



**Hochschule für Technik
und Wirtschaft Berlin**

University of Applied Sciences

Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin

Fachbereich 1 - Ingenieurwissenschaften Energie und Information

Forschungsgruppe Solarspeichersysteme

Web-App: indielux Wattrechner

Dokumentation der Berechnungsgrundlagen

Autoren

Nico Orth

Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin

Fachbereich 1 – Ingenieurwissenschaften Energie und Information

Forschungsgruppe Solarspeichersysteme

Wilhelminenhofstr. 75a

12459 Berlin

Version

Version 1.0

Webseite

<https://pvspeicher.htw-berlin.de>

Berlin, März 2021

Inhaltsverzeichnis

1	VORWORT	1
2	ANWENDUNGSBEREICH	1
3	EINGANGSDATEN	2
3.1	Wetterdaten.....	2
3.2	Verbrauchsdaten	2
4	SYSTEMKOMPONENTEN	3
4.1	Stecker-Solar-Gerät	3
4.2	Batteriesystem	3
5	RAHMENBEDINGUNGEN	4
6	DANKSAGUNG	6
	LITERATURVERZEICHNIS	7

1 Vorwort

Die verheerenden Folgen und Veränderungen durch den Klimawandel sind weltweit spürbar, eine Abkehr von der Nutzung fossiler Energien ist in Anbetracht dessen unabdingbar. Im Zuge dessen kommt es zu einer Transformation des Energiesystems, in ein CO₂-neutrales Zeitalter, dass näher an die Bürger:innen rückt. Stecker-Solar-Geräte ermöglichen die direkte Teilhabe an dem Generationenprojekt Energiewende.

Die Web-App: indielux Wattrechner hilft dabei den Nutzen von Stecker-Solar-Geräten in Verbindung mit einem Batteriespeicher und dem Energiemanagementsystem ready2plugin besser nachvollziehen zu können und somit eine fundierte Entscheidung für die Solarenergie zu treffen. Diese Dokumentation legt die zugrundeliegenden Annahmen und Berechnungen offen.

2 Anwendungsbereich

Ziel des entwickelten Tools ist es, die solare Eigenversorgung des individuellen Haushalts mit Stecker-Solar-Geräten und steckbaren Batteriesystemen abzuschätzen. Gleichzeitig können, unter Berücksichtigung der Gegebenheiten vor Ort, ökonomische Kennwerte zum Erreichen der gewünschten solaren Eigenversorgung ermittelt werden. Das Tool soll Laien bzw. Laiinnen als auch Expert:innen auf Grundlage einer übersichtlichen und intuitiven Bedienung wissenschaftliche und komplexe Themenstellungen leicht zugänglich vermitteln. Die im Tool hinterlegten Ergebnisse basieren auf Simulationsuntersuchungen von knapp 90 Mio. unterschiedlichen Systemkonfigurationen. Das Systemverhalten der einzelnen Konfigurationen wurde in einer zeitlichen Auflösung von einer Minute über den Zeitraum von einem Jahr simuliert.

Tabelle 1 stellt den zulässigen Wertebereich der einzelnen Parameter dar, die im Tool variiert werden können. Um den Berechnungsaufwand zu begrenzen, musste die Variantenanzahl pro Parameter eingeschränkt werden. Dadurch kann das Tool nicht alle in der Praxis möglichen Systemkonstellationen abbilden.

Tabelle 1 Grenzen und Schrittweite der veränderlichen Parameter des Tools.

Parameter	Minimum	Maximum	Schrittweite
PV-Leistung in Wp	200	700	10
	800	4600	100
Speicherkapazität in Wh	0	3000	500
Haushaltsstrombedarf in kWh/a	500	5500	1
Neigung in °	0	90	5
Ausrichtung in °	0	335	45
Investitionskosten in €	0	∞	1
Strompreis in ct/kWh	25	40	1
Betrachtungszeitraum in Jahren	10	25	5

3 Eingangsdaten

Zur Simulation des Betriebsverhaltens der untersuchten Systemkonstellationen wurden minütlich aufgelöste Eingangsdatensätze verwendet, die nachfolgend kurz beschrieben werden.

3.1 Wetterdaten

Als Datengrundlage stehen Messwerte des meteorologischen Observatoriums Lindenberg (Brandenburg) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) aus dem Jahr 2017 zur Verfügung. Die Globalbestrahlung auf der Horizontalen lag in diesem Jahr bei 1062 kWh/(m²·a). Die Messwerte der Global- und Diffusbestrahlungsstärke wurden zur Bestimmung der Bestrahlungsstärke auf der geneigten PV-Generatorebene genutzt. Auf Basis der Messwerte der Lufttemperatur wurde die Effizienz des PV-Generators ermittelt. Die mittlere Lufttemperatur betrug am Standort Lindenberg im Jahr 2017 ca. 10 °C.

