

Einsatz und Wirtschaftlichkeit von Photovoltaik-Batteriespeichern in Kombination mit Stromsparen

Kurzinformation für Verbraucherinnen und Verbraucher Freiburg, 21.03.2018

Autorinnen und Autoren

Kathrin Graulich
Inga Hilbert
Christoph Heinemann

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Schicklerstraße 5-7
10179 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 6151 8191-0

info@oeko.de
www.oeko.de

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	4
1. Zusammenfassung und Empfehlungen	5
2. Hintergrund und Zielsetzung	7
3. Einsatz von Photovoltaik-Batteriespeichern	10
3.1. Allgemeiner Aufbau eines PV-Batteriespeichersystems	10
3.2. Verschiedene Technologien bei Photovoltaik-Batteriespeichern	12
3.3. Allgemeiner Systemvergleich der PV-Batteriespeichertechnologien	14
3.4. Vergleichende Analyse der PV-Batteriespeichertechnologien	18
3.5. Marktanteile verschiedener Speichergrößen	19
3.6. Zusammenhang PV-Anlage, Stromverbrauch und Batteriespeicher	20
3.7. Typische Eigenverbrauchsquoten und Autarkiegrade	21
3.8. Optimale Einbettung der PV-Batteriesysteme ins Netz	21
3.9. Kosten verschiedener Speichersysteme	24
3.10. Förderprogramme für PV-Speichersysteme	25
3.11. Marktakteure und Marktübersichten für PV-Batteriespeicher	26
4. „Stromspar-Speicherrechner“ des Öko-Instituts	27
5. Stromeinsparpotenziale und ihre Wirtschaftlichkeit in Haushalten	30
6. Wirtschaftlichkeit von Photovoltaik-Batteriespeichern in Kombination mit Stromsparmaßnahmen	32
6.1. Szenario A: PV-Bestandsanlage mit auslaufender EEG-Vergütung: Investition in Batteriespeicher und Auswirkung von Stromeinsparungen	33
6.2. Szenario B: Neuinstallation einer PV-Anlage ohne Speicher: Dimensionierung mit und ohne Stromeinsparungen	34
6.3. Szenario C: Neuinstallation einer PV-Anlage mit Speicher: Auswirkungen von Stromeinsparungen	35
6.4. Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit von PV-Batteriespeichern	36
7. Literatur	37
8. Anhang: EEG-Einspeisevergütung und Eigenverbrauchsbonus in Abhängigkeit vom Inbetriebnahmezeitpunkt der PV-Anlage	40

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Stromspar-Speicherrechner des Öko-Instituts zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit von PV-Batteriespeichern unter Einbezug von Stromsparen	9
Abbildung 3-1:	Schema eines DC-gekoppelten Batteriespeichersystems	11
Abbildung 3-2:	Schema eines AC-gekoppelten Batteriespeichersystems	11
Abbildung 3-3:	Unterscheidung zwischen Nenn- und Nutzkapazität der Batteriespeicher	15
Abbildung 3-4:	Verlustmechanismen in Photovoltaik-Batteriesystemen	16
Abbildung 3-5:	Einspeiseprofil eines PV-Speichersystems in das Netz bei ausschließlicher Optimierung des Eigenverbrauchs für den Haushalt	21
Abbildung 4-1:	Grundsätzlicher Aufbau des Wirtschaftlichkeitsrechners für PV-Batteriespeicher unter Berücksichtigung von Stromeinspar-Potenzialen	29
Abbildung 5-1:	Stromeffizienzklassen gemäß Stromspiegel 2017	30
Abbildung 6-1:	PV-Bestandsanlage mit auslaufender EEG-Vergütung: Wirtschaftlichkeit der Investition in einen Batteriespeicher ohne und mit paralleler Investition in Stromeinsparmaßnahmen	33
Abbildung 6-2:	Neuinstallation PV-Anlage: Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Anlagengrößen, jeweils mit und ohne zusätzliche Stromsparmaßnahmen	34
Abbildung 6-3:	Neuinstallation PV-Anlage: Wirtschaftlichkeit mit unterschiedlich dimensionierten Batteriespeichern und Stromeinsparungen	35

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Vor- und Nachteile einer DC / AC Batteriekopplung	12
Tabelle 3-2:	Technischer Vergleich der verschiedenen PV-Speichertechnologien	14
Tabelle 3-3:	Vor- und Nachteile der verschiedenen PV-Batteriespeichertechnologien	18
Tabelle 3-4:	Endkunden-Preise für schlüsselfertige Lithium-Ionen Speicher	24
Tabelle 3-5:	Beispiele für Förderprogramme für PV-Batteriespeicher	25
Tabelle 3-6:	Online-Marktübersichten zu Photovoltaik-Batteriespeichern	26
Tabelle 8-1:	EEG-Einspeisevergütung für Anlagen bis PV-Anlagen 10 kWp	40
Tabelle 8-2:	Sätze für EEG-Eigenverbrauchsbonus	42

1. Zusammenfassung und Empfehlungen

Bei bestehenden Photovoltaik-Anlagen werden in naher Zukunft die ersten auf 20 Jahre befristeten, recht hohen Förderungen aus dem Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) auslaufen. Da diese Haushalte danach nur sehr geringe Börsenstrompreise für die Einspeisung von Strom ins Netz erhalten, besteht ein Anreiz zur möglichst hohen Eigennutzung des selbst erzeugten Stroms mit Hilfe eines Batteriespeichers. Auch bei Neuinstallation von PV-Anlagen werden Batteriespeicher zunehmend gleich mit angeboten. Finanzielle Zuschüsse der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) in Kombination mit sinkenden Preisen begünstigen schließlich den steigenden Trend zur Investition in Photovoltaik-Batteriespeicher.

Haushalte, die die Anschaffung eines PV-Speichers planen, finden im Internet zahlreiche Speicherrechner, sowohl von Batterieherstellern, als auch von Energieversorgungsunternehmen sowie anderen unabhängigen Akteuren wie Hochschulen, Energieagenturen oder Testzeitschriften. Manche Tools sind Wirtschaftlichkeitsrechner, andere bestimmen den Eigenverbrauch und Autarkiegrad oder geben Anhaltspunkte für die Dimensionierung des Speichers. Alle Tools gehen jedoch bei den Berechnungen der Wirtschaftlichkeit jeweils vom aktuellen Stromverbrauch der Haushalte aus. Das Öko-Institut hat in Kooperation mit dem Büro Ö-quadrat nun erstmals ein Beratungstool entwickelt, mit dem Haushalte die Wirtschaftlichkeit und Auslegung von PV-Speichern in Kombination mit Investitionen in Stromsparmaßnahmen berechnen können („Stromspar-Speicherrechner“).

Hintergrund ist, dass PV-Batteriespeicher tendenziell häufiger von Haushalten gekauft werden, die im Vergleich zum Durchschnittsverbrauch deutscher Privathaushalte einen höheren Stromverbrauch haben, so dass noch Potenziale zur Verringerung des Strombedarfs bestehen. Gleichzeitig ist anzunehmen, dass es sich um Haushalte mit mittlerem bis höherem Einkommen handelt, in denen Anreize zum Stromsparen eher fehlen, da kein finanzieller Druck zum Verringern der Stromkosten besteht. Dagegen spielt bei Haushalten, die sich einen PV-Batteriespeicher anschaffen wollen, in der Regel die Wirtschaftlichkeit der geplanten Investition eine Rolle.

Der **Stromspar-Speicherrechner des Öko-Instituts**¹ kombiniert die Investitionen für die Anschaffung eines Speichers mit Investitionen, die für Stromsparmaßnahmen erforderlich sind, zum Beispiel Ersatzanschaffungen für alte, ineffiziente Geräte. Das Ergebnis verdeutlicht, dass gleichzeitige Investitionen in Stromsparmaßnahmen nicht nur einen weiteren Beitrag des Haushalts zur Energiewende liefern, sondern zugleich den Autarkiegrad und damit die Absicherung gegen steigende Strompreise erhöhen können, und schließlich auch noch wirtschaftlich von Vorteil sind.

Die Wirtschaftlichkeitsberechnungen mit dem Stromspar-Speicherrechner des Öko-Instituts ergeben folgende Empfehlungen:

Bei **Neuinstallation einer Photovoltaik-Anlage** ist über einen Zeitraum von 20 Jahren gesehen die Investition in eine möglichst große Anlage bis 10 kWp², kombiniert mit Investitionen in möglichst hohe Stromeinsparungen, am wirtschaftlichsten. Diese Kombination ist nicht nur finanziell für den Haushalt höchst attraktiv, sondern leistet auch im Sinne der Energiewende den größten Beitrag zu den Zielen der Bundesregierung (Ausbau der erneuerbaren Energien und Reduzierung des Stromverbrauchs). Haushalte sollten daher ihre vorhandenen Dachflächen bestmöglich ausnutzen, denn auch große PV-Anlagen, die bilanziell deutlich mehr Strom erzeugen als verbraucht werden kann, rechnen sich wirtschaftlich.

¹ Hinweis: Der Stromspar-Speicherrechner des Öko-Instituts ist nicht anwendbar für Hauseigentümergeinschaften oder Mieterstrom-Modelle, für PV-Anlagen größer 10 kWp sowie für Gewerbe mit spezifischen Lastprofilen.

² Für PV-Anlagen größer als 10 kWp gelten andere EEG-Förderbedingungen.

Haushalte, die parallel zur Neuinstallation der PV-Anlage die Anschaffung eines Batteriespeichers planen um einen höheren Autarkiegrad zu erreichen, können dies auch durch Reduzierung des Stromverbrauchs realisieren. Die Kombination eines vergleichsweise kleineren Batteriespeichers zusammen mit Stromsparmaßnahmen ist daher sowohl aus Autarkie- als auch aus finanzieller Sicht eine optimale Lösung.

Bei **PV-Bestandsanlagen**, deren hohe Einspeisevergütung durch die EEG-Förderung demnächst ausläuft, ist die alleinige Investition in einen (Lithium-Ionen)-Batteriespeicher nur dann wirtschaftlich, wenn von künftig steigenden Strompreisen bzw. noch stärker sinkenden Speicherpreisen ausgegangen wird. Unter der Annahme, dass die Strompreise aufgrund der auslaufenden hohen EEG-Einspeisevergütungen nach 2025 leicht sinken werden, lohnt sich finanziell gesehen die Investition in einen Speicher nicht. Ein größerer Speicher führt zwar zu einem höheren Eigenverbrauch und Autarkiegrad, je größer jedoch der Batteriespeicher ausgelegt wird, desto nachteiliger fällt das Ergebnis mit Bezug auf die Wirtschaftlichkeit aus.

Realisiert der Haushalt dagegen neben der Speicheranschaffung zusätzlich Investitionen in Stromsparmaßnahmen, so erhöht sich dadurch nicht nur der Autarkiegrad, sondern es ergibt sich über einen Zeitraum von 20 Jahren gesehen aufgrund der geringeren Strombezugskosten unabhängig von der Batteriegröße in jedem Fall ein wirtschaftlicher Vorteil, sogar bei künftig sinkenden Strompreisen. Empfehlenswert sind daher auch bei PV-Bestandsanlagen Investitionen in möglichst hohe Stromsparmaßnahmen in Kombination mit einem möglichst kleinen Speicher

Damit durch die Installation einer Vielzahl von individuellen Batteriespeichern in Haushalten keine Nachteile für das Gesamtnetz entstehen, sollte die geplante Anschaffung nicht ausschließlich auf die Optimierung des Eigenverbrauchs ausgelegt sein, sondern einen **netzoptimierten Betrieb des Batteriespeichers** ermöglichen. Durch entsprechende Schnittstellen sind prognosebasierte Lade-strategien möglich: Beladung des Speichers bei Erzeugungsspitzen zur Verringerung der Netzein-speisung (z.B. zur Mittagszeit oder bei Starkwind), und Entladung des Speichers mit Nutzung des eigenen eingespeicherten Stroms während Lastspitzen (z.B. morgens und abends).

Neben einem netzorientierten Betrieb können Haushalte bei der Anschaffung eines Speichers zu-dem auf weitere Aspekte achten. Das Öko-Institut hat im Rahmen einer Studie für die Elektrizitätswerke Schönau³ eine **vergleichende Analyse verschiedener Batteriespeichertechnologien** durchgeführt. Im Fokus standen dabei die Kriterien Gefahrstoffe, Sicherheit und Lebensdauer so-wie eingesetzte Rohstoffe und Recycling. Die Analyse zeigt, dass keine Batterietechnologie unein-geschränkt empfehlenswert ist, bei Salzwasser- und Lithium-Eisenphosphat-Batterien jedoch die positiven Aspekte im Vergleich zu Bleibatterien und Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Batterien über-wiegen. Bei der spezifischen Auswahl eines PV-Batteriespeichers sollten Haushalte zudem nicht nur auf Kosten und Speicherkapazität Wert legen, sondern soweit möglich auch weitere Parameter einbeziehen wie Qualität und Langlebigkeit, Wartungsaufwand, Reparatur- und Recyclingfreund-lichkeit, Rücknahme am Ende der Lebensdauer sowie Serviceangebote des Herstellers.

Bei der Bewertung des aktuellen Jahresstromverbrauchs und den möglichen Stromeinsparpoten-zialen können sich Haushalte sehr einfach am **Stromspiegel für Deutschland** orientieren, www.stromspiegel.de. Zur Realisierung von Stromsparmaßnahmen unterstützt **EcoTopTen – Die Plattform für ökologische Spitzenprodukte** mit Übersichten über besonders sparsame Geräte in zahlreichen Kategorien sowie Alltagstipps zum Stromsparen unter www.ecotopten.de.

³ Siehe www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Foerderkriterien_PV-Batteriespeicher_EWS.pdf

2. Hintergrund und Zielsetzung

Regierungsziel 2050: Senkung des Stromverbrauchs

Nach den Zielen der Bundesregierung soll der Stromverbrauch in Deutschland bis zum Jahr 2050 um 25 Prozent gegenüber dem Jahr 2008 gesenkt werden (BMWi 2010). Einsparpotenziale in privaten Haushalten spielen dabei eine wichtige Rolle, insbesondere Maßnahmen zur Reduktion des gerätebedingten Stromverbrauchs, zum Beispiel durch geringinvestive Maßnahmen (u.a. Vermeidung von Standby-Verlusten, Einsatz von LED-Lampen), Reduktion von Mehrfachausstattungen von Geräten sowie sukzessiven Austausch von ineffizienten Haushaltsgeräten im Bestand durch hocheffiziente Geräte (Fischer et al. 2016). In den vergangenen Jahren standen vor allem Stromsparmaßnahmen für einkommensschwache Haushalte im Fokus, um deren Kostenbelastung zu reduzieren (Beispiel: Aktion Stromspar-Check des deutschen Caritasverbandes und des Bundesverbands der Energie- und Klimaschutzagenturen, gefördert durch die Nationale Klimaschutzinitiative des Bundesumweltministeriums).

Besonders hohe Stromspar-Potenziale bestehen jedoch vor allem in Haushalten mit mittlerem bis höherem Einkommen und bislang hohem Stromverbrauch. Da bei diesen jedoch kein finanzieller Druck zum Sparen bei den Stromkosten besteht, ist anzunehmen, dass sie von sich aus nicht aktiv Stromsparmaßnahmen ergreifen werden. Gleichzeitig werden sie kaum als spezifische Zielgruppe von Politikmaßnahmen zum Stromsparen (z.B. Stromsparberatungen, Informationskampagnen) adressiert. Auf der anderen Seite sind unter den Haushalten mit mittlerem bis höherem Einkommen jedoch auch diejenigen zu finden, die einen eigenen Beitrag zur Energiewende leisten wollen und gegenüber dem Einsatz Erneuerbarer Energien, insbesondere der Installation von Photovoltaik-Anlagen (PV-Anlagen) aufgeschlossen sind.

Regierungsziel 2050: Erhöhung des Anteils Erneuerbarer Energien

Nach den Zielen der Bundesregierung soll der Anteil der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch in Deutschland 80 Prozent bis 2050 betragen (BMWi 2010). Der Anteil der Stromerzeugung aus Photovoltaik stieg durch den fortschreitenden Ausbau von PV-Anlagen in der Vergangenheit stark an. Aufgrund der weiteren Ausbauplanung für Photovoltaik im Rahmen der Energiewende ist davon auszugehen, dass die Zahl der privaten PV-Anlagen auch künftig kontinuierlich weiter zunehmen wird. Nach einer aktuellen Regierungsstudie des Bundeswirtschaftsministeriums zu Mieterstrommodellen (Koepp et al. 2017) könnten bis zu 3,8 Millionen weitere Wohnungen mit Solarstrom versorgt werden.

Trend: Batteriespeicher zur Erhöhung des Eigenstromverbrauchs bei PV-Anlagen

Zur Erhöhung des Eigenstromverbrauchs von PV-Anlagen gibt es aktuell einen steigenden Trend zur Anschaffung von Batteriespeichern, finanziell begünstigt unter anderem durch ein bundesweites Förderprogramm der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW). Gemäß Figgenger et al. (2017) wurde in Deutschland im Jahr 2016 fast jede zweite kleine PV-Anlage bereits zusammen mit einem Batteriespeicher installiert. Ende April 2017 waren etwa 61.000 dezentrale Solarstromspeicher mit einer kumulierten nutzbaren Speicherkapazität von etwa 400 MWh an die deutschen Niederspannungsnetze angeschlossen.

Auch in den kommenden Jahren sind aus mehreren Gründen erhebliche Wachstumssteigerungen bei Batteriespeichern zu erwarten, begünstigt durch die schnelle Kostendegression vor allem bei Lithium-Ionen-Speichern:

- In naher Zukunft werden die ersten auf 20 Jahre befristeten EEG-Förderungen auslaufen. Aufgrund der um die Jahrtausendwende noch sehr hohen Kosten für PV-Anlagen lag die Förderung für den ins Netz eingespeisten Strom bei 51 Cent/kWh. Nach Auslaufen der EEG-Förderung erhalten diese Haushalte für die Stromeinspeisung jedoch nur noch die Börsenstrompreise, also zwei bis drei Cent/kWh. Von daher besteht ein großer Anreiz einen möglichst hohen Anteil des erzeugten Stroms selbst zu nutzen, was durch Batteriespeicher erleichtert wird.
- Auch bei der Installation neuer PV-Anlagen mit der aktuellen Förderung von 12,7 Cent/kWh besteht aufgrund der immer noch großen Differenz zum Durchschnittspreis für Haushaltsstrom mit derzeit rund 30 Cent/kWh ein Anreiz zur Nutzung von Eigenstrom und zur Kombination der PV-Anlagen mit Batteriespeichern.

Hintergrund ist, dass sich die Produktion von Photovoltaik-Strom und die Stromnachfrage der Haushalte nur bedingt überschneiden, sowohl jahreszeitlich (niedrige Erträge der PV-Anlage in den Wintermonaten, hoher Stromverbrauch gerade in den Wintermonaten, vor allem für Heizungspumpe und Licht), wie auch im Tagesablauf (hohe PV-Produktion mittags bzw. am Vor- und Nachmittag, Hauptstromverbrauch in den Haushalten tendenziell frühmorgens und abends). Dementsprechend kann bei Haushalten mit Photovoltaik-Anlage in der Regel kein hoher Eigenstromverbrauchsanteil erreicht werden. Der Eigenverbrauch kann jedoch deutlich erhöht werden, wenn der von der PV-Anlage erzeugte Strom in einer Batterie zwischengespeichert und dann zum Zeitpunkt des Strombedarfs verbraucht wird.

