

Reduzierte Netzbelastung und optimierter Eigenverbrauch von dezentralen PV-Speichersystemen durch modellprädiktive Betriebsführung von Speichern

Benjamin Matthi, Jann Binder, Benjamin Schott
Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW)
Industriestraße 6, D-70565 Stuttgart, Tel.: 0711/7870-342, Fax: 0711/7870-230
benjamin.matthiss@zsw-bw.de, <http://www.zsw-bw.de>

Abstract Bei einer hohen Dichte von PV-Anlagen am Niederspannungsnetz ist die Reduktion der Spitzeneinspeisung ein Weg, um die Spannungshaltung zu gewährleisten. Durch den Einsatz lokaler Energiespeicher mit geeigneten Ladealgorithmen ist es möglich die Verluste durch Abregelung zu minimieren und gleichzeitig den Eigenverbrauch zu optimieren. Um den Einfluss verschiedener Energiemanagementverfahren auf den Eigenverbrauch und die Netzbelastung darzustellen werden hier Jahresimulation der PV Strom Erzeugung einerseits und des Wärme- und Elektrizitätsbedarf andererseits analysiert. Zur Bewertung der erreichbaren Netzentlastung und dem resultierenden Eigenverbrauch wurden Szenarien mit Einspeisebegrenzung von 25% sowie 50% der installierten PV-Anlagenleistung betrachtet. Im Ergebnis reduziert die modellprädiktive Regelung der Batterie den Anteil der notwendigen Abregelung signifikant, ohne den Eigenverbrauch wesentlich einzuschränken.

1. Einleitung

Im Zuge der Energiewende ist mit einem weiteren Ausbau von erneuerbaren Energien zu rechnen. Eine Sonderstellung im Bereich der regenerativen Energien nimmt hierbei die Photovoltaik ein, da rund 80% der PV-Anlagen ihren Netzanschlusspunkt am Niederspannungsnetz haben. Hierdurch ist der Einfluss auf die Spannungsqualität durch die Einspeisung solar erzeugter Energie besonders groß. Zudem weist die Erzeugung aufgrund der Wetterabhängigkeit eine hohe gleichzeitigkeit auf, was zu einer erhöhten Netzbelastung führen kann. Der Einsatz lokaler Energiespeicher bietet die Möglichkeit, die Netzeinspeiseleistung zu reduzieren und gleichzeitig den Eigenverbrauch zu optimieren [1,2]. Um auch unter Berücksichtigung einer vorgegebenen Einspeisebegrenzung einen hohen Eigenverbrauchsanteil zu realisieren ist allerdings eine zielführende und effektive Betriebsführung notwendig, welche die Betriebsgrenzen der Komponenten als auch das Netzeinspeiselimit berücksichtigt.

2. Systemaufbau und Simulation

Das in dieser Untersuchung betrachtete System basiert auf einem Einfamilienhaus mit 140 m² Wohnfläche, welches mit einer 4,5 kWp PV-Anlage und einem Batteriespeicher ausgestattet ist. Die Wärmeversorgung für Heizung und Warmwasser erfolgt über eine luftgespeiste Wärmepumpe. Zum zwischenspeichern der erzeugten Wärmeenergie wird ein verlustbehafteter Warmwassertank verwendet. Der Heizbedarf des Wohngebäudes wurde auf der Grundlage der Energie-Einsparverordnung berechnet [3]. Hierbei wird von einer Normheizlast des Wohnhauses von 4 kW bei -12 °C ausgegangen und die Soll-Innentemperatur beträgt 20 °C. Die solaren Wärmegevinne des Gebäudes wurden anhand von Vergleichsrechnungen mit der Simulationssoftware EVA2010 [4] kalibriert.

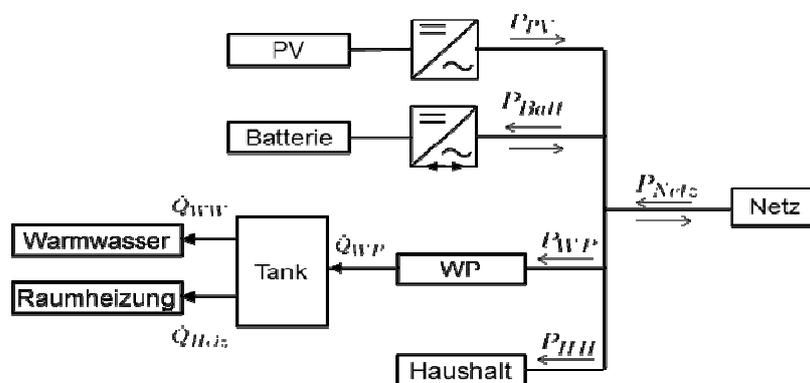


Abbildung 1: Aufbau des Systems mit den jeweiligen Komponenten und den entsprechenden Leistungsflüssen.

