

## VERGLEICH DER PHOTOVOLTAISCHEN EIGENVERSORGUNG VON EIN- UND MEHRFAMILIENHÄUSERN

Johannes Weniger<sup>1</sup>, Tjarko Tjaden<sup>1</sup>, Hans-Otto Troeder<sup>2</sup>, Volker Quaschnig<sup>1</sup>, Bert Stegemann<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> HTW Berlin - University of Applied Science, Wilhelminenhofstr. 75a, D-12459 Berlin

<sup>2</sup> Lichte Weiten e.V. Berlin, Wönnichstr. 104, D-10317 Berlin

\* eMail: bert.stegemann@htw-berlin.de

**Schlüsselwörter:** Photovoltaik, Eigenverbrauch, Lastprofil, Speicher, Simulation

**Zusammenfassung:** Dieser Beitrag vergleicht das Potenzial der Eigenversorgung von Ein- und Mehrfamilienhäusern durch Photovoltaik(PV)-Systeme sowie PV-Batteriesysteme. Zunächst wird der saisonale und tageszeitliche Verlauf des Stromverbrauchs verschiedener Lastprofile analysiert. Durch Simulationsrechnungen wird dann der Einfluss der PV-Systemgröße und Batteriegröße auf die Höhe der Eigenversorgung bestimmt. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass aufgrund von Ausgleichseffekten die Unterschiede in der Höhe der Eigenversorgung zwischen verschiedenen Mehrfamilienhäusern geringer als zwischen verschiedenen Einfamilienhäusern sind.

**Abstract:** The potential of the self-sufficiency of single-family houses and multi-family houses by photovoltaic (PV) systems and PV-battery systems is compared. First, the seasonal and daily course of the power consumption of various load profiles is analyzed. The influence of the PV system size and the battery size on the level of self-sufficiency is determined by time series simulations. The results show that differences in the level of self-sufficiency between different multi-family houses are less than between different single-family houses due to compensatory effects.

### 1. Einleitung

Noch vor wenigen Jahren haben sich PV-Systeme im Wohngebäudebereich ausschließlich durch die Einnahmen aus der Netzeinspeisevergütung refinanziert. Durch gestiegene Strombezugspreise und gesunkene Gestehungskosten des Solarstroms gewinnt der photovoltaische Eigenverbrauch vor Ort zunehmend an Bedeutung. Für die Refinanzierung der PV-Systeme sind somit die eingesparten Netzbezugskosten über die gesamte Nutzungsdauer entscheidend. Um die Wirtschaftlichkeit von photovoltaischen Eigenversorgungsprojekten in Wohngebäuden vorab zu kalkulieren, ist es notwendig, die anteilige Nutzung des Solarstroms zur Eigenversorgung oder Netzeinspeisung abzuschätzen. Für Einfamilienhäuser (EFH) existieren bereits umfangreiche Empfehlungen zur Auslegung von photovoltaischen Eigenversorgungssystemen [1]. Ob diese Auslegungshilfen auch für Mehrfamilienhäuser (MFH) gelten, wurde bislang nicht untersucht. Durch Simulationsrechnungen sollen daher in diesem Beitrag die photovoltaische Eigenversorgung von EFH und MFH verglichen und Ursachen für etwaige Unterschiede aufgezeigt werden.

### 2. Datengrundlage

Grundlage dieser Untersuchungen stellen verschiedene gemessene und synthetisierte Lastprofile dar. Zum einen wird auf die Referenzlastprofile für EFH und MFH der Richtlinie VDI 4655 zurückgegriffen [2]. Zum anderen stehen Messwerte des Stromverbrauchs von drei EFH in Berlin in einminütiger Auflösung sowie des MFH „Lichte Weiten“ in Berlin-Lichtenberg [3] in 15-minütiger Auflösung für das Jahr 2014 zur Verfügung. Weiterhin wird zum Vergleich das Standardlastprofil für Haushalte (H0) herangezogen. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die verwendeten Lastprofile und die jeweiligen Jahresstromverbräuche.

