

# 15. Einfluss von Solarstrom-anlagen auf die Umwelt

---

*Emmanouil Fylladitakis, Brunel University, UK*

## Lernziele

Nach dem Beenden dieses Kapitels sollten die Leser in der Lage sein:

- die hauptsächlichen Umwelteinflüsse von Solarstrom zu nennen
- die von einer solchen Anlage benötigte Fläche zu begreifen und die Eignung des Installationsstandortes zu beurteilen
- den Einfluss auf Wasserressourcen zu erkennen
- die gefährlichsten Materialien zu kennen, die zur Herstellung von Photovoltaik-Technik eingesetzt werden
- die zur Herstellung von Photovoltaik-Technik notwendigen Energiemengen und ihren Einfluss auf die Erderwärmung zu begreifen
- den visuellen/ästhetischen Einfluss von Solaranlagen zu erkennen und eine Empfehlung zur Eignung bezüglich einer Anwendung aussprechen zu können
- alle vorgenannten Einflüsse empirisch beurteilen zu können

## Einführung

Die Sonne ist zweifelsfrei eine unglaubliche Energiequelle, die es erlaubt, Strom zu erzeugen – scheinbar ohne Verschmutzung oder Einfluss auf die Erderwärmung. Manche argumentieren, dass die Photovoltaik die sauberste Form der Energieerzeugung ist, und einige wenige gehen sogar so weit zu sagen, dass sie die einzige Form ohne jegliche Umweltbelastung ist. Diese Einschätzung ist allerdings fehlerhaft, da Solarenergie tatsächlich einen signifikanten und vielschichtigen Einfluss auf die Umwelt hat: während Herstellung, Betrieb und Entsorgung.

Die Hauptumweltbelastungen von Solarenergie hängen zusammen mit:

1. Landbedarf
2. Wasserverbrauch
3. Rohstoffverbrauch
4. der Nutzung von Gefahrenstoffen
5. den Emissionen während der Lebensdauer
6. der optischen Beeinträchtigung

Größe und Technologie der Solarstromanlage haben einen direkten Einfluss auf die Ausprägung aller zuvor genannten Aspekte. Gebäudeintegrierte Solaranlagen

(BIPV) beispielweise nutzen kein oder fast kein Land, können aber die Ästhetik des Standortes beeinflussen.

### Landnutzung

Solare Großkraftwerke erregen Besorgnis wegen der Land- bzw. Bodenverschlechterung, des Verlustes bewirtschaftbarer oder gar bewohnbarer Gebiete. Je nach Technologie, Standorttopografie und Lage besagen Schätzungen, dass Solarkraftwerke 12.000 bis 40.000 m<sup>2</sup> pro MW benötigen. Windräder haben einen ähnlichen Platzbedarf, können sich aber das Land gegebenenfalls mit anderen Nutzungsformen teilen, z.B. mit der Landwirtschaft.

Studien empfehlen, solare Großkraftwerke dort zu platzieren, wo die Bodenqualität schlecht ist, um so den Landbedarf zu reduzieren [1]. Das könnten Industriebrachen sein, oder aber auch verlassene Tagebaue oder bereits bestehende Übertragungs- oder Transportkorridore [2]. Große Solarstromanlagen sind in der Regel gut geeignet für die Nutzung in isolierten, verlassenen oder anderen Gegenden mit geringer Bodenqualität (Abb. 1).



**Abbildung 1 - Solares Großkraftwerk auf kargem Land von geringem Wert.**

Mittelgroße Anlagen können gut auf Gewerbebauten installiert werden oder als Schallschutzmauern in der Nähe von Krankenhäusern oder zwischen Autobahnen und Wohn-/Gewerbegebieten (Abb. 2).



