

Projektarbeit

Analyse der Feldmessdaten von mehreren hundert Photovoltaik-Batteriespeichersystemen in deutschen Eigenheimen

B. Sc. Lucas Meissner (574546)

Wintersemester 2023/2024

HTW Berlin - Fachbereich 1

Regenerative Energien

Abgabe am 02.04.2024

Betreuung durch:

M. Sc. Nico Orth

Prof. Dr.-Ing. Volker Quaschnig

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	3
2	DATENGRUNDLAGE	4
2.1	Qualität der Daten	4
2.2	Verfügbare Datenpunkte	6
3	AUSWERTUNG DER FELDMESSDATEN	7
3.1	Autarkiegrade mit PV-Anlage	7
3.2	Autarkiegrade mit PV-Anlage und Batteriespeicher	8
4	DISKUSSION DER ERGEBNISSE	14
5	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	15
	ANHANG	17
	ABKÜRZUNGS- UND SYMBOLVERZEICHNIS	18
	LITERATURVERZEICHNIS.....	19

1 Einleitung

Die Klimakrise stellt für die Menschheit eine der größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts dar. Vor allem durch steigende durchschnittliche Temperaturen, häufigere Extremwetterereignisse und einem deutlichen Rückgang der Biodiversität werden die Auswirkungen des anthropogenen Klimawandels von Jahr zu Jahr deutlicher [1]. Um dieser globalen Bedrohung entgegenzuwirken, hat sich ein Großteil der Länder der Welt auf eine Abkehr von fossilen Energieträgern geeinigt [2]. Dabei hat sich vor allem in Deutschland das Wort „Energiewende“ etabliert, welches das zentrale politische und gesellschaftliche Ziel beschreibt, die zukünftige Energieversorgung der deutschen Bundesrepublik klimaneutral zu gestalten. Im Rahmen dieses Paradigmenwechsels spielen die Solar- und Windenergiebranche zwei fundamentale Säulen der zukünftigen emissionsfreien Energieerzeugung. Neben einem massiven Ausbau der Photovoltaik (PV) und Windenergieerzeugung muss die überschüssige Energie in Zeiten hoher erneuerbarer Erzeugung für Zeiträume ohne Sonne und Wind zwischengespeichert werden.

Insbesondere im Segment der Ein- und Zweifamilienhäuser hat sich in den letzten Jahren ein rasantes Wachstum der PV-Anlagen und Batteriespeichersysteme entwickelt. Im Jahr 2023 wurden mehr als 675 Tsd. PV-Anlagen im Bereich zwischen 2 kW und 20 kW gebaut und 530 Tsd. Batteriespeichersysteme mit bis zu 20 kWh Speicherkapazität [3]. Mit dieser Technologiekombination ist es Haushalten möglich, sich vom öffentlichen Stromnetz teilweise autark zu machen und so die bundesweiten Emissionen spürbar zu senken.

Die bilanzielle Simulation der Energieflüsse von Haushalten in Abhängigkeit des Jahresstromverbrauchs, der installierten Leistung der PV-Anlage, der nominellen Speicherkapazität des Batteriespeichers und auch von verschiedenen Standardlastprofilen ist schon mehrfach von verschiedenen Instituten durchgeführt worden, siehe beispielsweise [4] und [5]. Die Analyse von Feldmessdaten ist bis dato aufgrund der schwachen Datengrundlage allerdings eher geringer ausgefallen. Arbeiten von Thierschmidt et. al., Messner et. al. und Figgner et. al. existieren, sind allerdings schon ein paar Jahre alt und haben teilweise andere Schwerpunkte als die Autarkiegradbetrachtung der Haushalte [6]. Vor allem aufgrund sinkender Kosten von Systemkomponenten und dynamischer Entwicklungen auf dem Markt für PV-Anlagen und Batteriespeicher zeigten sich innerhalb der letzten Jahre im Durchschnitt wachsende Leistungen und Speicherkapazitäten bei PV-Anlagen und Speichersystemen [7]. Dementsprechend stellen sich folgende Forschungsfragen, welche mithilfe der vorliegenden Feldmessdaten geklärt werden sollen:

- Welche typischen Anlagengrößen zeigen die untersuchten Haushalte insbesondere bei PV-Leistung und Batteriespeicherkapazität?
- Welche Autarkiegrade erreichen die Haushalte mit einer PV-Anlage und um welchen Faktor kann der zusätzliche Einsatz eines Batteriespeichers diesen Wert steigern?

2 Datengrundlage

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Perform“ der Forschungsgruppe Solarspeichersysteme und auf gesonderte Anfrage haben die Unternehmen Kostal und Eigensonne eine Vielzahl an Datensätzen von Eigenheimen mit Photovoltaik-Anlage und Batteriespeichersystem anonymisiert zur Verfügung gestellt. Dabei sind Datensätze mit unterschiedlichen Hintergründen für dieses Arbeitspaket verfügbar:

- Monitoringportaldaten von 20 Haushalten,
- Tagesdaten von 918 Haushalten.

Aufgrund des erheblichen Aufwands des Datenimports (siehe Kapitel 2.1) wird in dieser Arbeit der Fokus auf die Analyse der Tagesdatensätze von über 900 Systemen gesetzt. Diese Datensätze stammen von Eigensonne-Kund*innen, welche einen Wechselrichter von Kostal und einen damit kompatiblen Batteriespeicher installiert haben. Bei einer Vielzahl der untersuchten Datensätze handelt es sich dabei um einen Batteriespeicher der Firma BYD.

2.1 Qualität der Daten

Die Sichtung der Datensätze lässt auch bei diesen über 900 Datensätzen mit gleichem Hintergrund verschiedene Strukturen erkennen. Dadurch sind der Import und die Aufbereitung dieser hohen Anzahl an Datensätzen erheblich aufwendiger. Die Daten liegen im JSON-Dateiformat vor. Dieses kompakte Dateiformat, welches aus der JavaScript-Umgebung kommt, beinhaltet Daten in einfach lesbarer Textform. Allerdings ist der Import mit Matlab im Vergleich zu Microsoft Visual Studio oder Python relativ aufwendig. Die Funktion **jsondecode** wird genutzt, um die Daten in Kombination mit der Funktion **fileread** zu importieren. Anschließend liegt der damit importierte Datensatz als struct-Datentyp vor. Der auffälligste Unterschied zwischen den Datensätzen ist der Zeitraum, den die Datenreihen abdecken bzw. die Länge der Datensätze:

- 493 Datensätze vom 01.01.2023 bis zum 30.06.2023.
- 136 Datensätze vom 01.01.2022 bis zum 31.12.2022.
- 112 Datensätze vom 01.01.2021 bis zum 31.12.2022.
- 177 Datensätze mit unterschiedlichen Zeiträumen.

Für eine aussagekräftige Analyse der erreichten Autarkie der Eigenheime ist die Untersuchung eines ganzen Betriebsjahres sinnvoll [8]. Dementsprechend fallen die Datensätze, welche weniger als ein ganzes Betriebsjahr darstellen, aus der Analyse heraus. Übrig bleiben die 136 Datensätze des Betriebsjahres 2022 und die 112 Datensätze der Betriebsjahre 2021 und 2022. Um eine möglichst hohe Anzahl von Datensätzen zu untersuchen, wird der Fokus der Analyse auf das Betriebsjahr 2022 gelegt. Von den 248 Datensätzen fallen weitere 10 Datensätze weg, da es sich dabei anscheinend um Systeme ohne Batteriespeicher handelt oder keine Daten zu den Energiesummen bezüglich der Batterie vorliegen. Die restlichen 238 Datensätze führen die installierte nominale PV-Leistung auf, jedoch nicht die installierte Batteriespeicherkapazität.

Durch eine Rücksprache mit den Unternehmen konnten 116 dieser Datensätze mithilfe der Kostal-ID zugeordnet werden. Bei der weiteren Analyse entfallen weitere 6 Systeme aufgrund von einer der folgenden Gründe:

- Die PV-Anlage und/oder der Batteriespeicher ist nicht seit Anfang des Betriebszeitraums „aktiv“, was auf eine Installation im Laufe von 2022 schließen lässt. Da diese Systeme kein volles Betriebsjahr abdecken, würden sie das Ergebnis verfälschen.
- Bei der Berechnung des Autarkiegrades mit unterschiedlichen Vorgehensweisen ergeben sich nicht vernachlässigbare Abweichungen, was die Vermutung nahe legt, dass einzelne Energiesummen fehlerbehaftet sind. Die Datensätze mit nicht plausiblen Abweichungen entfallen ebenfalls aus der folgenden Analyse, um die Ergebnisse nicht zu verfälschen.