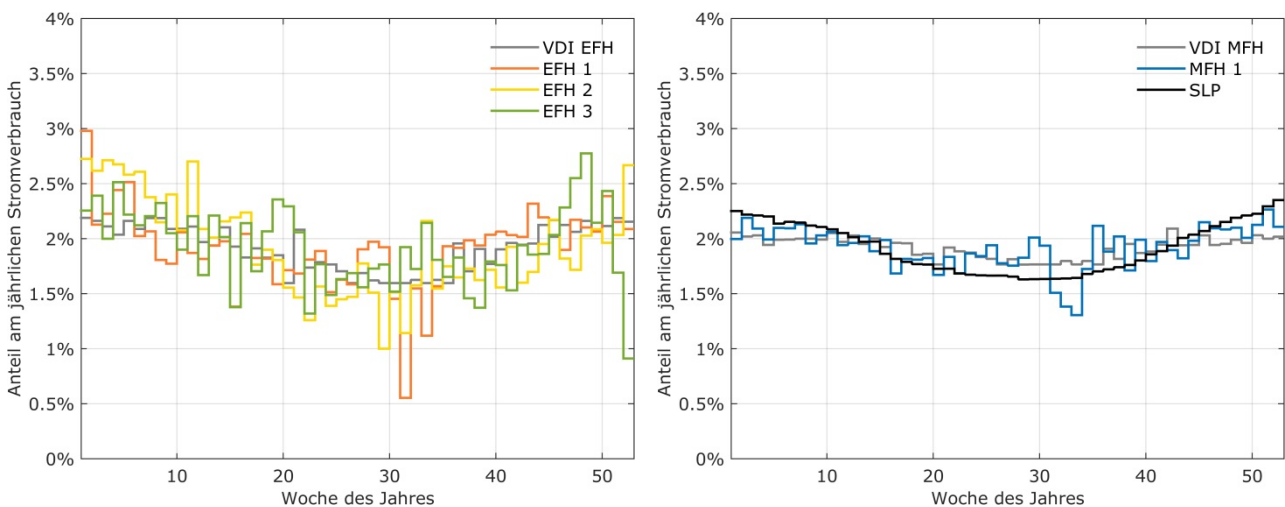
Die Simulation der PV-Leistungsabgabe erfolgt auf Basis von Messdaten des meteorologischen Observatoriums Lindenberg (Brandenburg) des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Für eine detaillierte Beschreibung der verwendeten Systemmodelle sei auf [4] verwiesen.

**Tabelle 1:** Beschreibung und Jahresstromverbräuche der verwendeten EFH- und MFH-Lastprofile.

Abkürzung	Kurzbeschreibung	Jahresstromverbrauch
VDI EFH	Referenzlastprofil für EFH (Richtlinie VDI 4655)	4.000 kWh (skaliert)
EFH 1	EFH mit 5 Personen	4.011 kWh
EFH 2	EFH mit 4 Personen	3.904 kWh
EFH 3	EFH mit 3 Personen	3.870 kWh
VDI MFH	Referenzlastprofil für MFH (Richtlinie VDI 4655)	20.000 kWh (skaliert)
MFH 1	MFH mit 24 Personen (11 Wohneinheiten )	17.274 kWh
SLP	Standardlastprofil für Haushalte (H0)	20.000 kWh (skaliert)

