

Aufbau eines HIL Teststandes zur Validierung von Algorithmen zur Steuerung von Smart Micro Grids

Felix Annen, Kersten Kröger, Michael Kelker, Katrin Schulte, Jens Haubrock

Fachhochschule Bielefeld Institut für Technische EnergieSysteme (ITES), 33619 Bielefeld
Interaktion 1, +49.521.106-70574, felix.annen@fh-bielefeld.de, <https://fh-bielefeld.de/iium/forschung/agnes>

Kurzfassung: Der Ausbau der Erneuerbaren Energien und die steigende Elektromobilität stellen steigende Herausforderungen an das Niederspannungsnetz. Um intelligente Steueralgorithmen praxisnah im Labor zu validieren, wurde ein Hardware-in-the-Loop-Teststand mit dazugehöriger Simulationsumgebung entwickelt, mit dem sich ein Smart-Micro-Grid simulieren lässt. Dieser ist modular aufgebaut und flexibel erweiterbar.

Keywords: Smart Micro Grid, HIL, Elektromobilität, Erneuerbare Energien

1 Einleitung

Im Zuge der Energiewende steigen die Herausforderungen an das elektrische Netz in Deutschland. Dies betrifft besonders die unteren Netzebenen, da in diesen die zahlenmäßig größte Anzahl an Erzeugungsanlagen angeschlossen sind. Gleichzeitig hat sich die Bundesregierung ein Ziel von sieben bis zehn Millionen zugelassenen Elektrofahrzeugen in Deutschland bis 2030 gegeben [1]. Damit wird sich, im privaten wie im gewerblichen Bereich, die Anzahl der Ladeanlagen signifikant erhöhen. Das führt, zusätzlich zum Ausbau der erneuerbaren Energien, zu einer weiteren Belastung der elektrischen Netze. Ist die Netzanschlusskapazität durch Ladeleistung der Elektrofahrzeuge und Einspeiseleistung der regenerativen Energieerzeuger erschöpft, erfolgt ein teurer Netzausbau mit neuen Erdkabeln oder einem neuen größeren Transformator.

Eine Alternative zum teuren Netzausbau ist die intelligente Steuerung von Erzeugern und Verbrauchern, basierend auf KI-Prognosemodellen, sodass nicht wie bisher, die Erzeugung dem Verbrauch folgt, sondern damit die Last der aktuellen Erzeugung angepasst wird [2]. Aber nicht nur aus Sicht der Vermeidung des Netzausbaus ist es sinnvoll, Erzeuger und Verbraucher aufeinander abzustimmen. Gewerbliche Flottenbetreiber und private Verbraucher können über das gesteuerte Laden ihrer EFZs ihren Eigenverbrauchsanteil erhöhen, dadurch Energiekosten sparen und tragen gleichzeitig damit zur Netzstabilität bei.

Um solche Steueralgorithmen praxisnah im Labor zu validieren, wurde ein Hardware-in-the-Loop-Teststand nebst zugehöriger Simulationsplattform entwickelt und aufgebaut. Der Vorteil der Validierung der Steueralgorithmen an einem Hardwareteststand im Vergleich zur reinen Softwaresimulation ist, dass anschließend an den Labortest mit nur geringem Änderungen diese in einen Feldtest integriert werden können. Der Teststand ist Teil des Smart Energy Application Labs, einem ERA Smart Energy Lab [3].

2 Hardwareteststand

Der Hardwareteststand stellt ein Smart Micro Grid auf der Niederspannungsebene dar. Er besteht aus den folgenden Komponenten:

- Sammelschiene
- Photovoltaikanlage
- Elektronische AC-Last
- Batteriespeicher
- Sechs EFZ-Ladepunkte
- Sechs EFZ-Simulatoren
- Grid Emulator (im Aufbau)

