

Photovoltaikanlagen – Life Cycle-Nutzenmodell

Eine Auswertung anhand eines dynamischen Modells

Ardian Dalipi, Caesar Gfeller, Severin Gygax, Tobias Iannaccone, Alain Zeltner *

Abstract – Die dezentrale Energieversorgung mittels Photovoltaikanlagen gilt als eine wichtige Technologie in der Umstellung auf erneuerbare Energien im Rahmen der Energiestrategie 2050 des Bundes [1]¹. Damit könnten sie als zukunftsweisendes Investitionsobjekt für Immobilienbesitzer, Unternehmen und Landeigentümer interessant sein. In den vergangenen Jahren wurden vielerorts Photovoltaikanlagen auf Firmendächern und Privathäusern installiert. Der Betrieb solcher Anlagen generiert Erträge in Form von elektrischer Energie und Minderausgaben durch einen geringeren Energiebezug vom lokalen Energieversorger. Sie erzeugen aber auch Aufwände wie Wartungs- und Unterhaltskosten, Kapitalkosten usw. Der technologische Fortschritt in dieser Branche geht weiter. So werden die Anlagen immer günstiger und immer effizienter. Für jeden Betreiber einer solchen Photovoltaikanlage stellt sich somit zwangsläufig die Frage, wann die Anlage durch eine neue ersetzt werden soll. Um dieser Thematik auf den Grund zu gehen, wird ein dynamisches, mathematisches Modell entwickelt, welches auf diese Frage eine Antwort liefern soll. Als Basis der Berechnung wurden Parameter zusammengetragen, welche einen Einfluss auf den Life Cycle haben können. Die Kerndaten sind in drei Kategorien (Finanziell, Technisch & Umwelt) unterteilt. Konkret vergleicht das Modell den Restnutzen einer bestehenden Anlage (bis zum Erreichen des vorgesehenen Lebensende) mit dem Teilnutzen einer neuen Anlage, die dank technologischem Fortschritt effizienter und günstiger ist, über eben diesen Zeitraum. Anhand dieses Vergleiches kann der optimale Ersatzzeitpunkt der Anlage berechnet werden. In der Anwendung des Modells bei kleinen und mittelgrossen Anlagen, zeigen sich Unterschiede beim optimalen Ersatzzeitpunkt. Bei einem geringen Eigenverbrauch lohnt ein frühzeitiger Ersatz einer Kleinanlage nicht. Wohingegen sich ein frühzeitiger Ersatz bei mittelgrossen Anlagen, unabhängig des Eigenverbrauchs, immer lohnt.

Index Terms – photovoltaic, embodied energy, life cycle analysis (LCA), energy optimization, building technology systems and components

* Bachelor of Science in Business Administration an der PHW Bern

¹ Bundesamt für Energie, 11.08.2018

1 Ausgangslage

Die Energiebranche in Europa und in der Schweiz befindet sich in einem fundamentalen Wandel. So stimmt die Bevölkerung des Kantons Bern am 10. Februar 2019 über eine Teilrevision des kantonalen Energiegesetzes ab. Dieses hat zum Ziel, Energie einzusparen, den CO₂ Ausstoss zu reduzieren und mehr erneuerbare Energien zu nutzen².

Gefordert werden immer öfter Lösungen, die Strom mittels erneuerbaren Quellen erzeugen können. Photovoltaikanlagen bilden einen Teil dieser Lösung und sollen im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit genauer untersucht werden.

Gegenwärtig befindet sich auch im Photovoltaikmarkt vieles im Umbruch. Die Anlagen werden immer günstiger (aktuelle Lehrmeinung -12%/p.a.) und effizienter (aktuelle Lehrmeinung +2%/p.a.), gleichzeitig ändern sich auch die Vergütungsmodelle auf politischer Ebene. Um den Betreibern einer Photovoltaikanlage ein Instrument zur Hand zu geben, den Entscheid für eine Ersatzinstallation fällen zu können, wurde dieses Forschungsprojekt initiiert. Es vergleicht den verbleibenden Nutzen einer bestehenden Photovoltaikanlage (Restnutzen) bis zu deren prognostiziertem Life-Cycle-Ende (aktuelle Lehrmeinung 30 Jahre) mit dem Teilnutzen einer vergleichbaren Neuanlage in ebendiesem Zeitraum.

