

PV-Eigenverbrauch mit Elektrofahrzeugen und Hausspeichersystemen

Philipp NOBIS, Florian SAMWEBER, Sebastian FISCHHABER

Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., Am Blütenanger 71, 80995 München,
Deutschland, 089-158121-33, pnobis@ffe.de, www.ffe.de

Kurzfassung:

Wenn regenerative solare Erzeugung direkt vor Ort verbraucht wird können Übertragungsverluste reduziert und langfristig die Wirtschaftlichkeit von Photovoltaik-Anlagen erhöht werden. Es stellt sich die Frage ob und in welchem Maß der Eigenverbrauch durch Nutzung eines Elektrofahrzeugs und/oder stationären Speichers erhöht wird. In diesem Beitrag werden die Synergieeffekte der einzelnen Komponenten diskutiert und deren Einflüsse untersucht. Zusammenfassend stellte sich heraus, dass sowohl Elektrofahrzeuge als auch Hausspeichersysteme den Eigenverbrauch im betrachteten Netzgebiet deutlich erhöhen können.

Keywords: Elektrofahrzeuge, Photovoltaik, Eigenverbrauch, Hausspeichersystem, Eigendeckung, Ladesteuerung

1 Einleitung

Die Energieversorgung der Zukunft soll aus erneuerbaren Energien bestehen: Windkraft, Wasserkraft und Photovoltaik (PV) sollen zukünftig die Haushalte mit elektrischer Energie versorgen. Wenn lokal erzeugter, regenerativer Strom direkt vor Ort verbraucht wird, können Übertragungsverluste reduziert werden. Zusätzlich könnten somit Lastspitzen im Netz vermieden werden. Durch stationäre Hausspeichersysteme (HSS) kann regenerative Energie auch dann genutzt werden, wenn keine Erzeugung vorhanden ist, z.B. in den Abendstunden wenn der Verbrauch i.d.R. am höchsten ist. Inwiefern Elektrofahrzeuge (BEV, Battery Electric Vehicle), als zusätzliche flexible Verbraucher im Haushalt, die Möglichkeit bieten den eigenerzeugten Strom besser zu nutzen ist bislang unklar.

2 Methodik

Die Untersuchungen an der FfE zum Thema PV-Eigenverbrauchserhöhung mit Elektrofahrzeugen und Hausspeichersystemen konzentrieren sich auf die energetische Bewertung von Synergieeffekten auf Haushalts- und Netzebene.

2.1 Berechnung des PV-Eigenverbrauchs mit EVSIM

Um die energetischen Zusammenhänge in einem Haushalt zu ermitteln, wurde an der FfE ein Simulationsmodell entwickelt, mit dem HSS, BEV und PV-Anlage simuliert werden können.

Das Modell (vergleiche **Abbildung 2-1**) benötigt verschiedene Eingangsparameter, um den Eigenverbrauch treffend bestimmen zu können:

- **Haushaltslastgang:** Der zeitliche Verlauf des Energiebedarfs des zu untersuchenden Haushalts wird in möglichst hoher Auflösung benötigt. Messlücken können mit einem speziellen Verfahren aufgefüllt werden. Sollte kein Haushaltslastgang zur Verfügung stehen, kann der zeitliche Verlauf des Verbrauchs mit einem Haushaltslastgenerator abgeschätzt werden.
- **PV-Lastgang:** Analog dem Haushaltslastgang kann dem Modell ein Erzeugungslastgang der Photovoltaikanlage zur Verfügung gestellt werden. Auch dieser kann alternativ mit Hilfe von vorliegenden Wetter- und Einstrahlungsdaten gemäß dem Standort sowie der Ausrichtung der PV-Anlage abgeschätzt werden.
- **HSS:** Der stationäre Stromspeicher wird als eine Batterie mit einer Kapazität, einem nutzbarem SOC-Swing und einer Lade- bzw. Entladeleistung abgebildet.
- **Elektrofahrzeug:** Jede Fahrt des Fahrzeugs verbraucht eine gewisse Energiemenge, die im ungesteuerten Fall unmittelbar nach der Rückkehr zu Hause wieder aufgeladen werden muss. Mit Hilfe von früheren Untersuchungen der Bewegungsprofile privater PKW (/Eflott-11/) kann dieser Energieverbrauch akkurat abgeschätzt werden.