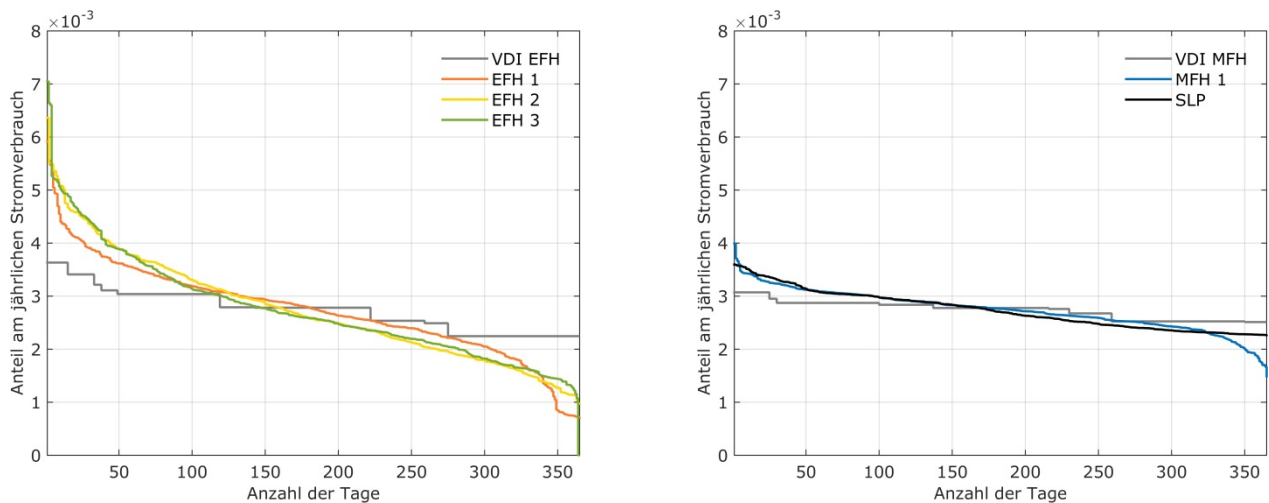
### 3. Analyse elektrischer Lastprofile von Einfamilien- und Mehrfamilienhäusern

Der zeitliche Verlauf des Stromverbrauchs von Wohngebäuden wird von zahlreichen Einflussgrößen bestimmt und unterliegt jahres- und tageszeitlichen Schwankungen. Bild 1 vergleicht den saisonalen Verlauf der verschiedenen EFH- und MFH-Lastprofile. Dargestellt ist der prozentuale Anteil der wöchentlichen Stromverbräuche am gesamten Jahresstromverbrauch. Für alle Lastprofile zeigt sich eine ausgeprägte jahreszeitliche Charakteristik mit erhöhten Stromverbräuchen in den Wintermonaten und geringeren Verbräuchen im Sommerhalbjahr. Im Vergleich zu den synthetisierten Lastprofilen der VDI 4655 sind die Schwankungen im wöchentlichen Stromverbrauch der gemessenen EFH- und MFH-Lastprofile ausgeprägter. Größere Einbrüche treten insbesondere während der Urlaubszeit in den Sommermonaten auf. Auffällig ist auch die stärkere Fluktuation der EFH-Profile im Vergleich zu den MFH-Profilen, die mit Ausgleichseffekten im Verbrauchsverhalten bei einer höheren Anzahl von Haushalten erklärt werden kann.



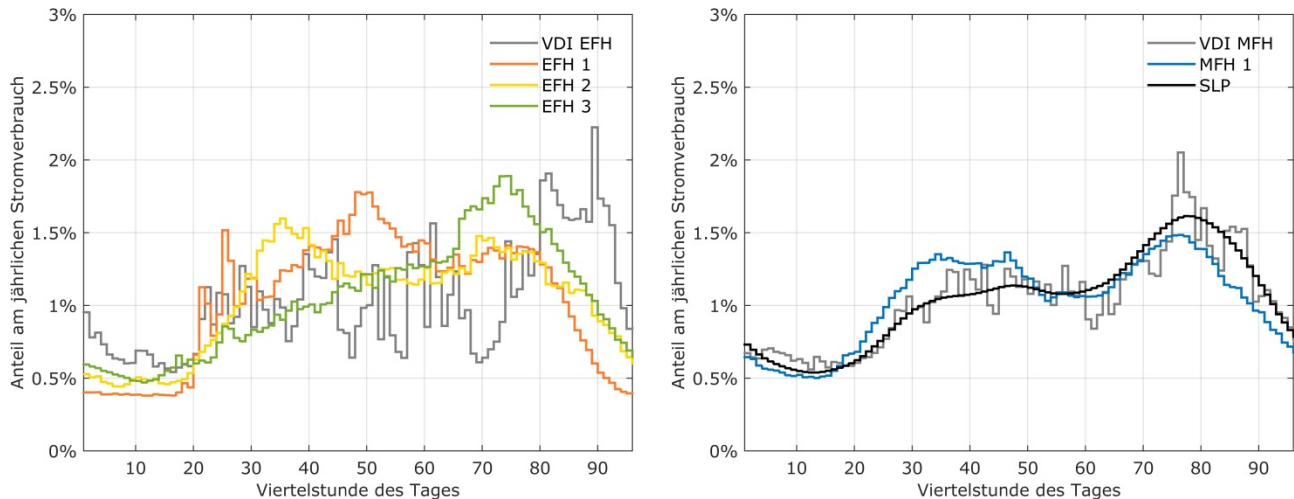
**Bild 1:** Wöchentlicher Verlauf des Stromverbrauchs verschiedener EFH- (links) und MFH-Lastprofile (rechts).

