

Realisierte Potenziale der Energieerzeugungsanlagen in Wohngebäuden im Effizienzhaus Plus Standard

Antje Bergmann
Hans Erhorn

*Univ.-Prof. (em.) Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. Dr. E.h. mult. Karl Gertis
zum 80. Geburtstag gewidmet*



Realisierte Potenziale der Energieerzeugungsanlagen in Wohngebäuden im Effizienzhaus Plus Standard

Die Umsetzung eines nahezu klimaneutralen Gebäudebestands in Deutschland wird nur möglich sein, wenn konsequent Schritt für Schritt die Energieeffizienz bei der Errichtung und speziell beim Betrieb der Gebäude und der Anteil erneuerbarer Energien am Energieverbrauch gestärkt werden. Die neue Gebäudegeneration „Effizienzhaus Plus“ bietet dafür einen innovativen Ansatz. Sie unterstützt den konsequenten Wandel vom Energie verbrauchenden zum Energie gewinnenden Gebäude. Das Effizienzhaus Plus ist nicht an eine bestimmte Technologie gebunden, sondern es kann in einem technologieoffenen Ansatz auf vielfältige Weise durch eine intelligente Kombination von energieeffizienten Bautechnologien und erneuerbaren Energiegewinnsystemen realisiert werden. Im Beitrag werden die realisierten Potenziale des gebäudenah photovoltaisch erzeugten Stroms in den Demonstrationsgebäuden der Forschungsinitiative Effizienzhaus Plus des Bundes analysiert. Sie können als Benchmarks für den frühen Gebäudeentwurf dienen.

Stichworte: Effizienzhaus Plus Standard, klimaneutral, Energiewende, Bautechnologien

1 Einleitung

Die Energiewende in Deutschland ist insbesondere eine Energiewende im Bereich Bauen und Wohnen. Die Umsetzung eines nahezu klimaneutralen Gebäudebestands in Deutschland wird nur möglich sein, wenn konsequent Schritt für Schritt die Energieeffizienz bei der Errichtung und speziell beim Betrieb der Gebäude und der Anteil erneuerbarer Energien am Energieverbrauch gestärkt werden.

Die neue Gebäudegeneration „Effizienzhaus Plus“ bietet dafür einen innovativen Ansatz. Sie unterstützt den konsequenten Wandel vom Energie verbrauchenden zum Energie gewinnenden Gebäude. Das Effizienzhaus Plus ist nicht an eine bestimmte Technologie gebunden, sondern es kann in einem technologieoffenen Ansatz auf vielfältige Weise durch eine intelligente Kombination von energieeffizienten Bautechnologien und erneuerbaren Energiegewinnsystemen realisiert werden.

Realized potential of energy generation systems in residential buildings meeting the efficiency house plus standard

In Germany, the implementation of a nearly climate-neutral building stock will only be successful if energy efficiency is constantly improved in the sectors of building construction and, particularly, building operation. In terms of building energy consumption, it is also essential that the share of renewable energy will be continuously increased. In this context, the new generation of 'Efficiency House Plus' buildings provides an innovative approach. This new generation of buildings consistently supports the steady transition from energy-consuming buildings towards energy-producing buildings. Since the 'Efficiency House Plus' is not restricted to any specific technology it can be realized in multiple ways, based on an approach that is open to all types of technology, using an intelligent combination of energy-efficient construction technologies and renewable energy generation systems. This report analyses the realized potential of electricity generated by on-site photovoltaic systems at the demonstration buildings of the German federal government's 'Efficiency House Plus' research initiative. These values can be used as benchmarks in the early stages of the building design process.

Keywords: Efficiency House Plus Standard; climate-neutral buildings; energy transition; construction technologies

Im Beitrag werden die realisierten Potenziale des gebäudenah photovoltaisch erzeugten Stroms in den Demonstrationsgebäuden der Forschungsinitiative Effizienzhaus Plus des Bundes analysiert. Sie können als Benchmarks für den frühen Gebäudeentwurf dienen. Bild 1 zeigt die im Vorhaben eingebundenen Objekte.

2 Bausteine für Effizienzhaus Plus Konzepte

Das Effizienzhaus Plus fußt gegenüber herkömmlicher Bauweise auf den drei Säulen:

- Energieeffizienz des Gebäudes bestmöglich steigern,
- Energiebedarf der Haushaltsprozesse so weit wie möglich senken,
- erneuerbare Energien zur Restdeckung verwenden.

Da bei diesem Hauskonzept die Summe aller im Haus benötigten Energiemengen über erneuerbare Energien ausgeglichen werden muss, die im räumlichen Umfeld des Ge-



Bild 1. Übersicht über die Gebäude der Forschungsinitiative „Effizienzhaus Plus“ des Bundes.

