

Nachhaltigkeit und Materialströme von Photovoltaik - Modulen in der Schweiz



Urs Muntwyler (PV Labor BFH-TI)/ PV Labor Berner Fachhochschule Technik Informatik, Jlcoweg 1, 3400 Burgdorf; e-mail: urs.muntwyler@bfh.ch; www.pvtest.ch

Eva Schüpbach (PV Labor BFH-TI)/ PV Labor Berner Fachhochschule Technik Informatik, Jlcoweg 1, 3400 Burgdorf; e-mail: eva.schuepbach@bfh.ch; www.pvtest.ch

Roman Eppenberger, Stiftung Sens eRecycling, Obstgartenstrasse 28, 8006 Zürich; e-mail: roman.eppenberger@sens.ch; www.eREcycling.ch

Zusammenfassung

Résumé

Abstract

Im Rahmen der Energiestrategie 2050 wird die durch das Phase-out von nuklearer Energie entstehende Stromlücke primär mit PV-Modulen erzeugt. Die Energiestrategie 2050 sieht einen Ausbau der Photovoltaik auf 12 TWh im Jahr 2050 vor. Dieser könnte durch den Wegfall der tiefen Geothermie (4TWh) und dem Ersatz der Autos mit Verbrennungsmotoren durch E-Mobile (ca. 8TWh) bis 24 TWh ansteigenⁱ. Ausgehend vom heutigen PV-Markt errechnet sich damit eine grosse Menge an installierten PV Modulen im Jahr 2050. Diese Module können aus unterschiedlichen Technologien aufgebaut sein wie c-Si, Dünnschichtmodulen wie Cd/Te, CIS oder CIGS. Bei Annahme einer Lebensdauer von 25-40 Jahrenⁱⁱ müssen all diese Module wieder abgebaut und entsorgt werden. Die Materialmengen, die dann in der Schweiz entsorgt werden müssen, und damit die rezyklierten Materialströme, sind erheblich, allein schon von PV-Modulen. Vorausschauendes Planen der eingesetzten Produkte und deren Recycling ist für die Anwender und Installateure wichtig. Hier setzen gemeinsame Forschungsanstrengungen von SENS eRecycling und der Berner Fachhochschule BFH an.

1. Ausgangslage

1.1 Kurze Einführung zur Entwicklung der Photovoltaik in der Schweiz

In der Schweiz werden PV Module seit den 1980-ern Jahren für autonome Stromversorgungen verbautⁱⁱⁱ. Damals hatten die PV Anlagen kleine, d.h. unter einem kWp installierte PV-Leistung. 1981 wurden die ersten beiden netzgekoppelte PV-Anlagen in der Schweiz und auch in Europa gebaut (1,2 kWp Eidgenössisches Institut für Reaktorforschung EIR und 10 kWp SUPSI Lugano). Zirka ab 1986 wurden in der Schweiz weitere netzgekoppelte PV Anlagen installiert^{iv}. Mit der Tour de Sol 1987 wurde eine neue Teilnehmerkategorie für Solarmobile mit netzgekoppelten PV Anlagen etabliert. Dies führte zum Bau privater, netzgekoppelter PV-Anlagen in der Schweiz. Um 1990 war die Schweiz beim Bau dezentraler netzgekoppelter PV Anlagen weltweit federführend. Die verbauten Mengen waren aber unter 1 MWp pro Jahr.

1.2 Entsorgung der PV Module in der Schweiz: Stiftung SENS eRecycling

Bei einer Lebensdauer der PV Module von 25-40 Jahren ist zu erwarten, dass diese in den nächsten Jahren wieder abgebaut werden müssen. Dazu kommen PV Module aus Brandfällen und Garantiefällen, bei denen die Module vorzeitig abgebaut werden müssen. Konkret wurden seit 2015 folgende Mengen recycelt^v:

2015: 71 Tonnen

2016: 126 Tonnen

2017: 337 Tonnen

Der starke Anstieg 2017 erstaunt und ist primär auf eine Garantierückruf-Aktion eines dachintegrierten, rahmenlosen PV-Produktes zurückzuführen. Einige wenige Tonnen dürften zudem auf die Entsorgung nach Brandfällen zurückzuführen sein. PV Module, die auf einem Gebäude installiert sind, das in Brand gerät (meist nicht wegen der PV Anlage), verlieren im Normalfall die Garantie und werden dem Recycling zugeführt^{vi}.