Neben dem wöchentlichen Verlauf des Stromverbrauchs variiert auch der tägliche Stromverbrauch der untersuchten Lastprofile. In Bild 2 sind die Tagesverbräuche der einzelnen Lastprofile der Höhe nach sortiert als Dauerlinie dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die täglichen Unterschiede bei den synthetisierten VDI-Lastprofilen geringer als bei den gemessenen Lastprofilen ausfallen. Dies ist auf die Vorgehensweise zur Erstellung der Referenzlastprofile zurückzuführen, da nach der Richtlinie VDI 4655 ein Jahreslastprofil nur auf Basis von zehn typischen Tagesprofilen erstellt wird. Die maximalen Tagesverbräuche der gemessenen EFH-Lastprofile betragen das bis zu 2,5-fache des durchschnittlichen Tagesverbrauchs. Die geringsten Tagesverbräuche sind um bis zu 75% gegenüber den mittleren Verbräuchen reduziert. Der Ausgleich zwischen einer Vielzahl von Haushalten führt bei den MFH-Profilen im Vergleich zu den EFH-Profilen zu geringeren Unterschieden in den täglichen Verbräuchen.



**Bild 2:** Dauerlinie des täglichen Stromverbrauchs verschiedener EFH- (links) und MFH-Lastprofile (rechts).

Deutliche Unterschiede zwischen den Lastprofilen werden auch im mittleren Tagesverlauf des Stromverbrauchs in Bild 3 ersichtlich. Ausgeprägte Verbrauchsspitzen in den Abendstunden treten sowohl beim Standardlastprofil als auch bei den MFH-Profilen auf. Im Vergleich dazu sind bei den EFH-Profilen jedoch deutlich größere tageszeitliche Unterschiede zu erkennen. Während EFH 1 einen erhöhten Verbrauch während der Mittagszeit hat, ist dies bei EFH 2 am Vormittag und bei EFH 3 in den frühen Abendstunden der Fall. Aufgrund der Vorgehensweise zur Erstellung der Referenzprofile ergeben sich für das VDI-EFH-Profil die größten Fluktuationen der Last in der Darstellung des mittleren Tagesverlaufs. Der Vergleich des tageszeitlichen Verlaufs der verschiedenen Lastprofile macht somit deutlich, dass sowohl die Anwesenheitszeiten als auch das Verbrauchsverhalten der Bewohner die tageszeitliche Verbrauchscharakteristik maßgeblich beeinflussen.