Die AC-Last, der PV-Wechselrichter und der Batteriespeicher sind energietechnisch an einem Knotenpunkt, der Sammelschiene, angeschlossen. Über einen bereits vorbereiteten Anschluss, kann als eine vierte Komponente zukünftig ein BHKW angeschlossen werden. Die Ladepunkte und die EFZ-Simulatoren arbeiten im Labor leistungslos. Die Leistung der EFZs wird auf den simulierten Lastgang aufsummiert, der über die AC-Last dargestellt wird. Eventuell vorhandene Messgeräte in den Ladepunkten können über die Simulationsplattform ebenfalls simuliert werden, sodass es für den Steueralgorithmus so aussieht, als würde tatsächlich eine Leistung über den Ladepunkt fließen. Die Leistung wird im Teststand mit einem vorher definierten Skalierungsfaktor dargestellt. Beträgt der Skalierungsfaktor 40, so können mit der AC-Last, die eine maximale Leistung von 15kVA hat, bis zu 600kVA dargestellt werden. In Abbildung 1 ist das Schema des Teststandes abgebildet.

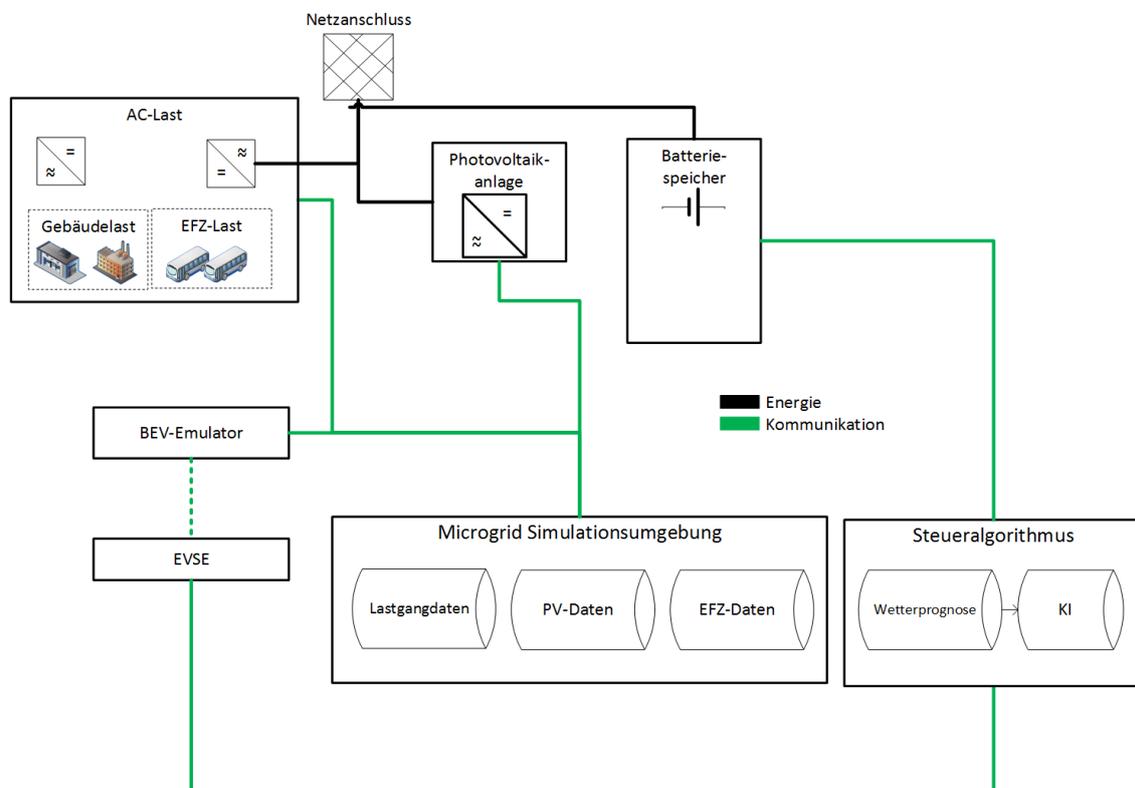


Abbildung 1: Schema des HiL-Teststands

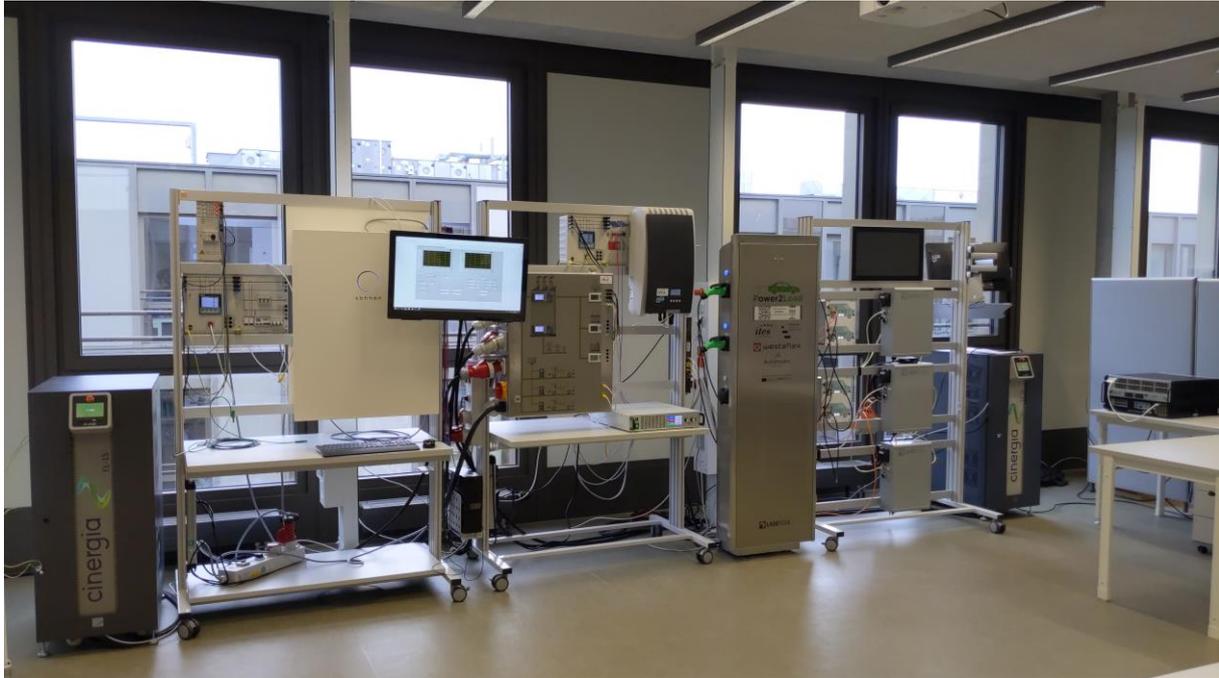


Abbildung 2: Überblick des Teststands. V.l.n.r.: AC-Last, Batteriespeicher, Sammelschiene, PV-Anlage, Ladesäule aus Projekt Power2Load, Ladeanlagen, EFZ-Simulatoren, Grid Emulator, Echtzeitsimulator