Die dem Recycling zugeführten PV Module werden von der Stiftung SENS eRecycling, der Schweizer Recycling Organisation, angenommen. SENS ist eine 1990 gegründete non-profit Organisation und in der Schweiz zuständig für die Entsorgung und Rezyklierung von Elektroschrott. Der gesetzliche Rahmen ist die „Verordnung über die Rücknahme und die Entsorgung elektrischer und elektronischer Geräte (VREG)“ vom 1. Juli 1998 (zurzeit in Revision). Sie beinhaltet eine Rückgabepflicht für Konsumenten und eine Rücknahmepflicht für Hersteller/ Importeure und Händler. Der Aufwand wird durch die vorgezogene Entsorgungsgebühr gedeckt, was ungefähr den Kosten des Recyclings entspricht. Das gewonnene Material kann anschliessend zu ca. 80% des Börsenwertes des Primär-Materials verwertet werden.

Im SENS eRecycling Netzwerk sind sowohl Hersteller, Importeure, Grossverteiler und der Grossfachhandel eingebunden (siehe Fig. 1). Partner und Verbände sorgen für die nötige Koordination. Dies ist im Falle der Solarkomponenten Swissolar, der Verband der Solarunternehmer in der Schweiz. Recycler sind dann für die effektive Verarbeitung der entsorgten Geräte und Komponenten zuständig.



Fig. 1: Kennzahlen SENS eRecycling (Stand 2015).

1.3 Rezyklierbare Materialanteile der PV Module und deren Weiterverarbeitung

PV Module bestehen in der Hauptzahl aus einem Deckglas, dem Einbettungsmaterial für die zusammengeschalteten Solarzellen (Standard: 60/72 Stück), dem Einbettungsmaterial auf der Rückseite sowie den Folien zum Schutz der Solarzellen. Meistens sorgen ein Aluminium-Rahmen für die mechanische Stabilität und eine Anschlussdose mit Dioden und zwei Kupferkabeln mit Stecker für ein anschlussfähiges Modul an den Strom (Fig. 2). Das Recycling ist also nicht allzu kompliziert.

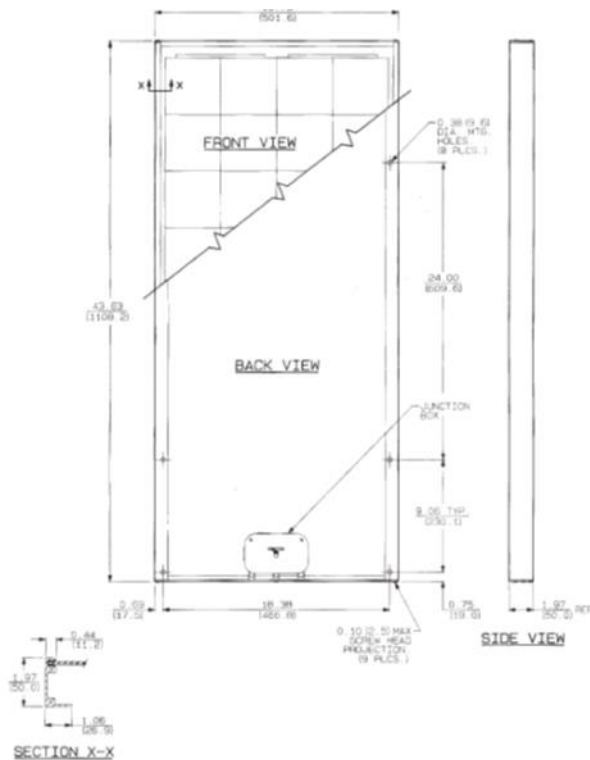


Fig. 2: MSX 64 PV Modul von Solarex (USA) mit massiver Alu-Rahmenkonstruktion, einem Gesamtgewicht von 7,2 kg und einer grossen Anschlussdose des polykristallinen PV-Moduls MSX 64, einem der meistverkauften PV Module von 1988-1998. Dieses Modul wurde sehr häufig auch in der Schweiz eingesetzt.

Je nach Technologie müssen PV Module getrennt recycelt werden. Alle Modultypen, die in der Schweiz im Einsatz sind, werden von der SENS eRecycling Stiftung gesammelt und ins Recycling gegeben. Beim SENS eRecycling von PV Modulen dominiert kristallines Silicium, da in der Schweiz primär kristalline Si-Module (c-Si) im Einsatz sind. Module mit Cadmium-Tellurid-Technologien (Cd/Te) werden in der Schweiz kaum eingesetzt (<1%). Der Marktleader dieser Technologie (First Solar), der keine Module in der Schweiz verkauft, hat eine eigene Entsorgungslinie. Kupfer-Indium-Selenid (CIS)/ Kupfer-Indium-Gallium-Selenid (CIGS) Module werden in der Schweiz selten und vor allem in PV-Fassaden eingesetzt.

