

Das Potential der Laststeuerung in Photovoltaik-Diesel-Systemen

Evandro Dresch, Christian Brosig, Eberhard Waffenschmidt
Technische Hochschule Köln - Betzdorfer Str. 2, 50679 Köln
Tel.: +49 22/8275 2756 evandro.dresch@th-koeln.de www.th-koeln.de

1. Einleitung und Problemstellung

PV-Anlagen eignen sich insbesondere für die Stromversorgung von netzfernen Regionen. Noch heute wird der größte Teil von netzfernen Anlagen jedoch mit Dieselgeneratoren versorgt. Die Nachrüstung von Dieselnetzen mit erneuerbaren Energien, vor allem PV, wird immer geläufiger [1]. Die Hybridisierung eines Dieselsystems mit fluktuierenden Energiequellen ist aber mit komplexen technischen Herausforderungen verbunden, vor allem wenn eine hohe PV-Eindringung erreicht werden soll. Um die Netzstabilität und die Versorgungssicherheit sicherzustellen, müssen diese Probleme bewältigt werden. Dieselgeneratoren laufen zum Beispiel unter bestimmten Bedingungen sehr ineffizient, vor allem bei Auslastungen unter 50% der Nennleistung oder bei zu hohen Auslastungen. Geringe Auslastungen führen bei gewöhnlichen Motoren zu einer vorzeitigen Alterung und auch zu einer Erhöhung der Emissionen [2]. In Systemen mit einer hohen PV-Eindringung ist dies sehr problematisch, da der Dieselgenerator immer in der Lage sein muss, kurzfristige Fluktuationen der PV-Einspeisung auszugleichen. In solchen Fällen müsste der Dieselgenerator auch unter geringen Auslastungen noch betrieben werden, um genügende Reserveleistung bereitzustellen. Um dies zu vermeiden, wird vor allem bei Anlagen ohne Batterien die Einspeisung der PV-Anlage üblicherweise gekappt. Das ist das Prinzip hinter der sogenannten *Fuel-Save-Technologie*. Insbesondere bei PV-Diesel-Systemen ohne Batterien bietet allerdings auch die Laststeuerung eine mögliche Lösung für die Maximierung der Nutzung von Solarenergie und für die Sicherstellung der Netzstabilität. Daher befasst sich diese Arbeit mit der Entwicklung eines Algorithmus, der Stromverbraucher abhängig von der Auslastung des Dieselgenerators und mit möglichst geringen Auswirkungen auf das Nutzerverhalten an- bzw. abschaltet.

2. Lastverschiebung und –Steuerung bei PV-Diesel-Systemen – Stand der Forschung

Die Anwendung von Lastverschiebung und –Steuerung in PV-Diesel-Systemen wurde bereits in anderen Arbeiten untersucht. Die Arbeit von Sichilalu and Xia [3] untersucht die Steuerung von Wärmepumpen zur Warmwasseraufbereitung in netzverbundenen PV-Diesel-Systemen mit Batterien. Die Wärmepumpe wird in Spitzbedarfszeiten mit der in der Batterie gespeicherten Energie betrieben. Somit unterscheidet sich diese Arbeit grundsätzlich vom zu

