

Auslegung und Betriebsergebnisse eines elektrischen Energiespeichers in einem Passivhaus Plus mit 17 Wohneinheiten

Marc Großklos, Britta Stein, Institut Wohnen und Umwelt GmbH
Rheinstraße 65, 64295 Darmstadt
Tel.: +49 (0) 6151 290447, m.grossklos@iwu.de

1 Einleitung

Elektrische Energiespeicher können bei der wünschenswerten verstärkten dezentralen Stromerzeugung in Gebäuden zu einer deutlichen Erhöhung des Eigenverbrauchsanteils einer Photovoltaik(PV)-Erzeugung sowie des Autarkiegrades beitragen. Sie haben in den letzten Jahren eine rasante Entwicklung erfahren und wurden zu Tausenden in Einfamilienhäusern installiert. Sie schaffen einen Ausgleich zwischen der PV-Stromerzeugung am Tag und dem Elektroenergieverbrauch am Abend und in der Nacht. In Mehrfamilienhäusern sind diese Speicher noch wenig verbreitet, und es liegen bisher kaum dokumentierte Erfahrungen zu Auslegung und Betrieb vor. Dies gilt besonders, wenn verschiedene Energieerzeuger wie Photovoltaik und Blockheizkraftwerk (BHKW) mit unterschiedlichen Erzeugungsprofilen kombiniert werden.

In der Cordierstraße 4 in Frankfurt am Main wurde durch die ABG Frankfurt HOLDING ein Mehrfamilienhaus mit 17 Wohneinheiten und 1219 m² Energiebezugsfläche als Ersatzneubau in einem bestehenden Quartier errichtet (Abbildung 1) und 2014 bezogen. Planung und Bauleitung lagen beim Büro faktor 10. Die Verbrauchs- und Erzeugungsdaten werden im bewohnten Zustand erfasst und vom Institut Wohnen und Umwelt ausgewertet.



Abbildung 1: Ansichten des Gebäudes von der West- und Südostseite

Neben der Umsetzung des Passivhaus-Standards wurde große Aufmerksamkeit auf die Reduktion der Verteilverluste, des Energieaufwandes für die Warmwasserbereitung und des Haushaltsstromverbrauchs gelegt [1].

Für die Wärmeversorgung sind 40 m² Vakuumröhrenkollektoren sowie ein Biomethan-BHKW (14,6 kW_{th}) installiert. Die Erzeugung der elektrischen Energie erfolgt über Photovoltaikanlagen auf Dach, Carport und an der Fassade (insgesamt ca. 49,7 kW_p) zusammen mit dem Biomethan-BHKW (5 kW_{el}). Vorteil dieses Konzeptes ist, dass sich Photovoltaik und BHKW bei der Stromerzeugung sehr gut ergänzen. Da die solarthermische Anlage im Sommer den Wärmebedarf für Warmwasser deckt, wird das wärmegeführte BHKW hauptsächlich in den Wintermonaten betrieben. Somit erzeugt es genau dann Strom, wenn die Photovoltaik nur geringe Erträge liefert.

Das Gebäude wurde 2012 als Passivhaus mit einem Netto-Energiegewinn in der Jahresbilanz geplant. Eine Berechnung mit PHPP 9.2 ergab einen Bedarf an erneuerbarer Primärenergie (primary energy renewable, PER) von 49 kWh/(m²a) und eine Erzeugung erneuerbarer Energie von 121 kWh/(m²a), so dass die Anforderungen an das Passivhaus Plus erreicht werden. Wird die PV-Anlage auf dem Carport mit berücksichtigt, dann steigt die erneuerbare Energieerzeugung auf 178 kWh/(m²a), und das Gebäude erreicht fast das Niveau des Passivhauses Premium. In den folgenden Angaben ist die PV-Anlage auf dem Carport berücksichtigt.