2.1 Sammelschiene

Der Schaltschrank, in dem sich die Sammelschiene befindet, hat zum einen die Funktion, die Hilfsenergie der AC-Last und zukünftig eines Grid Emulators in Form von 32A-Steckdosen bereitzustellen, zum anderen verfügt er über genügend Anschlüsse, um einen Knotenpunkt in einem Smart Micro Grid darzustellen. Dazu dienen insgesamt drei dreiphasige Anschlüsse in Form von Sicherheits-Einbaubuchsen, die mit 6A abgesichert sind und eine 32A CEE-Steckdose, an die die EUT-Side der AC-Last angeschlossen wird. Die Netzeinspeisung der Sammelschiene kann dabei mittels eines Umschalters sowohl aus dem öffentlichen Netz, als auch über eine 32A-CEE-Einspeisedose über den Grid Emulator geschehen. In die Schaltschranktür eingebaute fernauslesbare Messgeräte visualisieren die Leistungsflüsse.

2.2 Photovoltaikanlage

Die Photovoltaikanlage besteht aus einem dreiphasigen PV-Wechselrichter und einer DC-Quelle mit einer maximalen Leistung von 1500W. Die DC-Quelle verfügt über einen Netzwerkanschluss und wird über ModbusTCP von der Simulationsplattform gesteuert. Die Anbindung an die Sammelschiene erfolgt über 4mm-Sicherheitsbuchsen.

