

Flexibilisierung der Haushaltsnachfrage durch ein Photovoltaik-Batteriespeichersystem und ein Elektrofahrzeug

Flexible household load by solar energy storage and EV

T. Kaschub, Dr. P. Jochem, Prof. Dr. W. Fichtner

Lehrstuhl für Energiewirtschaft, Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP), Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Kurzfassung

Die Flexibilität der elektrischen Haushaltsnachfrage wird sich mit Photovoltaik-Batteriespeichersystem (PV-Speicher) und Elektrofahrzeug deutlich steigern und kann den Verlauf der Stromnachfrage und die Erlöse für Versorger signifikant verändern. Mit einem techno-ökonomischen Optimierungsmodell solcher Haushalte zeigen wir die Wirtschaftlichkeit dieser PV-Speicher-Systeme – in wenigen Jahren sogar ohne Förderung. Mit Demand Response Maßnahmen oder speziellen Tarifen lässt sich die flexible Nachfrage seitens des Energieversorgers beeinflussen. Insbesondere gesteuertes Laden des Elektrofahrzeugs hat einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis.

Abstract

Load flexibility of households will significantly increase by solar energy storage systems and electric vehicles (EV). With our techno-economic optimizing model of such a household system we prove that these systems will be profitable – in some years even without subsidies. The utility may apply demand response or adequate electricity tariffs to influence load profiles. Controlled EV charging has a substantial influence on the load, too.

1. Einleitung

Dem Ziel einer CO₂-emissionsarmen Wirtschaft soll sich in Deutschland u. a. durch das EEG und den dadurch induzierten Ausbau von Photovoltaikanlagen (PV) angenähert werden. So entstand ein Massenmarkt mit bereits rund 1,4 Mio. installierten Anlagen. Im Transportsektor soll ein Wechsel hin zu Elektrofahrzeugen (E-Pkw) dieses Ziel unterstützen. Durch fallende Batteriepreise [1] (derzeit im E-Pkw Bereich) könnte in den nächsten Jahren für viele Haushalte eine Investition in PV mit stationärem Batteriespeichersystem (SBS) auch in Kombination mit einem E-Pkw interessant werden [2], [3]. Dies kann zu einer signifikanten Änderung der Haushaltsnachfrage nach Elektrizität und des Nachfrageverlaufs (inkl. Lastspitzen) aus dem Netz führen. Gleichzeitig würde dies die Nachfrageflexibilität der Haushalte erhöhen.

Diese Flexibilität ermöglicht es mit Anreizen wie Demand Response oder speziellen Tarifen die Nachfrage stärker zu beeinflussen als heute.

2. Methodik und Beschreibung des Optimierungsmodells

Zur Analyse möglicher Gestaltungsalternativen zur Beeinflussung der Nachfrage wurde ein Modell eines Haushaltes mit PV, SBS und E-Pkw als gemischt-ganzzahliges lineares Problem (ca. 770k Var., ca. 71k Binärvar.) entwickelt. Es dimensioniert PV und SBS endogen und optimiert die Ladevorgänge. Ziel ist die Maximierung der Kapitalwerte¹ beider Anlagen unter Berücksichtigung aller Elektrizitätsausgaben² (siehe ausgewählte Formeln (1) bis (4)). Das Modell wird auf 225 verschiedene Haushalte angewendet.

$$\max \mathbf{OBJ} = -\mathbf{INV}^{SBS} - \mathbf{INV}^{PV} + \mathbf{SZ} \quad (1)$$

$$\mathbf{INV}^{PV} = \mathit{inv}^{PV} \cdot \mathbf{P}^{PV,peak} - \frac{CLT^{PV,rest}}{CLT^{PV}} \left(\frac{\mathit{inv}^{PV} \cdot \mathbf{P}^{PV,peak}}{(1+i)^{poc}} \right) \quad (2)$$

$$\mathbf{INV}^{SBS} = \sum_{y_{inv} \in Y_{inv}} \left(\frac{\mathit{inv}^{SBS}}{RC} \left(\frac{CAP^{SBS}}{(1+i)^{y_{inv}}} + \frac{CLT^{SBS,red}}{CLT^{SBS}(1+i)^{y_{inv}}} \right) \right) - \frac{CLT^{SBS,rest}}{CLT^{SBS}} \left(\frac{\mathit{inv}^{SBS} \cdot CAP^{SBS}}{(1+i)^{poc}} \right) \quad (3)$$

$$\mathbf{SZ} = \sum_{y \in Y} \left(-dt \cdot \sum_{t \in T} \left(\mathbf{P}_t^{grid,dem} \cdot p_y^{HH} \cdot pf_t + \mathbf{P}_t^{EV,disg} \cdot C^{EV,cy} + p^{over} \left(\mathbf{P}_t^{dem,over} + \mathbf{P}_t^{feed,over} \right) LA \right) - \left(p^{SBS,mt} \frac{CAP^{SBS}}{RC} \right) + dt \sum_{t \in T} \left(\mathbf{P}_t^{PV,feed} \cdot p_y^{PV} \right) \right) \frac{1}{(1+i)^y} \quad (4)$$