2 Elektrospeicher

Um die elektrische Energie vorrangig im Gebäude selbst zu nutzen, wird ein elektrischer Energiespeicher mit 30,7 kWh nutzbarer DC-Kapazität eingesetzt (27 kWh AC-Kapazität) (Abbildung 2). Der Speicher besitzt 40 Lithium-Eisenphosphat-Zellen (LiFePO₄) mit je 300 Ah



**Abbildung 2: Elektrospeicher der Firma ASD
Sonnenspeicher**

Kapazität, die dreiphasig (AC) mit dem Gebäude und den Energieerzeugern verbunden sind. Die Entladetiefe wurde vom Hersteller auf 25 % festgelegt, um auch bei längerem Stillstand Tiefentladungen zu verhindern und so die Lebensdauer der Zellen zu verlängern. Aus dem gleichen Grund wurde der Lade-/Entladestrom auf 0,3 C bzw. 100 A begrenzt. Der Speicher wird nur dann geladen, wenn mehr elektrische Energie im Haus erzeugt als verbraucht wird, wobei zur Verlängerung der Lebensdauer eine möglichst

gleichmäßige Ladung der Zellen angestrebt ist. Eine Ladung aus dem Netz ist nur zur Verhinderung von Tiefentladung bei längerem Stillstand vorgesehen.

Die Verluste der LiFePO_4 -Zellen liegen nach Herstellerangaben bei 3 %, die Verluste der Wechselrichter bei 4 % (Laden) bzw. 6 % (Entladen), so dass der AC-Gesamtwirkungsgrad des Speichers mit 88 % angegeben wird. Der Elektrospeicher kostete im November 2013 ca. 50.000 € brutto, inkl. Montage.

Besonderheit der Speicherregelung ist, dass das Gebäude bei Versorgung aus dem Speicher komplett vom Netz getrennt wird (Netzalternativbetrieb). Der Vorteil dieser Regelung liegt in der vollständigen Versorgung des Verbrauchs im Gebäude auf allen drei Phasen aus dem Speicher. Ein „bilanzieller“ Ausgleich zwischen den Phasen über das elektrische Netz ist hierbei ausgeschlossen. Nachteil ist einerseits, dass in Zeiten, in denen die Stromerzeugung aus PV oder BHKW nicht zur Bedarfsdeckung ausreicht, die fehlende Leistung nicht wie beim Netzparallelbetrieb aus dem Speicher entnommen werden kann, da bei Versorgung aus dem Speicher das Gebäude vom Netz getrennt sein muss. Somit wird auch bei Netzalternativbetrieb bei vollem Speicher gegebenenfalls Restenergie aus dem Netz bezogen. Andererseits führt das Umschalten von Netz- auf Speicherbetrieb zu kurzen Unterbrechungen in der Energieversorgung im Bereich von wenigen Millisekunden. Über Probleme durch diese kurze Unterbrechung wurde von den Bewohnern nicht berichtet.

Der Speicher sollte im Sommer den Abend- und Nachtverbrauch des gesamten Hauses decken können. Weniger und Quaschnig empfehlen für Einfamilienhäuser eine Dimensionierung zur Eigenverbrauchserhöhung von 1 kWh/kW_P [2]. Für das Gebäude in der Cordierstraße liegt die Speichergröße jedoch nur bei $0,54 \text{ kWh/kW}_P$. Dieser Wert entspricht etwa dem Gleichzeitigkeitsfaktor, der bei der Elektroplanung in Mehrfamilienhäusern dieser Größe angesetzt wird. Die elektrische Leistung des BHKW wurde hierbei nicht berücksichtigt, da dessen Betriebszeiten abhängig vom Wärmebedarf im Jahresverlauf zwischen 0 h und 24 h am Tag liegen. Aufgrund der hohen Anlaufströme kann der Aufzug nicht vom Speicher versorgt werden, da die Dauerleistung des Speichers auf 7 kW pro Phase begrenzt ist (maximale Spitzenleistung 8 kW je Phase).

