

Ökobilanz von Solarstrom

In der künftigen schweizerischen Energieproduktion soll gemäss bundesrätlicher Energiestrategie die Photovoltaik eine stark wachsende Bedeutung haben. Wie aber belastet Solarstrom die Umwelt? Einen grossen Einfluss haben der Herstellort der PV-Anlage, die technologischen Fortschritte bei der Fertigung und dem Wirkungsgrad der Solarmodule sowie die Konstruktion der Modulbefestigung. Die Berücksichtigung all dieser Entwicklungen führt zu einer noch besseren Ökobilanz von Solarstrom als bisher angenommen: So vermindern sich beispielsweise die Treibhausgas-Emissionen von Solarstrom gegenüber den heute verwendeten Umweltdaten um fast 60 %, was auch hinsichtlich der schweizerischen Energiestrategie 2050 relevant ist.

Von Daniel Rufer und Arthur Braunschweig

Inhalt:

1. Einleitung.....	1
2. Grundüberlegungen	2
3. Monokristalline Zellen.....	2
4. Frühere Ökobilanz-Ergebnisse.....	3
5. Ökobilanz-Studie für das BFE	3
6. Bilanzierung einer konkreten PV-Anlage (Küsnacht 2012)	6
7. Best Technology 2013	9
8. PV-Anlagen im Jahr 2023.....	9
9. Resultate.....	11
10. Schlussfolgerungen.....	11
Anhang: Geringere Netzverluste durch Solarstrom	13
Quellen	18

1. Einleitung

Als Grundlage für die schweizerische Energiepolitik 2050 [11] liess das Bundesamt für Energie (BFE) 2012 durch Bauer et al. einen Ökobilanz-Vergleich verschiedener Stromerzeugungsarten erstellen [1]. Diese Studie aktualisiert die Umweltdaten der heute gebräuchlichen Technologien zur Stromerzeugung. Für die Photovoltaik kommt diese Studie zu Emissionswerten, welche erstaunlich hoch erscheinen. Die Autoren der vorliegenden Publikation (sowie der daraus erstellten Kurzfassung [2]) haben deshalb die Annahmen von [1] bezüglich Photovoltaik-Anlagen (PV-Anlagen) kritisch hinterfragt und in wesentlichen Punkten aktualisiert und korrigiert. Als Ergebnis zeigt sich, dass beispielsweise die Treibhausgas-Emissionen von Solarstrom um 58% tiefer liegen als in der BFE-Studie dargestellt.

2. Grundüberlegungen

Angesichts der technischen Fortschritte in der Photovoltaik ist es nicht sinnvoll, künftigen Solarstrom auf Basis eines vergangenen Technologie-niveaus zu beurteilen. Andererseits sollen keine spekulativen künftigen Entwicklungen angenommen werden. In der vorliegenden Analyse wird deshalb davon ausgegangen, die *beste heute eingesetzte Technologie* stelle eine geeignete Grundlage dar, um künftige Photovoltaik zu beurteilen. Zu diesem Zweck sind, wie nachstehend beschrieben, einzelne Ökobilanz-Elemente überarbeitet worden.

3. Monokristalline Zellen

Bei PV-Anlagen mit hohem Wirkungsgrad wird in [1] zwischen mono- und polykristallinen Siliziumzellen sowie Cadmiumtellurid-Zellen unterschieden. Die vorliegende Untersuchung beschränkt sich auf Anlagen mit monokristallinen Zellen. Diese hatten in den letzten Jahren einen weltweiten Marktanteil von rund 40 % [3]. Die dabei getroffenen Annahmen und Aktualisierungen gelten grundsätzlich auch für Anlagen mit polykristallinen Zellen (Marktanteil über 50 %), deren Stromproduktion gemäss [1] geringere Umweltbelastungen aufweist; eine vertiefte Betrachtung dieses Solarzellentyps entsprechend der vorliegenden Untersuchung wäre zweifellos sinnvoll. Die Cadmiumtellurid-Technologie ist für die Schweiz nicht relevant, denn gemäss einer Marktumfrage von Swissolar [13] wird sie in der Schweiz gar nicht eingesetzt. Die Marktanteile anderer Dünnschicht-technologien werden von Swissolar kleiner als 1 % (CIS-Zellen), resp. kleiner als 5 % (Zellen mit amorphem Silizium) geschätzt.

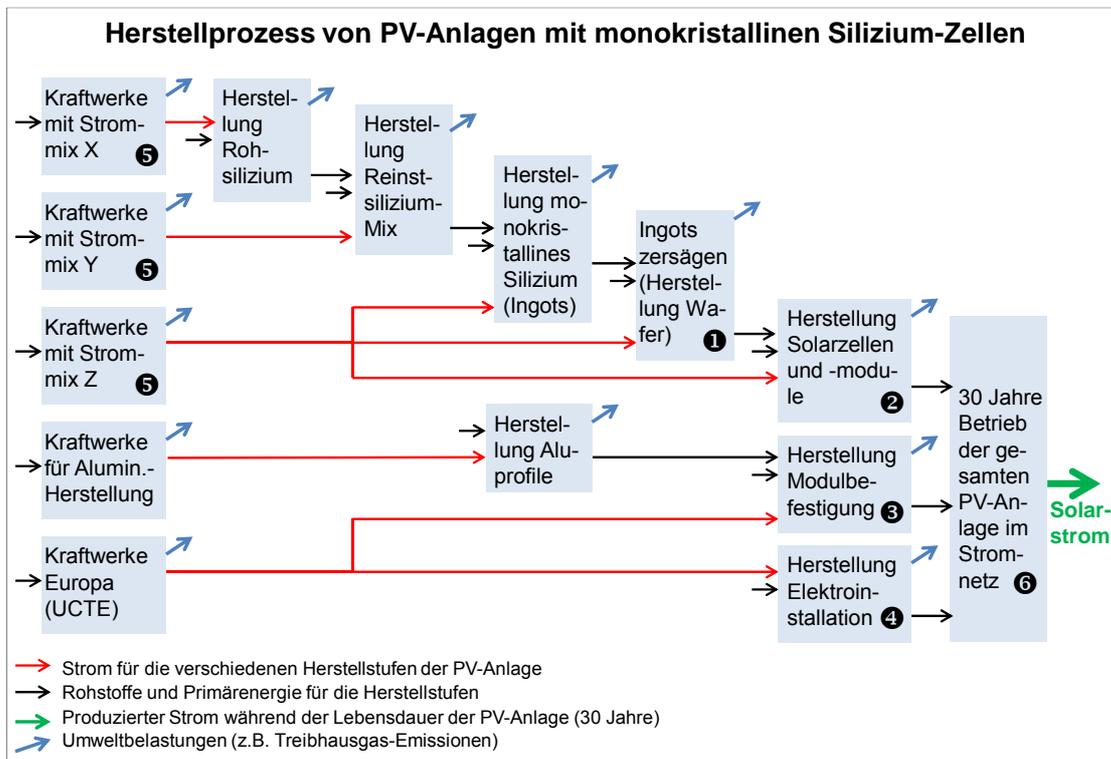


Abbildung 1: Die Umweltbelastung von Solarstrom hängt insbesondere von den Herstellstufen 1 bis 6 ab.

4. Frühere Ökobilanz-Ergebnisse

Der Herstellprozess von PV-Anlagen mit monokristallinen Zellen ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Für alle Herstellstufen existieren dank der Datenbank Ecoinvent [3] detaillierte Ökobilanz-Daten, deren Grundlagen weitgehend aus den Jahren 2005 oder früher stammen. Aufgrund dieser Daten ergibt sich für Solarstrom mit europäischen Modulen eine Umweltbelastung von 83 g Treibhausgas-Emissionen pro kWh (Abbildung 2, Säule A sowie Tabelle 1, Spalte A).

