

# Photovoltaik und Stromspeicher im Gewerbe

Johannes Weniger, Michaela Zoll, Gisella Buhr Sepúlveda, Volker Quaschnig  
Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Berlin  
Forschungsgruppe Solarspeichersysteme  
Wilhelminenhofstr. 75a, 12459 Berlin  
E-Mail: pvspeicher@htw-berlin.de  
Internet: <https://pvspeicher.htw-berlin.de>

Gewerblich genutzte Gebäude haben ein enormes Dachflächenpotenzial, dessen Erschließung für den weiteren Ausbau der Photovoltaik (PV) in Deutschland von besonderer Bedeutung ist. Zur Analyse der solaren Eigenversorgung von Gewerbebetrieben wurden über 150 elektrische Lastprofile von Lebensmittelmärkten, Möbelhäusern, Werkstätten, Produktionsbetrieben, Speditionen, Sägewerken, Milchviehbetrieben und anderen gewerblich genutzten Gebäuden untersucht. Auf Basis der vorliegenden Messdaten wurden für unterschiedliche Gewerbetypen typische Lastprofile identifiziert. Mithilfe dieser Lastprofile wurde durch Simulationsanalysen die solare Eigenversorgung von Gewerbebetrieben mit und ohne Stromspeicher ermittelt. Dieser Beitrag stellt die Ergebnisse der Simulationsstudie vor und zeigt Unterschiede in der Höhe der solaren Eigenversorgung für verschiedene Gewerbetypen auf.

## Wie wurde der Betrieb der Systemkomponenten simuliert?

Als Datengrundlage stehen minütlich aufgelöste Messwerte des meteorologischen Observatoriums Lindenberg (Brandenburg) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) aus dem Jahr 2017 zur Verfügung [1]. Die resultierende Globalbestrahlung betrug in dem Jahr 1062 kWh/m<sup>2</sup>. Auf Grundlage der Messwerte der Global- und Diffusbestrahlungsstärke wurde über geometrische Zusammenhänge sowie mit dem Modell nach Klucher [2] die Bestrahlungsstärke auf der geneigten Ebene des PV-Generators ermittelt. Der PV-Generator ist südlich ausgerichtet und um 25° geneigt. Die Abhängigkeit des PV-Modulwirkungsgrads von der Bestrahlungsstärke und von der Modultemperatur wurde auf Basis eines empirischen Modells nach Beyer et al. [3] berücksichtigt. Hierzu wurden Messdaten des Solarmoduls LG NeON R verwendet. Zusätzliche Verluste des PV-Generators wurden pauschal durch einen konstanten Verlustfaktor von 0,92 abgebildet [4]. Das ermittelte Erzeugungsprofil des PV-Generators wurde auf die jeweilige Nennleistung skaliert.

Die Umwandlungseffizienz des PV-Wechselrichters wurde durch die Wirkungsgradkennlinie des SMA Sunny Tripower 10.0 abgebildet. Die Nennleistung des PV-Wechselrichters ist an die Größe des PV-Generators gekoppelt und beträgt 1 kW/kWp. Unter Berücksichtigung der beschriebenen Eingangsdaten und getroffenen Annahmen ergibt sich ein AC-Jahresertrag des PV-Systems von 1000 kWh/kWp.

Das Betriebsverhalten des AC-gekoppelten Batteriesystems wurde mit einem Simulationsmodell abgebildet, das folgende Systemeigenschaften berücksichtigt:

- nutzbare Speicherkapazität des Batteriespeichers
- nominale AC-Leistungsaufnahme und -abgabe des Batteriesystems
- mittlerer Umwandlungswirkungsgrad des Batteriewechselrichters im Lade- und Entladebetrieb
- mittlerer Umwandlungswirkungsgrad des Batteriespeichers

Die erforderlichen Modellparameter lassen sich aus Labortests gemäß dem „Effizienzleitfaden für PV-Speichersysteme“ ermitteln [5]. Zur Parametrierung des Modells wurden Wirkungsgradmesswerte des Batteriesystems TESVOLT TS 48 V in Kombination mit dem Batteriewechselrichter SMA Sunny Island 8.0H verwendet. Der AC-Systemnutzungsgrad dieses Systems beträgt 84,6 %. Die nominale AC-Leistungsaufnahme und -abgabe des Batteriesystems ist mit 0,5 kW/kWh an die nutzbare Speicherkapazität gekoppelt. Alle Speicherkapazitätsangaben beziehen sich nachfolgend auf den nutzbaren Energieinhalt des Batteriespeichers.