**Abbildung 2 - Mittelgroße Solarstromanlage als Schallschutzmauer an einer Autobahn. Brenner-Autobahn, bei Marano, Italien.**

Kleinere und gebäudeintegrierte PV-Anlagen werden in der Regel auf bestehenden, künstlichen Strukturen installiert und haben daher einen minimalen Einfluss auf den Landbedarf. Es ist interessant anzumerken, dass die für andere Anwendungen durch Solarnutzung unbrauchbar gemachte Nettolandfläche signifikant geringer ausfallen kann als bei Kohle- oder Kernenergie, wenn man alle damit zusammen hängenden Landnutzungen, wie z.B. Abbau, Weiterverarbeitung usw., berücksichtigt [16].

### Wasserverbrauch

Der Wasserverbrauch kann eine problematische Angelegenheit werden, wenn für Solarstromanlagen, wie für alle thermischen Kraftwerke, Wasser zur Kühlung benötigt wird. Da die Standorte mit dem höchsten Potenzial für solche Kraftwerke für gewöhnlich in Gebieten mit trockenem Klima liegen, sind sorgfältige Abwägungen essenziell [1, 3, 4].

Photovoltaikpanels benötigen scheinbar kein Wasser zur Erzeugung von Elektrizität. Allerdings wird Wasser für ihre Wartung benötigt, damit die Anlage ihre maximale Leistungsfähigkeit aufrechterhält. Gerade zur Reinigung der Panels ist Wasser nötig, und die stark schwankende Menge hängt wesentlich vom Standort der Anlage ab [5]. Weiterhin wird, wie für fast alle Herstellungsprozesse, Wasser während der Herstellung der Panels und anderer Komponenten benötigt [6].



**Abbildung 3 - Reinigung einer kleineren Solarstromanlage mittels Wasserstrahl.**

Wenngleich das kein direkter Wasserverbrauch ist, so können Solargroßkraftwerke doch gravierende Auswirkungen auf die Wasserressourcen am Installationsstandort haben. Sie können sowohl die Grundwassererneuerung reduzieren, als auch die Reinigung der Luft und des Regenwassers von Verschmutzung verringern, und sogar die Wahrscheinlichkeit von Überflutungen erhöhen [7]. Das ist besonders wahrscheinlich, wenn für die Installation die Abholzung von Bäumen an einem Hang erforderlich war. Allerdings sind die Auswirkungen von Solarstromanlagen, wenn man sie mit jeglicher Form von konventioneller Energieerzeugung vergleicht, immer noch ein großer Gewinn [7].

#### Rohstoffverbrauch

Abgesehen davon, dass die Herstellung aktueller Solarpanels ein energieintensiver Prozess ist, sind auch große Mengen Rohstoffen erforderlich. Sehr große Menge von gewöhnlichen Mineralien, wie Eisen, Kupfer und Aluminium, sind für die Herstellung von PV-Panels erforderlich. Aluminium- und Kupfererze werden von kohle-, öl- oder gasbetriebenen Kraftwerken nicht oder nur in unbedeutenden Mengen verwendet. Eisen wird in allen konventionellen Energieerzeugungsprozessen benötigt, aber man schätzt, dass Solarstromanlagen im Vergleich mit konventionellen Energien weitaus größere Mengen an Eisen pro erzeugter kWh erfordern; mehr sogar als kohlebetriebene Anlagen [8].

Obschon alle diese Materialien wiederverwendbar sind, darf man die immensen Mineralabbauemengen nicht ignorieren. Studien belegen, dass 3,3g Eisenerz und 1,2g Aluminiumerz (Bauxit) pro erzeugter kWh nötig sind [9]. Solche

Zahlen erfordern wirkungsvolle Recyclingprogramme, wenn Solarstromanlagen eine Hauptrolle bei der Energieversorgung spielen sollen.

Und auch, wenn die erforderlichen Mengen nur gering sind, so sind Substanzen wie Tellurid, Indium, Cadmium und Gallium seltene Rohstoffe – und manche, wie Cadmium, auch noch giftig. Diese Stoffe zu beschaffen, kann ein kostenintensiver und schwieriger Prozess sein, besonders wenn sie giftig sind.

