

Konzepte zum Einsatz von Stromspeichern und Laststeuerungen zur Glättung fluktuierender erneuerbarer Energiequellen im Niederspannungsbereich

Thomas WIELAND^{1(*)}, Ernst SCHMAUTZER¹, Maria AIGNER¹, Ernst Friedl^{1(*)}

Institut für Elektrische Anlagen / TU Graz, Inffeldgasse 18/I, 8010 Graz,
Tel.: +43 (0)316 873 7567, Fax: +43 (0)316 873 7553, t.wieland@tugraz.at,
www.ifea.tugraz.at

Kurzfassung: Der folgende Beitrag stellt ein Konzept zur optimalen Nutzung des erzeugten elektrischen Stroms aus dargebotsabhängigen erneuerbaren Energiequellen (z.B. Photovoltaik-Anlagen) durch Steuerung von Endverbrauchern im Haushalt mittels eines intelligenten Lastmanagementsystems vor. Als Stromspeicher dienen Akkumulatoren, die durch das zentrale Lastmanagementsystem gesteuert werden, um in Zeiten hoher Erzeugung der PV-Anlage die überschüssige Energie zu speichern bzw. in Zeiten geringer Erzeugung diese wieder bereitzustellen. Mittels Simulationen unterschiedlicher Betriebszustände der PV-Anlage sowie des Verbrauchs bzw. der Lasten eines Einfamilienhauses wird unter den derzeit gegebenen technischen Möglichkeiten die optimale Auslegung und eine mögliche Betriebsführung des verwendeten Stromspeichers dargestellt.

Keywords: Dezentrale Stromerzeugung, dargebotsabhängige erneuerbare Energiequellen, Lastmanagementsystem, dezentrale Stromspeicher

1 Einleitung

Durch die Erzeugung der elektrischen Energie aus erneuerbaren, volatilen Energiequellen kann das Erreichen der europäischen Klimaziele, bestehend aus der Reduktion des CO₂-Ausstoßes um 20%, einer Steigerung des Anteils der Stromerzeugung aus regenerativen Energiequellen auf 20% und einer gleichzeitigen Steigerung der Energieeffizienz um 20%, ermöglicht werden. Angesichts des Anstiegs großer und vor Allem kleiner dezentraler Stromerzeugungseinheiten im Verteilnetz ist es in Zukunft – insbesondere bei Netzengpässen (Bottlenecks) – erforderlich, Stromspeicher (z.B. Akkumulatoren) in das elektrische Energiesystem zu integrieren.

Die im verbrauchernahen Teil des Verteilnetzes auftretenden Fluktuationen von Erzeugung und Verbrauch können durch eine Vor-Ort-Nutzung der erneuerbaren Energie reduziert werden. Diese ermöglicht zusätzlich den optimalen und ressourcenschonenden Betrieb der elektrischen Netze. Die abgestimmte Integration sowie Koordination dezentraler Stromerzeugungseinheiten mit unterschiedlichen installierten Leistungen sowie einer

¹ Institut für Elektrische Anlagen / TU Graz, Inffeldgasse 18/I, 8010 Graz, Tel.: +43(0)316/873 7567, Fax: +43(0)3167/873 7553, t.wieland@tugraz.at, www.ifea.tugraz.at

(*) Nachwuchsautor

volatilen Erzeugungsscharakteristik (wie z.B. PV- und Windkraft-Anlagen) stellen eine große Herausforderung dar, um die 20-20-20-Ziele, den sicheren und zuverlässigen Betrieb dieser dezentralen Anlagen, zu erreichen.

2 Herausforderungen

Die räumliche Zusammenführung und die optimale Abstimmung der dargebotsabhängigen Erzeugung (PV-Anlage) und des Verbrauchs (Endverbraucher) sind aus ökologischer und ökonomischer Sicht sinnvoll, da die in einem Haushalt verbrauchte Energie abhängig von der Personenanzahl ist und zeitlichen bzw. saisonalen Schwankungen unterliegt. Im Tageslastgang eines Haushalts sind am Morgen (06:00 – 08:00 Uhr), um die Mittagszeit (11:00 – 13:00 Uhr) bzw. in den Abendstunden (16:00 – 19:00 Uhr) charakteristische Leistungsspitzen ersichtlich. Die überschüssige Energie aus der PV-Anlage kann im vorgestellten Konzept in einen Speicher übergeführt werden, um die eingespeiste Energie in das öffentliche Netz in unerwünschten Zeiten auf ein Minimum zu begrenzen.

Zur Erreichung dieser Ziele kann das vorliegende Konzept aus einer PV-Anlage und einem intelligenten Lastmanagementsystem als zentrale Steuer- bzw. Regeleinheit in Kombination mit einem elektrischen Speicher herangezogen werden. Dies ermöglicht es, Prozesse bzw. Verbraucher in Zeiten eines hohen bzw. niedrigen Energiedargebots zu verschieben bzw. aus dem Speicher zu versorgen.