Fig. 1. Overview of the buildings included in the German federal government's research initiative 'Efficiency House Plus'.

bäudes erschlossen werden können, ist die Bedarfsmenge an Energie über eine deutlich verbesserte Energieeffizienz bestmöglich zu reduzieren.

Der Energiebedarf lässt sich über den Gebäudeentwurf (kompakter Gebäudekörper, optimale Orientierung), über den Wärmeschutz (hocheffiziente Fenster und Wärmeschutzsysteme für die Gebäudehülle), über optimierte Verarbeitung (wärmebrückenzuschlagsfreie und luftdichte Konstruktionen und Bauteilanschlüsse) sowie energiebewusstes Bewohnerverhalten (unterstützt zum Beispiel durch Verbrauchsvisualisierung, Smart Metering) senken. Gleichzeitig verbessert sich durch die bedarfssenkenden Maßnahmen in aller Regel der Nutzungskomfort, da die hierbei entstehenden warmen Oberflächen die Behaglichkeit in den Räumen erhöhen. Die Energieeffizienz lässt sich weiterhin erhöhen durch

- niedrige Systemtemperaturen (und damit verbundene niedrige Wärmeverluste) in der Heizanlage,
- kurze Leitungslängen bei Heiz-, Warmwasser- und Lüftungsanlagen (und damit verbundene niedrigere Wärmeverluste sowie geringere Antriebsenergien für Pumpen und Ventilatoren),
- durch Wärmerückgewinnungssysteme in der Lüftung und in den Abwassersystemen,

- durch hydraulischen Abgleich in allen Anlagen (und damit verbundene geringere Antriebsenergien für Pumpen und Ventilatoren),
- bedarfsgesteuerte Heiz- und Lüftungssysteme (und einer damit vermiedenen Überversorgung der Räume mit Frischluft und Heizwärme),
- Haushaltsgeräte höchster Energieeffizienz (A+++)
- effiziente Raumbeleuchtung (LED oder Energiesparlampen in Verbindung mit Bedarfskontrollsystemen).

Die erneuerbaren Energien lassen sich aktiv und passiv im Gebäude erschließen. Völlig kostenfrei können die passiven Solargewinne über die Fenster einerseits zur Reduzierung des Heizenergiebedarfs und andererseits zur Reduzierung des Bedarfs an künstlicher Beleuchtung genutzt werden. Aktiv lassen sich erneuerbare Energien über thermische Solarkollektoren, biogene Brennstoffe, Geothermie oder Umweltwärme erschließen. Das „Plus“ in das Gebäude bringen schließlich stromerzeugende Systeme wie Photovoltaik- oder Windkraftanlagen. Alternativ können auch überschüssige Wärmegewinne aus Abwärme oder thermischen Solaranlagen, die in Nah- oder Fernwärmesysteme eingespeist werden, als Energiegutschriften in Bezug genommen werden. Blockheizkraftwerke, Brennstoffzellen oder Mikro-

KWK-Anlagen können je nach verwendetem Brennstoff zwar primärenergetisch eine Gutschrift bewirken, endenergetisch können sie aber nicht zur positiven Bilanz beitragen. Die produzierten Überschüsse können im Gebäude zwischengespeichert und darüber hinausgehende Erträge ins Netz der Energieanbieter eingespeist werden.

3 Installierte Größen und Kennwerte der Photovoltaikanlagen

Im Rahmen des Förderprogramms „Modellprojekte im Effizienzhaus Plus Standard“ des Bundesbauministeriums sind 37 Wohngebäude nach der Vorgabe der Effizienzhaus Plus-Bilanzierung errichtet worden. Es handelt sich dabei um 28 Ein- bis Zweifamilienhäuser und 9 Mehrfamilienhäuser mit 4 bis 74 Wohneinheiten. Insgesamt wurden eine Wohnfläche von ca. 19.000 m² und eine installierte Photovoltaikfläche (PV-Fläche) von ca. 6.800 m² geschaffen. Die installierte Photovoltaikfläche liegt, wie Bild 2 zeigt, für Einfamilienhäuser im Mittel bei 0,46 Quadratmeter PV-Fläche pro Quadratmeter Wohnfläche und für Mehrfamilienhäuser aufgrund der im Verhältnis zur Wohnfläche geringeren Dach- und Fassadenfläche bei 0,33 Quadratmeter PV-Fläche pro Quadratmeter Wohnfläche. In der Regel sind die zur Verfügung stehenden Dachflächen nahezu vollständig mit PV-Installationen belegt. Die Dachneigungen werden vorzugsweise < 30 Grad gewählt, um auch in den nicht südorientierten Dachbereichen Solargewinnflächen noch effizient betreiben zu können.