2 Ziel

Es wird ein Instrument für die Betreiber von Solaranlagen entwickelt, mit dem ein ökonomisch fundierter Entscheid für eine Ersatzinvestition getroffen werden kann.

Insbesondere werden die folgenden 3 Ziele verfolgt:

- 1) Entwicklung eines robusten Berechnungsmodells zur Definition des ökonomisch optimalen Ersatzzeitpunktes (KS1).
- 2) Bestimmung des Einflusses der grauen Energie (KS2), die in der bestehenden Anlage steckt, auf den Entscheid über den Ersatzzeitpunkt
- 3) Bestimmung des Einflusses des Eigenverbrauches (KS3) auf den Entscheid über den Ersatzzeitpunkt

3 Abgrenzung

Im Rahmen der Validierung des Berechnungsmodells wird auf die Auswertung der Daten einer Photovoltaik-Grossanlage verzichtet. Im Berechnungsbeispiel wird das Modell lediglich auf die in der Schweiz am weitesten verbreiteten Anlagegrössen (klein und mittelgross) angewendet. Beim Ersatz wird zudem von einer äquivalenten Anlage, bezogen auf ihre Leistung, ausgegangen.

4 Vorgehen

Folgendes Vorgehen wurde angewendet.

- 1) Allgemeines Variantenmodell formulieren (Abgrenzung des Restnutzens vom Teilnutzen)
- 2) Parametrisierung des Restnutzens und Teilnutzens (Verbrauch, Standort, Anlagendaten)
- 3) Beziehung zwischen den Parametern definieren
- 4) Recherche regulatorischer Vorgaben (Vergütungen etc.)
- 5) Plausibilitätstest mittels zweier Szenarien

Zur Ermittlung und dem Vergleich des optimalen Anlagen-Ersatzzeitpunktes wird ein Nutzenberechnungsmodell erstellt.

Allgemeines Nutzenmodell

Der Nutzen einer Photovoltaikanlage liegt in der wirtschaftlichen Produktion von elektrischer Energie. Der Verkauf, respektive die Einsparungen durch den Eigenverbrauch der produzierten Energie, muss mindestens die laufenden Kosten decken, damit die Wirtschaftlichkeit gegeben ist. Langfristig werden optimalerweise zusätzlich die getätigten Investition kompensiert. Ob dies erreicht wird, ist jedoch im Voraus schwer zu erahnen, da dies stark von einzelnen Komponenten abhängig ist.

Bei der Betrachtung des Ersatzzeitpunktes über den (Gesamt)Nutzen einer Photovoltaikanlage wird dieser in den Teilnutzen (TN) und den Restnutzen (RN) unterteilt.

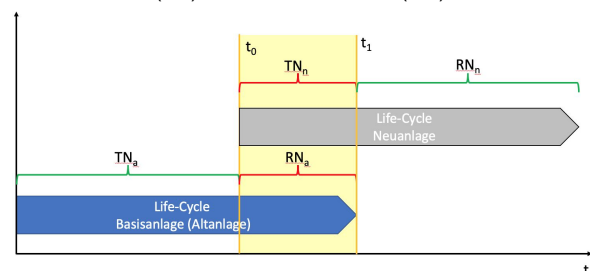


Abbildung 1: Schematisches Nutzenmodell

Damit ein wirtschaftlicher Ersatz der Basisanlage gegeben ist, muss der Teilnutzen der Neuanlage (TN_n) grösser sein als der Restnutzen der Altanlage (RN_a).

