



**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: Stecker-Solar-Simulator

Dokumentation der Berechnungsgrundlagen

Autoren

Nico Orth, Joseph Bergner und Michaela Zoll

Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin

Fachbereich 1 – Ingenieurwissenschaften Energie und Information

Forschungsgruppe Solarspeichersysteme

Wilhelminenhofstr. 75a

12459 Berlin

Version

Version 3.0

Webseite

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

Berlin, Mai 2024

Inhaltsverzeichnis

1	VORWORT.....	1
2	ANWENDUNGSBEREICH	1
3	EINGANGSDATEN	2
3.1	Wetterdaten.....	2
3.2	Verbrauchsdaten.....	2
3.3	CO₂-Emissionsfaktoren.....	2
4	SYSTEMKOMPONENTEN	3
4.1	Steckersolargerät	3
4.2	Batteriesystem	4
5	RAHMENBEDINGUNGEN.....	4
6	AUSGABEGRÖßEN.....	9
7	DANKSAGUNG.....	9
	LITERATURVERZEICHNIS.....	10

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, in dem die Erzeugung von Energie näher an die Bürger:innen rückt. Steckersolargeräte ermöglichen die Teilhabe an dem Generationenprojekt Energiewende.

Die Web-App: Stecker-Solar-Simulator hilft dabei den Nutzen von Steckersolargeräten 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 der entwickelten Web-App ist es, die solare Eigenversorgung des individuellen Haushalts mit Steckersolargeräten und steckbaren Batteriesystemen abzuschätzen. Gleichzeitig können, unter Berücksichtigung der Gegebenheiten vor Ort, ökonomische Kennwerte zum Erreichen der gewünschten solaren Eigenversorgung ermittelt werden.

Das Planungswerkzeug soll technischen Laien und Laiinnen als auch Expert:innen auf Grundlage einer übersichtlichen und intuitiven Bedienung wissenschaftliche und komplexe Themenstellungen leicht zugänglich vermitteln. Die hinterlegten Ergebnisse basieren auf Simulationsuntersuchungen von mehr als 17 Mio. unterschiedlichen Systemkonfigurationen. Das Systemverhalten der einzelnen Konfigurationen wurde in einer zeitlichen Auflösung von einer Minute über den Zeitraum von einem Jahr simuliert und auf die Betriebsjahre extrapoliert.

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

Tabelle 1 Grenzen und Schrittweite der Parameter des Stecker-Solar-Simulators.

Parameter	Minimum	Maximum	Schrittweite
PV-Leistung in W_p	400	2000	5
Wechselrichterleistung in W_{AC}	300	800	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	20	5
Verschattung ¹	keine -	starke -	-

¹ Die Direktstrahlung bleibt bis zu einer bestimmten Sonnenhöhe (25°, 35°, 45°) unberücksichtigt, s. 5 Rahmenbedingungen.

3 Eingangsdaten

Zur Simulation des Betriebsverhaltens der untersuchten Systemkonstellationen wurden minütlich aufgelöste Eingangsdatensätze der Einstrahlung und der Last 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, siehe 4.1. 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 NutzerInnen und technischer Ausstattung der Haushalte können sich Haushaltslastprofile deutlich voneinander unterscheiden. Um diese Unterschiede im Verbrauchsverhalten zu berücksichtigen, liegen der Anwendung insgesamt 41 gemessene Jahreslastprofile zu Grunde, vgl. auch Abbildung 5. 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 abbilden zu können, wurde das Profil mit dem geringsten Verbrauch skaliert.

3.3 CO₂-Emissionsfaktoren

Zur Berechnung der eingesparten CO₂-Emissionen innerhalb des Betrachtungszeitraums werden vereinfacht mittlere CO₂-Emissionsfaktoren für den Strommix berücksichtigt. Abbildung 1 stellt die angenommene Dekarbonisierung des Stromsektors nach Böing et al. [5] dar.