3.2 Verbrauchsdaten

Der zeitliche Verlauf des elektrischen Energieverbrauchs der Haushalte wird von zahlreichen Einflussfaktoren bestimmt [1], [2]. Je nach Verhalten der Nutzer:innen und technischer Ausstattung der Haushalte können sich Haushaltlastprofile deutlich voneinander unterscheiden. Um diese Unterschiede im Verbrauchsverhalten zu berücksichtigen, liegen der Anwendung insgesamt 41 gemessene Jahreslastprofile zu Grunde, vgl. auch Abbildung 1. Die Lastprofile stammen aus zwei verschiedenen Untersuchungen. Während 16 der 41 Profile auf Grundlage von realen Messungen in Wohnungen synthetisiert worden sind [3] wurden die anderen Lastprofile aus dem frei verfügbaren Datensatz der HTW von Einfamilienhäusern entnommen [4]. Der jährliche Strombedarf der untersuchten Lastprofile variiert zwischen 750 kWh bis 6230 kWh pro Jahr. Um einen Stromverbrauch von 500 kWh/a abbilden zu können, wurde das Profil mit dem geringsten Verbrauch skaliert.

4 Systemkomponenten

Dieser Abschnitt beschreibt die verwendeten Simulationsmodelle zur Abbildung der einzelnen Systemkomponenten

4.1 Stecker-Solar-Gerät

Das Stecker-Solar-Gerät setzt sich aus dem PV-Generator und dem PV-Wechselrichter zusammen. Auf Grundlage der Wetterdaten wurde zunächst über geometrische Zusammenhänge sowie mit dem Modell nach Klucher [5] die Bestrahlungsstärke auf der geneigten Ebene des PV-Generators ermittelt. Die Modellierung der Abhängigkeit des PV-Modulwirkungsgrads von der Bestrahlungsstärke und von der Modultemperatur erfolgte auf Basis eines empirischen Modells nach Beyer et al. [6]. Das ermittelte Erzeugungsprofil des PV-Generators wurde auf die jeweilige Nennleistung skaliert.

Bei diesem Anwendungstool wurde der Ansatz verfolgt, die Umwandlungseffizienz der leistungselektronischen Wandler PV-Wechselrichter durch die resultierende Verlustleistung abzubilden. Die Leistungsabhängigkeit der Verlustleistung wird dabei durch eine quadratische Gleichung approximiert. Beim PV-Wechselrichter dient für Systemleistungen bis 700 W der Wirkungsgradverlauf des AEConversion INV250-45EU als Datengrundlage (entnommen aus PV*SOL). Übersteigt die Generatorleistung diesen Schwellwert, wird der Wirkungsgradverlauf des Sunny Boy 3.0-1AV-41 bei Bemessungseingangsspannung berücksichtigt [7]. Die Nennleistung des PV-Wechselrichters ist an die Größe des PV-Generators gekoppelt und beträgt stets 0,9 W/Wp. Anpassungsverluste durch eine fehlerhafte MPP-Regelung bleiben unberücksichtigt.

4.2 Batteriesystem

Zur Abbildung des Batteriesystems wurde auf ein vereinfachtes Modell des „Performance Simulation Model for PV-Battery Systems (PerMod)“ von Weniger et al. zurückgegriffen [8]. Es wurde davon ausgegangen, dass der PV-Generator und der Batteriespeicher über einen PV-Wechselrichter und einen separaten Batteriewechselrichter verbunden sind (AC-Kopplung des Batteriesystems). Um das Betriebsverhalten eines Stecker-Speicher-Geräts realitätsnah abbilden zu können, wurde zur Parametrierung des Modells auf das AC-gekoppelte Niedervolt-System C1 der Stromspeicher-Inspektion 2018 [9] zurückgegriffen. Für die Systemkonfigurationen wurde ein mittlerer Umwandlungswirkungsgrad im Lade- bzw. Entladebetrieb von 91,7 % bzw. 92 % angenommen, der Batteriewirkungsgrad beträgt 97,8 %. Der resultierende AC-Systemnutzungsgrad des AC-gekoppelten Batteriesystems beträgt somit 82,5 %. Die Nennleistung des Batteriewechselrichters wurde mit 0,5 W/Wh angesetzt. Auf die Abbildung der Stand-by-Verluste sowie Verluste aufgrund der dynamischen oder stationären Regelungsabweichungen wurde verzichtet. Die Systemeffizienz wird somit überschätzt.