Die mittlere installierte Leistung pro Quadratmeter Photovoltaikfläche beträgt, wie Bild 3 zeigt, für die Ein- bis Zweifamilienhäuser im Mittel 146 W_{peak} und für die Mehrfamilienhäuser 178 W_{peak}. Dies entspricht einer mittleren installierten Leistung von 67 W_{peak} je Quadratmeter Wohnfläche bei den Ein- und Zweifamilienhäusern und 59 W_{peak} je Quadratmeter Wohnfläche bei den Mehrfamilienhäusern. Aufgrund der begrenzten Dachflächen werden bei mehrgeschossigen Objekten häufig PV-Systeme mit höheren Leistungskennwerten verbaut, um bestmöglich die Gewinnflächen auszunutzen. Bei Ein- und Zweifamilienhäusern kommen dagegen zusätzliche Installationen auf

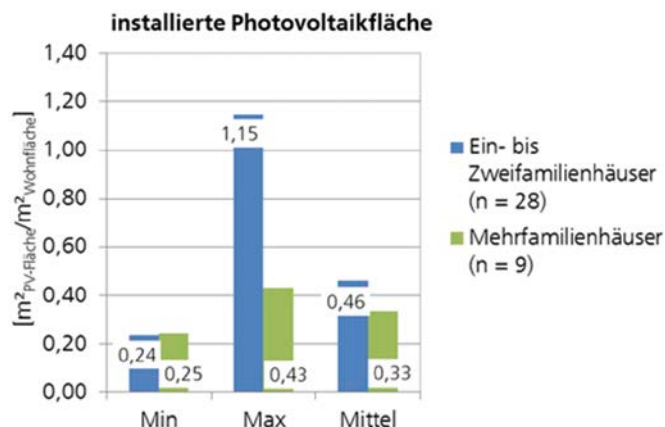


Bild 2. Minimale und maximale sowie mittlere installierte Photovoltaikfläche pro Quadratmeter Wohnfläche der Ein- bis Zweifamilienhäuser und Mehrfamilienhäuser im Netzwerk Effizienzhaus Plus.

Fig. 2. Minimum, maximum, and mean installed PV surface area per square meter floor area at (semi-)detached and multi-family homes in the Efficiency House Plus network.

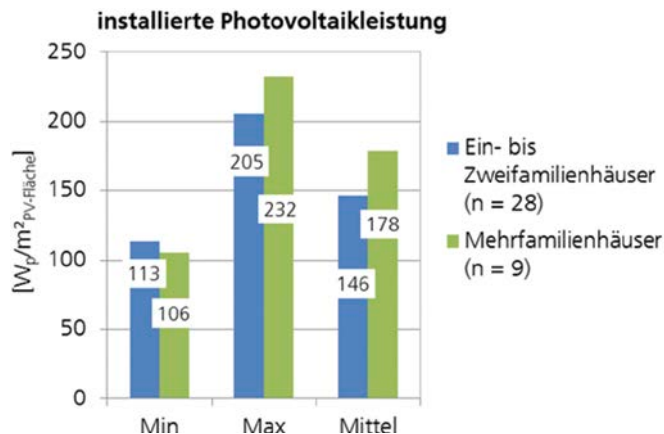


Bild 3. Minimale und maximale sowie mittlere installierte Photovoltaikleistung pro Quadratmeter PV-Fläche der Ein- bis Zweifamilienhäuser und Mehrfamilienhäuser im Netzwerk Effizienzhaus Plus.

Fig. 3. Minimum, maximum, and mean installed PV capacity per square meter PV surface area at (semi-)detached and multi-family homes in the Efficiency House Plus network.

angrenzenden Garagen oder Loggien zum Einsatz, dies erlaubt es, hier kostengünstigere PV-Systeme mit niedrigeren Leistungskennwerten zu verwenden.

Bei der Vorherberechnung der Photovoltaikerträge unter Berücksichtigung der Verluste der Wechselrichter (auf Basis des mittleren deutschen Klimas nach EnEV) gemäß der Rechenansätze der DIN V 18599 ergaben sich, wie in Bild 4 dargestellt, mittlere Erträge von 126 kWh/m²_{PV-Fläche} a für die Ein- bis Zweifamilienhäuser und 150 kWh/m²_{PV-Fläche} a für die Mehrfamilienhäuser. Daraus ergibt sich eine mittlere jährliche Ertragsdichte von 0,86 kWh je installierter W_{peak}-Photovoltaikleistung bei den Ein- und Zweifamilienhäusern und 0,84 kWh je installierter W_{peak}-Photovoltaikleistung bei den Mehrfamilienhäusern. Bei einer mittleren jährlichen Solareinstrahlung zwischen 1.000 und 1.200 kWh/m²a auf übliche Solargewinnflächen ergeben sich Nutzungsgrade der PV-Anlagen zwischen 10 und 15%.