Die aus der Photovoltaik-Anlage erzeugte Energie dient primär zur Deckung des Haushaltsstrombedarfs. Wenn es einen Energieüberschuss gibt, wird dieser Überschuss entweder im stationären Stromspeicher gespeichert (wenn möglich), oder als letzte Option in das öffentliche Netz eingespeist. Im umgekehrten Fall, wenn die aus der PV-Anlage erzeugte Energie den Strombedarf nicht decken kann, wird bevorzugt die vorhandene gespeicherte Energie aus dem stationären Stromspeicher zur Deckung der Last verwendet. Eine detaillierte Beschreibung des Modells ist in /GAL-01 13/ zu finden.

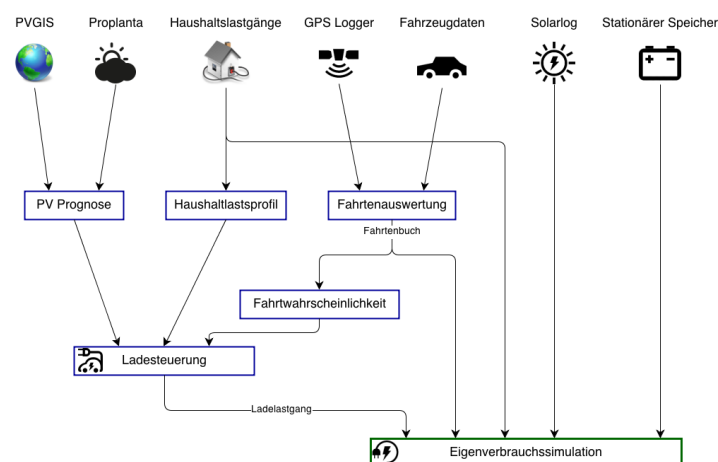


Abbildung 2-1: *Simulationsmodell EVSIM zur Eigenverbrauchs Optimierung und Bestimmung*

2.2 Berechnung des PV-Eigenverbrauchs im Netzgebiet mit GridSim

Um die Effekte von BEV und HSS auf den Eigenverbrauch in einem gesamten Netzgebiet zu untersuchen, wurde an der FfE das Simulationsmodell „GridSim“ um eine entsprechende Funktion erweitert (vergleiche Abbildung 2-2). Mit Hilfe dieses Berechnungsmodells können

reale und synthetische Niederspannungsnetze simuliert werden. Als Grundlage der Berechnungen werden den Hausanschlüssen des Stromnetzes Lastgänge zugewiesen. Da in den hier vorgestellten Untersuchungen der Fokus auf private Elektromobilität gelegt wird, werden ausschließlich Wohngebiete, also Lastgänge von Privathaushalten betrachtet. Weiterhin wird über einen Verteilungsschlüssel festgelegt wie viele PV-Anlagen, BEV und HSS im betrachteten Netzgebiet angenommen werden. Diese Komponenten verfügen ihrerseits wiederum über einstellbare Parameter. Die simulierten Elektrofahrzeuge verfügen zudem über individuelle Fahrprofile, welche aus GPS-Daten gewonnen wurden /Eflott-11/.