5 Rahmenbedingungen

Ein untergeordnetes Ziel der Entwicklung der Web-App war es, der Nutzerin bzw. dem Nutzer eine weitgehend freie Wahl bezüglich der energetischen als auch ökonomischen Rahmenbedingungen zu ermöglichen. Dennoch mussten verschiedene Annahmen getroffen werden, die im Folgenden beschrieben werden sollen.

Der Web-Anwendungen liegen detaillierte Simulationsrechnungen zugrunde, mit denen in Abhängigkeit von der PV-Generatorleistung, Speicherkapazität und Orientierung (Ausrichtung und Systemneigung) für die 41 zuvor beschriebenen Lastprofile jeweils der Autarkiegrad berechnet worden ist (vgl. dazu auch Abb. 1). Um die Eingabe des individuellen Strombedarfs ermöglichen zu können, wurde mithilfe einer Regressionsanalyse über folgende Funktion der Autarkiegrad a in Abhängigkeit des Strombedarfs E_L modelliert.

$$a = w \cdot e^{x \cdot E_L} + y \cdot e^{z \cdot E_L} \quad (1)$$

Die Parameter w , x , y , z variieren demnach in Abhängigkeit der oben genannten Einflussgrößen. Abbildung 1 stellt beispielhaft den Autarkiegrad in Abhängigkeit vom jährlichen Strombedarf für zwei Varianten dar. Die erste Variante ohne Batteriespeicher hat einen um 30° geneigten und südlichen ausgerichteten PV-Generator mit einer Nennleistung von 300 Wp. Bei der zweiten Variante ist der PV-Generator doppelt so groß und an einer Südfassade montiert und zusätzlich mit einem 600-Wh-Batteriespeicher kombiniert. Weiterhin stellt die Grafik die Regressionsanalyse bei einer Generatorleistung von 4600 Wp bei einem um 30° geneigten System dar.

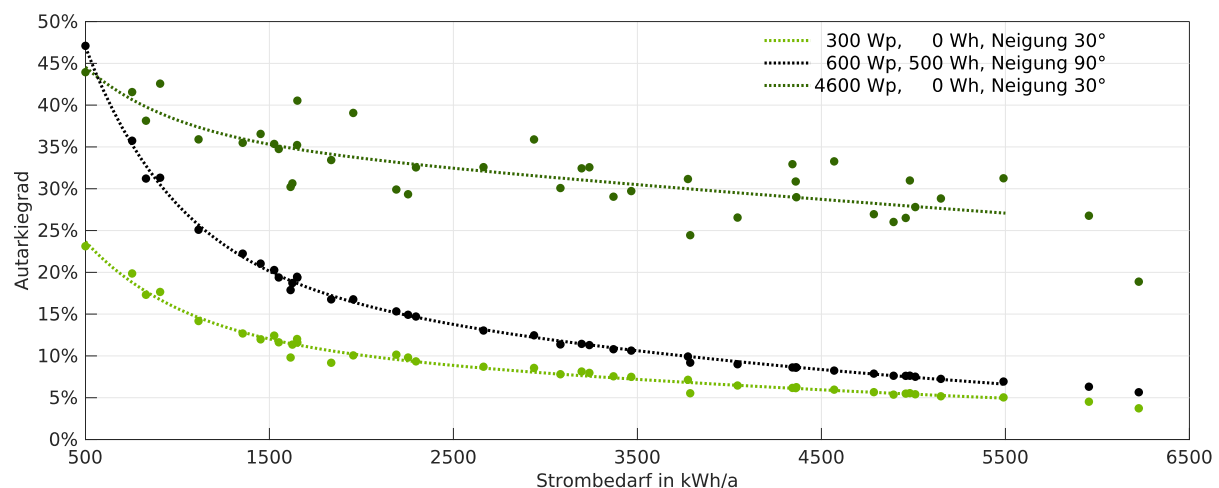


Abbildung 1 Beispielhafte Regressionsanalyse des Autarkiegrads in Abhängigkeit von der PV-Generatorleistung, der Speicherkapazität und der Neigung der Systemkonfiguration bei einer südlicher Ausrichtung.