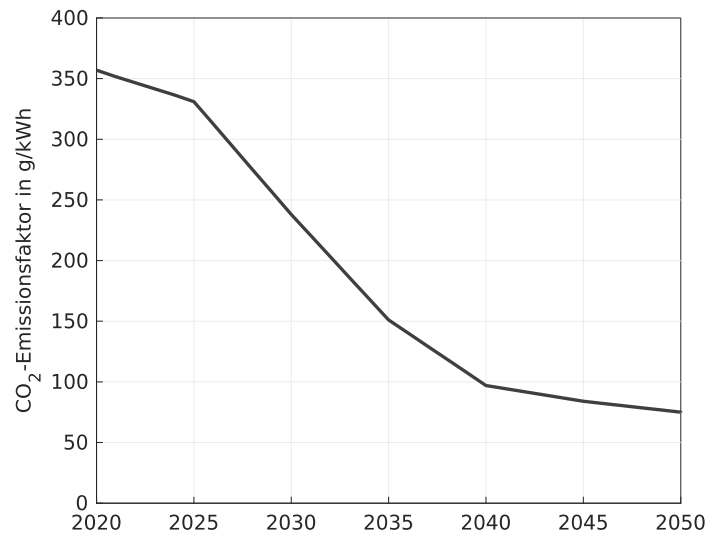


Abbildung 1 Berücksichtigte mittlere CO₂-Emissionsfaktoren nach [5].

4 Systemkomponenten

Dieser Abschnitt beschreibt die verwendeten Simulationsmodelle zur Abbildung der einzelnen Systemkomponenten.

4.1 Steckersolargerät

Das Steckersolargerät 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 dieser Web-App wurde der Ansatz verfolgt, die Umwandlungseffizienz des PV-Wechselrichters durch die resultierende Verlustleistung abzubilden. Die Leistungsabhängigkeit der Verlustleistung wird dabei durch eine quadratische Gleichung approximiert. Beim PV-Wechselrichter dient der auslastungsabhängige Wirkungsgrad des TSOL-M400 von TSUN als Grundlage für die Modellierung des Wechselrichters (Daten entnommen aus PV*SOL). Die Nennleistung des PV-Wechselrichters ist zwischen 400 W und 800 W variierbar, wobei stets auf die Parameter des TSOL-M400 zurückgegriffen wird. Allerdings kann ein Verhältnis von $2 W_P / W_{AC}$ nicht unterschritten werden.

Wichtiger Hinweis:

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass eine Unterdimensionierung des Wechselrichters zu einer stärkeren Auslastung und Erwärmung führt. Das Gerät kann schneller altern. Darüber hinaus müssen beim Kauf des Wechselrichters **unbedingt** die Strom-, Spannungsgrenzen und weitere Systemgrenzen berücksichtigt werden. Nicht alle am Markt verfügbaren Modulwechselrichter sind für mehrere Solarmodule mit höherer Leistung geeignet.

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 Niederspannungssystem 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 Standby-Verluste sowie Verluste aufgrund der dynamischen oder stationären Regelungsabweichungen wurde verzichtet.

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-Anwendung liegen detaillierte Simulationsrechnungen zugrunde, mit denen in Abhängigkeit von der PV-Generatorleistung, Wechselrichterleistung, Speicherkapazität, und Orientierung (Ausrichtung und Systemneigung) für die 41 zuvor beschriebenen Lastprofile berechnet wurden. In der Web-Anwendung lassen sich die Leistung des Steckersolargeräts frei wählen und neben der zusätzlichen Berücksichtigung eines Batteriesystems zahlreiche Einstellmöglichkeiten hinsichtlich der Investitionskosten, Entwicklung des Strompreises, Systemneigung sowie der Eingabe des zu untersuchenden Strombedarfs vornehmen.

Haushaltsstrombedarf

Vor dem Hintergrund einer möglichst einfachen und intuitiven Bedienbarkeit lässt sich der Haushaltsstrombedarf im Jahr sowohl über die Anzahl der Personen im Haushalt spezifizieren als auch mit einem konkreten Wert angeben. Für die Anzahl der Personen orientiert sich dessen Höhe dabei an den Ergebnissen des Stromspiegels [13], bei dem der Strombedarf in Abhängigkeit von der Anzahl der Bewohner:innen des Haushalts in sieben Kategorien von gering bis sehr hoch eingeteilt wird. Für diese Untersuchung wird von mittleren Verbräuchen ausgegangen, siehe Tabelle 2. Strom zur Warmwasseraufbereitung wird dabei nicht berücksichtigt.

Tabelle 2 Energieverbrauch in Abhängigkeit der Personen im Haushalt.

