

Laborinfrastruktur zur Kopplung realer und simulierter Elektrofahrzeuge: FlexEVELab

Martin NÖHRER*¹, Felix LEHFUSS¹, Stefan ÜBERMASSER¹, Matthias STIFTER¹

¹ AIT Austrian Institute of Technology GmbH – Energy Department
1210 Wien, Giefinggasse 2
T +43 (0) 50550-6323, martin.noehrer@ait.ac.at, <http://www.ait.ac.at>

Kurzfassung:

In dieser Arbeit wird die Kopplung einer realen Test- und Laborinfrastruktur mit einer Simulationsumgebung für die Analyse des elektrischen Verhaltens von Elektrofahrzeugen und deren Interaktion mit dem elektrischen Netz präsentiert. Der dargestellte Aufbau bietet eine Forschungs- und Testumgebung für die folgenden Szenarien:

- Untersuchung des elektrischen Verhaltens während dem Laden
- Untersuchung von Kommunikationsprotokollen zwischen Ladesäule(n) und Elektrofahrzeuge(n) sowie der benötigten Management-Aktoren
- Simulation der Auswirkungen von Elektrofahrzeug-Ladevorgängen auf das elektrische Energienetz
- Untersuchung von Smart Charging Konzepten und deren Auswirkungen auf das Energienetz mittels Kombination von realen und simulierten Elektrofahrzeugen

Um diese Vielzahl an Anwendungsmöglichkeiten realisieren zu können, werden zwei bestehende Systeme gekoppelt. Diese beiden Systeme, das FlexEVELab Labor und die EVSim Softwareumgebung, sowie die Realisierung der Kopplung, werden in diesem Beitrag genau erläutert und auf die Architektur der dafür notwendigen Komponenten und deren Datenaustausch eingegangen. In der hier dargestellten Erstimplementierung wurde eine einzelne Ladesäule in realer Hardware mit der Simulation des elektrischen Netzes, anderer Elektrofahrzeuge und intelligenter Ladesteuerung kombiniert. Zukünftige Anwendungen der Test- und Laborinfrastruktur sehen die gleichzeitige Verwendung mehrerer Ladesäulen in der direkten Kopplung mit der Simulationsumgebung vor. Hauptgrund der Motivation hinter dieser Kopplung sind die Modellbildung und Validierung von realen Komponenten durch den Hardware-In-The-Loop (HIL) Ansatz.

Keywords: Elektromobilität, Hardware-In-The-Loop, Simulation, Testinfrastruktur

1 Einleitung

Um die Emissionsvorgaben der EU zu erreichen stellen Fahrzeughersteller vermehrt Teile ihre Flotten auf voll- bzw. teilelektrifizierte Fahrzeuge um. Die erwartete Durchdringung von Elektrofahrzeugen (EV) sowie Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen (PEV) wird für das elektrische Netz gleichermaßen zur Herausforderung wie auch zur Chance. Im Jahr 2030 wird der Anteil

der voll- und teilelektrifizierter Fahrzeuge unter den europaweit neuangemeldeten Fahrzeugen, je nach Prognose, rund 70 bis 85% betragen [1].

Die Implementierung moderner Smart Grid Technologien ermöglicht den Einsatz intelligenter Kommunikationsnetzwerke und darauf basierender Regelungsalgorithmen, die in starker Synergie mit Elektrofahrzeugen und deren Ladevorgängen genutzt werden können. Dies eröffnet für das elektrische Energiesystem der Zukunft ein Potential an Synergien für die Elektromobilität und den Strommarkt. Mögliche Methoden hierfür sind Smart-Charging Szenarien, Vehicle 2 Grid (V2G) oder Vehicle 2 Service (V2X).

Da es sich beim Verteilnetz um kritische Infrastruktur handelt, bedarf es allerdings an Testmethoden, um diese neuen Technologien vor ihrem tatsächlichen Einsatz auf ihre Charakteristiken und deren Betriebssicherheit hin zu validieren. Die in sich geschlossene Kopplung von realen Komponenten mit validierten Simulationsmodellen in Echtzeit wird als Hardware-In-The-Loop (HIL)-Simulation bezeichnet. Sie ermöglicht unter anderem eine Skalierung möglicher Szenarien von der Haushaltsebene bis hin zu gesamten Mittelspannungsnetzen.