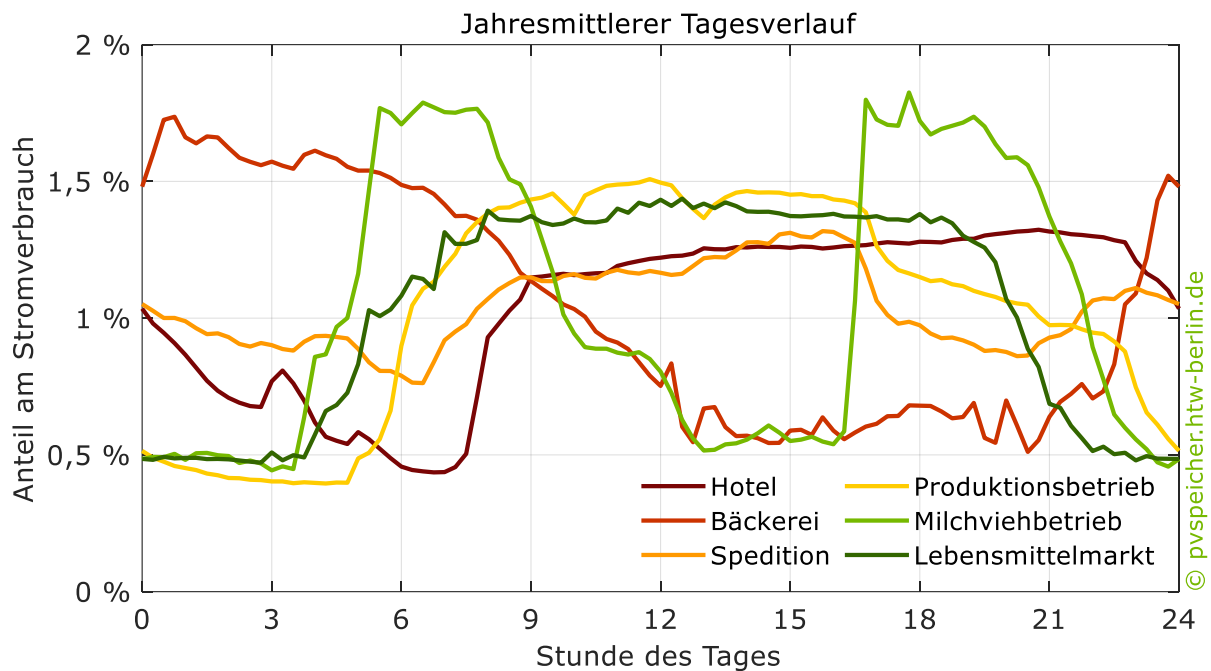
### **Welche Lastprofile liegen der Simulationsanalyse zugrunde?**

Die Simulationsuntersuchungen bauen auf verschiedenen frei zugänglichen Datensätzen auf, die nachfolgend kurz vorgestellt werden. Das Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) hat 50 elektrische Lastprofile von kleinen und mittleren Unternehmen veröffentlicht [6]. Ein weiterer Datensatz mit 28 Lastprofilen von Unternehmen aus den Bereichen Abfallentsorgung, Metall- und Holzverarbeitung sowie weiteren Branchen stammt ebenfalls vom KIT [7]. Das Fraunhofer IEE hat im Projekt Simbench Lastprofile von Gewerbe- und Landwirtschaftsbetrieben veröffentlicht [8]. Darüber hinaus haben mehrere Unternehmen, Institute, Landwirtschaftskammern und Energieversorger die Untersuchungen durch die Bereitstellung von Lastprofilen unterstützt. Alle Lastprofile liegen in einer zeitlichen Auflösung von 15 min über mindestens 1 Jahr vor. Der Jahresstromverbrauch wird nachfolgend als Stromverbrauch in der Einheit MWh (1000 kWh) angegeben.