2.3 Elektronische AC-Last

Mit der elektronischen AC-Last wird eine Haushalts- oder Industrielast im Smart Micro Grid abgebildet. Die verwendete AC-Last arbeitet in allen vier Quadranten und ist regenerativ, wandelt die Energie also nicht in Wärme um, sondern speist sie zurück ins Netz. Diese hat ebenfalls eine Netzwerkschnittstelle und wird über ModbusTCP angesteuert. Der Anschluss an die Sammelschiene erfolgt über einen 32A-CEE-Stecker für die Hilfsenergie und Rückspeisung und einen zweiten 32A-CEE-Stecker für die Equipment-Under-Test-Side.

2.4 Batteriespeicher

Der Batteriespeicher besteht aus einer 2,5 kWh großen Lithium-Eisenphosphat-Batterie und einem Wechselrichter mit einer Leistung von 1,1 kW. Die Ansteuerung erfolgt über eine REST-API und http. Der Anschluss an die Sammelschiene erfolgt über 4mm-Sicherheitsbuchsen. Im Gegensatz zur AC-Last können beim Batteriespeicher die Phasen nicht einzeln angesteuert werden und es ist auch nur eine Steuerung der Wirkleistung möglich. Die Blindleistung ist vernachlässigbar klein.

2.5 Ladeanlagen

Insgesamt stehen drei Ladeanlagen mit jeweils zwei Ladepunkten zur Verfügung. Diese sind aber keine voll funktionsfähigen Ladepunkte, da über diese lediglich die Kommunikation zwischen Ladeanlage und Elektrofahrzeug nach IEC61851 dargestellt wird. Elektrische Leistung fließt nicht über die Ladekabel. Stattdessen wird die elektrische Leistung der Elektrofahrzeuge über die AC-Last zusammen mit dem sonstigen Lastgang abgebildet. Jeder Ladepunkt ist mit einem handelsüblichen Ladecontroller ausgestattet, der sich über ModbusTCP ansteuern lässt. Damit kann der Status ausgelesen oder auch der maximal zulässige Ladestrom vorgegeben werden. In der Realität ließe sich auch ein an den Ladecontroller per ModbusRTU angeschlossener Zähler auslesen. Da im Labor allerdings über den Ladepunkt keine Ladeleistung fließt, wird diese Funktion von den EFZ-Simulatoren übernommen.

2.6 EFZ-Simulatoren

Die EFZ-Simulatoren bestehen aus einem Microcontroller, der gemäß IEC61851 eine Kommunikation mit einem Ladepunkt herstellt. Dazu werden entsprechende Widerstände zwischen den CP- und PP-Kontakt geschaltet und das PWM-Signal des Ladepunkts ausgewertet. Die Steuerung erfolgt nicht autonom, sondern muss von außen, also von der Simulationsumgebung, vorgegeben werden. Die Kommunikation erfolgt über ModbusTCP. Wie bereits beschrieben, fließt über die EFZ-Simulatoren selbst keine Leistung. Stattdessen kann der vom Ladepunkt vorgegebene Ladestrom von der Simulationsumgebung über die EFZ-Simulatoren ausgelesen werden und anschließend über die AC-Last abgebildet werden.

Die EFZ-Simulatoren stellen auch die Zählerfunktion für die in den Ladepunkten verbauten Ladecontroller bereit. Sie verhalten sich wie ein daran angeschlossener ModbusRTU-Zähler. Die Werte für Spannungen, Ströme, Leistungen und Energie werden von der Simulationsumgebung vorgegeben. Der Ladecontroller liest sie über eine serielle Verbindung mit dem EFZ-Simulator aus.

2.7 Messeinheiten

Um Leistungsflüsse in einem Smart Micro Grid sichtbar zu machen, sind Messeinheiten nötig. Dazu verfügt jede Komponente des Teststandes, über die eine elektrische Leistung fließt, eine per ModbusTCP auslesbare Messeinheit. Mit dieser lassen sich Spannungen, Ströme und Leistungen auslesen. Ein Sonderfall sind dabei, wie bereits beschrieben, die EFZ-Ladepunkte, da über diese keine elektrische Leistung fließt. Dadurch kann der Steueralgorithmus, wie in

der Praxis, die jeweilige Leistung einer jeden Komponente und eines jeden Ladepunktes auslesen und verarbeiten.