4 Vergleich Messung-Vorherberechnung der Ein- und Zweifamilienhäuser

Alle Gebäude durchlaufen nach Fertigstellung eine zweijährige Monitoringphase, in der neben allen Endenergieverbräuchen auch der selbst generierte Photovoltaikstrom gemessen wird. Von den 9 Mehrfamilienhäusern hatten zum Zeitpunkt der Auswertung ein Drittel der Gebäude das Monitoring noch nicht abgeschlossen, so dass im Weiteren nur auf die Ergebnisse der Ein- und Zweifamilienhäuser eingegangen wird. Wie in Bild 5 zu sehen, zeigt sich für die Ein- und Zweifamilienhäuser im Mittel eine gute Korrelation zwischen Messung und Berechnung der PV-Erträge. Der mittlere gemessene Ertrag der PV-Anlagen liegt bei 128 kWh pro Quadratmeter PV-Fläche und Jahr und überschreitet die Vorherberechnung (126 kWh/m²_{PV-Fläche}a) um nur 2 kWh pro Quadratmeter PV-Fläche und Jahr.

Allerdings erkennt man aus dem Bild auch, dass der Unterschied zwischen den verschiedenen installierten Anlagen, wie schon Bild 3 zeigte, sehr groß ist und den Faktor

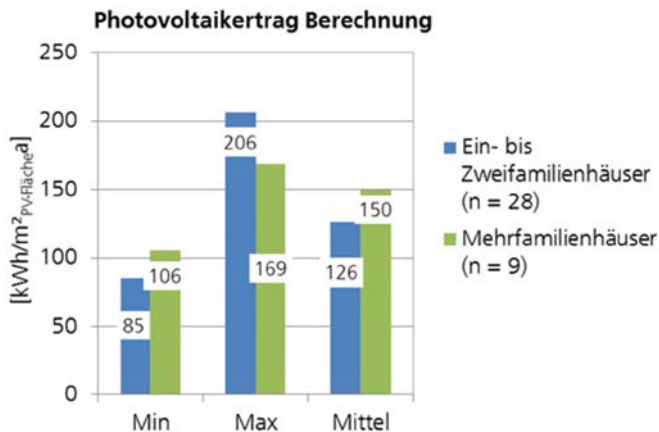


Bild 4. Minimaler und maximaler sowie mittlerer Ertrag der Photovoltaikanlage pro Quadratmeter PV-Fläche der Ein- bis Zweifamilienhäuser und Mehrfamilienhäuser im Netzwerk Effizienzhaus Plus.

Fig. 4: Minimum, maximum, and mean contribution of the PV system per square meter PV surface area at (semi-) detached and multi-family homes in the Efficiency House Plus network.

2 überschreitet. Dies liegt vorrangig an den deutlich unterschiedlichen Effizienzen der verbauten Systeme, aber auch an lokal vorherrschenden partiellen Verschattungen durch ungünstige Einbausituationen. Daher sollten die Performancewerte von geplanten Anlagen schriftlich in Angeboten fixiert werden, um im Betrieb keine Überraschung zu erleben. Das reine Vereinbaren einer PV-Anlage über deren Installationsfläche beschreibt nicht zuverlässig den zu erwartenden Ertrag.

5 Erhöhung von Eigenstromnutzung und Deckungsgrad durch Batteriespeicher

Mit der Nutzung von Batteriespeichern können der Eigennutzungsgrad des selbst generierten Stroms sowie der

Deckungsanteil des Stromverbrauchs durch die PV-Anlage erhöht werden. Etwa die Hälfte der Modellvorhaben verfügt über einen elektrischen Stromspeicher, dessen Einfluss auf die Erhöhung des Eigenverbrauchs und Deckungsgrades im Folgenden dargestellt wird.

Der Eigennutzungsgrad stellt das Verhältnis des selbst genutzten Photovoltaikstroms zum gesamten generierten PV-Ertrag dar. Der Deckungsgrad durch PV-Strom beschreibt das Verhältnis des selbst genutzten PV-Stroms am Gesamtstromverbrauch. Damit ergeben sich die folgenden Größen:

$$\text{Eigennutzungsgrad} = \frac{\text{Eigenverbrauch PV-Strom}}{\text{PV-Ertrag}} \quad (1)$$

und

$$\text{Deckungsgrad PV-Strom} = \frac{\text{Eigenverbrauch PV-Strom}}{\text{Gesamtstromverbrauch}} \quad (2)$$

Der Eigennutzungsgrad für die Modellvorhaben ohne elektrische Speicher schwankt bei den Vorhaben zwischen 13% und 38% und beträgt, wie in Bild 6 zu sehen, im Mittel 21%. Der PV-Deckungsanteil liegt in der Regel etwas höher als der Eigennutzungsgrad und beträgt im Mittel 27%. Bei deutlich über- oder unterdimensionierten PV-Anlagen kommt es zu größeren Abweichungen zwischen dem Eigenverbrauchsanteil und dem Deckungsgrad. Sehr kleine (unterdimensionierte) PV-Anlagen weisen hohe Eigenverbrauchsanteile und kleine Deckungsgrade auf, bei sehr großen (überdimensionierten) Anlagen verhält es sich genau anders herum.