### Gefahrstoffe

Der Herstellungsprozess von Solarpanels und der dazugehörigen Komponenten (wie Wechselrichter) involviert eine ganze Anzahl von Gefahrstoffen. Das Austreten dieser Gefahrstoffe in die Umwelt wird häufig als die kritischste Umweltbelastung sowohl kleiner als auch großer Solarstromanlagen erachtet [10]. Die meisten davon werden zur Reinigung der Halbleiteroberfläche von Solarzellen verwendet. Diese Chemikalien sind ähnlich denen, die in der allgemeinen Halbleiterindustrie benutzt werden. Gewöhnlich sind darunter:

- Salzsäure
- Schwefelsäure
- Salpetersäure
- Fluorwasserstoff
- 1,1,1-Trichlorethan
- Azeton

Menge und Typ der verwendeten Chemikalien hängen von der Art der Zelle ab, der notwendigen Reinigung und der Größe des Siliziumwafers [1]. Fortgeschrittenere Technologien neigen dazu, die Liste der beteiligten Gefahrstoffe noch zu verlängern. Dünnschichtzellen beispielsweise enthalten mehr Giftstoffe als klassische Siliziumzellen, darunter Galliumarsenid [11, 12], Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS) [13, 14] und Kadmiumtellurid [15, 16]. Im normalen Betrieb stellen Kadmiumtellurid-Zellen überhaupt kein Umweltrisiko dar. Dennoch können sie im Feuer, und nur im Feuer, giftige Gase erzeugen [17]. Kupfer-Indium-Diselenid-Zellen werden im Allgemeinen als weniger potenziell gefährlich erachtet als Kadmium-Tellurid-Zellen [17]. Bei unsachgemäßer Behandlung und Entsorgung können diese Stoffe eine ernsthafte Bedrohung für die Umwelt und die öffentliche Gesundheit darstellen. Allerdings haben Hersteller einen hohen finanziellen Anreiz, sicherzustellen, dass diese wertvollen und oft seltenen Rohstoffe eher recycelt als weggeworfen werden.

Und dennoch sind im Lebenszyklus einer Solarstromanlage weit weniger Gefahrstoffe involviert im Vergleich zu konventionellen Energieformen. Zum Beispiel sind Kadmiumemissionen bei Kohlekraftwerken fast 300 Mal höher [18, 19]. Die Emissionen verbreiteter Schadstoffe, die gefährlich für das Wohlergehen von Menschen sind, wie z.B. NO<sub>x</sub> und SO<sub>2</sub>, sind um Größenordnungen geringer als bei

konventioneller Energie – mit Ausnahme der Kernenergie [19]. Die bei der Verbrennung entstehenden Emissionen in konventionellen ölbetriebenen Kraftwerken enthalten auch Schadstoffe, die mit Krebs, Herz-Kreis-Erkrankungen und Fortpflanzungsproblemen in Verbindung gebracht werden [20]. In dieser Hinsicht sind Solarstromanlagen jeglichen verbrennungsbasierten Kraftwerken weit überlegen.

Der Herstellungsprozess von Fotozellen ist auch ein bekanntes Gesundheitsrisiko für die Arbeiter, da für sie das Risiko des Inhalierens von Siliziumstaub besteht [21-23].

#### Klimarelevante Emissionen während des Lebenszyklus

Ohne Zweifel entstehen während des Betriebs von Solarstromanlagen quasi keine klimarelevanten Emissionen. Allerdings werden ebensolche in fast jedem anderen Stadium des PV-Lebenszyklus erzeugt. Dazu zählen die Herstellung der Solarpanels und zugehöriger Komponenten, ihr Transport, ihre Installation, die baulichen Veränderungen am Installationsort, die Wartungsprozesse und sogar der Rückbau und das Recycling von außer Betrieb genommenen Anlagen.