Diese Arbeit basiert auf bestehende Forschungsaktivitäten im Bereich Integration von Elektromobilität ins elektrische Energienetz. Diese Aktivitäten und Erfahrungen umfassen verschiedene Bereiche im Kontext der Elektromobilität und werden im Folgenden dargestellt:

- Analyse des elektrischen Verhaltens von Elektrofahrzeugen während des Ladevorganges
- Untersuchungen und Einsatzmöglichkeiten von verschiedenen Kommunikationsprotokollen zwischen Elektrofahrzeug, der Ladesäule und den dafür benötigten Management-Aktoren
- Simulation der Auswirkungen von Elektrofahrzeugen-Ladevorgängen auf das elektrische Energienetz, sowie die Untersuchung verschiedener Smart Charging-Konzepte auf das Energienetz

Für diese Aufgaben entstanden unabhängig voneinander verschiedene Komponenten und Softwarewerkzeuge, welche für die jeweiligen Aufgabenstellungen entwickelt wurden. Ein großer Fokus wurde dabei auf die Entwicklung der FlexEVELab Umgebung gelegt. Diese erlaubt die Untersuchung von realen Komponenten in einem Laborumfeld. Für die Analyse der Auswirkungen von Elektrofahrzeug-Ladevorgängen auf das elektrische Energienetz entstand die Simulationsumgebung EVSim. Dieser Beitrag zeigt die Kopplung dieser beiden Systeme und die Realisierung einer HIL-Simulationsumgebung zur Analyse intelligenter Netzintegration von Elektrofahrzeugen.

In den folgenden Abschnitten werden die bereits vorhandenen Systeme FlexEVELab und EVSim vorgestellt. Darauf aufbauend wird ihre Kopplung genauer erläutert. Dabei wird auf die Architektur der dafür notwendigen Komponente und dem Datenaustausch zwischen den Systemen eingegangen. Die Demonstration einer Optimierung der Direktnutzung, bei der die Ladeleistung des realen Elektrofahrzeuges im Labor verändert wird, zeigt ein mögliches Einsatzgebiet der vorgestellten Kopplung zwischen EVSim und FlexEVELab.

2 Laborinfrastruktur FlexEVELab

Aus technischer Sicht besteht ein Ladesystem für Elektrofahrzeuge grundsätzlich aus drei Komponenten: dem elektrischen Energienetz, der Ladesäule (EVSE) und dem Elektrofahrzeug. Im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes COTEVOS [2] wurde eine Laborinfrastruktur für ein solches Ladesystem geschaffen, welches für Interoperabilitätstests sowie in der Forschung eingesetzt werden kann [3]. Die als FlexEVELab (Flexible Electric Vehicle Equipment Laboratory) benannte Laborinfrastruktur im AIT SmartEST bildet ein Ladesystem für Elektrofahrzeuge nach und ist in Abbildung 1 dargestellt.

