

Flexible Testumgebung für die Validierung von Home Energy Management Systemen

David REIHS*, Martin NÖHRER, Stefan ÜBERMASSER, Felix LEHFUSS

AIT – Austrian Institute of Technology, Giefinggasse 2, 1210 Wien, +4366488390029,
david.reihs@ait.ac.at, <https://www.ait.ac.at/>

Kurzfassung: Energiemanagementsysteme für Endverbraucher bekommen immer größere Bedeutung auf Grund von technischen Fortschritten im Bereich der verteilten erneuerbaren Energieerzeugung, Batterieenergiespeichersystemen und Informations- und Kommunikationstechnik. Dies gilt vor allem für die effiziente Steuerung dieser Systeme um die Auswirkungen die solche Systeme auf Netze und Energieflüsse im Haushalt haben beurteilen zu können wird eine Umgebung gebraucht in der sich unterschiedliche Zugänge zu dem Thema schnell und leicht vergleichen lassen. Eine Test- und Co-Simulationsumgebung für solche Energiemanagementsysteme wurde am Austrian Institute of Technology (AIT) entwickelt um Szenarien für Energiemanagementszenarien für Haushalte und Gebäude zu evaluieren. Die Umgebung ist in der Lage sowohl rein simulierte Komponenten als auch echte Hardware in Hardware-in-the-Loop (HIL) Evaluierungsszenarien zu berücksichtigen. Um das entworfene System zu validieren werden zwei unterschiedliche Use-Cases präsentiert.

Keywords: Heimenergiemanagementsystem, Testumgebung, Informations- und Kommunikationstechnik, Smart Grids, Demand-Side-Management, Netzstabilität

1 Einleitung

Die Weltbevölkerung steigt kontinuierlich, sowie der weltweite Energieverbrauch. Da klassische Energiequellen wie fossile Energieträger begrenzt sind, werden diese Ressourcen innerhalb voraussehbarer Zeitspannen erschöpft sein (Shahriar Shafiee, 2009). Zusätzlich tragen fossile Energieträger durch die Freisetzung von Treibhausgasen in die Umwelt zum Klimawandel bei. Erneuerbare Energiequellen wie z.B. Photovoltaik (PV) erleben derzeit einen deutlichen Aufschwung. Solche PV Systeme zur dezentralen erneuerbaren Energieerzeugung erweisen sich vor allem im Heimbereich meist als wirtschaftlich attraktiv. (Tillmann Lang, 2015)

Diese dezentralen erneuerbaren Formen der Energieerzeugung bringen jedoch Herausforderungen für die klassischen elektrischen Energieverteilnetze mit sich. (A. Woyte, 2006) Anders als klassische Kraftwerke ist ihr momentaner Betrieb abhängig von einem externen Parameter auf den man keinen Einfluss nehmen kann. Die Unvorhersehbarkeit erneuerbarer Energieformen muss im Netz ein Gegenstück erhalten welches die benötigte Flexibilität anbieten kann um die Stabilität der Netze zu wahren und Stromengpässe zu vermeiden.

Im Bereich der Smart Grids, wird der Ausnutzung von Flexibilität auf der Verbraucherseite des elektrischen Energieverteilnetzes ein großer Wert beigemessen. Die Flexibilität kann dazu

benutzt werden um zusätzlich zur Erzeugerseite den elektrischen Energiefluss innerhalb des Systems zu managen. Das sogenannte Demand-Side-Management (DSM) beschreibt Teile des Stromverteilnetzes welche flexible Lasten verwenden um den Betrieb des Netzes zu regeln. (Peter Palensky, 2011)

Solche DSM Systeme können grundsätzlich unterschiedliche Formen annehmen, eine mögliche Implementierung von DSM Regelprozessen auf Wohnbauebene ist ein Heimenergiemanagementsystem (HEMS). Ein solches System kann je nach der benötigten Skalierung auf alles von Wohnsiedlungen bis zu Einzelheimen angewandt werden.

Viele Haushaltsgeräte bieten heutzutage bereits ein Application Programming Interface (API) an um ihren Betrieb von einer zentralen Instanz aus steuerbar zu machen. Dies kann ausgenutzt werden, um verschiedene Geräte zu bestimmten Zeiten zu aktivieren, z.B. um die momentane Last für das Energieverteilnetz zu regeln.