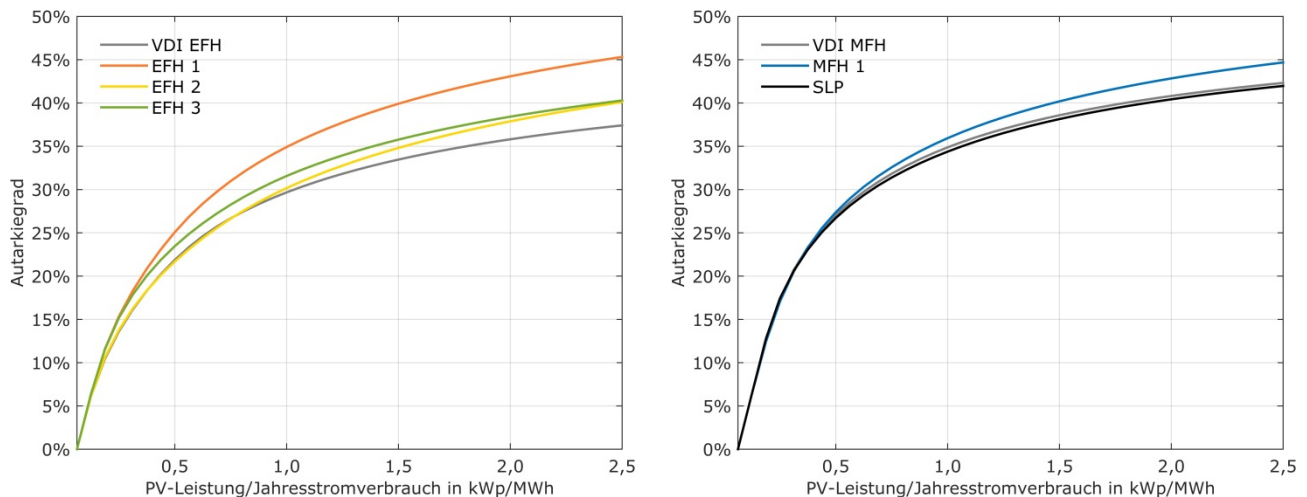


**Bild 3:** Mittlerer tageszeitlicher Verlauf des Stromverbrauchs verschiedener EFH- (links) und MFH-Lastprofile (rechts).

#### 4. Simulation der photovoltaischen Eigenversorgung von Einfamilien- und Mehrfamilienhäusern

Für die zuvor analysierten Lastprofile wird im Folgenden durch Simulationsrechnungen untersucht, wie sich die Größe des PV-Systems auf die erreichbare Eigenversorgung auswirkt. Als Vergleichsgröße dient der sogenannte Autarkiegrad, der angibt, zu welchem Anteil der jährliche Strombedarf durch zeitgleich verbrauchten oder zwischengespeicherten Solarstrom gedeckt wird. Um die Vergleichbarkeit auch bei unterschiedlichen Jahresstromverbräuchen zu ermöglichen, hat sich die Normierung der Systemgröße auf den Jahresverbrauch als zweckmäßig erwiesen [1]. Zunächst wurde die PV-Leistung ohne Berücksichtigung eines Speichers bis 2,5 kWp pro MWh (1000 kWh) Jahresstromverbrauch variiert. In Bild 4 ist der jahresmittlere Autarkiegrad für die verschiedenen Lastprofile über der normierten PV-Leistung aufgetragen. Grundsätzlich steigt durch die Vergrößerung des PV-Systems der Autarkiegrad an. Mit zunehmender PV-Leistung fällt jedoch die weitere Steigerung des Autarkiegrads geringer aus. Vergleicht man die Autarkiegrad-Verläufe der verschiedenen Lastprofile, so lassen sich die größten Unterschiede im Autarkiegrad bei höheren PV-Leistungen feststellen. Mit einer normierten PV-Leistung von 1 kWp/MWh lässt sich in den EFH und MFH ein Autarkiegrad zwischen 30 und 36% erzielen, wobei die Unterschiede zwischen den MFH vergleichsweise gering sind. Durch den erhöhten mittäglichen Stromverbrauch erreicht das Lastprofil EFH 1 den höchsten Autarkiegrad unter den EFH-Lastprofilen (vgl. Bild 3).