Die zur Simulation verwendeten Lastprofile für den Energiebedarf des Haushalts und den Warmwasserbedarfs stammen aus einem verhaltensbasierten Lastprofilgenerator [5]. Der Jahresbedarf an elektrischer Energie wurde hierbei auf 4500 kWh normiert und Energieverbrauch für Warmwasser auf einen Jahresbedarf von 12.5 kWh pro m² Wohnfläche. Die Daten für die solare Stromerzeugung stammen aus Wechselrichteraufzeichnungen von einem Testsystem in der Nähe von Stuttgart.

3. Modellprädiktive Regelung

In Abbildung 2 ist der grundsätzliche Ablauf der Betriebsführung durch die modellprädiktive Regelung (MPC) skizziert. Zunächst werden auf Basis vergangener Messwerter Vorhersagen für die lokale Erzeugung und den Verbrauch berechnet. Hierzu wird ein selbstlernendes Modell verwendet, wodurch ein offline Training entfällt. Auf Grundlage dieser Vorhersagen werden in Bezug auf bestimmte Kriterien optimale Trajektorien für den Batterieladezustand und den Wärmepumpenbetrieb

berechnet [6]. Als Optimierungskriterien wurden hier die Minimierung der erforderlichen Abregelung und Maximierung des Eigenverbrauchs gewählt. Zusätzlich werden entsprechende Randbedingungen für den Betrieb der Wärmepumpe oder des Batterieladerichters berücksichtigt. Die Ergebnisse der Optimierung werden als Sollwertvorgabe an untergeordnete Regler weitergegeben, welche die Steuerung der jeweiligen Komponenten übernehmen.

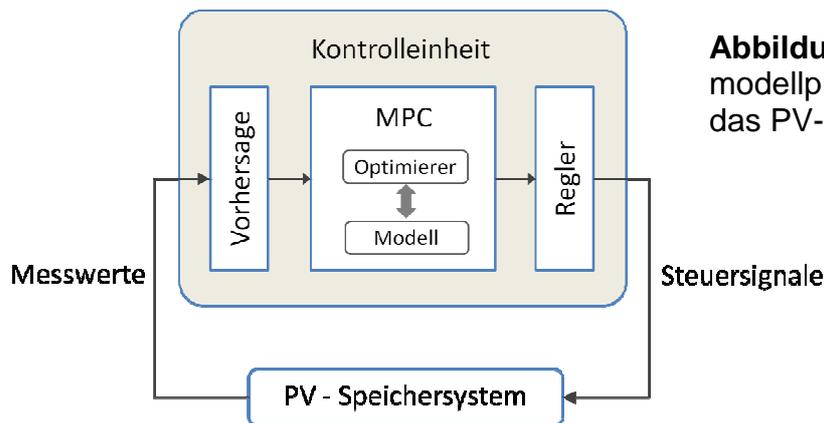


Abbildung 2 Ablaufskizze der modellprädiktiven Regelung für das PV-Batteriesystem.

4. Batterieladeverfahren

Um die Auswirkung der Batterieladestrategie auf den Eigenverbrauch und die Abregelung zu untersuchen wurden neben der modellprädiktiven Regelung weitere Ladealgorithmen implementiert. Diese beinhalten unter Anderem die (1) frühestmögliche Ladung der Batterie, (2) das linear verzögerte Laden und (3) das Peak Shaving. Die reguläre Betriebsweise von PV-Speichersystemen ist das direkte Laden der Batterie (siehe Abbildung 3). Dies führt zu einem hohen Eigenverbrauch, da die Batterie geladen wird, sobald die lokale PV-Erzeugung den Verbrauch übersteigt. Gleichzeitig führt diese Strategie zu hohen Einspeisespitzen sobald die Batterie voll geladen ist. Das linear verzögerte Laden basiert im Grundsatz auf der Vorgabe eines maximalen Ladezustands, welcher linear über den Tag ansteigt. Hierdurch werden Einspeisespitzen gedämpft und so das Netz entlastet. Beim netzoptimalen Betrieb (Peak Shaving) wird die Batterie nur dann geladen, wenn das Netzeinspeiselimit überschritten wird. Hierdurch steht die gesamte Batteriekapazität zum Zwischenspeichern der Einspeisespitzen zur Verfügung. In der Auswertung wird angenommen, dass die lokal erzeugte Energie, welche zu einer Überschreitung des Einspeiselimits führen würde, abgeregelt werden muss.