### **Wie unterscheidet sich der Stromverbrauch von unterschiedlichen Gewerbebetrieben im zeitlichen Verlauf?**

Aus der Vielzahl der vorliegenden Lastprofile wurden für 6 Branchen typische Lastprofile identifiziert, die für die nachfolgenden Simulationsanalysen verwendet wurden. Zu den näher betrachteten Wirtschaftszweigen gehören Hotels, Bäckereien, Speditionen, Produktions- und Milchviehbetriebe sowie Lebensmittelmärkte. Die 6 Lastprofile wurden in den Jahren 2017 oder 2019 erfasst und der jährliche Stromverbrauch der betrachteten Objekte lag zwischen 38 MWh und 317 MWh. Bild 1 stellt den mittleren Tagesverlauf der einzelnen Gewerbelastprofile dar. Für jede Viertelstunde wurde hierzu

der Anteil am jährlichen Stromverbrauch ermittelt. Die resultierenden mittleren Tageslastgänge machen die Unterschiede zwischen den verschiedenen Gewerbetypen deutlich sichtbar. Lebensmittelmärkte und Produktionsbetriebe haben tagsüber einen höheren Strombedarf als in den Nachtstunden. In dem betrachteten Hotel ist die Stromnachfrage in den späten Abendstunden am höchsten. Bedingt durch die Melkzeiten am Vormittag und Abend unterscheidet sich das Stromverbrauchsprofil von Milchviehbetrieben deutlich von den anderen Gewerbebetrieben. Bäckereien haben produktionsbedingt in den Nachtstunden den größten Strombedarf.



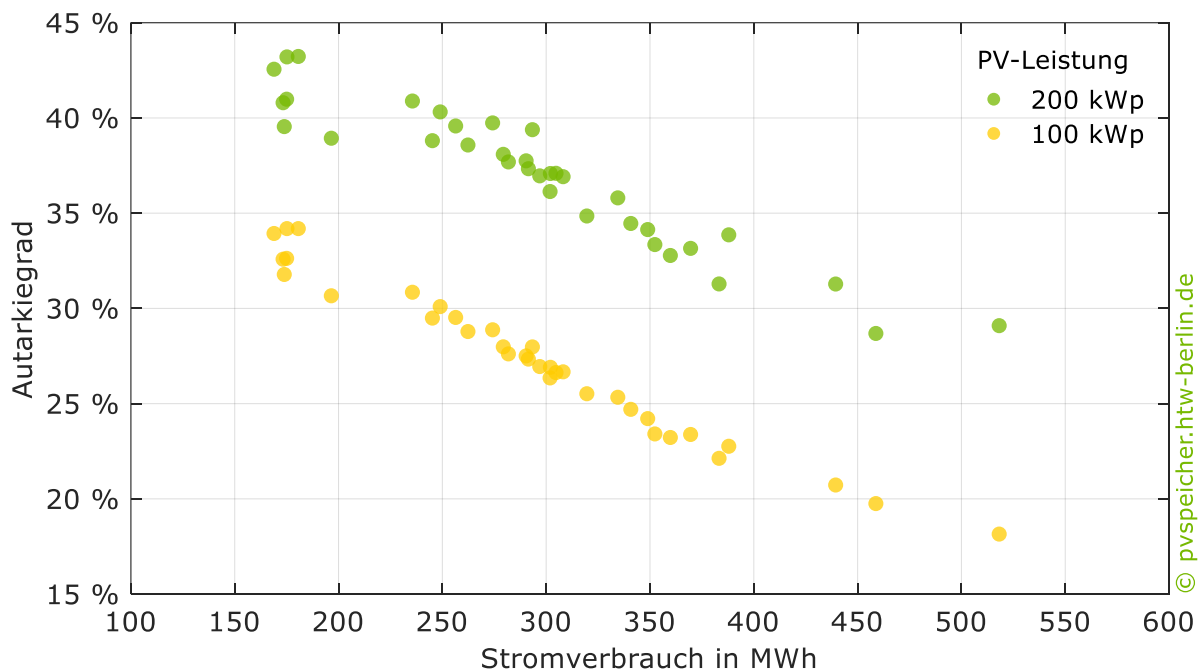
**Bild 1** Jahresmittlerer Tagesverlauf von verschiedenen Gewerbelastprofilen.