Somit bleiben **110 Datensätze** für die anschließenden Analysen übrig. Das eben beschriebene Vorgehen bzw. die Aussortierung der Datensätze ist schematisch in Bild 1 dargestellt. Bei der Sichtung der 110 Datensätze sind folgende weitere Besonderheiten aufgefallen:

- 86 Datensätze haben eine Lücke in den PV-Erzeugungs-Energiesummen die mehrere Monate lang ist. Da die Autarkiegrade auch über die PV-Direktversorgung bestimmt werden können, kann diese Datenlücke umgangen werden. Aufgrund der Länge der Lücken können diese nicht sinnvoll interpoliert bzw. gefüllt werden. Eine Vernachlässigung dieser Datensätze ist keine Option, da die Anzahl der verfügbaren Haushalte für die Analyse dann um fast 75 % sinken würde.
- Einige der Haushalte besitzen neben PV-Anlage und Batteriespeichersystem vermutlich ein Elektroauto bzw. eine Wallbox und/oder eine Wärmepumpe. Vor allem Haushalte mit Wärmepumpe haben tendenziell deutlich höhere Verbräuche in den Wintermonaten. Da die Datensätze allerdings eine sehr niedrige Auflösung (tageweise) haben und keine Informationen zu Wallbox/Elektroauto/Wärmepumpe gegeben sind, werden zu diesem Punkt im Folgenden keine gesonderten Analysen durchgeführt.

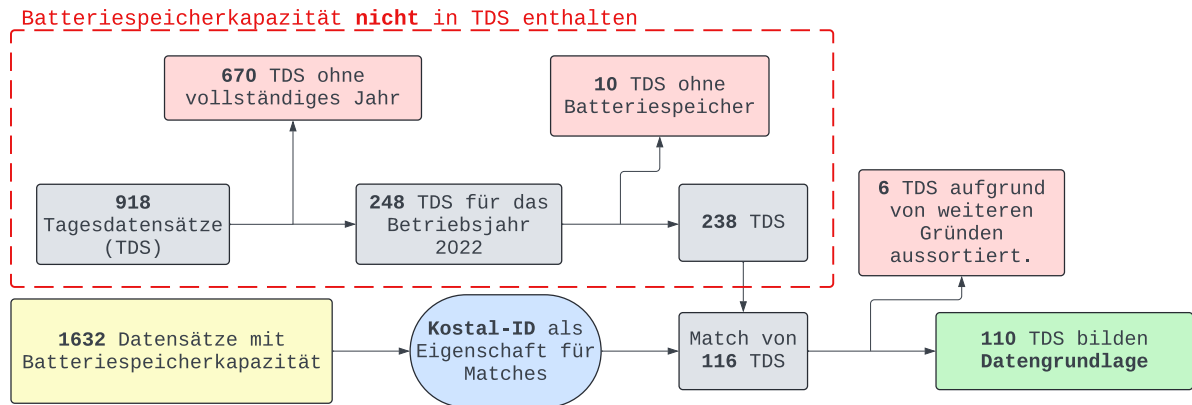


Bild 1 Schematisches Flussdiagramm zur Datengrundlage der Projektarbeit.

2.2 Verfügbare Datenpunkte

Die verbliebenen 110 Datensätze mit Tagesenergiesummen für das Betriebsjahr 2022 enthalten folgende Datenpunkte bzw. Energiesummen:

- E_L – Elektrischer Energieverbrauch in kWh/d
- $E_{PV_INV_DC}$ – DC-Energieabgabe des PV-Systems in kWh/d
- E_{PV_cons} – PV-Direktversorgung in kWh/d
- $E_{BAT_out_DC}$ – DC-Energieabgabe des Batteriesystems in kWh/d
- E_{BAT_cons} – Batterieversorgung in kWh/d
- E_{grid_cons} – Netzbezug in kWh/d
- E_{own_cons} – Eigenverbrauch in kWh/d

Zusätzlich dazu beinhalten alle Datensätze eine Kostal-ID, die nominale installierte Leistung des PV-Generators, die nominale installierte Speicherkapazität des Batteriespeichersystems, die Neigung und das Installationsdatum der PV-Anlage und eine Statusangabe, ob die Anlage aktiv ist. Bei letzterer Information ist nicht klar, ob es sich um die PV-Anlage, den Batteriespeicher oder beides handelt.

3 Auswertung der Feldmessdaten

Im ersten Schritt werden die Betriebsergebnisse der PV-Anlagen **ohne Batteriespeicher** verglichen. Dafür wird das Verhältnis der zeitgleich direkt verbrauchten PV-Energie zum Haushaltsstrombedarf auf Basis der täglichen Energiesummen bestimmt. Dieses Vorgehen ist vorteilhaft, damit später die Autarkiegradsteigerung durch den Einsatz eines Batteriespeichers bestimmt werden kann. Das beschriebene Vorgehen, um den jahresmittleren Autarkiegrad zu bestimmen ist in folgender Formel dargestellt:

$$a_{PV} = \frac{\sum E_{PV,cons}}{\sum E_L} \quad (3.1)$$

3.1 Autarkiegrade mit PV-Anlage

Der Autarkiegrad eines Haushalts hängt von zahlreichen Faktoren ab, unter anderem von der installierten PV-Leistung, dem jährlichen Stromverbrauch und dem Lastprofil des Haushalts. In Bild 2 sind die auf Basis der Jahresenergiesummen ermittelten Autarkiegrade der untersuchten Haushalte in Abhängigkeit von der **nominalen Leistung der PV-Anlage** dargestellt. Die PV-Leistung der analysierten Systeme liegt zwischen 4,8 kW und 13 kW, der Median liegt bei 8,4 kW. Die untersuchten Haushalte erreichen ohne Batteriespeicher Autarkiegrade zwischen 19 % und 61 %. Im Mittel decken sie ihren jährlichen Strombedarf zu 40 % durch eigens erzeugten Solarstrom. Den höchsten Autarkiegrad erreicht ein Haushalt mit einer 7,3-kW-PV-Anlage. Allerdings sind die Betriebsdaten von einer großen Streuung geprägt: Beispielsweise erreicht ein Haushalt mit einer ähnlichen PV-Leistung einen Autarkiegrad von lediglich 26 %. Allein aus der Größe der PV-Anlage eines Haushalts lassen sich folglich keine Rückschlüsse zur Höhe des erreichbaren Autarkiegrades ziehen.

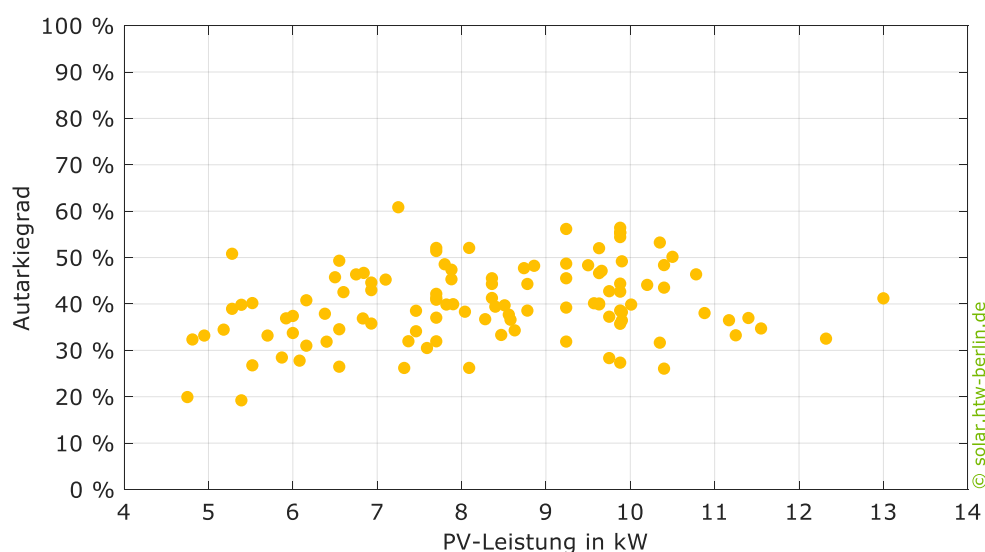


Bild 2 Autarkiegrade von 110 Haushalten mit PV-Anlage in Abhängigkeit von der installierten Leistung des PV-Generators (Daten: Eigensonne, Kostal).