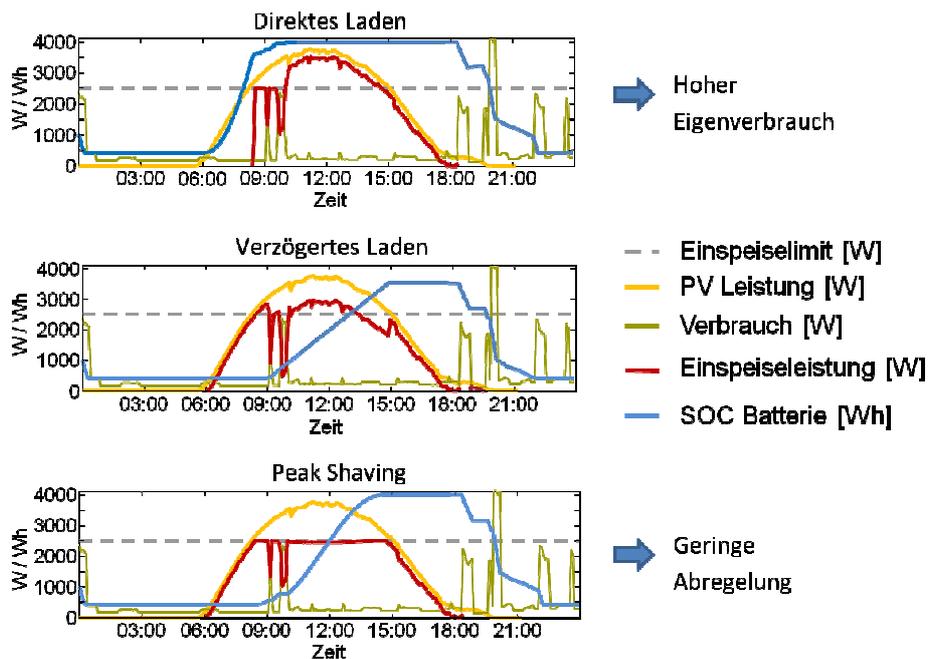


Abbildung 3 Schematische Darstellung der verschiedenen Batterieladeverfahren. Das direkte Laden der Batterie resultiert in einem hohen Eigenverbrauch. Das Peak-Shaving minimiert hingegen die nötige Abregelung.

5. Ergebnisse

Um den Einfluss verschiedener Energiemanagement-Verfahren auf den Eigenverbrauch und die Netzbelastung darzustellen, wurden Jahressimulationen für ein PV-System mit 4,5 kWp und verschiedenen Batteriespeichergrößen und Netzeinspeiselimits durchgeführt.

In Abbildung 4 ist der Verlauf des Eigenverbrauchs und der Abregelung normiert auf den PV-Jahresertrag dargestellt. Das Einspeiselimite beträgt in diesem Fall 25 % der PV-Nennleistung (Wp) und die Batteriegröße 4,5 kWh. Hierbei wird die Wärmepumpe bei den ersten fünf Verfahren über einen Zweipunktregler geregelt und bei den letzten beiden durch den MPC. Das direkte Laden der Batterie resultiert in einem hohen Eigenverbrauch, führt zusätzlich jedoch auch zu einer hohen Abregelung. Der Peak Shaving Algorithmus minimiert die durch die Abregelung entstehenden Verluste, gleichzeitig verringert sich jedoch der Eigenverbrauch aufgrund der vorrangigen Netzeinspeisung. Wird die Batterieladeregulation durch den MPC gesteuert, die Wärmepumpe jedoch traditionell durch einen Zweipunktregler, reduziert sich die Abregelung um 8,5 Prozentpunkte im Vergleich zum direkten Laden, wobei der Eigenverbrauch um nur 1,4 Prozentpunkte abnimmt. Bei zusätzlicher Steuerung der Wärmepumpe durch den MPC erhöht sich der Eigenverbrauch weiter auf ca. 70 % und die Verluste durch Abregelung verringern

sich von 8 % auf ca. 2 %. Stellt man dem MPC zusätzlich perfekte Vorhersagen der Last und des Wetters zur Verfügung, so verringert sich die Abregelung abermals auf rund 1 %.

