der Herstellung. Die Solarzellenherstellung ist ein energieintensiver High-Tech-Prozess. Die Anlagen zur Produktion von Solarenergie verbrauchen also zuerst einmal selber Energie.

Eine gesamthafte Bilanz der Herstellung, des Betriebs und der Entsorgung verschiedener Solaranlagen wurde im Standardwerk "Ökoinventare von Energiesystemen" durchgeführt¹.

Energiebilanz Solarstrom (Photovoltaik)

Die Herstellung einer typischen Schweizer Solarstromanlage² benötigt gemäss dieser Studie rund 200'000 Megajoule Primärenergie³. Diese Anlage kann unter Schweizer Bedingungen⁴ jedes Jahr 2570 Kilowattstunden Elektrizität ins Niederspannungsnetz einspeisen. Müsste diese jährliche Elektrizitätsmenge aus konventionellen Quellen hergestellt werden, würden dazu 35'300 Megajoule Primärenergie benötigt⁵. Bei einem anfänglichen

Investitionsaufwand von 200'000 Megajoule Primärenergie und einem jährlichen Energieertrag im Wert von 35'300 Megajoule Primärenergie dauert es **5.6 Jahre**, bis diese Energieinvestition aufgewogen ist⁶. Nach dieser Zeit, der sogenannten Energierückzahldauer ERZ, hat die Solar-



anlage ihre Energieschuld vollständig abgetragen und erzeugt nun netto Elektrizität aus frei verfügbarer Solarenergie⁷.

Andere Quellen⁸ haben Energierückzahlauern von Solaranlagen berechnet und kommen für gegenwärtige kristalline Anlagen auf Werte im Bereich von 3 bis 10 Jahren. Der Bereich erklärt sich vor allem durch Schwankungen im Ertragsbereich (Zellen-Wirkungsgrad, Klima des Standortes, Ausrichtung der Anlage). In naher Zukunft werden gemäss denselben Quellen durch Produktionsverbesserungen Energierückzahlauern von 1 bis 3 Jahren möglich werden. Die Gründe für Verbesserung liegen vor allem im Übergang von der Nischenproduktion zur Massenproduktion, der Verwendung von weniger energieintensivem Silizium und weniger materialintensiven Produktionsverfahren.

Energiebilanz Solarwärme (Solarkollektor)

Eine Energiebilanzierung kann auch für wärmeproduzierende Solaranlagen (sog. Solarkollektoranlagen) durchgeführt werden. In den "Ökoinventaren von Energiesystemen" wurden fünf verschiedene, für die Schweiz typische Kollektoranlagen zur Warmwasservorwärmung bilanziert. Dabei wurden alle nötigen Prozesse zur Herstellung, Bau, Betrieb und Entsorgung berücksichtigt. Die Energierückzahldauer für Solarwärme liegt für diese Anlagen im Bereich von **2 bis 3 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 "Ökoinventaren von Energiesystemen" wurden diese (und alle anderen) Emissionen der solaren Prozesskette erfasst und bilanziert.

¹ Diese Publikation wurde von der ETH Zürich und dem PSI Villigen in einem vom Bundesamt für Energie (BFE) geförderten Projekt erstellt. Der Autor dieses Merkblattes ist langjähriger Mitarbeiter der Forschungsgruppe Ökobilanzen der ETH und Autor des Teils "Photovoltaik" in den "Ökoinventaren von Energiesystemen".

² Gesamte Anlage inkl. Tragstrukturen und Elektronik (nicht nur Solarzellen), 3kW-peak Leistung, dachintegrierte monokristalline Siliziumzellen

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, Wasserkraft und Biomasse berücksichtigt.

⁴ Jahresernte 860 kWh/kWpeak Jahr

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

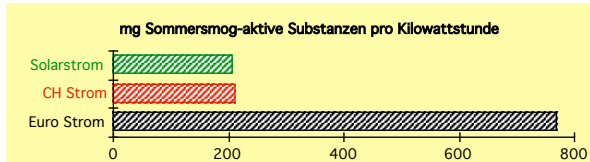
⁶ Dies ist ein Bruchteil der gesamten Lebensdauer von Solaranlagen von etwa 30 Jahren

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

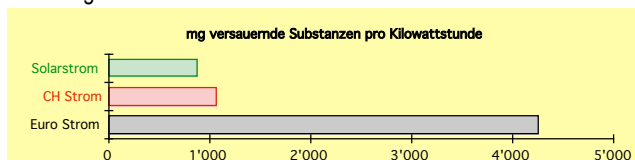
⁸ siehe Literaturüberblick in Alsema, E.A., P. Frankl, and K. Kato, "Energy Pay-Back Time of Photovoltaic Energy Systems: Present Status and Future Prospects", 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, 1998 (No. 98053).

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 Umwelt-schadenskategorien "Sommersmog" und "Versauerung" werden hier für einen Vergleich beigezogen. Es werden alle Emissionsquellen im Lebenszyklus betrachtet, also neben Fabrikation auch Bau, Betrieb und Entsorgung.