Abbildung 1 zeigt die schematische Darstellung eines Haushalts mit Endverbrauchen, einer integrierten Photovoltaik-Anlage (PV-Anlage), Akkumulatoren als Zwischenspeicher, dem Anschluss an das öffentliche Netz und die zentrale Steuerung bzw. Regelung durch das intelligente Lastmanagementsystem.

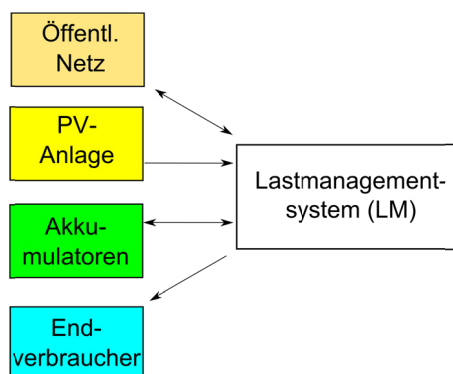


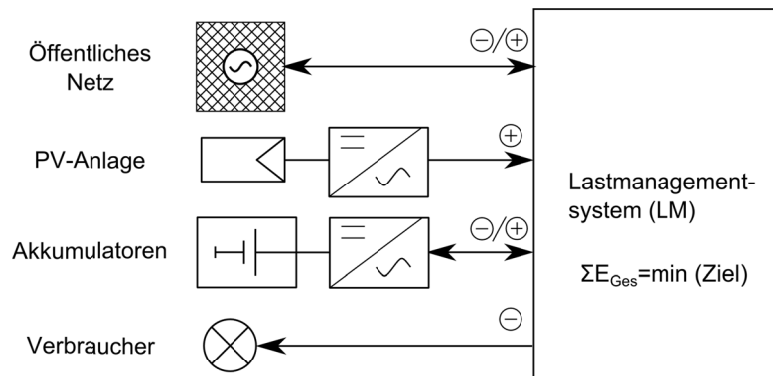
Abbildung 1 Schematische Darstellung eines Haushalts mit Anschluss an das öffentliche Netz, einer PV-Anlage, Akkumulatoren, Endverbrauchern und dem zentralen Lastmanagementsystem (LM) als Steuer- bzw. Regeleinheit

Die volatile Erzeugungsscharakteristik einer PV-Anlage bzw. der Verbrauch der elektrischen Energie in einem Haushalt und der daraus resultierende Einfluss auf das elektrische Energiesystem kann durch ein Lastmanagementsystem (LM) mit zusätzlichem Speicher reduziert werden.

In Gewerbebetrieben finden Lastmanagementsysteme bereits vielfach Einsatz, diese Systeme werden derzeit kaum im Haushaltsbereich eingesetzt, da der Anreiz für den Endkunden aufgrund der aktuellen Tarifsituation sehr gering ist.

3 Konzept

Ein mögliches Konzept, um die Einspeisung der überschüssigen elektrischen Energie auf ein Minimum zu reduzieren, ist in Abbildung 2 dargestellt. In der Darstellung wird das Erzeugerzählpfeilsystem angewendet, somit wird die verbrauchte Leistung negativ angenommen und die erzeugte Leistung positiv. Die örtliche Zusammenführung des erzeugten elektrischen Stroms aus der PV-Anlage (Erzeuger) wird durch Steuerung der elektrischen Verbraucher bzw. Regelung des Wechselrichters der Akkumulatoren (Erzeuger/Verbraucher) durch das Lastmanagementsystem (LM) erreicht.



Legende:

- \ominus Verbrauch
- \oplus Erzeugung

Abbildung 2 Schematische Darstellung bestehend aus einem intelligenten Lastmanagementsystem (LM), der PV-Anlage, den Akkumulatoren, den Verbrauchern und dem öffentlichen Netz (zur Erreichung des vorgegebenen Ziels $\Sigma E_{Ges} = \min$)

Aus der schematischen Darstellung der Energieverhältnisse E innerhalb eines Betrachtungszeitraumes T in Abbildung 2 ergibt sich folgende Gleichung (1):

$$+ E_{PV} - E_{Verbraucher} \pm E_{Akkumulator} = \pm E_{\text{Öffentliches Netz}} \stackrel{!}{=} \min(T) \quad (1)$$

Der Akkumulator inklusive dem Wechselrichter übernehmen zu bestimmten Zeitpunkten die Funktion des öffentlichen Netzes, daher ist es möglich, Energie einzuspeisen bzw. Energie zu beliebig sinnvollen Zeiten zu beziehen. Wird z.B. mehr Energie durch die PV-Anlage erzeugt als benötigt wird, erfolgt die Aufladung des Akkumulators, ansonsten die Einspeisung in das öffentliche Netz.