2.8 Kommunikationsschnittstellen

Als Kommunikationsschnittstellen zwischen den Hardwarekomponenten und der Simulationsumgebung kommen ausschließlich IP-basierte Protokolle zum Einsatz. Dies hat den Vorteil, dass der Verdrahtungsaufwand minimiert wird, es sich um eine mittlerweile bewährte Technik handelt und gleichzeitig ein flexibler Aufbau möglich ist. Alle Komponenten und der PC der Simulationsplattform befinden sich im selben Labornetz, welches als VLAN innerhalb der Hochschule konfiguriert ist. Dieses ist durch die Firewall der Hochschule abgesichert gegen unbefugte Zugriffe von außen. Über einen VPN-Zugang kann jedoch auch von außerhalb auf den gesamten Teststand zugegriffen werden, was sich im Zuge der Corona-Pandemie bewährte. Ein weiterer Vorteil ist, dass prinzipiell der Aufstellort einiger Komponenten verlagert werden können. So müssen z.B. die Ladeanlagen samt EFZ-Simulatoren elektrisch nicht mit der Sammelschiene verbunden werden und da das Labornetz auch in anderen Laborräumen freigeschaltet werden kann, kann dieser Teil bei Platzproblemen ohne weitere Verkabelung in einen anderen Raum umziehen.

3 Simulationsplattform

Die Simulationsplattform, die die einzelnen Komponenten des Teststands ansteuert, ist in LabView programmiert und läuft unabhängig vom zu testenden Steueralgorithmus. Der Simulationsablauf kann entweder automatisch oder manuell erfolgen. Als Eingangsdaten für den Automatikmodus dienen Datensätze zum Lastgang, zur solaren Einstrahlung und zur Ladeleistung von EFZs. Diese können entweder historische Messdaten oder künstlich generierte Pseudodatensätze sein.

3.1 Datenquellen

Als Datenquellen für die Simulationsplattform können zum einen historische Messdaten oder aber auch Pseudodaten verwendet werden. Der Deutsche Wetterdienst bietet beispielsweise historische Strahlungsmessdaten mit einer zeitlichen Auflösung von zehn Minuten aus ganz Deutschland als Opendata im CSV-Format an [4]. Da allerdings nicht jede Wetterstation auch Strahlungsdaten aufnimmt, werden diese zuerst gefiltert. Dies geschieht durch ein Script in der Programmiersprache R, das diejenigen Datensätze mit Strahlungsdaten erkennt und die entsprechende Datei auch umbenennt. Die Umbenennung erleichtert später die Auswahl, da im ursprünglichen Dateinamen nur eine Stationsnummer vermerkt ist, aber nicht der Ort der Wetterstation.

3.2 Automatikbetrieb

Im Automatikbetrieb fährt die Simulationsumgebung nach Einlesen aller benötigter Datensätze selbstständig diese ab und steuert die jeweiligen Komponenten des Teststandes an. Zu Beginn werden die Datensätze analysiert und es kann für jeden Datensatz ein individueller Startzeitpunkt ausgewählt werden. So ist es möglich, den Lastverlauf aus einem Sommertag mit der Sonneneinstrahlung eines Wintertags zu kombinieren.

Der minimale Zeitschritt beträgt derzeit eine Minute. Die Zeitschritte der verschiedenen Datensätze können allerdings auch unterschiedlich sein. Beispielsweise haben die Datensätze des DWDs eine zeitliche Auflösung von zehn Minuten, Lastgangwerte allerdings in der Regel 15 Minuten.

Alle Teil-Simulationen sind individuell ein- und ausschaltbar. Das heißt, dass es möglich ist, über die Simulationsumgebung beispielsweise nur den Lastgang oder nur die Elektrofahrzeuge zu simulieren. Im Automatikbetrieb kommt ferner ein global konfigurierter Skalierungsfaktor zur Anwendung.