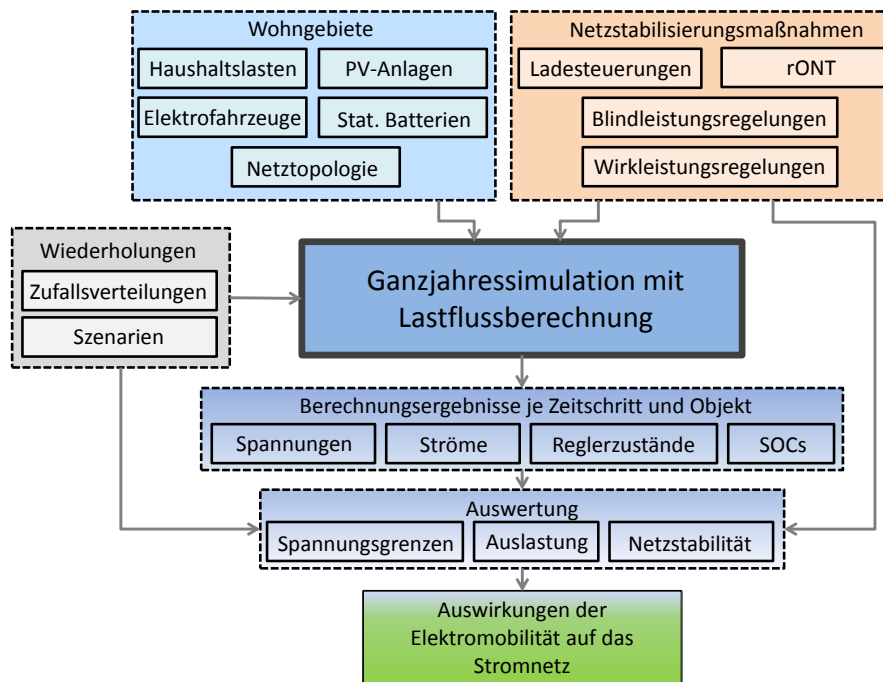


Abbildung 2-2: Simulationsmodell GridSim

Aufbauend auf den oben beschriebenen Simulationsparametern werden Lastflussberechnungen durchgeführt und die Ergebnisse ausgewertet. Diese Bottom-Up-Modellierung des Netzgebietes mit einzelnen Haushalten erlaubt es verschiedene Eingangsdaten, z.B. Fahrprofile der BEV, Haushaltslastgänge oder unterschiedliche Laderegeln zu kombinieren.

3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Synergieeffekte und Einflüsse von BEV, PV-Anlagen und HSS diskutiert.

3.1 Ladeverhalten BEV vs. PV-Erzeugung

Die Ladecharakteristik privater Fahrzeuge wurde im Forschungsprojekt /FFE-39 12/ eingehend anhand der bundesweiten Mobilitätsbefragung /INFAS-01 10/ untersucht. In Abbildung 3-1 sind die Ladehäufigkeiten der simulierten Fahrzeugflotte in 2015 für eine exemplarische Woche dargestellt. Die Analysen zeigen, dass die meisten Fahrzeuge zwischen 16 Uhr und 21 Uhr geladen werden. Die maximale Gleichzeitigkeit beträgt ca. 12 % (vergleiche **Abbildung 3-1**).

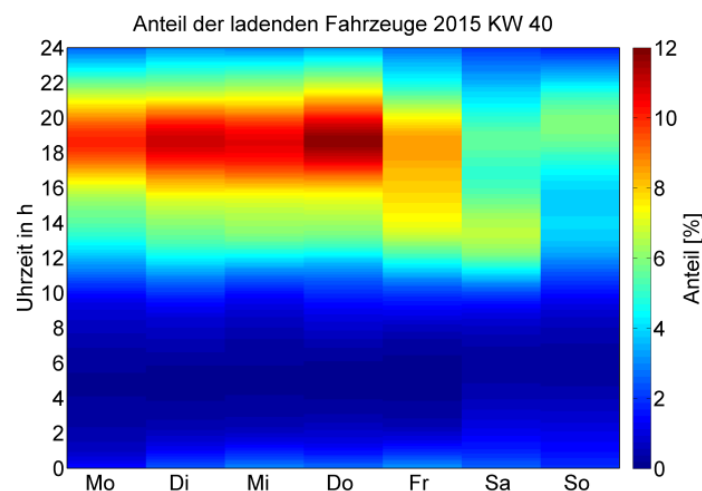


Abbildung 3-1: Ladezeiträume der Elektrofahrzeuge

In Abbildung 3-2 ist der Ladelastverlauf der gleichen Woche für die Jahre 2015, 2020 und 2030 dargestellt. In beiden Abbildungen ist zu erkennen, dass die Ladelast zur Mittagszeit, wenn die PV-Einstrahlung am höchsten ist, stark ansteigt. Die Spitzenlast tritt gegen 19:00 Uhr auf, wenn kaum PV-Erzeugung vorhanden ist.