Zielsetzung: Optimale Netzeinbindung von Photovoltaik-Batteriespeichern

Der zu erwartende Boom bei Batteriespeichern ist aus Sicht der Netzbetreiber nicht unkritisch, vor allem, wenn diese ausschließlich auf die Eigenverbrauchsoptimierung einzelner Haushalte ausgelegt sind. Eine wachsende Zahl an individuellen Batteriespeichern hat bereits heute Auswirkungen auf den Betrieb von Netz und Markt. Besonders der nicht-netzoptimierte Betrieb dieser Anlagen kann zu Spannungsschwankungen im Verteilnetz führen und so die Funktionalität des Netzes beeinflussen. Auch führt eine ausschließliche Optimierung des Eigenverbrauchs im Markt zu Effizienzverlusten und erhöhten Systemkosten im Gesamtnetz. Bei netzoptimierter Steuerung, eventuell gar mit erlaubtem externen Zugriff durch die Netzbetreiber, könnten die PV-Batteriespeicher dagegen eine sinnvolle Funktion für das Gesamtnetz wahrnehmen, zum Beispiel durch Verringerung von Lastspitzen.

Kombination der Ziele „Ausbau von Photovoltaik“ und „Reduzierung des Stromverbrauchs“

Als Entscheidungsgrundlage zum Einbau einer PV-Anlage und eines Batteriespeichers werden von den Anbietern häufig Investitionsrechnungen über 20 Jahre vorgelegt. Die Möglichkeit von vorgezogenen Stromeinsparungen zur Reduktion der Anlagengrößen wird von den Herstellern in der Regel nicht adressiert oder einbezogen, da dies das eigene Geschäft schmälern würde, und wird von den Haushalten vermutlich auch nicht eingefordert. Überschlägige Rechnungen zeigen jedoch ein sehr großes finanzielles Einsparpotenzial durch Stromsparen, das erst durch die Investitionsrechnung über 20 Jahre deutlich wird. Das Öko-Institut hat daher im Rahmen eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Verbundprojektes (Graulich et al. 2018) in Kooperation mit dem Büro Ö-quadrat ein Beratungstool für private Haushalte entwickelt, mit dem die Wirtschaftlichkeit von PV-Anlagen und Batteriespeichern berechnet wird, jedoch erstmalig kombiniert mit der Berücksichtigung der finanziellen Potenziale von Stromsparmaßnahmen („Stromspar-Speicherrechner“, siehe Abbildung 2-1).

Abbildung 2-1: Stromspar-Speicherrechner des Öko-Instituts zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit von PV-Batteriespeichern unter Einbezug von Stromsparen

BERATUNGSTOOL BATTERIESPEICHER

Eingabemaske

Wichtige Bedienungshinweise

 Eingabefelder: In den blau umrandeten Feldern werden vom Nutzer Eingaben erwartet

 Ausgabefelder: Hier werden Ergebnisse oder Zwischenergebnisse dargestellt.

Überschreiben **Überschreibungsfelder** können vom Nutzer überschrieben werden. Wird kein Wert eingegeben, verwendet das Programm einen vordefinierten Wert.

Verbrauchswerte und Berechnung der Stromeffizienzklasse

Jahresstromverbrauch (kWh/a)

Haushaltsgröße (Personen im Haushalt)

Gebäudetyp Wohnung im Mehrfamilienhaus 1-2 Familienhaus/Reihenhaus/Doppelhaushälfte

Elektrisch Warmwasser Ja Nein

Die derzeitige Stromeffizienzklasse Ihres Haushaltes ist: Klasse C

Die Skala der Stromeffizienzklassen geht von **A (sehr gut) bis G (sehr schlecht)**. Die Einstufung berechnet sich aus Ihrem Jahresstromverbrauch, der Haushaltsgröße, dem Gebäudetyp und ob sie Ihr Warmwasser elektrisch aufbereiten.

[zu den SEK Klassen](#)

Dimensionierung und Bestimmung des Solarertrages der PV-Anlage

PV Anlage bereits vorhanden? Ja Nein

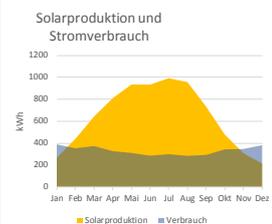
PV-Neuanlage

Vorhandene Dachfläche in m ²	<input style="width: 100px;" type="text" value="50"/>
Nennkapazität der PV-Anlage (kWp) (max. 10 kWp)	<input style="width: 100px;" type="text" value="8,0 kWp"/>
Kosten für PV Anlage in Euro	<input style="width: 100px;" type="text" value="10.240 €"/> <small>Überschreibbar</small>
Geplanter Installationszeitpunkt PV-Anlage (Monat und Jahr)	<input style="width: 100px;" type="text" value="Dezember"/> <input style="width: 100px;" type="text" value="2017"/>

PV-Bestandsanlage

PV Anlage zur ausschließlichen Netzspeisung?	<input type="radio"/> Ja <input checked="" type="radio"/> Nein
Nennkapazität der PV-Anlage (kWp) (max. 10 kWp)	<input style="width: 100px;" type="text" value="8,0 kWp"/>
Monat und Jahr der Inbetriebnahme der PV-Anlage	<input style="width: 100px;" type="text" value="März"/> <input style="width: 100px;" type="text" value="2009"/>
Geplanter Installationszeitpunkt Batteriespeicher (Jahr)	<input style="width: 100px;" type="text" value="2018"/>

Solarproduktion und Stromverbrauch



Quelle: Öko-Institut e.V.

Zielsetzung: Gezielte Adressierung von Haushalten mit höherem Stromverbrauch und höherem Einkommen für das Stromsparen

Gemäß Figgener et al. (Figgener et al. 2017) werden PV-Batteriespeicher tendenziell häufiger von Haushalten mit erhöhtem Stromverbrauch im Vergleich zum durchschnittlichen Stromverbrauch deutscher Privathaushalte gekauft und installiert. Bei den Gründen für die Investition in ein Speichersystem wird die Absicherung gegen steigende Strompreise als eines der Hauptmotive aufgeführt, und ist bei Haushalten mit höheren Verbräuchen von besonderer Relevanz.

Mit dem Stromspar-Speicherrechner des Öko-Instituts können daher als Adressaten gezielt Haushalte mit höherem Einkommen, aber auch höherem Verbrauch erreicht werden. In diesen Haushalten spielt bei der geplanten Investition in einen Batteriespeicher die Berechnung der Wirtschaftlichkeit eine Rolle. Die im Beratungstool ergänzend vorgeschlagenen Stromsparmaßnahmen und dafür erforderliche finanzielle Investitionen stehen nicht einzeln für sich, sondern werden in die Berechnungen zur Gesamtwirtschaftlichkeit integriert und bieten daher einen zusätzlichen ökonomischen Anreiz zur Umsetzung. Man erreicht die Haushalte zu einem Zeitpunkt, an dem sie gewillt sind, eine Investition in der Größenordnung von mehreren Tausend Euro (für einen Batteriespeicher) zu tätigen. Anders als zum Beispiel bei einkommensschwachen Haushalten erscheint die Investition in Stromsparmaßnahmen (zum Beispiel für den Austausch ineffizienter Altgeräte) daher umsetzbarer, wenn sie gesamtwirtschaftlich sinnvoll ist.

3. Einsatz von Photovoltaik-Batteriespeichern

Der mit einer Photovoltaik-Anlage erzeugte Strom kann vom Haushalt anteilig direkt verbraucht oder ins öffentliche Stromnetz eingespeist werden. Für die Einspeisung von Strom ins Netz erhält der Betreiber der Photovoltaik-Anlage durch das „Gesetz zur Förderung der erneuerbaren Energien (EEG)“ eine so genannte Einspeisevergütung (siehe Anhang).

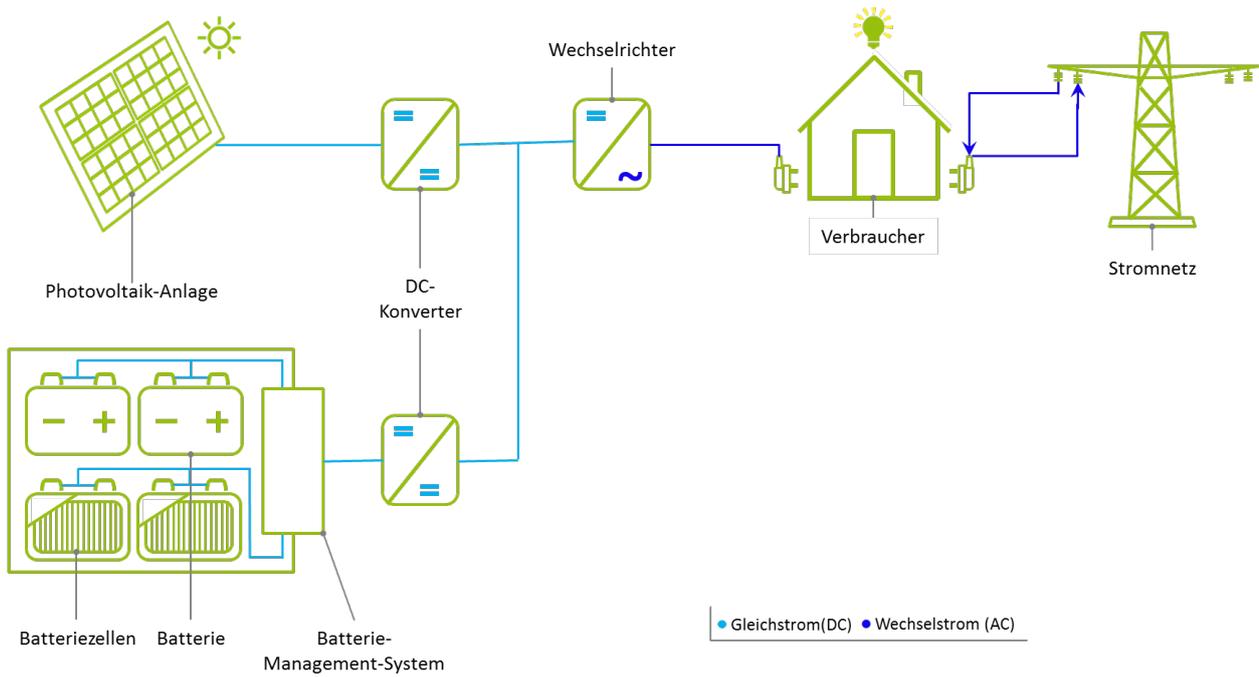
Ist die Vergütung für die Einspeisung höher als die Kosten für den Bezug von Haushaltsstrom, so lohnt sich eher die Einspeisung des eigenproduzierten Stroms ins Netz; zur Deckung des Strombedarfs kann der Haushalt zu niedrigeren Kosten Strom von einem externen Stromversorger beziehen. Sind jedoch die Strompreise am Markt höher als die gesetzliche Einspeisevergütung, so kann es wirtschaftlicher sein, den produzierten Strom selbst zu verbrauchen anstatt einzuspeisen. In vielen Fällen fallen jedoch der Zeitpunkt der Stromerzeugung der Photovoltaik-Anlage (tagsüber, höhere Stromerzeugung in den Sommermonaten) und des benötigten Stroms (morgens und abends, höherer Strombedarf in den Wintermonaten) auseinander. Ein Photovoltaik-Batteriespeicher dient in diesen Fällen dazu, den von der Photovoltaikanlage erzeugten Strom zu speichern und zeitversetzt dann wieder zur Verfügung zu stellen, wenn der Strom im Haushalt benötigt wird. Die Haushalte können mit einem Batteriespeicher somit einen höheren Anteil ihres erzeugten Stroms selbst nutzen.

3.1. Allgemeiner Aufbau eines PV-Batteriespeichersystems

Für die Installation eines Batteriespeichersystems sind neben den eigentlichen Batterien, die sich wiederum aus mehreren Batteriezellen zusammensetzen, weitere Komponenten notwendig (Batterie-Management-System sowie Wechselrichter). Das Batterie-Management-System (BMS) steuert die Be- und Entladung der Batterie, und je nach Ausgestaltung (einfacher Laderegler versus Energiemanagementsystem) die optimale Nutzung des Batteriespeichers. Zusätzlich sind mehrere Umrichter notwendig, die für eine optimale Spannung zur Ladung des Batteriespeichers sorgen (DC-Konverter) oder den in der Batterie gespeicherten Gleichstrom für den Einsatz im Haushalt zu Wechselstrom umwandeln (Wechselrichter).

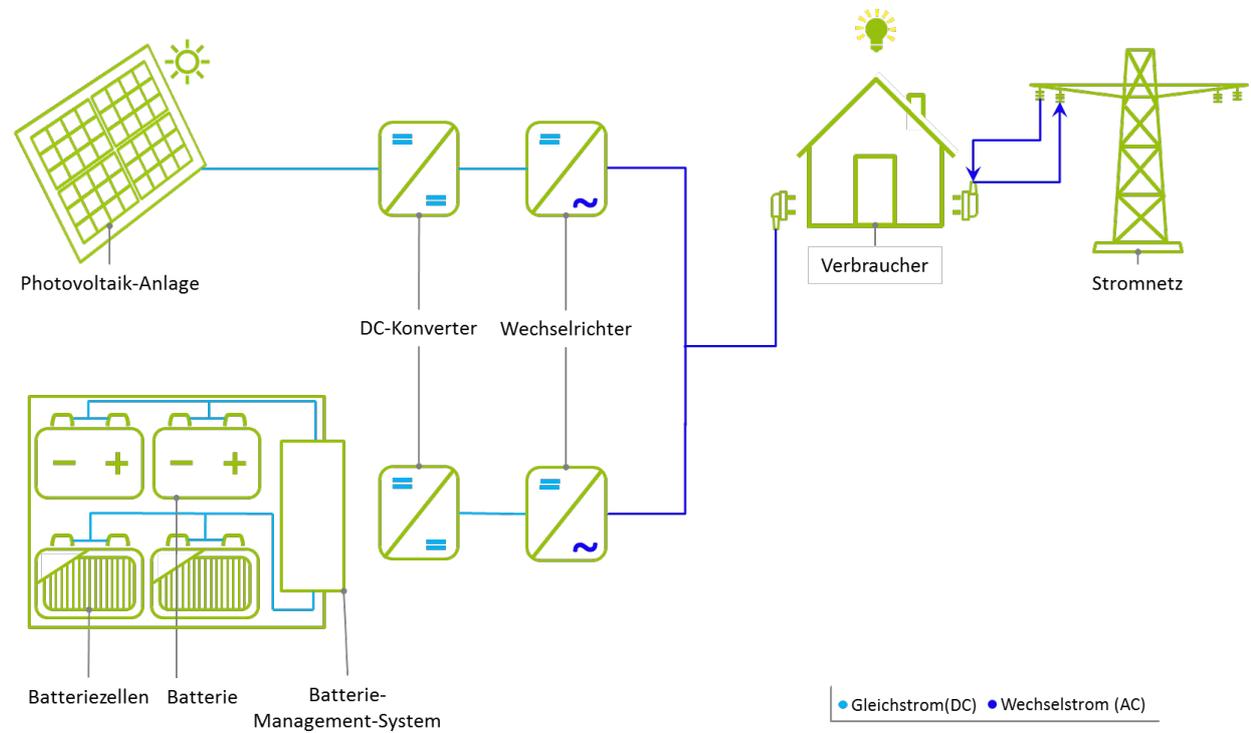
Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten, den Batteriespeicher in das Gesamtsystem zu integrieren. Da Solarstromspeicher mit Gleichstrom be- und entladen werden, kann die Batterie zusammen mit der PV Anlage, die ebenfalls Gleichstrom produziert, als sogenannte DC-Kopplung vor dem Wechselrichter installiert werden (siehe Abbildung 3-1). Alternativ können Solarstromspeicher als AC-Kopplung mit einem eigenen Wechselrichter in den Wechselstromkreis eingebaut werden (siehe Abbildung 3-2).

Abbildung 3-1: Schema eines DC-gekoppelten Batteriespeichersystems



Quelle: Öko-Institut 2017

Abbildung 3-2: Schema eines AC-gekoppelten Batteriespeichersystems



Quelle: Öko-Institut 2017

Beide Bauarten bieten jeweils Vor- und Nachteile. Wie Tabelle 3-1 zu entnehmen ist, bieten sich AC-Kopplungen vor allem beim Nachrüsten bestehender PV-Anlagen mit Batteriespeichern, DC-Kopplungen hingegen bei komplett neu installierten Systemen an.

Tabelle 3-1: Vor- und Nachteile einer DC / AC Batteriekopplung

	DC-Systeme	AC-Systeme
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Tendenziell geringere Umwandlungsverluste • Geringer Platzbedarf des integrierten Systems 	<ul style="list-style-type: none"> • Höhere Flexibilität • Einfachere Nachrüstung bestehender Systeme
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Flexibilität • Aufwändiges Nachrüsten bestehender Systeme 	<ul style="list-style-type: none"> • Freie Skalierung des Batteriesystems • Höhere Kosten durch zusätzlichen Wechselrichter • Höherer Platzbedarf durch zwei separate Systeme • Tendenziell höhere Umwandlungsverluste

Quelle: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Ba-Wü (2017), nach RWTH Aachen / www.speichermonitoring.de

3.2. Verschiedene Technologien bei Photovoltaik-Batteriespeichern

Der Markt an PV-Batteriespeichern ist vielfältig. Während ursprünglich Bleibatterien die dominierende Technologie war, sind mittlerweile Lithium-Ionen-Batterien am weitesten verbreitet. Laut Solarstromspeicher-Preismonitor Deutschland (Tepper 2016) verteilte sich der Speicherabsatz der für den Monitor befragten Installateure im ersten Drittel des Jahres 2016 zu 94 Prozent auf Lithium- und zu 6 Prozent auf Bleispeicher, letztere mit weiter sinkenden Marktanteilen. Innerhalb der Lithium-Batteriespeicher gibt es wiederum eine Vielzahl von Elektrolyten und Kombinationen von Elektrodenmaterialien, die sich in ihren Eigenschaften wie Zyklfestigkeit, spezifische Kapazität etc. voneinander unterscheiden. Jenseits der Blei- und Lithiumspeicher sind zudem vereinzelt PV-Batteriespeicher auf Basis von Salzwasser als Elektrolyt, sowie Vanadium-Redox-Flow-Batteriespeicher verfügbar. Die für die Zukunft zu erwartenden weiteren Kostendegressionen bei Lithium-Ionen-Batterien lassen darauf schließen, dass der Einsatz von Blei-Batterien bei zukünftig installierten Speichern in Deutschland keine signifikante Rolle mehr spielen wird.

Blei-Säure-Akkumulatoren

Bei Blei-Säure-Akkumulatoren bestehen sowohl die negative als auch die positive Elektrode aus Blei bzw. einer Bleilegierung. Als Elektrolyt dient Schwefelsäure, die an der Zellreaktion teilnimmt. Im geladenen Zustand bestehen die positive Elektrode aus Bleidioxid (PbO₂) und die negative aus Blei (Pb). Zusammen mit der Schwefelsäure bildet sich beim Entladen an beiden Elektroden Bleisulfat (PbSO₄), das beim Laden wieder in Bleidioxid bzw. in Blei zurückverwandelt wird.

Lithium-Ionen-Akkumulatoren

Bei Lithium-Ionen Akkumulatoren enthält die positive Elektrode als Aktivmaterialien entweder Übergangsmetalloxide wie Lithium-Kobaltoxid (LCO), Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminiumoxid (LNCA), Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid (LNMC) oder Lithium-Manganoxid (LMO), oder Übergangsmetallphosphate wie Lithium-Eisenphosphat (LFP).

Gemäß „Marktübersicht Batteriespeicher 2017“ (C.A.R.M.E.N. e.V. 2017) kommen im Bereich der Photovoltaik-Batteriespeicher im Wesentlichen Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid (LNMC) und Lithium-Eisenphosphat (LFP) zum Einsatz.