Der Primärenergieverbrauch bei der Herstellung der Panels war für Jahrzehnte die größte Sorge der Forscher. Ein früher erschienener Übersichtsbeitrag hat viele von diesen Studien zusammengefasst und vor Allem die signifikante Uneinigkeit unter den Forschern festgestellt [24]. Wie der Autor berichtet, reichten die Angaben für den Energieverbrauch bei der Herstellung eines Quadratmeters multikristallinen Siliziums (mc-Si) von 667 kWh bis 2115 kWh. Ebenso für monokristallines Silizium (mn-Si): es wurden Energieverbräuche zwischen 1470 und 4580 kWh pro m<sup>2</sup> berichtet. Dünnschicht-Technologien sind weit weniger energieintensiv; in der Regel erfordern sie nur ein Viertel der Energie, die zur Herstellung eines gleichwertigen mc-Si-Panels benötigt wird. Allerdings beinhaltet die Übersichtsstudie auch ältere Studien von vor dem Jahr 2000. Damit stützten sie sich auch auf Annahmen aus älteren Herstellungsmethoden und Siliziumverarbeitung. Außerdem muss angemerkt werden, dass alle ähnlichen Studien die geschätzte Produktion der Solarstromanlage voraussetzen müssen, die ja ganz offensichtlich von Standort zu Standort schwankt. Daher haben Studien, die an Orten mit geringer Sonneneinstrahlung durchgeführt wurden, weniger optimistische Ergebnisse [8].

Die meisten Schätzungen der Emissionen einer Solarstromanlage während ihres Lebenszyklus liegen zwischen 30 und 80 Gramm Kohlendioxid-Equivalent pro erzeugter kWh, in Abhängigkeit vom Energiemix des Gebietes/Landes [25]. Es gibt Studien, die besagen, dass neuere PV-Technologien, wie z.B. Kadmium-Tellurid-Panels (Cd-Te) bis auf 24 Gramm/kWh herunter gehen können, womit sie die Kernenergie herausfordern [26-28]. Diese Emissionen werden fast komplett der Produktion und dem Transport der für eine Solaranlage benötigten Stoffe zugerechnet, z.B. Panels und Elektronik. Die in Verbindung mit den Stoffen/Materialien einer konventionellen Anlage anfallenden Emissionen machen

nur einen geringen Prozentsatz ihrer Gesamtemissionen pro erzeugter kWh aus, da ein Großteil ihrer Treibhausgasemissionen beim Betrieb entstehen [28]. Und selbst, wenn man ihre Betriebsemissionen nicht rechnet, übersteigen Produktion und Transport ihrer Treibstoffe bei weitem die Treibhausemissionen von Solarpanels pro kWh [29].

### Optische Wirkung

Ein weiterer wichtiger Umwelteinfluss ist die optische Wirkung von Solarstromanlagen. Die visuelle Beeinträchtigung einer gebäudeintegrierten Solarstromanlage kann sehr hoch sein, sich aber auch leicht beheben lassen. Mit sorgfältigem Architekturdesign und ästhetischen Materialien kann man Solarpanels als Designelemente einfließen lassen, die das Aussehen eher verschönern als stören. Der Architekt muss die Panels und andere Komponenten nicht komplett verstecken, sondern sie als einen Bestandteil in das Gesamtdesign integrieren. Auf Herstellerseite können moderne leichte Designs für den Einsatz in bevölkerten Gebieten und auf Gebäuden entwickelt werden; auch eingefärbte Versionen sind schon seit einigen Jahren auf dem Markt. Eingefärbte Panels werden oft eingesetzt, um das Erscheinungsbild von Keramikdachziegeln oder Glas zu simulieren. Nachrüstanlagen auf Dächern und großen Oberflächen von Gebäuden sind generell auch eine gute Lösung, außer wenn das Gebäude optisch nicht verändert werden kann, z.B. solche von historischer oder kultureller Bedeutung. Weiterhin können Dünnschichtpanels leicht Glas- oder Spiegeloberflächen auf großen Gebäuden ersetzen. Da Dünnschichtpanels eine geringere Lichtdurchlässigkeit haben als Glas, können sie auch zur Ergänzung der Kühlleistung verwendet werden, da sie Schatten oder sogar Wärmeableitung bieten [30]. Allerdings muss der Architekt immer Blendeffekte berücksichtigen. Die Ersetzung von Glasflächen kann sehr gut die einzige Methode sein, die man an Gebäuden mit historischem oder kulturellem Wert, wo optische Veränderungen der Konstruktion selbst unmöglich sind, anwenden kann.