3.1 Anforderungen an den Akkumulator und dem Wechselrichter

Um die relativ hohen Investitionskosten zur Speicherung der elektrischen Energie in den Akkumulatoren auf ein Minimum zu begrenzen, ist es erforderlich, folgende Unterscheidungen bezogen auf die Auslegung des Speichers durchzuführen:

- Speicherbedarf (kWh) Tagesspeicher vs. Wochenspeicher ($T = 1$ Tag, $T = 7$ Tage)
- Speicherenergie der Akkumulatoren (kWh) unter Berücksichtigung der Ladezyklen
- Wechselrichterleistung (kW) zur Ladung und Entladung der Akkumulatoren
- Erfüllung von Netzdienstleistungen wie z.B. Spannungshaltung bzw. Leistungs-/Frequenzregelung

Der Einsatz und die Betriebsweise der Akkumulatoren als Wochenspeicher sind aufgrund der hohen Anschaffungskosten derzeit nicht sinnvoll. Somit ist es erstrebenswert, die Größe – i.S. eines Tagesspeichers – des elektrischen Speichers optimal auf die PV-Anlage und den Verbrauch abzustimmen.

3.2 Detaillierte Betrachtung des Konzepts

3.2.1 Lastmanagementsystem

Das Lastmanagementsystem benötigt folgende Informationen (Input- (I) bzw. Output-Signale (O)), um die elektrischen Verbraucher und den Wechselrichter zu steuern (siehe Abbildung 3):

- Ladezustand der Akkumulatoren (I_{Akku})
- Leistungsproduktion der PV-Anlage (I_{PV})
- Ansteuerung der einzelnen Schütze zur Prozesssteuerung (O_{Last})
- Benötigter Energieverbrauch für ausgewählte Prozesse (I_{Prozess})
- Ansteuerung des Wechselrichters (O_{WR}) zur Ladung des Akkumulators

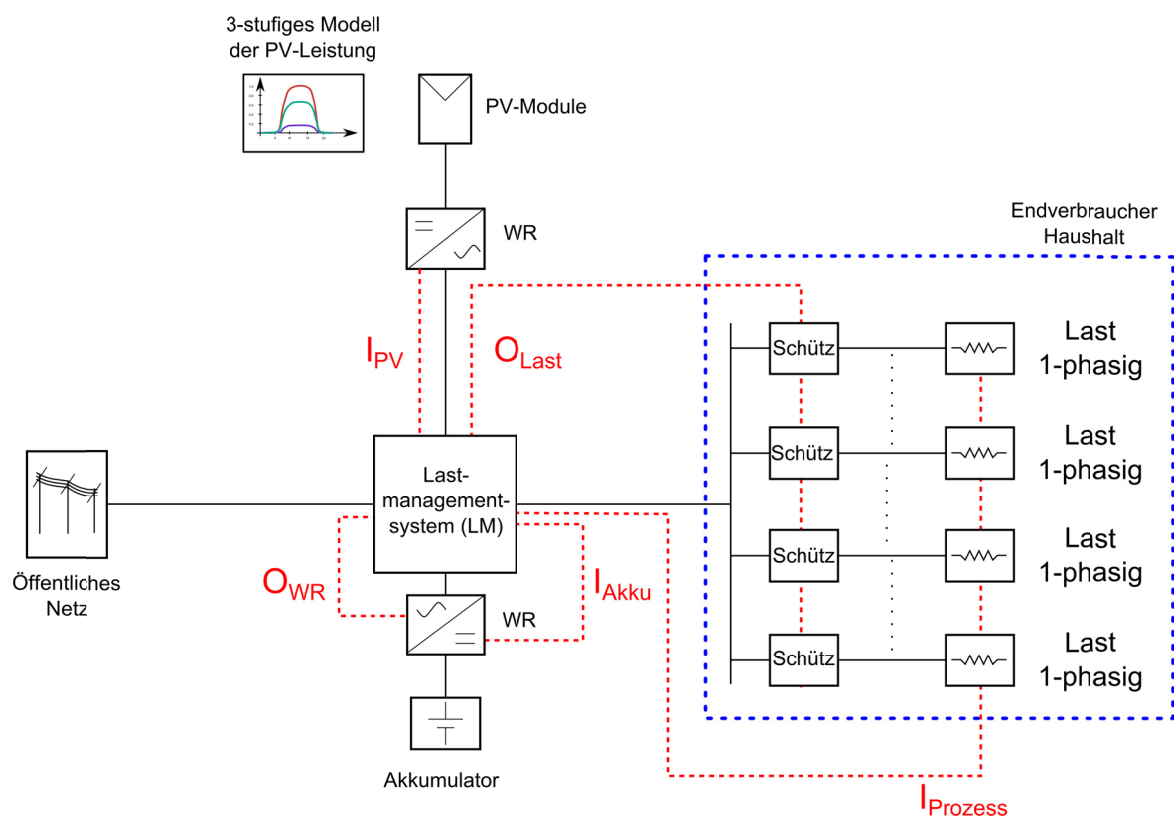


Abbildung 3 Detaillierte Darstellung des Konzepts mit Lastmanagementsystem (LM), PV-Anlage, Akkumulator, Lasten im Haushalt und dem öffentlichen Netz

3.2.2 Einfluss des Wetters auf die PV-Erzeugung

Durch die Verwendung eines dreistufigen Modells der PV-Leistung zur Reduzierung des Tageslastgangs der PV-Anlage mit den Stufen sonnig, wechselhaft und bedeckt/regnerisch ist es möglich, einzelne Prozesse unter Berücksichtigung der aktuellen PV-Leistung durchzuführen bzw. auf einen anderen Tag zu verschieben. Somit können bei sonnigen Tagen energieintensivere Endverbraucher wie z.B. Waschmaschine oder Bügeleisen betrieben werden.