Die Aktivmaterialien der negativen Elektrode bestehen in der Regel aus Graphit oder anderen kohlenstoffhaltigen Materialien. Laut Köhler et al. (2017) wird mehrheitlich Graphit verwendet, da es sich durch geringe Materialkosten auszeichnet. Neuere Entwicklungen nutzen Nanomaterialien mit Silizium, Zinn, Aluminium oder nanostrukturiertes Lithiumtitanat. So unterscheidet man zum Beispiel bei Lithium-Eisenphosphat-Batterien zwischen C-LFP mit Anode auf Basis einer Graphitstruktur, d.h. Kohlenstoff, sowie LTO-LFP auf Basis von Lithiumtitanoxid.

Beim Laden wird Lithium aus der positiven Elektrode entfernt und nach Transport durch den Elektrolyten in die negative Elektrode eingelagert, während beim Entladen der Vorgang in umgekehrter Richtung abläuft (Stahl et al. 2016). Als Elektrolyte werden aufgrund der hohen Reaktivität metallischen Lithiums gegenüber Wasser oder feuchter Luft gemäß Wohlfahrt-Mehrens (o.J.) nur Lösungen wasserfreier Lithiumsalze in organischen Lösemitteln oder Festkörperelektrolyte verwendet.

Salzwasser-Akkumulatoren (Aqueous-Hybrid-Ion, AHI)

Die „Salzwasserbatterie“ wird im Englischen als Aqueous Hybrid Ion (AHI) Battery bezeichnet. Die Kathode besteht aus Lithium-Manganoxid, die Anode aus Kohlenstoff („activated carbon“), der Separator aus Baumwollvlies und der Elektrolyt aus Salzwasser auf Basis von Natrium-Sulfat. Im Gegensatz zu Lithium-Ionen-Akkus, bei denen ausschließlich Lithium-Ionen den Ladungstransport zwischen Anode und Kathode übernehmen, handelt es sich bei der Salzwasserbatterie gemäß Würtenberg (2014) um ein System, das man als „poly-ionisch“ bezeichnen könnte. Dabei wird die Ladung sowohl von Lithium- als auch von Natrium-Ionen transportiert. Dazu kommen Wasserstoff-Protonen, die bei einem bestimmten Ladezustand entstehen und ebenfalls Ladung transportieren.

Der Batterietyp „Aqueous-Hybrid-Ion“ wurde von dem US-amerikanischen Unternehmen Aquion Energy entwickelt und patentiert. Der Batterietyp von Aquion Energy wurde bis Anfang des Jahres 2017 auch in Deutschland zum Verkauf angeboten. Aquion Energy meldete dann jedoch Insolvenz an; der Bieterprozess wurde Mitte 2017 entschieden; laut Mayer (2017) hat ein chinesisches Unternehmen den Zuschlag erhalten und Verhandlungen mit dem Österreichischen Unternehmen BlueSky Energy aufgenommen, die bislang europäischer Anbieter der Salzwasser-Batterie waren.

Redox-Flow-Akkumulatoren

Bei Redox-Flow-Batterien befindet sich das Aktivmaterial in der Lösung des wässrigen Elektrolyten, die in zwei separaten Tanks gelagert werden. Für die elektrochemische Reaktion zirkulieren die beiden Flüssigkeiten über Pumpen in zwei getrennten Kreisläufen. Im durchströmten „Reaktor“ kommt es dann zu den Lade- und Entladevorgängen mittels Ionenaustausch über eine Membran. Der Aufbau bei diesem Batterietyp ist durch die Tanks, Pumpen und Leitungen aufwändiger als bei den andern dargestellten Batterien und führt zu höheren Verlusten und einem größeren Wartungsaufwand (Stahl et al. 2016). Im Privatbereich spielen Redox-Flow-Batterien derzeit eine untergeordnete Rolle. Laut „Produktdatenbank Batteriespeichersysteme für Photovoltaikanlagen“ (PV Magazine 2017) gibt es derzeit nur einen Hersteller, der PV-Batteriespeicher auf Basis von Vanadium Redox-Flow anbietet.

3.3. Allgemeiner Systemvergleich der PV-Batteriespeichertechnologien

Tabelle 3-2: Technischer Vergleich der verschiedenen PV-Speichertechnologien

	Blei	Aqueous Hybrid Ion	Lithium-Ionen (LFP und LNMC)
Kalendarische Lebensdauer	10-20 Jahre (überwiegend 10 Jahre)	15 Jahre	>10 bis >20 Jahre (überwiegend 20 Jahre)
Zykluslebensdauer	2.500-4.200 Vollzyklen (80% Restkapazität)	3.000 Vollzyklen (70% Restkap.)	4.000-15.000 Vollzyklen (80% Restkapazität); LFP höher als LNMC
Entladetiefe (Depth of Discharge, DoD)	50-100% (überwiegend 60%)	100%	70-100% (überwiegend 90%)
Wirkungsgrad Batterie	80-85%	80-90%	90-95%
Volumetrische Energiedichte	60-75 Wh/l	12-24 Wh/l	490-580 Wh/l (LNMC) 160-260 Wh/l (LFP)
Sicherheit	Bei starker Überladung / Überentladung können bleihaltige Partikel freigesetzt werden.	Elektrolyt weder brennbar noch explosiv.	Gefahr des „thermal run-away“; LFP zersetzt sich im Gegensatz zu LNMC nicht unter Sauerstoffentwicklung
Wartungsaufwand	hoch (Ausnahme: VRLA, valve-regulated lead-acid battery)	sehr gering	gering bis sehr gering

Quellen: Doelling (2017); C.A.R.M.E.N. e.V. (2017); Verbraucherzentrale Nordrhein-Westfalen (2016); Aquion Energy (o.J.); BlueSky Energy (2017); BlueSky Energy (o.J.); Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Ba-Wü (2017); Stahl et al. (2016); Petersen (2015); Köhler et al. (2017)

Lebensdauer

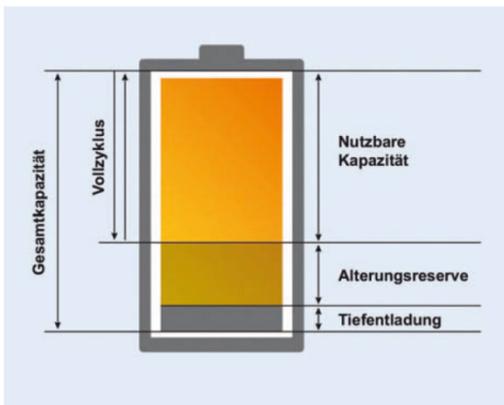
Die Lebensdauer einer Batterie wird in der Regel sowohl als kalendarische Lebensdauer in Jahren als auch als zyklische Lebensdauer mit der Zyklenzahl angegeben. Die Zykluslebensdauer ist die Anzahl der Vollzyklen, also der möglichen Be- und Entladungen, bevor die Kapazität der Batterie auf 80 Prozent der ursprünglichen Gesamtkapazität gesunken ist. Aus dem spezifischen Anwendungsprofil des Haushalts – bei einem Durchschnittshaushalt z.B. ca. 250 Vollzyklen im Jahr – ergibt sich die zu erwartende Lebensdauer in Jahren. Die kalendarische Alterung beschreibt die Alterung durch chemische Zerfallsprozesse. Diese treten auch auf, wenn der Speicher gar nicht in Betrieb ist. Je nach Anwendungsprofil ist der eine oder der andere Parameter für die Lebensdauer bestimmender. (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Ba-Wü 2017)

Die durchschnittliche Lebensdauer der verschiedenen Batterietechnologien beträgt für Bleibatterien 10 Jahre, für die Salzwasserbatterie 15 Jahre und für Lithium-Ionen-Batterien 20 Jahre. Während Sauer (2013) in seinem Kurzgutachten zum Marktanreizprogramm für dezentrale Speicher insbesondere für PV-Strom die kalendarische Lebensdauer für Bleibatterien noch mit einer Bandbreite von 5 bis 15 Jahren, und für Lithium-Ionen-Batterien mit 5 bis 20 Jahren charakterisierte, zeigt die aktuelle Marktübersicht zu Batteriespeichern der Verbraucherzentrale NRW, dass sich die Werte mehr und mehr überlappen und es sowohl bei Blei- als auch bei Lithium-Ionen-Batterien Produkte mit einer Lebensdauer zwischen 10 und 20 Jahren gibt. (Verbraucherzentrale Nordrhein-Westfalen 2016) Laut Köhler et al. (2017) hat innerhalb der Lithium-Ionen-Batterien LFP eine deutlich höhere Anzahl an Vollzyklen als LNMC.

Entladetiefe

Die Entladetiefe, auch bezeichnet als Depth of Discharge (DoD), gibt an, wie viel Prozent der Nennkapazität der Batterie genutzt werden kann (Nutzkapazität), ohne dabei die Lebensdauer signifikant negativ zu beeinflussen. Die reale Entladetiefe beeinflusst somit die Batterielebensdauer: eine vollständige Entladung um 100 Prozent könnte sich je nach Batterietechnologie negativ auf die Lebensdauer der Batterie auswirken. (C.A.R.M.E.N. e.V. 2017) Die Nutzkapazität bezeichnet somit den Teil der Kapazität, der tatsächlich für eine Anwendung im Betrieb zur Verfügung steht, siehe auch Abbildung 3-3.

Abbildung 3-3: Unterscheidung zwischen Nenn- und Nutzkapazität der Batteriespeicher



Quelle: (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Ba-Wü 2017)

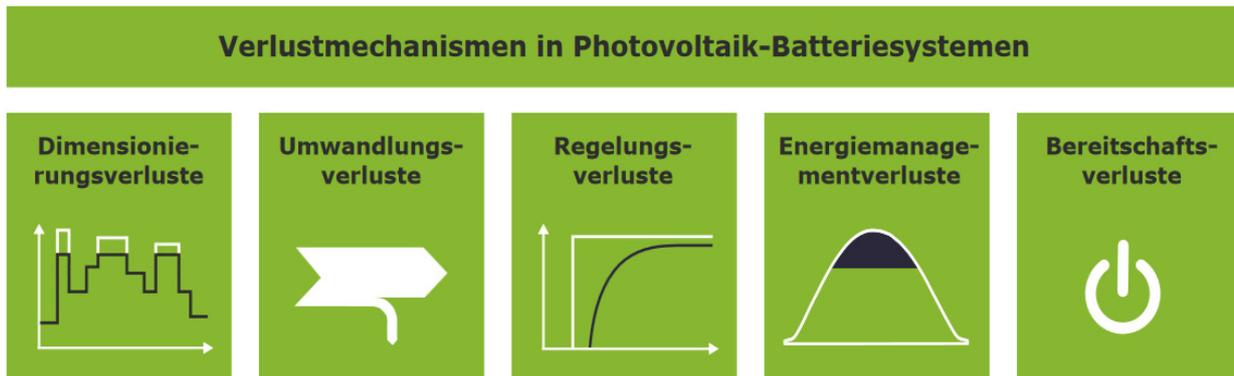
Während bei Salzwasserbatterien die Entladetiefe laut Herstellerangaben (Aquion Energy o.J.) bis zu 100 Prozent nutzbar ist, d.h. sie vollständig entladen werden können, liegt die Entladetiefe bei Lithium-Ionen-Batterien überwiegend bei 90 Prozent. Blei-Säure-Batterien nutzen nach Figgner et al. (2017) im Gegensatz dazu typischerweise nur 50 bis 60 Prozent ihrer installierten Kapazität zur Zyklierung, um Alterungsprozesse wie Sulfatierung bei niedrigen Ladezuständen oder Ausfall von Aktivmaterial durch mechanischen Stress zu vermeiden und dadurch akzeptable Lebensdauern zu gewährleisten. Bei gleicher nominaler Speicherkapazität steht Blei-Säure-Batterien somit weniger nutzbare Speicherkapazität zur Verfügung als Lithium-Ionen- oder Salzwasserbatterien. Bei Tiefentladung würde die Lebensdauer von Bleibatterien stark beeinträchtigt, so dass für einen optimierten Betrieb Ladekontrolle und Tiefentladungserkennung erforderlich sind. (Stahl et al. 2016)

Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad ist definiert als die zur Verfügung stehende Energie beim Entladen, dividiert durch die eingespeicherte Energie, das heißt das Verhältnis von gespeicherter zu später wieder abgegebener Energie. Er verdeutlicht somit Leistungsverluste. Je größer der Effizienzverlust, desto weniger Energie kann im Haushalt genutzt werden. Unterscheiden muss man zwischen dem Wirkungsgrad der Batterie an sich, wie in Tabelle 3-2 angegeben, und der Systemeffizienz (Gesamtwirkungsgrad). Lithium-Ionen-Batterien weisen mit bis zu 95 Prozent den größten Wirkungsgrad auf. Bei den Bleibatterien ist der Wirkungsgrad mit bis zu 85 Prozent im Vergleich geringer. Der Wirkungsgrad der Salzwasserbatterie liegt mit 80 bis 90 Prozent etwas höher als der von Bleibatterien, ist jedoch geringer als der Wirkungsgrad von Lithium-Ionen-Speichern.

Der Gesamtwirkungsgrad setzt sich aus den einzelnen Teilwirkungsgraden aller beteiligten Geräte zusammen, d.h. von Batterie, Laderegler und Wechselrichter. Dabei ergeben sich nach Weniger et al. (2017) Systemverluste durch der leistungselektronischen Komponenten, den Batteriespeicher und die Systemregelung, d.h. Dimensionierungsverluste (bedingt durch Leistungsbeschränkungen der Systemkomponenten), Umwandlungsverluste (durch die Energieumwandlung in den leistungselektronischen Komponenten und im Batteriespeicher), Regelungs- und Energiemanagementverluste sowie Bereitschaftsverluste (durch Leistungsaufnahme der Komponenten, z.B. dem Batteriemanagementsystem, im Leerlauf- oder Standby-Betrieb), siehe Abbildung 3-4.

Abbildung 3-4: Verlustmechanismen in Photovoltaik-Batteriesystemen



Quelle: Weniger et al. (2017)

Bereitschaftsverluste eines Batteriespeichersystems entstehen unabhängig von den Wirkungsgraden bei der Leistungsumwandlung. Sie entstehen im sogenannten Leerlauf- und Standby-Betrieb (Baars 2017). Als Leerlaufverbrauch wird der Energiebedarf des Speichers bezeichnet, wenn dieser weder lädt noch entlädt, sich jedoch in Bereitschaft für sofortiges Laden bzw. Entladen befindet. Der Standby-Verbrauch beschreibt den Stromverbrauch des Systems während dieses nicht aktiv ist, also weder laden noch entladen kann. Im Gegensatz zum Leerlauf ist das Batteriespeichersystem dabei nicht verfügbar, also nicht in sofortiger Bereitschaft.

Gemäß der C.A.R.M.E.N. Marktübersicht (Stand Februar 2017)⁴ liegt der durchschnittliche Leerlaufverbrauch für Lithium-Speichersysteme mit einer Speicherkapazität von weniger als 15 kWh bei 29,8 Watt, bei einer Bandbreite von 1 bis 90 Watt. Der durchschnittliche Standby-Verbrauch der erfassten Systeme liegt bei 9,2 Watt, bei einer Bandbreite von 0,1 bis 20 Watt. Allgemein variiert der Standby-Verbrauch je nach Art des Speichersystems. Systeme zur Garantie einer Ununterbrochenen Stromversorgung (USV) können je nach Modell und Baujahr sogar bis zu 100 Watt Standby-Verbrauch aufweisen (PV Magazine 2016) .

⁴ www.carmen-ev.de/files/Sonne_Wind_und_Co/Speicher/Markt%3%BCbersicht-Batteriespeicher_2016.pdf , zuletzt aufgerufen am 04.09.2017

Energiedichte

Die volumetrische Energiedichte der Salzwasserbatterie liegt deutlich unterhalb der üblichen Energiedichten von Blei-Säure- oder Lithium-Ionen-Batterien, welche die höchste Energiedichte aufweisen (innerhalb der Lithium-Ionen-Batterien haben LNMC-Batterien wiederum eine höhere Energiedichte als LFP-Batterien). Bei Salzwasser- und Bleibatterien steigt deshalb gegenüber den derzeit üblichen Lithium-Speichern entweder der Raumbedarf, oder der Kunde muss bei vergleichbarer Größe Abstriche bei der Speicherkapazität in Kauf nehmen.

Sicherheit und Wartung

Bleibatterien sind grundsätzlich wartungsintensiver als Lithium-Ionen-Batterien. Es muss regelmäßig destilliertes Wasser nachgefüllt werden.

Nach Stahl et al. (2016) ist bei Überladung von Bleibatterien eine Wasserstoffentwicklung zu berücksichtigen. Bei starker Überladung und bei Überentladung kann das Batteriegehäuse versagen, so dass in diesem Fall Schwefelsäure und bleihaltige Partikel freigesetzt werden können. Die Batterieräume müssen daher ausreichend gut belüftet sein. Empfohlen werden gemäß Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Ba-Wü (2017) eine regelmäßige Spannungsmessung und Temperaturkontrolle sowie insbesondere die Prüfung der ordnungsgemäßen Be- und Entlüftung des Raums. Eine wartungsarme Variante innerhalb der Bleibatterien ist laut Köhler et al. (2017) eine ventilgeregelte Blei-Säure-Batterie (englisch: ‚valve-regulated lead-acid battery‘, VRLA) mit Überdruckventil und gel-artigem Elektrolyt; ein Nachfüllen von destilliertem Wasser ist bei diesem Batterietyp nicht nötig.

Laut Umweltbundesamt (2015) sind Lithium-Batterien bei ordnungsgemäßigem Umgang allgemein als sicher anzusehen. Dennoch können sich Gefahren durch mechanische Beschädigungen, elektrische Fehler, falsche Ansteuerung (z.B. unkontrollierte Überladung oder Tiefentladung) sowie thermische Einwirkungen ergeben: Durch mechanische Beschädigungen können gasförmige oder flüssige Stoffe austreten, welche stark reizend, brennbar oder sogar giftig sein können. Ein elektrischer Fehler, z.B. ein Kurzschluss durch Produktionsfehler, kann zur Überhitzung und zum Brand führen. Auch die äußere Erwärmung einer Lithium-Batterie, z.B. durch Sonneneinstrahlung oder Heizung, kann zum Brand oder zur Explosion führen. Diese Kettenreaktion wird als so genannter „thermal runaway“ bezeichnet.

Innerhalb der unterschiedlichen Lithium-Ionen-Batterietypen gibt es laut Karlsruher Institut für Technologie, KIT, zitiert in ENBAUSA (2014), keine wesentlichen Unterschiede in Bezug auf die Entflammbarkeit. Die wesentlichen Bestandteile der Lithium-Eisenphosphat-Batterien sind identisch mit den übrigen Lithium-Ionen Batterien. Der Elektrolyt ist in beiden Fällen eine leicht entzündliche organische Flüssigkeit, beziehungsweise bei höheren Temperaturen ein leicht entzündliches Gas, das im Falle eines Brandes in der Regel zunächst brennt. Dasselbe gelte für die Anode, wenn sie bei Lithium-Eisenphosphat-Batterien wie bei den übrigen Lithium-Ionen Batterien aus Kohlenstoff oder Graphit ist und im Brandfall daher eine zusätzliche Brandlast darstellt. Einzig die Kathode von Lithium-Eisenphosphat-Akkus sei weniger brennbar im Vergleich zu anderen Lithium-Ionen Batterien. Nach Stahl et al. (2016) zersetzt sich LFP bei hohen Temperaturen nicht unter Sauerstoffentwicklung. Der Recyclingkonzern Umicore⁵ stuft – im Falle eines Brandes – kobalthaltige Lithium-Ionen Batterien als problematischer ein als andere Lithium-Ionen Batterien, weil sie im Laufe der Reaktion Sauerstoff freisetzen und damit schwerer zu löschen sind. Zudem sind die Energiedichten bei kobalthaltigen Batterien oft höher.