	Mehrfamilienhaus	Einfamilienhaus
Eine Person	1500 kWh/a	2500 kWh/a
Zwei Personen	2100 kWh/a	3000 kWh/a
Drei Personen	2600 kWh/a	3700 kWh/a
Vier Personen	3000 kWh/a	4000 kWh/a
Mehr als vier Personen	3500 kWh/a	5000 kWh/a

Installation

Ferner lässt sich über die häufigsten Installationsformen die Systemneigung voreinstellen. Wird das System an der Hausfassade oder am Balkon installiert, beträgt der Neigungswinkel des Systems in der Regel 90°. Wird das System hingegen im Garten aufgeständert, wird in der Berechnung von einem Neigungswinkel von 30° ausgegangen. Für die Installation auf dem Gebäudedach wird mit einer Neigung von 45° gerechnet. Eine individuelle Auswahl der Ausrichtung und Neigung ist ebenfalls möglich.

Darüber hinaus ermöglicht der Stecker-Solar-Simulator die Abschätzung der energetischen und ökonomischen Kenngrößen unter Berücksichtigung von verschiedenen Verschattungssituationen. Dafür wurde die vereinfachte Annahme getroffen, dass je nach Verschattungsgrad (leichte-, mittlere-, starke Verschattung) die Direktstrahlung bis zu einer bestimmten Sonnenhöhe (25°, 35°, 45°) unberücksichtigt bleibt. Dies kann vereinfacht mit einer verschattenden Mauer bzw. einem gegenüberliegenden Gebäuden vor dem Steckersolargerät verglichen werden, siehe Abbildung 2. Vereinfacht gesagt: Je höher die verschattende Wand, desto später trifft die direkte Sonnenstrahlung auf das Solarsystem. Insbesondere im urbanen Raum ist dieser Effekt häufig zu beobachten. Selbstverständlich ist der Winkel des Verschattungsobjektes neben der relativen Höhe auch von dessen Entfernung abhängig.

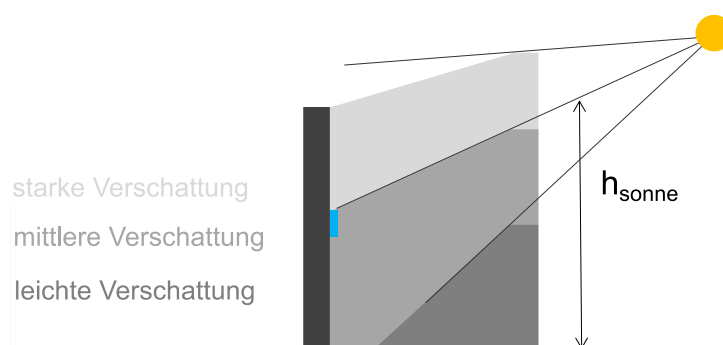
**Abbildung 2** Vereinfachte Darstellung der umgesetzten Verschattungsstrategie.

Abbildung 3 stellt die Sonnenhöhe (oben) und die Gleichstromleistung (DC, unten) für die unverschattete (gelb) und stark verschattete Situation (grün) gegenüber. Auf der linken Seite ist der Jahresverlauf der beiden Größen zu sehen und auf der rechten Seite die Tagesgänge von vier exemplarischen Tagen. In den Wintermonaten wird aufgrund der geringen Sonnenhöhe selbst zur Mittagszeit lediglich das unverschattete PV-Modul die gesamte potenzielle Leistung ausschöpfen. Die Erzeugung des stark verschatteten Systems ist vom diffusen Anteil der

Strahlung geprägt. Zwischen April und September überschreitet die Sonnenhöhe tageszeitabhängig den gewählten Grenzwert für starke Verschattung von 45° und der direkte Anteil der Strahlung wirkt sich zusätzlich auf die Höhe der Leistungsabgabe des PV-Generators aus.