Die Materialanteile der von SENS eRecycling entsorgten PV Module in der Schweiz umfassen folgende Materialien^{vii}. Die einzelnen Recyclingprozesse bei den heutigen kleinen Mengen von einigen hundert Tonnen Material sind:

- Glas (inklusive Silizium-Wafer): 88%
- Metall (vor allem Alu): 6%
- Kunststoffe (Folien): 6%

Der Alurahmen wird zuerst abgetrennt und kann direkt ins Alu-Recycling überführt werden. Das Glas wird entweder wieder zu Flachglas verarbeitet oder zu Glaswolle, und als Dämmmaterial auf dem Bau verwendet. Das PV-Laminat wird mechanisch in einer Hammermühle geschreddert. Die Teilchen werden mechanisch separiert in:

- Fe-Metalle (Schrauben etc.)
- NE-Metalle (u.a. Kupfer)
- Kunststoffe
- Weitere Stör-Stoffe.

Die Kunststoffe werden entweder in der Zementindustrie als Ersatzbrennstoff verwendet oder in der KVA verbrannt (Energie- und Wärmegewinnung).

All die oben beschriebenen Prozesse werden in Deutschland in zwei Fabriken durchgeführt, da die heutigen Mengen einen eigenen Verwertungsbetrieb in der Schweiz nicht rechtfertigen^{viii}. Es fallen dadurch also zusätzliche Transporte an. Die Analyse der Energieaufwände zeigt, dass bei grossen Mengen und durchdachter Wahl der Transportmittel der Energieaufwand für den Transport nicht wesentlich ins Gewicht fällt^x, auch nicht bei PV Modulen mit Herkunft China bzw. Fernost.

In der Zukunft wäre denkbar, die einzelnen Komponenten genauer zu trennen und so die Wertschöpfung noch zu steigern. Ob dies in der Schweiz geschehen könnte, wird eher kritisch gesehen (persönliche Mitteilung Roman Eppenberger, 29.5.2018), da das primär anfallende Glas wenig ökonomischen Wert hat. Könnte das Silizium separat erfasst und verwertet werden, könnte sich diese Wertschöpfung verbessern, was zurzeit in verschiedenen Forschungsprojekten untersucht wird. Werden dabei noch chemische Trennverfahren notwendig, dürfte die Zulassung eine Hürde sein.

2. Zukunft Recycling PV Module

2.1 Verbesserungen Material

In der Zukunft muss nur noch halb so viel Material pro kWp PV-Leistung entsorgt werden (Fig. 3; Fig. 4a, 4b). Dies einerseits, weil die PV Module in den vergangenen 40 Jahren immer grösser und leistungsstärker werden. Beispielsweise ist das Leistungsgewicht des in Fig. 2 gezeigten MSX 64 PV Modul von Solarex (USA) mit 112,5 kg pro 1 kWp heute noch etwa halb so gross. Teilweise ist die Leistung von ca. 30 Wp sogar um das 10-fache auf über 300 Wp (Fig. 3) angestiegen.