Bild 3 visualisiert die Abhängigkeit des Autarkiegrades vom **jährlichen Haushaltsstromverbrauch**. Die untersuchten Haushalte verbrauchten im Jahr 2022 zwischen 2333 kWh und 10 583 kWh. Der Median liegt bei 4882 kWh. Im Mittel sinkt der Autarkiegrad der untersuchten Haushalte bei steigendem Stromverbrauch um 2,2 Prozentpunkte je 1000 kWh/a. Wie zu erwarten, ist allerdings auch hier eine hohe Varianz der Ergebnisse erkennbar: So erreicht der Haushalt mit dem geringsten Stromverbrauch einen Autarkiegrad von 46 % - ebenso wie ein Haushalt mit einem Stromverbrauch von 5318 kWh/a, welcher mehr als doppelt so hoch ist.

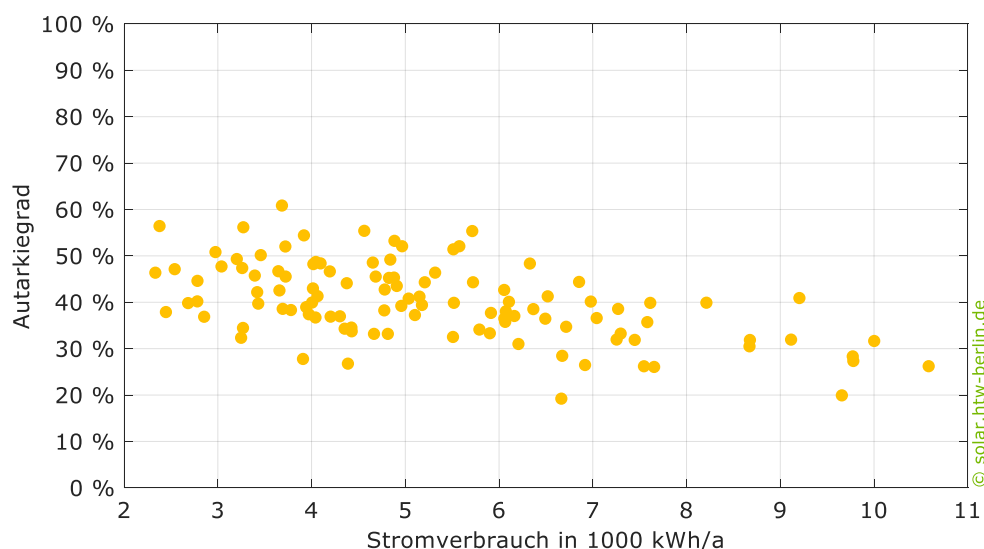


Bild 3 Autarkiegrade von 110 Haushalten mit Photovoltaik-Anlage in Abhängigkeit von dem individuellen jährlichen Haushaltsstromverbrauch (Daten: Eigensonne, Kostal).

3.2 Autarkiegrade mit PV-Anlage und Batteriespeicher

Ein Batteriespeicher kann den tagsüber überschüssig erzeugten Solarstrom speichern und in der Nacht oder bei ungenügender PV-Erzeugung wieder abgeben. Batteriespeicher dienen somit dem Ausgleich des täglichen Erzeugungs- und Bedarfsüberschusses, fungieren jedoch nicht als saisonale Stromspeicher. Je nach Anwendungsfall bzw. Wunsch des/der Endkund*in kann der Batteriespeicher auch größer dimensioniert werden, allerdings sinkt dadurch der zusätzliche Nutzen im Hinblick auf die erreichbare Autarkie. Sobald der Speicher groß genug ist, um den nächtlichen Haushaltsstrombedarf zu decken, bringt eine Steigerung der Kapazität immer weniger.

Um die Autarkiegrade der Haushalte mit PV-Anlage und Speichersystem zu ermitteln, wird die Summe aus den Energiesummen für das Jahr 2022 des direkten PV-Energieverbrauchs und der Batterieversorgung gebildet und diese anschließend in das Verhältnis zum elektrischen Jahresstromverbrauch gesetzt. Das beschriebene Vorgehen ist in folgender Formel abgebildet:

$$a_{\text{PV_BAT}} = \frac{\sum E_{\text{PV_cons}} + \sum E_{\text{BAT_cons}}}{\sum E_{\text{L}}} \quad (3.2)$$

Bild 4 stellt die Autarkiegrade der untersuchten Haushalte mit und ohne Batteriespeicher in Abhängigkeit der installierten PV-Leistung gegenüber. Dabei befinden sich Batteriespeicher mit nutzbaren Speicherkapazitäten von 4,9 kWh bis 9,7 kWh in den Haushalten. Der Median der installierten Speicherkapazität liegt bei 7,3 kWh. Die untersuchten Haushalte erreichen durch die Integration eines Stromspeichers Autarkiegrade zwischen 31 % und 95 %. Der Medianwert liegt bei 70 %, was bedeutet, dass die analysierten Haushalte durch die Verwendung einer Batterie nur noch 30 % ihres Strombedarfs aus dem öffentlichen Netz beziehen. Bei dieser Betrachtung lässt sich keine klare Relation zwischen PV-Leistung und Autarkiegrad erkennen. Vor allem in dieser Darstellung ist zu erkennen, dass zwei Größen der PV-Anlage besonders häufig unter den untersuchten Haushalten zu finden sind: 9,6 kW und 9,9 kW. Bei den Speicherkapazitäten ist dieses Verhalten noch stärker vertreten: 95 % der untersuchten Haushalte haben eine nutzbare Speicherkapazität, die entweder 4,9 kWh, 7,3 kWh oder 9,7 kWh beträgt. Dabei handelt es sich um verschiedene BYD-Batteriespeicher, welche bei den untersuchten Haushalten sehr dominant vertreten sind.

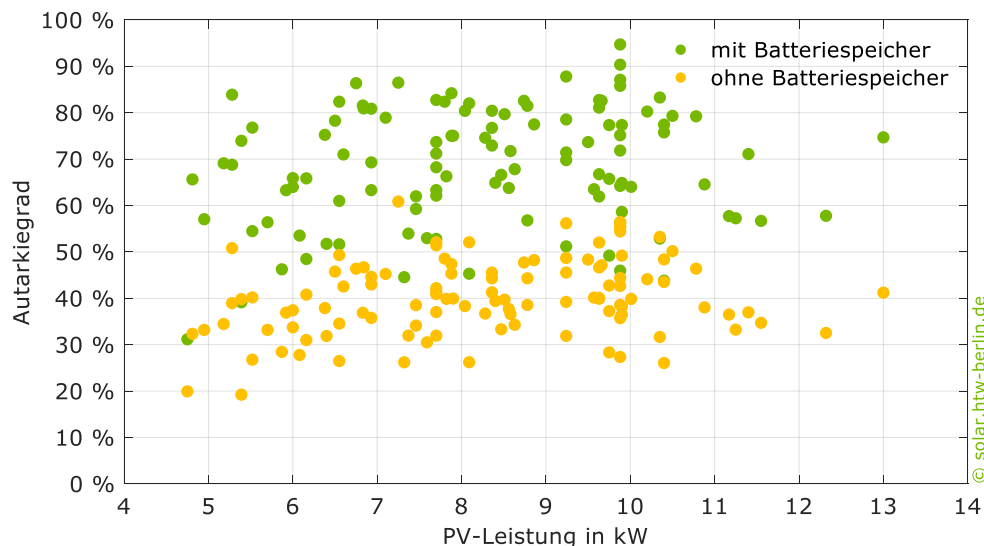


Bild 4 Autarkiegrade von 110 Haushalten mit PV-Speichersystem in Abhängigkeit von der installierten PV-Leistung (Daten: Eigensonne, Kostal).