Im einzelnen basiert diese Berechnung auf den folgenden Ecoinvent-Prozessen (wie alle nachfolgend aufgeführten Prozessbezeichnungen gemäss [3]) sowie weiterführenden Annahmen:

- Modul-Herstellung: gemäss Prozess „Strom, Photovoltaik, ab 3kWp, Schrägdachanlage, single-Si, laminiert, integriert“ [3], exkl. den Bauteilen „Schrägdachkonstruktion“, „Elektroinstallationen“ und „Wechselrichter“, ergänzt durch die Transporte ab Werk Deutschland in die Schweiz.
- Befestigung der Module: 10 % der Module mit In-Dach-Befestigung gemäss „Schrägdachkonstruktion, integriert, auf Dach (EUR)“ im Prozess „Strom, ab Photovoltaik, 3kWp, Schrägdachanlage, single-Si, laminiert, integriert“ [3] sowie 90 % der Module gemäss „Schrägdachkonstruktion“ in den Prozessen „Strom, Photovoltaik, ab 3kWp, Schrägdachanlage, single-Si, Paneel, aufgesetzt, auf Dach“, resp. „Strom, Photovoltaik, ab 3kWp, Flachdachanlage, single-Si, auf Dach“ [3].
- Elektroinstallationen: bestehend aus „Elektroinstallationen“ und „Wechselrichter“ im Prozess „Strom, Photovoltaik, ab 3kWp, Schrägdachanlage, single-Si, laminiert, integriert“ [3].
- Netzverluste: 4,4 % des produzierten Stroms, d.h. 50% der Netzverluste von ins Hochspannungsnetz einspeisenden Kraftwerken (Begründung: siehe unten im Abschnitt „Bilanzierung einer konkreten PV-Anlage“).
- Stromnetz Schweiz: Anrechnung der gesamten Umweltbelastung der Netzinfrastruktur wie in [1] (6,8 g CO₂-Äq./kWh).

Wichtige technologische Entwicklungen in den Herstellstufen ❶ bis ❷ gemäss Abbildung 1 liessen das BFE eine Aktualisierung dieser Ökobilanz in Auftrag geben.

5. Ökobilanz-Studie für das BFE

Um die technologischen Entwicklungen in den Herstellstufen von Solarzellen (siehe Abbildung 1) für die Ökobilanzierung abzubilden, nahmen Bauer et al. [1] bei ihrer Aktualisierung der Ecoinvent-Daten für das BFE gegenüber der früheren Solarstrom-Ökobilanz folgende Anpassungen vor:

- Waferherstellung ❶: Reduktion der Dicke der Wafer (monokristalline Silizium-Scheiben) von 270 µm auf die heute üblichen 190 µm, was den Material- und Energieverbrauch sowie die Umweltbelastungen der Vorstufen reduziert ([1], S. 14).
- Strommix ❷: Aktualisierung des Strommixes für die in Europa hergestellten Solarmodule mit einem Teil des Reinstsiliziums aus den USA ([1], S. 15).

- Strommix ⑤: Annahme, dass 34 % der in der Schweiz eingesetzten Module in China und 66 % in Europa produziert werden ([1], S. 15). Der chinesische Strommix hat einen hohen Anteil an Kohlestrom, was zu bedeutend höheren Umweltbelastungen führt.

Die Solarstrom-Ökobilanz gemäss Studie [1] ist in Abbildung 2, Säule B sowie in Tabelle 1, Spalte B, dargestellt. Die Umweltbelastungswerte der „Module exkl. Rahmen“ (Laminat) wurden hier nachmodelliert, indem wie in [1] die Ökobilanzmodelle aus [3] in den oben beschriebenen Punkten aktualisiert wurden. Die Werte für die „Befestigung der Module“ und die „Elektroinstallationen“ wurden wie in [1] direkt aus [3] übernommen. Dabei wurde bei den PV-Anlagen von 10% Laminat (integrierte, resp. Indach-Anlagen) und 90% Paneelen (Aufdach- und Flachdach-Anlagen) ausgegangen. Die Werte von „Netzverluste“ und „Stromnetz“ wurden aus [1] übernommen.

Diese Ökobilanz ergibt wie in [1] 97 g Treibhausgas-Emissionen pro kWh Solarstrom. Da die Studie [1] als Basis für die Energiestrategie 2050 der Schweiz in Auftrag gegeben wurde, passen verschiedene Annahmen nicht zu dieser Aufgabenstellung. So wurden wichtige technologische Fortschritte der letzten 5-10 Jahre nicht berücksichtigt und zu erwartende Entwicklungen nicht antizipiert. Zudem wurde mit einem mittleren Netzverlust von 8,8 % des produzierten Stroms gerechnet, was der unrealistischen Annahme entspricht, dass Solarstrom künftig nur aus Grossanlagen ins Hochspannungsnetz eingespeist wird. Nachfolgend wird gezeigt, dass die Richtigstellung dieser Annahmen notwendig ist, denn damit ergeben sich wesentlich tiefere Umweltbelastungen von Solarstrom. Ein zukünftiger starker Ausbau der Photovoltaik in der Schweiz führt somit zu wesentlich geringeren Umweltbelastungen als gemäss [1] berechnet.

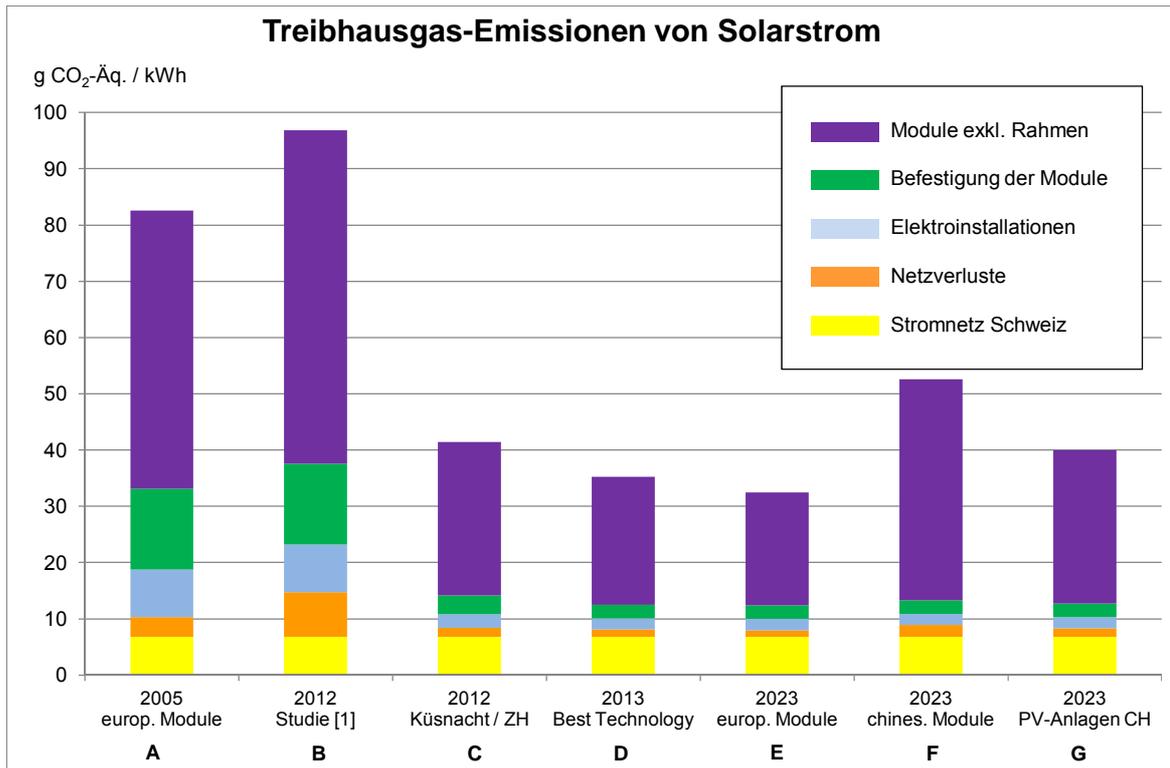


Abbildung 2: Die Technologie-Entwicklung beim Solarstrom verbessert die Ökobilanz.