Der technische Fortschritt in den Bereichen dezentraler elektrischer Energieerzeugung (vor allem Photovoltaik), der dezentralen elektrischen Energiespeichersysteme und der Informations- und Kommunikationstechnologie, führt dazu, dass Energiemanagementsysteme im Heimbereich immer verbreiteter und wichtiger werden.

1.1 Energiesystem der Zukunft – Prosumer Haushalte

Mit dem Fortschritt bei Energieerzeugung, -speicherung und Kontrollmöglichkeiten von Haushaltsgeräten ist ein Haushalt realisierbar, der sich im Bereich der elektrischen Energieversorgung stark vom Status Quo unterscheidet. Ein solcher Prosumer Haushalt stellt Hausinterne Flexibilität entweder dem Netzbetreiber zur Verfügung, oder regelt sie selbst in einer Weise die dem Endnutzer ebenfalls einen Vorteil bringt. (Per Goncalves Da Silva, 2012) Für den Bewohner ergeben sich daraus, neben dem Gefühl energieeffizient zu sein, vor allem wirtschaftliche Anreize. Zum Beispiel kann der Netzbetreiber unterschiedliche Netzentgelt-niveaus anbieten in Abhängigkeit von maximaler Einspeisung und maximalem Bezug von elektrischer Energie. Des Weiteren können variable Energiepreise je nach Netzauslastung einen Anreiz für zentrale Regelung von Flexibilität des Haushalts bieten.

Die Ausnützung von Flexibilität innerhalb des elektrischen Energiesystems des Haushalts benötigt eine Instanz die mit allen Komponenten welche an dieser Flexibilitätsbereitstellung teilnehmen kommunizieren kann. Eine solche Verknüpfung der steuerbaren Komponenten stellt ein HEMS dar. Das HEMS ist die zentrale Steuereinheit der Haushaltskomponenten und überwacht die Schnittstelle zum lokalen Energieverteilnetz. Es ist sowohl dafür verantwortlich die gewünschten Systembeschränkungen einzuhalten wie auch den Energiefluss optimal zu regeln.

Diese Entwicklungen bringen sowohl Möglichkeiten als auch Risiken in dem was für Effekte sie auf den Aufbau von klassischen Energieverteilnetzen haben könnten mit sich. Mit dem Ziel möglichst viele solche Systeme abbilden und evaluieren zu können wurde die Testumgebung entwickelt. Simulationen mit dem System kann vorstellbare Probleme mit verschiedenen Implementierungen von HEMS aufzeigen, und ermöglicht es die ideale Regelbarkeit unter Begrenzungen zu bestimmen.

Im Weiteren wird die implementierte Software-Umgebung zur Simulation von HEMS Anwendungen im Detail präsentiert. Außerdem werden zwei Test Cases vorgestellt und die Ergebnisse aus den Test Cases werden diskutiert.

2 Testumgebung

2.1 Notwendige Simulationen und Tests

Um die Funktion von unterschiedlichen HEMS Zugängen bewerten zu können, werden Simulationen der Funktion des HEMS über einen definierten Zeitraum benötigt. Als minimale benötigte Simulationsspanne werden 24h festgesetzt. Diese Zeitspanne ist insofern geeignet, als das sie die Periode der elektrischen Energieerzeugung mit PV darstellt. Langzeiteffekte von HEMS Implementierungen können für gewisse Parameter ebenfalls durch 24h andauernde Simulationen beschrieben werden. Im Fall von Effekten auf die Netzstabilität ist als Simulationszeitraum eine ganze Kalenderwoche nötig, da an unterschiedlichen Wochentagen das Stromverhaltensverhalten und damit das Verhalten des Stromnetzes stark variiert.

Verschiedene Komponenten (z.B. Batterieenergiespeichersystem (BESS), Waschmaschine, Elektroauto (EV)) wirken sich unterschiedlich auf die Effektivität der HEMS Implementierung aus. Daher müssen die Systemzusammensetzungen über unterschiedliche Simulationen variiert werden. Diese Tests ermöglichen es Aussagen über die Effektivität von unterschiedlichen Komponenten und deren Flexibilität zu treffen.