Bild 5 stellt die Autarkiegrade der Haushalte in Abhängigkeit vom Jahresstromverbrauch dar. Die niedrigste Steigerung des Autarkiegrades durch den zusätzlichen Betrieb eines Batteriespeichers beträgt 11 Prozentpunkte. Dieser Wert resultiert in einem Haushalt mit einem hohen Stromverbrauch von 9657 kWh/a. Die zugehörige PV-Anlage mit einer Leistung von 4,8 kW sowie der Batteriespeicher mit einer nutzbaren Speicherkapazität von 4,9 kWh sind im Verhältnis zum Stromverbrauch eher klein dimensioniert. Ein anderer Haushalt erreicht bei einem jährlichen Strombedarf von 5700 kWh/a durch den Einsatz eines 9,7-kWh-Batteriespeichers den höchsten Autarkiegrad von fast 95 %. Seinen mittleren täglichen Strombedarf von 16 kWh deckt das Eigenheim fast vollständig durch die PV-Anlage und den Batteriespeicher. Der Haushalt bezieht im gesamten Jahr 2022 nur etwas mehr als 310 kWh aus dem öffentlichen Stromnetz.

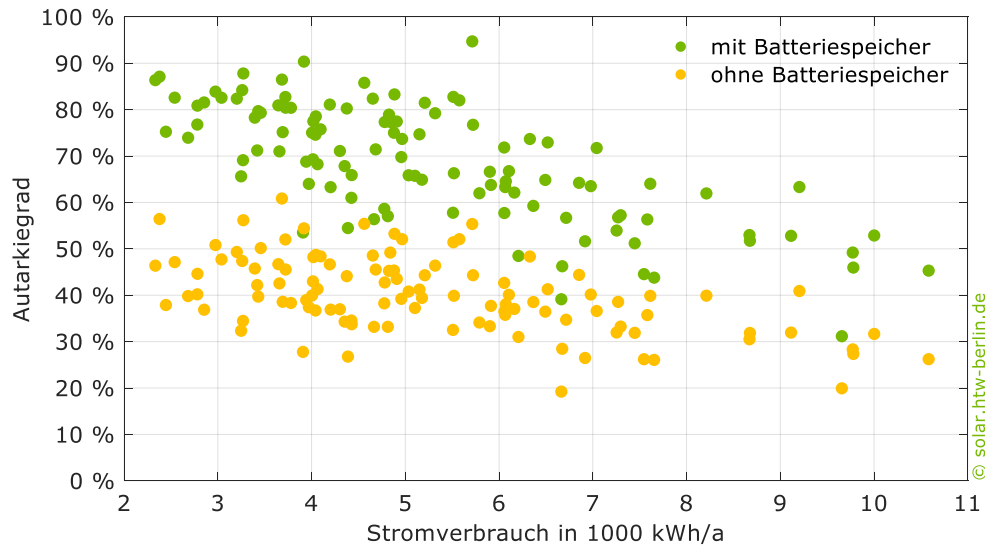


Bild 5 Autarkiegrade von 110 Haushalten mit PV-Speichersystem in Abhängigkeit von dem individuellen jährlichen Haushaltsstromverbrauch (Daten: Eigensonne, Kostal).

Bild 6 stellt die Häufigkeitsverteilung der Steigerung des Autarkiegrades der betrachteten Haushalte durch den Einsatz eines Batteriespeichers dar. Generell erhöht die Installation eines Batteriespeichers die solar-elektrische Eigenversorgung aller untersuchten Haushalte um etwa 30 Prozentpunkte, wie der Median der Betriebsdaten zeigt. Neben der zuvor erwähnten minimalen Zunahme von 11 Prozentpunkten beträgt die maximale Steigerung fast 45 Prozentpunkte. Dieser Haushalt hat einen Strombedarf von etwa 2900 kWh/a. Durch die Kombination aus PV-Anlage und einem 4,9-kWh-Batteriespeicher bezieht das Eigenheim nur noch 18 % seines Strombedarfs aus dem öffentlichen Netz. Von Anfang Mai bis Ende August kann sich der Haushalt fast vollständig autark versorgen. In diesem Zeitraum beträgt der Netzbezug lediglich 8 kWh. In den Sommermonaten Juni und Juli übersteigt die Direktversorgung der Last die Energie aus der Batterie. Im Januar und Dezember ist hingegen der Anteil der aus der Batterie gedeckten Last mehr als doppelt so hoch.

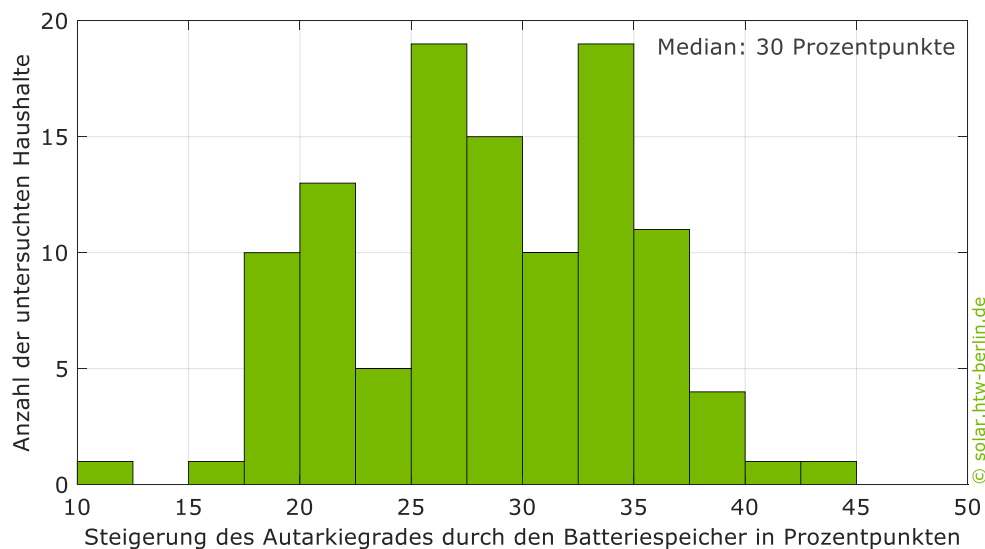


Bild 6 Häufigkeitsverteilung der Steigerung des Autarkiegrades durch den Einsatz eines Batteriespeichers in 110 Haushalten mit PV-Batteriespeichersystem (Daten: Eigensonne, Kostal. Klassenbreite: 2,5 Prozentpunkte).

Zur besseren Vergleichbarkeit der Betriebsergebnisse von PV-Batteriesystemen ist es empfehlenswert, die Nennleistung der PV-Anlage und die nutzbare Speicherkapazität auf den jährlichen Stromverbrauch zu normieren [9], [10]. Bild 7 stellt den Autarkiegrad der untersuchten Haushalte mit PV-Speichersystemen in Abhängigkeit von der auf den jährlichen Haushaltsstrombedarf normierten PV-Leistung dar. Dafür wurde das Verhältnis der individuellen PV-Leistung zu dem individuellen jährlichen Stromverbrauch der einzelnen Haushalte gebildet. Der Haushalt mit dem geringsten Autarkiegrad von knapp 31 % verbraucht 9657 kWh/a und hat eine 4,8-kW-PV-Anlage. Das **Verhältnis von PV-Leistung zu jährlichem Stromverbrauch** beträgt somit rund 0,5 kW je 1000 kWh. Tendenziell steigt der erreichbare Autarkiegrad, wenn das Verhältnis aus Leistung der PV-Anlage zu Stromverbrauch zunimmt. Ab einem Verhältnis von 1,5 kW je 1000 kWh steigt der Autarkiegrad jedoch immer langsamer an, was auch in anderen Untersuchungen deutlich wird [11]. Auch hier zeigen die Betriebsergebnisse bei der kombinierten Betrachtung von PV-Leistung und Jahresstromverbrauch eine hohe Abweichung: Das System mit dem größten Verhältnis aus PV-Leistung und Jahresstromverbrauch liegt bei knapp 2,9 kW je 1000 kWh/a - der Haushalt erreicht einen Autarkiegrad von 86 %. Denselben Eigenversorgungsanteil erreicht allerdings auch ein Haushalt mit einem Verhältnis von 1,9 kW je 1000 kWh/a. Dieser verbraucht von Mitte April bis Ende September täglich 10 kWh Strom. Aufgrund des wesentlich höheren Bedarfs im Sommer, welcher beispielsweise durch ein strombetriebenes Klimagerät aufgenommen kann, liegt der Jahresverbrauch knapp 900 kWh/a über dem Bedarf des anderen Haushalts. Dadurch entsteht bei einer ähnlichen PV-Leistung ein wesentlich niedrigeres Verhältnis zwischen PV-Leistung und jährlichem Stromverbrauch. Der hohe Direktverbrauch des Solarstroms im Sommer deckt zusammen mit dem Batteriespeicher die elektrische Last jedoch fast vollständig, sodass der Haushalt dennoch einen sehr hohen Autarkiegrad erreicht. Der Haushalt mit einem Verhältnis von 2,9 kW je 1000 kWh/a hat dementsprechend vor allem eine höhere Netzeinspeisung als der Haushalt mit dem Verhältnis von 1,9 kW je 1000 kWh/a.