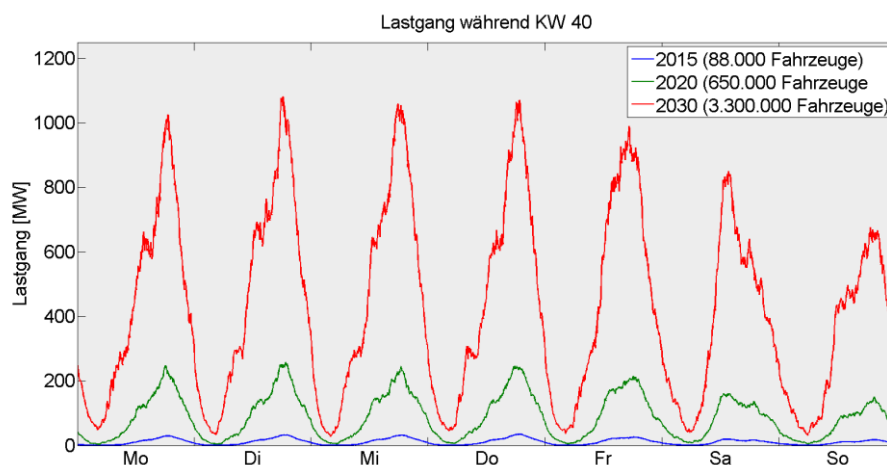


Abbildung 3-2: Ladelastgang der Elektrofahrzeuge

Hinsichtlich der PV-Erzeugung ergibt sich trotz der hohen abendlichen Ladeleistung ein signifikantes Deckungspotenzial. Um dieses Potenzial abzuschätzen wurde hypothetisch die in Abbildung 3-2 dargestellt Ladelast normiert und der gesamten, normierten PV-Erzeugung in Deutschland aus 2013 gegenübergestellt. Es zeigte sich, dass die Ladelast der Elektrofahrzeuge zu 34 % durch die PV-Erzeugung abgedeckt würde.

3.2 PV-Eigenverbrauch in privaten Haushalten mit Elektrofahrzeugen und Hausspeichersystemen

Abbildung 3-3 zeigt den gemittelten Energiefluss über alle simulierten Haushalte mit BEV im betrachteten Simulationsjahr ohne (links) und mit HSS (rechts). Dabei wurden kombinatorisch alle 114 Haushaltslastgänge mit den 43 Ladeprofilen der BEVs verknüpft und simuliert (4.902 Kombinationen). Es geht hervor, dass ohne stationären Speicher im Mittel 441 kWh bzw. 18 % der jährlichen Fahrenergie aus der PV-Anlage in die Fahrzeugbatterie geladen wurde. Der Großteil des Stromes von 1991 kWh (82 %) wird jedoch regulär aus dem Netz bezogen. Die Eigendeckung reduziert sich durch ein Elektrofahrzeug von 31,4 % auf 26,9 %. Beim Einsatz eines Hausspeichersystems erhöht sich die Eigendeckung des Haushaltes und des Elektrofahrzeuges auf 47,6 %.