Die Säulenwerte in obenstehender Abbildung 2 entsprechen den gleichnamigen Spaltenwerten in untenstehender Tabelle 1. Die Buchstaben bezeichnen die verschiedenen im Text beschriebenen Herstellungsvarianten.

Umweltbelastungen:	2005 europ. Module A	2012 Studie [1] B	2012 Küsnacht / ZH C	2013 Best Technol. D	2023 europ. Module E	2023 chines. Module F	2023 PV-Anlagen CH G
- Treibhausgase (g CO ₂ -Äq./ kWh)	82,6	96,8	42,4	35,3	32,5	52,6	40,0
- Umweltbelastungspunkte (UBP'06 / kWh)	171,7	187,0	102,3	96,6	94,9	112,3	101,0
- Nicht erneuerbare Primärenergie (kJ / kWh)	1'314	1'315	575	550	506	569	528

Tabelle 1: Umweltbelastungen von Solarstrom (Varianten A bis G)

6. Bilanzierung einer konkreten PV-Anlage (Küsnacht 2012)

Die überarbeiteten Daten wurden am Beispiel einer konkreten PV-Anlage angewendet: Um die Ökobilanz einer PV-Anlage in CH-8700 in Küsnacht [4] gemäss Stand der Technik im Jahr 2012 zu berechnen, haben die Autoren das frühere Ökobilanz-Modell [3] deshalb in folgenden Punkten aktualisiert:

- Waferherstellung ❶: Wie in der BFE-Studie [1] wurde die Dicke der Wafer mit aktuell üblichen 190 μm eingesetzt.
- Zellen- und Modulherstellung ❷: Technologische Fortschritte bei der Herstellung der Solarzellen und -module bewirkten in den letzten Jahren nahezu eine Verdoppelung des pro m^2 produzierten Solarstroms: Während in der Ökobilanz [3] und in der Studie [1] noch mit einer Jahresproduktion von 125 kWh/m^2 gerechnet wurde, kann bei effizienten, im Jahr 2012 erhältlichen Modulen von 200 kWh/m^2 ausgegangen werden. Wie in Abbildung 3 erläutert, basiert dieser Wert auf einer PV-Anlage in Küsnacht mit Ausrichtung nach Südwest und einer Neigung von 15° . Bei einer jährlichen Produktionsreduktion um 0,5 % (ca. 15 % nach 30 Jahren, d.h. 7,5 % im Durchschnitt der rechnerischen Lebensdauer von 30 Jahren) ergibt dies eine jährliche Stromproduktion von 185 kWh/m^2 im Durchschnitt über 30 Jahre.
- Modulbefestigung ❸: Beim betrachteten Gebäude in Küsnacht [4] handelt es sich um eine Dach-integrierte PV-Anlage. Die Tabelle 2 zeigt, dass gegenüber früheren derartigen Modulbefestigungen heute weniger Material eingesetzt werden muss.
- Elektroinstallationen ❹: Diese umfassen die Elektrokabel sowie den Wechselrichter, welcher den Gleichstrom in Wechselstrom umwandelt. Die technische Entwicklung ermöglichte, die Gleichspannung von früher 50 Volt auf - wie heute üblich - über 600 Volt zu erhöhen. Dies reduziert die für die Kabel notwendige Kupfermenge um über 80 %: Die 2010 erstellte PV-Anlage in Küsnacht [4] mit einer Leistung von 14,2 kWp erforderte Elektroinstallationen mit 11,5 kg Kupfer – gemäss der Sachbilanz in [3] wären dafür früher 65 kg Kupfer notwendig gewesen. Auch die heute wesentlich kleineren Wechselrichter senken den Materialaufwand der Elektroinstallationen.
- Strommix ❺: Für die Ökobilanz der PV-Anlage in Küsnacht wurde bei der Modulherstellung mit philippinischem Strommix und mit Reinstsilizium aus USA gerechnet (Solarmodule der Firma SunPower).
- Stromnetz ❻: Wie in der früheren Ökobilanz [3] und der Studie [1] wird davon ausgegangen, dass die PV-Anlage während 30 Jahren Strom herstellt und ins schweizerische Netz einspeist. Erstellung, Betrieb und Entsorgung des Stromnetzes verursachen eine mittlere Umweltbelastung von 6,8 g CO_2 -Äquivalenten pro verbrauchte kWh des heutigen, konventionell erzeugten Stroms [1]. Im Vergleich dazu beansprucht dezentral eingespeister Solarstrom - selbst bei hohem Solarstromanteil - das Hoch- und Mittelspannungsnetz nur kurzzeitig und das Niederspannungsnetz nur teilweise (siehe dazu die Ausführungen im untenstehenden Anhang dieser Publikation). Da Solarstrom auf das Stromnetz angewiesen ist, wird diesem trotzdem die gesamte Netz-Umweltbelastung (6,8 g CO_2 -Äq./kWh) angerechnet.

- Netzverluste ⑥: Im schweizerischen Stromnetz fallen Netzverluste in Höhe von 8,8% des von den Kraftwerken auf Hochspannungsebene produzierten Stroms, resp. 9,7 % des im Niederspannungsnetz bezogenen Stroms an [6]. Wesentlich geringer sind diese Verluste bei Solarstrom, der dezentral ins Niederspannungsnetz eingespeist und weitgehend im gleichen Netzabschnitt verbraucht wird. Die Abbildung 4 gemäss der Studie Bucher [7, Seite 24] und der Anhang dieser Publikation zeigen: Bei einer Einspeisung von bis zu 15 % Solarstrom durch moderne Wechselrichter entstehen im Niederspannungsnetz keine Netzverluste durch Solarstrom. Bei einem 30%-igen Solarstromanteil sind die Netzverluste noch immer weniger als halb so hoch wie bei zentral eingespeistem Strom. In der vorliegenden Ökobilanz wird beim Solarstrom insgesamt nur mit halb so grossen Netzverlusten gerechnet wie bei Strom aus Kraftwerken, die ins Hochspannungsnetz einspeisen; Dies sind Netzverluste von 4,4% des produzierten Solarstroms, resp. 4,9 % des im Niederspannungsnetz bezogenen Solarstroms. Im Anhang der vorliegenden Publikation findet sich eine detaillierte Begründung dieses Ansatzes.

Die Ergebnisse dieser Ökobilanz „PV-Anlage Küssnacht 2012“ sind in Abbildung 2, Säule C, dargestellt. Es resultieren 42 g Treibhausgas-Emissionen pro kWh Solarstrom. Dies kann als durchschnittlicher Wert für 2012 gebaute, effiziente PV-Anlagen in der Schweiz betrachtet werden, denn die Ausrichtung, resp. Neigung dieser Anlage ist nicht optimal, und es existieren in der Schweiz viele Standorte mit einer höheren mittleren Solareinstrahlung als Küssnacht (z.B. Südschweiz, Westschweiz, Region Bern und generell alle Gebiete über ca. 800 m Meereshöhe).