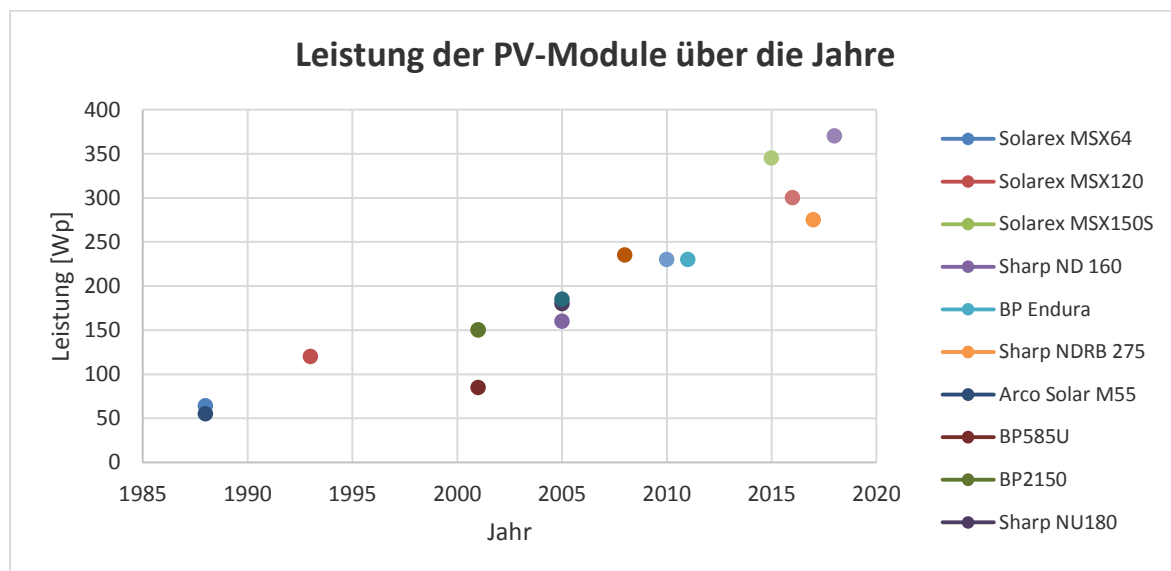


Fig. 3: Die Entwicklung der Leistung verschiedener PV Module seit 1985 zeigt den kontinuierlichen Leistungsanstieg in den vergangenen 30 Jahren.

Andererseits ist der Wirkungsgrad gut um das Doppelte angestiegen: Heute hat ein Standardmodul die Abmessungen von ca. 1x1,6 m. Das Leistungsgewicht, also die Materialmenge für eine Standardleistung von 1 Wp, hat sich fast halbiert. Es muss somit nur noch halb so viel Material für eine kWh - Stromertrag aufgewendet werden, wie eine Aufstellung von PV-Module aus den letzten 30 Jahren zeigt (Fig. 4a, 4b).

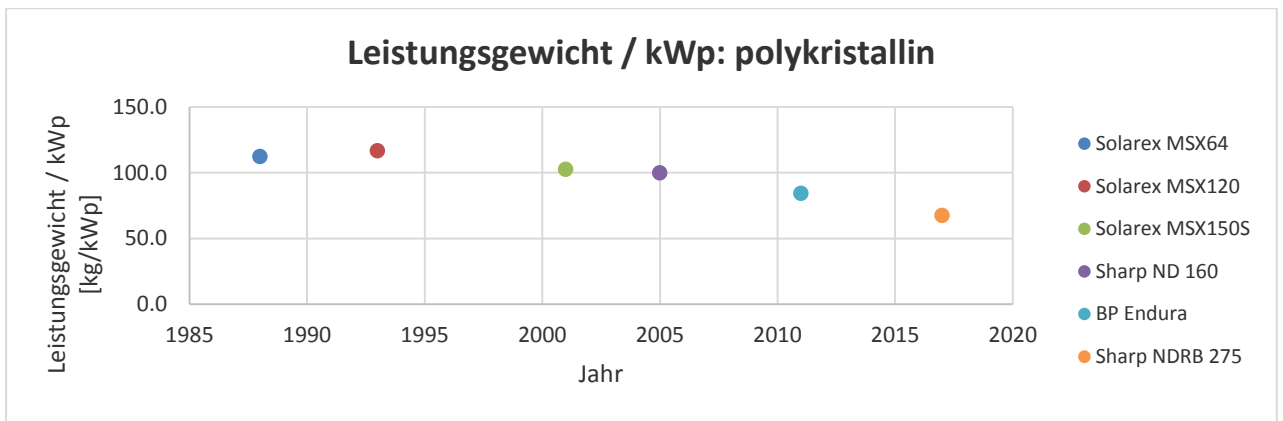


Fig. 4a: Entwicklung Leistungsgewicht polykristalliner PV Module seit 1985 (Halbierung in den letzten 30 Jahren).