3 Betriebserfahrungen

Der Elektrospeicher wurde im Mai 2014 in Betrieb genommen. In der Anfangszeit traten Probleme bei den elektrischen Schaltanlagen und bei der Speicherregelung auf. Außerdem war der Elektrospeicher zur Abklärung von Fragen zur Kurzschlussleistung bei Speicherversorgung von Oktober 2014 bis April 2015 außer Betrieb. Seit Mai 2015 ist er in Dauerbetrieb.

Der Gesamtstromverbrauch des Hauses lag im Jahr 2015 bei $25,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, die Stromerzeugung bei $48,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ (Tabelle 1). Vom erzeugten Strom wurden $20,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ ins Netz eingespeist, während $4,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ aus dem Netz bezogen wurden. Die Verluste des Elektrospeichers lagen im Betriebszeitraum 2015 (251 d) bei $3,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, entsprechend 15 % der abgegebenen Energie. Diese liegen somit etwas über den Herstellerangaben von 12 % Verlust auf der AC-Seite. Im Rahmen der Messunsicherheiten wird der Herstellerwert annähernd erreicht.

Die gemessene nutzbare AC-Speicherkapazität liegt bei ca. 30,5 kWh, was einer Entladetiefe von 80 % entspricht, so dass der Hersteller die nutzbare Kapazität im Rahmen eines Softwareupdates gegenüber der bei Inbetriebnahme erhöht hat.

Das Gebäude erreichte mit dem Speicher einen sehr hohen Autarkiegrad (Verhältnis Eigenverbrauch zu Gesamtstromverbrauch) von 81 %, ohne Speicher (Januar bis Mitte April) immer noch 57 % und damit deutlich mehr, als bei einer reinen PV-Versorgung zu erreichen wäre. Der Anteil der Stromerzeugung, der selbst verbraucht wurde, lag ohne Speicher bei 43 % und mit Speicher bei 57 %, wobei berücksichtigt werden muss, dass im Sommer typischerweise hohe Überschüsse durch die PV entstehen.

2015	absolut	bezogen auf A_{EBF}
	[kWh/a]	[kWh/(m ² a)]
Stromverbrauch	31.231	25,6
Haushaltstrom	21.099	17,3
Hilfsstrom	10.132	8,3
Stromerzeugung	59.678	48,9
Photovoltaik	45.958	37,7
Biomethan-BHKW	13.720	11,3
Stromaustausch mit dem elektrischen Netz		
Netzeinspeisung gesamt	25.328	20,8
Netzbezug gesamt	5.394	4,4
Elektrospeicher		
Verluste Speicher	4.670	3,8
Verluste Speicher (2. Halbjahr)	15%	
Netzkenndaten		
	mit Speicher	ohne Speicher*
Eigenverbrauchsanteil	57%	43%
elektrischer Autarkiegrad	81%	57%

* 01.01.15 - 14.04.15

Tabelle 1: Kenndaten Stromerzeugung und -verbrauch im Jahr 2015; A_{EBF} : Energiebezugsfläche

Der Verlauf der monatlichen Erzeugung aus PV-Anlage und BHKW, der Stromverbrauch des Gebäudes sowie der Autarkiegrad sind in Abbildung 3 für den Zeitraum Juli 2014 bis Dezember 2015 dargestellt. Grau hinterlegt ist die Zeit, in der der Elektrospeicher nicht in Betrieb war. In diesem Winterhalbjahr 2014/2015 schwankt der Autarkiegrad zwischen 40 % und 90 %. Bei Gebäuden mit reiner PV-Erzeugung liegen die Werte im Winter meist unter 25 %. Diese hohen Autarkiegrade werden aufgrund des BHKW erreicht, das die mittlere elektrische Last des Gebäudes abdecken kann. In der Übergangszeit, wenn das BHKW nur wenige Stunden am Tag in Betrieb ist und die PV-Erträge meist gering sind, wurden die niedrigsten Deckungsanteile erreicht. Der Vergleich mit den Monaten Oktober bis Dezember 2015, in denen der Elektrospeicher überschüssige Energie aufnahm, zeigt, dass die Autarkiegrade angehoben sind. Aufgrund des Netzalternativbetriebs können jedoch kaum Autarkiegrade über 90 % erreicht werden, da die Erzeugungsanlagen an das Netz angeschlossen sein müssen und fehlende Energiemengen nicht durch den Speicher geliefert werden können. Mit einem Speicher im Netzparallelbetrieb wären hier höhere Autarkiegrade zu erreichen gewesen.