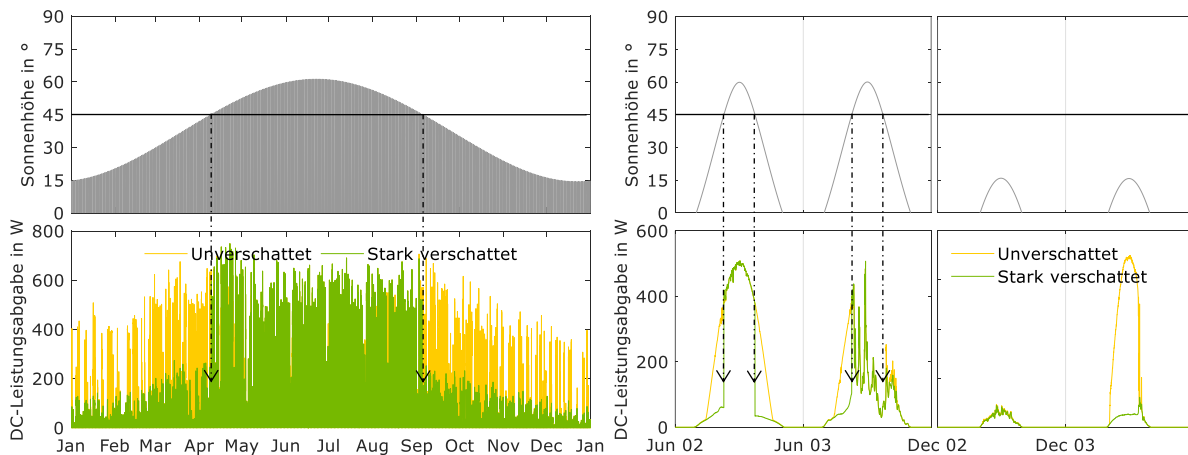


Abbildung 3 Gegenüberstellung der Sonnenhöhe und DC-Leistungsabgabe des PV-Generators (600 Wp) im unverschatteten und stark verschatteten Fall.

Um weiterhin die weitgehend freie, zeitlich unverzögerte Bedienbarkeit der Anwendung gewährleisten zu können, wurde der Verschattungsfaktor f_{shade} bestimmt. Dieser beschreibt das Verhältnis aus dem verschatteten zum unverschatteten Direktverbrauch (vgl. „Verallgemeinerung der Simulationsergebnisse“, im Dokument). Er kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wobei 0 einer absoluten Verschattung und 1 einem unverschatteten System entspricht. Der Faktor wurde über eine Regressionsanalyse mit folgender Funktion in Abhängigkeit der Jahresstrombedarfs E_L bestimmt:

$$f_{\text{shade}} = x \cdot E_L^y \quad (1)$$

Die Parameter x und y variieren mit dem Verschattungsgrad, sowie mit den oben genannten Einflussfaktoren.

Der resultierende Direktverbrauch ergibt sich abschließend aus dem Produkt des unverschatteten Direktverbrauch $E_{\text{PV}S2L}$ und dem Verschattungsfaktor f_{shade} .

Ökonomische Parameter

Abbildung 4 stellt die Bruttoangebotskosten der Steckersolargeräte mit einer Kostenfunktion für den untersuchten Bereich von 400 Wp bis 2000 Wp dar. Die standardmäßig hinterlegte Kostenfunktion ergibt sich vereinfacht aus einer linearen Regression der Angebotsdaten der Marktübersicht von Steckersolargeräten der Webseite MachDeinenStrom.de [10].

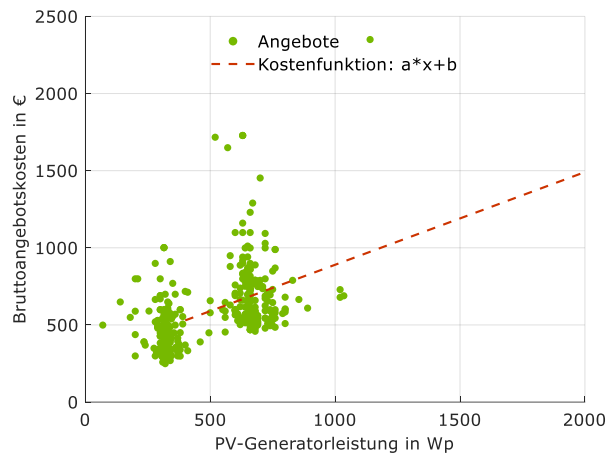


Abbildung 4 Bruttoangebotspreise der Steckersolargeräte in Abhängigkeit von der PV-Generatorleistung (Daten: <https://machdeinenstrom.de/mini-solar-ranking/>[10]).