Mit der Einführung von „Key Performance Indikatoren (KPI)“ lassen sich Aussagen zu bestimmten Aspekten des benützten Algorithmus treffen. Diese KPI sind spezifisch für unterschiedliche Fälle und müssen daher eigens für das Ziel des Vergleichs der HEMS Implementierungen definiert werden.

2.2 Implementierte Softwareumgebung zum Testen von HEMS

In die Testumgebung eingebettet in das FlexEVELab im SmartEST Labor des AIT, bietet eine Umgebung zum Testen und Validieren von Heimenergiemanagementsystemen und -algorithmen. Sie setzt sich zusammen aus mehreren Softwarekomponenten zur Steuerung und Auswertung von Simulationen. Im Zentrum der Testumgebung befindet sich die am AIT entwickelte LabLink Middleware, welche verwendet wird um sämtliche Daten zu übertragen und Simulationen zu synchronisieren. (Martin Nöhrer, 2017) Diese Middleware basiert auf einer MQTT Kommunikationsstruktur. Diese Middleware ermöglicht es Daten zwischen verschiedenen individuellen Simulationen oder Emulationen auszutauschen. Dieser Austausch wird mit sogenannten Datenpunkten realisiert. Jedem Datenpunkt werden die erforderlichen Simulationen zugeordnet, so dass bei einer Änderung der Werte in diesem Datenpunkt die hinterlegten Simulationen benachrichtigt werden. Mithilfe des Sync-Hosts kann sichergestellt werden dass alle mit dem Lablink verbundenen Simulationen ihre Simulationsschritte synchronisieren. Das ermöglicht neben einer Co-Simulation auch die Einbindung realer Hardwarekomponenten in einem Hardware-in-the-Loop Setup.

Die Steuerung der koordinierten Simulationen der HEMS übernimmt eine angepasste Instanz der Open Source Heimautomatisierungsplattform Home Assistant. (Schousten, 2018) Die

Regelung der verfügbaren Steuerparameter findet automatisiert über Python Skripte in der Home Assistant Instanz statt. Als Systemkomponenten stehen derzeit ein PV Simulator, ein BESS Simulator, ein Haushaltslast Simulator und eine simulierte Elektroauto Ladestation (EVSE) samt simuliertem EV zur Verfügung. Weitere Komponenten können dank der eingesetzten LabLink Architektur, nach entsprechender Modellierung, jederzeit eingebunden werden. Diese Simulatoren können Realitätsgetreu die Funktion und die elektrotechnischen Eigenschaften der Komponenten abbilden. Um reale Hardware in Verbindung mit einem HEMS zu testen, steht im FlexEVELab ein Ladesäulen- und ein Elektroautoemulator zur Verfügung. Die Datenspeicherung wird direkt vom LabLink vorgenommen, welcher sämtliche kommunizierte Werte in einer Instanz der Zeitreihendatenbank InfluxDB (InfluxData, 2018) speichert. Zur Datenauswertung werden Jupyter Notebooks (Project Jupyter, 2018) verwendet die auf der Programmiersprache Python aufgebaut sind. Dies ermöglicht eine direkte Anbindung an die InfluxDB API sowie vielseitige Bibliotheken zur Auswertung und Darstellung der Daten. Zusammen bieten die einzelnen Komponenten eine vielseitige Umgebung deren Verwendung das ausführliche Testen und Evaluieren von HEMS Systemen und Algorithmen ermöglicht. Eine Übersicht der Testumgebung und der Einsatz der Kommunikationsmiddleware werden in Bild 1 präsentiert.