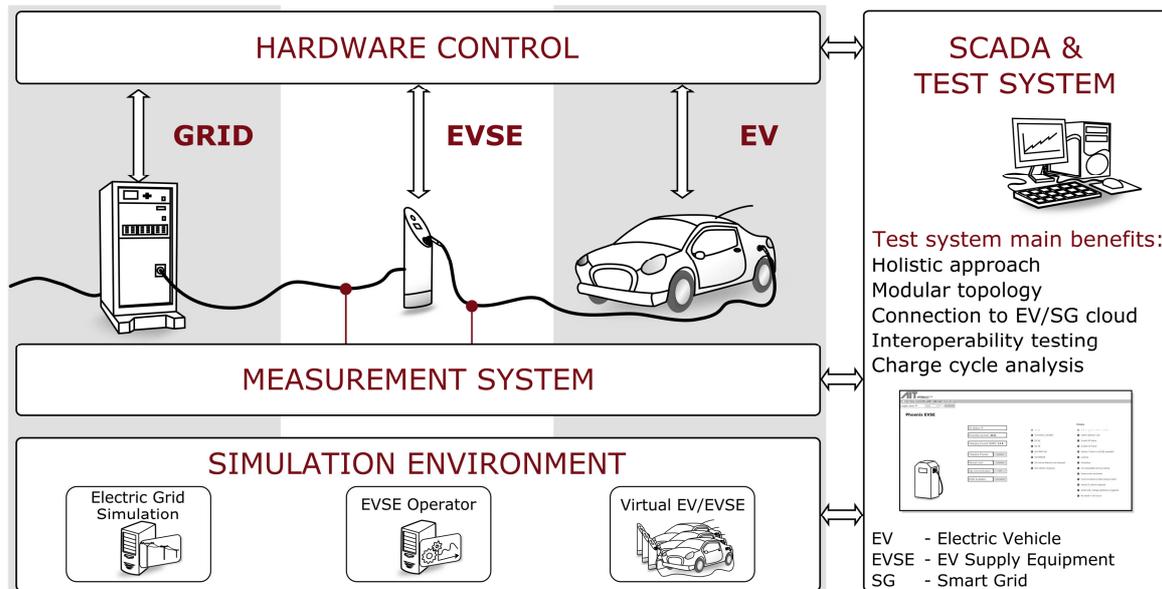


Abbildung 1: Architektur der FlexEVELab-Infrastruktur

Der obere Teil in Abbildung 1 besteht aus hardwarebasierenden Komponenten, welche im Labor die Beeinflussung des elektrischen Energiepfades erlauben. Dieser Bereich beinhaltet eine vollständig steuerbare Ladesäule, mit welcher der Ladevorgang eines Elektrofahrzeuges beeinflusst werden kann. Neben dem Starten bzw. Stoppen des Ladevorganges kann hier auch der maximal erlaubte Ladestrom vorgegeben werden. In der derzeitigen Implementierungsphase wird dazu das Kommunikationsprotokoll IEC 61851-1 zwischen Ladesäule und Elektrofahrzeug verwendet. Als Testobjekt (Device under Test) kann ein handelsübliches Elektrofahrzeug verwendet werden.

Um die elektrischen Eigenschaften während des Ladevorganges beeinflussen zu können nutzt diese Infrastruktur einen elektrischen Netzemulator. Dieser besteht aus drei einphasigen Leistungsverstärkern, die zu einem dreiphasigen Netz verschaltet werden. Mit einer maximaler Ausgangsleistung von 10 kW pro Phase, also 30kW gesamt, sowie deren Ansteuerung über eine Signalquelle lässt sich das dynamische Verhalten eines elektrischen Niederspannungsnetzes nachbilden. Diese steuerbare Spannungsquelle ermöglicht die phasenindividuelle Beeinflussung der Spannungshöhe und die Erzeugung transients Vorgänge, wie der Ausfall einer Phase oder ein abrupter Spannungseinbruch.

Der Hardwarebereich der Laborinfrastruktur wird mit Hilfe eines übergeordneten SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)-Systems überwacht und gesteuert. Dieses auf Open Source Software basierende System stellt Informationen aller angeschlossenen Kom-

ponenten übersichtlich dar. Ein eingebautes Messsystem erlaubt die Aufzeichnung von elektrischen Strom und Spannung während des Ladevorganges eines Elektrofahrzeuges. Dabei werden neben zeitlich niedrig aufgelösten RMS-Daten auch hochaufgelöste Informationen gesammelt, mit denen transiente Vorgänge untersucht werden können.

Das FlexEVELab ist auch an eine bestehende Simulationsumgebung angebunden [4]. Dabei kann ein elektrisches Niederspannungsnetz simuliert und die berechneten Daten zur Steuerung der Hardwarekomponenten benutzt werden. Diese Umgebung erlaubt das Verhalten des im Labor verwendeten Elektrofahrzeuges auf ein simuliertes Energienetz zu analysieren. Ebenso erlaubt diese Anbindung durch ihre hohe Flexibilität das Einbinden von zusätzlichen Aktoren in die Infrastruktur. Diese Aktoren tauschen zum überwiegenden Teil Daten über internetbasierenden Kommunikationstechnologien aus und dienen hauptsächlich der Verwaltung und Steuerung von Ladesäulen. Die Aufgaben dieser Aktoren reichen vom Management der Ladesäulen, wie die Reservierung, bis zur Ausführung sogenannter Smart Charging Algorithmen, wo der benutzte elektrische Strom für den Ladevorgang extern vorgegeben werden kann. Der EVSE- oder Ladesäulen-Operator oder ein Verteilnetzbetreiber (DSO) zählen zu diesen Aktoren.