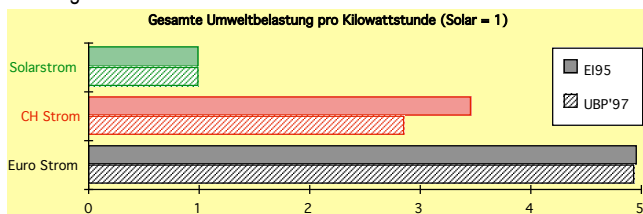
Eine Solarstromanlage in der Schweiz stösst aus diesen Gründen pro Kilowattstunde insgesamt **208 Milligramm Sommersmog-aktive Substanzen** aus¹¹. Eine Kilowattstunde aus dem Europäischen Elektrizitätsmix UCTE¹² belastet die Umwelt dagegen mit 770 Milligramm Sommersmog-aktiven Substanzen - oder beinahe die vierfache Menge. Eine Kilowattstunde aus dem Schweizer Stromnetz¹³ erzeugt mit 212 Milligramm etwa gleich viel Sommersmog wie Solarstrom.



Eine Solarstromanlage in der Schweiz stösst pro Kilowattstunde insgesamt **890 Milligramm versauernde Substanzen** aus¹⁴. Eine Kilowattstunde aus dem Europäischen Elektrizitätsmix UCTE belastet die Umwelt dagegen mit rund 4300 Milligramm versauernden Substanzen - oder beinahe die fünf-fache Menge. Eine Kilowattstunde aus dem Schweizer Stromnetz erzeugt mit 1080 Milligramm leicht mehr Versauerung als Solarstrom.



Wenn also von kritischer Seite behauptet wird, dass die Solarzellen-fabrikation unakzeptabel umweltbelastend sei, so müsste die gegenwärtige Praxis der Schweizerischen Stromproduktion zu ähnlichen Einwänden führen, da die Belastung bezüglich der kritisierten Schadstoffe vergleichbar ist. Bei einer *gesamtökologischen* Analyse, in der weitere Aspekte wie Treibhauseffekt, Ressourcenverbrauch und Endlagerung radioaktiver Abfälle berücksichtigt werden, scheidet die Solarenergie weit besser als der schweizerische Strommix ab¹⁵.



⁹ Flusssäure, 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.

¹² UCTE: Union for the Coordination of Transmission of Electricity (vormals UCPTÉ, L'Union pour la Coordination de la Production et du Transport de l'Électricité)

¹³ Schweizer Inlandproduktion inklusive der aus dem Ausland importierten Strommengen.

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

¹⁵ Die Umweltbelastungen von Solarstrom sind rund 3 mal geringer als diejenigen des Schweizer Strommixes; berechnet nach Eco-indicator95 (EI95) und Methode der ökologischen Knappheit (UBP'97). Der Europäische (UCTE) Strommix ist etwa 5 mal belastender als Solarstrom.

Verfahren zum **Recycling von Solarzellen** werden zur Zeit entwickelt. Die Hersteller sammeln alte (oder defekte) PV-Module für ein späteres Recycling. Rezykliertes Silizium für Solarzellen kann bereits mit den existierenden Verwertungs-Verfahren günstiger und weniger energieintensiv hergestellt werden als neues Silizium

Nochmals: Umweltbelastungen sind generell zu vermeiden, das gilt auch für die Solarenergie. Mit zukünftigen Fabrikationsanlagen, in welchen die Solarzellenproduktion weit effizienter gestaltet ist, werden auch die – vergleichsweise geringen – Umweltbelastungen der Solarenergie weiter sinken. Die heute erzeugten Belastungen sind im Vergleich mit der konventionellen Stromproduktion gesamthaft besser, und sogar in den kritisierten Bereichen ("Versauerung" und "Sommersmog") gleichrangig mit dem schweizerischen Strommix.

Weitere Umweltbelastungen durch Solarwärme

Solkollektoren 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 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 Plasmapeschichtung nur noch 10% des direkten Energieaufwandes früherer Beschichtungsverfahren.

Literatur:

Alsema et al. 1998 Alsema, E.A., P. Frankl, and K. Kato, "Energy Pay-Back Time of Photovoltaic Energy Systems: Present Status and Future Prospects", 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, 1998 (No. 98053).

BUWAL 1998 G. Brand, A. Scheidegger, O. Schwank, A. Braunschweig, "Methode der ökologischen Knappheit – Ökofaktoren 1997", Vorabdruck der gleichnamigen BUWAL Schriftenreihe Umwelt Nr. 297, ÖBU, Februar 1998

ESU 1996a R.Frischknecht, P.Suter, U.Bollens, S.Bosshart, M.Ciot, L.Ciseri, G.Doka, R.Hirscher, A.Martin, R.Dones, U.Gantner, "Ökoinventare von Energiesystemen", Gruppe Energie-Stoffe-Umwelt (ESU), ETH Zürich und PSI, Villigen, 3.Auflage, Juli 1996

Goedkoop 1995 M. Goedkoop, "The Eco-indicator 95 – Final Report", Universität Leiden (CML); Pré Consultants, Amersfoort; Netherlands agency for energy and the environment (NOVEM), Utrecht; et al., 1995 (gute Beschreibung des methodischen Vorgehens auch unter: <http://www.pre.nl/eco-ind.html>)

Nowak 2000 Mitteilung von Stefan Nowak, NET AG, vom 13. Juni 2000

SWISSOLAR

Netzwerk für Wärme und Strom

Seefeldstr. 5a, 8008 Zürich

Tel: 01 250 88 33 Fax: 01 250 88 35

info@swissolar.ch; www.swissolar.ch

Info-Linie: 0848 000 104

Autor dieses Merkblattes:

Gabor Doka, Doka Ökobilanzen, Zürich

Juli 2000