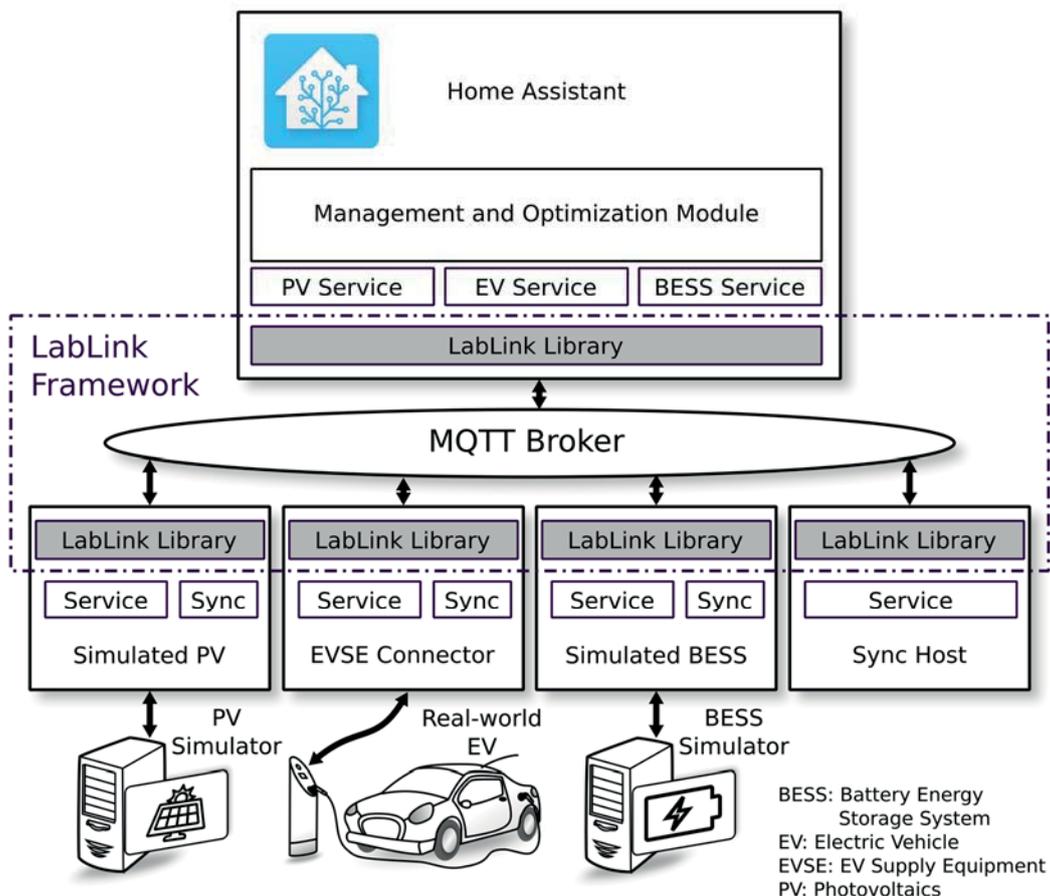


Bild 1: Überblick über die Architektur der Testumgebung

2.3 Flexibilität und Einbindungsmöglichkeiten in komplexe Energiesysteme

Die in Abschnitt 2.3 beschriebenen Vorteile der in der Testumgebung eingebundenen Middleware ermöglichen die Anwendung in verschiedenen Testszenarien. Zum Beispiel lassen sich dadurch verschiedene HEMS Szenarien abbilden, es lässt sich aber auch ein einzelner Haushalt als simulierter Anschlusspunkt eines Stromverteilnetzes abbilden.

Somit können Effekte von gleichen Regelalgorithmen bei einer erhöhten Durchdringung von HEMS in einem Niederspannungsnetz abgebildet werden.

Da bei einer hohen Durchdringung von Heimenergiemanagementsystemen jeder Haushalt auf bestimmte Zustände des lokalen Niederspannungsnetzes reagiert kann es dort zu Schwingungen im Netz kommen die sich negativ auf die Stabilität des Netzes auswirken können.

Eine Instanz der präsentierten Testumgebung für HEMS kann das Verhalten eines Netzanschlusspunktes in einem Niederspannungsnetz abbilden, über die Einbindung einer simulierten Lastkurve und Simulatoren für die unterschiedlichen Systemkomponenten. Relevante Regelparameter für das HEMS werden entweder intern behandelt oder sofern Netzparameter benötigt werden, von der Niederspannungsnetzsimulation an das HEMS übergeben.

3 Beispielimplementierungen

Um das vorgestellte System zu validieren werden zwei Use-Cases in diesem Abschnitt präsentiert und es wird analysiert inwiefern sich die entworfene Testumgebung für den Einsatz in diesen Bereichen eignet. Die Systemkomposition für erste Validierungen der Testumgebung ist wie folgt: Ein Haushalt mit lokaler PV, einem BESS und einem EV.