Legende

Variablen in (1-4) sind fett markiert.	P	Leistung	EV	Elektrofahrzeug	
OBJ	Zielwert in EUR	p	Preis	feed	Netzeinspeisung
INV	Investition	pf	Preisfaktor (1)	grid	Netz
SZ	Summe Zahlungsströme	poc	betracht. Zeitraum (20 a)	HH	Haushalt
CAP ^{SBS}	Speicherkapazität	RC	Restkapazität (80 %)	mt	Wartung
C	Kosten	t	Zeitscheibe (0-35039)	over	über Grenze
CLT	kalend. Lebensdauer	y	Jahre 2018-2037 (0-19)	peak	Spitzenleistung
dt	Zeitscheibendauer (0,25 h)	y _{inv}	Investitionsjahre (insb. J. 0)	PV	Photovoltaik-Anlage
i	Zinssatz (4 %)	cy	Batteriezyklen	red	reduziert
inv	Investition pro Einheit	dem	Nachfrage	rest	restliche
LA	Lastgrenze aktiv (0 oder 1)	disg	Entladen	SBS	stationärer Batteriespeicher

Restriktionen wie die zyklische und kalendarische Alterung des SBS und dessen Ladecharakteristiken beeinflussen den Einsatz. Bei der PV-Anlage sind Ausrichtung und Temperaturabhängigkeit berücksichtigt und bei den Invertern der linearisierte Wirkungsgrad mit Einschaltsschwelle. Der E-Pkw kann mit verschiedenen Ladestrategien (ungesteuert, gesteuert oder bidirektional) ins Haussystem eingebunden werden. Primärzweck des E-Pkw ist die Bereitstellung der Mobilität, die gewährleistet sein muss. Diese wurde aus dem Mobilitätspanel [4] abgeleitet [5]. Eine ganzjährige Einsatzplanung in Viertelstundenschritten ermöglicht

¹ Annahmen für Investitionen: PV mit 1.6 EUR/W_p (2014) -4 %/a; SBS mit 500 €/kWh (2018).

² Annahmen für Strompreis 29,1 ct/kWh (2014) +2 %/a und Vergütung PV-Einspeisung: 3,5 ct/kWh.

sowohl die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, als auch die Evaluation verschiedenster Tarifmodelle und Möglichkeiten zur Nutzung der Flexibilitäten. Als Betrachtungszeitraum werden die Jahre 2018 bis 2037 gewählt. Die Berechnung der einzelnen Kapitalwerte von PV-Anlage und SBS wird ermöglicht durch drei Berechnungen (Haushalt ohne PV und SBS, mit PV, mit PV und SBS). Durch die Differenz der Zielwerte ergeben sich der Kapitalwert der PV-Anlage und des SBS (z. B. $NPV^{SBS} = OBJ^{SBS} - OBJ^{PV}$).

3. Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, dass unter den gewählten Annahmen eine PV-Anlage in wenigen Jahren ohne EEG wirtschaftlich betreibbar ist und durch ein SBS sinnvoll ergänzt werden kann (vgl. Tab. 1). Die Integration eines E-Pkw substituiert je nach Mobilitätsprofil und Lade-strategie zum Teil den Zweck des SBS (vgl. Tab. 1) und ermöglicht eine weitere Nachfrageflexibilisierung. Eigenverbrauchsanteile von knapp 70 % sind unter den gemachten Annahmen in der Regel optimal (vgl. Tab. 1).

Tabelle 1: Mittelwerte und Standardabweichung für Kapitalwert und Systemgrößen (n=225)

E-Pkw Integration	pos. NPV ^a		$P^{PV,peak}$	CAP^{SBS}	NPV^{SBS}	NPV^{PV+SBS}	Eigenverbrauchs-q.
	PV	SBS	in kW _p	in kWh	in €/kWh	in €	
kein E-Pkw	100%	100%	1,7 ± 0,9	2,0 ± 0,9	313 ± 176	2.601 ± 1.352	55,1% ± 4,3
ungesteuert	100%	100%	3,8 ± 1,7	3,0 ± 1,5	357 ± 197	3.438 ± 1.904	67,4% ± 3,0
gesteuert	100%	100%	4,6 ± 2,0	2,8 ± 1,6	306 ± 183	5.272 ± 2.136	69,5% ± 4,7
bidirektional	100%	91%	5,3 ± 1,8	1,8 ± 1,9	276 ± 352	6.459 ± 2.994	71,3% ± 6,9

^a Anteil der Haushalte mit einem positiven Kapitalwert (NPV) der jeweiligen Technologie.