⁵ Telefonische Mitteilung vom 22.09.2017, Gespräch geführt mit Christian Hagelüken und Frank Treffer (Umicore)

Bei der Salzwasserbatterie besteht die positive Elektrode aus Lithium-Mangan-Oxid (LMO), das sich nach (Stahl et al. 2016) zwar auch bei hohen Temperaturen unter Wärmeentwicklung und Sauerstoffentwicklung zersetzen kann. Die Salzwasser-Batterie gilt gemäß BlueSky Energy (2017) jedoch als extrem sicher, da das wässrige Elektrolyt weder brennbar noch explosiv ist. Die Salzwasser-Batterie ist laut BlueSky Energy (2017) zudem absolut wartungsfrei.

3.4. Vergleichende Analyse der PV-Batteriespeichertechnologien

Im Rahmen einer Studie für die Elektrizitätswerke Schönau hat das Öko-Institut eine vergleichende Analyse der verschiedenen Batteriespeichertechnologien durchgeführt (Graulich & Manhart 2017). Im Fokus standen dabei die Kriterien Gefahrstoffe, Sicherheit und Lebensdauer sowie eingesetzte Rohstoffe und Recycling. Die Analyse zeigt, dass keine der Batterietechnologien uneingeschränkt empfehlenswert ist, bei Salzwasser- und Lithium-Eisenphosphat-Batterien jedoch die positiven Aspekte überwiegen (siehe Tabelle 3-3).

Bei der spezifischen Auswahl eines PV-Batteriespeichers sollten Haushalte schließlich nicht nur auf Kosten, Speicherkapazität und Wartungsaufwand achten, sondern soweit möglich auch weitere Parameter einbeziehen wie Qualität und Langlebigkeit, Reparatur- und Recyclingfreundlichkeit, Rücknahme am Ende der Lebensdauer sowie Serviceangebote der Hersteller.

Tabelle 3-3: Vor- und Nachteile der verschiedenen PV-Batteriespeichertechnologien

<p>Salz- wasser- Batterien</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Vorteile: <ul style="list-style-type: none"> – <u>Gefahrstoffe</u>: Die in den Batteriezellen enthaltenen Substanzen sind überwiegend nicht als Gefahrstoffe für Umwelt oder Gesundheit klassifiziert bzw. besitzen im Vergleich zu anderen Batterietechnologien vergleichsweise niedrige Wirkfaktoren. – <u>Sicherheit</u>: Der wässrige Elektrolyt ist weder brennbar noch explosiv. Die Batterie ist laut Hersteller wartungsfrei. – <u>Entladetiefe</u>: bis zu 100 Prozent. – <u>Lebensdauer und Wirkungsgrad</u>: Höher als beim Durchschnitt der Blei-Säure-Batterien. • Nachteile: <ul style="list-style-type: none"> – <u>Lebensdauer und Wirkungsgrad</u>: Niedriger als beim Durchschnitt der Lithium-Batterien. – <u>Volumetrische Energiedichte</u>: Sehr niedrig (d.h. steigender Raumbedarf oder geringere Speicherkapazität).
<p>Lithium- Eisen- phosphat- Batterien (LFP)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Vorteile: <ul style="list-style-type: none"> – <u>Gefahrstoffe</u>: Das positive Aktivmaterial LFP ist nicht als Gefahrstoff für Umwelt und Gesundheit klassifiziert. – <u>Sicherheit</u>: Innerhalb der Lithium-Batterien besitzen LFP-Batterien eine geringere Energiedichte; bei hohen Temperaturen zersetzt sich LFP nicht wie LNMC unter zusätzlicher Sauerstoffentwicklung. – <u>Lebensdauer und Wirkungsgrad</u>: Sehr hoch; Anzahl Vollzyklen bei LFP-Batterien etwas höher als bei LNMC-Batterien. • Nachteile: <ul style="list-style-type: none"> – <u>Gefahrstoffe</u>: Leitsalz und Lösemittel des Elektrolyten sind, wie bei LNMC-Batterien, als Gefahrstoffe für Umwelt und Gesundheit klassifiziert, allerdings mit niedrigeren Wirkfaktoren im Vergleich zu den Substanzen der Blei-Säure-Batterie. – <u>Sicherheit</u>: Gefahr des „thermal runaway“.

Lithium-Mangan-Kobalt-Oxid-Batterien (LNMC)	<ul style="list-style-type: none"> • Nachteile: <ul style="list-style-type: none"> – <u>Gefahrstoffe</u>: Das positive Aktivmaterial LNMC ist als Gefahrstoff für Umwelt und Gesundheit mit relativ hohen Wirkfaktoren klassifiziert. Auch Leitsalz und Lösemittel des Elektrolyten sind, wie bei LFP-Batterien, als Gefahrstoffe für Umwelt und Gesundheit klassifiziert, allerdings mit niedrigeren Wirkfaktoren im Vergleich zu den Substanzen der Blei-Säure-Batterie. – <u>Sicherheit</u>: Gefahr des „thermal runaway“. Innerhalb der Lithium-Batterien besitzen LNMC-Batterien eine höhere Energiedichte; bei hohen Temperaturen wird im Laufe der Reaktion Sauerstoff freigesetzt, so dass diese Batterien schwerer zu löschen sind. – <u>Rohstoffe</u>: Kobalt ist als „kritischer Rohstoff“ eingestuft mit dem Risiko von Versorgungsengpässen für die EU. Die Primärgewinnung im Kongo erfolgt unter unzureichenden Arbeitsbedingungen. • Vorteile: <ul style="list-style-type: none"> – <u>Lebensdauer und Wirkungsgrad</u>: Sehr hoch – <u>Recycling</u>: Innerhalb der Lithium-Batterien sind LNMC-Batterien interessanter für Recyclingbetriebe; Kobalt und Nickel sind aktuell aus wirtschaftlicher Sicht attraktiv und werden zurückgewonnen.
Bleibatterien	<ul style="list-style-type: none"> • Nachteile: <ul style="list-style-type: none"> – <u>Gefahrstoffe</u>: Die in den Batteriezellen enthaltenen Substanzen sind als Gefahrstoffe für Umwelt oder Gesundheit klassifiziert und besitzen im Vergleich zu den anderen Batterietechnologien die höchsten Wirkfaktoren. – <u>Rohstoffe</u>: Die Primärgewinnung von Blei in außereuropäischen Ländern zählt zu den am stärksten umwelt- und gesundheitsgefährdenden Prozessen der Welt. – <u>Lebensdauer, Wirkungsgrad und Entladetiefe</u>: Im Vergleich zu den anderen Batterietechnologien am niedrigsten. – <u>Volumetrische Energiedichte</u>: Niedrig (d.h. steigender Raumbedarf oder geringere Speicherkapazität). – <u>Wartungsaufwand</u>: Hoch (Ausnahme: VRLA-Typ, d.h. „valve regulated lead-acid battery“) • Vorteile: <ul style="list-style-type: none"> – <u>Recycling</u>: Etablierte Recycling-Infrastruktur in Industrieländern wie Deutschland, mit hohen Recyclingeffizienzen.

Quelle: Graulich & Manhart (2017)

3.5. Marktanteile verschiedener Speichergrößen

Die Kapazität der auf dem Markt angebotenen Batteriespeichersysteme weist eine große Bandbreite auf. Die Skalierbarkeit der Systeme hängt von der Kapazität eines einzelnen Batteriemoduls ab, auch hier variieren die Angebote stark in ihrer Kapazität. Für die Anwendung als PV-Batteriespeicher für Privathaushalte liegen sie bei ca. 2-3 kWh. Allgemein ist der Verkauf einzelner Batteriemodule und modularer Systeme eher selten. In den meisten Fällen werden Komplettsysteme angeboten, die alle notwendigen technischen Komponenten (Batterie, Wechselrichter und Batteriemanagementsystem) umfassen. Bei manchen Systemen lässt sich die Anzahl der Batteriemodule im Laufe der Nutzung verändern, sodass die Speichergröße und Kapazität variabel ist. So wäre es zum Beispiel möglich, den Batteriespeicher bei steigendem Strombedarf (z.B. durch eine neu eingebaute Wärmepumpe/ Elektromobilität) nachzurüsten.

Die laufende Preisreduktion bei Lithium-Ionen Batterien hat dazu geführt, dass in jüngerer Zeit mehr Speicher mit größeren Kapazitäten installiert wurden. Besonders kleine Speichersysteme mit weniger als 2 kWh hatten einen sehr geringen Marktanteil, da die Fixkosten für Leistungselektronik und Installation sie vergleichsweise wirtschaftlich unattraktiver machen. (Figgener et al. 2017).

3.6. Zusammenhang PV-Anlage, Stromverbrauch und Batteriespeicher

Die Auswahl der Speichergröße wird sowohl von der Leistung der PV-Anlage als auch dem jährlichen Stromverbrauch des Haushalts bestimmt.

Auf Ein- bis Zweifamilienhäusern oder Mietshäusern werden in der Regel Dachanlagen bis einschließlich 10 kWp installierter Leistung installiert⁶, dies entspricht einer maximal nutzbaren Dachfläche von ca. 60 m². Gemäß Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Ba-Wü (2017) liegt der durchschnittliche Anlagenertrag von PV-Anlagen in Baden-Württemberg pro Jahr im Bereich um 950 Kilowattstunden (kWh) je Kilowattpeak (kWp), in besonders sonnenreichen Lagen sind bei optimaler Ausrichtung auch Werte von deutlich über 1.000 kWh/kWp pro Jahr möglich. Ein Durchschnittshaushalt mit einem jährlichen Strombedarf von 4.000 kWh könnte entsprechend rein rechnerisch bereits mit einer PV-Anlagengröße von ca. 4,5 kWp bedarfsdeckend mit Solarenergie versorgt werden. Da aber Stromerzeugung und -verbrauch zeitlich nicht deckungsgleich sind, wird typischerweise nur ca. ein Drittel des solar erzeugten Stroms direkt selbst verbraucht. Durch die Installation eines Batteriespeichersystems lässt sich diese Menge steigern, indem insbesondere morgens und abends auf den gespeicherten Solarstrom zurückgegriffen wird. (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Ba-Wü 2017)

Bei den im Speichermonitoring erfassten Haushalten nahm mit zunehmender Nennleistung der PV-Anlage auch die nutzbare Batteriekapazität zu. Bei der am häufigsten vertretenen PV-Anlagengröße von 9 kWp lag der Median der Speicherkapazität bei knapp unter 8 kWh. PV-Anlagen mit einer Nennkapazität kleiner als 5 kWp und dazu gehörige Batteriespeicher (Median bei 4 kWh) kamen unter den erfassten Haushalten verhältnismäßig selten vor. (Figgener et al. 2017)

Bei der Gegenüberstellung von nutzbarer Batteriespeicherkapazität und dem jährlichen Stromverbrauch lässt sich feststellen, dass mit zunehmendem jährlichem Stromverbrauch auch der Median der installierten Speichergröße ansteigt. Bei Haushalten, die einen Stromverbrauch zwischen 3.000 und 3500 Kilowattstunden hatten, betrug der Median der installierten Speicher ca. 5 Kilowattstunden, bei 5.000 bis 6.000 Kilowattstunden knapp 7 Kilowattstunden nutzbare Batteriekapazität. Figgener et al. (2017) vergleichen diese Stromverbräuche mit dem regelmäßig vom Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) herausgegebenen durchschnittlichen Stromverbrauch deutscher Privathaushalte (freistehende Ein- und Zweifamilienhäuser: 3.500 kWh/a; Haushalte mit 4 Personen: 4.750 kWh/a) und resümieren, dass PV-Batteriespeicher tendenziell häufiger von Haushalten mit erhöhtem Stromverbrauch gekauft und installiert werden. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der Motivationsbefragung zur Investition in ein Speichersystem: Die Absicherung gegen steigende Strompreise wird als eines der Hauptmotive aufgeführt, und ist bei Haushalten mit höheren Verbräuchen von besonderer Relevanz.

Empfehlungen des Öko-Instituts zur Dimensionierung der PV-Anlage, des Batteriespeichers sowie dem Einfluss von Stromsparmaßnahmen: siehe Abschnitt 1 (Zusammenfassung) und 6 (Details).

⁶ Solarstrom aus Dachanlagen bis 10 kWp wird nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) bis zu 100% der Anlagenerleistung vergütet, während für PV-Anlagen über 10 kWp andere Bedingungen gelten. (Finke o.J.)

3.7. Typische Eigenverbrauchsquoten und Autarkiegrade

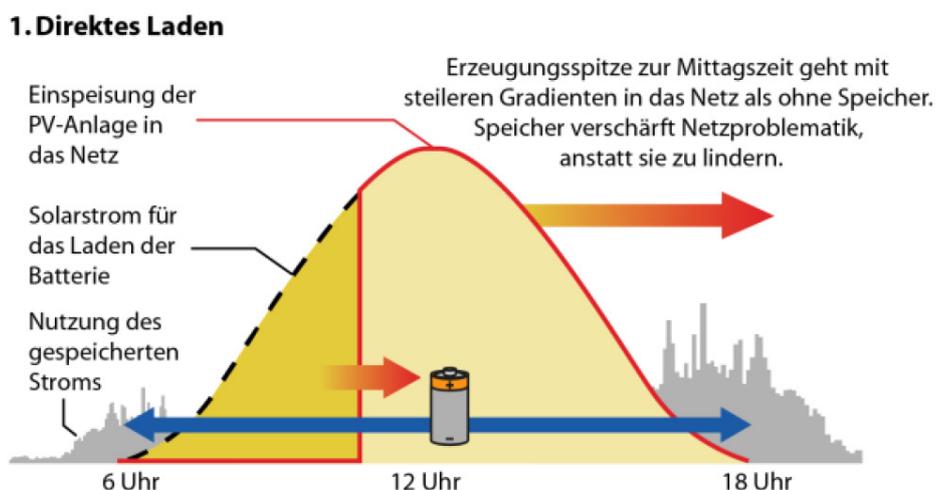
Die **Eigenverbrauchsquote** gibt den Anteil des von der PV-Anlage erzeugten Stroms an, der vor Ort tatsächlich vom Haushalt selbst verbraucht wird (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Ba-Wü 2017). Die Auswertung des Zusammenhangs von PV-Nennleistung, Speicherkapazität und Eigenverbrauchsquote zeigt, dass auch schon kleine Batteriespeicher (bis 4 kWh) Eigenverbrauchsquoten von bis zu 60 Prozent ermöglichen. Allerdings ist nicht die Speichergröße selbst, sondern das Verhältnis zwischen PV-Anlage und Stromverbrauch der entscheidende Faktor der Quote. Je größer das Verhältnis aus PV-Anlage und Haushaltslast ist, desto geringer ist die Eigenverbrauchsquote bei gleichbleibender Speicherkapazität. Praktisch ausgedrückt kann von der Energie verhältnismäßig weniger gespeichert werden, je größer die PV-Anlage ist (Figgenger et al. 2017). Für Haushalte, deren PV-Anlage den jährlichen Haushaltsstromverbrauch bilanziell deckt (Werte größer als 1), liegen typische Eigenverbrauchsquoten um die 50 Prozent.

Der **Autarkiegrad** beschreibt, inwieweit sich ein Haushalt – gemessen an seinem Jahresstromverbrauch – mit dem selbsterzeugten Strom der PV-Anlage eigenständig versorgen kann. Er verdeutlicht also das Maß der Unabhängigkeit eines Haushalts von zusätzlichen Strombezügen. (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Ba-Wü 2017) Typische Werte bei einer PV-Anlage mit passend dimensioniertem Speicher liegen zwischen 40 und 70 Prozent Autarkiegrad. Der Autarkiegrad steigt zwar mit zunehmender Speichergröße, allerdings führt hier auch eine größere PV-Anlage zu einem höheren Wert. Höhere Werte können zudem erzielt werden, wenn der tendenziell hohe Stromverbrauch der Haushalte reduziert wird (siehe Abschnitt 6.3).

3.8. Optimale Einbettung der PV-Batteriesysteme ins Netz

Installation und Betrieb von PV-Speichersystemen werden von privaten Haushalten vorrangig zur Erhöhung ihres Eigenverbrauchs durchgeführt. Ziel ist es dabei möglichst wenig des von der PV-Anlage erzeugten Stroms in das öffentliche Stromnetz einzuspeisen und den Speicher so zu nutzen, dass der Strombedarf des Haushalts möglichst weitgehend mit der Stromerzeugung aus der eigenen PV-Anlage gedeckt werden kann. Diese Strategie wird laut Forschungsstelle für Energienetze und Energiespeicher (2015) als „direktes Laden“ bezeichnet (siehe Abbildung 3-5).

Abbildung 3-5: Einspeiseprofil eines PV-Speichersystems in das Netz bei ausschließlicher Optimierung des Eigenverbrauchs für den Haushalt



Quelle: Forschungsstelle für Energienetze und Energiespeicher (2015)

Wie in Abbildung 3-5 zu erkennen ist, führt die Betriebsweise eines PV-Speichers, der allein auf den Eigenverbrauch des Haushalts optimiert ist, zu deutlich höheren Einspeisegradierten, da der erzeugte PV-Strom in der Regel morgens zunächst zum Beladen des Speichers verwendet wird. Bei Vollbeladung des Speichers, meist am späten Vormittag, erfolgt dann auf einmal die Einspeisung einer vergleichsweise hohen PV-Leistung ins Netz. Gleichzeitig bleiben die hohen Erzeugungsspitzen im Netz zur Mittagszeit unverändert bestehen, da die PV-Speicher meist vorher schon voll beladen sind und keinen von der PV-Anlage erzeugten Strom mehr aufnehmen können, so dass der Strom zur Mittagszeit weiterhin in hohem Maße ins Netz eingespeist wird. Somit wird das Netz durch diese individuelle, rein eigenverbrauchsorientierte Betriebsweise der PV-Batteriespeicher verstärkt belastet.

Problematisch ist solch ein Betrieb besonders dann, wenn die Einspeicherung von Strom in den PV-Speicher in den Zeiten erfolgt, in denen der Strom zur Verbrauchsdeckung oder zur Unterstützung des Netzbetriebs benötigt würde oder es durch den Speichereinsatz wie oben beschrieben zu besonders starken Lastgradienten kommt. Daher ist beispielsweise eine finanzielle Förderung von PV-Batteriespeichern durch die Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) an Bedingungen für die Betriebsweise gebunden (KfW Bankengruppe 2017). Der Haushalt ist verpflichtet, die Wirkleistung der mit dem Speicher verbundenen PV-Anlage auf 50 Prozent der installierten Nennleistung zu reduzieren (feste Einspeisebegrenzung). Außerdem ist er verpflichtet, den Zugriff auf die Anlage durch einen Netzbetreiber zu ermöglichen, sodass zukünftig ein Einsatz zur Bereitstellung von Systemdienstleistungen erfolgen kann. Die Maßnahme zur Reduktion der Einspeisespitze von PV-Speichersystemen zielt auf eine verringerte Belastung des Elektrizitätsnetzes. Sie führt jedoch auch dazu, dass Stromerzeugung aus PV-Anlagen abgeregelt wird und entsprechend durch andere, unter Umständen konventionelle Anlagen bereitgestellt werden muss. Die Abregelung aufgrund der festen Einspeisegrenze von 50 Prozent der installierten Leistung bei KfW-geförderten Anlagen wird auf insgesamt ca. 12 Prozent quantifiziert (E-Bridge Consulting et al. 2014; Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin 2016).