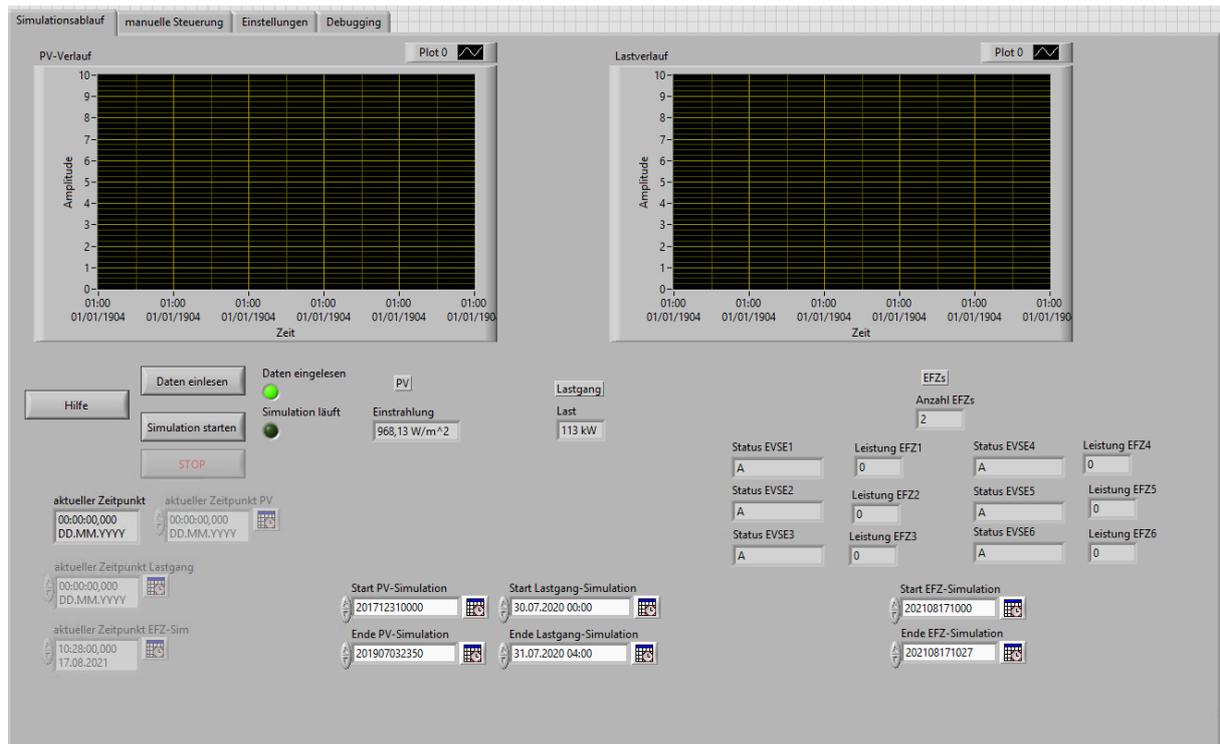


Abbildung 3:

3.2.1 PV-Simulation

Mit der PV-Simulation lässt sich eine beliebige Photovoltaikanlage simulieren und die so berechnete Leistung über eine DC-Quelle und Wechselrichter in das Smart Micro Grid einspeisen. Als Datengrundlage dienen zum einen die Anlagendaten (Größe, Ausrichtung, Ort) und zum anderen Strahlungswerte (Globalstrahlung, Diffusstrahlung, Uhrzeit).

Die Strahlung auf die geneigte Ebene setzt sich dabei aus der Direktstrahlung, der Diffusstrahlung und der reflektierten Strahlung:

$$E_{G,gen} = E_{dir,gen} + E_{diff,gen} + E_{refl,gen}$$

Zur Berechnung der diffusen Einstrahlung wird das Modell von Klucher verwendet [5]. Die Formeln zur Berechnung lassen sich aus der einschlägigen Literatur entnehmen. Die Bodenreflexion wird derzeit noch vernachlässigt, lässt sich aber in einer späteren Version problemlos integrieren, da als weiterer Parameter lediglich die Albedo hinzukommt.