5 Modell

Der Nutzen von Photovoltaikanlagen ist abhängig von diversen Faktoren. Relevant sind einerseits die monetären Kosten und Erträge, andererseits aber auch Orts- und Leistungsabhängige Variablen. Um diese zu ermitteln, werden in diesem Modell die Parameter in die drei untenstehenden Kategorien unterteilt:

Finanzielle Daten

- Investitionskosten der Basisanlage und der Wechselrichter
- Einspeisevergütung (CHF / kWh) für die Alt- und Neuanlage
- Periodische Wartungs- und Unterhaltskosten
- Zinssatz für Fremdkapital
- Bezugspreis pro kWh Strom (CHF / kWh)

² Energiegesetz-be-ja. Online (15.01.2019).
www.energiegesetz-be-ja.ch/de/darum-gehts

Technische Daten

- Leistungsdegradation PV-Module
- Anlagenwirkungsgrad
- Globalstrahlung im Standort
- Fläche der Anlage
- Eigenverbrauch an Strom

Weitere Daten

- Alter der Basisanlage beim vorgesehenen Ersatzzeitpunkt

Die Berechnungen basieren auf folgenden Annahmen³:

- Reduktion der Investitionskosten: 12% p.a.⁴
- Effizienzsteigerung: 2% p.a.⁵
- Abschreibart: linear
- Abschreibedauer: 30 Jahre
- Reinigungs- und Wartungsaufwand: CHF 500 p.a.
- Basis Globalstrahlung: 1'100kWh/m²
- Anlagenwirkungsgrad: 14.50%
- Paneldegradation: 0.500% p.a.
- Graue Energie in den Panels: 887kWh/m²⁶

6 Kalkulationsschemata**KS1: Nutzen beim Ersatzzeitpunkt N_E**

$$N_E = TN_n - RN_a$$

- N_E : Nutzen beim Ersatzzeitpunkt
 TN_n : Teilnutzen Neuanlage
 RN_a : Restnutzen Altanlage

Der Teil- und Restnutzen wird gemäss den nachfolgenden Formeln berechnet:

$$TN_n = TE_n - A_n$$

$$RN_a = RE_a + RW - A_a$$

- TE_n : Teil-Ertrag Neuanlage
 A_n : Aufwand Neuanlage
 RE_a : Rest-Ertrag Altanlage
 RW : Restwert Altanlage
 A_a : Aufwand Altanlage

KS2: Berücksichtigung der grauen Energie

Soll die graue Energie, die zur Produktion der Altanlage aufgewendet wurde, mitberücksichtigt werden (ökologischer Aspekt), so kann dieser Faktor mittels nachfolgender Formel überprüft werden:

$$N_{Umw} = W_{gr} - \sum W_{prod}$$

- N_{Umw} : Nutzen für die Umwelt

- W_{gr} : Graue Energie in der Anlage
 $\sum W_{prod}$: Summe der produzierten Energie

KS3: Eigenverbrauch

Beim Betrieb einer Photovoltaikanlage ist zwischen zwei Betriebsarten zu unterscheiden:

- Eigenverbrauch (produzierte Energie wird direkt verbraucht)
- Einspeisung (produzierte Energie wird ins Stromnetz eingespeist und verkauft)

Eigenverbrauch

Die selbstverbrauchte Energie ist als Nutzen zu betrachten, da sie die Kosten für den Strombezug vom Elektrizitätswerk senkt:

$$N_{EV} = W_{EV} \times K_{kWh}$$

- N_{EV} : Nutzen aus Eigenverbrauch
 W_{EV} : Eigenverbrauch
 K_{kWh} : Preis pro bezogene Kilowattstunde

Einspeisung

Die produzierte Energie, die nicht selber verbraucht wird, kann ins Netz eingespeist und verkauft werden. Sie ist somit auch als Nutzen zu betrachten:

$$N_V = W_{Prod} - W_{EV} \times V$$

- N_V : Nutzen aus Einspeisung (Verkauf)
 W_{Prod} : Produzierte Energie
 W_{EV} : Eigenverbrauch
 V : Vergütung pro eingespeiste Kilowattstunde

Da jede bezogene (eingekaufte) Kilowattstunde vom Elektrizitätswerk i.d.R. teurer ist als eine eingespeiste (verkaufte) Kilowattstunde (Ausnahme bildet eine noch laufende kostendeckende Einspeisevergütung KEV), ist ein möglichst hoher Eigenverbrauch anzustreben.