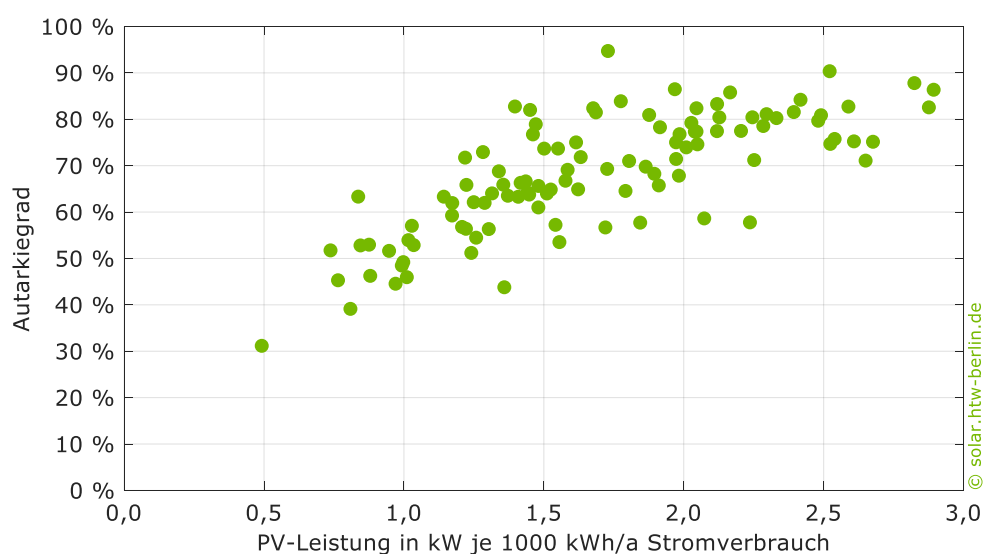


Bild 7 Autarkiegrade von 110 Haushalten mit PV-Speichersystem in Abhängigkeit von der auf den jährlichen Haushaltsstromverbrauch normierten PV-Leistung (Daten: Eigensonne, Kostal).

Im Bereich von 1,5 kW je 1000 kWh/a bis 2,0 kW je 1000 kWh/a ist die beobachtete Streuung der Betriebsergebnisse ebenfalls sehr hoch: Der niedrigste ermittelte Autarkiegrad liegt in diesem Bereich bei 53 %, wohingegen das System mit dem höchsten Autarkiegrad 95 % erreicht. Die Abweichungen in diesem Segment zeigen deutlich, wie stark die Betriebsergebnisse trotz ähnlichem Verhältnis von PV-Leistung zu Jahresstromverbrauch voneinander abweichen und unterstreicht die Relevanz einer sinnvollen Auslegung von PV-Anlage und Batteriespeicher.

Bild 8 stellt in Ergänzung zu Bild 7 den Autarkiegrad in Abhängigkeit von dem Verhältnis aus nutzbarer Speicherkapazität zu jährlichem Stromverbrauch dar. Das kleinste Verhältnis von 0,5 kWh je 1000 kWh/a hat der Haushalt mit dem geringsten Autarkiegrad. Das maximale **Verhältnis von Speicherkapazität zu Jahresstromverbrauch** beträgt hingegen fast 2,9 kWh je 1000 kWh/a. In dem zugehörigen Haushalt mit einem jährlichen Stromverbrauch von knapp 2500 kWh/a verhilft der 7,3-kWh-Batteriespeicher dem Eigenheim zu einem Autarkiegrad von 83 %. Denselben Wert erzielt ein System mit dem Verhältnis von 0,9 kWh je 1000 kWh/a. Ein weiteres Beispiel für hohe Abweichungen sind etwa 15 Haushalte mit einem Verhältnis von Speicherkapazität zu Jahresstromverbrauch von je etwa 0,75 kWh je 1000 kWh/a. Die Autarkiegrade der Systeme liegen im Bereich von 39 % bis 74 %, was verdeutlicht, dass auch der Vergleich der Betriebsergebnisse anhand von Speicherkapazität und Jahresstromverbrauch keine eindeutigen Ergebnisse oder Faustformeln liefert.

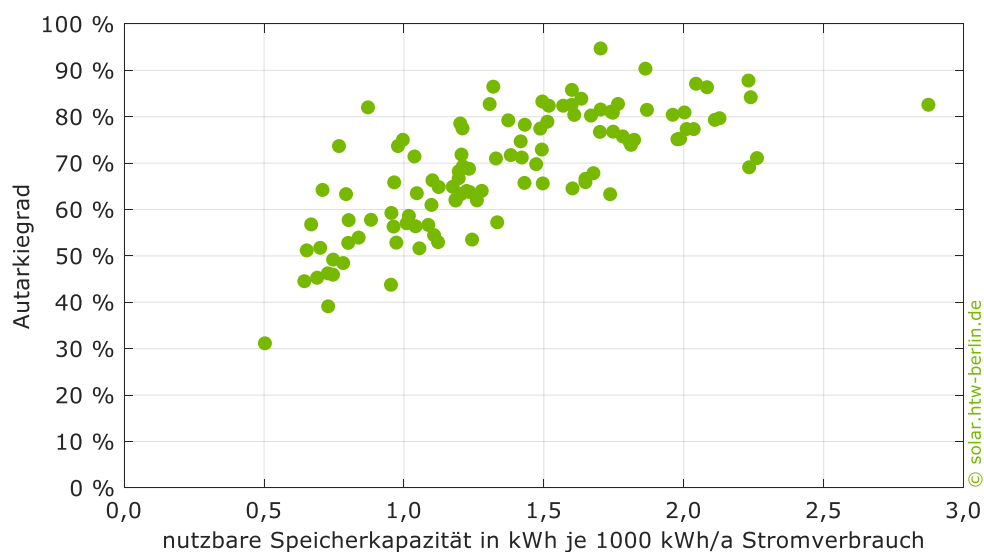


Bild 8 Autarkiegrade von 110 Haushalten mit PV-Speichersystem in Abhängigkeit von der auf den jährlichen Haushaltsstromverbrauch normierten Batteriespeicherkapazität (Daten: Eigensonne, Kostal).

Die Darstellung der beiden auf den Haushaltsstromverbrauch normierten Systemparameter PV-Leistung und Speicherkapazität ermöglicht dennoch eine intuitivere Analyse der berechneten Autarkiegrade in Abhängigkeit von den drei Kenngrößen. Um die Analyse der Betriebsdaten zu komplementieren, stellt Bild 9 den Autarkiegrad der untersuchten Haushalte in Abhängigkeit von der auf den **Jahresstromverbrauch normierten PV-Leistung und der normierten Speicherkapazität** dar. Je nach Höhe des erreichten Autarkiegrads sind die Datenpunkte bzw. Haushalte verschieden eingefärbt dargestellt.