Die Investitionskosten I_{SSG} der Steckersolargeräte werden in Abhängigkeit der PV-Generatorleistung P_{PVG} und der Wechselrichterleistung P_{WR} berechnet und sind in einer Kostenfunktion hinterlegt. Es wurde die vereinfachte Annahme getroffen, dass die Kosten für den Wechselrichter ein Drittel der Gesamtkosten betragen. Die Investitionskosten sind wie folgt definiert:

$$I_{SSG} = (0,6 \cdot P_{PVG} + 289,2) \cdot \frac{2}{3} + (0,6 \cdot P_{WR} + 289,2) \cdot \frac{1}{3} \quad (2)$$

Sofern die Investitionskosten für das Steckersolargerät nicht individuell angepasst werden, folgen die Kosten dem oben dargestellten Verlauf. 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].

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

Sollen ggf. anfallende Ersatzkosten im variablen Betrachtungszeitraum berücksichtigt werden, müssen weitere Annahmen getroffen werden. Die absoluten Kosten des Wechselrichters variieren in Abhängigkeit von dessen Leistung sowie je nach Hersteller. Für diese Untersuchung werden sie vereinfacht mit einem Drittel der Investitionskosten abgeschätzt [3]. Während für diese Untersuchung angenommen wurde, dass der Mikrowechselrichter nach 15 Betriebsjahren ersetzt wird, erfolgt ein Tausch des steckbaren Batteriesystems bereits nach 10 Jahren. Mit dem weiteren PV- und Speicherausbau wird aufgrund von Lernkurven und Skaleneffekten eine weitere Senkung der Produktionskosten erwartet [12]. Aufgrund dessen werden lediglich 75 % der ursprünglichen Investitionskosten für die Ersatzkosten veranschlagt. Ein Zeitersatzwert zum Ende des Betrachtungszeitraums wird nicht berücksichtigt.

In den Basiseinstellungen wurde zudem von einem aktuellen Arbeitspreis von 29 ct/kWh ausgegangen und keine zukünftige Änderung des Strompreises berücksichtigt. Der Betrachtungszeitraum beträgt in der Standardkonfiguration 15 Jahre und wurde auf 20 Jahre begrenzt. An dieser Stelle sei allerdings darauf hingewiesen, dass aus heutiger Sicht nichts gegen einen längeren Betrieb des Steckersolargeräts zur Eigenversorgung spricht.

Sofern eine Systemleistung eingegeben wird, die nicht zuvor simuliert worden ist (vgl. Tabelle 1) wird zwischen den Ergebnissen der nächstgrößeren bzw. -kleineren linear interpoliert.

Verallgemeinerung der Simulationsergebnisse

Die konkreten Ergebnisse der Analyse sind jeweils abhängig vom Direktverbrauch (vermiedener Netzbezug), welcher aus der Simulation ermittelt wurde, siehe Abbildung 5. Um die Eingabe des individuellen Strombedarfs ermöglichen zu können, wurde mithilfe einer Regressionsanalyse über folgende Funktion der Direktverbrauch E_{PVS2L} in Abhängigkeit des Strombedarfs E_L modelliert.

$$E_{PVS2L} = s \cdot e^{-u \cdot E_L} + v \cdot e^{-w \cdot E_L} \quad (3)$$

Die Parameter s , u , v , w variieren demnach in Abhängigkeit der oben genannten Einflussgrößen.

Abbildung 5 stellt beispielhaft den vermiedenen Netzbezug in Abhängigkeit von dem jährlichen Strombedarf für zwei Varianten dar. Die erste Variante ohne Batteriespeicher hat einen um 35° geneigten und südlichen ausgerichteten PV-Generator mit einer Nennleistung von 600 Wp. Bei der zweiten Variante ist der 1000-Wp-PV-Generator mit einem PV-Wechselrichter von 800 W kombiniert, an einer Südfassade montiert und zusätzlich mit einem 1000-Wh-Batteriespeicher ausgestattet. Hierbei entsprechen die Punkte den Simulationsergebnissen und die Linien der Regressionsanalyse.