7 Berechnungsmodell

Bei den Berechnungsmodellen ist zwischen jenem für die Altanlage und jenem für die Neuanlage zu unterscheiden.

Berechnungsmodell AltanlageRestertrag Altanlage RE_a

$$RE_a = [(W_R - (W_{EV} \times LC_R)) \times V] + (W_{EV} \times LC_R \times K_{kWh})$$

$$W_R = A \times \eta \times W_G \times LC_R \times PDF$$

- RE_a : Rest-Ertrag Altanlage
 W_R : Progn. Energieproduktion über Rest-Life-Cycle
 W_{EV} : Eigenverbrauch
 V : Vergütung pro eingespeiste Kilowattstunde
 K_{kWh} : Preis pro bezogene Kilowattstunde
 A : Installierte Solarpanel-Fläche
 η : Anlagenwirkungsgrad
 W_G : Globalstrahlung am Standort
 LC_R : Life-Cycle Restdauer
 PDF : Paneldegradationsfaktor

³ Im Modell «GUI_Profi» können die meisten Werte angepasst werden

⁴ 35th EUPVSEC Konferenz-Report

⁵ 35th EUPVSEC Konferenz-Report

⁶ Energieberatung Region Winterthur. Online (02.12.2018).

www.eb-region-winterthur.ch/graue-energie-von-pv-modulen/

Aufwand A_a

$$A_a = K_Z + K_B + GR$$

- A_a : Aufwand Altanlage
- K_Z : Kalkulatorische Zinsen
- K_B : Kalkulatorische Betriebskosten
- GR: Grossrevision (Tausch Wechselrichter)

Restwert RW

$$RW = \frac{I_a}{LC_a}$$

- I_a : Investitionskosten Altanlage
- LC_a : Geplanter Life-Cycle Altanlage

Berechnungsmodell Neuanlage

Teilertrag Neuanlage TE_n

$$TE_n = [(W_T - (W_{EV} \times LC_R)) \times V] + (W_{EV} \times LC_T \times K_{kWh})$$

$$W_R = A \times \eta \times W_G \times LC_R \times PDF$$

- TE_n : Teil-Ertrag Neuanlage
- W_T : Progn. Energieproduktion über Teil-Life-Cycle
- W_{EV} : Eigenverbrauch
- V: Vergütung pro eingespeiste Kilowattstunde
- K_{kWh} : Preis pro bezogene Kilowattstunde
- A: Installierte Solarpanel-Fläche
- η : Anlagenwirkungsgrad
- W_G : Globalstrahlung am Standort
- LC_T : Life-Cycle Teildauer
- PDF: Paneldegradationsfaktor

Aufwand A_n

$$A_n = K_Z + K_B + K_A + GR$$

- A_n : Aufwand Neuanlage
- K_Z : Kalkulatorische Zinsen
- K_B : Kalkulatorische Betriebskosten
- K_A : Kalkulatorische Abschreibungen
- GR: Grossrevision (Tausch Wechselrichter)

8 Validierung

Um die Validität des Berechnungsmodells zu evaluieren, wurden 2 Szenarien kalkuliert. Dabei unterschieden sich die beiden Anlagentypen hauptsächlich in der Grösse (Kleinanlage & Mittलगrosse Anlage).