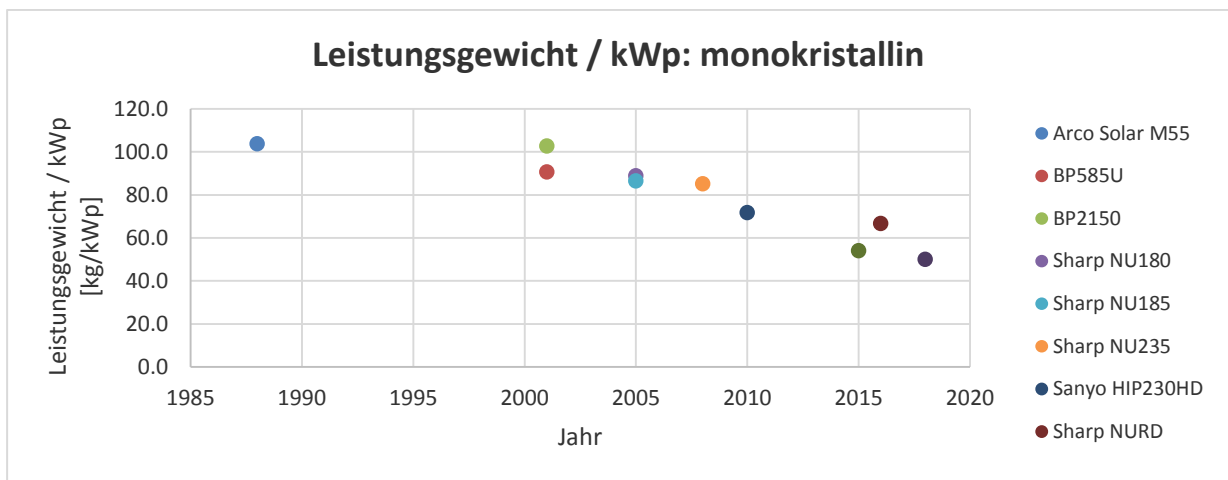


Fig. 4b: Entwicklung Leistungsgewicht monokristalliner PV Module seit 1985 (Halbierung in den letzten 30 Jahren).

Durch die bessere Empfindlichkeit der Solarzellen ist heute der Ertrag pro kWp auch etwas höher. Dieser Effekt ist aber nicht sehr ausgeprägt. Mehr ins Gewicht fallen dürfte die längere Lebensdauer. Dass alte PV-Module wie MSX 64 von Solarex (siehe Fig. 2), KC 50 von Kyocera und vor allem M55 von Arco Solar/ Siemens lange halten, ist von Langzeit-PV-Modulmessungen des PV-Labors der BFH bekannt^x. Bei neuen PV-Modulen muss das noch gezeigt werden, wobei der heutige Preisdruck theoretisch auch zu einer verminderten Lebensdauer sowie Qualitätsproblemen führen könnte.

2.2 Hochrechnung der Stoffmengen bis 2050

Da der historische PV Markt in der Schweiz bekannt ist und ebenso die durchschnittlichen Leistungsgewichte der PV-Module, kann daraus die jährlich verbaute Menge PV Module in der Zukunft errechnet werden (Tab. 1).

Tab. 1: Berechnete (*) und geschätzte (**) jährlich verbaute PV Modulmenge in der Schweiz von 2000-2025.

Jahr	Markt/ Jahr	Stoffmenge (to)/Jahr	Technologie dominant
2000*	1 MWp	100 Tonnen	Poly-/ mono-Si (>80% Markt)
2005*	5 MWp	400 Tonnen	Poly-/ mono-Si (>80% Markt)
2010*	30 MWp	2'100 Tonnen	Poly-/ mono-Si (>90% Markt)
2015*	300 MWp	18'000 Tonnen	Poly-/ mono-Si (>90% Markt)
2020**	500 MWp	25'000 Tonnen	Poly-/ mono-Si (>90% Markt) **

2025**	1'000 MWp	50'000 Tonnen	Poly-/ mono-Si (>90% Markt) **
--------	-----------	---------------	--------------------------------

*Berechnung Muntwyler (basierend auf PV-Markt BFE^{xi})/ ** Prognose Muntwyler

Der erwartete kumulierte Materialbestand im 2050 (Energiestrategie 2050) ist potentiell noch viel höher, da von einer weiteren Verbesserung der Leistungsgewichte von 20% (40 kg/ 1 kWp) und einer unveränderten Konstruktionsweise der PV-Module ausgegangen werden kann (Tab. 2).

Tab. 2: Die im Jahr 2050 erwarteten installierten PV-Materialmengen (**Prognose U. Muntwyler).

Jahr	Bestand	Stoffmenge total (to)	Technologie dominant
2050**	12'000 MWp	480'000 Tonnen	Poly-/ mono-Si (??? Markt)
2050**	24'000 MWp	960'000 Tonnen	Poly-/ mono-Si (??? Markt)