In den Sommermonaten mit hohen PV-Erträgen werden durch den Speicher Autarkiegrade über 90 % erreicht. Insgesamt zeigt sich die gleichmäßige Deckung des Elektroenergiebedarfs in diesem Gebäude durch die Kombination von PV-Anlage, BHKW und Elektrospeicher.

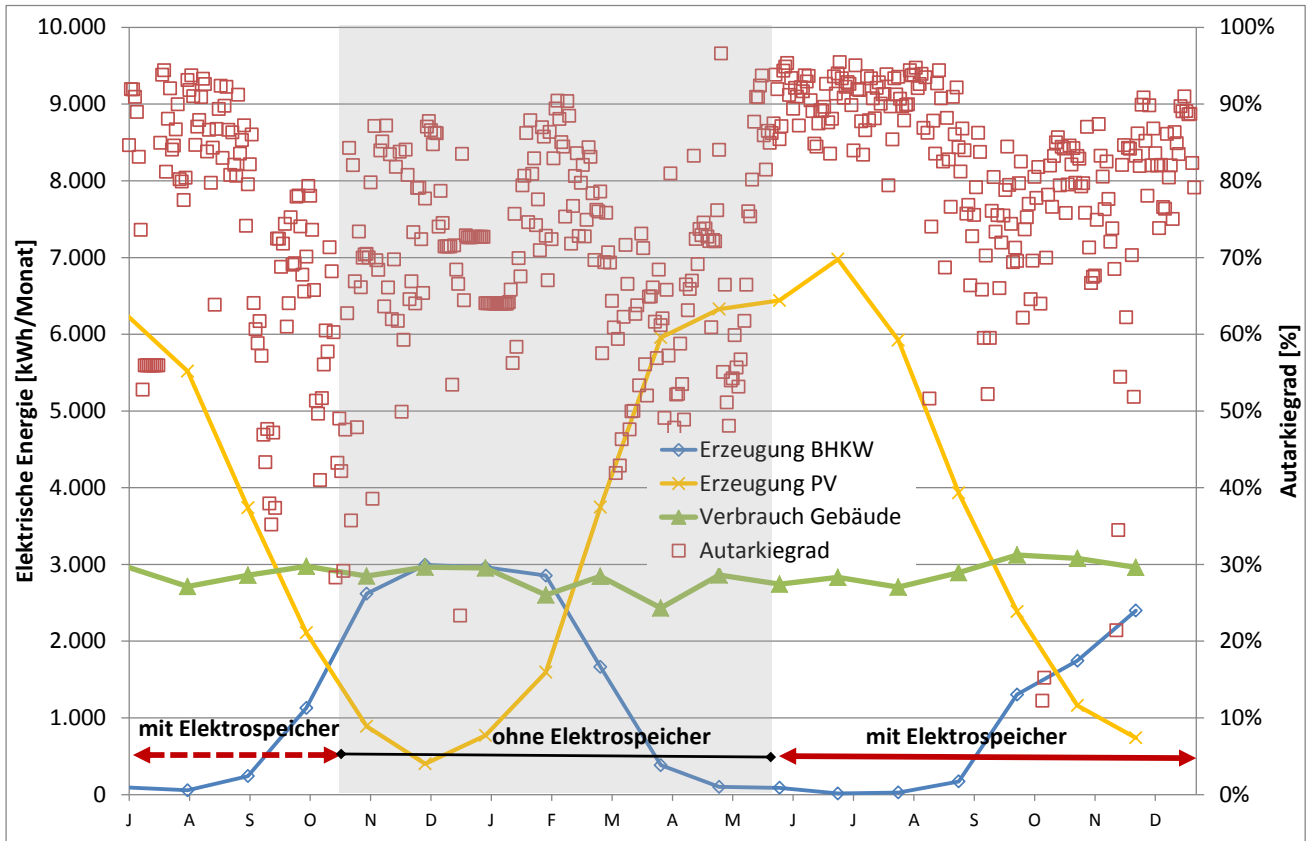