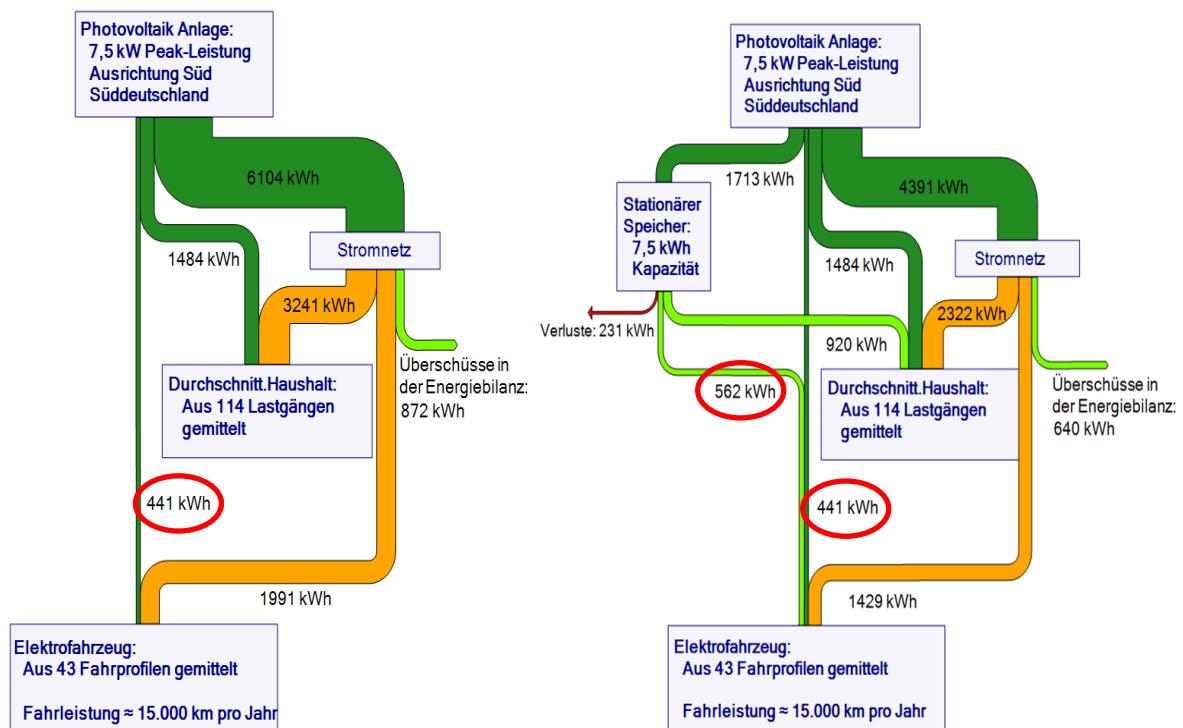


Abbildung 3-3: Energieflüsse in Haushalten mit und ohne Hausspeichersystem

Im Vergleich zum Fall ohne Hausspeichersystem, wird mit einem zusätzlichen stationären Speicher der PV-Anteil an der elektrischen Fahrenergie mehr als verdoppelt von 18 % auf 41 %. Diese Erhöhung unterliegt über das Jahr gesehen starken saisonalen Schwankungen. Während im Sommer aufgrund der hohen PV-Erzeugung das HSS meistens vollgeladen werden kann und damit am Abend genug gespeicherte Energie für das Laden des BEV zur Verfügung steht, ist im Winter der Füllstand des HSS oft an der unteren SOC-Grenze, so dass abendliche BEV-Ladungen aus dem Stromnetz bezogen werden müssen.

Ähnlich wie die Eigendeckung, die sich auf den Endverbrauch bezieht, wurde der Eigenverbrauch durch BEV und HSS erhöht. Ohne HSS erhöhte sich der Eigenverbrauch durch die ungesteuerten Elektrofahrzeuge von 19,6 % auf 24 %. Mit HSS erhöhte sich der Eigenverbrauch sogar auf 45 %, wobei 6,4 % des Eigenverbrauchs die Verluste der HSS ausmachen.

3.3 Erhöhung des PV-Eigenverbrauchs durch BEV-Ladesteuerungen

Durch den Einsatz von Ladesteuerungen kann der Eigenverbrauch weiter gesteigert werden. Um diesen Mehrwert zu untersuchen, wurden an der FfE verschiedene Ladesteuerungen entworfen. Die hier untersuchte Ladesteuerung lädt die Batterie des Elektrofahrzeugs nach seiner Ankunft zunächst sofort bis zu einem vorgegebenen Füllstand (SOC_k) auf, um dem Komfortanspruch des Nutzers gerecht zu werden (d.h. der Nutzer kann sich jederzeit für eine weitere Fahrt mit seinem Fahrzeug entscheiden und sein Fahrverhalten wird durch den Einsatz der Ladesteuerung voraussichtlich nicht beeinflusst). Nach Erreichen dieses Ladezustands wird die Fahrzeugbatterie erst weiter geladen, wenn eine Überschussleistung der PV-Anlage oder des Hausspeichersystems vorhanden ist. Das Elektrofahrzeug wird in diesem Fall nur mit der Überschussleistung aufgeladen. Die in der Simulation verwendete Batteriekapazität der Elektrofahrzeuge beträgt 22 kWh. Die minimale SOC beträgt 10 % und der maximale 94 %. Der nutzbare Speicherinhalt beträgt dabei 18,5 kWh.

Der Zusammenhang zwischen SOC_{min} , SOC_{max} und SOC_k ist in **Abbildung 3-4** dargestellt.

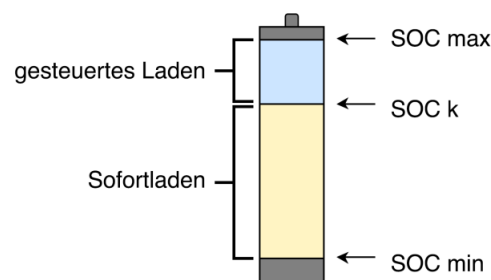


Abbildung 3-4: Zusammenhang zwischen SOC_{min} , SOC_{max} und SOC_k

In dem hier vorgestellten Beispiel wurde 80 % Ladefüllstand als Kompromiss angenommen. Vorherige Untersuchungen hatten gezeigt, dass bei einem Großteil an Ladevorgängen zwischen 20 % und 30 % der Batteriekapazität geladen wird /FFE-39 12/.