Tabelle 1 und 2 illustrieren, dass die Stoffströme von PV Anlagen heute in der Schweiz noch relativ klein und im Bereich von einigen hundert Tonnen pro Jahr sind, aber bis 2050 um ca. Faktor 1'000 ansteigen werden. Die Zahlen legen nahe, dass es sich lohnt, das zukünftige Recycling der erwarteten Materialströme vorgängig zu planen und aufzubauen. Wie in Abschnitt 1.3 ausgeführt, ist das aktuelle Recycling in der Schweiz recht einfach aufgebaut und basiert auf dem Zerkleinern der c-Si PV Module in Hammermühlen sowie dem Schreddern und der Weiterverarbeitung der Materialpartikel in Deutschland. Die im Jahr 2017 recycelte Menge an PV Modulen in der Schweiz (siehe Abschnitt 1.2) entspricht einer Leistung von unter 3 MWp. Diese Menge wird in den kommenden Jahren auf bis 50'000 Tonnen pro Jahr ansteigen (entsprechend 1GWp pro Jahr). So wartet unter anderem die älteste und grösste PV Anlage in Europa (Fig. 5) auf dem Mont Soleil (CH) auf die Entsorgung (Fig. 5), d.h. schätzungsweise 60 Tonnen PV Modulmaterial, plus Montagekonstruktionen, Kabel und Wechselrichter.



Fig. 5: Die 1992 gebaute Freiflächen-PV-Installation auf dem Mont Soleil im Schweizer Jura (555 kWp Leistung) ist die älteste und grösste PV Anlage in Europa.

2.3 Recycling weiterer Bestandteile von PV-Anlagen

Zusätzlich zu den PV Modulen werden bei einer PV-Anlage weitere Komponenten wie PV-Wechselrichter, Kupfer-Kabel, Montagekonstruktionen, Abdichtungen etc. benötigt. PV-

Wechselrichter werden wie ein Elektrogerät (z.B. Waschmaschine) recycelt. Auch hier sind die Leistungsgewichte massiv gesunken, wie eine interne Untersuchung des PV Labors an der Berner Fachhochschule BFH gezeigt hat^{xii}. Die hier entstehenden Stoffströme werden also auch immer kleiner und können über die etablierten Recyclingorganisationen wie SENS eRecycling rezykliert werden. So wiegt heute ein Stringwechselrichter wie der Delta „Flex“ mit 3'800Wp noch 9,7 kg^{xiii}. Dafür wurden vor 30 Jahren bei einem Solcon HE3400 noch 39 kg Material benötigt. Diese Verbesserung um den Faktor 4 ist enorm, da die Leistung gleichgeblieben ist. Noch imposanter sieht der Vergleich von einem vor 30 Jahren üblichen Zentralwechselrichter mit einem heute üblichen Multi-Stringinverter aus. 1990 wurden für einen SMA Zentralwechselrichter 1'250 kg Material für 50 kWp Leistung benötigt^{xiv}. Der neue Multi-Stringinverter von ABB indes benötigt für 120 kWp noch 125 kg^{xv}. Das ist eine Verbesserung um den Faktor 24 in der Materialeffizienz! Dabei wurde der Wirkungsgrad verbessert und der Preis massiv gesenkt.

2.4 Recycling von PV-Speichersystemen

Sind zusätzlich dezentrale PV-Speichersysteme im Einsatz, werden weitere erhebliche Stoffmengen installiert. Hier sind nicht nur die Batteriemodule, sondern auch erhebliche elektrotechnische Komponenten wie das Gehäuse, Klemmen, Kabel etc. zu berücksichtigen. Sie können gut rezykliert werden. Speichersysteme unterstehen in der Schweiz dem staatlichen Obligatorium (INOBAT) und werden von der Firma Batrec in Wimmis (Kanton Bern) verarbeitet. Hier werden u.a. Li-Batterien nach einem Hydro-Metallurgischen Verfahren rezykliert (www.inobat.ch).

3. Einordnung der in Zukunft zu erwartenden Materialmengen

Die im Jahr 2050 gesamthaft installierte Menge von 960'000 Tonnen PV Module in der Variante mit 24 TWh Stromertrag in Tab. 2 scheint hoch. Aber wie hoch ist sie relativ? Pro Kopf der Schweizer Bevölkerung entspricht sie 120 kg Material und einer Leistung von 3 kWp (ca. 20m² Fläche). Damit kann Strom für 30 Jahre erzeugt werden.

Ferner: Die 20m² Fläche pro Kopf der Bevölkerung bedeuten eine Erhöhung des rezyklierten Materials um ca. 5 kg (inkl. Wechselrichter, etc.) resp. eine Erhöhung von 50% des von SENS eREcycling rezyklierten Elektroschrotts gegenüber dem Jahr 2015. Damit stellt das Recycling in der Energiestrategie 2050 jedoch keine zusätzliche Grössenordnung dar.