	Benötigte Menge Aluminium und Stahl zur Befestigung der PV-Module (in kg / m² Modul)			
	Stand 2005 gemäss [3, Kap. 10]		Stand 2013 gemäss [14]	
Ins Dach integrierte PV-Module (Indach-Montagesystem)	Total	2,40 kg/m²	Total	2,22 kg/m²
Auf bestehendem Schrägdach montierte PV-Module (Aufdach-Montagesystem)	Modulrahmen	2,63 kg/m ²	Modulrahmen	2,17 kg/m ²
	Befestigung	4,30 kg/m ²	Befestigung	0,88 kg/m ²
	Total	6,93 kg/m²	Total	3,05 kg/m²
Auf Flachdach montierte PV-Module (Fachdach-Montagesystem)	Modulrahmen	2,63 kg/m ²	Modulrahmen	2,17 kg/m ²
	Befestigung	2,80 kg/m ²	Befestigung	2,21 kg/m ²
	Total	5,43 kg/m²	Total	4,38 kg/m²

Tabelle 2: Materialeinsatz verschiedener Montagesysteme für PV-Anlagen.

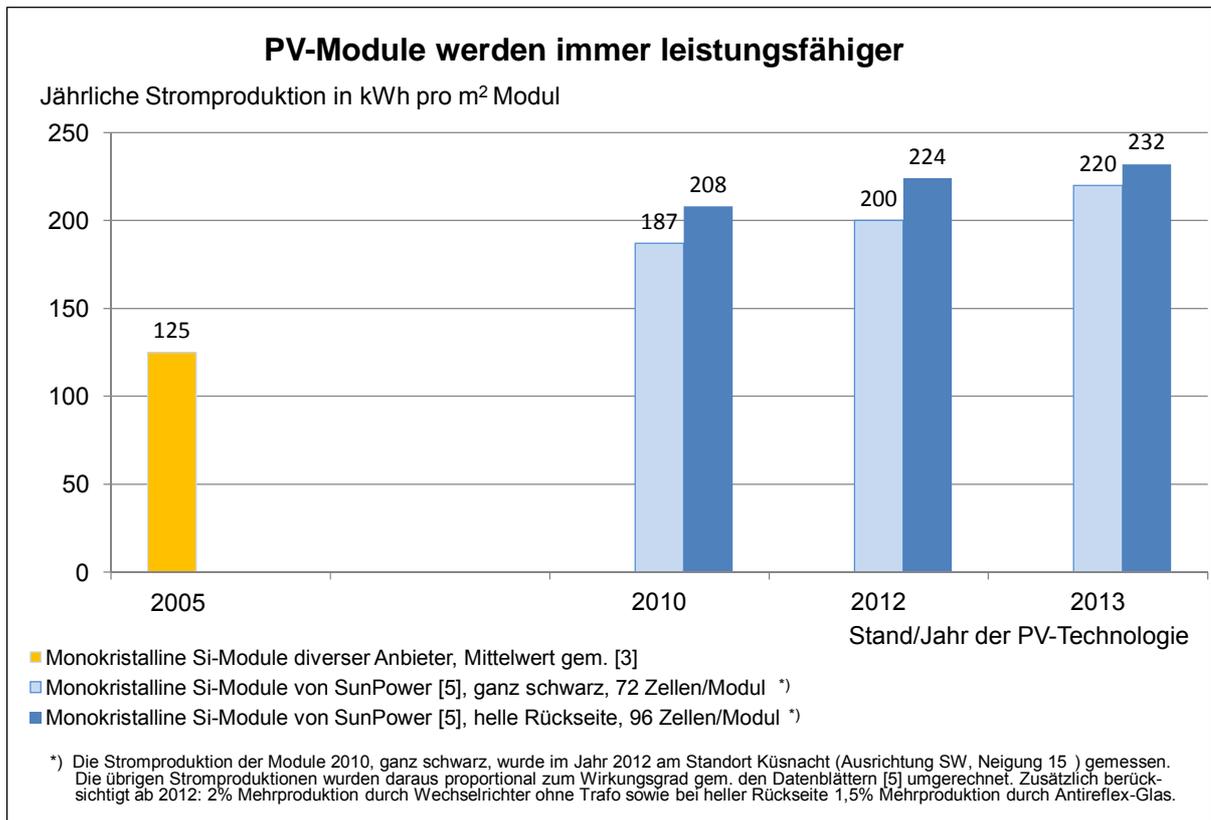


Abbildung 3: Im Jahr 2013 erstellte, leistungsstarke PV-Anlagen produzieren in der Schweiz 232 kWh pro m² und Jahr.

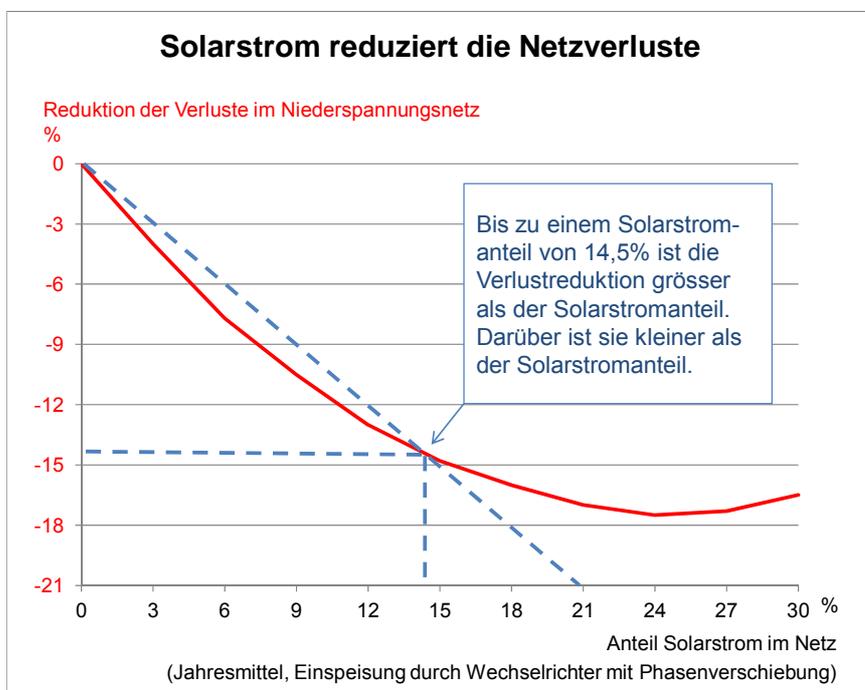


Abbildung 4: Weniger Verluste im Niederspannungsnetz dank Solarstrom [7].