Anschließend lässt sich mit der Gesamtstrahlung auf die PV-Anlage die entsprechende elektrische Leistung bestimmen. Die Umgebungstemperatur wird derzeit in der Simulation noch nicht berücksichtigt.

3.2.2 Lastgangsimulation

Die Lastgangsimulation simuliert einen Lastgang, beispielsweise eines Industriebetriebes oder eines Hauses mit Hilfe der AC-Last. Dieser muss in Form einer Tabelle im CSV-Format vorliegen, wobei für jede Phase die Wirk- und Blindleistung angegeben wird. Anschließend werden die Leistungsdaten eines Zeitschritts mit dem Skalierungsfaktor verrechnet und entsprechende Steuerbefehle an die AC-Last gegeben.

3.2.3 EFZ-Simulation

In der EFZ-Simulation sind die Ankunfts- und Abfahrtszeiten der zu simulierenden Elektrofahrzeuge und die Ladeleistung hinterlegt. Dementsprechend werden automatisch die EFZ-Simulatoren angesteuert, das heißt Fahrzeuge werden mit den Ladepunkten verbunden, das PWM-Signal und somit der maximal vom Ladepunkt vorgegebene Ladestrom ausgelesen, und dementsprechend die Zählerwerte vorgegeben. Diese EFZ-Simulation läuft auf der Simulationsplattform ab und nicht auf dem Microcontroller des EFZ-Simulators. Dieser setzt nur die Befehle der Simulationsplattform um.

Derzeit ist noch kein Batteriemodell in die EFZ-Simulation integriert. Für jeden Zeitschritt eines EFZs wird in einer Tabelle eine Ladeleistung vorgegeben. Liegt die aus dem vorgegebenen Ladestrom berechnete Leistung unter der in der Tabelle vorgegebenen Ladeleistung, so wird die Ladeleistung reduziert. Dies führt dazu, dass wenn die Ladeleistung reduziert wird, im Laboraufbau ein EFZ weniger Energie bezieht als in der Praxis, wenn das Fahrzeug nach Tabellenvorgabe noch angeschlossen ist, aber die Ladeleistung bereits null ist.

Da über die Ladepunkte selbst keine Leistung fließt, die Leistung aber auch im Labor abgebildet werden soll, wird diese über die AC-Last an der Sammelschiene abgebildet. Dazu werden der Lastgang und die Gesamtleistung der EFZs addiert.

Ein Beispieldatensatz mit einem einem Fahrzeug ist in Tabelle 1 abgebildet. Für jedes weitere Fahrzeug werden fünf weitere Tabellenspalten benötigt. Die Daten müssen im CSV-Format vorliegen.

Tabelle 1: Beispieldatensatz mit einem Fahrzeug

Zeitstempel	EFZ1 Status	EFZ1 IL1	EFZ1 IL2	EFZ1 IL3	EFZ1 cos phi
202108171000	A	0	0	0	1
202108171001	A	0	0	0	1
202108171002	A	0	0	0	1
202108171003	B	0	0	0	1
202108171004	C	16	16	16	1

202108171005	C	16	16	16	1
202108171006	C	16	16	16	1

3.2.4 Steueralgorithmus

Der zu testende Steueralgorithmus („Algorithm under Test“) ist selbst nicht Teil der Simulationsumgebung oder des Teststandes. Er wird auf einem separaten PC ausgeführt und hat über das Labornetzwerk Zugriff auf die Messeinheiten, Ladepunkte und das Internet. Darüber trifft dieser Entscheidungen, wann und mit welcher Leistung Elektrofahrzeuge geladen werden sollen. Derzeit werden mit Hilfe des HiL-Teststandes in den beiden von der EU im Rahmen des EFRE-Programms geförderten Forschungsprojekten Power2Load und KI-Grid KI-basierte Steueralgorithmen erforscht.