**Abbildung 4 - Die von Onyx Solar konzipierte belüftete Solarfassade des Center for Genomic and Oncologic Research (GENyO) der Pfizer-Universität Granada-Junta de Andalucía. Sie erzeugt ungefähr 32 MWh/Jahr.**

Solare Großkraftwerke sind eine kompliziertere Angelegenheit. Die Installation einer Großanlage an oder nahe bei Naturstandorten, Touristenattraktionen, archäologisch oder ökologisch wichtigen Orten ist problematisch und muss vermieden werden. Großanlagen brauchen den richtigen Ort, in der Regel außerhalb von Wohn- oder auch Gewerbegebieten. Verlassene Regionen oder Land von schlechter Qualität sind die geeignetsten Orte für solche Anlagen.



**Abbildung 5 - Polykristalline Solarpanels, die nachgerüstet wurden, um die Fassade eines Gewerbegebäudes zu bedecken. Es wurden damit Spiegel ersetzt.**

#### Literaturnachweis

- [1] M. M. Hand, S. Baldwin, E. DeMeo, J. M. Reilly, T. Mai, D. Arent, *et al.* (2012, April, 18th). *Renewable electricity futures study*. Available: [http://www.nrel.gov/analysis/re\\_futures/](http://www.nrel.gov/analysis/re_futures/)
- [2] United States Environmental Protection Agency. (2015, April, 18th). *Renewable Energy at Mining Sites*. Available: <http://www.epa.gov/aml/revital/renewable.htm>
- [3] D. Mills, "Advances in solar thermal electricity technology," *Solar energy*, vol. 76, pp. 19-31, 2004.
- [4] K. Ummel and D. Wheeler, "Desert power: the economics of solar thermal electricity for Europe, North Africa, and the Middle East," *Center for Global Development Working Paper*, 2008.
- [5] V. Fthenakis and H. C. Kim, "Life-cycle uses of water in U.S. electricity generation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 2039-2048, September 2010.
- [6] V. M. Fthenakis and H. C. Kim, "Photovoltaics: Life-cycle analyses," *Solar Energy*, vol. 85, pp. 1609-1628, August 2011.
- [7] D. Turney and V. Fthenakis, "Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 3261-3270, 2011.
- [8] R. Laleman, J. Albrecht, and J. Dewulf, "Life Cycle Analysis to estimate the environmental impact of residential photovoltaic systems in regions with a low solar irradiation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 267-281, 2011.
- [9] M. Pehnt, "Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies," *Renewable energy*, vol. 31, pp. 55-71, 2006.