7. Best Technology 2013

Wie hoch ist die Umweltbelastung von Solarstrom in der Schweiz, der durch eine PV-Anlage gemäss neuem Stand der Technik produziert wird? Um diese Ökobilanz „Best Technology 2013“ zu berechnen, sind die Autoren wiederum vom früheren Ökobilanz-Modell [3] ausgegangen. Mit Ausnahme der nachfolgenden Punkte wurden die gleichen Aktualisierungen wie für die Ökobilanzierung „PV-Anlage Küssnacht 2012“ vorgenommen:

- Zellen- und Modulherstellung ②: Statt von 185 kWh/m² wurde gemäss Abbildung 3 für das Jahr 2013 von den leistungsstärksten Modulen mit einer jährlichen Stromproduktion von 232 kWh/m² ausgegangen. Die Produktionsminderung der PV-Module im Verlauf der Lebensdauer (ca. 0,5 % jährlich, d.h. ca. 15 % bis zur rechnerischen Lebensdauer von 30 Jahren) ist dadurch berücksichtigt, dass von einer tatsächlichen Lebensdauer von 33 Jahren ausgegangen wird. Wiederum entspricht dieser Produktionswert aufgrund von Standort und Ausrichtung der betrachteten PV-Anlage etwa einem schweizerischen Durchschnitt für solche leistungsstarken Module,
- Modulbefestigung ③: In der vorliegenden Ökobilanz-Variante wird von 50 % Flachdächern, 40 % Montagen auf bestehenden Schrägdächern und 10 % Dach-integrierten PV-Anlagen ausgegangen [14]. Bei all diesen Montagearten konnte durch Konstruktionsoptimierung die eingesetzte Materialmenge (Aluminium und Stahl) in den letzten Jahren gesenkt werden (siehe Tabelle 2). Zudem ist es heute möglich, den Anteil von Recycling-Aluminium im eingesetzten Material von 32 % auf 80 % zu erhöhen, was eine zusätzliche geringe Verbesserung der Gesamtbilanz ergibt [15].
- Strommix ⑤: Für die Ökobilanz „Best Technology 2013“ wurde für Solarmodule mit dem Herstellort Europa, d.h. mit europäischem Strommix gerechnet. Weitere Herstellorte sind in den Ökobilanzen für das Jahr 2023 berücksichtigt (siehe unten im Abschnitt „PV-Anlagen im Jahr 2023“).

Die Ergebnisse der Ökobilanz „Best Technology 2013“ sind in Abbildung 2, Säule D, dargestellt. Gegenüber der früheren Ökobilanz [3], die ebenfalls auf dem Produktionsstandort Europa basiert (Säule A), reduziert sich die Umweltbelastung von Solarstrom um 57% auf 35 g Treibhausgas-Emissionen pro kWh.

8. PV-Anlagen im Jahr 2023

Gemäss der neuen Energiestrategie des Bundes soll der Solarstrom-Anteil von heute 0,6 % bis im Jahr 2050 auf 20 % steigen [11]. Die dafür notwendigen PV-Anlagen sollen also in den nächsten Jahrzehnten erstellt werden. Massgeblich für die Umweltauswirkungen des Solarstroms wird somit die PV-Technologie in den nächsten 35 Jahren sein. Es scheint deshalb sinnvoll, die Ökobilanz auf einem Technologieniveau zu errechnen, welches in 10 Jahren oder später zu erwarten ist. Zur Abschätzung einer Solarstrom-Ökobilanz in 10 Jahren – also im Jahr 2023 - werden die folgenden Annahmen getroffen, welche allesamt bereits heute technisch realistisch sind:

- Die in [1] erwähnten Projekte zum Recycling des Sägestaubes, der beim Sägen der Silizium-Wafer entsteht, sind bis 2023 umgesetzt. Dies reduziert den Einsatz von monokristallinem Silizium um 50%. Weitere erwartete Verbesserungen gemäss der Studie [8] (z.B. Reduktion der

Wafer-Dicke von 190 µm auf 100 µm oder Verminderung des Ausschusses bei der Herstellung der PV-Zellen) sind nicht berücksichtigt.

- Bezüglich Wirkungsgrad der Solarmodule, d.h. der pro m² erzeugten Strommenge, wird die „Best Technology 2013“ bis 2023 zum Branchendurchschnitt. Dies ist eine vorsichtige Annahme, denn die Studie [8] zeigt, dass auch bei der Modul-Effizienz weiteres Verbesserungspotential besteht.
- Bei den Befestigungssystemen und den Elektroinstallationen für die Solarmodule werden gegenüber dem heutigen Branchenstandard keine Verbesserungen angenommen.
- Beim Strommix zur Herstellung der Solarmodule geht die Studie [1] von 66 % europäischer und 34 % chinesischer Produktion aus. Vorliegend wird nur 50 % europäische, aber 10 % philippinische und 40 % chinesische Herstellung angenommen. Diese Annahmen sind vorsichtig, denn es bestehen Anzeichen, dass chinesische PV-Produktionen in andere Länder verlagert werden. Zudem wird die in mehreren Ländern geplante Förderung umweltschonender Stromproduktion im Strommix nicht berücksichtigt.

Die Säulen E, F und G in Abbildung 2 zeigen die Ergebnisse dieser Solarstrom-Ökobilanz 2023. Säule F zeigt im Vergleich zu Säule E den Einfluss des Produktionsstandortes China mit hohem Anteil an Kohlekraftwerken im Strommix. Die Säule G basiert auf dem oben erwähnten Herkunftsmix für PV-Anlagen in der Schweiz und ergibt 40 g CO₂-Äq./kWh Solarstrom (in der Kurzfassung [2] fälschlicherweise mit 41 g CO₂-Äq./kWh ausgewiesen).

In Studie [1] wird dem Solarstrom ein hoher Verbrauch seltener Rohstoffe angelastet: 53 mg Sb-Äq./kWh bei Cadmiumtellurid-Zellen. Da solche Zellen in der Schweiz kaum eingesetzt werden und im schweizerischen Mix der PV-Technologien nicht berücksichtigt werden müssen, vermindert sich der Wert auf die in [1] ausgewiesenen 14 mg Sb-Äq./kWh heutiger Siliziumzellen. Ein wichtiger Beitrag zu diesem Ressourcenverbrauch bildet der Einsatz von Silber in der Herstellung von Siliziumzellen: Dieser Silberbedarf wird gemäss Studie [8] in den nächsten Jahren um 75 % reduziert und in den Jahren ab 2015 durch das weniger seltene Kupfer ersetzt. Dadurch wird der höhere Verbrauch seltener Rohstoffe beim Solarstrom weitgehend entfallen. Verbleiben wird - wie bei allen anderen Stromerzeugungsarten - ein Wert von 1-2 mg Sb-Äq./kWh als Folge des Kupferverbrauchs für das Stromnetz [1].

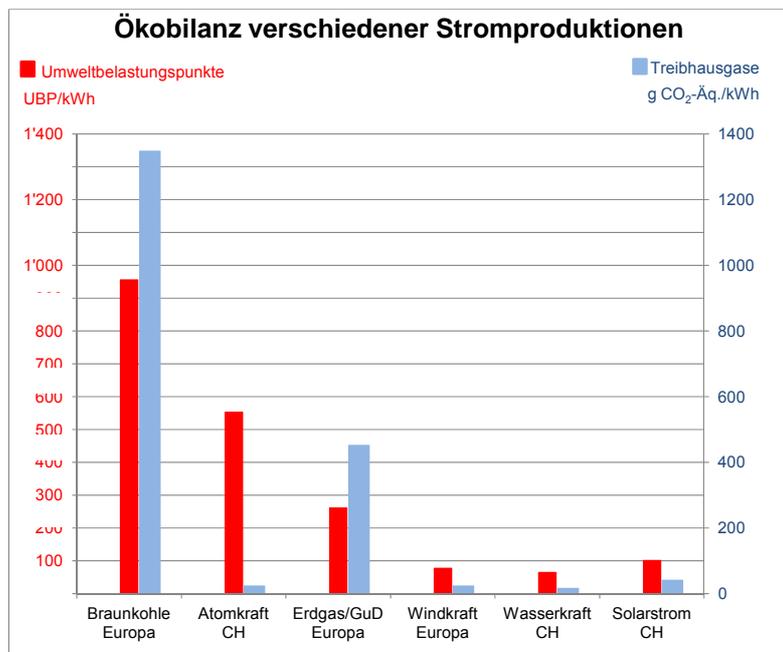


Abbildung 5: Solarstrom gehört zu den umweltschonendsten Energien. Quellen: Solarstrom [2]; Braunkohle [3]; übr. Werte für Umweltbelastungspunkte [3]; übr. Werte für Treibhausgase [1].