Deutliche Unterschiede zwischen den Lastprofilen werden auch bei der Analyse der Lastgänge im wöchentlichen Verlauf sichtbar. Bei Hotel- und Milchviehbetrieben sind häufig nur geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Wochentagen zu erkennen. Der Strombedarf von Speditionen und produzierenden Gewerbebetrieben fällt in der Regel an den Wochenenden im Vergleich zu den Werktagen geringer aus. Bei Lebensmittelmärkten ist zudem die geringe Stromnachfrage an Sonn- und Feiertagen deutlich erkennbar.

Große saisonale Schwankungen im Stromverbrauch konnten für die 6 Lastprofile nicht identifiziert werden. Aufgrund des höheren Kühlbedarfs in den Sommermonaten steigt auch der Stromverbrauch der Lebensmittelmärkte in dieser Jahreszeit an [9]. In den Lastgängen von Produktionsbetrieben treten Abweichungen häufig während der Betriebsferien im Sommer sowie zum Jahreswechsel auf.

## Wie groß sind die Unterschiede in der solaren Eigenversorgung innerhalb eines Gewerbetyps?

Um dieser Frage nachzugehen, wurden Simulationsanalysen für 35 Lebensmittelmärkte durchgeführt. Der jährliche Stromverbrauch der Lebensmittelmärkte variiert zwischen 169 MWh und 519 MWh. Unter Berücksichtigung der individuellen Lastprofile wurden die Energieflüsse in den Lebensmittelmärkten bei Einsatz einer PV-Anlage mit einer Nennleistung von 100 kWp und 200 kWp simuliert. Bild 2 stellt den Anteil des jährlichen Strombedarfs dar, der zeitgleich durch die PV-Anlage gedeckt wird. Ist auf den Märkten eine 100-kWp-PV-Anlage installiert, können 18 % bis 34 % des Stromverbrauchs vor Ort zeitgleich erzeugt werden. Dabei wird eine ausgeprägte Abhängigkeit des resultierenden Autarkiegrads von der Höhe des Stromverbrauchs ersichtlich. Bei nahezu identischem Stromverbrauch weichen die Autarkiegrade um maximal 2,5 Prozentpunkte voneinander ab. Ist die PV-Anlage doppelt so groß, steigt die solare Eigenversorgung je nach Stromverbrauch auf 27 % bis 43 %. Zudem fällt bei der PV-Leistung von 200 kWp auf, dass die Unterschiede zwischen den Lastprofilen größer werden. Allerdings unterscheiden sich die Autarkiegrade bei gleichem Stromverbrauch um weniger als 4 Prozentpunkte.