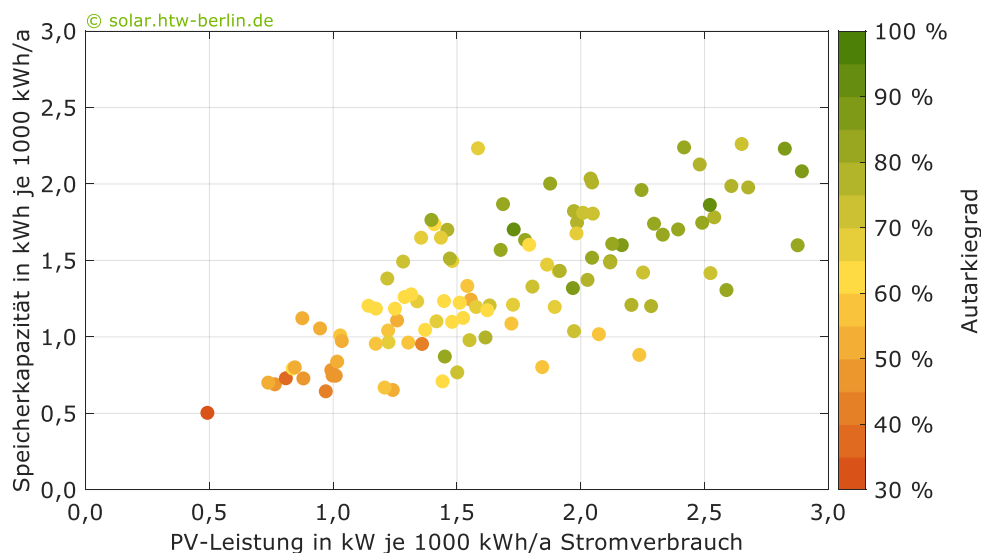


Bild 9 Autarkiegrade von 110 Haushalten mit PV-Speichersystem in Abhängigkeit von der auf den jährlichen Haushaltsstromverbrauch normierten PV-Leistung und nutzbaren Batteriespeicherkapazität (Daten: Eigensonne, Kostal).

Trotz abweichender Betriebspunkte lässt sich ein klarer Trend erkennen, der den Anstieg des Autarkiegrades mit bedarfsgerechter Zunahme der Speicherkapazität und PV-Leistung deutlich macht. Der Bereich mit einer PV-Leistung von 1,5 kW bis 2,0 kW je 1000 kWh/a Stromverbrauch in Kombination mit einer analogen normierten Speicherkapazität zeigt eine hohe Streuung der Betriebsergebnisse: Hier liegen die Autarkiegrade um bis zu 30 Prozentpunkte auseinander. Der Haushalt mit dem niedrigsten Autarkiegrad erreicht in diesem Segment eine solare Eigenversorgungsrate von 65 %, wobei der Haushalt mit der höchsten Autarkie fast 95 % erreicht. Noch signifikanter ist die Streuung der Daten im selben Bereich der PV-Leistung, jedoch mit einer Kapazität von 1,0 kWh bis 1,5 kWh je 1000 kWh/a. In diesem Segment liegen 15 der untersuchten Haushalte. Ihre Autarkiegrade reichen von 54 % bis 86 %. Die Standardabweichung aller ermittelten Autarkiegrade beträgt fast 13 %. Beeinflusst wird dieser Wert durch einige Extremfälle. So erreicht beispielsweise ein Haushalt mit dem Verhältnis von PV-Leistung zu Jahresstromverbrauch von 1,3 kW je 1000 kWh/a und dem Verhältnis von Speicherkapazität zu Jahresstromverbrauch von 0,9 kWh je 1000 kWh/a einen wesentlich geringeren Autarkiegrad als andere Haushalte mit einer vergleichbaren Systemdimensionierung. Das Lastprofil des abweichenden Haushalts zeigt hohe Lasten in den Wintermonaten, welche um den Faktor vier bis acht höher sind als in den Sommermonaten. Aufgrund dessen sinkt der Anteil der solarelektrischen Eigenversorgung und der Haushalt erreicht nur einen vergleichsweise geringen Autarkiegrad.

Dementsprechend kann aus den Ergebnissen der Untersuchung abgeleitet werden, dass die Autarkiegrade von Haushalten mit ähnlich dimensionierten PV-Batteriesystemen stark variieren können. Neben der PV-Erzeugung, der Batteriekapazität und dem jährlichen Stromverbrauch beeinflussen auch das Verbraucherverhalten bzw. **Lastprofil**, sowie die **Umwandlungseffizienz** des PV-Batteriesystems die Höhe des erreichbaren Autarkiegrades [12], [13].

4 Diskussion der Ergebnisse

Im Vergleich der Ergebnisse der Projektarbeit zu der Untersuchung von Thierschmidt et. al. aus 2015 [6] fallen neben einzelnen Gemeinsamkeiten auch deutliche Unterschiede auf: Die 132 untersuchten Haushalte mit PV-Speichersystem haben mit 2000 kWh/a bis 4000 kWh/a einen deutlich geringeren mittleren Stromverbrauch als die in der Projektarbeit analysierten Haushalte, welche einen mittleren Stromverbrauch von etwa 5300 kWh/a aufweisen. Weiterhin sind auch wesentlich kleinere PV-Anlagen in der Datengrundlage enthalten. Prinzipiell berichten auch Thierschmidt et. al. von dem Trend der höheren Autarkiegradsteigerung bei einem geringeren Haushaltsstrombedarf [6]. In der Arbeit ermitteln sie, dass Autarkiegrade von bis zu 80 % bei Haushalten mit 2000 kWh/a bis 4000 kWh/a und einer installierten PV-Leistung von mehr als 5 kW erreicht werden. Im Vergleich mit Bild 7 ist das bei einer PV-Leistung von 5 kW der horizontale Achsenabschnitt von 1,25 kW/1000 kWh/a bis 2,5 kW/1000 kWh/a. In diesem Bereich liegen auf jeden Fall Haushalte mit Autarkiegraden von bis zu 80 %, allerdings auch einige Haushalte mit deutlich höheren Werten. Diese noch höhere Autarkie kann durch deutlich höhere installierte PV-Leistung erklärt werden. Weiterhin ist in der Untersuchung von Thierschmidt et. al. leider nicht der direkte Einfluss der Batteriekapazität zu erkennen [6]. Durch höhere Kapazitäten können tendenziell höhere Autarkiegrade erreicht werden, auch wenn es sich dabei nicht um einen linearen Zusammenhang handelt [14]. Weiterhin hat sich möglicherweise die Effizienz der verbauten Wechselrichter und Batteriespeicher verbessert, wodurch die Autarkie auch in einem kleinen Maßstab erhöht wird.

Rechberger et. al. [15] kommen in einer Analyse der Feldmessdaten von 50 PV-Speichersystemen in Oberösterreich ebenfalls auf Autarkiegrade der Systeme im Bereich von 28 % bis 90 %. Auch in dieser Untersuchung ist der Autarkiegrad nur über einer anderen Größe aufgetragen: Es ist kein direkter Zusammenhang zwischen der Batteriespeicherkapazität und der erreichten Autarkie erkennbar. Dementsprechend ist auch in dieser Untersuchung eine hohe Varianz der Ergebnisse zu beobachten. Weiterhin wurden lediglich die Energiesummen des ersten Halbjahrs 2015 betrachtet, welches geringe Einstrahlungswerte als das zweite Halbjahr hatte, wodurch die Erzeugung geringer und somit auch die Autarkiegrade niedriger ausfielen [16]. Figgenger et. al. ermitteln in ihrem Speichermonitoring [17] bei der Untersuchung einer Vielzahl von PV-Speichersystemen jährliche Autarkiegrade zwischen 50 % und 70 %, was einen weitaus kleineren Wertebereich darstellt. Der Grund dafür liegt in der monatlichen Ermittlung der Autarkiegrade und der anschließenden Berechnung des Median und Mittelwert. Allerdings kommt auch diese Untersuchung zu dem Schluss, dass der Einfluss der Speicherkapazität auf den Autarkiegrad mit steigender Kapazität abnimmt, da eine Vergrößerung der Batterie, welche den Haushaltsnachtstrombedarf schon decken kann, nur noch einen geringen Einfluss auf die erreichbare Autarkie hat.