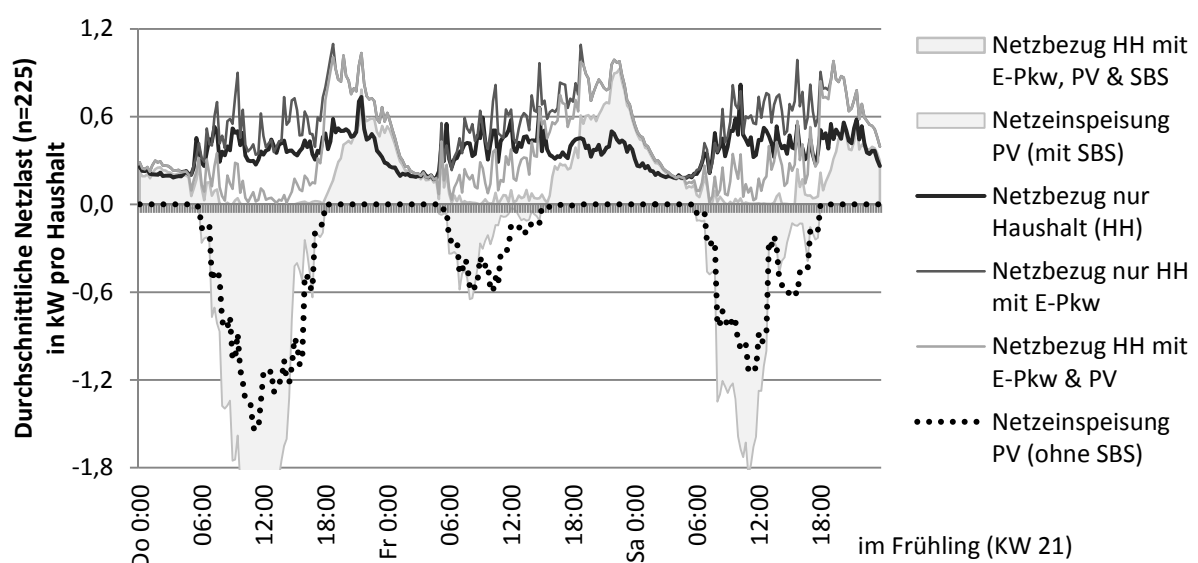


Bild 1: Netzlast und -einspeisung bei verschiedenen Systemen mit ungesteuertem Laden

Die Netznutzung bezogen auf die Jahresnachfrage ist stark abhängig von den vorhandenen Technologien im Haushalt (vgl. Tab. 2 und Bild 1). Ein E-Pkw steigert selbst bei einer geringen elektrischen Jahresfahrleistung (Plugin-Hybride) die Nachfrage deutlich. PV-Anlage und SBS haben Einfluss auf die Einspeisespitzen. Die Spitzenlast ist kaum beeinflusst.

Die neuen Last- und Einspeiseflexibilitäten durch gesteuertes Laden des E-Pkw und des SBS können durch geeignete Stromtarife oder Rahmenbedingungen nutzbar gemacht werden. Zeitvariable Energiepreise wie ein HT/NT-Tarif sorgen für eine Lastverlagerung in die NT-Zeiten, was leicht positive Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit des PV-Speichers und den PV-Zubau hat (vgl. Tab. 3). Bei ungesteuertem Laden des E-Pkw kann der Bezugsanteil in NT-Zeiten von 63 % auf 72 % gesteigert werden, bei gesteuertem Laden sogar von 64 % auf 80 %. Geeignete Möglichkeiten für einen reduzierten Spitzenleistungsbezug sind leistungsabhängige Tarifkomponenten (nicht dargestellt), wie sie in der Industrie üblich sind, oder lastvariable Tarife³. Für die Reduzierung der Spitzeneinspeisung können Einspeisebegrenzungen⁴ oder ebenfalls lastvariable Tarife³ eingesetzt werden (vgl. Tab. 3). Eine Erhöhung des Grundpreises für Elektrizität bewirkt lediglich eine verminderte Wirtschaftlichkeit des PV-Speichersystems und geringere Investitionen (nicht dargestellt).