3.3 Manueller Betrieb

Der manuelle Betriebsmodus ermöglicht es, für schnelle Tests oder Demonstrationszwecke statische Werte vorzugeben. Soll beispielsweise die Funktion einer Ladeanlage überprüft werden, so kann per Mausklick ein Fahrzeug verbunden oder eine Last eingestellt werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem HiL-Teststand und der dazugehörigen Simulationsumgebung kann ein Smart Micro Grid mit einer Photovoltaikanlage, einer AC-Last, sechs Elektrofahrzeugen und Ladepunkten und einem Batteriespeicher simuliert werden. Damit können im Labor intelligente Steueralgorithmen, die Einfluss auf den Ladevorgang der Elektrofahrzeuge nehmen, validiert werden. Die Validierung an einem HiL-Teststand im Vergleich zu einer reinen Software-Validierung hat den Vorteil, dass diese bereits alle nötigen Schnittstellen für einen Feldtest enthält. Damit werden Probleme schon im Vorhinein entdeckt und nicht erst in der Praxis. Die gesamte Kommunikation erfolgt über ein IP-Netzwerk, was den Verdrahtungsaufwand und die Fehleranfälligkeit deutlich reduziert. Als Datensätze kommen zum einen Pseudodaten und zum anderen Messdaten, beispielsweise Lastgangdaten eines realen Industriebetriebes oder frei verfügbare solare Einstrahlungsdaten des DWD zum Einsatz.

Die Simulationsplattform und der Hardwareteststand werden ständig weiterentwickelt und an die aktuellen Bedürfnisse angepasst. Derzeit wird ein Echtzeitsimulator von OPAL-RT eingebunden, mit dem es möglich ist, ein elektrisches Netz in Echtzeit zu simulieren und den derzeit starren Einspeisepunkt aus dem öffentlichen Netz durch einen Grid Emulator zu ersetzen. Damit ergeben sich völlig neue Möglichkeiten in Bezug auf die Simulation von autonomen Netzzellen.

Der Netzsimulator besteht zum einen aus einem Echtzeitsimulator, der Netzmodelle in Echtzeit berechnen kann und einem Grid Emulator („Verstärker“), der mit diesem gekoppelt ist und einen Netzknotenpunkt elektrisch darstellen kann. Dieser Netzknotenpunkt dient nun als Einspeisung der Sammelschiene. Der Lastfluss ist bidirektional und eine Änderung der Leistungsverhältnisse an der Sammelschiene, beispielsweise durch eine Änderung der Photovoltaikeinspeisung, wirkt sich auch auf das in Echtzeit berechnete Netzmodell aus. Die Grundkonfiguration des Grid Emulators erfolgt über ModbusTCP. Die eigentliche

Datenübertragung zwischen Echtzeitsimulator und Grid Emulator erfolgt über eine analoge Schnittstelle. Das Netzmodell ist in Matlab/Simulink programmiert.

Neben den historischen und manuell eingegebenen Daten, wird zukünftig auf Live-Daten, beispielsweise eines Zählers in einem Industriebetrieb, einer Photovoltaikanlage oder eines Strahlungssensors, als Eingang genutzt werden.

5 Referenzen

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (29.09.2021). Förderung der Elektromobilität durch die Bundesregierung [online]. <https://www.bmu.de/themen/luft-laerm-mobilitaet/verkehr/elektromobilitaet/foerderung> [abgerufen am 29.11.2021]
- [2] Kelker, M.; Schulte, K.; Hansmeier, D.; Annen, F.; Kröger, K.; Lohmann, P.; Haubrock, J.: Development of a forecast model for the prediction of photovoltaic power using neural networks and validating the model based on real measurement data of a local photovoltaic system. Powertech 2019, Juni 23 – 27, Milano 2019
- [3] ERA-Net Smart Energy Systems: Validation Network with Living Labs and Testbeds (26.01.2022). <https://www.eranet-smartenergysystems.eu/II/133/SEAp---Smart-Energy-Applications.html> [abgerufen am 26.01.2022]
- [4] Deutscher Wetterdienst (29.09.2021). https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/10_minutes/solar/ [abgerufen am 29.11.2021]
- [5] Klucher, T. M. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. Solar Energy, 23(2) (1979), 111–114.