Der Nutzerin bzw. dem Nutzer der Web-Anwendung sollen neben der zusätzlichen Berücksichtigung eines Batteriesystems zahlreiche Einstellmöglichkeiten hinsichtlich der Investitionskosten, Entwicklung des Strompreises, Systemneigung sowie eine exakte Eingabe des zu untersuchenden Strombedarfs ermöglicht werden. Dabei gelten folgende Grundannahmen:

Hinsichtlich der Investitionskosten I_{SSG} der Stecker-Solar-Geräte mit deren Leistung P_{PVG} wurde eine Kostenfunktion hinterlegt, die wie folgt definiert ist und sich aus einer Regression der Marktübersicht von Stecker-Solar-Geräten der DGS ergibt [10]:

$$I_{SSG} = 803,3 \cdot P_{PVG} + 280,8 \quad (2)$$

Produktrecherchen verdeutlichen, dass die Kostenfunktion auch auf größere, unmontierte Systemleistungen übertragbar ist.

Sofern die Investitionskosten für das Stecker-Solar-Gerät nicht individuell angepasst werden, folgen die Kosten der Kostenfunktion. Aufgrund einer fehlenden Datenlage konnten die Kosten der steckbaren Batteriespeicher nur abgeschätzt werden und ergeben sich aus der Extrapolation der Marktübersicht für Batteriespeicher vom pv-magazine [11]. Ersatzkosten werden im Rahmen dieses Anwendungstools nicht berücksichtigt.

Über die Betriebsdauer des Systems kommt es, bedingt durch Alterungserscheinungen, zur Leistungsabnahme der PV-Module. Für die Web-Anwendung wurde eine jährliche Leistungsabnahme von 0,3 % berücksichtigt [3].

Vor dem Hintergrund einer möglichst einfachen und intuitiven Bedienbarkeit lässt sich der Haushaltsstrombedarf im Jahr über die Anzahl der Personen im Haushalt spezifizieren. Dessen Höhe orientiert sich dabei an den Ergebnissen des Stromspiegels [13], bei dem der Strombedarf in Abhängigkeit von der Anzahl der Bewohner:innen des Haushalts in 7 Kategorien von gering bis sehr hoch eingeteilt wird. Für diese Untersuchung wird von mittleren Verbräuchen ausgegangen. In Mehrfamilienhäusern ergibt sich demnach für einen Einpersonenhaushalt ein mittlerer Strombedarf von 1500 kWh/a. Ein Zweipersonenhaushalt verbraucht im Mittel 2100 kWh/a, bei 3 Personen sind es ca. 2600 kWh/a und bei 4 Personen etwa 3000 kWh/a. Wohnen mehr als 4 Personen in einem Haushalt, wird vereinfacht von einem Haushaltstrombedarf von 3400 kWh/a ausgegangen. Strom zur Warmwasseraufbereitung wird dabei nicht berücksichtigt. Zum anderen lässt sich über die häufigsten Installationsformen die Systemneigung voreinstellen. Wird das System am Balkon oder an der Fassade installiert, beträgt der Neigungswinkel des Systems in der Regel 90°. Wird das System hingegen im Garten aufgestellt, wird in der Berechnung von einem Neigungswinkel von 20° ausgegangen. Für die Installation auf dem Gebäudedach wird mit einer Neigung von 45° gerechnet. Eine individuelle Auswahl der Ausrichtung, Neigung oder des Strombedarfs ist möglich.

In der Voreinstellung wurde zudem von einem aktuellen Arbeitsstrompreis von 30 ct/kWh ausgegangen und eine Strompreissteigerung von 1 %/a angenommen.

In der Web-Anwendung besteht die Möglichkeit eine Systemleistung einzugeben, die nicht zuvor simuliert worden ist (vgl. Tabelle 1). In diesem Fall wird zwischen den Ergebnissen der nächstgrößeren bzw. -kleineren Systemleistung linear interpoliert.

Ausgabegrößen

Stromerzeugung: Die AC-seitige PV-Erzeugung beschreibt den jährlichen Ertrag in kWh/a des Stecker-Solar-Geräts, der sich abzüglich der Verluste im Wechselrichter ergibt.

Vermiedener Strombezug: Der vermiedene Strombezug beschreibt den Strombedarf der Verbraucher, der direkt durch das Stecker-Solar-Gerät bzw. durch die Batterieentladung gedeckt werden kann. Netzbezug kann damit verringert werden.

Direktverbrauch Diese Kenngröße beschreibt den Anteil der Stromerzeugung, der direkt zum Laden der Batterie bzw. zur Deckung der Verbraucher genutzt werden kann.

Selbstversorgung: Die Selbstversorgung, häufig auch Autarkiegrad oder Eigenversorgung genannt, bildet sich aus dem Verhältnis des vermiedenen Netzbezugs zum elektrischen Strombedarf des betrachteten Haushalts.