- [10] T. Tsoutsos, N. Frantzeskaki, and V. Gekas, "Environmental impacts from the solar energy technologies," *Energy Policy*, vol. 33, pp. 289-296, 2005.
- [11] C. Jagadish and S. J. Pearton, *Zinc oxide bulk, thin films and nanostructures: processing, properties, and applications*: Elsevier, 2011.
- [12] V. Fthenakis, P. Moskowitz, and J. Lee, "Manufacture of amorphous silicon and GaAs thin film solar cells: an identification of potential health and safety hazards," *Solar cells*, vol. 13, pp. 43-58, 1984.
- [13] D. L. Morgan, C. J. Shines, S. P. Jeter, R. E. Wilson, M. P. Elwell, H. C. Price, *et al.*, "Acute pulmonary toxicity of copper gallium diselenide, copper indium diselenide, and cadmium telluride intratracheally instilled into rats," *Environmental research*, vol. 71, pp. 16-24, 1995.
- [14] N. Naghavi, S. Spiering, M. Powalla, B. Cavana, and D. Lincot, "High-efficiency copper indium gallium diselenide (CIGS) solar cells with indium sulfide buffer layers deposited by atomic layer chemical vapor deposition (ALCVD)," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 11, pp. 437-443, 2003.
- [15] V. Fthenakis and P. Moskowitz, "Thin-film Photovoltaic Cells: Health and Environmental Issues in their Manufacture Use and Disposal," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 3, pp. 295-306, 1995.
- [16] K. Hynes, A. Baumann, and R. Hill, "An assessment of the environmental impacts on thin film cadmium telluride modules based on life cycle analysis," in *1994 IEEE first world conference on photovoltaic energy conversion: Conference record of the twenty fourth IEEE photovoltaic specialists conference--1994. Volume 1*, 1994.
- [17] V. Fthenakis, M. Fuhrmann, J. Heiser, A. Lanzirotti, J. Fitts, and W. Wang, "Emissions and encapsulation of cadmium in CdTe PV modules during fires," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 13, pp. 713-723, 2005.
- [18] R. Meij and H. te Winkel, "The emissions of heavy metals and persistent organic pollutants from modern coal-fired power stations," *Atmospheric Environment*, vol. 41, pp. 9262-9272, 2007.
- [19] V. M. Fthenakis, H. C. Kim, and E. Alsema, "Emissions from photovoltaic life cycles," *Environmental science & technology*, vol. 42, pp. 2168-2174, 2008.
- [20] J. Lewtas, "Air pollution combustion emissions: characterization of causative agents and mechanisms associated with cancer, reproductive, and cardiovascular effects," *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, vol. 636, pp. 95-133, 2007.
- [21] R. Merget, T. Bauer, H. Küpper, S. Philippou, H. Bauer, R. Breitstadt, *et al.*, "Health hazards due to the inhalation of amorphous silica," *Archives of Toxicology*, vol. 75, pp. 625-634, 2002/01/01 2002.
- [22] E. C. Rose, "Environmental, health and safety assessment of photovoltaics," NASA, United States, 1983.
- [23] T. L. Neff, *The social costs of solar energy: A study of photovoltaic energy systems*: Elsevier, 2013.
- [24] E. Alsema, "Energy pay-back time and CO2 emissions of PV systems," *Progress in photovoltaics: research and applications*, vol. 8, pp. 17-25, 2000.
- [25] V. Fthenakis and E. Alsema, "Photovoltaics energy payback times, greenhouse gas emissions and external costs: 2004-early 2005 status," *Progress in Photovoltaics: research and applications*, vol. 14, pp. 275-280, 2006.
- [26] V. Fthenakis and H. C. Kim, "Energy use and greenhouse gas emissions in the life cycle of CdTe photovoltaics," in *MRS Proceedings*, 2005, pp. 0895-G03-06.
- [27] V. M. Fthenakis and H. C. Kim, "Greenhouse-gas emissions from solar electric-and nuclear power: A life-cycle study," *Energy Policy*, vol. 35, pp. 2549-2557, 2007.
- [28] H. Hondo, "Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case," *Energy*, vol. 30, pp. 2042-2056, 2005.
- [29] V. Fthenakis and H. C. Kim, "Photovoltaics: Life-cycle analyses," *Solar Energy*, vol. 85, pp. 1609-1628, 2011.
- [30] A. G. Hestnes, "Building integration of solar energy systems," *Solar Energy*, vol. 67, pp. 181-187, 1999.