Eine wachsende Zahl an individuellen, nicht-netzdienlich gesteuerten PV-Batteriespeichern hat somit bereits heute Auswirkungen auf das Stromnetz und den Markt. Zudem führt eine ausschließliche Optimierung des Eigenverbrauchs der einzelnen Haushalte zu Effizienzverlusten und erhöhten Systemkosten im Gesamtmarkt. Neben diesen Kernherausforderungen für das Netz ergeben sich zusätzlich auch Auswirkungen auf das Energiesystem im Allgemeinen:

- **Kein volkswirtschaftlich optimaler Einsatz der Speichertechnologien:** Die Maximierung des Eigenverbrauchs in Haushalten führt zu einem Einsatz einer Vielzahl individueller PV-Batteriespeicher, auch wenn systemweit effizientere und kostengünstigere Speicherlösungen (auch Lastmanagementpotenziale) zur Verfügung stehen. Das kann dazu führen, dass in der Gesamtbilanz die Stromerzeugung aus PV-Anlagen weniger effizient genutzt wird, da durch Umwandlungsverluste jedes einzelnen Speichers (siehe Abschnitt 0) höhere Verluste bei der Stromerzeugung aus PV-Anlagen entstehen und diese ggf. durch konventionelle Erzeugungseinheiten gedeckt werden müssen.
- **Kein volkswirtschaftlich optimaler Einsatz der Erzeugungstechnologien:** Die Einspeicherung von PV-Strom in einer Batterie im Haushalt kann möglicherweise zu ungünstigen Zeitpunkten stattfinden, beispielsweise, wenn an anderer Stelle im Netz ein Defizit an Strom herrscht und dieser Bedarf dann durch konventionelle Kraftwerke gedeckt werden muss. Umgekehrt kann gemäß Forschungsstelle für Energienetze und Energiespeicher (2015) auch der Fall eintreten, dass nachts in einem Netzgebiet mit vielen Windkraftanlagen diese bei Starkwind abgeregelt werden müssen, weil zu wenig Stromverbraucher und Transportkapazitäten vorhanden sind und der Strombedarf durch Entladung der dezentralen Batteriespeicher abgedeckt wird.

- **Verminderter Anreiz zum Ausnutzen der PV-Potenzialfläche:** Gemäß Schill et al. (2017) kann davon ausgegangen werden, dass der Zubau von PV-Anlagen bei Haushalten mit dem Ziel der Eigenverbrauchsmaximierung systematisch zu einer verminderten Ausnutzung der vorhandenen Dachflächenpotenziale führt. Insbesondere dürfte dies für Einfamilienhäuser zutreffen, bei denen im Verhältnis zum Stromverbrauch der Bewohner eine vergleichsweise große Dachfläche zur Verfügung steht.
- **Verminderte Anreize für Effizienz:** Durch die Fokussierung auf die Eigenverbrauchsquote gehen Schill et al. (2017) zudem davon aus, dass Effizienzgesichtspunkte im Sinne der absoluten Verringerung des Stromverbrauchs in Haushalten weniger im Fokus stehen.
- **Netzentgelte – Verteilungswirkungen:** Der durch den Eigenverbrauch reduzierte Bezug von Strom aus dem Netz kann zu einer Gefährdung der Finanzierung des Netzes führen. Dies ist in der derzeitigen Struktur der Netzentgelte begründet, die mit dem Verbrauch von Strom, also pro verbrauchte kWh erhoben werden und sich in einen volumetrischen und einen fixen Bestandteil gliedern. Auf Haushaltsebene findet eine Refinanzierung des Netzbetriebs besonders durch den volumetrischen Anteil statt. Reduzieren einzelne Verbraucher aufgrund eines höheren Eigenverbrauchs eigener Erzeugungsanlagen ihren Netzbezug (das bedeutet nicht, dass auch der Gesamtverbrauch reduziert wird), so wird die Refinanzierung der Elektrizitätsnetze auf weniger Stromkunden verteilt, die dadurch höhere Belastungen zu erwarten haben.

Die Summe der dezentralen Batterien zusammen sollte helfen die Fluktuation der Erneuerbaren Energien auszugleichen. Dabei kann es zwei Zielsetzungen geben: Die lokale Netzentlastung oder die Einspeisung von Elektrizität zu Zeiten, in denen nur wenige Erneuerbare Energien einspeisen können (z.B. bei Windflauten).

Mit Hilfe eines Stromspeichers kann die PV-Anlage beispielsweise dadurch netzdienlich betrieben werden, dass Erzeugungsspitzen zu Mittagszeiten vermieden werden. Wird der Batteriespeicher im Tagesverlauf zu früh voll aufgeladen (siehe Abbildung 3-5), so muss die Leistung der PV-Anlage zur Einhaltung der geforderten 50-Prozent-Einspeisegrenze trotz Direktverbrauch und Speichereinsatz gedrosselt werden, und der potentiell immer noch zur Verfügung stehende Solarstrom kann nicht mehr genutzt werden. Daher bedarf es einer vorausschauenden Planung der Batterieladung im Tagesverlauf, die sich durch ein prognose-basiertes Energiemanagement umsetzen lässt. Das Ziel solch einer prognosebasierten Batterieladeplanung ist es, die PV-Energie erst um die Mittagszeit in den PV-Batteriespeicher einzuspeichern, um die geforderte maximale Einspeiseleistung einzuhalten und somit eine Abregelung der PV-Anlage zu vermeiden. (Tjaden et al. 2016). Für eine solche prognosebasierte Betriebsweise bedarf es jedoch entsprechender IKT-Schnittstellen und Betriebsführungsmöglichkeiten, die die PV-Batteriespeicher aufweisen sollten.

Im Sinne der Energiewende im Gesamtsystem ist es wichtig, dass PV-Batteriespeicher künftig nicht nur zur Eigenverbrauchsoptimierung der einzelnen Haushalte eingesetzt werden. Mögliche Einsatzfelder mit direktem Nutzen für die Energiewende sind:

- *Einsatzoptimierung zur Entlastung des lokalen Verteilnetzes bei Auslastungsspitzen.*
- *Einsatzoptimierung zum Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch von Strom im Gesamtsystem.*

Haushalte sollten bei der Investition in einen PV-Batteriespeicher darauf achten, dass diese durch entsprechende Schnittstellen netzdienlich betrieben werden können und somit nicht nur den einzelnen Haushalt optimieren, sondern über eine intelligente Ladestrategie auch eine Einsatzoptimierung zum Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch von Strom im Gesamtsystem bieten.

3.9. Kosten verschiedener Speichersysteme

Der Solarstromspeicher-Preismonitor Deutschland des Bundesverbandes Solarwirtschaft gibt für das erste Halbjahr 2016 die folgenden Werte als durchschnittliche Lithium-Batteriesystempreise pro kWh Nennkapazität an (Verkaufspreis schlüsselfertig an Kunden inkl. Batteriesteuerung und Installation, aber ohne MwSt.): Lithium-System bis 5 kWh: 1.648 Euro/kWh (Fallzahl n = 36); Lithium-System bis 10 kWh: 1.410 Euro/kWh (Fallzahl n = 38); die Preisspreizungen der in den Preismonitor einbezogenen Systeme ist allerdings relativ hoch (Tepper 2016).

Gemäß Märtel (o.J.a) gibt das Fachmagazin pv magazine zusammen mit Büro F, einem Marktanalyst mit Spezialisierung auf Erneuerbare Energien, einen Preisindex heraus. Tabelle 3-4 zeigt die durchschnittlichen Endkunden-Preise (netto ohne MwSt.) für einen schlüsselfertigen Lithium-Ionen Speicher inkl. Installation, Batteriewechselrichter, Steuerungssoftware etc. entsprechend ihrer Kapazität für das zweite Halbjahr 2016.

Tabelle 3-4: Endkunden-Preise für schlüsselfertige Lithium-Ionen Speicher

	4 kWh nutzbare Speicherkapazität	6 kWh nutzbare Speicherkapazität	8 kWh nutzbare Speicherkapazität
Durchschnittlicher Preis (netto)	1.529 Euro/kWh	1.290 Euro/kWh	1.275 Euro/kWh
Preise basieren auf	19 Datensätzen	23 Datensätzen	19 Datensätzen

Quelle: Märtel (o.J.a)

Gemäß Märtel (o.J.a) ist die Datenbasis des Preisindex mit 27 bzw. 31 befragten Firmen allerdings recht klein und bei diesen Angaben die Spreizung der Preise noch relativ hoch. Die Mittelwerte von 1.275 Euro bis 1.529 Euro pro Kilowattstunde nutzbare Speicherkapazität haben eine Varianz von rund 700 Euro nach oben und unten. So ermittelte der Preisindex für PV-Speicher mit 6 kWh Speicherkapazität in der Spitze auch Preise von 2.050 Euro/kWh bzw. 574 Euro/kWh.

Faktoren, die für die Unterschiede bei der Preisgestaltung von Batteriespeichern ausschlaggebend sind, sind gemäß Märtel (o.J.a):

- die Einbindung in die Hauselektrik: AC-gekoppelte oder DC-gekoppelte Batteriespeicher,
- Garantieleistungen seitens des Herstellers,
- die Anzahl der Ladezyklen,
- der Installationsaufwand,
- weiterführende Funktionalitäten hinsichtlich Regelenergiemarkt, Notstromoption und Einbindung von Elektroautos.

Schließlich ist zu beachten, dass die Preise für Photovoltaik Speicher zuletzt innerhalb von drei Jahren (von 2013 auf 2016) um rund 40 Prozent gesunken sind. Nach Märtel (o.J.a) kommt ein Untersuchungsbericht der RWTH Aachen („Speichermonitoring 2016“) hinsichtlich der Preisentwicklung zu ähnlichen Ergebnissen. Demnach sinken die Preise für Solarstromspeicher mit Lithium-Ionen Technologie für den Heimgebrauch derzeit um rund 18 Prozent pro Jahr.

3.10. Förderprogramme für PV-Speichersysteme

Für den Erwerb von PV-Batteriespeichersystemen gibt es seitens Bund, Ländern, Banken, aber auch privatwirtschaftlichen Akteuren verschiedene Fördermöglichkeiten, wie z.B. Zuschüsse oder zinsverbilligte Kredite, siehe Beispiele in Tabelle 3-5.

Tabelle 3-5: Beispiele für Förderprogramme für PV-Batteriespeicher

Name	Art d. Förderung	Höhe der Förderung	Anlaufstelle / Verfügbarkeit
Bundesweit			
Erneuerbare Energien - Speicher (KfW-Programm 275) ⁷	Tilgungszuschuss zu einem Finanzierungskredit der KfW (degressiv)	mehrere hundert bis einige tausend Euro	Hausbank bzw. Kreditinstitut eigener Wahl / Bundesweit
Erneuerbare Energien - Standard (KfW - Programm 270) ⁸	Finanzierungskredit	bis zu 100% der förderfähigen Netto-Investitionskosten, max. 50 Mio. €	Hausbank bzw. Kreditinstitut eigener Wahl / Bundesweit
Regional (unvollständig)			
EnergieBonus Bayern ⁹	Zuschuss (degressiv)	1.000 - 3.900 €	Antragsstellung ausschließlich Online / Bayern
EnergieBonus Bayern ¹⁰	Zuschuss	1.000 €	Antragsstellung ausschließlich Online / Bayern
progres.nrw ¹¹	Zuschuss	max. 10% bzw. 50% der zuwendungsfähigen Ausgaben, max. 30.000 €, Bagatellgrenze 350 €	Bezirksregierung Arnsberg / NRW
Dezentrale Stromspeicher (InES4) ¹²	Zuschuss (De-minimis-Beihilfe)	40% der förderfähigen Ausgaben für den Stromspeicher, max. 20.000 €	Sächsische Aufbaubank / Sachsen
Solar Invest ¹³	Zuschuss (De-minimis-Beihilfe)	bis zu 80% der zuwendungsfähigen Ausgaben, max. 100.000 €	Thüringer Aufbaubank / Thüringen
Ökostrom Aktiv ¹⁴	Zuschuss	10% der Netto-Investitionskosten	badenova / Region Freiburg

⁷ [www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Energie-Umwelt/F%C3%B6rderprodukte/Erneuerbare-Energien-%E2%80%93-Speicher-\(275\)/](http://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Energie-Umwelt/F%C3%B6rderprodukte/Erneuerbare-Energien-%E2%80%93-Speicher-(275)/)

⁸ [www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Energie-Umwelt/F%C3%B6rderprodukte/Erneuerbare-Energien-Standard-\(270\)/](http://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Energie-Umwelt/F%C3%B6rderprodukte/Erneuerbare-Energien-Standard-(270)/)

⁹ www.haus.co/magazin/wp-content/uploads/2017/05/photovoltaik-foerderung_bayern_energiebonusbayern_t3.pdf

¹⁰ www.haus.co/magazin/wp-content/uploads/2017/05/photovoltaik-foerderung_bayern_energiebonusbayern_h.pdf

¹¹ www.haus.co/magazin/wp-content/uploads/2017/05/photovoltaik-foerderung_nordrhein-westfalen_progres.nrw_.pdf

¹² www.haus.co/magazin/wp-content/uploads/2017/05/photovoltaik-foerderung_sachsen_ines4.pdf

¹³ www.haus.co/magazin/wp-content/uploads/2017/05/photovoltaik-foerderung_thueringen_solar-invest.pdf

¹⁴ www.badenova.de/web/Downloads/Privatkunden/%C3%96kostrom/Oekostrom_Aktiv_Foerderprogramm_Speicher.pdf

Name	Art d. Förderung	Höhe der Förderung	Anlaufstelle / Verfügbarkeit
Förderprogramm Regenerative Energien ¹⁵	Zuschuss	500 €	Stadtwerke Marburg / Marburg
Städtische Förderungen ¹⁶	Zuschuss	7,5% der Investitionskosten, max. 1000€	Stadt Winsen / Winsen

Quelle: Öko-Institut e.V.

3.11. Marktakteure und Marktübersichten für PV-Batteriespeicher

PV-Batteriespeicher werden von einer Bandbreite an Akteuren angeboten.

Hersteller: Die zehn Hersteller, die im Jahr 2016 in Deutschland die meisten Batteriespeichersysteme verkauft haben, sind in absteigender Reihenfolge Sonnen, Senec, E3/DC, LG Chem, Solarwatt, SMA, Varta, Fronius, Mercedes Benz Energy und Tesla. Die drei größten Hersteller decken mit 47 Prozent Marktanteil etwa die Hälfte aller verkauften Systeme ab. (EuPD Research Sustainable Management GmbH 2017)

Energieversorger: Auch Energieversorger bieten ihren Kunden mittlerweile PV-Batteriespeicher an. Dadurch, dass sie keine eigenen Speichersysteme produzieren, kooperieren sie in der Regel mit ausgewählten Batterieherstellern. Sowohl sehr große Energieversorger wie E.ON oder Vattenfall haben entsprechende Angebote in ihrem Portfolio, als auch kleinere Versorger wie z.B. die Stadtwerke Jena. Manche Energieversorger bieten keine konkreten Produkte zum Kauf an, sondern stellen auf ihren Internetseiten Beratungsangebote und Informationen für mögliche Interessenten zur Verfügung. Die Elektrizitätswerke Schönau (EWS) bieten ihren Stromkunden beispielsweise ein Förderprogramm für PV-Batteriespeicher für Privathaushalte mit Fokussierung auf Speichersysteme und Hersteller, die sich bezüglich Umweltrelevanz und Qualität positiv hervorheben.

Weitere Akteure: Weitere aktive Akteure sind Beratungsunternehmen, die sich auf Dienstleistungen rund um Batteriespeicher spezialisiert haben. Sie helfen unter anderem bei der Auswahl der Technik und der Dimensionierung der Anlagen. Auch verschiedene Online-Portale adressieren die Thematik, stellen Interessenten Informationen zusammen oder vermitteln Beratungen.

Einen jeweils umfassenden Überblick über das PV-Batteriespeicherangebot mit technischen Details zu den am Markt verfügbaren Batteriespeichersystemen findet man unter anderem in den in Tabelle 3-6 aufgeführten online-Marktübersichten.

Tabelle 3-6: Online-Marktübersichten zu Photovoltaik-Batteriespeichern

Webseiten mit Marktübersichten	
CARMEN e.V.	www.carmen-ev.de/sonne-wind-co/stromspeicher/batterien/813-marktuebersicht-fuer-batteriespeichersysteme
Manager Magazin	www.manager-magazin.de/unternehmen/artikel/solaranlage-hier-finden-sie-die-besten-stromspeicher-a-1144767.html

¹⁵ http://stadtwerke-marburg.de/fileadmin/media/umweltberatung/foerderprogramme/04_foerd_reg_en.pdf

¹⁶ www.winsen.de/downloads/datei/OTAyMDAxMDcwOy07L3Vzci9sb2NhbC9odHRwZC92aHRkb2NzL2Ntcy93aW5zZW4vbWVkaWVuL2Rva3VtZW50ZS92M19mbHllcmVuZXJnaWVzcGFycHJvZ3JhbW1fc3RhZHR3aW5zZW4ucGRm/v3_flyerenergiesparprogramm_stadtwinzen.pdf

PV Magazine <https://www.pv-magazine.de/marktuebersichten/batteriespeicher/>

Solaranlagen-Portal <https://www.solaranlagen-portal.com/photovoltaik/stromspeicher/photovoltaik-speicher>

Quelle: Öko-Institut e.V.

4. „Stromspar-Speicherrechner“ des Öko-Instituts

Im Internet gibt es zahlreiche Speicherrechner, sowohl von Batterieherstellern bzw. -anbietern, als auch von Energieversorgungsunternehmen, Photovoltaik-Magazinen und anderen unabhängigen Akteuren wie Hochschulen, Energieagenturen oder Testzeitschriften. Alle Tools haben jeweils unterschiedliche Zielsetzungen: Manche Tools sind Wirtschaftlichkeitsrechner, andere bestimmen lediglich den Eigenverbrauch und Autarkiegrad bzw. die Dimensionierung des Speichers und/oder der PV-Anlage. Keines der analysierten Tools bezieht jedoch in seine Berechnungen die Möglichkeiten des Stromsparens und dessen Auswirkungen auf die Gesamtwirtschaftlichkeit mit ein.

Das Öko-Institut hat in Kooperation mit dem Büro Ö-quadrat ein digitales Beratungstool entwickelt, mit dem Haushalte erstmals die Wirtschaftlichkeit von Batteriespeichern in Kombination mit Investitionen in Stromsparmaßnahmen berechnen können. Während vorhandene Rechner auf Basis des aktuellen Jahresstromverbrauchs eher eine maximal mögliche Dimensionierung der Batteriespeicher vorschlagen, zeigen überschlägige Rechnungen, dass über einen Zeitraum von 20 Jahren ein großes finanzielles Einsparpotenzial durch Maßnahmen zum Stromsparen besteht.