Stromgestehungskosten: Die Stromgestehungskosten C_{LCOE} bzw. Stromnutzungskosten in Verbindung mit einem Batteriesystem, sind die spezifischen Kosten für die Energie aus dem Stecker-Solar-Gerät. Zu Berechnung werden die Gesamtkosten des Stecker-(Speicher)-Systems C_{SSG} über den Betrachtungszeitraum n in Jahren ermittelt und durch die genutzte Energie geteilt. Ohne Netzeinspeisung entspricht dies dem vermiedenen Netzbezug.

Investitionsrendite: Die Investitionsrendite (interner Zinsfuß, IRR) ermöglicht eine Aussage über die Rentabilität der Investition. Sie beschreibt den Zins, den die Investorin bzw. der Investor bei einer Investition innerhalb eines Jahres erzielt.

Amortisationszeit: Die Amortisationszeit t_{amort} beschreibt den Zeitpunkt, ab dem die Einsparungen durch den vermiedenen Netzbezug höher als die Investition sind.

6 Danksagung

Ein besonderer Dank gilt den zahlreichen Betreiber:innen von Stecker-Solar-Geräten, die der Forschungsgruppe Solarspeichersysteme der HTW Berlin Messdaten ihrer Systeme bereitgestellt haben sowie Christian Ofenhäusle für die Unterstützung bei der Akquise.

Die Web-Anwendung wurde von der Forschungsgruppe im Rahmen des Forschungsprojektes „Digitale Werkzeuge für Plug-in Solarenergiesysteme (PV.pluginTool)“ entwickelt. Das Vorhaben wird vom IFAF – Institut für angewandte Forschung Berlin e. V. gefördert.



Literaturverzeichnis

- [1] WENIGER, JOHANNES ; BERGNER, JOSEPH ; TJADEN, TJARKO ; QUASCHNING, VOLKER: *Dezentrale Solarstromspeicher für die Energiewende*. 1. Berlin : Berliner Wissenschafts-Verlag, 2015. – Wen15 – ISBN 978-3-8305-3548-5
- [2] WENIGER, JOHANNES: *Bewertung der Energieeffizienz von netzgekoppelten Photovoltaik-Batteriesystemen in Wohngebäuden*. Berlin, Technische Universität Berlin, Dissertation, 2019
- [3] ORTH, NICO: *Energetische und ökonomische Bewertung von Stecker-Solar-Geräten*. Berlin, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Masterarbeit, 2020
- [4] TJADEN, TJARKO ; BERGNER, JOSEPH ; WENIGER, JOHANNES ; QUASCHNING, VOLKER: *Representative electrical load profiles of residential buildings in Germany with a temporal resolution of one second*, 2015
- [5] KLUCHER, T. M.: Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. In: *Solar Energy* Bd. 23 (1979), S. 111–114
- [6] BEYER, HANS GEORG ; HEILSCHER, GERD ; BOFINGER, STEFAN: Identification of a General Model for the MPP Performance of PV-Modules for the Application in a Procedure for the Performance Check of Grid Connected Systems. In: *19th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Paris, 2004, S. 3073–3076
- [7] SMA SOLAR TECHNOLOGY AG: *Wirkungsgrade und Derating SUNNY BOY / SUNNY BOY STORAGE / SUNNY TRIPOWER / SUNNY MINI CENTRAL* (Technische Information) : SMA Solar Technology AG, 2020
- [8] WENIGER, JOHANNES ; TJADEN, TJARKO ; ORTH, NICO ; MAIER, SELINA: *Performance Simulation Model for PV-Battery Systems (PerMod)*. URL <http://pvspeicher.htw-berlin.de/permod>. – Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin
- [9] WENIGER, JOHANNES ; MAIER, SELINA ; KRANZ, LENA ; ORTH, NICO ; BÖHME, NICO ; QUASCHNING, VOLKER: *Stromspeicher-Inspektion 2018*. Berlin : Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, 2018
- [10] DGS – DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR SONNENENERGIE E.V.: *Marktübersicht Steckdosen Solar-Geräte*. URL <https://www.pvplug.de/marktuebersicht/>. – abgerufen am 2020-08-30. – Deutsche Gesellschaft für Solarenergie
- [11] PV MAGAZINE: *Marktübersicht Batteriespeicher für Photovoltaikanlagen - 2020*. URL <https://www.pv-magazine.de/marktuebersichten/batteriespeicher/speicher-2020/>. – pv magazine Deutschland
- [12] KOST, CHRISTOPH ; SHAMMUNGAM, SHIVENES ; JÜLCH, VERENA ; NGUYEN, HUYEN-TRAN ; SCHLEGL, THOMAS: *Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien*. Freiburg : Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), 2018
- [13] CO2ONLINE GMBH: *Stromspiegel für Deutschland 2019* (Broschüre). Berlin : co2online gGmbH, 2019