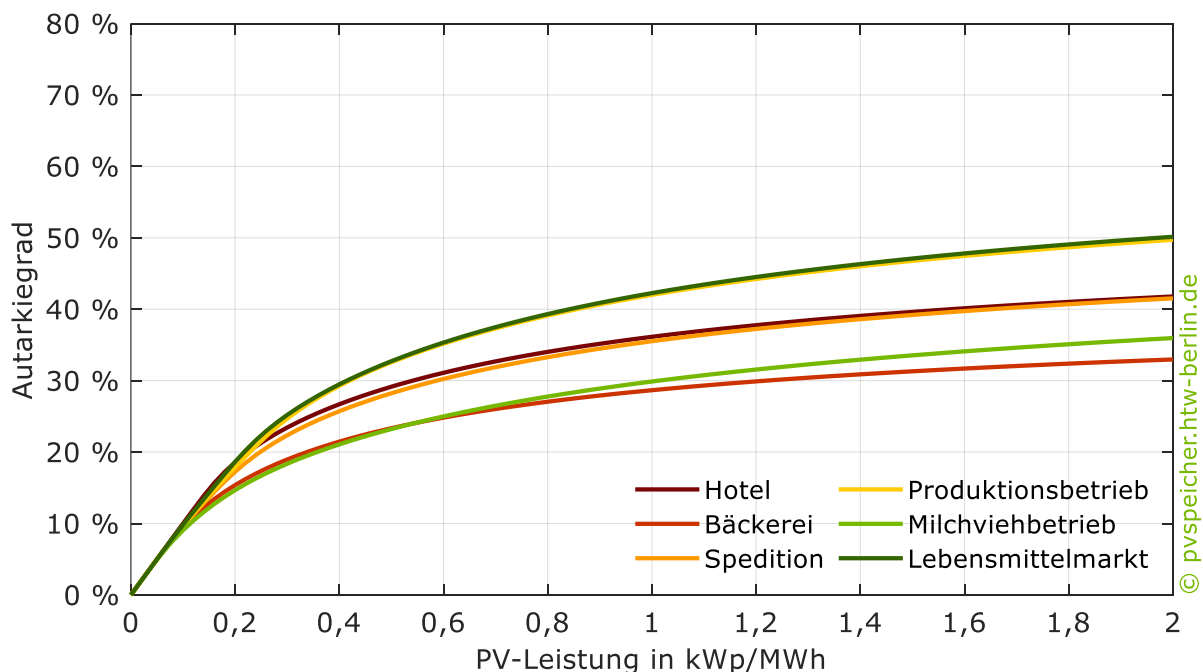


**Bild 2** Berechnete Eigenversorgung von 35 unterschiedlichen Lebensmittelmärkten je nach PV-Anlagengröße.

Im Gegensatz zu Lebensmittelmärkten, Hotel- und Milchviehbetrieben gibt es aber auch Branchen, innerhalb derer die Unterschiede in der Höhe der solaren Eigenversorgung größer ausfallen. Hierzu zählen u. a. Betriebe der Metall- und Holzverarbeitung sowie der Abfallentsorgung.

## Wie hoch ist die solare Eigenversorgung von unterschiedlichen Gewerbebetrieben?

Wie in Bild 2 bereits aufgezeigt, beeinflusst die Höhe des Stromverbrauchs den resultierenden Autarkiegrad. Um die Berechnungsergebnisse für Betriebe mit unterschiedlich hohem Stromverbrauch vergleichbar zu machen, wird die Größe der PV-Anlage im Folgenden als Verhältnis der PV-Leistung zum Stromverbrauch in der Einheit kWp/MWh angegeben. Wird die betrachtete Bäckerei mit einem Stromverbrauch von 202 MWh durch eine 200-kWp-PV-Anlage versorgt, beträgt die spezifische PV-Leistung folglich rund 1 kWp/MWh. Bei diesem Verhältnis von PV-Leistung zu Stromverbrauch wird in der Jahresbilanz genauso viel Strom von der PV-Anlage erzeugt wie Strom benötigt wird, da der AC-Jahresertrag der PV-Anlage 1000 kWh/kWp beträgt. In diesem Fall werden 29 % des Stromverbrauchs zeitgleich durch die PV-Anlage gedeckt. Dagegen können der Produktionsbetrieb und der Lebensmittelmarkt bei einer PV-Leistung von 1 kWp/MWh einen Autarkiegrad von 42 % vorweisen. Bild 3 veranschaulicht für die 6 unterschiedlichen Gewerbetypen die Abhängigkeit der solaren Eigenversorgung von der auf den Stromverbrauch normierten PV-Anlagengröße.