Für Objekte mit Stromspeicher werden Eigennutzungsgrade von im Mittel 34% und Deckungsgrade von im Mittel 49% erreicht (Bild 7). Die Nutzung von elektrischen Speichern führte bei den untersuchten Objekten zu einer mittleren Erhöhung des Eigennutzungsgrades um 13% und einer Erhöhung des Deckungsgrads um 22%, der sich hierdurch nahezu verdoppelt. Die Unterschiede sind be-

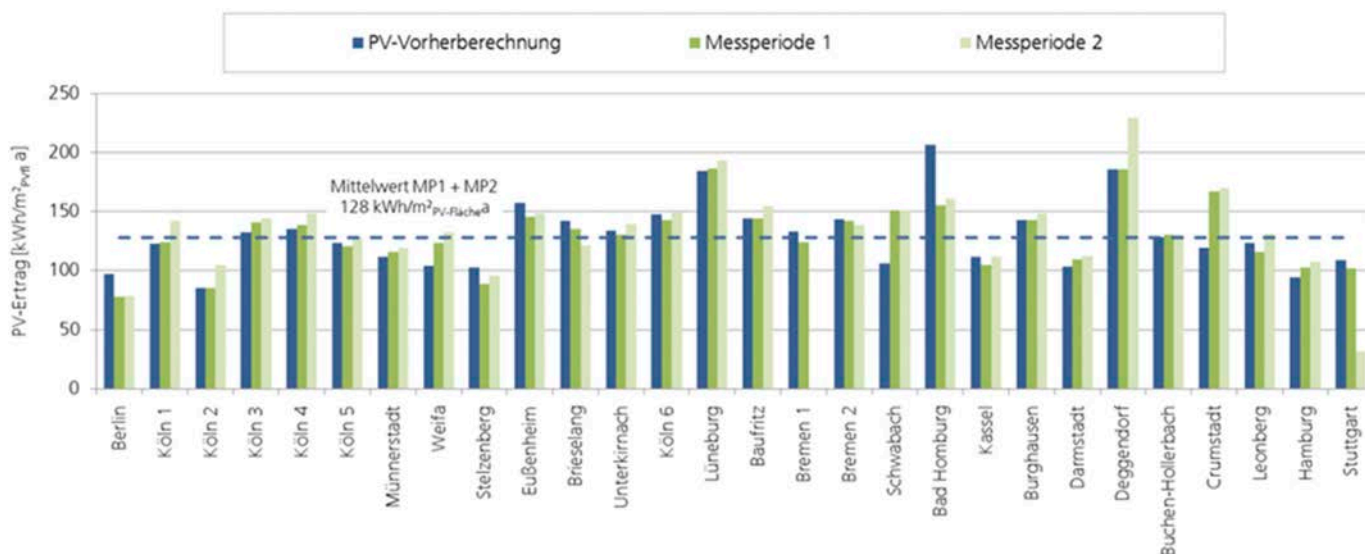


Bild 5. Berechneter und gemessener Ertrag der Photovoltaikanlage pro Quadratmeter PV-Fläche der Ein- bis Zweifamilienhäuser im Netzwerk Effizienzhaus Plus.

Fig. 5. Calculated and measured contribution of the PV system per square meter PV surface area at (semi-)detached homes in the Efficiency House Plus network.