Szenario 1: Kleinanlage, 10kWp

Für die Berechnung dieses Szenarios werden folgende Parameter festgelegt:

- Anlagenleistung: 10kWp
- Einspeisevergütung Altanlage: CHF 0.11/kWh
- Einspeisevergütung Neuanlage: CHF 0.11/kWh
- Bezugspreis Strom: CHF 0.19/kWh
- Kalkulatorischer Zins: 3.0%

Einmalvergütung (KLEIV): 26% vom Neuwert

In diesem Modell werden drei unterschiedliche Eigenverbrauchswerte berücksichtigt:

- 1) 0kWh/Jahr
- 2) 15'000kWh/Jahr
- 3) 20'000 kWh/Jahr

Ergebnis

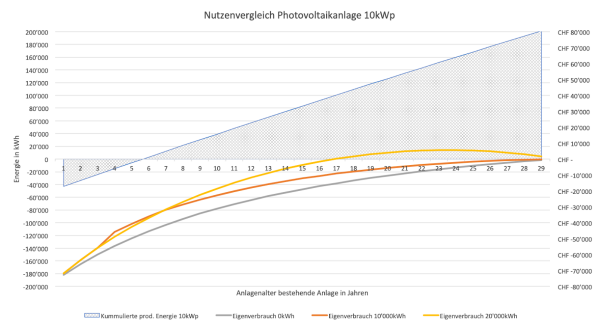


Abbildung 2: Nutzenvergleich PV-Anlage mit 10kWp

Die Auswertung dieses Szenarios zeigt, dass nicht in jedem Fall ein vorzeitiger Ersatz der Anlage wirtschaftlich sinnvoll ist. Bei einem Eigenverbrauch von 0kWh respektive 10'000kWh pro Jahr ist ein vorzeitiger Ersatz wirtschaftlich nicht sinnvoll. Anders sieht es bei einem höheren Eigenverbrauch von 20'000kWh pro Jahr aus. Für die 3 untersuchten Eigenverbräuche ergeben sich somit folgende optimalen Ersatzzeitpunkte:

- 0kWh/Jahr Eigenverbrauch: >29. Betriebsjahr
- 10'000kWh/Jahr Eigenverbrauch: >29. Betriebsjahr
- 20'000kWh/Jahr Eigenverbrauch: 24. Betriebsjahr

Die graue Energie der Anlage ist nach dem 5. Betriebsjahr bereits erzeugt, so dass in diesem Szenario dieser Aspekt nicht beachtet werden muss.

Szenario 2: Mittलगrosse Anlage, 99kWp

Für die Berechnung dieses Szenarios werden folgende Parameter festgelegt:

- Anlagenleistung: 99kWp
- Einspeisevergütung Altanlage: CHF 0.11/kWh
- Einspeisevergütung Neuanlage: CHF 0.11/kWh
- Bezugspreis Strom: CHF 0.19/kWh
- Kalkulatorischer Zins: 3.0%
- Einmalvergütung (KLEIV): 26% vom Neuwert

In diesem Modell werden drei unterschiedliche Eigenverbrauchswerte berücksichtigt:

- 1) 0kWh/Jahr
- 2) 100'000kWh/Jahr
- 3) 200'000 kWh/Jahr

Ergebnis

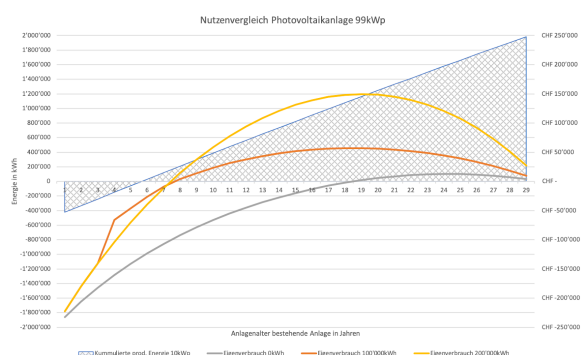


Abbildung 3: Nutzenvergleich PV-Anlage mit 99 kWp

Die Auswertung dieses Szenarios zeigt, dass ein frühzeitiger Ersatz in jedem Fall aus ökonomischer Sicht sinnvoll ist. Für die 3 untersuchten Eigenverbräuche ergeben sich folgende optimalen Ersatzzeitpunkte:

- 0kWh/Jahr Eigenverbrauch: 24. Betriebsjahr
- 100'000kWh/Jahr Eigenverbrauch: 19. Betriebsjahr
- 200'000kWh/Jahr Eigenverbrauch: 19. Betriebsjahr

Auch in diesem Szenario ist die graue Energie schon nach dem 5. Betriebsjahr erzeugt worden (die Berechnungsfaktoren ändern sich zwischen den beiden Szenarien nicht).

9 Kritik

Die gesamte Solarbranche, der Strommarkt sowie die politischen Rahmenbedingungen (Vergütungsmodelle) befinden sich in einem grossen Wandel. Eine Prognose über mehrere Jahrzehnte ist somit von vielen Unsicherheitsfaktoren betroffen. Es genügt daher nicht eine solche Berechnung nach dem Kauf einer Anlage durchzuführen. Vielmehr muss diese Überprüfung periodisch wiederholt werden. Dabei sind die dem Berechnungsmodell zugrundeliegenden Parameter auf ihre Aktualität hin zu überprüfen und gegebenenfalls zu korrigieren. Es wird empfohlen, diese Berechnungen nach 5, 10, 15 Jahren und anschliessend im 2-Jahresrhythmus durchzuführen.

Insbesondere sind folgende Parameter in der periodischen Nachkalkulation zu überprüfen:

- Preisentwicklung der Komponenten
- Effizienzsteigerung der Anlagen
- Aktuelle Zinssätze
- Einspeisevergütung
- Eigenverbrauch
- Menge der tatsächlich produzierten Energie

In dem Modell wurden folgende Aspekte nicht berücksichtigt:

Verkauf der Altanlage

Wird eine bestehende Anlage demontiert, könnte diese statt entsorgt auch zu einem attraktiven Preis weiterverkauft werden, denn sie wäre noch voll funktionsfähig. Dieser Verkaufserlös würde das Ergebnis der Neuanschaffung entsprechend verbessern.

Steuerliche Aspekte

Die Installation einer Photovoltaikanlage kann steuerlich in Abzug gebracht werden. Da dieser jedoch stark unterschiedlich ausfallen kann, wurde er im einfachen Berechnungsmodell nicht berücksichtigt (im Berechnungsmodell «GUI_Profi» kann dieser Wert eingegeben werden).

10 Quellen

- 1) Eröffnungsrede der 35ten EUPVSEC Konferenz (Pierre Verlinden, 28.09.2018)
- 2) Swisssolar. Website. Online (02.12.2018) <https://www.swisssolar.ch/fuer-bauherren/planung/shilfsmittel/solardachrechner/>
- 3) Energieheld. Website. Online (02.12.2018) <https://www.energieheld.ch/solaranlagen/photovoltaik#groesse-rechner>
- 4) Electrosuisse. Website. Online (02.12.2018) https://www.electrosuisse.ch/uploads/media/Energie_Sonnenklar_D.pdf
- 5) ISE Fraunhofer. Website. Online (02.12.2018) <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf>
- 6) Energieberatung Region Winterthur. Website. Online (02.12.2018) <http://www.eb-region-winterthur.ch/graue-energie-von-pv-modulen/>
- 7) Energieschweiz. Website. Online (02.12.2018) <https://www.energieschweiz.ch/page/de-ch/Extra-blatt-Special-Vier-Photovoltaik-Mythen>
- 8) Energiegesetz-be-ja. Website. Online (15.01.2019) <https://energiegesetz-be-ja.ch/de/darum-gehts>
- 9) Bundesamt für Energie. Website. Online (11.08.2018) <http://www.bfe.admin.ch/themen/00490/00497>