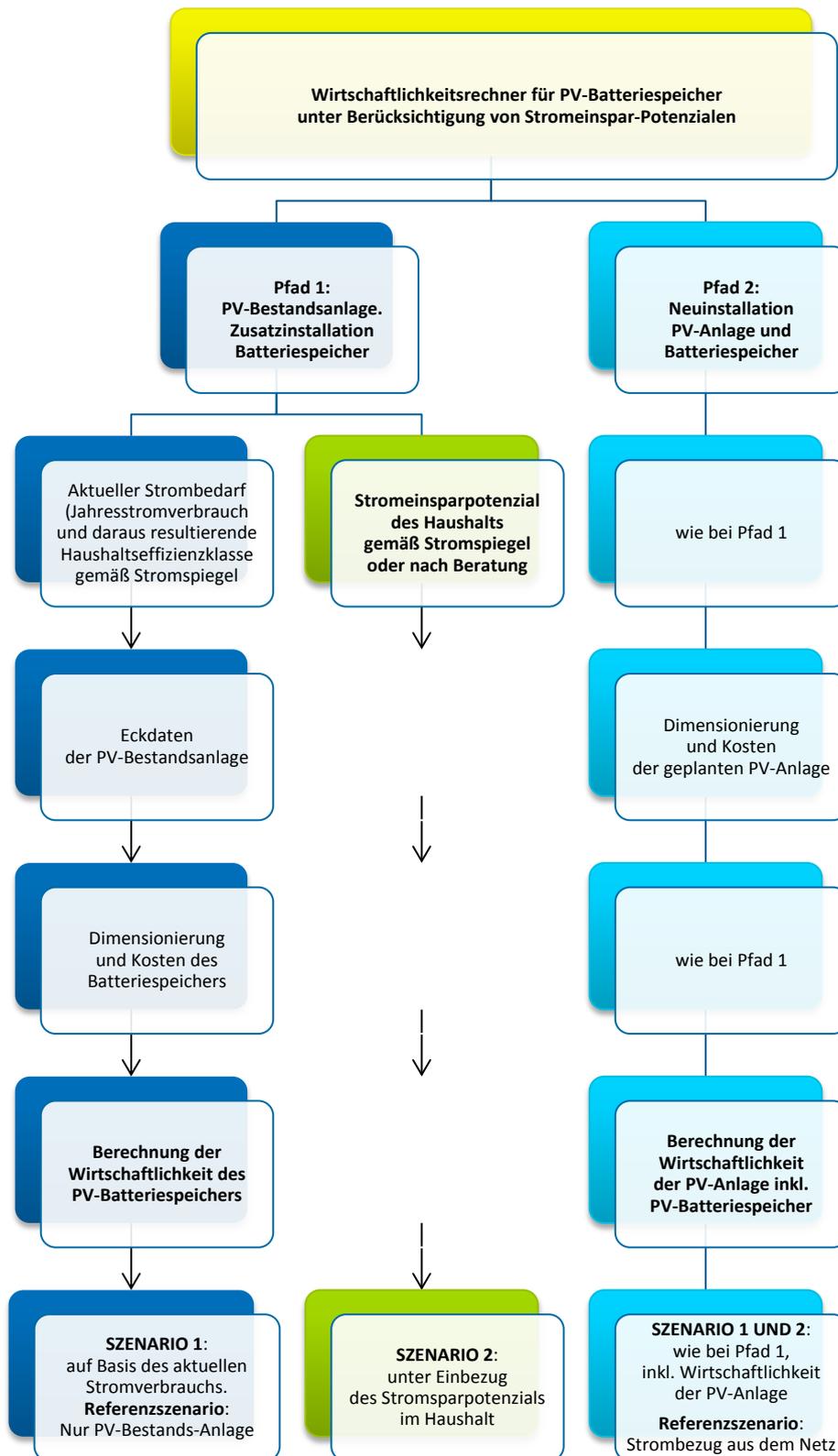
Das Beratungstool basiert auf einer Simulation der Energieflüsse zwischen Stromerzeugung durch eine PV-Anlage, Einspeicherung von Strom in einen Batteriespeicher, Stromverbrauch des Haushalts sowie Einspeisung von Strom ins Netz bzw. Bezug von Strom aus dem Netz. Parallel dazu werden auf Basis der Investitions- und Betriebskosten für PV-Anlage und Batteriespeicher sowie der Kosten für den Strombezug bzw. der Erlöse durch die Einspeisung von Strom ins Netz Szenarien für die Gesamtwirtschaftlichkeit über eine Laufzeit von 20 Jahren berechnet.

Darüber hinaus kombiniert dieses Tool erstmalig die Wirtschaftlichkeit von Batteriespeichern mit der Berechnung der Wirtschaftlichkeit von Investitionen in Stromeinsparmaßnahmen (z.B. Ersatz alter, ineffizienter Haushaltsgeräte). Hintergrund ist, dass PV-Batteriespeicher tendenziell häufiger von Haushalten mit erhöhtem Stromverbrauch gekauft und installiert werden und es sich gleichzeitig um Haushalte mit mittlerem bis höherem Einkommen handelt. Da bei diesen in der Regel kein finanzieller Druck zum Einsparen von Stromkosten besteht, ist anzunehmen, dass sie nicht von sich aus Stromsparmaßnahmen ergreifen werden. Gleichzeitig werden sie bisher kaum aktiv als spezifische Zielgruppe von Politikmaßnahmen zum Stromsparen (z.B. Stromsparberatungen) adressiert. Mit dem Beratungstool für Batteriespeicher können die Haushalte dagegen direkt auch für die Potenziale des Stromsparens angesprochen werden. Man erreicht sie zu einem Zeitpunkt, an dem sie bereits gewillt sind, eine Investition in der Größenordnung von mehreren Tausend Euro (in einen Batteriespeicher und/oder eine PV-Anlage) zu tätigen. Die vorgeschlagenen Stromsparmaßnahmen stehen insofern nicht einzeln für sich, sondern werden in die Berechnungen zur Gesamtwirtschaftlichkeit der geplanten Investitionen integriert und bieten daher einen zusätzlichen finanziellen Anreiz zur Umsetzung.

Der Wirtschaftlichkeitsrechner des Öko-Instituts ermöglicht zwei grundsätzliche Pfade (siehe Abbildung 4-1):

- Im ersten Pfad ist bereits eine Photovoltaik-Anlage vorhanden (PV-Bestandsanlage); in die Wirtschaftlichkeitsberechnung wird lediglich die nachträgliche Installation eines PV-Batteriespeichers in Kombination mit möglichen Stromeinsparpotenzialen einbezogen.
- Im zweiten Pfad plant der Haushalt die Neuinstallation einer Photovoltaik-Anlage in Kombination mit einem Batteriespeicher, d.h. in die Wirtschaftlichkeitsberechnung werden die Investitions- und Betriebskosten der PV-Anlage, die Installation des Batteriespeichers und die möglichen Stromeinsparpotenziale einbezogen.

Abbildung 4-1: Grundsätzlicher Aufbau des Wirtschaftlichkeitsrechners für PV-Batteriespeicher unter Berücksichtigung von Stromeinspar-Potenzialen



Quelle: Öko-Institut e.V.

5. Stromeinsparpotenziale und ihre Wirtschaftlichkeit in Haushalten

Das Bewusstsein für den eigenen Stromverbrauch ist in Haushalten unterschiedlich ausgeprägt. Grundsätzlich können alle Haushalte auf ihrer Jahresstromrechnung die Einordnung ihres eigenen Stromverbrauchs gegenüber dem bundesweiten Durchschnitt entnehmen. Allerdings sind die Angaben zum Durchschnittsstromverbrauch in Deutschland sehr grob. Auch die Durchschnittswerte, die in vorhandenen Wirtschaftlichkeitsrechnern für PV-Batteriespeicher hinterlegt sind, weisen oft deutliche Bandbreiten auf: für Zwei-Personen-Haushalte werden beispielsweise typische Verbräuche von 3.000 bis 3.500 kWh/Jahr angegeben, bei Vier-Personen-Haushalten liegt die Bandbreite zwischen 4.200 und 5.200 kWh/Jahr. Keines der vorhandenen Tools erläutert die verwendeten Durchschnittswerte für den Stromverbrauch.

Der Wirtschaftlichkeitsrechner des Öko-Instituts bezieht sich explizit auf den so genannten „Stromspiegel für Deutschland“ (co2online gGmbH 2017). Der Stromspiegel differenziert den Stromverbrauch von Haushalten nicht nur nach der Anzahl von Personen im Haushalt, sondern auch, ob es sich um ein Ein- bis Zweifamilienhaus oder eine Wohnung im Mehrfamilienhaus handelt, und ob die Warmwasserbereitung mit oder ohne Strom erfolgt. Die daraus resultierenden verschiedenen Stromverbräuche werden jeweils sieben Klassen zugeordnet, so dass innerhalb einer Kategorie zwischen geringen bis zu sehr hohen Verbräuchen differenziert werden kann, siehe Abbildung 5-1. Der Nutzer erhält somit eine detailliertere Einschätzung seines Stromverbrauchs im Vergleich zu anderen Haushalten und kann zugleich sein mögliches Einsparpotenzial erkennen.

Abbildung 5-1: Stromeffizienzklassen gemäß Stromspiegel 2017

Gebäudetyp	Warmwasser	Personen im Haushalt	Verbrauch in Kilowattstunden (kWh) pro Jahr						
			Gering	B	C	D	E	F	Sehr hoch
			A	B	C	D	E	F	G
Ein- oder Zweifamilienhaus	ohne Strom	1 Person	bis 1.300	bis 1.700	bis 2.000	bis 2.500	bis 3.000	bis 4.000	über 4.000
		2 Personen	bis 2.100	bis 2.500	bis 3.000	bis 3.200	bis 3.600	bis 4.400	über 4.400
		3 Personen	bis 2.600	bis 3.000	bis 3.500	bis 3.900	bis 4.300	bis 5.200	über 5.200
		4 Personen	bis 2.900	bis 3.500	bis 3.800	bis 4.200	bis 4.900	bis 5.900	über 5.900
	mit Strom	1 Person	bis 1.500	bis 2.000	bis 2.500	bis 3.000	bis 3.600	bis 5.000	über 5.000
		2 Personen	bis 2.500	bis 3.000	bis 3.500	bis 4.000	bis 4.500	bis 5.800	über 5.800
		3 Personen	bis 3.000	bis 3.800	bis 4.200	bis 4.900	bis 5.700	bis 7.300	über 7.300
		4 Personen	bis 3.500	bis 4.000	bis 4.800	bis 5.500	bis 6.300	bis 8.000	über 8.000
Wohnung im Mehrfamilienhaus	ohne Strom	1 Person	bis 800	bis 1.000	bis 1.200	bis 1.500	bis 1.800	bis 2.200	über 2.200
		2 Personen	bis 1.300	bis 1.600	bis 2.000	bis 2.200	bis 2.600	bis 3.100	über 3.100
		3 Personen	bis 1.700	bis 2.000	bis 2.400	bis 2.800	bis 3.200	bis 3.900	über 3.900
		4 Personen	bis 1.900	bis 2.400	bis 2.800	bis 3.200	bis 3.700	bis 4.500	über 4.500
	mit Strom	1 Person	bis 1.200	bis 1.500	bis 1.800	bis 2.000	bis 2.400	bis 3.000	über 3.000
		2 Personen	bis 2.000	bis 2.500	bis 2.900	bis 3.100	bis 3.500	bis 4.200	über 4.200
		3 Personen	bis 2.600	bis 3.200	bis 3.700	bis 4.100	bis 4.700	bis 5.600	über 5.600
		4 Personen	bis 2.800	bis 3.500	bis 4.000	bis 4.600	bis 5.400	bis 6.500	über 6.500

Quelle: co2online gGmbH (2017)

Haushalte haben bei Anwendung des Stromspar-Speicherrechners zwei Möglichkeiten zur Bestimmung ihres Stromeinsparpotenzials:

- **Variante A:** Das Einsparpotenzial kann mit Unterstützung einer individuellen Energieberatung¹⁷ ermittelt werden. Durch eine Vor-Ort-Begehung werden die vorhandenen Haushalts- und Unterhaltungselektronikgeräte, Beleuchtung, Heizungspumpe, Durchlauferhitzer und weitere Stromverbrauchende Geräte (z.B. Aquarium, Sauna, Luftentfeuchter) gesichtet. Anhand des ungefähren Alters bzw. bei Bedarf auch durch direkte Messung des gerätespezifischen Verbrauchs kann der Berater konkrete Vorschläge für Sparmaßnahmen entwickeln und das Einsparpotenzial des Haushalts berechnen. Mit Hilfe des Stromspiegels lässt sich die nach Durchführung der Stromsparmaßnahmen voraussichtlich neu erreichte Stromeffizienzklasse ablesen.
- **Variante B:** Auf Basis der momentanen Stromeffizienzklasse gemäß Stromspiegel 2017 kann der Haushalt selbst festlegen, in welche – niedrigere – Stromeffizienzklasse er idealerweise gelangen möchte. Anhand der im Stromspiegel für die einzelnen Klassen angegebenen Verbrauchswerte lässt sich dann ausrechnen, wie viele Kilowattstunden der Haushalt jährlich einsparen müsste, um die gewünschte Zielklasse zu erreichen.

Um die möglichen Stromsparziele zu erreichen, sind entweder Verhaltensänderungen und/oder Investitionen in effizientere Geräte erforderlich. Unterscheiden lassen sich „geringinvestive“ Maßnahmen, die nur niedrige finanzielle Investitionen erfordern (z.B. Einsatz von LED-Beleuchtung, Steckerleisten oder Verhaltensänderungen) und „investive“ Maßnahmen (z.B. Austausch von ineffizienten Bestandsgeräten gegen sparsamere Neugeräte).

Besonders sparsame Geräte in zahlreichen Kategorien sowie Alltagstipps zum Stromsparen finden Sie bei EcoTopTen – Die Plattform für ökologische Spitzenprodukte www.ecotopten.de

Zur Ableitung der voraussichtlich erforderlichen Investitionskosten für die vorgesehenen Sparmaßnahmen wird im Stromspar-Speicherrechner folgende überschlägige Rechnung zugrunde gelegt:

Überschlägige Berechnung der erforderlichen Investitionskosten für Stromsparmaßnahmen:

30 Prozent der einzusparenden Kilowattstunden lassen sich mit geringinvestiven Maßnahmen erreichen, für 70 Prozent der einzusparenden Kilowattstunden sind investive Maßnahmen erforderlich.

- Geringinvestive Einsparmaßnahmen: Kosten von 0,05 Euro je einzusparende Kilowattstunde
- Investive Einsparmaßnahmen (es wird angenommen, dass in einem bereits relativ effizienten Haushalt die erforderlichen Investitionskosten höher sind als bei einem Haushalt mit recht hohem Ausgangsverbrauch):
 - Kosten von 1,00 Euro je einzusparende Kilowattstunde (bei aktueller Effizienzklasse F und G)
 - Kosten von 1,25 Euro je einzusparende Kilowattstunde (bei aktueller Effizienzklasse C, D und E)
 - Kosten von 1,50 Euro je einzusparende Kilowattstunde (bei aktueller Effizienzklasse A und B)

Beispiel: Ein Zwei-Personen-Haushalt im Einfamilienhaus mit einem Stromverbrauch von 4.000 kWh/Jahr (Warmwasserbereitung ohne Strom) befindet sich aktuell in Stromeffizienzklasse F. Geplant sind Einsparungen von 1.000 kWh/Jahr, so dass der Stromverbrauch künftig 3.000 kWh/Jahr beträgt und somit Klasse D erreicht wird. Um diese Einsparungen zu erreichen, ist überschlägig eine *einmalige Investition* von 715 Euro erforderlich (300 kWh à 0,05 Euro = 15 Euro für geringinvestive Maßnahmen und 700 kWh à 1,00 Euro = 700 Euro für investive Maßnahmen).

Dem gegenüber stehen jedoch *jährliche Einsparungen* an Stromkosten von rund 300 Euro aufgrund des deutlich geringeren Stromverbrauchs, so dass sich die Anfangsinvestition bereits nach zwei bis drei Jahren refinanziert hat.

¹⁷ Beispielsweise www.verbraucherzentrale-energieberatung.de

6. Wirtschaftlichkeit von Photovoltaik-Batteriespeichern in Kombination mit Stromsparmaßnahmen

Für folgende drei Szenarien wird mit dem Stromspar-Speicherrechner des Öko-Instituts die Wirtschaftlichkeit einer PV-Bestandsanlage oder Neuinstallation einer PV-Anlage in Kombination mit der Investition in einen Batteriespeicher sowie Investitionen in Stromsparmaßnahmen berechnet:

Szenario A: Ist bei PV-Bestandsanlagen, deren EEG-Vergütung demnächst ausläuft, die Installation eines PV-Batteriespeichers zur Erhöhung des Eigenverbrauchs wirtschaftlich? Und wenn ja, welche Batteriespeichergröße ist von Vorteil? Wie würden sich zusätzliche Investitionen in Stromeinsparmaßnahmen auf den Autarkiegrad und die Wirtschaftlichkeit auswirken?

Szenario B: Welche Dimensionierung bietet bei einer geplanten Neuinstallation einer PV-Anlage den größten wirtschaftlichen Vorteil? Macht es Sinn, parallel zur Installation einer PV-Anlage in Stromeinsparungen zu investieren, auch wenn der Strom günstig und ökologisch selber erzeugt wird? Ist es finanziell sinnvoll, die vorhandene Dachfläche maximal auszunutzen, oder sollte die PV-Anlage kleiner dimensioniert werden, wenn sich der Strombedarf verringert?

Szenario C: Bietet sich bei Neuinstallation einer PV-Anlage die parallele Investition in einen Batteriespeicher zur Erhöhung des Autarkiegrads an? Welche Auswirkungen haben Stromeinsparungen auf den Autarkiegrad, die erforderliche Dimensionierung des Batteriespeichers und die Gesamtwirtschaftlichkeit der geplanten Investitionen?

Folgende Annahmen werden für die Szenarien getroffen:

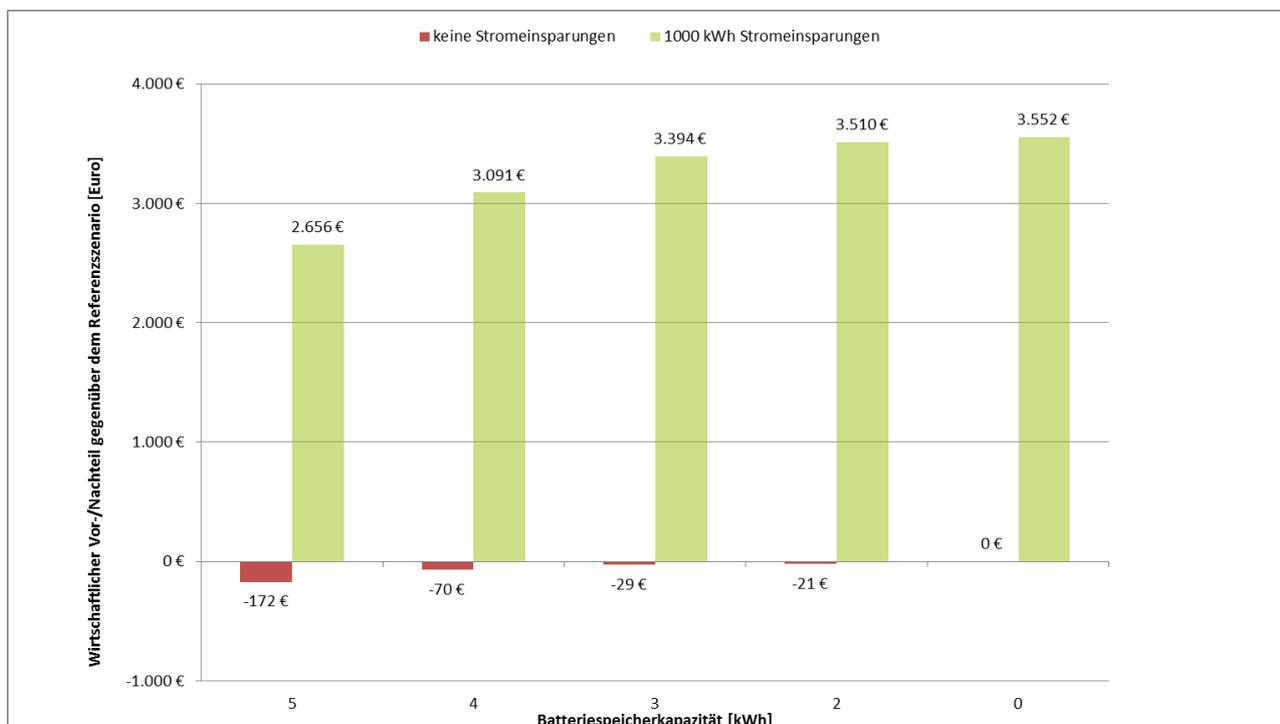
- Es handelt sich um einen Zwei-Personen-Haushalt, der in einem Ein- bis Zweifamilienhaus wohnt. Die Warmwasserbereitstellung erfolgt nicht elektrisch.
- Der jährliche Stromverbrauch beträgt 4.000 Kilowattstunden. Bei einem Zwei-Personen-Haushalt entspricht dies der Stromeffizienzklasse F. Diese Werte sind typisch zum Beispiel für Haushalte, in denen die erwachsenen Kinder ausgezogen sind, jedoch der Gerätebestand nicht reduziert bzw. erneuert wurde. Wird der Stromverbrauch um 1.000 Kilowattstunden reduziert, wird Klasse C erreicht, bei Stromeinsparpotenzialen von 2.000 Kilowattstunden sogar Klasse A.
- Für die solare Einstrahlung wurde der bundesweite Durchschnitt von 965 kWh/kWp angesetzt.
- Als Kosten für die PV-Anlage und den Batteriespeicher wurden die im Stromspar-Speicherrechner hinterlegten Werte genutzt.
- Als Ausgangswert wird gemäß BDEW (2017) ein durchschnittlicher Strompreis von 29 Cent/kWh angenommen (Arbeitspreis, Stand Mai 2017). Die zukünftige Strompreisentwicklung basiert auf der im Stromspar-Speicherrechner hinterlegten Prognose des Öko-Instituts; darin wird noch bis zum Jahr 2025 ein Anstieg der Strompreise angenommen, danach wird jedoch auf Grund einer kleiner werdenden EEG-Umlage durch die dann auslaufenden hohen Einspeisevergütungen mit leicht sinkenden Strompreisen gerechnet.
- Bei den Investitionskosten für die Stromsparmaßnahmen wird eine Aufteilung von 30 Prozent für geringinvestive und 70 Prozent für investive Maßnahmen angenommen (vergleiche Abschnitt 5). Als Investitionskosten für die Energieeinsparungen werden die im Tool hinterlegten Werte genutzt (einmalig 771 Euro für 1.000 kWh/a bzw. 1.542 Euro für 2.000 kWh/a Stromeinsparungen).
- Für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit über 20 Jahre wird eine durchschnittliche jährliche Inflationsrate von 1 Prozent angenommen.

