



**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

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
3.3	CO ₂ -Emissionsfaktoren	2
4	SYSTEMKOMPONENTEN	3
4.1	Stecker-Solar-Gerät	3
4.2	Batteriesystem	4
5	RAHMENBEDINGUNGEN	4
6	DANKSAGUNG	7
	LITERATURVERZEICHNIS	8

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 Teilhabe an dem Generationenprojekt Energiewende.

Die Web-App: Stecker-Solar-Simulator hilft dabei den Nutzen von Stecker-Solar-Geräten 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 Planungstool 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 1,3 Mio. unterschiedlichen Systemkonfigurationen. Das Systemverhalten der einzelnen Konfigurationen wurde mit 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
Speicherkapazität in Wh	0	1500	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

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 $1062 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. Die Messwerte der Global- und Diffusbestrahlungsstärke wurden zur Bestimmung der Bestrahlungsstärke auf der geneigten PV-Generatorebene genutzt, siehe 3.1. Auf Basis der Messwerte der Lufttemperatur wurde die Effizienz des PV-Generators ermittelt. Die mittlere Lufttemperatur betrug am Standort Lindenberg im Jahr 2017 ca. $10 \text{ }^\circ\text{C}$.

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 Haushaltlastprofile deutlich voneinander unterscheiden. Um diese Unterschiede im Verbrauchsverhalten zu berücksichtigen, liegen der Anwendung insgesamt 41 gemessene Jahreslastprofile zu Grunde, vgl. auch Abbildung 2. 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 2 stellt die angenommene Dekarbonisierung des Stromsektors nach Böing et al. [5] dar.

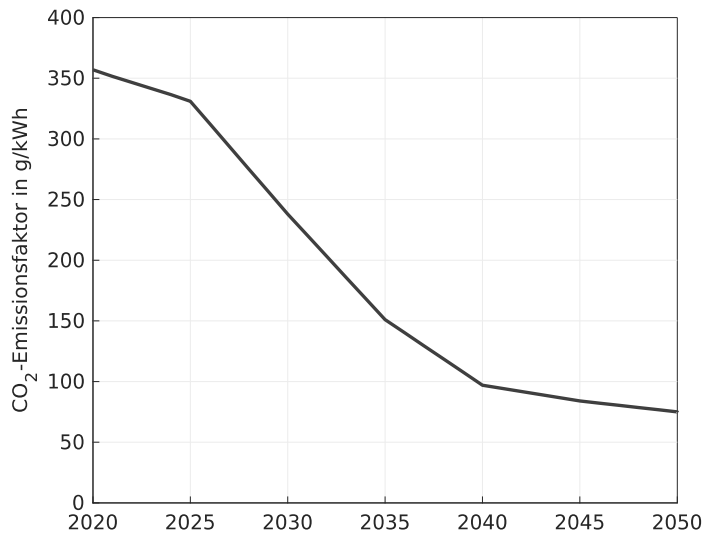


Abbildung 1 Berücksichtigte mittlere CO₂-Emissionsfaktoren nach [5].

4 Systemkomponenten

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

4.1 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 des PV-Wechselrichters durch die resultierende Verlustleistung abzubilden. Die Leistungsabhängigkeit der Verlustleistung wird dabei durch eine quadratische Gleichung approximiert. Beim PV-Wechselrichter dient der Wirkungsgradverlauf des AEConversion INV250-45EU als Grundlage (entnommen aus PV*SOL). Die Nennleistung des PV-Wechselrichters ist an die Größe des PV-Generators gekoppelt und beträgt 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 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-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. 2). 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 2 stellt beispielhaft den Autarkiegrad in Abhängigkeit von dem 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, an einer Südfassade montiert und zusätzlich mit einem 500-Wh-Batteriespeicher kombiniert.