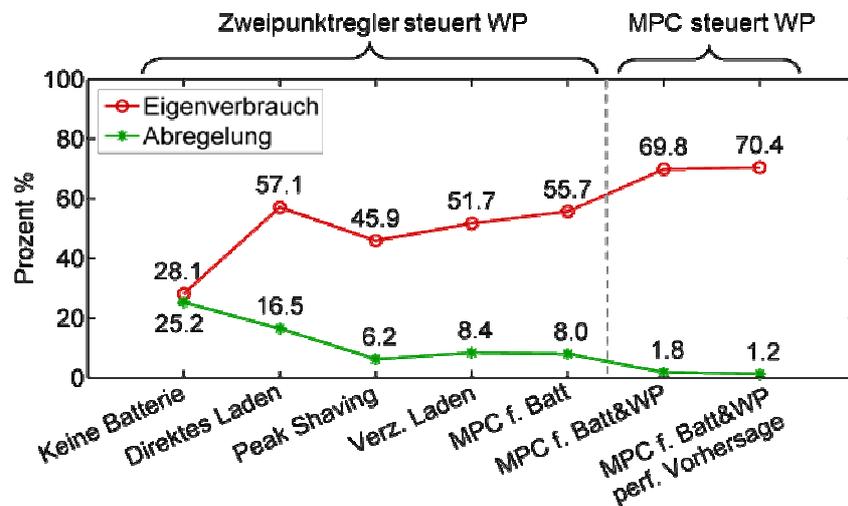


Abbildung 4 Verlauf des Eigenverbrauchs und der nötigen Abregelung normiert auf den PV-Jahresertrag. Das Einspeiselimit beträgt hierbei 25 % PVp und die Batteriegröße 4,5 kWh.

Die Auswirkungen der verschiedenen Betriebsführungsalgorithmen auf das Netzeinspeiseverhalten ist anhand der Einspeisedauerlinie in Abbildung 5 links zu erkennen. Das direkte Laden der Batterie verringert zwar die eingespeiste Energiemenge, der Anteil der Energie über dem Einspeiselimit ist jedoch weiterhin hoch. Durch die modellprädiktive Regelung der Batterieladung und der Wärmepumpe reduziert sich einerseits die eingespeiste Energiemenge über dem Einspeiselimit, was sich auch durch die geringen Verluste durch Abregelung in Abbildung 4 zeigt. Andererseits wird zusätzlich die eingespeiste Energie unter dem Einspeiselimit verringert, was einen hohen Eigenverbrauch zur Folge hat.

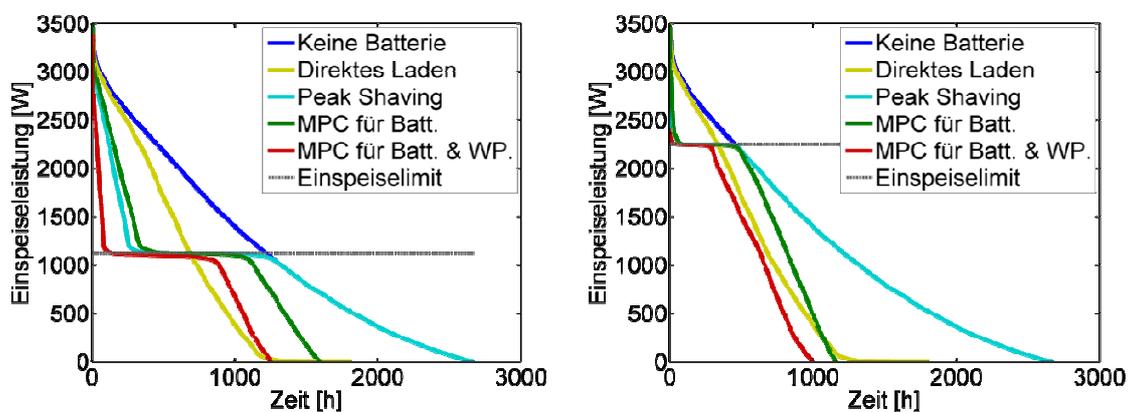


Abbildung 5 Die Einspeisedauerlinien für die Szenarien Netzeinspeiselimit 25 % der PV Nennleistung (links) und 50 % der PV-Nennleistung (rechts).