9. Resultate

Die vorliegenden Ökobilanz-Berechnungen ergeben, dass für die künftige Solarstrom-Versorgung der Schweiz mit Treibhausgas-Emissionen von 40 g CO₂-Äq. pro kWh zu rechnen ist. Die in Studie [1] aufgeführte Umweltbelastung von 97 g pro kWh wurde wesentlich zu hoch ausgewiesen, weil für die Fragestellungen der schweizerischen Energiestrategie 2050 wichtige technologische Entwicklungen bei Photovoltaik-Anlagen und Besonderheiten der dezentralen Stromerzeugung nicht berücksichtigt wurden.

Aus den gleichen Gründen beträgt der Einsatz nicht erneuerbarer Primärenergie nur noch 528 statt 1'315 MJ pro kWh, und die gesamthafte Umweltbelastung ausgedrückt in Umweltbelastungspunkten (UBP'06) sinkt von 187 auf 101 UBK pro kWh Solarstrom (siehe Tabelle 1).

Im Gegensatz zu den Ergebnissen von Studie [1] wird sich zudem der Verbrauch seltener Rohstoffe bei Solarstrom künftig kaum von demjenigen anderer Stromerzeugungsarten unterscheiden.

10. Schlussfolgerungen

Energiapolitische Schlussfolgerungen können der Abbildung 5 entnommen werden: Der Ökobilanz-Vergleich verschiedener Stromproduktionen zeigt, dass Strom aus Wind, Wasser und Photovoltaik die tiefsten Umweltbelastungen aufweist. Die Unterschiede zwischen diesen drei erneuerbaren Stromerzeugungsarten werden erheblich kleiner als bisher ausgewiesen. Es ist deshalb sinnvoll, insbesondere das grosse Potenzial von Solarstrom in der Schweiz rasch zu erschliessen, um die Produktion von nicht erneuerbarem, umweltbelastendem Strom zu ersetzen.

Die für das Jahr 2023 erwarteten mittleren Umweltbelastungswerte von 40 g CO₂-Äq., resp. 101 UBP pro kWh Solarstrom werden mit den effizientesten verfügbaren PV-Anlagen bereits heute erreicht.

Strom aus PV-Anlagen wird in der Energiestrategie 2050 der Schweiz ökologisch wesentlich besser abschneiden als bisher dargestellt. Die CO₂-Emissionen von Solarstrom liegen gemäss der vorliegenden Studie um 59 % tiefer. Bei dem in der Energiestrategie 2050 angestrebten Solarstromanteil von 20% (12 TWh) werden die Treibhausgas-Emissionen von Solarstrom pro Jahr um rund 680'000 Tonnen tiefer liegen. Das Ziel der Energiestrategie 2050, den CO₂-Ausstoss von 5,1 auf 1,5 Tonnen pro Person und Jahr zu senken [11], wird damit rascher erreichbar. Die in der vorliegenden Studie vorgenommenen Ökobilanz-Berechnungen für monokristalline Siliziumzellen sollten in analoger Weise auch für polykristalline Siliziumzellen durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Studie [1] weisen darauf hin, dass Strom aus polykristallinen Zellen noch tiefere Umweltbelastungen aufweist, als solcher aus monokristallinen Zellen.

Anhang: Geringere Netzverluste durch Solarstrom

In diesem Anhang wird der Frage nachgegangen, wie sich die dezentrale Einspeisung von Solarstrom auf die Netzverluste auswirkt.

1. Ausgangslage

Die Stromproduktion wird heute in der Schweiz fast ausschliesslich ins Hochspannungsnetz eingespeist und gelangt via Mittelspannungs- und Niederspannungsnetz zu den Verbrauchern. Dadurch fallen Netzverluste von 9,7 % des bezogenen Stroms [6, S. 180], resp. 8,8 % des von den Kraftwerken produzierten Stroms an. Die Verluste allein im Hoch- und Mittelspannungsnetz liegen bei 3,7 %. Die Verluste im Niederspannungsnetz betragen 5,1 % des produzierten Stroms, resp. 5,3 % des ins Niederspannungsnetz eingespeisten Stroms [6].

In der Studie Bucher [7, 9] wurden die Auswirkungen der Einspeisung von Solarstrom in ein Niederspannungsnetz untersucht. Dabei wurde mit modernen Wechselrichtern mit Phasenverschiebung ($\cos(\Phi)=0,9$) gerechnet. Gemäss dieser Studie werden die Netzverluste reduziert, wenn Solarstrom dezentral ins Niederspannungsnetz eingespeist und somit weitgehend im gleichen Quartiernetz verbraucht wird. Die Abbildung 3 der vorliegenden Publikation, die auf der Studie Bucher [7, S. 24] basiert, zeigt: Die Verluste im Niederspannungsnetz sinken mit steigendem Solarstromanteil immer weiter, bis zu einem Anteil von 24 % Solarstrom, bezogen auf den Jahresstromverbrauch in einem durchschnittlichen Haushalt. Danach steigen die Verluste an und erst bei einem hohen Solarstromanteil von über 50 % werden die Netzverluste grösser als ohne Solarstromeinspeisung.

In Ökobilanzen von unterschiedlichen Stromerzeugungsarten sind auch zugehörige Netzverluste einzurechnen. Deshalb stellt sich die Frage, in welchem Verhältnis die durch dezentrale Solarstromeinspeisung reduzierten Netzverluste dem auf Hochspannungsebene eingespeisten Strom (Wasser-, Atom-, Gas- und Kohlekraftwerke) resp. dem dezentral eingespeisten Solarstrom angerechnet werden sollen.

2. Zurechnungsvarianten im Niederspannungsnetz

Vorerst werden allein die Verluste im Niederspannungsnetz betrachtet – auf die Verluste im Hoch- und Mittelspannungsnetz wird in Ziffer 6 eingegangen. Für die Verluste im Niederspannungsnetz werden zwei mögliche Zuordnungsvarianten untersucht:

- Variante A: Unabhängig vom Solarstromanteil werden dem via Hoch- und Mittelspannungsnetz zentral eingespeisten Strom die erwähnten 5,3 % Verluste angelastet. Der dezentral eingespeiste Solarstrom erhält - wie in Ziffer 3 beschrieben - eine vom Solarstromanteil abhängige Belastung oder sogar Gutschrift.
- Variante B: Zentral eingespeistem Strom und dezentralem Solarstrom werden je die gleichen prozentualen Verluste im Niederspannungsnetz angerechnet. Der prozentuale Verlust ist abhängig vom Solarstromanteil (siehe Ziffer 4).

Im weiteren wird davon ausgegangen, dass das in der Studie Bucher [7] untersuchte Quartiernetz Luchswiesenstrasse der Stadt Zürich einem

typischen Wohnquartier für die künftige Solarstromeinspeisung entspricht.