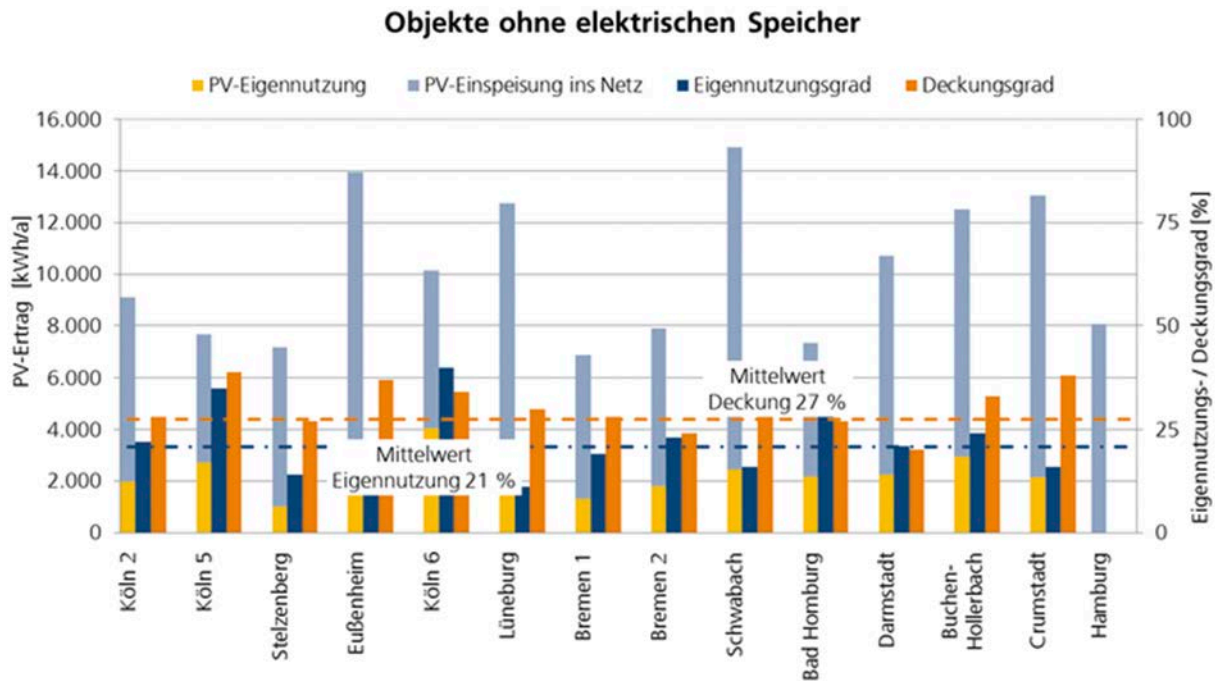


Bild 6. Eigennutzung, Einspeisung, Eigennutzungsgrad und Deckungsgrad des PV-Stroms der Ein- und Zweifamilienhäuser im Netzwerk Effizienzhaus Plus ohne Stromspeicher im 2. Messjahr.

Fig. 6. Personal use, grid feed-in, degree of self-use, degree of self-sufficiency for PV-generated electricity at (semi-)detached homes in the Efficiency House Plus network, without electricity storage facilities, in the 2nd year of measurements.

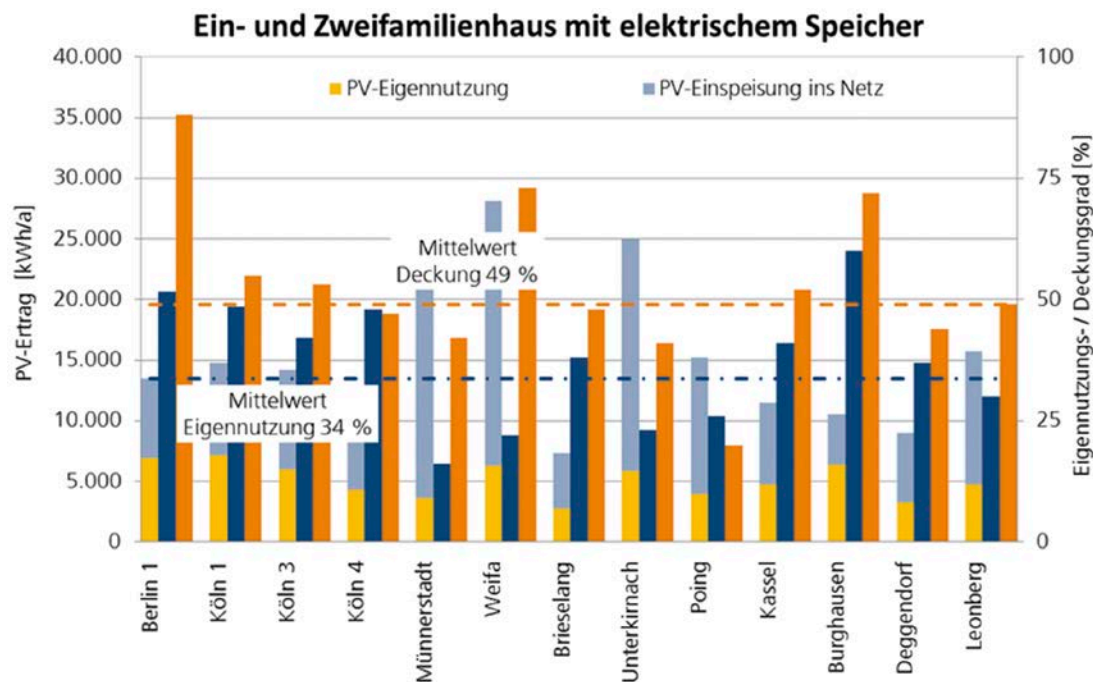


Bild 7. Eigennutzung, Einspeisung, Eigennutzungsgrad und Deckungsgrad des PV-Stroms der Ein- und Zweifamilienhäuser im Netzwerk Effizienzhaus Plus mit Stromspeicher im 2. Messjahr.