hier untersuchenden Algorithmus. Eine weitere Untersuchung von Kallel et.al [4] ist dagegen ähnlicher und behandelt ein System für die Laststeuerung in netzfernen Hybridsystemen zur Stromversorgung von Haushalten. Dabei wird der Leistungsfluss optimal kompensiert, um die Größe der Systemkomponenten, den Kraftstoffverbrauch und Emissionen zu minimieren, und auch die Batterie möglichst zu schonen. Der Algorithmus baut sich auf gespeichertem Verbrauchsverhalten der Haushalte, vorhandene PV-Leistung und auf den Ladezustand einer Batterie auf. Der Dieselgenerator wird nur als Zusatzstromgenerator eingesetzt und somit ist der Anteil an Dieselstrom nur ca. 5%. Die hier vorgestellte Arbeit geht von anderen Randbedingungen aus, da das System über keine Batterien verfügt und die Laststeuerung für den effizienten Betrieb des Dieselgenerators eingesetzt wird. Weitere Arbeiten untersuchen andere Vorgehensweisen, um das Nutzerverhalten vorherzusagen, wie eine Monte Carlo Simulation [4], oder ein *Advanced Metering Infrastructure* [5]. Beide analysierten Systeme verfügen ebenfalls über Energiespeicher. Die Arbeit von Elamari [6] analysiert dagegen ein einfacheres System mit nur einer PV-Anlage und einem Dieselgenerator. Dabei werden frequenzgesteuerte elektrische Warmwasseraufbereitungssysteme als steuerbare Lasten untersucht. Die Arbeit zeigt wie die Netzfrequenz in einem PV-Diesel-System mithilfe einer einfachen Laststeuerung konstant gehalten werden kann. Hier soll ein ähnlicher Algorithmus vorgestellt werden, der jedoch gewöhnliche Haushaltslastprofile verwendet, um Entscheidungen bezüglich der An- und Abschaltung der Stromverbraucher zu treffen. Ziel dabei ist es, den Dieselgenerator in einem möglichst effizienten und schonenden Betriebsbereich zu halten und trotzdem nur Geräte abschalten, die eine geringe subjektive Wertigkeit für die Haushaltsbewohner haben.

3. Simulation

Der hier vorgestellte Algorithmus zur Laststeuerung wurde in einer MATLAB-Umgebung entwickelt, um später in ein umfassendes Simulink-Tool zur Simulation von PV-Diesel-Systemen implementiert zu werden. In dieser Arbeit wurden wie in [4] auch Haushaltslasten betrachtet. Als Datenquelle für die hochaufgelösten Lastprofile wurde das Tool *LoadProfileGenerator* von Noah Pflugradt benutzt [7]. Hierfür wurden mit diesem Tool 25 verschiedene Haushalte simuliert, mit insgesamt 108 verschiedenen Gerätetypen und 1737 einzelnen Verbrauchern. Für das PV-Profil wurden Messdaten einer 4.51 kWp-Anlage verwendet [8], die für verschiedene Berechnungsfälle hochskaliert wurde. Daten zum Dieselverbrauch des Generators wurden von Datenblättern entnommen [9]. Die Daten zum Nutzerverhalten der Hausbewohner und Wertigkeit für die einzelnen Gerätetypen wurden von [8] übernommen, dabei variiert die Wertigkeit zwischen 5 (Geräte mit einer hohen Priorität) und 1 (geringe Priorität bzw. Wertigkeit). Das Ziel dieser Simulation ist ein Algorithmus zu

entwickeln, der in der Lage ist, Lasten an- und abzuschalten, je nach Betriebsbedingung des Dieselgenerators und subjektiver Wertigkeit für die Bewohner. Dabei kann auch die **Suffizienz-Kenngröße S_k** bewertet werden [8]. Die S_k ist ein Maß, die bestimmen kann, wie gut die Hausbewohner mit den vom jeweiligen Energiesystem gegebenen Rahmenbedingungen auskommen. Sie kann also auch als qualitativer Autarkiegrad bezeichnet werden. Eine S_k von 100% somit ein Maß für ein perfektes autarkes System ohne jeglichen Verzicht. Dieser Algorithmus kann für die Simulation weiterer Anwendungsfälle implementiert werden, dabei sind aufgelöste Lastprofile und Prioritäten für die Stromverbraucher notwendig. Die Nutzung der hier beschriebenen Daten dient zur Überprüfung der Funktionsweise des Algorithmus. Hierbei wurden jeweils ein Sommer- und ein Wintermonat bei einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten untersucht. Der Algorithmus überprüft bei jedem Simulationsschritt die gegebene Auslastung des Dieselgenerators. Liegt diese in einem ungünstigen Bereich (unter 50% oder über 90% der Nennleistung), so wird das aktuelle Lastprofil aller Haushalte untersucht und Geräte werden vom Algorithmus je nach Nutzerpriorität nach einem Zufallsprinzip an- bzw. abgeschaltet.