3.1 Use Case 1: Vergleich von zwei HEMS Algorithmen

Für die Anwendung von HEMS gibt es unterschiedliche Zielsetzungen, die meist in der spezifischen Implementierung des Regelalgorithmus widergespiegelt werden. Zwei solcher Planziele für die Steuerung eines elektrischen Energienetzes im Heimbereich sind die maximale Ausnutzung der lokal produzierten erneuerbaren Energie, und die Eindämmung von Last- und Einspeisespitzen, um die Netzverträglichkeit des HEMS zu erhöhen. Zu jeder dieser zwei Zielsetzungen wurde ein Algorithmus entwickelt der versucht das vorgegebene Regelziel zu erreichen.

Der Algorithmus zur Maximierung des Eigenverbrauchs (Eigenverbrauchmaximierung) gebraucht die flexiblen Lasten BESS und EV dazu benutzt um ein Maximum der Last in den Bereich von hoher PV Energieproduktion zu verschieben. Der zweite betrachtete Algorithmus (Spitzenlimitierung) benutzt die Flexibilität der kontrollierbaren Lasten um Einspeisespitzen zu verhindern und Lastspitzen zu limitieren.

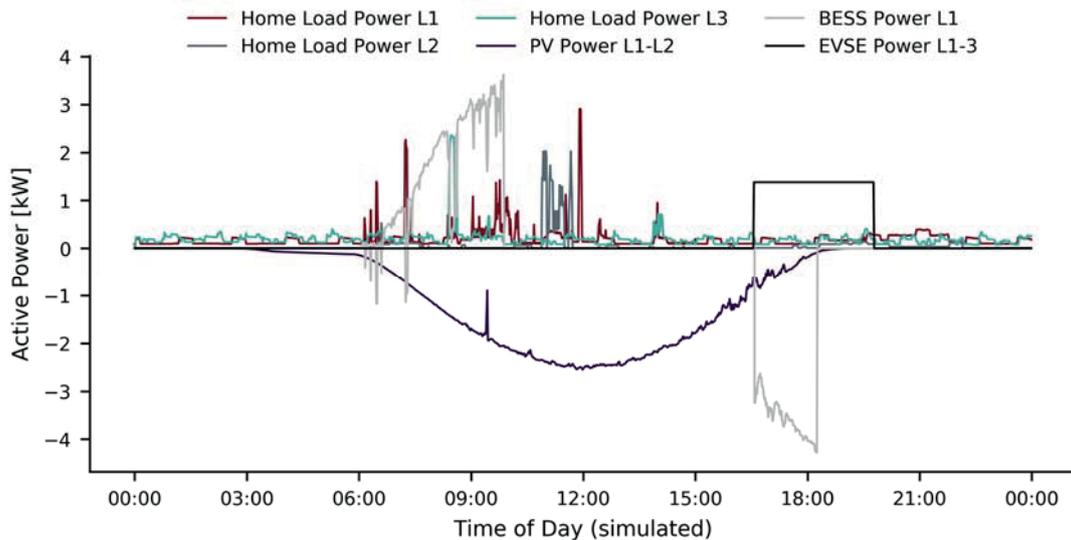


Bild 2: Ergebnisse der einer 24 Stunden Simulation mit dem HEMS Algorithmus zur Maximierung des Eigenverbrauchs (Reihs, 2018)