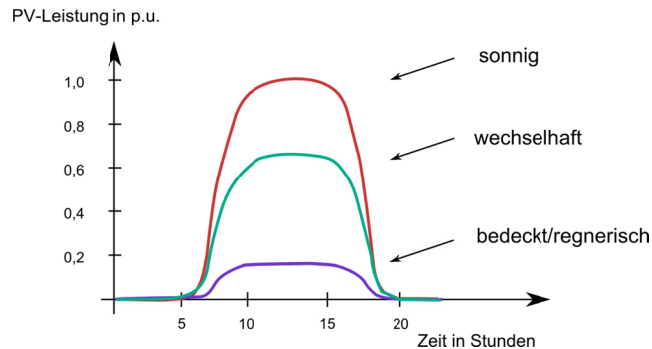


Abbildung 4 Tageslastgang der PV-Leistung mit drei Zuständen (sonnig, wechselhaft, bedeckt/regnerisch) [1]

3.2.3 Energieintensive Endverbraucher geeignet zur Lastverschiebung

Energieintensive Endverbraucher im Haushalt sind Wärme- bzw. Kälteprozesse und werden in Tabelle 1 zusammengefasst: [2]

Tabelle 1 Auflistung ausgewählter energieintensiver Endverbraucher im Haushalt

Wärmeprozesse	Kälteprozesse
<ul style="list-style-type: none"> • Waschmaschine • Warmwasseraufbereitung • Geschirrspüler • Bügeleisen • Elektroherd 	<ul style="list-style-type: none"> • Kühlschrank • Gefrierschrank • Klimaanlage

3.2.4 Auslegung des elektrischen Stromspeichers

Um die fluktuierende Erzeugung und den Verbrauch zu glätten, werden Stromspeicher eingesetzt. Für die Untersuchung dienen Akkumulatoren als Speicher mit einer Nennspannung U_{Batterie} von 12 V und einer Nennkapazität Q_{Batterie} von 105 Ah. Durch die Verschaltung von drei Akkumulatoren in Reihe ergibt sich eine Spannung von 48 V. Die Vergrößerung der Kapazität wird durch die Parallelschaltung von zwei weiteren in Reihe (Anzahl der Strings N_S) verschalteten Akkumulatoren erreicht. Somit ergibt sich eine gespeicherte Energie von 10 kWh – siehe Gleichung (2).

$$E_{\text{Batterie}} = N_S \cdot U_{\text{Batterie}} \cdot Q_{\text{Batterie}} = 2 \cdot 48 \text{ V} \cdot 105 \text{ Ah} = 10 \text{ kWh} \quad (2)$$

Um die Lebensdauer nicht unnötig zu verringern, wird die Entladetiefe auf 40% des max. Wertes angenommen. Dadurch ergibt sich eine nutzbare Energiemenge im Speicher von 6 kWh.

3.3 Untersuchungen bei maximaler Einspeisung der PV-Anlage

Es wurde mittels einer realen dezentralen Stromerzeugungsanlage (PV-Anlage) ein repräsentativer PV–Lastgang und ein Haushaltslastgang im Sinne eines Anwendungsbeispiels – 24-h-Zyklus – nachgebildet.

Die Messung der erzeugten Leistung aus der dezentralen Stromerzeugungsanlage (PV-Anlage) an einem sonnigen Tag erfolgt in Sekundenwerten durch ein geeignetes Leistungsmessgerät. In Tabelle 2 sind Leistung der gemessenen PV-Anlage, der Ein- und Ausschaltzeitpunkt bzw. die zugehörige Farbdarstellung (gemäß Abbildung 5) dargestellt.

Tabelle 2 Anschlussleistung der dezentralen Stromerzeugungsanlage (PV-Anlage) mit dem zugehörigen Ein- und Ausschaltzeitpunkt

Gerätetyp [-]	Anschlussleistung [W]	Einschaltzeitpunkt [hh:mm]	Ausschaltzeitpunkt [hh:mm]	Farbe [-]
PV-Anlage	5000	00:00	23:59	Grün

Die Anschlussleistungen der ausgewählten Endverbraucher, deren Ein- und Ausschaltzeit bzw. die Farbdarstellung (siehe Abbildung 5) sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Tabelle 3 Auflistung der Endverbraucher mit den zugehörigen Anschlussleistungen, Einschalt- und Ausschaltzeiten