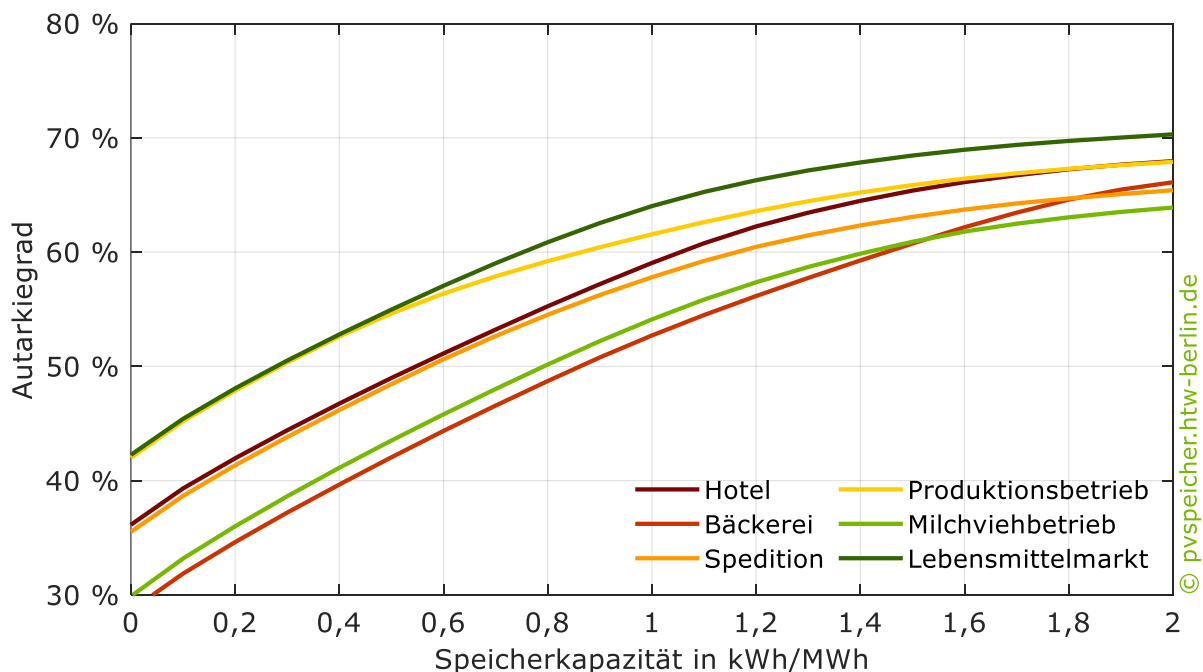


**Bild 3** Einfluss der Größe des PV-Systems auf die zeitgleiche Deckung des Stromverbrauchs für unterschiedliche Gewerbetypen (Normierung der PV-Leistung auf den jährlichen Stromverbrauch in MWh).

Die resultierenden Unterschiede im erreichbaren Autarkiegrad können mit der unterschiedlichen Charakteristik der Lastprofile begründet werden. Die Ergebnisse der Bäckerei und des Lebensmittelmarkts markieren nahezu über den gesamten Leistungsbereich bis 2 kWp/MWh die Bandbreite der erreichbaren Autarkiegrade.