Abbildung 3: Stromerzeugung aus PV und BHKW und Stromverbrauch (jeweils als Monatsmittelwerte) mit und ohne Betrieb des Elektrospeichers sowie Autarkiegrad des Gebäudes (als Tagesmittelwerte)

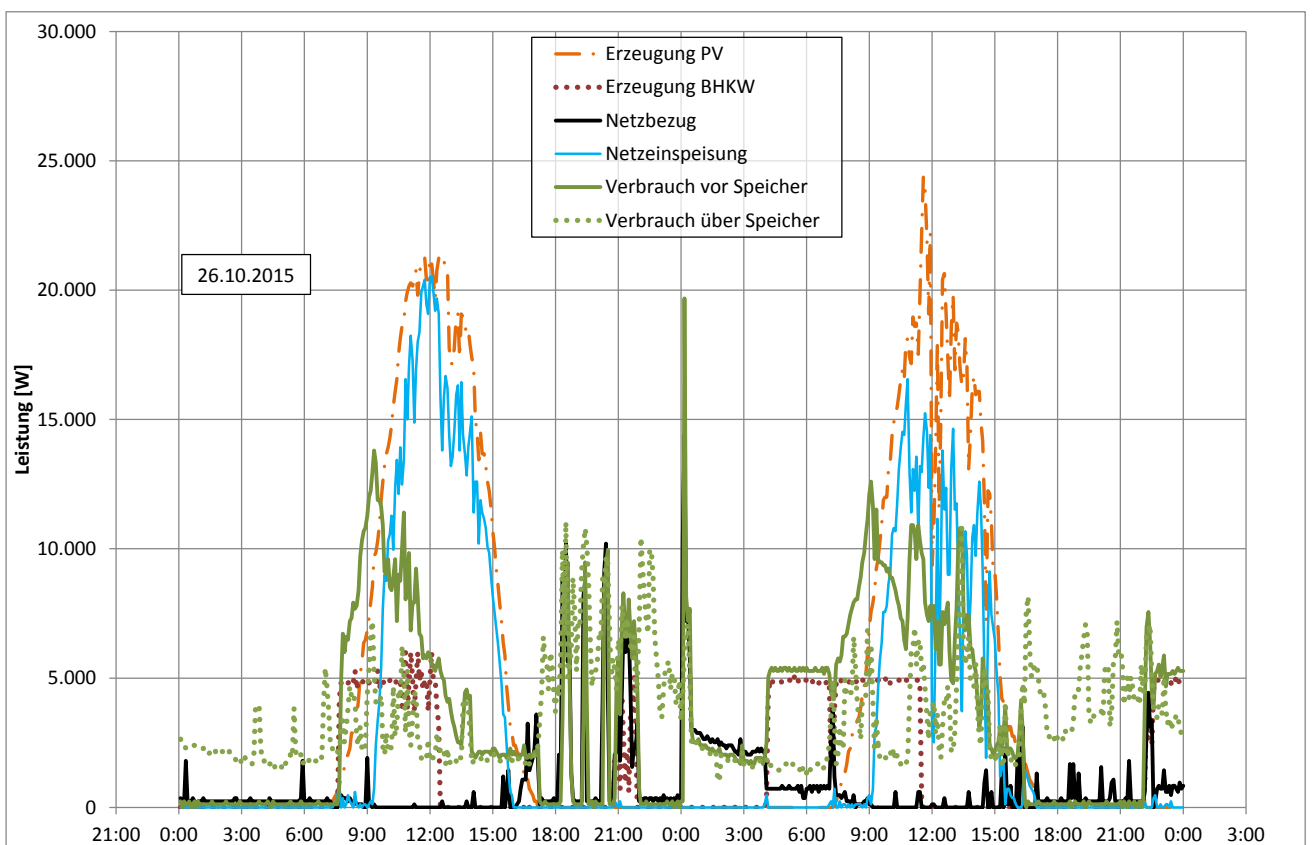


Abbildung 4: Stromerzeugung und -verbrauch über zwei Tage (26./27. Oktober 2015)