Gerätetyp [-]	Anschlussleistung [W]	Einschaltzeitpunkt [hh:mm]; [hh:mm]	Ausschaltzeitpunkt [hh:mm];[hh:mm]	Farbe [-]
Fernseher	350	08:00	14:21	Braun
Waschmaschine	2000	14:30	15:26	Schwarz
Kaffeefullautomat	1200	07:00	07:02	Violett
Wasserkocher	2000	07:10; 07:30	07:11; 07:32	Rosa
E-Herd 1 (Kochfeld)	2500	12:15	12:29	Grau
E-Herd 2 (Kochfeld)	2500	11:38	12:15	Orange
E-Herd 3 (Backrohr)	2500	10:00	11:37	Rot
Kühlschrank	70	00:00	23:59	Blau
Kleinwasserspeicher	2000	13:00; 13:20	13:07; 13:27	Pink
Standby-Verbrauch	100	00:00	23:59	Cyan

Abbildung 5 zeigt den Tageslastgang der aufgezeichneten Endverbraucher und der erzeugten Leistung der PV-Anlage. Die erzeugte Leistung wird positiv angenommen und die verbrauchte Leistung als negativ (Erzeugerzählpfeilsystem). Die untersuchten Kleinwasserspeicher (1 und 2) besitzen eine Füllmenge von 5 Liter, der Wasserkocher 1 bzw. Wasserkocher 2 erhitzt eine Wassermenge von 300 ml bzw. 600 ml. Bei der ausgewählten Kaffeemaschine handelt es sich um einen Kaffeefullautomat, der eine Tasse Kaffee zubereitet. Um die Mittagszeit wird der Kochprozess im Backrohr (E-Herd 3) und an beiden Kochfeldern (E-Herd 2 und E-Herd 1) durchgeführt.

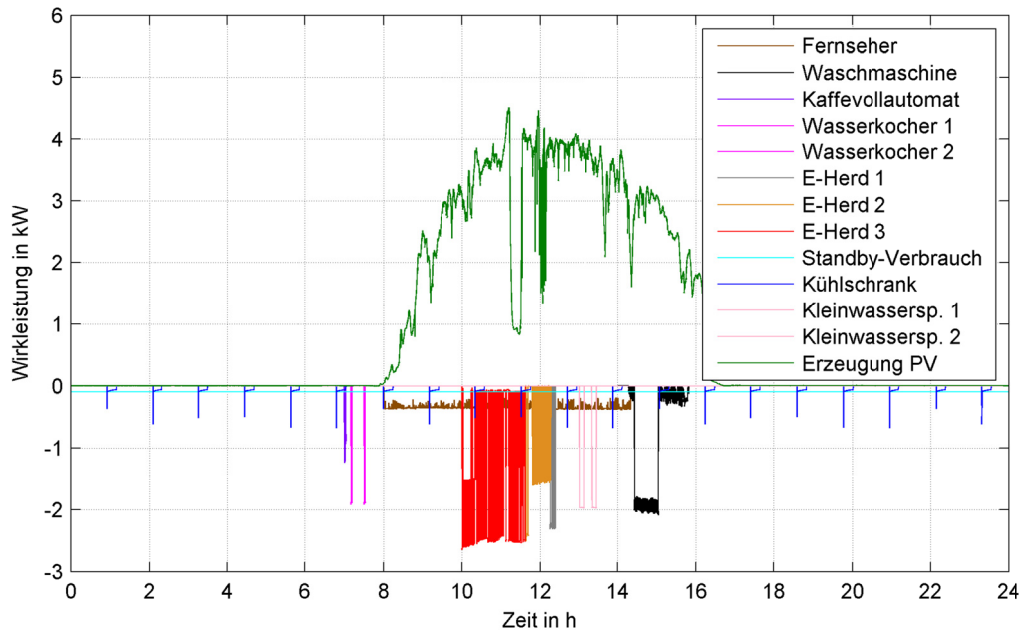


Abbildung 5 Tageslastgänge ausgewählter Verbraucher (Endverbraucher) und Erzeugung mittels PV-Anlage (5-kWp)

Die Subtraktion zwischen der Erzeugung $p_{\text{Erzeugung}}(t)$ (grüner Verlauf) und dem Verbrauch $p_{\text{Verbrauch}}(t)$ (blauer Verlauf) entspricht der Netzeinspeisung bzw. der Speichereinspeisung $p_{\text{Speicher}}(t)$ (schwarzer Verlauf) - siehe Abbildung 6.