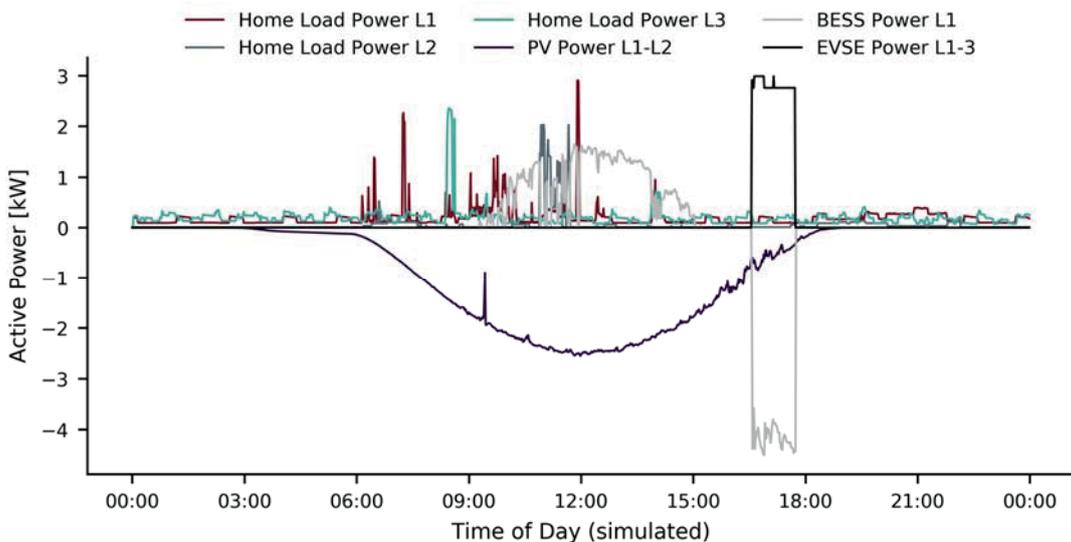


Bild 3: Ergebnisse einer 24 Stunden Simulation mit dem HEMS Algorithmus zur Vermeidung von Last und Einspeisespitzen (Reihs, 2018)

Algorithmus	Netzenergie Summe	Netzenergie Maximum	Einspeisung Summe	Einspeisung Maximum
Eigenverbrauchmaximierung	100%	100%	95.7%	100%
Spitzenlimitierung	80.9%	71.1%	100%	83.8%

Tabelle 1: Relatives Leistungsvermögen für Eigenverbrauchmaximierung und Spitzenlimitierung

Die Ergebnisse von zwei 24 Stunden Simulation mit der gleichen Systemzusammensetzung mit unterschiedlichen Steueralgorithmus bezüglich auf 4 unterschiedliche Key Performance Indikatoren sind in Tabelle 1 dargestellt. Die dazugehörigen Daten sind in Bild 2 und Bild 3 abgebildet.

Es ist zu sehen, dass der Eigenverbrauchmaximierungsalgorithmus erfolgreich die Einspeisung von lokal produzierter elektrischer Energie minimiert, und somit den Eigenverbrauch maximiert hat. Trotzdem lässt sich leicht erkennen, dass der Spitzenlimitierungsalgorithmus in allen anderen Bereichen ein besseres Verhalten gezeigt hat. Zur Evaluierung der Ergebnisse müssen außerdem noch die Rahmenbedingungen beachtet werden.

- Gibt es variable Elektrizitätskosten nach Auslastung des Stromnetzes?
- Wird ein höherer Strompreis für Anschlusspunkte mit höheren Leistungsmaxima eingesetzt?
Werden unterschiedliche Tarife bei Nacht vom Netzbetreiber eingesetzt?

Sollte der Algorithmus in Bezug auf den Strompreis für den Endnutzer bewertet werden, ergeben sich für diese zwei unterschiedlichen Rahmenbedingungen unterschiedliche Aussagen für die Algorithmen.

Es ist erkenntlich, dass der elektrische Verbrauch eines Haushalts stark beeinflusst wird von der Einsatzweise eines HEMS und davon welcher Algorithmus verwendet wird. Um eine Bewertung durchzuführen ist es entscheidend was das Ziel ist das mittels des HEMS verfolgt werden soll.

Es wurde gezeigt, dass mithilfe der präsentierten Testumgebung eine Bewertung von HEMS Algorithmen in Bezug auf verschiedene KPI möglich ist.

3.2 Use Case 2: 15118 & 61851 konforme Einbindung von EV in HEMS

Als zweiter Use Case für die Testumgebung wird die Evaluierung von HEMS Algorithmen in Bezug auf die Regelkonformität zu den Normen ISO/IEC 15118 (International Organization for Standardization, 2013) und IEC 61851 (International Electrotechnical Commission, 2017) vorgeschlagen.