3. Variante A: Fixer Verlustanteil für die zentrale Einspeisung ins Niederspannungsnetz

Bei der Zuordnungsvariante A werden dem zentral (via Hoch- und Mittelspannungsnetz) eingespeisten Strom unabhängig vom Solarstromanteil stets 5,3 % Verluste im Niederspannungsnetz (NSN) angerechnet. Die Differenz zu den durch die dezentrale Solarstromeinspeisung reduzierten tatsächlichen Verlusten gemäss Abbildung 4 wird dem Solarstrom angerechnet. Am Beispiel eines Niederspannungsnetzes mit einer gesamten Stromeinspeisung von 100 MWh/Jahr ergeben sich folgende Verlustzuordnungen:

- Bei einem **Solarstromanteil von 0 %** wird 100 % der Stromproduktion zentral eingespeist. Die zentrale Stromeinspeisung beträgt 100 MWh, die Netzverluste im NSN liegen bei 5,3 MWh (5,3 %).
- Bei einem **Solarstromanteil von 6 %** werden 94 MWh (94 %) der Stromproduktion zentral eingespeist. Der zentralen Stromproduktion werden 5,0 MWh Netzverluste (5,3 % von 94 MWh) angelastet. Da sich die gesamten Netzverluste im NSN gemäss Abbildung 4 jedoch um ca. 7,5 % auf 4,9 MWh (92,5 % von 5,3 MWh) reduziert haben, erhält der Solarstrom eine Gutschrift von 0,1 MWh, d.h. eine **Gutschrift von 1,7 % der Solarstromeinspeisung**.

In der nachfolgenden Tabelle 3 werden diese Berechnungen für andere Solarstromanteile weitergeführt. Daraus ergibt sich:

- Bei einem **Solarstromanteil von 14,5 %** erfolgt die Solarstromeinspeisung **ohne Netzverluste im NSN**.
- Bei einem **Solarstromanteil von 24 %** verursacht die Solarstromeinspeisung **1,7 % Netzverluste im NSN**.
- Bei einem **Solarstromanteil von 30 %** verursacht die Solarstromeinspeisung **2,3 % Netzverluste im NSN**.

Solarstromanteil	Solarstromeinspeisung	Zentrale Stromeinspeisung ins NSN	Netzverluste im NSN der zentralen Stromeinspeisung	Reduktion gesamten NSN-Verluste (gem. Abb. 3)	Gesamte Netzverluste im NSN	Netzverluste im NSN durch dezentrale Solarstromeinspeisung	
0,0 %	0 MWh	100 MWh (100 %)	5,3 MWh (5,3 % von 100 MWh)	0,0 %	5,3 MWh (5,3 % von 100 MWh)	---	---
6,0 %	6,0 MWh	94,0 MWh (94 %)	5,0 MWh (5,3 % von 94 MWh)	7,5 %	4,9 MWh (92,5 % von 5,3 MWh)	-0,1 MWh (4,9-5,0)	-1,7 % (-0,1 von 6 MWh)
14,5 %	14,5 MWh	85,5 MWh (85,5 %)	4,5 MWh (5,3 % von 85,5 MWh)	14,5 %	4,5 MWh (85,5 % von 5,3 MWh)	0,0 MWh (4,5-4,5)	0,0 %
24,0 %	24,0 MWh	76,0 MWh (76 %)	4,0 MWh (5,3 % von 76 MWh)	17,5 %	4,4 MWh (82,5 % von 5,3 MWh)	0,4 MWh (4,4-4,0)	1,7 % (0,4 von 24 MWh)
30,0 %	30,0 MWh	70,0 MWh (70 %)	3,7 MWh (5,3 % von 70 MWh)	16,5 %	4,4 MWh (83,5 % von 5,3 MWh)	0,7 MWh (4,4-3,7)	2,3 % (0,7 von 30 MWh)

Tabelle 3: Netzverluste bei 0 bis 30 % Solarstrom-Anteil, gemäss dem Ansatz 'fixe Netzverluste bei zentraler Einspeisung ins Niederspannungsnetz')

4. Variante B: Gleiche Verlustanteile für alle Stromeinspeisungen ins Niederspannungsnetz

Bei der Zuordnungsvariante B werden dem zentral (via Hoch- und Mittelspannungsnetz) eingespeisten Strom und dem dezentral eingespeisten Solarstrom je die gleichen prozentualen Verluste im Niederspannungsnetz (NSN) angerechnet. Dabei ist die Höhe dieser prozentualen Verluste abhängig vom Solarstromanteil. Am Beispiel eines Niederspannungsnetzes mit einer gesamten Stromeinspeisung von 100 MWh/Jahr lassen sich folgende Verlustzuordnungen für verschiedene Solarstromanteile berechnen:

- Bei einem **Solarstromanteil von 0 %** wird 100 % der Stromproduktion zentral eingespeist. Die zentrale Stromeinspeisung beträgt 100 MWh, die Netzverluste im NSN liegen bei 5,3 MWh, resp. **5,3 % der Stromeinspeisung**.
- Bei einem **Solarstromanteil von 6 %** haben sich die gesamten Netzverluste im NSN gemäss Abbildung 3 um ca. 7,5 % auf 4,9 MWh (92,5 % von 5,3 MWh) reduziert. Dies sind **Netzverluste von 4,9 % aller Stromeinspeisungen**.

In der nachfolgenden Tabelle werden diese Berechnungen für andere Solarstromanteile weitergeführt. Es ergeben sich:

- Netzverluste im NSN von **4,5 % aller Stromeinspeisungen** bei **14,5 % Solarstromanteil**,
- Netzverluste im NSN von **4,37 % aller Stromeinspeisungen** bei **24 % Solarstromanteil**,
- Netzverluste im NSN von **4,43 % aller Stromeinspeisungen** bei **30 % Solarstromanteil**.

Solarstromanteil	Solarstrom-einspeisung	Reduktion gesamte Netzverluste im NSN (gem. Abb. 3)	Gesamte Netzverluste im NSN	NSN-Verluste aller Strom-einspeisungen
0,0 %	0 MWh	0,0 %	5,3 MWh (5,3 % von 100 MWh)	5,3 %
6,0 %	6,0 MWh	7,5 %	4,9 MWh (92,5 % von 5,3 MWh)	4,9 %
14,5 %	14,5 MWh	14,5 %	4,5 MWh (85,5 % von 5,3 MWh)	4,5 %
24,0 %	24,0 MWh	17,5 %	4,37 MWh (82,5 % von 5,3 MWh)	4,37 %
30,0 %	30,0 MWh	16,5 %	4,43 MWh (83,5 % von 5,3 MWh)	4,43 %

Tabelle 4: Netzverluste bei 0 bis 30 % Solarstrom-Anteil, gemäss dem Ansatz 'gleiche Netzverluste für alle Stromeinspeisungen ins Niederspannungsnetz'

5. Konsequenzen bezüglich Verlusten im Niederspannungsnetz

Der vorliegenden Studie wird aus folgenden Gründen die Zuordnungsvariante A (fixer Verlustanteil bei zentraler Einspeisung ins Niederspannungsnetz) zugrunde gelegt:

- Ein fixer Verlustanteil für Kraftwerke mit Hochspannungseinspeisung entspricht dem bisher üblichen Ansatz (siehe [1] und [6]).
- Die Reduktion der Netzverluste als Folge der dezentralen Einspeisung von Solarstrom soll dem dafür verantwortlichen Prozess zugeschrieben werden.
- Die Ökobilanzierung der zentralen Strombereitstellungstechnologien (wie Wasser-, Atom-, Gas- und Kohlekraftwerke) bleibt so unabhängig vom Solarstromanteil im Niederspannungsnetz.