Aus Bild 4 ist ebenfalls zu erkennen, dass ab einer PV-Leistung von 1 kWp/MWh der Autarkiegrad für das Lastprofil EFH 2 stärker als für das EFH-Referenzlastprofil des VDI ansteigt. Dies lässt sich mit dem mittleren tageszeitlichen Verlauf der beiden Lastprofile begründen (vgl. Bild 3): Während bei höheren PV-Leistung zunehmend die Lastspitze von EFH 2 am Vormittag photovoltaisch versorgt werden kann, tragen größere PV-Leistungen nicht dazu bei, die Lastspitze des VDI-Referenzprofils am späten Abend zu decken.

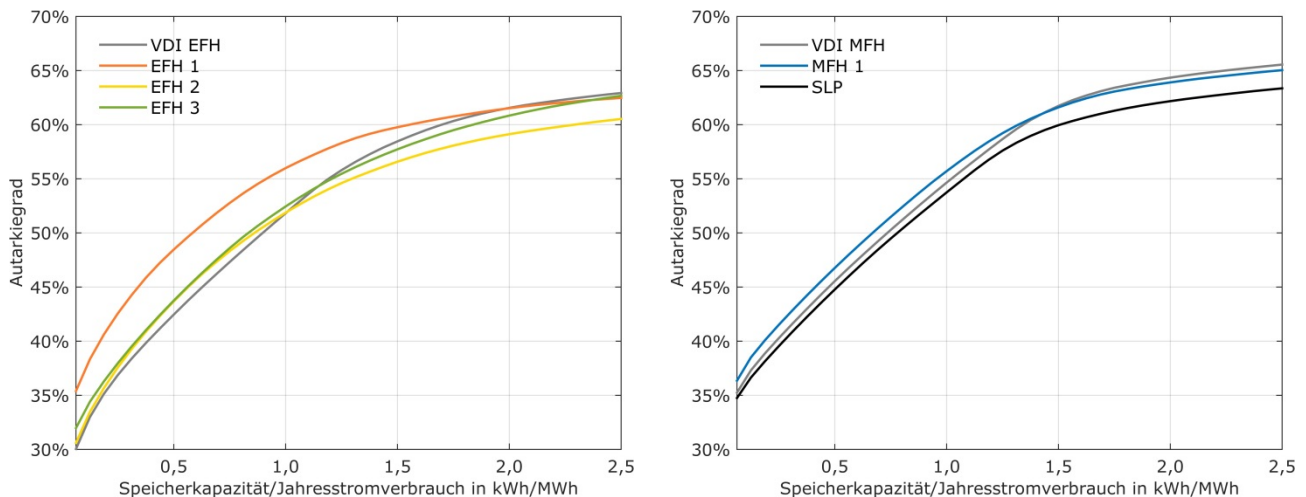


**Bild 4:** Autarkiegrad für verschiedene EFH- (links) und MFH-Lastprofile (rechts) in Abhängigkeit von der PV-Leistung ohne Speicher.

Um den Nutzen eines zusätzlichen Batteriespeichers zu untersuchen, wurden Simulationsrechnungen mit einer nutzbaren Speicherkapazität von bis zu 2,5 kWh/MWh bei einer PV-Leistung von 1 kWp/MWh durchgeführt. In Bild 5 sind die erreichbaren Autarkiegrade in Abhängigkeit von der Speicherkapazität für die unterschiedlichen Lastprofile gegenübergestellt. Am Verlauf des Autarkiegrads kann man erkennen, dass je nach Lastprofil ab einer Speicherkapazität von etwa 1,5 kWh/MWh eine weitere Vergrößerung des Batteriespeichers nur einen geringen Nutzen hat. Zu erklären ist dies damit, dass größere Batteriespeicher in der Nacht nicht vollständig entladen werden können und somit am Folgetag nicht die gesamte Speicherkapazität zur Verfügung steht [5].

Betrachtet man den Verlauf des Autarkiegrads für EFH 2 und für das VDI-Referenzprofil für EFH, fällt auf, dass ab einer Speicherkapazität von 1 kWh/MWh das VDI-Referenzprofil höhere Autarkiegrade erzielt. Ein Grund hierfür ist, dass das VDI-Profil eine geringere Variabilität der täglichen Stromverbräuche hat (vgl. Bild 2). Des Weiteren fällt bei EFH 2 der Stromverbrauch in den Wintermonaten höher als beim VDI-Referenzprofil aus.