4. Ergebnisse und Diskussion

Die folgenden Diagramme in Abbildung 1 zeigen die jeweiligen PV- und Lastprofile (ohne jegliche Verschiebung) für jeweils zwei Wochen der untersuchten Monate. Als Vergleichssystem für die weiteren Berechnungen wird eine Anlage mit einem 20 kW Dieselgenerator (Prime Power) [9] und eine PV-Anlage mit 45.1 kWp verwendet.

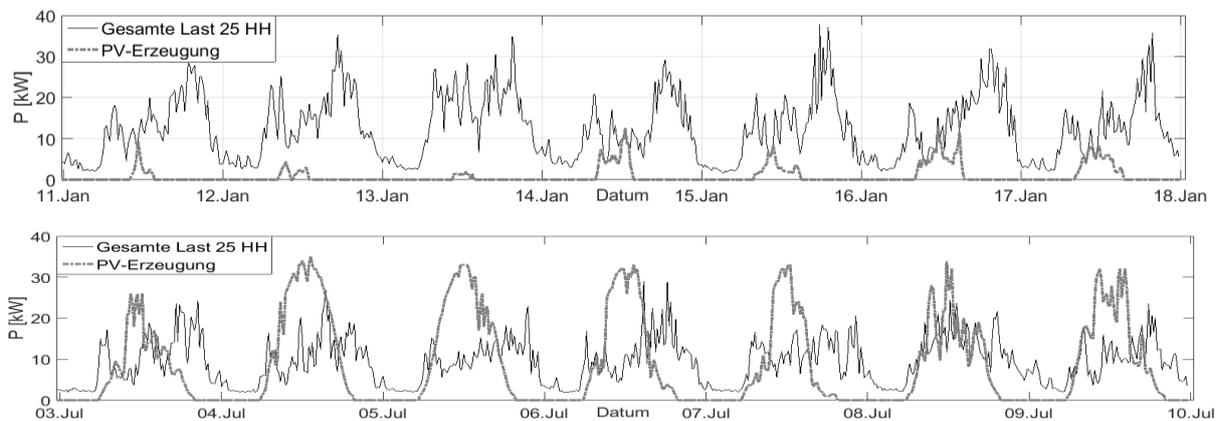


Abbildung 1 - PV- und Lastprofile für zwei Wochen im Winter- (oben) bzw. Sommermonat

Die folgenden Auslastungen des Dieselgenerators in Abbildung 2 wurden für die obigen Beispielwochen vor und nach Implementierung der Laststeuerung berechnet:

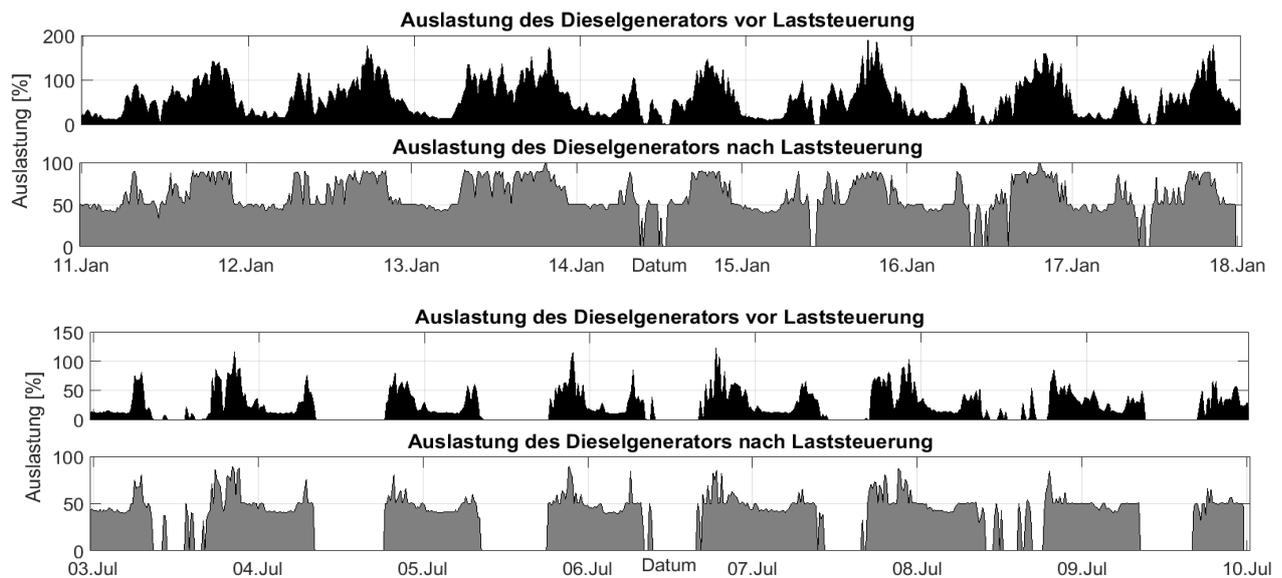


Abbildung 2 - Auslastung des Dieselgenerators – Ohne/Mit Laststeuerung, oben: Wintermonat

Im Wintermonat läuft der Dieselgenerator vor der Laststeuerung aufgrund der häufigen Lastspitzen oft überlastet. Bestimmte Verbraucher müssen daher öfters abgeschaltet werden, vor allem in den Abendstunden. Durch die niedrige Einspeisung der PV-Anlage ändert sich der Betrieb des Dieselgenerators in den Tagesstunden nicht sonderlich viel. Vor allem in den Nachtstunden muss der Generator jedoch bei sehr niedrigen Auslastungen laufen und somit müssten sehr viele Stromverbraucher eingeschaltet werden, um eine Mindestauslastung von 50% zu gewährleisten. Diese wären eigentliche *Dump Loads*, im Optimalfall Heizelemente, die den Strom als Wärme oder Warmwasser speichern. Nichtsdestotrotz müsste in diesem Fall das Nutzerverhalten der Haushaltsbewohner angepasst werden, um den Dieselgenerator optimal auszulasten. Im Falle des Sommermonates wird ein großer Teil der Lasten in den Tagesstunden durch die PV abgedeckt und der Dieselgenerator kann oft heruntergefahren werden. Die PV-Anlage muss jedoch auch oft abgeregelt werden. Trotzdem bleibt das Problem der geringen Auslastungen in den Nachtstunden bestehen. Nach Implementierung einer Laststeuerung wird der Generator zwar besser ausgelastet, aber dafür müssten wieder etliche Verbraucher der Haushalte in der Nacht eingeschaltet werden.

In solchen Fällen wären eigentlich zwei Dieselgeneratoren notwendig. Ein Generator würde die Grundlast abdecken, während der zweite nur Spitzlasten übernehmen würde. Die folgenden Graphen zeigen die Anzahl notwendiger Abschaltungen in den zwei untersuchten Monaten abhängig von der Größe der PV-Anlage. Die Abschaltungen sind für alle Geräte gleich lang (15 Minuten). In der Simulation wird im nächsten Zeitschritt das Lastprofil jedoch erneut untersucht und somit können Lasten mit niedriger Priorität auch über mehrere Stunden abgeschaltet bleiben:

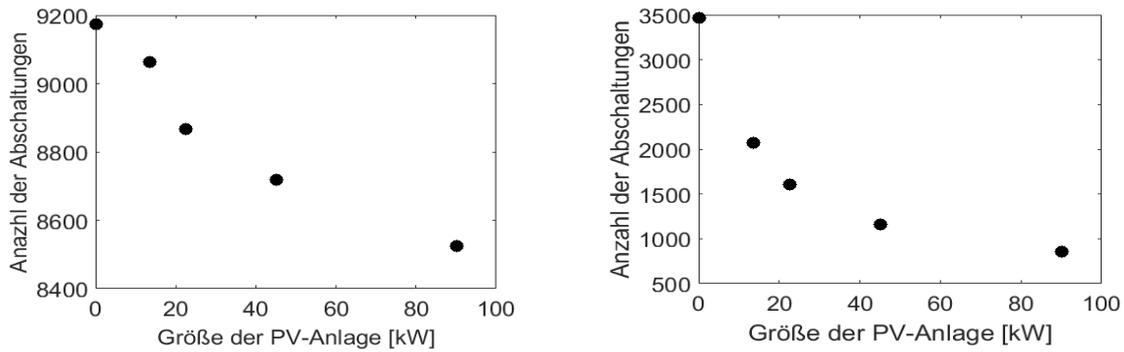


Abbildung 3 - Anzahl der Abschaltungen von Verbrauchern im Wintermonat (links) und Sommermonat (rechts) je nach Größe der PV-Anlage. Jede Abschaltung erfolgt für eine Zeitdauer von 15 Minuten

Die Größe der PV-Anlage beeinflusst nur gering die Anzahl der notwendigen Abschaltungen, vor allem im Wintermonat. Darüber hinaus wäre eine Anlage größer als 45 kWp in diesem Fall unwirtschaftlich, da ein großer Teil des erzeugten Stroms abgeregelt werden müsste. Auch verringert sich der Dieserverbrauch bei einer Erhöhung der PV-Anlagegröße nur gering. Ist keine PV-Anlage installiert, so ist der gesamte Dieserverbrauch für den Monat ca. 2300 l. Bei 90 kWp liegt der gesamte Verbrauch bei ca. 1900 l. Durch die Implementierung der Laststeuerung und somit Einschaltungen von Geräten in den Nachtstunden erhöht sich der Dieserverbrauch um ca. 50%. Im Sommermonat ist die gesamte Anzahl der notwendigen Abschaltungen aufgrund der größeren PV-Einspeisung und auch des geringeren Stromverbrauchs fast ein Drittel weniger als im Wintermonat. Auch hier liegt der Dieserverbrauch zwischen 1900 l bei einer PV-Anlage von 90 kWp und 2400 l bei einer reinen Dieselanlage.

Die Anzahl der notwendigen Einschaltvorgänge, um den Dieselgenerator genug auszulasten ist in beiden Monaten sehr hoch. Diese Betriebsweise stellt sich als unrealistisch dar. Hier wird deutlich, dass die Stromversorgung der 25 Haushalte durch ein PV-Dieselsystem nur mit komplexeren Auslegungen implementiert werden kann. Es sind entweder Batterien notwendig, oder die Anzahl von Generatoren muss erhöht werden.

Somit liegt in diesem Beispiel das Potenzial von einer Laststeuerung vielmehr bei der Vermeidung einer Überlastung des Dieselgenerators. Wie die Abbildung 4 für den

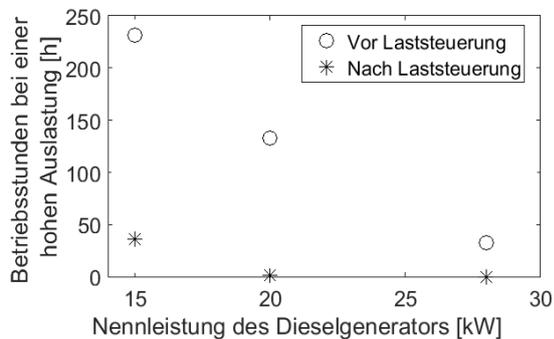


Abbildung 4 – Betriebsstunden bei einer hohen Auslastung je nach Größe des Dieselgenerators