Sowohl die IEC 61851 als auch die ISO/IEC 15118 stellen Beschränkungen an die Regelung des Ladzyklus des EV. So wird in der Norm IEC 61851 zum Beispiel der minimale Ladestrom pro Phase als 6A festgesetzt. Ein HEMS Algorithmus sollte das bei seiner Regelbarkeit berücksichtigen, da sonst ein falscher Ladestrom an das Ladeequipment weitergereicht werden kann.

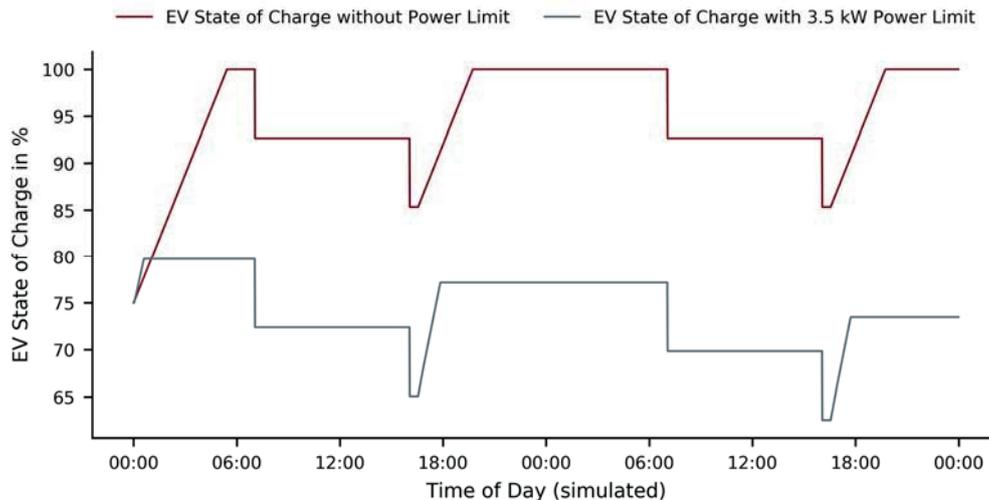


Bild 4: Mit der Leistungslimitierung auf 3.5kW ist es dem HEMS Algorithmus nicht mehr möglich das EV voll zu laden wegen 61851 Limitierungen

In Bild 4 sind die Daten einer 48h Simulation eines EV das an einem Haushalt mit HEMS ladet dargestellt. Man sieht, dass die lokale Ladeinfrastruktur im Fall einer implementierten Leistungslimitierung es nicht mehr schafft den Verbrauch des EV pro Tag zu laden. Der Grund dafür ist, dass die vom Algorithmus berechnete Ladeleistung die minimale Ladeleistung für dreiphasiges Laden die von der IEC 61851 definiert ist unterschreitet sobald keine Leistung mehr aus dem BESS bezogen werden kann.

Wird ein EVSE vom HEMS betrieben welches die für den Ladeprozess relevanten Normen nicht ausreichend berücksichtigt, kann es vorkommen, dass es wie hier präsentiert zu Fehlern im Betrieb der lokalen Ladeinfrastruktur kommt.

4 Diskussion

Die präsentierte Testumgebung ist vorteilhaft für die Evaluation von HEMS Algorithmen da sie ein einfaches Interface zur Implementierung von neuen Komponenten bietet, und zur gleichen Zeit erlaubt, simulierte Komponenten mit echter Laborhardware zu kombinieren. Außerdem werden durch die Testumgebung die Möglichkeiten eröffnet, die Effekte von HEMS und deren Unterschiedlichen Implementierungen an großflächigen Netzsimulation zu erforschen.

Sobald Werte aus einer Simulation an echte Laborinfrastruktur weitergereicht wird, wird sichergestellt, dass die Funktionen der unterschiedlichen Komponenten miteinander vereinbar sind, und die Limitierungen der echten Hardware über das ganze System berücksichtigt sind.

Der erste Use-Case zeigt auf wie gravierend die Unterschiede des Stromverbrauchverhaltens des Haushalts Abhängig von dem Algorithmus mit dem das HEMS betrieben wird sind.

Am zweiten Use-Case wird klar, dass ein Algorithmus wichtige Aspekte der Funktion einer realen Komponente vernachlässigen kann. Solche Fehler in der Implementierung von HEMS Algorithmen können Tests in einem Hardware-in-the-Loop Setup verhindern.