Schlussendlich ist zu den Ergebnissen der Projektarbeit noch anzumerken, dass das Installationsdatum der PV-Anlage und des Speichersystems nicht gesondert betrachtet wurden und die Erkenntnis, ob ein System aktiv war, nur anhand der Tagesenergiesummen getroffen wurde. Weiterhin sind die Datensätze mit Wallbox bzw. Elektroauto und/oder Wärmepumpe nicht gesondert untersucht wurden, welche durchaus die Ergebnisse signifikant beeinflussen können durch einen sehr viel höheren Haushaltsstromverbrauch.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Projektarbeit wurden mehrere hundert Datensätze von deutschen Eigenheimen mit PV-Anlage und teilweise Batteriespeichersystem in der Programmierungsumgebung Matlab importiert und analysiert. Die Daten stammen von den Unternehmen Eigensonne und Kostal und wurden im Rahmen des Forschungsprojekts „Perform“ bereitgestellt. Nach dem Import, der Sichtung und Analyse der über 900 Datensätze konnten, die Feldmessdaten des Jahres 2022 von 110 Haushalten mit PV-Anlage und Batteriespeichersystem analysiert werden. Dabei fiel ein Großteil der Datensätze aufgrund von folgenden Aspekten aus der Betrachtung heraus:

- Ein Großteil der Datensätze beinhaltet nur Daten für den Zeitraum eines halben Jahres, welche sich weniger für eine aussagekräftige Analyse der Haushaltsautarkie eignen.
- Weiterhin haben nicht alle Datensätze eine PV-Anlage und einen Batteriespeicher, weswegen diese nicht in die Analyse einbezogen wurden.
- Zusätzlich dazu fehlte die Batteriespeicherkapazität bei allen Datensätzen. Durch eine Rücksprache mit Eigensonne konnten erweiterte Datensätze zur Verfügung gestellt werden, mit welchen anhand der Kostal-ID Paare beider Datensätze ermittelt worden. Diese Schnittmenge beinhaltet nicht alle ursprünglichen Datensätze.
- Schlussendlich sind weitere Datensätze aus der Analyse gefallen, da die PV-Anlage und/oder der Batteriespeicher erst im Laufe des Jahres 2022 installiert wurden sind.

Für die Analyse der verbliebenen 110 Datensätze wurde im ersten Schritt der erreichte Autarkiegrad im Jahr 2022 für den Fall ohne Batteriespeicher berechnet. Anschließend wurde der Autarkiegrad für die Systeme mit Speichersystem ermittelt. Dabei wurden folgende Kernaussagen generiert:

- Der Median der installierten PV-Leistung der untersuchten Haushalte liegt bei 8,4 kW, die Werte reichen von 4,8 kW bis 13 kW. Die nutzbaren Speicherkapazitäten sind im Bereich von 4,9 kWh bis 9,7 kWh, wobei der Median 7,3 kWh beträgt.
- Im Mittel beziehen die 110 Haushalte 4900 kWh/a aus dem Netz. Durch den Einsatz einer PV-Anlage wird dieser Wert auf 2900 kWh/a reduziert. Wird zusätzlich ein Batteriespeicher installiert, liegt der Median des Strombezugs nur noch bei 1500 kWh/a und die Haushalte erreichen einen Autarkiegrad von 70 %.
- Durch den zusätzlichen Einsatz eines Speichersystems können mehr als 90 % der Haushalte ihren Autarkiegrad um 18 bis 38 Prozentpunkte steigern. Besonders bei Haushalten mit geringen

Stromverbräuchen hat der Einsatz einer Batterie einen signifikanten Einfluss auf den erreichbaren Autarkiegrad. Die Haushalte erreichen Autarkiegrade zwischen 31 % und 95 %.

- Selbst bei einer Betrachtung von PV-Leistung, Speicherkapazität und Jahresstromverbrauch zeigen die berechneten Autarkiegrade noch eine hohe Varianz. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass der erreichbare Autarkiegrad neben den betrachteten Faktoren auch von dem zugrunde liegenden Lastprofil und der Effizienz des installierten PV-Batteriesystems abhängt.

Im Rahmen dieser Projektarbeit wurde ein Beitrag für das **39. PV-Symposium** erarbeitet. Für die Veranstaltung wurden die Ergebnisse teilweise in einem Konferenzpaper dargestellt und ein Ausstellungsposter auf der Konferenz präsentiert, welches im Anhang zu finden ist, siehe Bild 10. Die Ergebnisse der Projektarbeit sind ebenfalls in die **Stromspeicher-Inspektion 2024** [3] eingeflossen. In der jährlich erscheinenden Studie ist zusätzlich zu der Analyse der Feldmessdaten ein Vergleich der Genauigkeit von hochaufgelösten Labor-messwerten und Monitoringportal-daten zu finden. Dabei wurde gezeigt, dass die Energiesummen der zwei unterschiedlichen Quellen qualitativ genügend übereinstimmen und somit Endkund*innen bei Interesse auch mit Hilfe der in Monitoringportalen herunterladbaren Daten ihre PV-Batteriespeichersysteme näher analysieren können.

Um noch aussagekräftigere Ergebnisse zu erarbeiten, wird eine höhere Anzahl von Datensätzen ganzer Betriebsjahre benötigt. Zum Ende der Bearbeitungszeit konnten mithilfe des Marktstammdatenregisters der deutschen Bundesnetzagentur [18] für weitere Datensätze die Batteriespeicherkapazitäten ermittelt werden. Aufgrund der vorangeschrittenen Zeit konnte diese Methode allerdings nicht mehr angewendet werden, wobei diese zusätzliche Quelle für Stammdaten von PV-Speichersystemen für zukünftige Untersuchungen zu dieser Thematik ggf. genutzt werden kann.

Weiterhin ist eine gesonderte Untersuchung der erreichbaren Autarkie und Eigenverbrauchsanteile von Eigenheimen mit PV-Batteriespeicher in Kombination mit einer Wallbox und/oder einer Wärmepumpe wünschenswert. Aus der Untersuchung ergeben sich folgende **Forschungsfragen**:

- Welchen Autarkiegrad erreichen Haushalte mit PV-Anlage in Kombination mit einer Wallbox (Elektroauto) und/oder einer Wärmepumpe?
- Welche Steigerung der Autarkie lässt sich durch die Installation eines Batteriespeichers für die eben genannten Eigenheime erreichen?
- Inwiefern ist die Installation eines Batteriespeichers noch ökonomisch sinnvoll, falls das vorhandene Elektroauto und der Haushalt die Möglichkeit des bidirektionalen Ladens hat?

Aufgrund der rasant wachsenden Zahlen an privaten PV-Anlagen, Batteriespeichern und Elektroautos werden diese Erkenntnisse zukünftig immer relevanter und zeitgleich auch voraussichtlich die Menge an verfügbaren Datensätzen für etwaige Analysen immer ergiebiger.

Anhang

Vergleich der Feldmessdaten von Photovoltaik-Batteriesystemen

Lucas Meissner, Nico Orth, Johannes Weniger,
Cheyenne Schlüter, Volker Quaschnig
Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Berlin
Forschungsgruppe Solarspeichersysteme

htw Hochschule für Technik
und Wirtschaft Berlin
University of Applied Sciences

Gefördert durch:
Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie
aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Fragestellungen

In welchem Maß können Haushalte in der Praxis ihren Autarkiegrad durch den Einsatz eines Batteriespeichers steigern? Wie stark weichen die Autarkiegrade verschiedener Haushalte mit unterschiedlich dimensionierten PV-Anlagen und Stromspeichersystemen voneinander ab?

Datengrundlage

- Eigensonne und Kostal stellten mehr als 900 Datensätze bereit.
- 300 davon enthalten Tagesenergiesummen eines ganzen Jahres.
- Es wurden 110 Haushalte mit einem PV-Batteriespeichersystem ohne Datenlücken oder fehlende Systemparameter untersucht.

Steigerung des Autarkiegrades durch den Einsatz eines Batteriespeichers

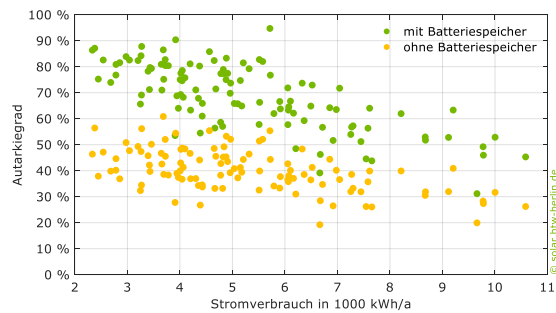


Bild 1: Autarkiegrade von 110 Haushalten mit PV-Speichersystem in Abhängigkeit von dem individuellen jährlichen Haushaltsstromverbrauch (Daten: Eigensonne, Kostal).