Bei der Zuordnungsvariante A stellt sich nun die Frage, mit welchem Netzverlust in der Ökobilanz von Solarstrom gerechnet werden soll. In Ziffer 3 wurde dargelegt, dass dieser Wert im Bereich von 0 bis 30 % Solarstromanteil von einer Gutschrift von 1,7 % (bei 6 % Solarstromanteil) bis zu einem Verlust von 2,3 % (bei 30 % Solarstromanteil) reichen kann. Für die vorliegende Studie war deshalb klar, dass der in [1] verwendete Verlust von 5,3 % im Niederspannungsnetz für Solarstrom nicht verwendet werden kann. Es soll ein Wert verwendet werden, der zur Fragestellung – die Diskussion der weiteren Entwicklung von Solarstrom – passt. Die Energiestrategie 2050 des Bundesrats geht für das Jahr 2050 von 20 % Solarstrom aus [11], während die „Agentur für Erneuerbare Energie und Energieeffizienz“ (AEE) dieses Ziel bereits 2025 erreichen will [12] und sich der Solaranteil somit bis 2050 weiter erhöhen kann. Bei sehr hohen 30 % Solarstromanteil würde ein Wert von 2,3 % Netzverlusten für Solarstrom resultieren. Im Sinne eines einfachen Ansatzes wird hier für Solarstrom im Niederspannungsnetz deshalb der halbe Netzverlust von zentral produziertem Strom eingerechnet: Mit 2,55 % (= 5,1 % / 2) werden dem Solarstrom sogar bei einem künftigen Anteil von mehr als 30 % genügend Netzverluste zugewiesen. Die in der Studie [1] zu hoch angenommenen Verluste von Solarstrom im Niederspannungsnetz werden in dieser Studie somit halbiert.

6. Verluste im Hoch- und Mittelspannungsnetz

Die Verluste im schweizerischen Hoch- und Mittelspannungsnetz betragen 3,7 % des auf Hochspannungsebene eingespeisten Stroms [6].

In [7] wurde auch untersucht, welcher Anteil des Solarstroms ins Mittel- und Hochspannungsnetz zurückgespiessen wird. Dabei zeigte sich, dass der dezentral ins Niederspannungsnetz eingespeiste Solarstrom zum grössten Teil im gleichen Netzteil verbraucht wird. Im Jahresdurchschnitt wird bei einem Solarstromanteil von 10 % weniger als 0,5 % des Stroms in das Mittel- und Hochspannungsnetz weitergeleitet [10]. Auch bei einem Solarstromanteil von 30 % gelangen weniger als 25 % des Solarstroms ins Mittel- und Hochspannungsnetz, d.h. dem Solarstrom müssten höchstens 0,93 % (25 % von 3,7 %) Verluste auf Hoch- und Mittelspannungsebene angerechnet werden.

In der vorliegenden Studie wird für Solarstrom von 1,85 % Verlusten im Hoch- und Mittelspannungsnetz ausgegangen, denn dies entspricht wiederum der Hälfte des Verlustes von Kraftwerken, die ins Hochspannungsnetz einspeisen (3,7 %). Mit dieser Annahme werden dem Solarstrom keinesfalls zu geringe Netzverluste zugewiesen. Die in der Studie [1] auch für das Hoch- und Mittelspannungsnetz zu hoch angenommenen Verluste für Solarstrom werden dadurch ebenfalls halbiert.

7. Schlussfolgerungen

In den Ökobilanzen verschiedener Stromerzeugungsarten in der Schweiz sind Netzverluste wie folgt anzurechnen:

- Mit Netzverlusten von 8,8 %, bezogen auf die Stromproduktion [1], darf nur bei Kraftwerken, die ihre Stromproduktion ins Hochspannungsnetz einspeisen, gerechnet werden. Bei dezentraler Einspeisung von Solarstrom sind die Netzverluste erheblich geringer.
- Bei dezentral ins Niederspannungsnetz eingespeisten Solarstrom sind die gesamten Netzverluste (im Hoch-, Mittel- und Niederspannungsnetz) auch bei einem hohen Solarstromanteil bis zu 30 % höchstens halb so gross, d.h. 4,4 % (2,55 % im Niederspannungsnetz plus 1,85 % im Hoch- und Mittelspannungsnetz). Gegenüber der in [1] dem Solarstrom angerechneten 8,8 % Netzverluste ergibt dies eine wesentliche Verbesserung der Ökobilanz von Solarstrom.
- Bei einem Solarstromanteil von weniger als 10 % (der heutige Solarstromanteil in der Schweiz liegt bei 0,6 %) müssten dem Solarstrom gar keine Netzverluste angerechnet werden, denn die resultierende Verlustreduktion im Niederspannungsnetz ist wesentlich grösser als die zusätzlichen Verluste im Mittel- und Hochspannungsnetz.
- In der vorliegenden Studie „Ökobilanz von Solarstrom“ wird im Sinne einer vorsichtigen Annahme mit 4,4 % Netzverlusten bei Solarstrom gerechnet.

Quellen

- [1] Bauer Ch., Frischknecht R., Eckle P., Flury K., Neal T., Papp K., Schori S., Simons A., Stucki M., Treyer K. (2012) Umweltauswirkungen der Stromerzeugung in der Schweiz. Im Auftrag des Bundesamts für Energie BFE.
- [2] Rufer D., Braunschweig A. (2013) Die bessere Ökobilanz von Solarstrom, Umwelt Perspektiven, Nr. 4 / 2013.
- [3] Jungbluth N., Stucki M., Frischknecht R. (2009) Vol. ecoinvent report No. 6-XII. ESU-services Ltd., Uster.
- [4] Huber H., Metzler Th., Rufer D. (2013) Plusenergie-Haus. Faktor Verlag, ISBN 978-3-905711-21-9
- [5] Datenblätter Solar-Module von SunPower, www.sunpowercorp.de
- [6] Itten R., Frischknecht R., Stucki M. (2013) Life Cycle Inventories of Electricity Mixes and Grid. ESU-services, Uster.
- [7] Bucher Ch. (2012) Auswirkungen eines hohen Photovoltaikanteils auf das Niederspannungsnetz. 10. Nationale PV-Tagung, Baden.
- [8] International Technology Roadmap for Photovoltaic, Results 2012, www.itrpv.net.
- [9] Bucher Ch., Bettecke J., Andersson G., Bletterie B., Küng L. (2012) Simulation of Distribution Grids with Photovoltaics by means of Stochastic Load Profiles and Irradiance Data. PVSEC, Frankfurt.
- [10] Bucher Ch. (2013) Persönliche Mitteilung zur Energieeinspeisung ins Mittelspannungsnetz am Beispiel des Quartiernetzes Luchswiesenstrasse in Zürich.
- [11] Bundesamt für Energie (2012) Erläuternder Bericht zur Energiestrategie 2050 (Vernehmlassungsvorlage vom 28.11.2012). BFE, Bern.
- [12] Agentur für Erneuerbare Energie und Energieeffizienz, (2011) 10-Punkte-Programm. AEE, Bern.
- [13] Marktumfrage von Swissolar zum Einsatz verschiedener PV-Technologien (2012) Branchenverband Swissolar, Zürich.
- [14] Johnson M., Product Manager Solar Energy Systems, Ernst Schweizer AG (2013) Persönliche Mitteilung zum Marktanteil und Materialeinsatz verschiedener Montagesysteme für PV-Anlagen in der Schweiz.
- [15] Ernst Schweizer AG, Hedingen (2013) Zertifikate für die Lieferung von Aluminium-Profilen mit mindestens 80% Sekundäraluminium.