Vergleicht man darüber hinaus die rezyklierbare PV Materialmenge mit dem Gesamtgewicht einem Auto, dem grössten und teuersten Produkt einer in der Schweiz wohnhaften erwachsenen Durchschnittsperson, so ist das Gesamtgewicht aller Autos in der Schweiz bereits 10-mal höher (8 Millionen Tonnen) als alle 2050 in der Schweiz eingesetzten PV-Module zur Erzeugung von 24 TWh Strom im Jahr.

Die oben angesprochenen 30 Jahre Stromproduktion sind 3 Generationen Autos, also 24 Millionen Tonnen Material. Jedes Auto braucht aber noch Ersatzteile, Schmierstoffe und fast eine Tonne Benzin pro Jahr, d.h. jährlich 4,5 Millionen Tonnen Treibstoff oder 135 Millionen Tonnen Treibstoff in 30 Jahren. Diese 135 Millionen Tonnen Benzin für die Schweizer Autos in 30 Jahren können mit PV-Strom ersetzt werden, was eine rezyklierbare PV Modulmenge von 960'000 Tonnen ergibt. Solchen Hebelarmen gehört die Zukunft. Dass das auch ökonomischer ist, versteht sich von selbst. Schliesslich ist ein PV Moduls wesentlich einfacher aufgebaut als ein Auto (siehe Kap. 1) und damit auch einfacher zu zerlegen und zu rezyklieren.

Trotzdem liegt im Bereich der Konstruktion von PV Anlagen noch Potential, um PV Module für den Recyclingprozess noch besser, schneller und sortenreiner zu trennen. Hier kann durchaus von der Autoindustrie gelernt werden, die das schon länger praktiziert. Beispielsweise ist heute die Mehrzahl der PV Module mit einem Alurahmen ausgeführt. In Zukunft könnte es einen Trend zu Glas-Glas-Konstruktionen geben. Damit würde das Gewicht ev. höher, aber der Alurahmen würde wegfallen. Das würde die Energiebilanz der PV Module weiter verbessern und die Lebensdauer ev. erhöhen. Eine erhöhte Lebensdauer würde sowohl die Wirtschaftlichkeit des Solarstroms wie auch die Stoffbilanz verbessern. Denkbar sind auch völlig neue Konstruktionen, ev. auf der Basis von Dünnschicht-Technologien, einer nun schon über 20 Jahre alten Entwicklung (Solarex Millenia

Solarmodule, flexible Uni-Solar Triple Module etc.). Eine Entwicklungsrichtung sind auch Leichtgewichtsmodule.

4. Das Material einer PV-Anlage hat mehrere Leben (Second Life)

Das Material einer PV-Anlage hat mehrere „Leben“. Es lohnt sich, diese bei der Planung von PV Anlagen zu berücksichtigen.

4.1 Rückbau und Repowering von PV Anlagen einplanen

Zur Planung einer PV-Anlage gehören auch Überlegungen zum Rückbau und Recycling. Das fängt bei der Auswahl der Komponenten und Lösungen an (z.B. Dachintegration oder nicht), geht über die Art der Montage, der Montagekonstruktion und deren Hilfsmittel, bis zur Planung des Abbaus und der Entsorgung der Komponenten. Geplant werden muss auch der jeweilige Zeitpunkt. Das „Repowering“ von alten Anlagen ist eine Geschäftsidee der Zukunft.

4.2 Rückstellungen für den Abbau der Anlagen

Bei der Finanzierung des Rückbaus sind die Anlagenbetreiber gefragt und müssen Rückstellungen für den Abbau der Anlage machen. Dies kann durch Rücklagen geschehen, wie z.B. von der Arbeitsgemeinschaft für dezentrale Energieversorgung ADEV in Burgdorf. Es darf auch gehofft werden, dass die Anlage während heute noch meist üblichen 25 Jahren läuft und dieser Ertrag den Rückbau finanziert („planning by hope...“). Weniger zu empfehlen ist es, diese Kosten dem nächsten Anlagenbetreiber zu überantworten.

4.3 Keine kritischen Komponenten und Materialien bei CH-PV Standard - Modulen

Bei den in der Schweiz vorwiegend verwendeten kristallinen Silizium PV Modulen sind keine kritischen Materialien zu erwarten. Dies ist anders bei Dünnschicht-Technologien, wie sie in der Schweiz bei Fassaden- und Gebäudehüllen aber selten anzutreffen sind. Hier könnte eine kritische Komponente das Kupfer sein. Dieses ist bereits heute teuer und wird sicher noch teurer. An Stelle von Kupfer steht das Leichtmetall „Aluminium“ bereit. Es ist zwar schwieriger zu verlegen und braucht einen etwas grösseren Querschnitt bei etwas geringerem Gewicht. Diese Herausforderung wird aber die gesamte Elektrobranche haben.