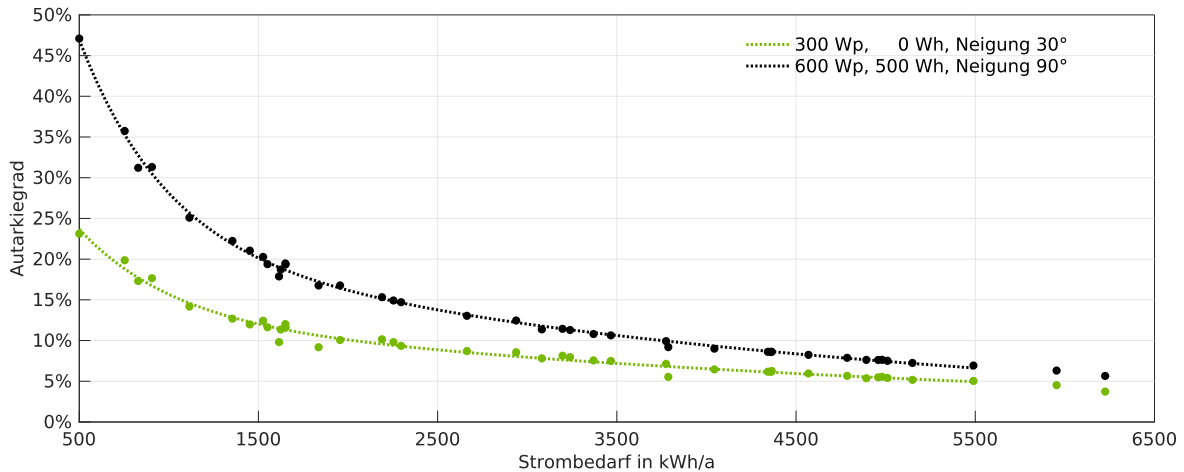


Abbildung 2 Beispielhafte Regressionsanalyse des Autarkiegrads in Abhängigkeit von der PV-Generatorleistung, der Speicherkapazität und der Neigung der Systemkonfiguration bei einer südlicher Ausrichtung.

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]:

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

Abbildung 3 stellt die Bruttoangebotskosten der Stecker-Solar-Geräte mit der Kostenfunktion für den untersuchten Bereich von 100 Wp bis 700 Wp dar.

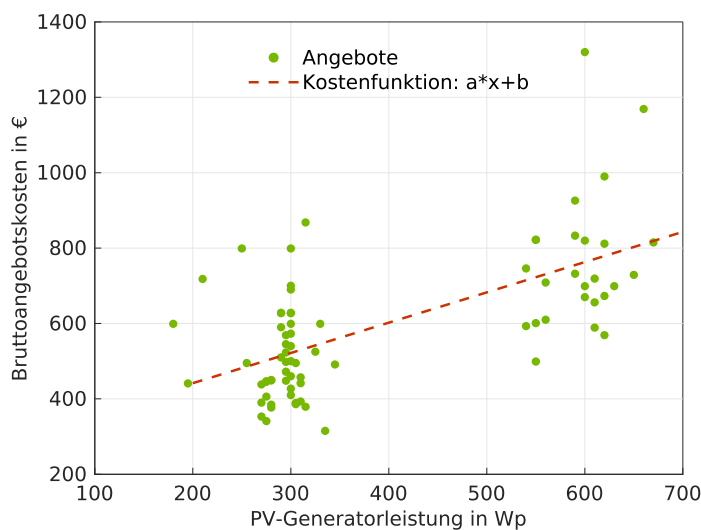


Abbildung 3 Bruttoangebotspreise der Stecker-Solar-Geräte in Abhängigkeit von der wählbaren PV-Generatorleistung (Daten: <https://www.pvplug.de/marktuebersicht/> [9]).

Sofern die Investitionskosten für das Stecker-Solar-Gerät 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 Leistungsabnahme 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 33 % 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.

Vor dem Hintergrund einer möglichst einfachen und intuitiven Bedienbarkeit lässt sich zum einen 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 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 3500 kWh/a ausgegangen. In Einfamilienhäusern sind die Strombedarfe tendenziell höher und ergeben sich unter identischer Reihenfolge zu: 2500 kWh/a, 3000 kWh/a, 3700 kWh/a, 4000 kWh/a, 5000 kWh/a. Strom zur Warmwasseraufbereitung wird dabei nicht berücksichtigt. Zum anderen 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, Neigung oder des Strombedarfs ist möglich.

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 Stecker-Solar-Geräts 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.

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

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

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

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 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 ergeben sich aus dem vermiedenen Netzbezug und dem spezifischen deutschen, prognostizierten mittleren CO₂-Emissionsfaktor.

6 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 den zahlreichen Betreiber:innen von Stecker-Speicher-Geräten, die der Forschungsgruppe Messdaten ihrer Systeme zur Verfügung gestellt haben sowie Christian Ofenhäusle für die Unterstützung bei der Akquise.

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] 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 gGMBH: *Stromspiegel für Deutschland 2019* (Broschüre). Berlin : co2online gGmbH, 2019