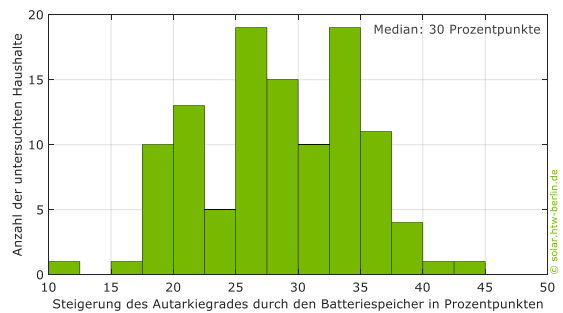


Bild 2: Häufigkeitsverteilung der Steigerung des Autarkiegrades durch den Einsatz eines Batteriespeichers in 110 Haushalten mit PV-Batteriespeichersystem (Daten: Eigensonne, Kostal, Klassenbreite: 2,5 Prozentpunkte).

Abweichung der Betriebsergebnisse und mittlere Autarkiegrade je nach Systemkonzept

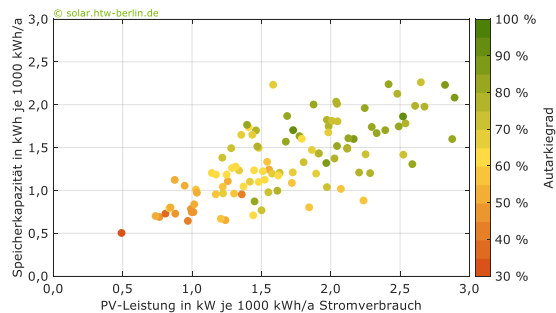


Bild 3: Autarkiegrade von 110 Haushalten mit PV-Speichersystem in Abhängigkeit von der auf den jährlichen Haushaltsstromverbrauch normierten PV-Leistung und nutzbaren Batteriespeicherkapazität (Daten: Eigensonne, Kostal).

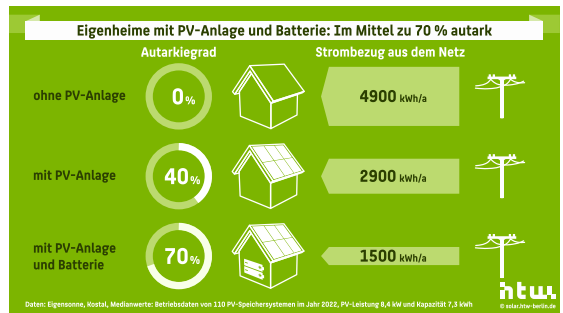


Bild 4: Einfamilienhaushalte mit PV-Anlage und Batteriespeicher erreichen im Mittel einen Autarkiegrad von 70 % und können den Netzbezug durchschnittlich um 3400 kWh/a reduzieren (Daten: Eigensonne und Kostal).

Zusammenfassung

- Der Autarkiegrad der untersuchten Haushalte steigt durch den Einsatz eines **Batteriespeichers** im Mittel um 30 Prozentpunkte.
- Die Betriebsergebnisse zeigen selbst bei annähernd gleich dimensionierten PV-Batteriesystemen eine **hohe Streuung**.
- Neben der PV-Erzeugung, der Batteriekapazität und dem jährlichen Stromverbrauch beeinflusst auch das **Lastprofil** sowie die **Umwandlungseffizienz** des PV-Speichersystems den Autarkiegrad.

Mehr dazu in der Stromspeicher-Inspektion 2024

Die Betriebsdatenanalyse ist im Rahmen der „Stromspeicher-Inspektion 2024“ entstanden. Wie genau Monitoring-Portaldaten sind und wie sich die Monitoring-Portale verschiedener Hersteller inhaltlich unterscheiden, beantwortet die 55-seitige Studie: <https://solar.htw-berlin.de/inspektion>



Bild 10 Mit Ergebnissen der Projektarbeit erarbeitetes Poster, welches beim 39. PV-Symposium eingereicht und ausgestellt wurde.

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bedeutung
a_{PV}	%	Autarkiegrad des Haushalts mit PV-Anlage
a_{PV_BAT}	%	Autarkiegrad des Haushalts mit PV-Batteriespeichersystem
E_L	kWh/d	Elektrischer Energieverbrauch
$E_{PV_INV_DC}$	kWh/d	DC-Energieabgabe der PV-Anlage
E_{PV_cons}	kWh/d	PV-Direktversorgung
$E_{BAT_out_DC}$	kWh/d	DC-Energieabgabe der Batterie
E_{grid_cons}	kWh/d	Netzbezug
E_{own_cons}	kWh/d	Eigenverbrauch
ID	-	Identifikationsnummer
JSON	-	JavaScript Object Notation
PV	-	Photovoltaik

Literaturverzeichnis

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change, *IPCC Special Report: Global warming of 1.5°C*. 2018. Zugegriffen: 26. April 2019. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.ipcc.ch/report/sr15/>
- [2] N. Höhne, T. Kuramochi, S. Sterl, und L. Röschel, „Was bedeutet das Pariser Abkommen für den Klimaschutz in Deutschland?“, Greenpeace e.V., Berlin, Kurzstudie, Feb. 2016.
- [3] J. Weniger, N. Orth, L. Meissner, C. Schlüter, und J. von Rautenkranz, „Stromspeicher-Inspektion 2024“, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Berlin, 2024.
- [4] Forschungsgruppe Solarspeichersysteme, „Projekthomepage: Solarstromrechner“, HTW Berlin. Zugegriffen: 28. Februar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://solar.htw-berlin.de/forschungsgruppe/solarstromrechner/>
- [5] Agora Energiewende, „PV- und Windflächenrechner“. Zugegriffen: 11. November 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.agora-energiewende.de/service/pv-und-windflaechenrechner/>
- [6] T. Thierschmidt, F. Kever, und M. Rothert, „Kompaktspeicher: Placebo oder Zukunftslösung? Ergebnisse aus einem Jahr Felderfahrung“, in *30. Symposium Photovoltaische Solarenergie*, Bad Staffelstein, März 2015.
- [7] J. Weniger, N. Orth, L. Meissner, C. Schlüter, und J. Meyne, „Stromspeicher-Inspektion 2023“, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Berlin, 2023.
- [8] J. Figgenger, D. Haberschusz, S. Zurmühlen, und D. Sauer, „Speichermonitoring BW Schlussbericht“, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), RWTH Aachen, Aachen, Mai 2021. doi: 10.13140/RG.2.2.30516.37768.
- [9] J. Weniger, „Dimensionierung und Netzintegration von PV-Speichersystemen“, Masterarbeit, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Berlin, 2013.
- [10] J. Weniger, J. Bergner, T. Tjaden, und V. Quaschnig, *Dezentrale Solarstromspeicher für die Energiewende*. Berlin: Berliner Wissenschafts-Verlag, 2015.
- [11] J. Weniger, N. Orth, I. Lawaczeck, L. Meissner, und V. Quaschnig, „Stromspeicher-Inspektion 2021“, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Berlin, 2021.
- [12] C. Messner, J. Kathan, C. Seitzl, S. Hofmüller, und J. Wolfahrt, „Field Assessment of PV Home Storage Systems“, in *6th Solar Integration Workshop - International Workshop on Integration of Solar Power into Power Systems*, Wien, 2016.
- [13] J. Weniger, „Bewertung der Energieeffizienz von netzgekoppelten Photovoltaik-Batteriesystemen in Wohngebäuden“, Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin, 2019.
- [14] J. Bergner und V. Quaschnig, „Sinnvolle Dimensionierung von Photovoltaikanlagen für Prosumer“, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin (HTW Berlin), Berlin, Kurzstudie, Dez. 2018.
- [15] P. Rechberger und G. Steinmaurer, „Feldtestergebnisse von Speichersystemen im Rahmen der Oberösterreichischen Speicherförderung“, in *31. Symposium Photovoltaische Solarenergie*, Bad Staffelstein, März 2016.
- [16] „Photovoltaic Geographical Information System“. [Online]. Verfügbar unter: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/de/#PVP

- [17] J. Figgner, D. Haberschusz, K.-P. Kairies, O. Wessels, S. Zurmühlen, und D. U. Sauer, „Speichermontoring Baden-Württemberg Jahresbericht 2019“, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), RWTH Aachen, Aachen, 2019.
- [18] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (BNetzA), „Marktstammdatenregister der Bundesnetzagentur“. Zugegriffen: 3. August 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.marktstammdatenregister.de/MaStR>