Die Verwendung der flexiblen Testumgebung hat die Use Cases ermöglicht weil dadurch die Komplexität der Integration von neuen Komponenten und Algorithmen in unser HEMS Modell erleichtert wird.

Zusätzlich zur Evaluierung von HEMS Algorithmen und Zugängen ermöglicht der Modulare Aufbau der Testumgebung die Erweiterung der Systemkomponenten und die Integration in Simulationen von Energieverteilnetzen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit erhöhter Marktdurchdringung von verteilter erneuerbarer Energieproduktion sinkt die vorhandene Flexibilität auf Produktionsseite im elektrischen Energieverteilnetz. Durch erhöhte Flexibilität auf Verbraucherseite lässt sich das teilweise kompensieren. Die Netzverträglichkeit von HEMS hängt stark vom verwendeten Steueralgorithmus ab, und bei hohem Aufkommen von solchen Systemen steigt die Bedeutsamkeit der Steuerung. Um negative Effekte zu vermeiden und positive Effekte zu fördern müssen die Auswirkungen von unterschiedlichen HEMS Algorithmen erst bewertet werden können.

Es wurde gezeigt, dass mit der präsentierten Testumgebung umfangreiche Bewertungen und Tests von automatisierten Steueralgorithmus im Heimenergiebereich möglich sind. Außerdem wurde die Flexibilität der Testumgebung mit den zwei unterschiedlichen Test-Case Implementierungen aufgezeigt.

Als nächster Schritt wird versucht über großflächige Netzintegrationssimulationen zu zeigen wie sich eine große Marktdurchdringung von HEMS auf verschiedene Parameter des Stromverteilnetzes auswirkt.

Acknowledgement

Parts of this work were conducted within the European project CESEPS. This project has received funding in the framework of the joint programming initiative ERA-Net Smart Grids Plus, with support from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme.



Literaturverzeichnis

- A. Woyte, V. V. (2006). Voltage fluctuations on distribution level introduced by photovoltaic systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion, Volume 21*(Issue 1), S. 202-209. doi:10.1109/TEC.2005.845454
- InfluxData. (31. Januar 2018). Von Influx DB 1.4 documentation: <https://docs.influxdata.com/influxdb/v1.4/> abgerufen
- International Electrotechnical Commission. (2017). Electric vehicle conductive charging system - Part 1: General requirements. *IEC 61851-1:2017*. Abgerufen am 31. Januar 2018 von <https://webstore.iec.ch/publication/33644>
- International Organization for Standardization. (09 2013). Road vehicles -- Vehicle to grid communication interface -- Part 1: General information and use-case definition. *ISO 15118-1:2013*. Abgerufen am 31. Januar 2018 von <https://www.iso.org/standard/55365.html>
- Martin Nöhrer, M. F. (2017). AIT LabLink - The Link between Smart Grids and the Laboratory. Abgerufen am 31. Januar 2018 von http://www.seswa.at/docs/poster/Poster_Noehrer.pdf
- Per Goncalves Da Silva, S. K. (2012). A survey towards understanding residential prosumers in smart grid neighbourhoods. *3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*, (S. 1-8). doi:10.1109/ISGTEurope.2012.6465864
- Peter Palensky, D. D. (2011). Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads. *IEEE Transactions on Industrial Informatics, Volume 7*(Issue 3), S. 381-388. doi:10.1109/TII.2011.2158841
- Project Jupyter. (31. Januar 2018). Von jupyter Documentation: <http://jupyter.org/documentation> abgerufen
- Reihs, D. (2018). Framework for Evaluation of Home Energy Management System Approaches. *Diplomarbeit*. (T. U. Wien, Hrsg.)
- Schousten, P. (31. Januar 2018). Von Home Assistant Documentation: <https://home-assistant.io/docs/> abgerufen
- Shahriar Shafiee, E. T. (2009). When will fossil fuel reserves be diminished? *Energy Policy, Volume 37*(Issue 1), pp. 181-189. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.08.016>
- Tillmann Lang, E. G. (2015). Don't just follow the sun – A global assessment of economic performance for residential building photovoltaics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(Volume 42), S. 932-951. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.077>.