Die Analysen zeigen, dass der Eigenverbrauch bei einer 2,5 kW_p PV-Anlage und einem stationären Speicher mit 2,5 kWh Kapazität durch eine solche Ladesteuerung um 4,2 % erhöht werden kann /BWK 1-14/, /BWK 1-14/. In **Abbildung 3-5** ist der Eigenverbrauch mit Ladesteuerung für unterschiedliche PV-Anlagen und stationäre Speichergrößen dargestellt.

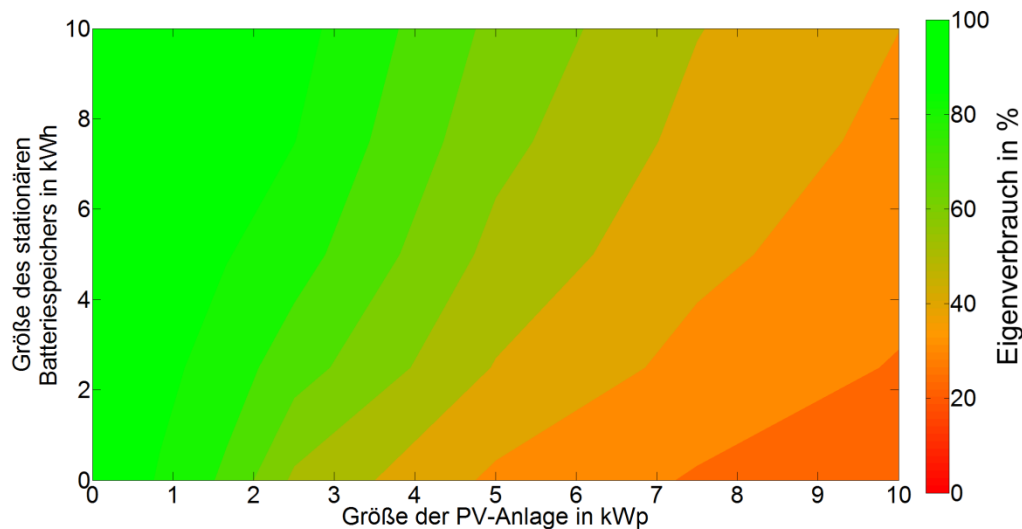


Abbildung 3-5: Einfluss unterschiedlich großer PV-Anlagen sowie stationärer Speichergrößen auf den Eigenverbrauch

Eine Analyse hat weiter ergeben, dass der Einfluss dieser Ladesteuerung umso größer wird, je kleiner die PV-Anlage beziehungsweise der stationäre Speicher ist. Dies kann auch **Tabelle 3-1** entnommen werden, welche die vorliegenden Simulationsergebnisse in Bezug auf die Erhöhung des Eigenverbrauchs für die vorgestellte Ladesteuerung zusammenfasst.

Tabelle 3-1: Erhöhung des Eigenverbrauchs durch die Ladesteuerung ab 80 % SOC

		Größe der Photovoltaikanlage in kWp			
		2,5 kWp	5 kWp	7,5 kWp	10 kWp
Größe des stationären Batteriespeichers	kein Speicher	12,4%	6,6%	5,0%	3,6%
	2,5 kWh	4,2%	3,1%	2,2%	1,8%
	5 kWh	2,7%	2,5%	1,9%	1,5%
	7,5 kWh	1,7%	2,1%	1,6%	1,2%
	10 kWh	1,1%	1,8%	1,4%	1,1%

3.4 PV-Eigenverbrauch im Netzgebiet

In Abbildung 3-6 ist der PV-Eigenverbrauch eines Wohngebietes für verschiedene Ladeleistungen dargestellt. In diesem Fall wurde angenommen, dass 40 % der Haushalte über ein Elektrofahrzeug verfügen und 36 % eine PV-Anlage, wobei 30 % der PV-Anlagenbesitzer ein HSS haben. Im Mittel wurde eine PV-Anlagengröße von etwa 5 kWp angenommen. Ohne die vorgestellte Ladesteuerung und ohne Hausspeichersysteme beträgt der PV-Eigenverbrauch ca. 86 % bei einer Ladeleistung von 3,5 kW. Eine Erhöhung der Ladeleistung auf 7 kW erhöht den Eigenverbrauch um ca. 1 %, jede weitere Erhöhung der Ladeleistung hat im ungesteuerten Fall keinen Einfluss.