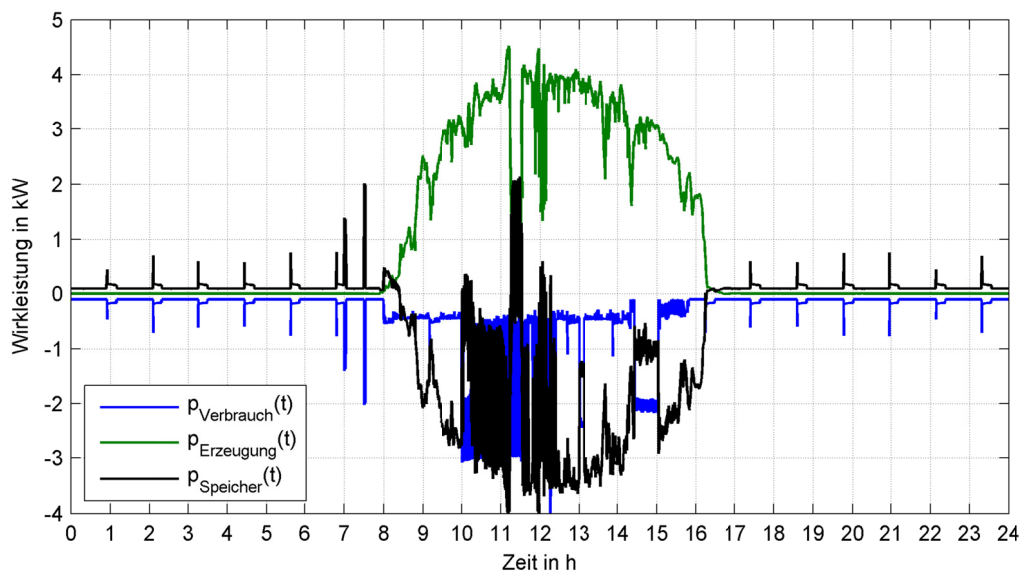


Abbildung 6 Tageslastgang der aufgezeichneten Endverbraucher $p_{\text{Verbrauch}}(t)$, die Erzeugung der PV-Anlage $p_{\text{Erzeugung}}(t)$ und der resultierende Lastgang (Entnahme, Speicherung) in den Akkumulatoren $p_{\text{Speicher}}(t)$

Die Aufsummierung der Sekundenwerte (Schrittweite $\Delta t=1s$) der aufgezeichneten verbrauchten Leistung $p_{\text{Verbrauch}}(t)$ und der erzeugten Leistung $p_{\text{Erzeugung}}(t)$ aus der PV-Anlage über 24 Stunden (86400 Sekunden) - siehe Gleichung (3) und (4) – ermöglicht die Berechnung des benötigten Speicherbedarfs $e_{\text{Speicher}}(t)$ (siehe Gleichung (5)).

$$e_{\text{Verbrauch}}(t) = \sum_{t=0}^{86400 \text{ s}} p_{\text{Verbrauch},t} \cdot \Delta t \quad (3)$$

$$e_{\text{Erzeugung}}(t) = \sum_{t=0}^{86400 \text{ s}} p_{\text{PV-Anlage},t} \cdot \Delta t \quad (4)$$

$$e_{\text{Speicher}}(t) = e_{\text{Verbrauch}}(t) - e_{\text{Erzeugung}}(t) \quad (5)$$

In Abbildung 7 ist die Arbeitssummenlinie der Erzeugung $e_{\text{Erzeugung}}(t)$, des Verbrauchs $e_{\text{Verbrauch}}(t)$ und der daraus resultierenden Speicherung $e_{\text{Speicher}}(t)$ dargestellt. Aus diesem Energieinhalt lässt sich auf die Akkumulatorenkapazität schließen, die erforderlich ist, um die überschüssige Energie zu speichern und eine Einspeisung in das öffentliche Netz zu verhindern. Alternativ dazu könnte selbstverständlich auch eine Zwischenspeicherung von Überschussenergie aus dem Netz sinnvoll sein (z.B. in Batterien von E-Autos für Energiemanagement). In den Nacht- und Morgenstunden entfällt die Erzeugung der PV-Anlage, somit muss die Energie aus dem Speichers entnommen werden. Daher besitzt der Speicher annahmegemäß zum Zeitpunkt $t=00:00$ Uhr einen Energieinhalt von 1 kWh. Die benötigte Energie, um den Haushalt zu versorgen, beträgt 9,2 kWh.