6.1. Szenario A: PV-Bestandsanlage mit auslaufender EEG-Vergütung: Investition in Batteriespeicher und Auswirkung von Stromeinsparungen

Szenario A beschreibt einen Haushalt, der kurz nach Einführung der EEG-Förderung im Jahr 2000 eine 5 kWp PV-Anlage installiert hat und bisher den erzeugten Strom für über 50 Cent/kWh komplett in das öffentliche Stromnetz einspeist. Die EEG-Förderung wird zum 31.12.2020 auslaufen, danach wird die Einspeisung lediglich mit dem Börsenstrompreis (Stand Dez 2017 ca. 3 Cent/kWh) vergütet. Da der Strombezugspreis mit einem Arbeitspreis um die 29 Cent/kWh deutlich höher liegt, scheint ein möglichst hoher Eigenverbrauch durch einen nachträglich installierten Batteriespeicher ab 2021 eine sinnvolle Alternative zu sein. Im Zuge einer Stromsparberatung wurde ein Einsparpotential von 1.000 kWh identifiziert und der Haushalt möchte gerne wissen, wie sich die Umsetzung der Stromeinsparungen bilanziell auswirken würde, und ob nach deren Realisierung ggf. ein kleinerer Speicher ausreicht. Zusätzlich interessiert sich der Haushalt dafür, wie sich die Installation eines Batteriespeichers bzw. Stromeinsparungen auf den Autarkiegrad auswirken.

Betrachtet man die Gesamtwirtschaftlichkeit der Investitionen, so ist die alleinige Installation eines Batteriespeichers bei einer PV-Bestandsanlage unter den zuvor beschriebenen Annahmen leicht sinkender Strompreise ab 2025 knapp nicht wirtschaftlich. Die Installation eines 5 kWh Batteriespeichers würde – gerechnet über einen Zeitraum von 20 Jahren – zu einem wirtschaftlichen Nachteil von insgesamt 172 Euro führen, wobei der wirtschaftliche Nachteil mit sinkender Speichergröße kleiner wird (siehe Abbildung 6-1). Erst unter der Annahme einer jährlichen Strompreissteigerung von mindestens 0,9 Prozent wird der Break-Even-Point für einen 5 kWh Batteriespeicher erreicht. Die Eigenverbrauchsquote der PV-Anlage erhöht sich mit Speicher von 31 auf 57 Prozent, der Autarkiegrad von 37 auf 69 Prozent.

Abbildung 6-1: PV-Bestandsanlage mit auslaufender EEG-Vergütung: Wirtschaftlichkeit der Investition in einen Batteriespeicher ohne und mit paralleler Investition in Stromeinsparmaßnahmen



Quelle: Öko-Institut e.V.

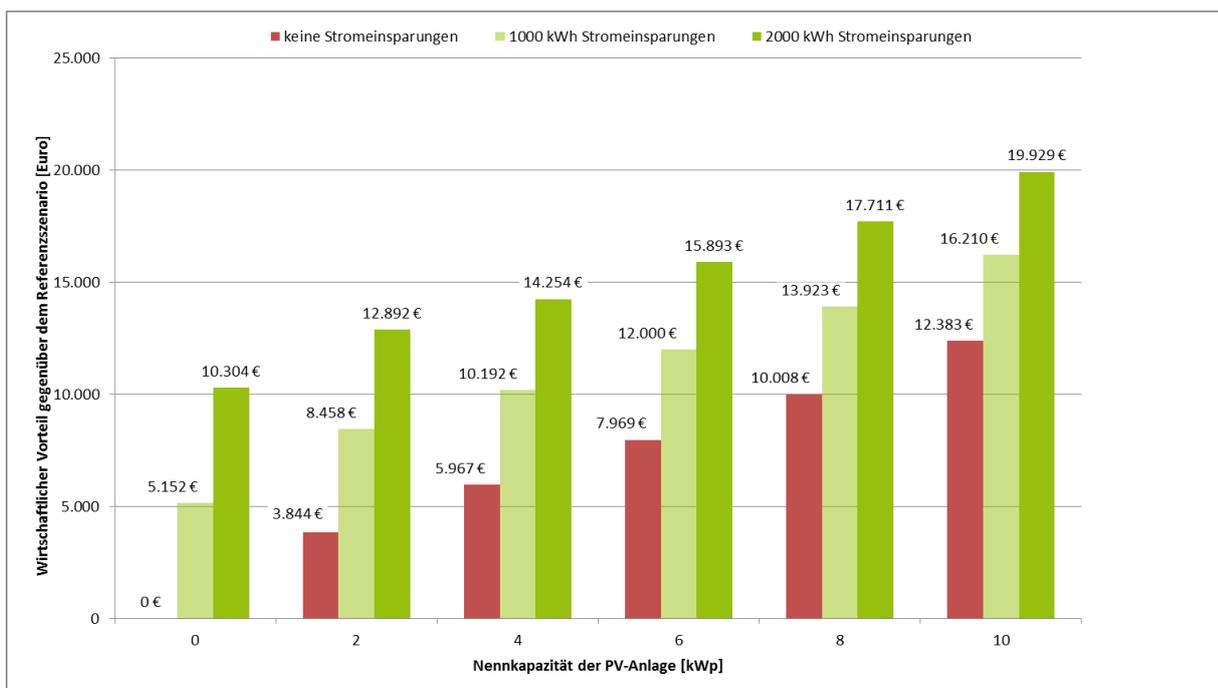
Realisiert der Haushalt neben der Speicheranschaffung zusätzlich einmalige Investitionen von 771 Euro für Stromsparmaßnahmen und reduziert seinen jährlichen Stromverbrauch auf 3.000 kWh, so ergibt sich gegenüber der Ausgangssituation unabhängig von der Batteriegröße in jedem Fall ein wirtschaftlicher Vorteil. Je kleiner der Speicher ausgelegt wird, desto kleiner fällt der wirtschaftliche Nachteil aus. Der finanzielle Vorteil fällt am höchsten aus, wenn anstelle des Batteriespeichers ausschließlich in Stromsparmaßnahmen investiert würde. In diesem Fall würde über einen Zeitraum von 20 Jahren aufgrund der eingesparten Stromkosten ein wirtschaftlicher Vorteil von 3.552 Euro gegenüber der Ausgangssituation entstehen (siehe Abbildung 6-1). Die Kombination der PV-Anlage mit Speicher *und* Stromsparmaßnahmen führt zu einer Eigenverbrauchsquote von 48 Prozent, und der Autarkiegrad kann sogar auf 77 Prozent gesteigert werden.

6.2. Szenario B: Neuinstallation einer PV-Anlage ohne Speicher: Dimensionierung mit und ohne Stromeinsparungen

Nutzungsszenario B beschreibt einen Haushalt, der die Installation einer neuen PV-Anlage plant und unschlüssig ist, wie groß die Anlage dimensioniert werden soll. Generell ist der Haushalt daran interessiert, einen eigenen Beitrag zur Energiewende zu leisten und eine möglichst große PV-Anlage zu installieren, jedoch sollte dadurch kein finanzieller Nachteil entstehen. Der Haushalt hat einen durchschnittlichen Jahresverbrauch von 4.000 kWh und es wurden Einsparpotenziale von 1.000 kWh für 771 Euro Investitionskosten bzw. 2.000 kWh für 1.542 Euro identifiziert.

Wie Abbildung 6-2 verdeutlicht, lohnt sich in jedem Fall die Investition in eine größere Anlage bis zu 10 kWp (für noch größere Anlagen gelten andere EEG-Fördersätze), auch bei Reduzierung des Stromverbrauchs. So erzielt die Installation einer 10 kWp Anlage über 20 Jahre einen wirtschaftlichen Vorteil von 12.383 Euro. Investiert der Haushalt darüber hinaus in Stromsparmaßnahmen, erhöht sich der wirtschaftliche Vorteil je nach Größe der PV-Anlage sogar auf bis zu 19.929 Euro.

Abbildung 6-2: Neuinstallation PV-Anlage: Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Anlagengrößen, jeweils mit und ohne zusätzliche Stromsparmaßnahmen



Quelle: Öko-Institut e.V.

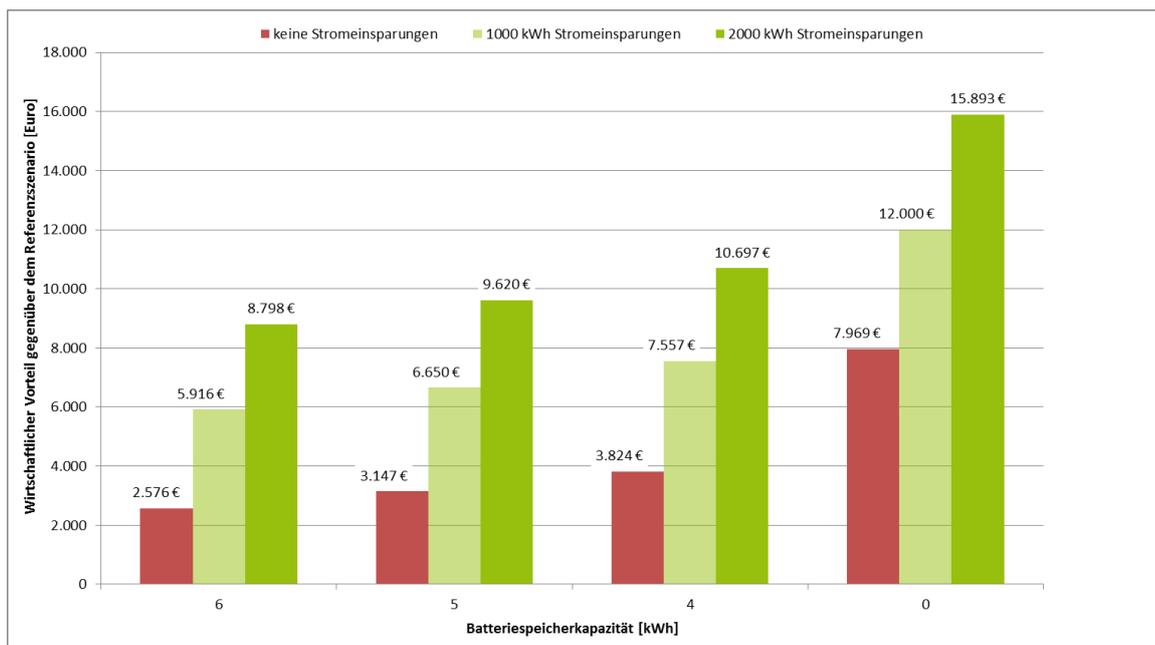
6.3. Szenario C: Neuinstallation einer PV-Anlage mit Speicher: Auswirkungen von Stromeinsparungen

Nutzungsszenario C beschreibt einen Haushalt, dem angeraten wurde bei der geplanten Neuinstallation einer 6 kWp PV-Anlage gleich in einen Batteriespeicher mit zu investieren, um den Autarkiegrad zu erhöhen und damit möglichst unabhängig vom Stromnetz zu sein. Mit Hilfe des Stromspar-Speicherrechners soll dargestellt werden, welche Auswirkungen auf den Autarkiegrad und die Wirtschaftlichkeit zusätzliche Investitionen in Stromsparmaßnahmen von 1.000 kWh für 771 Euro bzw. 2.000 kWh für 1.542 Euro Investitionskosten hätten.

Wird ausschließlich in eine 6 kWp PV-Anlage investiert, so ergibt sich nach 20 Jahren ein wirtschaftlicher Vorteil von 7.969 Euro gegenüber der Ausgangssituation, d.h. dem vollständigen Strombezug aus dem Netz. Investiert der Haushalt darüber hinaus in einen Batteriespeicher, so reduziert sich der wirtschaftliche Vorteil nach 20 Jahren auf 3.824 Euro bei einem 4 kWh Speicher bzw. auf 2.576 Euro bei einem 6 kWh Speicher. Das heißt, je größer der Speicher ist, desto geringer ist der finanzielle Vorteil. Investiert der Haushalt dagegen neben der PV-Anlage ausschließlich in Stromsparmaßnahmen, so ergibt sich ein deutlicher wirtschaftlicher Vorteil, der umso größer ist, je mehr Strom eingespart wird, obwohl dafür höhere Investitionskosten erforderlich sind. Spart der Haushalt beispielsweise 2.000 Kilowattstunden ein, so liegt der wirtschaftliche Vorteil ohne Batteriespeicher nach 20 Jahren bei 15.893 Euro gegenüber der Ausgangssituation.

Steht neben dem Investitionskapital für eine neue PV-Anlage noch weiteres Geld zur Verfügung, so lohnt es sich aus ökologischer und ökonomischer Sicht daher in jedem Fall, zunächst in Stromsparmaßnahmen zu investieren. Haushalte, die mit Hilfe eines Batteriespeichers einen höheren Autarkiegrad erreichen wollen, können diesen auch durch Reduzierung des Stromverbrauchs erhöhen. Die Kombination eines vergleichsweise kleineren Batteriespeichers zusammen mit Stromsparmaßnahmen stellt daher sowohl aus Autarkie- als auch aus finanzieller Sicht eine optimale Lösung dar.

Abbildung 6-3: Neuinstallation PV-Anlage: Wirtschaftlichkeit mit unterschiedlich dimensionierten Batteriespeichern und Stromeinsparungen



Quelle: Öko-Institut e.V.

6.4. Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit von PV-Batteriespeichern

Im Folgenden werden diejenigen Parameter reflektiert, die wesentliche Auswirkungen auf die Höhe der Wirtschaftlichkeit von PV-Batteriespeichern haben können.

- **Solareinstrahlung:** Die Wirtschaftlichkeit eines Photovoltaik-Batteriespeichers hängt unter anderem vom Stromertrag der PV-Anlage ab. Bei PV-Anlagen mit Ost-West-Ausrichtung ist die Stromerzeugung in der Regel geringer als bei Anlagen in Südausrichtung, auch die Dachneigung kann eine Rolle spielen.
- **Lastkurve für den Stromverbrauch:** Die Wirtschaftlichkeit eines PV-Batteriespeichers kann sich gegebenenfalls ändern, wenn der Haushalt eine atypische Verbrauchskurve hat, z.B. wenn die Wohnung über längere Perioden komplett leer steht, ein Elektroauto regelmäßig tagsüber bzw. nachts geladen wird o.ä.
- **Nutzungsdauer des PV-Batteriespeichers:** Für Lithium-Ionen-Speicher liegt die Nutzungsdauer bei etwa 20 Jahren. Ein vorzeitig notwendiger Komplett-Austausch des Batteriespeichers innerhalb dieses Berechnungszeitraums hätte große Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit.
- **Kosten für PV-Batteriespeicher:** Die Spannweite bei den Kosten für PV-Batteriespeicher ist recht groß und Lithium-Ionen-Speicher unterliegen zudem aktuell noch einer starken Kostendegression (siehe Abschnitt 3.9). Die spezifischen Kosten können sich daher je nach individuellem Angebot und auch je nach Zeitpunkt der Installation noch ändern.
- **Annahme der künftigen Stromkosten:** Wirtschaftlichkeitsberechnungen für PV-Batteriespeicher werden wesentlich davon beeinflusst, welche Strompreisentwicklung für die nächsten 20 Jahre angenommen wird, z.B. ob von sinkenden oder eher steigenden Kosten für den Strombezug ausgegangen wird. Während viele im Internet verfügbare Speicherrechner von steigenden Stromkosten ausgehen, wird im Stromspar-Speicherrechner des Öko-Instituts noch bis zum Jahr 2025 ein Anstieg der Strompreise angenommen, danach wird jedoch auf Grund einer kleiner werdenden EEG-Umlage durch die dann auslaufenden hohen Einspeisevergütungen mit leicht sinkenden Strompreisen gerechnet.
- **Einfluss von Förderungen oder Kreditkosten auf die Wirtschaftlichkeit:** Mögliche finanzielle Förderungen (z.B. durch die KfW), Kosten für die Aufnahme eines Kredits zur Finanzierung der Anschaffung der PV-Anlage bzw. des Batteriespeichers oder auch steuerliche Auswirkungen können die Wirtschaftlichkeit positiv oder negativ beeinflussen.
- **Mögliche Deckelung der PV-Einspeiseleistung:** Eine der Fördervoraussetzungen für das KfW-Programm 275 (Erneuerbare Energien „Speicher“) besteht darin, dass die maximale Leistungsabgabe der Photovoltaikanlage über mindestens 20 Jahre nur 50 Prozent der installierten Leistung der PV-Anlage betragen darf. Das bedeutet, dass über diesen Zeitraum immer mindestens 50 Prozent des Stroms selbst verbraucht werden müssen. Eine solche Deckelung der Stromerzeugung kann sich auf die Gesamtwirtschaftlichkeit auswirken.
- **Investitionskosten für Stromsparmaßnahmen:** In der vorliegenden Studie wird bei den erforderlichen Investitionskosten für Stromsparmaßnahmen mit pauschalierten Werten gerechnet (30 Prozent der Kosten entfallen auf geringinvestive Einsparmaßnahmen à 0,05 Euro je einzusparende Kilowattstunde und 70 Prozent der Kosten auf investive Einsparmaßnahmen à 1,00 bis 1,50 Euro je einzusparende Kilowattstunde, siehe Abschnitt 5). Die tatsächlichen Kosten für Stromsparmaßnahmen können je nach individueller Maßnahme (z.B. spezifischer Geräteaus-tausch) von diesem Ansatz abweichen und damit die Wirtschaftlichkeit beeinflussen.