Die Verwendung der Ladesteuerung erhöht den PV-Eigenverbrauch im Wohngebiet um ca. 2,5 %. Diese Steigerung lässt sich ebenfalls auf eine Ladeleistung von 7 kW übertragen, bei höheren Ladeleistungen sinkt die Eigenverbrauchserhöhung wieder ab.

Mit Hausspeichersystemen in 30 % der Haushalte mit PV-Anlage erhöht sich der PV-Eigenverbrauch um knapp 5 %. Wenn nun die Fahrzeuge ebenfalls gesteuert geladen

werden erhöht sich der Eigenverbrauch um weitere 1,7 %. Tendenziell ist auch hier zu erkennen, dass eine Ladeleistung von über 7 kW wieder zu fallenden PV-Eigenverbrauchserhöhungen führt.

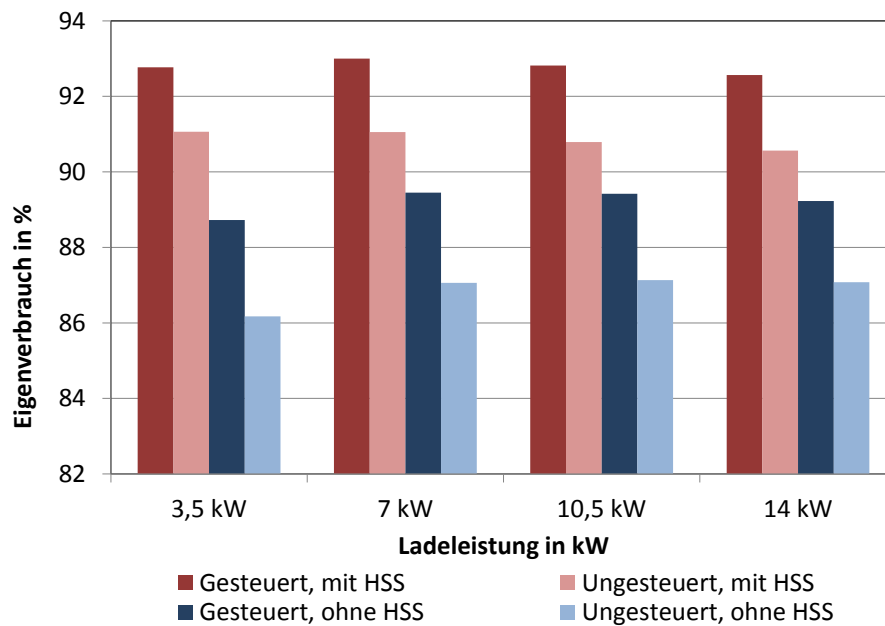


Abbildung 3-6: PV-Eigenverbrauch der Wohngebiete für verschiedene Szenarien

Mit steigender Anzahl an Elektrofahrzeugen wird der Eigenverbrauch im Netzgebiet deutlich erhöht. Unter der Annahme, dass jeder zweite Haushalt über ein Elektrofahrzeug verfügt, erhöht er sich auf ca. 94 %. Dabei wird die Steigerung des Eigenverbrauchs mit zunehmender Elektrofahrzeugdurchdringung schwächer. Der Einfluss der Ladeleistung ist hierbei als gering einzuschätzen. Ohne Elektrofahrzeuge und HSS liegt der Eigenverbrauch im Netzgebiet bei ca. 78,5 %.