In Abbildung 6 ist die Entwicklung des Eigenverbrauchs und der Abregelung über die Batteriekapazität aufgetragen. Durch die modellprädiktive Betriebsführung lässt sich bei allen Systemen, sowohl mit als auch ohne Wärmepumpe, die abzuregelnde Energiemenge verringern. Hierbei bleibt der Eigenverbrauch hoch oder wird durch das Regeln der Wärmepumpe sogar leicht gesteigert. Besonders effektiv ist der Algorithmus bei kleinen Speichergrößen und starker Limitierung der Netzeinspeiseleistung. Zusätzlich können durch die modellprädiktive Regelung weitere Anreizsignale, wie zum Beispiel der Strompreis, leicht berücksichtigt werden.

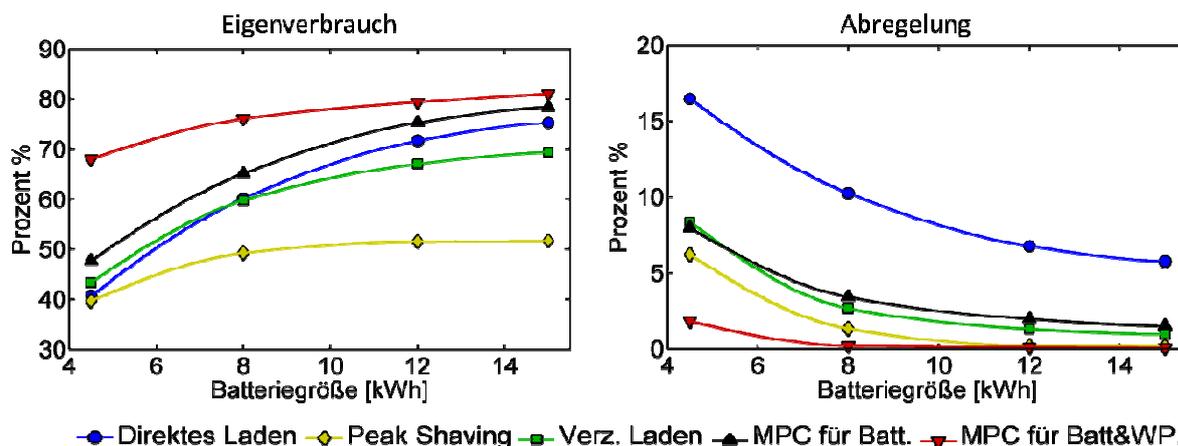


Abbildung 6 Verlauf der Verluste durch Abregelung und des Eigenverbrauchs über verschiedene BatteriegroÙen und Algorithmen für ein PV-Batteriesystem mit Wärmepumpe und einem Einspeiselimit von 25 % PVp.

Die Autoren bedanken sich für die Förderung der Arbeiten durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit unter dem Förderkennzeichen FKZ 0325385.

Literatur

- [1] Jann Binder and Tobias Kelm, "Dezentrale Photovoltaik: Autonomie, Eigenverbrauch und Netzentlastung durch lokale Strom- und Wärmespeicher," in *27. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein*, 2012.
- [2] Christopher Williams, Jann Binder, Michael Danzer, Frank Sehnke, and Martin Felder, "Battery charge control schemes for increased grid compatibility of decentralized PV Systems," in *28th European Photovoltaic Solar Energy Conference (PVSEC)*, 2013.
- [3] *EnEV: Energie-Einsparverordnung. Leitfaden für Wohngebäude.*
- [4] Ingenieurbüro Leuchter, *EVA2010-Energieberaterin*. Available: <http://www.leuchter.de/>.
- [5] N. Pflugradt and B. Platzer, "Behavior based load profile generator for domestic hot water and electricity use," *InnoStock, 12th International Conference on Energy*, 2012.
- [6] R. Dittmar and B.-M. Pfeiffer, *Modellbasierte prädiktive Regelung: Eine Einführung für Ingenieure*. München: Oldenbourg, 2004.