4.4 Energiebilanzen massiv positiv

Dass die Energiebilanzen von PV Modulen stark positiv sind, ohne Recycling sogar im Bereich von Faktor 30, ist Insidern seit Jahrzehnten bekannt, hat sich aber noch nicht überall durchgesprochen. Mit Recycling können sich die Energiebilanzen noch weiter verbessern. So macht es bereits heute den Hauptteil aus bei der Berechnung von Energiebilanzen, ob man neues oder recyceltes Aluminium für den Rahmen verwendet^{xvi}.

5. Ausblick

In der publizierten Literatur herrscht im Bereich der verwendeten Materialien, Energie- und Stoffströme im Zusammenhang mit PV Modulen noch wenig Übereinstimmung und viel Unsicherheit resp. Unwissen. Die Stiftung SENS eRecycling und das PV Labor der Berner Fachhochschule BFH haben daher eine Zusammenarbeit aufgebaut, um die vorhandenen Unsicherheiten anzugehen und die nötige Transparenz zu schaffen. Gemeinsame Forschungsanstrengungen werden unternommen zur Lebensdauer, Material-Transparenz und Recycling sowohl bei PV Anlagen als auch bei PV-Speichersystemen. Die Herausforderungen sind gut lösbar, denn die Materialien sind bekannt und können bereits heute gut recycelt werden. Die zu erwartenden Mengen in der Zukunft sind zwar gross, liegen aber in bekannten Grössenordnungen. Viel Potential ist noch vorhanden bei den Geschäftsmodellen für die Konstruktion, Montage und Abbau der Module, dem Recycling der Stoffe sowie der objektiven Information über Energie- und Stoffströme von rezyklierten PV Anlagen.

Referenzen:

- ⁱ Energiestrategie 2050; Urs Muntwyler, www.pvtest.ch, 2017
- ⁱⁱ Langzeitmessung von PV Anlagen; Urs Muntwyler, PV Labor BFH-TI, www.pvtest.ch, 2018
- ⁱⁱⁱ Praxis mit Solarzellen, Urs Muntwyler, 1986, 75.ff; Franzis Verlag München
- ^{iv} Muntwylers SolarHandbuch, Urs Muntwyler; 1991, S. 3ff; Muntwyler Energietechnik AG
- ^v Persönliche Information, eSens recycling, Frühling 2018
- ^{vi} Urs Muntwyler, PV Tagung Staffelstein, 2016
- ^{vii} Persönliche Information, eSens recycling, Frühling 2018
- ^{viii} Persönliche Information, eSens recycling, Frühling 2018
- ^{ix} Checkliste zum Erstellen einer Energiebilanz, 2014, Unterrichtsmaterialien Wahlmodul „Nachhaltigkeit für Ingenieure; BFH-TI, 2014, PD Dr. Eva Schüpbach
- ^x www.pvtest.ch, diverse Beiträge
- ^{xi} Swissolar, PV Markt Schweiz, 2000-2015
- ^{xii} Untersuchung MSE Studenten/ Urs Muntwyler, Sommer 2018 (unveröffentlicht)
- ^{xiii} Tabelle „Wechselrichter“, Urs Muntwyler; MSE-Kurs „Photovoltaik“ 2018
- ^{xiv} Tabelle „Wechselrichter“, Urs Muntwyler; MSE-Kurs „Photovoltaik“ 2018
- ^{xv} Tabelle „Wechselrichter“, Urs Muntwyler; MSE-Kurs „Photovoltaik“ 2018
- ^{xvi} Checkliste zum Erstellen einer Energiebilanz, 2014, Unterrichtsmaterialien Wahlmodul „Nachhaltigkeit für Ingenieure»; BFH-TI, 2014, PD Dr. Eva Schüpbach,

Verdankung:

Diese Forschungsarbeit ist Teil der Aktivitäten im Swiss Competence Centers for Energy Research "SCCER-FURIES" (Future Swiss Electrical Infrastructure), finanziert von Innosuisse (Schweizerische Agentur für Innovationsförderung - SCCER Programm). Ebenfalls wird die finanzielle Unterstützung der Berner Fachhochschule BFH in Burgdorf (Schweiz) hier freundlich verdankt.