## Welchen Beitrag leistet ein Batteriesystem zur Steigerung der Eigenversorgung?

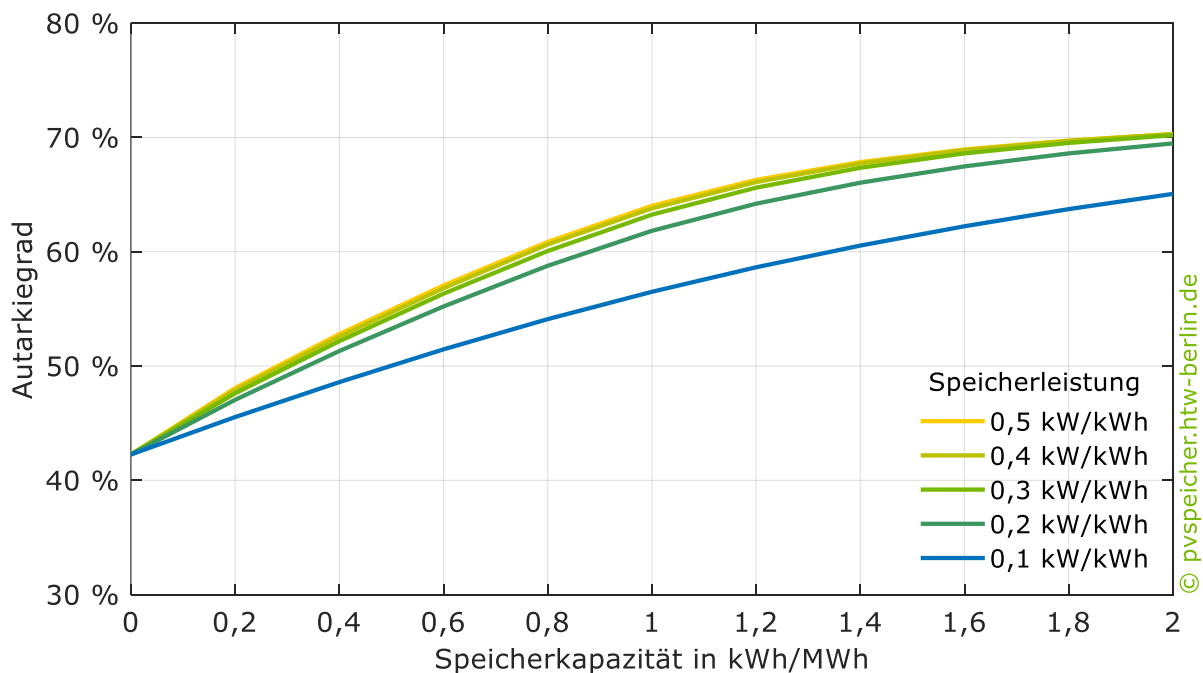
Nachfolgend wird aufgezeigt, wie sich der Autarkiegrad durch Speicherung der Solarstromüberschüsse in einem Batteriespeicher steigern lässt. Analog zur PV-Leistung wird die nutzbare Speicherkapazität des Batteriespeichers normiert auf den Stromverbrauch angegeben. Der Einfluss der Speicherkapazität auf die Solarstromversorgung der unterschiedlichen Gewerbebetriebe ist in Bild 4 bei einer PV-Leistung von 1 kWp/MWh dargestellt. Ab einer Speicherkapazität von 0,5 kWh/MWh lassen sich Unterschiede in der Steigerung der Eigenversorgung zwischen den Betrieben beobachten. Auffällig ist hierbei, dass der Sättigungseffekt bei weiterer Vergrößerung des Batteriespeichers zuerst bei den Betrieben auftritt, die sowohl samstags als auch sonntags einen deutlich geringeren Verbrauch als an Werktagen haben. Bei Milchviehbetrieben und Lebensmittelmärkten tritt die Sättigung erst bei Speicherkapazitäten oberhalb von 1,5 kWh/MWh auf. Dies trifft auch auf Bäckereien zu, die die größte Steigerung der Eigenversorgung durch einen Batteriespeicher aufgrund des hohen nächtlichen Stromverbrauchs erreichen.



**Bild 4** Steigerung der solaren Eigenversorgung von unterschiedlichen Gewerbetypen durch den Einsatz von Batteriesystemen bei einer PV-Leistung von 1 kWp/MWh und einer Speicherleistung von 0,5 kW/kWh (Normierung der Speicherkapazität auf den Jahresstromverbrauch in MWh).

## Welches Verhältnis von Speicherleistung zu Speicherkapazität ist erforderlich?

Neben der Speicherkapazität beeinflusst auch die Nennleistung des Batteriewechselrichters das Betriebsverhalten des Batteriesystems. Die in Bild 4 dargestellten Berechnungsergebnisse wurden bei einem Verhältnis von Speicherleistung zu Speicherkapazität von 0,5 kW/kWh ermittelt. Bild 5 veranschaulicht für den betrachteten Lebensmittelmarkt den Einfluss der Speicherleistung auf den Autarkiegrad. Ist die Lade- und Entladeleistung des Batteriesystems auf 0,3 kW/kWh beschränkt, wird der Energiedurchsatz durch das Batteriesystem nur wenig beeinträchtigt. Erst ab einer Speicherleistung unterhalb von 0,2 kW/kWh fällt der Autarkiegrad und damit der Nutzen des Batteriespeichers deutlich ab. Dieser Zusammenhang konnte auch für die anderen Gewerbetypen nachgewiesen werden. Daher ist ein Verhältnis von Speicherleistung zu Speicherkapazität von 0,3 kW/kWh zur Steigerung der Solarstromversorgung von Gewerbebetrieben in der Regel ausreichend.