Bei einer Speicherkapazität von 1 kWh/MWh und einer PV-Leistung von 1 kWp/MWh resultieren für die untersuchten Lastprofile Autarkiegrade zwischen 53 und 57%. Durch eine Verdopplung der Speicherkapazität auf 2 kWh/MWh lassen sich die Autarkiegrade lediglich auf 59 bis 64% erhöhen. Beim Vergleich der berechneten Autarkiegrade für EFH (Bild 5 links) und MFH (Bild 5 rechts) wird auch deutlich, dass die Unterschiede zwischen den Lastprofilen bei den MFH geringer als bei den EFH sind.



**Bild 5:** Autarkiegrad für verschiedene EFH- (links) und MFH-Lastprofile (rechts) in Abhängigkeit von der Speicherkapazität bei einer PV-Leistung von 1 kWp/MWh.

## 5. Zusammenfassung

Durch Simulationsrechnungen konnten in diesem Beitrag Unterschiede in der Eigenversorgung von EFH und MFH durch PV-Systeme sowie PV-Batteriesysteme nachgewiesen werden. Es wurde untersucht, welchen Einfluss die installierte PV-Leistung und Speicherkapazität auf die Höhe der Eigenversorgung hat. Es konnten zudem Unterschiede im tages- und jahreszeitlichen Verlauf verschiedener Lastprofile aufgezeigt werden, die sich wiederum auf die Höhe der Eigenversorgung auswirken. Sowohl für EFH als auch für MFH sind die Referenzprofile der VDI-Richtlinie 4655 gut geeignet, um die photovoltaische Eigenversorgung je nach PV-Leistung und Speicherkapazität vorab zu bestimmen (vgl. auch [6]). Für die untersuchten EFH sind Standardlastprofile auf Grund ihrer Charakteristik zur Abschätzung der photovoltaischen Eigenversorgung eher ungeeignet. Für alle untersuchten Lastprofile hat sich gezeigt, dass Autarkiegrade über 50% mit typischen Systemkonfigurationen möglich sind. Somit können PV-Systeme in Kombination mit Batteriespeichern einen wesentlichen Beitrag zur Stromversorgung von Wohngebäuden leisten.

## 6. Referenzen

- [1] J. Weniger, J. Bergner, T. Tjaden, V. Quaschnig, Hrsg.: *Dezentrale Solarstromspeicher für die Energiewende*, 1. Aufl. Berlin: Berliner Wissenschafts-Verlag, 2015.
- [2] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: „VDI 4655: Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen“, in *VDI-Handbuch Energietechnik*, Düsseldorf, 2008.
- [3] J. Weniger, M. Mesenholl, R. Baldy, H.-O. Troeder, B. Stegemann: „Analyse und Optimierung des Eigenverbrauchs von Solarstrom in Mehrfamilienhäusern“, in *21. Symposium Nutzung Regenerativer Energiequellen und Wasserstofftechnik*, Stralsund, S. 169-176, 2014.
- [4] J. Weniger, V. Quaschnig: „Begrenzung der Einspeiseleistung von netzgekoppelten Photovoltaiksystemen mit Batteriespeichern“, in *28. Symposium Photovoltaische Solarenergie*, Bad Staffelstein, S. 48-49, 2013.
- [5] J. Weniger, T. Tjaden, V. Quaschnig: „Sizing of Residential PV Battery Systems“, *Energy Procedia*, Bd. 46, S. 78–87, 2014.
- [6] T. Tjaden, J. Weniger, J. Bergner, F. Schnorr, V. Quaschnig: „Einfluss des Standorts und des Nutzerverhaltens auf die energetische Bewertung von PV-Speichersystemen“, in *29. Symposium Photovoltaische Solarenergie*, Bad Staffelstein, S. 103-104, 2014.