Wintermonat zeigt, kann die Anzahl der Betriebsstunden bei Überlastung je nach Größe des Dieselgenerators mit einer intelligenten Laststeuerung deutlich reduziert werden. Dabei sind im gegebenen Fall die Abschaltungen für die Haushaltsbewohner nicht sehr problematisch, da nur selten müssen Geräte abgeschaltet werden, die eine hohe Wertigkeit für den Nutzer haben. Im Wintermonat

müssten z.B. je nach Größe der PV-Anlage für den **gesamten Monat** zwischen 259 und 280 Abschaltvorgänge von Verbrauchern mit einer höheren Priorität als 1 (also Prioritäten 2-5, ca. 20 pro Zeitschritt, in denen abgeschaltet werden muss) durchgeführt werden. Dabei liegt die Anzahl aller eingeschalteten Verbraucher je nach Zeitschritt zwischen 400 und 500. Im Durchschnitt müssen zehn Geräte niedrigster Priorität für die 532 Zeitschritte abgeschaltet werden. Im Sommermonat ist die Anzahl der notwendigen Abschaltungen um ca. 80% kleiner. Die Suffizienz-Kennzahl wäre somit in beiden Fällen für die verschiedenen Haushalte höher als 60%. Grund dafür ist, dass der Verzicht auf prioritäre Geräte nicht über einen sehr langen Zeitraum erfolgen würde, denn der Spitzenbedarf beträgt nur wenige Stunden. Konkret heißt das, dass die Hausbewohner keinen größeren Verzicht auf wichtige Stromverbraucher über einen langen Zeitraum ausüben müssten.

5. Ausblick

Eine einfache PV-Diesel Anlage ohne Batterie und mit einem Dieselgenerator ist ungeeignet für die Elektrizitätsversorgung von dynamischen Haushaltslasten, auch mit Laststeuerung, da die Betriebsstunden bei geringen Auslastungen zu viele sind. Dafür wäre ein Dieselgenerator mit einem *Common-Rail-Einspritzsystem* notwendig, der auch unter 50% effizient arbeitet. Die Laststeuerung hat hier das Potenzial, eine Überlastung zu vermeiden, auch mit Auswirkungen auf das Nutzverhalten der Hausbewohner. Der Algorithmus wird weiterentwickelt, um Systeme mit Energiespeichern und mit mehreren Generatoren zu untersuchen. Darüber hinaus sollen andere Anwendungsfälle untersucht werden, wie industrielle Lastprofile.

Diese Arbeiten wurden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) mit dem Kennzeichen FKZ 0325752E gefördert.

6. Literatur

- [1] R. Kempener, O. Lavagne, D. Saygin, J. Skeer, S. Vinci, and D. Gielen, "Off-Grid Renewable Energy Systems: Status and Methodological Issues," Abu Dhabi, 2015.
- [2] E. D. Tufte, "Impacts of Low Load Operation of Modern Four-Stroke Diesel Engines in Generator Configuration," Norwegian University of Science and Technology, 2014.
- [3] S. M. Sichilalu and X. Xia, "Optimal Power Control of Grid Tied PV-battery-diesel System Powering Heat Pump Water Heaters," *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 1514–1521, 2015.
- [4] R. Kallel, G. Boukettaya, and L. Krichen, "Demand side management of household appliances in stand-alone hybrid photovoltaic system," *Renew. Energy*, vol. 81, pp. 123–135, 2015.
- [5] L. Zhu, Z. Yan, W.-J. Lee, X. Yang, Y. Fu, and W. Cao, "Direct Load Control in Microgrids to Enhance the Performance of Integrated Resources Planning," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 9994, no. c, pp. 1–1, 2015.
- [6] K. Elamari and L. a C. Lopes, "Frequency based control of electric water heaters in small PV-diesel hybrid mini-grids," *2012 25th IEEE Can. Conf. Electr. Comput. Eng. Vis. a Greener Futur. CCECE 2012*, pp. 0–3, 2012.
- [7] N. Pflugradt, "LoadProfileGenerator LoProGen." [Online]. Available: www.loadprofilegenerator.de. [Accessed: 26-Nov-2015].
- [8] C. Brosig, "Energie-Autarkie von Haushalten durch Suffizienz-Maßnahmen," Fachhochschule Köln, 2015.
- [9] K. P. Systems, "Data Sheet Model 20REOZK." pp. 4–7.