**Bild 5** Einfluss der Nennleistung und Speicherkapazität der Batteriesysteme auf die solare Eigenversorgung eines Lebensmittelmarkts bei einer PV-Leistung von 1 kWp/MWh (Normierung der Speicherkapazität auf den Jahresstromverbrauch in MWh, Normierung der Speicherleistung auf die Speicherkapazität in kWh).

## Schlussfolgerungen

Im Gegensatz zu privaten Eigenheimen können Gewerbebetriebe tagsüber häufig deutlich mehr Solarstrom vor Ort verbrauchen. Produktionsbetriebe und Lebensmittelmärkte können mehr als 40 % ihres Stromverbrauchs durch eine PV-Anlage decken,

wenn die installierte PV-Leistung den Wert von 0,8 kWp pro MWh Jahresstromverbrauch übersteigt (vgl. Bild 3). In Bäckereien und Milchviehbetrieben kann durch die Speicherung des Solarstroms mit Batteriesystemen die größte Steigerung der solaren Eigenversorgung erreicht werden (vgl. Bild 4). In Gewerbebetrieben steigt der erzielbare Autarkiegrad nur noch wenig, sobald die Speicherleistung den Wert von 0,3 kW/kWh überschreitet. Entgegen der weitverbreiteten Aussage besteht daher bei Gewerbespeichersystemen zur Eigenversorgungsoptimierung kein erhöhter Leistungsbedarf. Ohne Speicher können PV-Anlagen 20 % bis 50 % und mit Speicher 40 % bis 70 % des Strombedarfs von Gewerbebetrieben decken. PV-Anlagen und Stromspeicher leisten somit gemeinsam einen wichtigen Beitrag zur solaren Stromversorgung des Gewerbesektors in Deutschland.

## Danksagung

Die präsentierten Ergebnisse sind im Vorhaben „Digitale Werkzeuge für solarstrombasierte Energieversorgungskonzepte (PVplusX)“ entstanden. Die Autoren danken der Dobeneck-Technologie-Stiftung für die finanzielle Unterstützung des Projekts.

## Literaturverzeichnis

- [1] K. Behrens, „Basic measurements of radiation at station Lindenberg“. 2017, [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.883232>.
- [2] T. M. Klucher, „Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces“, *Sol. Energy*, Bd. 23, S. 111–114, Jan. 1979, doi: 10.1016/0038-092X(79)90110-5.
- [3] H. G. Beyer, G. Heilscher, und S. Bofinger, „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.
- [4] E. Lorenz, T. Scheidsteger, J. Hurka, D. Heinemann, und C. Kurz, „Regional PV power prediction for improved grid integration“, *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, Bd. 19, Nr. 7, S. 757–771, Nov. 2011, doi: 10.1002/pip.1033.
- [5] BVES - Bundesverband Energiespeicher e.V. und BSW - Bundesverband Solarwirtschaft e.V., „Effizienzleitfaden für PV-Speichersysteme 2.0“, Berlin, Apr. 2019.
- [6] F. Braeuer, „Load profile data of 50 industrial plants in Germany for one year“. Zenodo, Juni 17, 2020, doi: 10.5281/ZENODO.3899018.
- [7] J. Huber, N. Klemp, J. Becker, und C. Weinhardt, „Electricity consumption of 28 German companies in 15-min resolution“. Karlsruhe, 2019, doi: 10.5445/IR/1000098027.
- [8] C. Spalthoff *u. a.*, „SimBench: Open source time series of power load, storage and generation for the simulation of electrical distribution grids“, gehalten auf der Internationaler ETG-Kongress 2019, Esslingen, 2019.
- [9] G. Merei, J. Moshövel, D. Magnor, und D. U. Sauer, „Optimization of self-consumption and techno-economic analysis of PV-battery systems in commercial applications“, *Appl. Energy*, Bd. 168, S. 171–178, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.01.083.