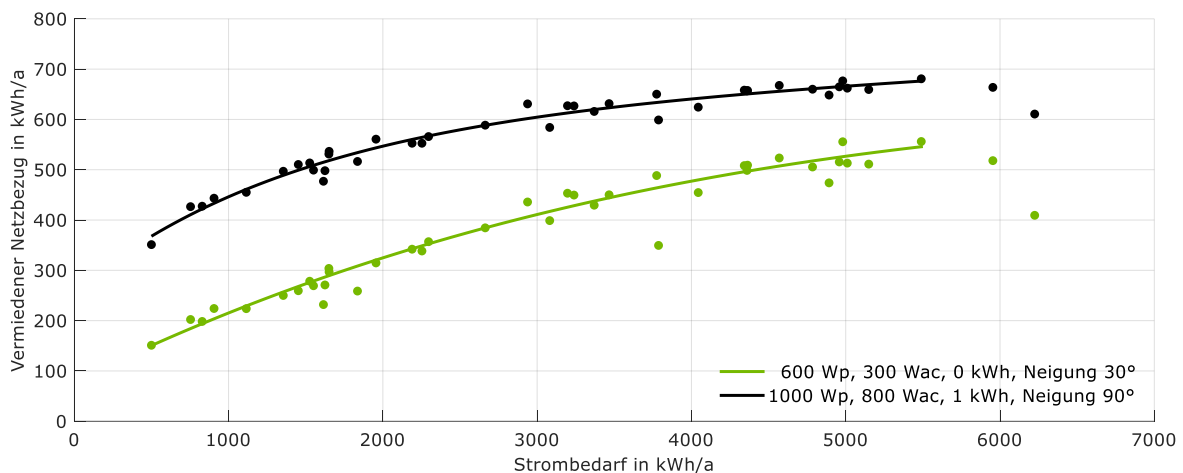


Abbildung 5 Beispielhafte Regressionsanalyse des Autarkiegrads in Abhängigkeit von der PV-Generatorleistung, der Speicherkapazität und der Neigung der Systemkonfiguration bei einer südlichen Ausrichtung.

6 Ausgabegrößen

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

Vermiedener Netzbezug: Der vermiedene Netzbezug beschreibt den Strombedarf der Verbraucher, der direkt durch das Steckersolargerät bzw. durch die Batterieentladung gedeckt werden kann. Netzbezug kann damit verringert werden.

Nutzungsgrad: Diese Kenngröße beschreibt den Anteil der Solarstromerzeugung, der zum Laden der Batterie bzw. zur Deckung der Verbraucher direkt genutzt werden kann.

Autarkiegrad: Der Autarkiegrad auch Eigenversorgung bildet sich aus dem Verhältnis des vermiedenen Netzbezugs zum elektrischen Strombedarf des betrachteten Haushalts.

Ersparnis während der Betriebszeit: Jährliche Ersparnis multipliziert mit der Betriebszeit. Abweichungen aufgrund von Rundungen möglich.

Bilanz nach Betrachtungszeitraum: Ersparnis während der Betriebszeit abzüglich der anfänglichen Investition (Solarsystemkosten).

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

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

CO₂-Einsparungen: Die persönlichen CO₂-Einsparungen über den gesamten Betrachtungszeitraum (z. B. 15 Jahre) ergeben sich aus dem vermiedenen Netzbezug und dem spezifischen deutschen, prognostizierten mittleren CO₂-Emissionsfaktor.

7 Danksagung

Die Web-Anwendung „Stecker-Solar-Simulator“ wurde von der Forschungsgruppe Solarspeichersysteme der HTW Berlin 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. Ein besonderer Dank gilt zudem Christian Ofenhäusle für die Unterstützung bei der Akquise und den zahlreichen Betreiber:innen von Stecker-Speicher-Geräten, die der Forschungsgruppe Messdaten ihrer Systeme zur Verfügung gestellt haben.

Literaturverzeichnis

- [1] WENIGER, JOHANNES ; BERGNER, JOSEPH ; TJADEN, TJARKO ; QUASCHNING, VOLKER: *Dezentrale Solarstromspeicher für die Energiewende*. 1. Berlin : Berliner Wissenschafts-Verlag, 2015 – 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] BÖING, FELIX ; REGETT, ANIKA: Hourly CO₂ Emission Factors and Marginal Costs of Energy Carriers in Future Multi-Energy Systems. In: *Energies* Bd. 12 (2019), Nr. 12, S. 2260
- [6] KLUCHER, T. M.: Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. In: *Solar Energy* Bd. 23 (1979), S. 111–114
- [7] 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
- [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] CHRISTIAN OFENHÄUSLE: *Das MachDeinenStrom.de Mini-Solar-Ranking 2021*. URL <https://machdeinenstrom.de/mini-solar-ranking/>. – abgerufen am 2022-04-26. – MachDeinenStrom.de
- [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