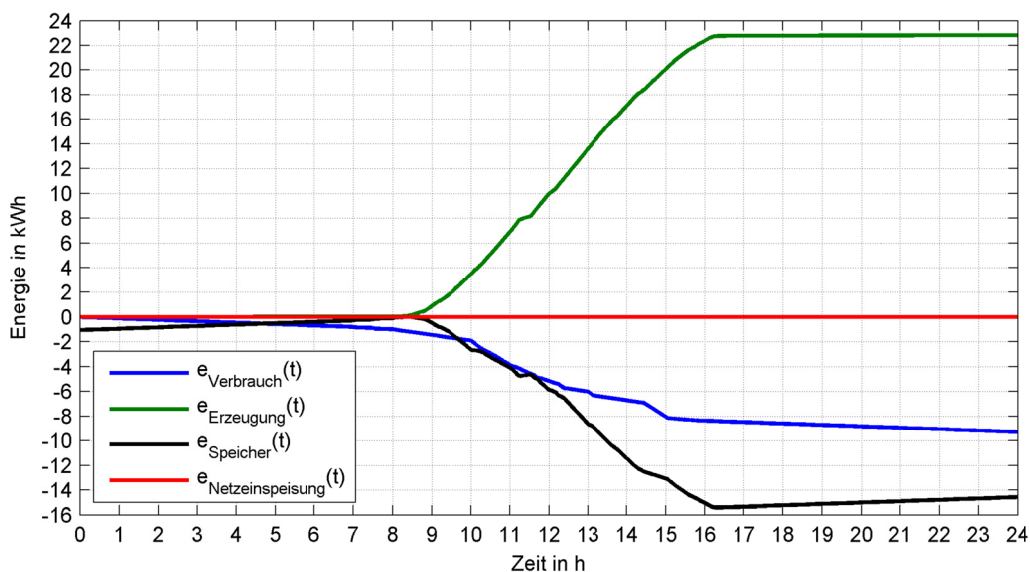


Abbildung 7 Arbeitssummenlinie zur Abschätzung des Speicherbedarfs

In der weiteren Betrachtung wird der maximal genützte elektrische Speicherinhalt der Akkumulatoren mit 6 kWh angenommen – siehe Abbildung 8. Der elektrische Speicher $e_{\text{Speicher}}(t)$ besitzt zu Beginn der Simulation bei $t=00:00$ Uhr einen Energieinhalt von 3 kWh (Startwert). Bis zum Zeitpunkt $t=08:21$ Uhr wird die Energie $e_{\text{Speicher}}(t)$ aus dem Speicher bezogen, um die Endverbraucher $e_{\text{Verbrauch}}(t)$ im Haushalt zu versorgen. Danach übersteigt die Energie $e_{\text{Erzeugung}}(t)$ aus der PV-Anlage jene des Verbrauchs $e_{\text{Verbrauch}}(t)$ und der elektrische Speicher $e_{\text{Speicher}}(t)$ wird wieder geladen. Zum Zeitpunkt $t=11:00$ Uhr ist der Speicher $e_{\text{Speicher}}(t)$ aufgeladen, somit wird die überschüssige Energie $e_{\text{Netzeinspeisung}}(t)$ in das öffentliche Netz eingespeist. Sobald die PV-Anlage $e_{\text{Erzeugung}}(t)$ keine Energie mehr erzeugt, zum Zeitpunkt $t=16:10$ Uhr, wird die benötigte Energie erneut aus dem elektrischen Speicher entnommen, um die Endverbraucher weiter zu versorgen.

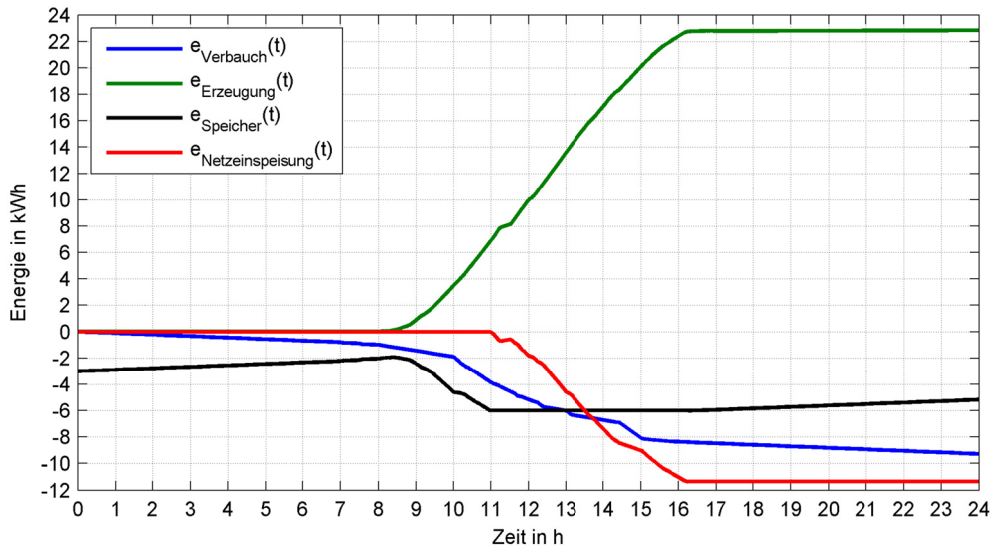


Abbildung 8 Arbeitssummenlinie bei vorhandenem elektrischem Speicher und einem vorgegebenen elektrischen Energieinhalt von 3 kWh (Startwert)

3.4 Untersuchung bei verringerter Erzeugung der PV-Anlage

Wird der Verbrauch (Tageslastgang) des Haushalts wie im vorherigen Beispiel angenommen und die erzeugte Leistung der PV-Anlage aufgrund des 3-stufigen Modell der PV-Leistung um die Hälfte reduziert ($P/P_N=0,5$ p.u.), wird keine Energie in das öffentliche Netz eingespeist (siehe Abbildung 9). Die erzeugte Energie der PV-Anlage reicht aus, um die vorhandenen Lasten im Haushalt zu versorgen. Die überschüssige Energie wird im Speicher zwischengespeichert und im Bedarfsfall für die Versorgung der Lasten erneut abgegeben. Am Ende des Tages (24:00 Uhr) besitzt der Speicher eine Energie von 5,1 kWh.