Fig. 7. Personal use, grid feed-in, degree of self-use, degree of self-sufficiency for PV-generated electricity at (semi-)detached homes in the Efficiency House Plus network, with electricity storage facilities, in the 2nd year of measurements.

sonders dann groß, wenn die PV-Anlagen überdimensioniert sind und die Speicher eine große Nutzkapazität aufweisen.

6 Dimensionierung elektrischer Speicher

Die Hälfte der Ein- und Zweifamilienhausprojekte ist mit einem elektrischen Speicher versehen, dabei kommen je zur Hälfte Lithium-Ionen- bzw. Blei-Technologien zum Einsatz. Die Dimensionierung der PV-Speichersysteme

Speicherkapazität Stromspeicher in Abhängigkeit PV-Nennleistung

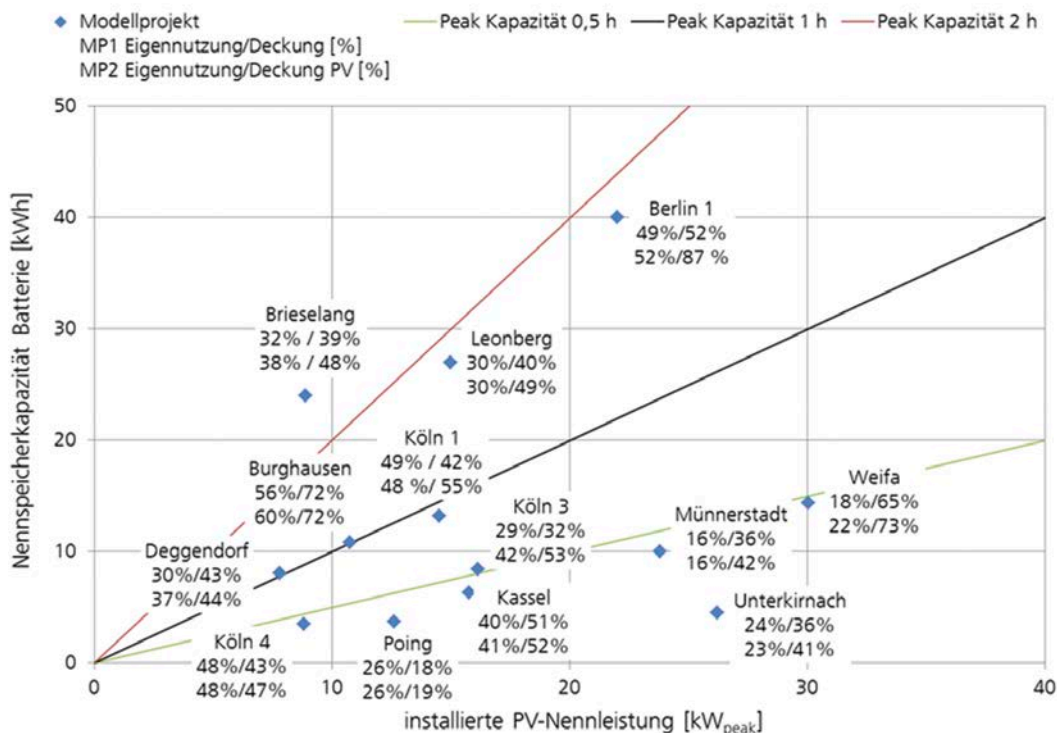


Bild 8. Speicherkapazität in Abhängigkeit von der installierten PV-Leistung der Ein- und Zweifamilienhäuser im Netzwerk Effizienzhaus Plus mit Stromspeicher unter Angabe der am Standort im 1. und 2. Messjahr erzielten Eigennutzungsgrade und Deckungsgrade des PV-Stroms.

Fig. 8. Storage capacity versus installed PV capacity at (semi-)detached homes with electricity storage facilities in the Efficiency House Plus network, with indication of locally achieved degrees of self-use, degrees of self-sufficiency for PV electricity (during the 1st and 2nd year of measurements).

kann entweder an der installierten Leistung der PV-Anlage oder dem strombasierten Endenergiebedarf des Gebäudes ausgerichtet werden. Die Speicherkapazitäten der realisierten Einfamilienhäuser variieren zwischen 3,5 kWh und 40 kWh und weisen damit Nennkapazitäten aus, die es ermöglichen, die Produktion der PV-Anlage bei einer bis zu zweistündigen Vollerleistung zu speichern. Anlagen mit einer Nennkapazität von 1 kWh je kW_{peak} Photovoltaikanlagenleistung besitzen demnach bei einer PV-Anlagengröße von 20 kW_{peak} eine Nennleistung des Stromspeichers von 20 kWh. Etwa die Hälfte der Objekte verwendet Speicher mit einer Nennkapazität ≤ 1 kWh je kW_{peak} installierte Leistung der PV-Anlage.