Tabelle 2: Mittelwerte der Netznutzung (n=225)

Modellvariante, und E-Pkw Integration	Jahresnachfrage in kWh/a		Spitzenlast in kW _p		Einspeisespitze in kW _p	
	kein	gest.	kein	gest.	kein	gest.
HH	3.812	5.383	11,8	11,9	0	0
HH mit PV	2.956	3.478	11,6	11,3	-1,4	-2,9
HH mit PV und SBS	2.234	2.605	11,5	10,9	-2,2	-3,7

Tabelle 3: Mittelwerte der Indikatoren für verschiedene Szenarien (n=225)

Szenario, ungesteuertes Laden	Nachfrage in kWh/a	Spitzenlast in kW _p	Einspeisespitze in kW _p	<i>NPV^{PV}</i> in €/kW _p	<i>CAP^{SBS}</i> in kWh	<i>NPV^{SBS}</i> in €/kWh
Referenz	3.210	12,7	3,1	980	3,0	357
HT/NT	3.132	12,9	3,3	1.061	3,3	421
PV Abregelung ⁴	3.216	12,7	2,2	989	3,0	360
Leistungsgrenzen ³	3.271	8,1	2,6	1.044	2,9	339

³ Strombezug über 4 kW und Einspeiseleistung über 2 kW werden mit je 10 ct/kWh pönalisiert.

⁴ Einspeiseleistungen oberhalb 50 % der installierten PV-Spitzenleistung werden abgeregelt.

4. Diskussion und Fazit

Die Modellergebnisse zeigen eine sich fundamental ändernde Netznutzung durch Technologien wie E-Pkw, PV-Anlagen und SBS, die voraussichtlich in den nächsten Jahren zunehmend Verbreitung finden. Weitere Technologien wie Blockheizkraftwerke, Wärmepumpen oder Klimaanlage haben wahrscheinlich ähnliche Auswirkungen. Durch die neuen Lastflexibilitäten lässt sich die Netzbelastung im Zeitverlauf grundsätzlich durch die richtige Gestaltung von Anreizen durch Tarife oder Rahmenbedingungen beeinflussen. Umgesetzt wird dies dann in einem automatisiertem Hausenergiemanagement. Für eine Nutzerakzeptanz von Lastverlagerung sind zudem eine einfache und verständliche Ausgestaltung und Transparenz durch Echtzeit-Feedback von zentraler Relevanz [6].

Mit dem entwickelten Modell können Unsicherheiten bzgl. Nutzerverhalten, Wettereinflüssen oder Preisentwicklungen lediglich durch eine Sensitivitätsanalyse aufgezeigt werden. Insbesondere die Strompreisentwicklung, der Zinssatz, der Preis für SBS sowie das kalendarische und zyklische Alterungsverhalten haben einen starken Einfluss. Die optimale Einsatzplanung und Dimensionierung durch das Modell, ist im realen Einsatz so nur teilweise umsetzbar, da bspw. nur bestimmte Anlagengrößen erhältlich sind und so die Wirtschaftlichkeit der Komponenten reduziert wird. Die Einflüsse durch Tarife und Lastanpassungen sollten nicht nur aus Sicht des Anlagenbetreibers sondern auch aus Sicht der anderen involvierten Akteure (insb. Energieversorger und Netzbetreiber) untersucht werden. Grundsätzlich zeigt die Arbeit auf, dass es Möglichkeiten gibt, den wirtschaftlichen Betrieb von PV-SBS mit einer netz- und erzeugungsdienlichen Lastganganpassung zu verbinden.

5. Literaturangaben

- [1] Nykvist, B.; Nilsson, M.: Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles. *Nature climate change*, 5 (2015), S. 329-332.
- [2] Kaschub, T.; Jochem, P.; Fichtner, W.: Steigerung des Elektrizitätseigenverbrauchs von Heim-Fotovoltaikanlagen durch Elektrofahrzeuge. *uwf*, 21 (2013) 3, S. 243-250.
- [3] Kaschub, T.; Jochem, P.; Fichtner, W.: Interdependencies of Home Energy Storage between Electric Vehicle and Stationary Battery. *EVS 27*, Barcelona, Spain, 2013.
- [4] Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung: Deutsches Mobilitätspanel (MOP). Institut für Verkehrswesen (KIT), 2010.
- [5] Kaschub, T.; Heinrichs, H.; Jochem, P.; Fichtner, W.: Modeling Load Shifting Potentials of Electric Vehicles. *IAEE European Conference 2013*, Düsseldorf, 2013.
- [6] Paetz, A.-G.; Kaschub, T.; Jochem, P.; Fichtner, W.: Load-Shifting Potentials in Households including Electric Mobility. *IEEE - 10th EEM*, Stockholm, 2013.