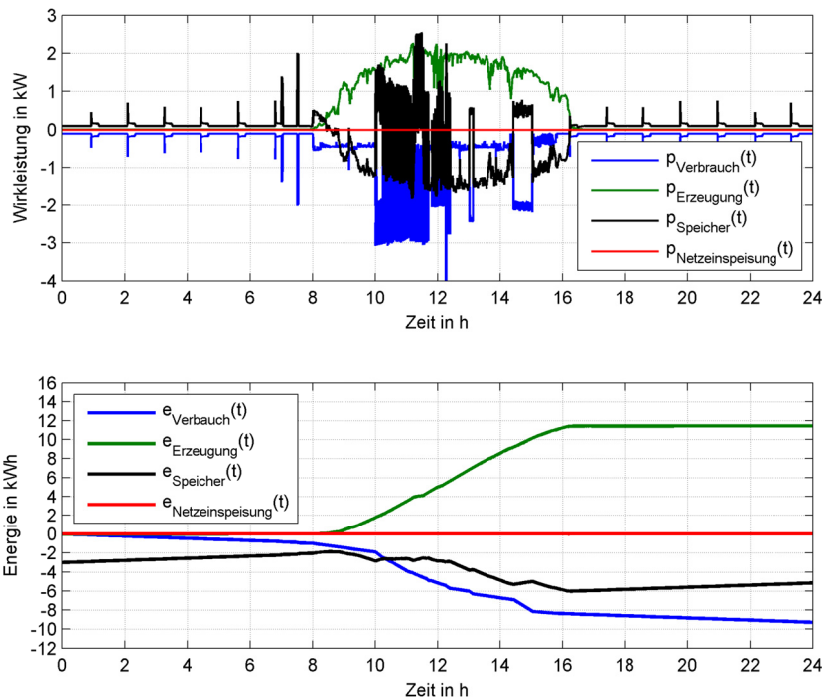


Abbildung 9 a) Verlauf der Erzeugung $p_{\text{Erzeugung}}(t)$ (PV-Anlage $P/P_N=0,5$ p.u.) bei konstantem Tageslastgang der Verbraucher $p_{\text{Verbrauch}}(t)$
 b) Arbeitssummenlinie des elektrischen Speichers $e_{\text{Speicher}}(t)$ bei konstantem Verbrauch $e_{\text{Verbrauch}}(t)$ und reduzierter PV-Einspeisung $e_{\text{Erzeugung}}(t)$ (PV-Anlage $P/P_N=0,5$ p.u.)

4 Zusammenfassung

Im Haushalts- und Gewerbebereich wird es in Zukunft im Wesentlichen durch die Weiterentwicklung elektrischer Haushaltsgeräte möglich sein, nachhaltig und ökonomisch sinnvoll Energie einzusparen.

Die zusätzliche Ausstattung einzelner Haushaltsgeräte mit Laststeuerungsfunktion ermöglicht es weiters zentrale Steuerungs- bzw. Regelungsaufgaben in Abhängigkeit vom Energiedargebot durch ein intelligentes Lastmanagementsystem durchzuführen und Prozesse auszuführen.

Die Einbindung eines elektrischen Speichers ermöglicht es, überschüssige Energie in Zeiten eines hohen Energiedargebots zu speichern und in Zeiten eines geringen Dargebots zur Verfügung zu stellen. Somit ist es möglich, Prozesse bzw. Endverbraucher zeitlich zu verschieben und erneuerbare Energiequellen erzeugungskonform und damit effizient zu nutzen.

Die Speicherung der überschüssigen Energie und Bereitstellung dieser in Zeiten eines geringen Energiedargebots kann – unter Einbeziehung von neuen Stromtarifmodellen – die Anwendung von elektrischen Stromspeichern im Haushaltsbereich wirtschaftlich attraktiv machen. Die Vorteile neu zu entwickelnder Geräte mit zentralem Lastmanagementsystem und einem zusätzlichen elektrischen Stromspeicher müssen für den Endkunden klar ersichtlich sein bzw. finanzielle Anreize bieten, um Energieeinsparen leistbar und zugleich komfortabel zu ermöglichen.

In diesem Beitrag wird gezeigt, dass bereits kleine Speicher und Lastmanagementsysteme ausreichen, um PV-Anlagen oder andere dezentrale Erzeugungseinheiten effizient und ressourcenschonend zu betreiben, wenn Sicherheitsbedenken hinsichtlich einer längerfristigen Überbrückung eines Ausfalls des vorgelagerten Netzes nur ein geringes Gewicht beigemessen wird. Derzeit sind jedoch die Anschaffungskosten von PV-Anlagen mit Akkumulatoren noch nicht wirtschaftlich.

5 Literaturquellen

[1] IEA: „Modelling Load Shifting Using Electric Vehicles in a Smart Grid Environment“, Working Paper, 2010

[2] Iskra, R.: „Der Stromverbrauch im Haushalt – Lastganganalyse und Leistungssparpotentiale“, TU Graz, 1994

[3] Schmautzer, Aigner, Fickert, Anaca: „Leistungseinsparpotentiale elektrischer Haushaltsgeräte durch den koordinierten Einsatz smarterer Technologie“, 7. Internationale Energiewirtschaftstagung, Wien, 2011