Wie Bild 8 zeigt, ergeben sich aus der installierten Leistung der PV-Anlage, der Nennkapazität des Speichers und dem Gesamtstromverbrauch des Gebäudes unterschiedliche Verhältnisse zwischen Eigenverbrauchsanteilen und Deckungsgraden. Sie reichen von einem relativ ausgeglichenen Verhältnis (Köln 1, Köln 4, Brieselang), d. h. beide Anteile sind ungefähr gleich groß, bis hin zu einem relativ hohen Deckungsgrad bei gleichzeitig geringem PV-Eigenverbrauchsgrad (Münnerstadt, Weifa). Relativ hohe Deckungsgrade bei gleichzeitig hohem Eigenverbrauch erreichen die Systeme in Berlin 1 und Burghausen.

Zu acht Projekten konnten die Speicherverluste der installierten Akkumulatoren ermittelt werden. Diese lagen, wie Bild 9 zeigt, zwischen 10% und 55%. Hier bestehen erhebliche Verbesserungspotentiale, da die Verluste ganz wesentlich über die Wirtschaftlichkeit entscheiden. Dane-

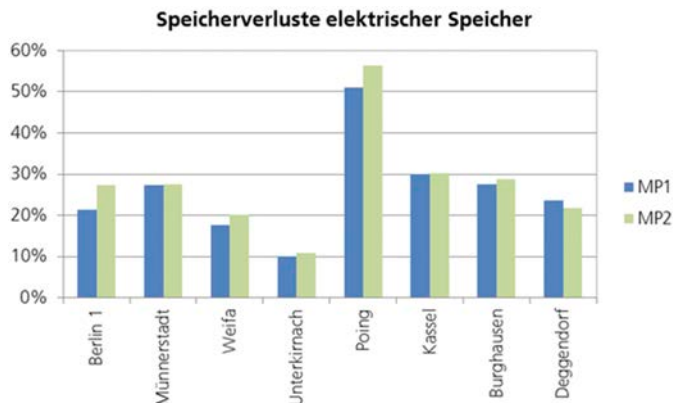


Bild 9. Speicherverluste der Stromspeicher der Ein- bis Zweifamilienhäuser im Netzwerk Effizienzhaus Plus im 1. und 2. Messjahr.

Fig. 9. Storage losses of the electricity storage facilities at (semi-)detached homes in the Efficiency House Plus network, recorded in the 1st and 2nd year of measurements.

ben können hohe Verluste der Batterie auch zur Verschlechterung der Raumlufttemperaturen im Gebäude beitragen.

Fazit

Die realisierten Einfamilienhäuser im Effizienzhaus Plus-Standard weisen eine mittlere Photovoltaikfläche von 0,46

Quadratmeter PV-Fläche pro Quadratmeter Wohnfläche auf. Bei den Mehrfamilienhäusern liegt sie im Mittel bei 0,33 Quadratmeter PV-Fläche pro Quadratmeter Wohnfläche. Der erzielte jährliche Ertrag beträgt im Mittel etwa 126 kWh pro Quadratmeter PV-Fläche bei den Ein- und Zweifamilienhäusern bzw. 150 kWh pro Quadratmeter PV-Fläche bei den Mehrfamilienhäusern. Aufgrund des begrenzten Platzbedarfs müssen in Mehrfamilienhäusern in der Regel hochwertigere Systeme eingesetzt werden.

Einhergehend mit den sinkenden Einspeisevergütungen werden PV-Installationen mit hoher Eigenverbrauchsdeckung bei gleichzeitig hohem Deckungsgrad benötigt. Daher sollten Speicherkapazitäten von Stromspeichern mit der ein- bis zweifachen Peakleistung der PV-Anlage ($\text{kWh}/\text{kW}_{\text{peak}}$) angestrebt werden. Gleichzeitig sollte der Stromspeicher, im Abgleich mit der Dimensionierung der PV-Anlage, den über das Jahr erzeugten mittleren täglichen Stromüberschuss speichern können.

Weitere Projektergebnisse sind auf der Projekt-homepage der Forschungsinitiative Effizienzhaus Plus

(<https://www.forschungsinitiative.de/effizienzhaus-plus/>) zu finden.

Danksagung

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des Begleitforschungsprogramms zur Forschungsinitiative „Effizienzhaus Plus“ des BMI mit Mitteln der BBSR-Forschungsförderung „Zukunft Bau“ (FKZ: SWD – 10.08.17.7-15.44) durchgeführt. Die Forschenden danken für die Unterstützung.

Autoren

Dipl.-Ing. Antje Bergmann, antje.bergmann@ibp.fraunhofer.de
Dipl.-Ing. Hans Erhorn, hans.erhorn@ibp.fraunhofer.de

Beide

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart



Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Stuttgart

Postfach 80 04 69 – 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12 – 70569 Stuttgart

Holzkirchen

Postfach 11 52 – 83601 Holzkirchen
Fraunhoferstraße 10 – 83626 Valley

www.ibp.fraunhofer.de