7. Literatur

- Aquion Energy (o.J.): Aspen 48S-2.2 Battery. Product Specification Sheet. Online verfügbar: http://info.aquionenergy.com/hubfs/01_Product_Documentation/Aquion_Energy_Aspen_48S-2.2_Product_Specification_Sheet.pdf; letzter Abruf am 18.10.2017.
- Baars (2017): Neuer Effizienzleitfaden: Darauf solltet ihr bei Speichersystemen achten, SMA. Online verfügbar: <http://www.sma-sunny.com/neuer-effizienzleitfaden-darauf-solltet-ihr-bei-speichersystemen-achten/>; letzter Abruf am 08.03.2018.
- BDEW (2017): BDEW - Strompreisanalyse Mai 2017. Online verfügbar: [https://www.bdew.de/internet.nsf/res/ACB6766AE4CA66E0C1258132004BC873/\\$file/170531_BDEW_Strompreisanalyse_Mai2017.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/res/ACB6766AE4CA66E0C1258132004BC873/$file/170531_BDEW_Strompreisanalyse_Mai2017.pdf); letzter Abruf am 25.08.2017.
- BlueSky Energy (2017): Chinesen kaufen Aquion Energy. Online verfügbar: <https://www.portaldewirtschaft.de/pressemitteilung/288774/chinesen-kaufen-aquion-energy.html>; letzter Abruf am 23.10.2017.
- BlueSky Energy (2017): GreenRock - Der Salzwasser-Stromspeicher. Der sicherste & umweltfreundlichste Stromspeicher. Online verfügbar: http://www.bluesky-energy.eu/wp-content/uploads/2017/02/Endkundenflyer_GREENROCK_a4_2017-02_de.pdf; letzter Abruf am 18.10.2017.
- BlueSky Energy (o.J.): GREENROCK S-Line Stromspeicher Gesamtsystem. Technische Daten. Online verfügbar: <http://www.bluesky-energy.eu/project/greenrock-s-line-stromspeicher-gesamtsystem/>; letzter Abruf am 18.10.2017.
- BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung (BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Hrsg.). Online verfügbar: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiekonzept-2010.html>; letzter Abruf am 28.12.2017.
- C.A.R.M.E.N. e.V. (2017): Marktübersicht Batteriespeicher. Informationsangebot (C.A.R.M.E.N. e.V., Hrsg.). Online verfügbar: https://www.carmen-ev.de/files/Sonne_Wind_und_Co/Speicher/Markt%C3%BCbersicht-Batteriespeicher_2017.pdf; letzter Abruf am 13.10.2017.
- co2online gGmbH (co2online gGmbH, Hrsg.) (2017): Stromspiegel für Deutschland 2017. Klimaschutz zu Hause. Online verfügbar: https://www.die-stromsparinitiative.de/fileadmin/bilder/Stromspiegel/broschuere/Stromspiegel_2017_web.pdf; letzter Abruf am 08.03.2018.
- Doelling (2017): Wirkungsgrad von Solar-Stromspeichern im Vergleich. Online verfügbar: www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/photovoltaik/stromspeicher/wirkungsgrad.html; letzter Abruf am 13.10.2017.
- E-Bridge Consulting et al. (2014): Moderne Verteilnetze für Deutschland. Abschlussbericht (Bundesminister für Wirtschaft und Energie, Hrsg.). Berlin.
- ENBAUSA – Energetisch Bauen und Sanieren (ENBAUSA - Energetisch Bauen und Sanieren, Hrsg.) (2014): Brandgefahr auch bei Lithium-Eisenphosphat-Batterien. Online verfügbar: <https://www.enbausa.de/solarenergie/aktuelles/artikel/brandgefahr-auch-bei-lithium-eisenphosphat-batterien-3269.html>; letzter Abruf am 17.11.2017.
- EuPD Research Sustainable Management GmbH (2017): Deutsche Anbieter behaupten Führungsposition im deutschen und europäischen Markt für Solarspeicher. Online verfügbar: <http://www.eupd-research.com/en/home/view-details/deutsche-anbieter-behaupten-fuehrungsposition-im-deutschen-und-europaeischen-markt-fuer-solarspeiche/>; letzter Abruf am 20.10.2017.
- Figgenger et al. (2017): Wissenschaftliches Mess- und Evaluierungsprogramm Solarstromspeicher 2.0. Jahresbericht 2017. Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe der RWTH Aachen. Online verfügbar: http://www.speichermonitoring.de/fileadmin/user_upload/Speichermonitoring_Jahresbericht_2017_ISEA_RWTH_Aachen.pdf; letzter Abruf am 31.07.2017.

- Finke (o.J.): Die Vergütung für eingespeisten Solarstrom 2017, PVS Solarstrom. Online verfügbar: <https://photovoltaiksolarstrom.com/einspeiseverguetung/>; letzter Abruf am 25.10.2017.
- Fischer et al. (2016): Konzept zur absoluten Verminderung des Energiebedarfs: Potenziale, Rahmenbedingungen und Instrumente zur Erreichung der Energieverbrauchsziele des Energiekonzepts (Climate Change Nr. 17). Umweltbundesamt.
- Forschungsstelle für Energienetze und Energiespeicher (2015): Der positive Beitrag dezentraler Batteriespeicher für eine stabile Stromversorgung. Regenburg. Online verfügbar: https://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/BEE_HM_FENES_Kurzstudie_Der_positive_Beitrag_von_Batteriespeichern_2015.pdf; letzter Abruf am 14.11.2017.
- Graulich et al. (2018): Einsatz und Wirtschaftlichkeit von Photovoltaik-Batteriespeichern in Kombination mit Stromsparen. Ergebnisse aus dem BMBF-geförderten Verbundprojekt BuergEn „Perspektiven der Bürgerbeteiligung an der Energiewende unter Berücksichtigung von Verteilungsfragen“. Öko-Institut e.V. in Zusammenarbeit mit Büro Ö-quadrat GmbH. Online verfügbar: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/PV-Batteriespeicher-Endbericht.pdf>; letzter Abruf am 21.03.2018.
- Graulich & Manhart (2017): Entwicklung von Kriterien und Herstellerempfehlungen für ein Förderprogramm der EWS zu Photovoltaik-Batteriespeichern. Kurzstudie für die Elektrizitätswerke Schönau Vertriebs GmbH (EWS). Öko-Institut e.V. Online verfügbar: https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Foerdkriterien_PV-Batteriespeicher_EWS.pdf; letzter Abruf am 10.01.2018.
- Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin (2016): 50%-Studie: Effekte der 50%-Einspeisebegrenzung des KfW-Förderprogramms für Photovoltaik-Speichersysteme. Berlin. Online verfügbar: <https://pvspeicher.htw-berlin.de/wp-content/uploads/2016/02/HTW-Berlin-50-Prozent-Studie.pdf>; letzter Abruf am 14.11.2017.
- KfW Bankengruppe (2017): KfW-Programm Erneuerbare Energien "Speicher" (275), KfW Bankengruppe. Online verfügbar: [https://www.kfw.de/KfW-Konzern/Service/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-\(Inlandsf.\)-\(D-EN\)/Barrierefreie-Dokumente/KfW-Programm-Erneuerbare-Energien-Speicher-\(275\)-Merkblatt/](https://www.kfw.de/KfW-Konzern/Service/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-(Inlandsf.)-(D-EN)/Barrierefreie-Dokumente/KfW-Programm-Erneuerbare-Energien-Speicher-(275)-Merkblatt/); letzter Abruf am 04.12.2017.
- Koepf et al. (2017): Mieterstrom. Rechtliche Einordnung, Organisationsformen, Potenziale und Wirtschaftlichkeit von Mieterstrommodellen (MSM) (BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Hrsg.). Online verfügbar: http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/schlussbericht-mieterstrom.pdf?__blob=publicationFile&v=10; letzter Abruf am 28.12.2017.
- Köhler et al. (2017): Vergleichende ökonomische und ökologische Bewertung von innovativen, stationären Energiespeichertechnologien in der industriellen Produktion (VDI ZRE, Hrsg.).
- Märtel (Solaranlagen Portal, Hrsg.) (o.J.a): Solarstromspeicher Preise. Online verfügbar: <https://www.solaranlagen-portal.com/photovoltaik/stromspeicher/preise>; letzter Abruf am 28.12.2017.
- Märtel (Solaranlagen Portal, Hrsg.) (o.J.b): Vergütung für Eigenverbrauch von Solarstrom. Online verfügbar: <https://www.solaranlagen-portal.com/photovoltaik/eigenverbrauch/einspeiseverguetung>; letzter Abruf am 28.12.2017.
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Ba-Wü (2017): Photovoltaik und Batteriespeicher. Technologie, Integration, Wirtschaftlichkeit (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Ba-Wü, Hrsg.). Online verfügbar: https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Energie/UM_PV_Batteriespeicher.pdf; letzter Abruf am 06.07.2017.
- Petersen, N. H. (2015): Die Salzwasserbatterie. Photovoltaik 9/2015 (2015). Online verfügbar: <https://www.photovoltaik.eu/article-669301-30021/die-salzwasserbatterie-.html>; letzter Abruf am 18.10.2017.
- PV Magazine (PV Magazine, Hrsg.) (2016): Batteriespeicher: die Frage nach der Effizienz. Online verfügbar: <https://www.pv-magazine.de/2016/03/11/batteriespeicher-die-frage-nach-der-effizienz/?L=1%5C%27&cHash=d66efee1d9c34504c661c907dd4fe246>; letzter Abruf am 04.09.2017.

- PV Magazine (PV Magazine, Hrsg.) (2017): Produktdatenbank Batteriespeichersysteme für Photovoltaikanlagen. pv magazine Produktdatenbank zu Heimspeichersystemen 2017. Online verfügbar: <https://www.pv-magazine.de/marktuebersichten/batteriespeicher/speicher-2017/>; letzter Abruf am 13.10.2017.
- Sauer (2013): Marktanreizprogramm für dezentrale Speicher insbesondere für PV-Strom. Kurzgutachten. RWTH Aachen - Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe. Online verfügbar: https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Gutachten/kurzgutachten_marktanreizprogramm_bf.pdf?__blob=publicationFile&v=2; letzter Abruf am 07.07.2017.
- Schill et al. (2017): Dezentrale Eigenstromversorgung mit Solarenergie und Batteriespeichern: Systemorientierung erforderlich (Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Hrsg.) (DIW Wochenbericht 12.2017). Berlin. Online verfügbar: http://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.554835.de/17-12-1.pdf; letzter Abruf am 28.03.2017.
- Solarenergie Förderverein Deutschland e.V. (Solarenergie Förderverein Deutschland e.V., Hrsg.) (2017): Solarstrom-Vergütungen im Überblick. Online verfügbar: <http://www.sfv.de/lokal/mails/sj/verguetu.htm>; letzter Abruf am 28.12.2017.
- Stahl et al. (2016): Ableitung von Recycling- und Umweltaanforderungen und Strategien zur Vermeidung von Versorgungsrisiken bei innovativen Energiespeichern (Umweltbundesamt, Hrsg.). Dessau-Roßlau. Online verfügbar: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_07_2016_ableitung_von_recycling-und_umweltaanforderungen.pdf; letzter Abruf am 07.07.2017.
- Tepper (2016): Solarstromspeicher - Preismonitor Deutschland. Ergebnisse 1. Halbjahr 2016, Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (BSW) und Intersolar Europe. Online verfügbar: https://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/user_upload/BSW_Speicherpreismonitor_1hj_2016.pdf; letzter Abruf am 31.08.2017.
- Tjaden, T. et al. (2016): Energie aus PV-Anlagen intelligent speichern. Mit prognosebasierten Betriebsstrategien Abregelverluste reduzieren. In: , *ep Photovoltaik Spezial* (06/2016, S. 14–18). Online verfügbar: <http://pvspeicher.htw-berlin.de/wp-content/uploads/2014/04/Tjaden-2016-Intelligent-speichern-statt-abregeln-Web.pdf>; letzter Abruf am 23.10.2017.
- Umweltbundesamt (Umweltbundesamt, Hrsg.) (2015): Lithium-Batterien und -Akkus. Online verfügbar: <https://www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/elektrogeraete/lithium-batterien-akkus>; letzter Abruf am 03.11.2017.
- Verbraucherzentrale Nordrhein-Westfalen (2016): Marktübersicht für Solarstromspeicher bis 12 kWh (Juni 2016) (Verbraucherzentrale Nordrhein-Westfalen, Hrsg.). Online verfügbar: https://www.verbraucherzentrale.nrw/sites/default/files/migration_files/media240343A.pdf; letzter Abruf am 13.10.2017.
- Weniger et al. (2017): Vergleich verschiedener Kennzahlen zur Bewertung der energetischen Performance von PV-Batteriesystemen. HTW Berlin. Online verfügbar: https://pvspeicher.htw-berlin.de/wp-content/uploads/2017/03/WENIGER-2017_03-Vergleich-verschiedener-Kennzahlen-zur-Bewertung-der-energetischen-Performance-von-PV-Batteriesystemen.pdf; letzter Abruf am 04.09.2017.
- Wohlfahrt-Mehrens (o.J.): Lithium-Batterien. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung. Online verfügbar: http://www.hiu-batteries.de/fileadmin/user_upload/Dokumente/Broschueren/lithium_batterien.pdf; letzter Abruf am 10.11.2017.
- Württemberg (2014): Der Salzwasser-Akku. Neuer Energiespeicher. Online verfügbar: <http://www.elektroniknet.de/elektronik/power/der-salzwasser-akku-108903.html>; letzter Abruf am 18.10.2017.

8. Anhang: EEG-Einspeisevergütung und Eigenverbrauchsbonus in Abhängigkeit vom Inbetriebnahmezeitpunkt der PV-Anlage

Der Vergütungssatz für den durch die PV-Anlage erzeugten und ins Netz eingespeisten Strom (EEG-Einspeisevergütung) ist abhängig von der Größe der PV-Anlage (für Anlagen größer als 10 kWp gelten andere EEG-Vergütungssätze) und dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme (siehe Tabelle 8-1); ab diesem Zeitpunkt wird er über 20 Jahre lang gleichbleibend gezahlt.

Tabelle 8-1: EEG-Einspeisevergütung für Anlagen bis PV-Anlagen 10 kWp

Inbetriebnahmezeitpunkt	Mindest-Solarstromvergütung (Ct/kWh)	Erneuerbare-Energien-Gesetz Stand
Bis 2000	50,62	EEG 2000
2001	50,62	EEG 2000
2002	48,10	EEG 2000
2003	45,70	EEG 2000
2004	57,40	EEG 2004
2005	54,53	EEG 2004
2006	51,80	EEG 2004
2007	49,21	EEG 2004
2008	46,75	EEG 2004
2009	43,01	EEG 2009
2010 (1.1.-30.6.)	39,14	EEG 2009
2010 (1.7.-30.9.)	34,05	EEG-Novelle 2010
2010 (1.10.-31.12.)	33,03	EEG-Novelle 2010
2011	28,74	EEG-Novelle 2010
2012 (1.1.-31.3.)	24,43	EEG 2012 (PV-Novelle)
2012 (April)	19,50	EEG 2012 (PV-Novelle)
2012 (Mai)	19,31	EEG 2012 (PV-Novelle)
2012 (Juni)	19,11	EEG 2012 (PV-Novelle)
2012 (Juli)	18,92	EEG 2012 (PV-Novelle)
2012 (August)	18,73	EEG 2012 (PV-Novelle)
2012 (September)	18,54	EEG 2012 (PV-Novelle)
2012 (Oktober)	18,36	EEG 2012 (PV-Novelle)
2012 (November)	17,90	EEG 2012 (PV-Novelle)
2012 (Dezember)	17,45	EEG 2012 (PV-Novelle)
2013 (Januar)	17,02	EEG 2012 (PV-Novelle)
2013 (Februar)	16,64	EEG 2012 (PV-Novelle)
2013 (März)	16,28	EEG 2012 (PV-Novelle)

Inbetriebnahmezeitpunkt	Mindest-Solarstromvergütung (Ct/kWh)	Erneuerbare-Energien-Gesetz Stand
2013 (April)	15,92	EEG 2012 (PV-Novelle)
2013 (Mai)	15,63	EEG 2012 (PV-Novelle)
2013 (Juni)	15,35	EEG 2012 (PV-Novelle)
2013 (Juli)	15,07	EEG 2012 (PV-Novelle)
2013 (August)	14,80	EEG 2012 (PV-Novelle)
2013 (September)	14,54	EEG 2012 (PV-Novelle)
2013 (Oktober)	14,27	EEG 2012 (PV-Novelle)
2013 (November)	14,07	EEG 2012 (PV-Novelle)
2013 (Dezember)	13,88	EEG 2012 (PV-Novelle)
2014 (Januar)	13,68	EEG 2012 (PV-Novelle)
2014 (Februar)	13,55	EEG 2012 (PV-Novelle)
2014 (März)	13,41	EEG 2012 (PV-Novelle)
2014 (April)	13,28	EEG 2012 (PV-Novelle)
2014 (Mai)	13,14	EEG 2012 (PV-Novelle)
2014 (Juni)	13,01	EEG 2012 (PV-Novelle)
2014 (Juli)	12,88	EEG 2012 (PV-Novelle)
2014 (August)	12,75	EEG 2014
2014 (September)	12,69	EEG 2014
2014 (Oktober)	12,65	EEG 2014
2014 (November)	12,62	EEG 2014
2014 (Dezember)	12,59	EEG 2014
2015 (Januar)	12,56	EEG 2014
2015 (Februar)	12,53	EEG 2014
2015 (März)	12,50	EEG 2014
2015 (April)	12,47	EEG 2014
2015 (Mai)	12,43	EEG 2014
2015 (Juni)	12,40	EEG 2014
2015 (Juli)	12,37	EEG 2014
2015 (August)	12,34	EEG 2014
2015 (1.9.-31.12.)	12,31	EEG 2014
2016	12,31	EEG 2014
2017 (1.1.-30.4.)	12,30	EEG 2017
2017 (1.5.-31.5.)	12,27	EEG 2017
2017 (1.6.-30.6.)	12,24	EEG 2017

Inbetriebnahmezeitpunkt	Mindest-Solarstromvergütung (Ct/kWh)	Erneuerbare-Energien-Gesetz Stand
2017 (1.7.-31.12.)	12,20	EEG 2017
2018 (1.1.-31.1.)	12,20	EEG 2017

Quelle: Solarenergie Förderverein Deutschland e.V. (2017)

Für PV-Anlagen, die in den Jahren 2009 bis 2012 in Betrieb genommen wurden, wird zusätzlich zur EEG-Einspeisevergütung ein so genannter Eigenverbrauchsbonus gezahlt, wenn ein bestimmter Anteil des erzeugten Stroms selbst verbraucht wird. Die Jahreszahl bezieht sich beim Eigenverbrauch immer auf den Zeitpunkt der Inbetriebnahme der PV-Anlage, nicht auf das Jahr, in dem der Solarstrom verbraucht wird. Die jeweiligen Regelungen gelten ab Zeitpunkt der Inbetriebnahme für die gesamte Dauer der kommenden 20 Jahre, für die auch die reguläre Einspeisevergütung gewährt wird.

Tabelle 8-2: Sätze für EEG-Eigenverbrauchsbonus

Inbetriebnahmezeitpunkt	Eigenverbrauchsanteil bis 30%	Eigenverbrauchsanteil über 30%
01.01. – 31.12.2009	25,01 ct/kWh	
01.01. – 30.06.2010	22,76 ct/kWh	
01.07. – 30.09.2010	17,67 ct/kWh	22,05 ct/kWh
01.10. – 31.12.2010	16,65 ct/kWh	21,03 ct/kWh
01.01. – 31.12.2011	12,36 ct/kWh	16,74 ct/kWh
01.01. – 31.03.2012	8,05 ct/kWh	12,43 ct/kWh
01.04. – 30.06.2012	Bis zu diesem Tag galt noch eine Übergangsregelung für die Eigenverbrauchsbedingungen aus dem ersten Quartal 2012. Allerdings nur, wenn vor dem 24. Februar 2012 ein Netzanschlussbegehren für die Photovoltaik Anlage beim örtlichen Netzbetreiber gestellt wurde. Dann konnte die Anlage auch noch bis zum 30. Juni in Betrieb genommen werden und bekam trotzdem noch die Eigenverbrauch Vergütung gewährt, auch wenn diese seit dem 01. April bereits ausgelaufen war.	

Quellen: Solarenergie Förderverein Deutschland e.V. (2017); Märtel (o.J.b)