Abbildung 4 zeigt Elektroenergieerzeugung und Verbrauch für zwei Tage in der Übergangszeit mit guten Solarerträgen. Bei BHKW-Betrieb in der Nacht (zweiter Tag, 4:00 bis 7:00 Uhr) zeigt sich ein Bezug aus dem Netz von 700 W, obwohl der Verbrauch im Haus unter der Erzeugung des BHKW liegt. Erst wenn PV-Erzeugung hinzukommt, geht der Netzbezug auf null zurück. Grund ist eine ungenaue Erfassung der BHKW-Erzeugung und somit eine zu hohe Speicherladung, die Eigenverbrauch und Autarkiegrad mindert. Weiterhin treten beim Umschalten von Speicher- auf Netzbetrieb immer wieder hohe Leistungsspitzen auf, die durch eine kurzzeitige Ladung des Speichers aus dem Netz hervorgerufen werden. Vermutlich ist hier bei einzelnen Zellen die Kapazität stärker abgesunken, so dass deren Ladung von der Regelung ausgeglichen wird.

4 Schlussfolgerungen

Das untersuchte Mehrfamilienhaus, das die Anforderungen an ein Passivhaus Plus erreicht, kann mit Hilfe des elektrischen Energiespeichers in der Praxis Autarkiegrade von ca. 80 % erreichen. Die Auswertung des Speicherbetriebs zeigt, dass im Mehrfamilienhaus Elektro-speicher unter Berücksichtigung von Gleichzeitigkeitsfaktoren spezifisch kleiner dimensioniert werden können als im Einfamilienhaus, wodurch Einsparungen bei den Kosten möglich sind. Die Kombination von Stromerzeugern mit unterschiedlicher zeitlicher Erzeugungsstruktur ermöglicht bereits ohne Speicher höhere Autarkiegrade als bei einer Versorgung z.B. ausschließlich mit Photovoltaik.

Bei der Planung ist auch die elektrische Einbindung des Speichers zu berücksichtigen. Der Netzalternativbetrieb erlaubt eine sichere Versorgung des Gebäudes aus dem Speicher ohne bilanziellen Ausgleich zwischen den Phasen durch das Netz. Netzparallelbetrieb kann besonders bei Stromerzeugern mit einer niedrigen, aber konstanten Energielieferung Autarkiegrad und Eigenverbrauch erhöhen.

Grundsätzlich zeigen die Messergebnisse des Gebäudes Cordierstraße 4, dass auch im Mehrfamilienhaus durch die Kombination von hoher Energieeffizienz und regenerativen Energieerzeugern ein Netto-Elektroenergieüberschuss in der Jahres- und auch in der Monatsbilanz erreichbar ist. Die Untersuchung wurde im Rahmen des Feldversuchs zum Effizienzhaus Plus der Forschungsinitiative ZukunftBau finanziert.

5 Quellenverzeichnis

- [1] Schaede, M.; Großklos, M.: Passivhäuser mit Energiegewinn – Teilbericht Wissenschaftliche Begleitung Cordierstraße 4 in Frankfurt am Main. Institut Wohnen und Umwelt (IWU), Darmstadt, 2013.
- [2] Weniger, J.; Quaschnig, V.: Begrenzung der Einspeiseleistung von netzgekoppelten Photovoltaiksystemen mit Batteriespeichern. 28. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Kloster Banz, 06.–08. März 2013.