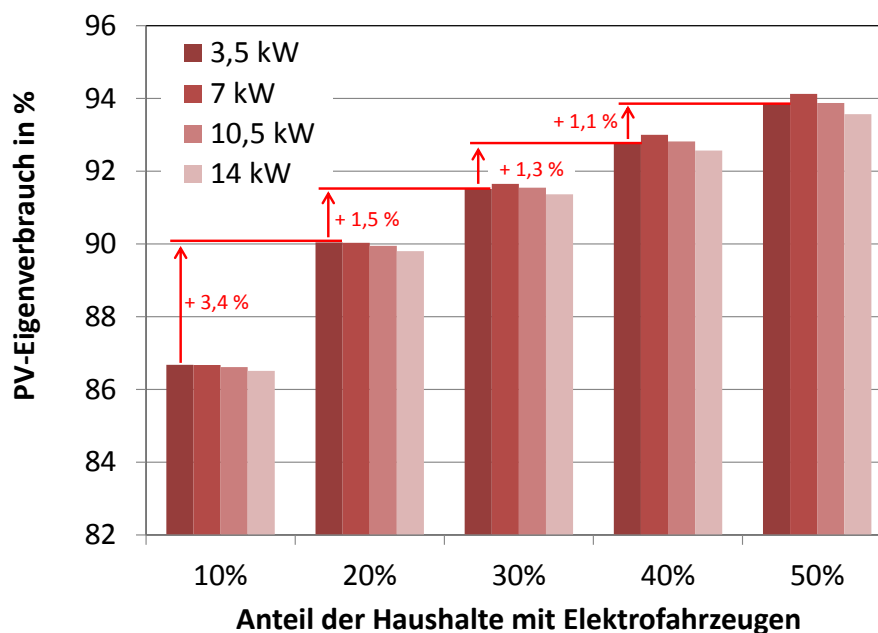


Abbildung 3-7: Erhöhung des PV-Eigenverbrauchs des Wohngebietes mit Elektrofahrzeugen und HSS

4 Schlussfolgerung

Die gesamte PV-Erzeugung (36 % der Haushalte mit \varnothing 5 kWp) wird ohne Speicher und Elektrofahrzeuge zu 78 % direkt im Netzgebiet verbraucht. Mit Speicher und starker BEV Durchdringung sowie Ladesteuerung kann dieser Eigenverbrauch auf bis zu 94 % erhöht werden. Eine Erhöhung des Eigenverbrauchs im Netzgebiet bewirkt, dass weniger Energie in das Mittelspannungsnetz zurückgespeist wird, wodurch Netzverluste reduziert werden können.

Die Analyse der Ladelastdeckung von BEV durch PV-Energie zeigte, dass sich zwar die Last- und Erzeugungsspitzen nicht überschneiden, jedoch ein großer Anteil der Ladeenergie von 18 % - bundesweit theoretisch >30 % - durch PV-Erzeugung direkt gedeckt werden kann. Im Mittel über alle simulierten Fälle konnte der PV-Anteil an der Fahrenergie durch die Verwendung eines stationären Speichers (Kapazität 7,5 kWh) bei einer 7,5 kWp PV-Anlage von 18 % auf 41 % gesteigert werden. Sowohl der Anteil an der Fahrenergie als auch der Anteil im Haushalt wird dabei gesteigert. Kombiniert mit einer eigenverbrauchsoptimierten Ladesteuerung kann dieser Effekt weiter erhöht werden.

Zusammenfassend hat sich gezeigt, dass durch zunehmende Verbreitung von HSS und BEV mehr regenerative Energie vor Ort genutzt werden kann.

Literatur

- GAL-01 13 Gallet, Marc: Netztechnische, wirtschaftliche und ökologische Modellierung des Zusammenwirkens von Elektrofahrzeugen, PV-Anlagen und stationärem Stromspeichern in Haushalten - Masterarbeit am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik an der Technischen Universität München (TUM). München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FFE), 2013
- FFE-39 12 Pellingner, Christoph; Schmid, Tobias; et al.: Laufendes Projekt: Merit-Order der Energiespeicherung im Jahr 2030 - Entwicklung und Darstellung kostenoptimierter Speicherinfrastrukturen in Form von Merit Order Kurven in: <http://www.ffe.de/die-themen/speicher-und-netze/414>. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2012
- INFAS-01 10 Follmer, Robert; Gruschwitz, Dana; Jesske, Birgit; Quandt, Sylvia; Lenz, Barbara; Nobis, Claudia; Köhler, Katja; Mehlin, Markus: Mobilität in Deutschland 2008 - Struktur – Aufkommen – Emissionen – Trends. Bonn: infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH, 2010
- BWK 1-14 Samweber, Florian; Nobis, Philipp; Gallet, Marc: Den eigenen PV-Strom tanken - Ladesteuerung zur Erhöhung des Photovoltaik-Eigenverbrauchs (Teil 1) in: BWK Issue 01/2013, S. 66-69. Düsseldorf: Springer VDI Verlag, 2014
- BWK 2-14 Samweber, Florian; Nobis, Philipp; Gallet, Marc: Den eigenen PV-Strom tanken - Ladesteuerung zur Erhöhung des Photovoltaik-Eigenverbrauchs (Teil 2) in: BWK Issue 03/2014, S. 46-49. Düsseldorf: Springer VDI Verlag, 2014