Die hier beschriebene und im AIT SmartEST implementierte Laborinfrastruktur erlaubt verschiedene Betriebsmodi. Neben dem manuellen Betrieb, in dem die Daten händisch über die Bedienoberfläche des SCADA-Systems eingestellt werden können, erlaubt die Infrastruktur ein automatisiertes Ausführen von Tests. Dabei werden Testskripte verarbeitet, die einen vorgegebenen Ablauf beim Einstellen von Parametern steuern. Ebenso ist die Infrastruktur für eine Hardware-In-Loop-Simulation vorbereitet, bei der Daten zwischen Laborinfrastruktur und einer Simulation des elektrischen Energienetzes ausgetauscht werden können.

3 Simulationsinfrastruktur EVSim

EVSim ist ein multi-agentbasiertes Simulationsprogramm. Elektroautos sind mit Batteriespeicher, temperaturabhängigen Verbrauch, Steckertyp, sowie anderen Parametern modelliert, um unter anderem intelligente Ladestrategien testen und validieren zu können. Basierend auf statistischen Verkehrsdaten werden Interaktionen mit dem elektrischen Netz, intelligenter Ladesteuerung und Verkehrssituation dynamisch simuliert: Die Ladesteuerung ändert die Ladeleistung und daher die Spannung an der Ladesäule. Ebenso wird der Energieinhalt in der Batterie und damit die Reichweite in der Fahrtsimulation berechnet [5]. Offline und Echtzeit Simulationen sind möglich und somit können reale Prozesse angebunden werden, wie etwa für eine Controller-Hardware-in-the-Loop-Validierung [6], [7]. Abbildung 2 zeigt den schematischen Aufbau von EVSim. Je nach Szenario und Ladestrategie kann dem Austausch von Parametern zwischen EVSim und der Netzsimulation ein Lademanagement Modul zwischengeschaltet werden.

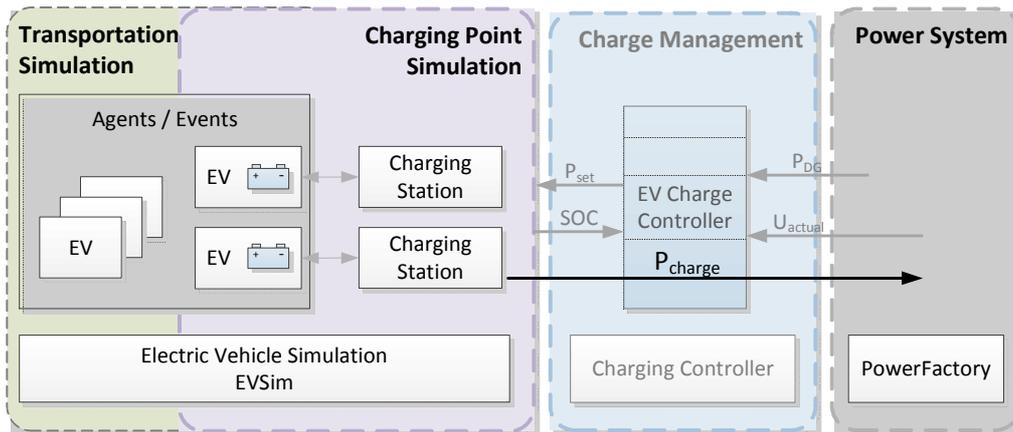


Abbildung 2: Architektur der Simulationsumgebung EVSim

Neben den wesentlichen technischen Werten, wie zum Beispiel dem aktuellen Lastwerten (P_{charge}), werden auch relevante Informationen im Hinblick auf die Berücksichtigung verschiedener Geschäftsmodelle (SLA – Service Level Agreement) abgebildet um, je nach Vertrag, einzelne Agenten priorisieren zu können. Eine detaillierte Beschreibung von EVSim wurde in [5] publiziert.

4 Kopplung der Simulation mit der Realität

Die Vorteile einer Kopplung der Laborinfrastruktur FlexEVELab mit der Simulationsinfrastruktur EVSim (siehe Abschnitt 3) gegenüber der bereits implementierten Simulation (siehe Abschnitt 2) liegen in der multi-agentenbasierenden Architektur und der umfangreiche Möglichkeit die Modelle der Elektrofahrzeuge zu parametrieren, sowie intelligente Ladestrategien einzubinden. Diese Vorteile überwiegen gegenüber der einfachen Netzsimulation des FlexEVELab. Durch die Kopplung dieser unabhängigen Infrastrukturen wird die Möglichkeit geschaffen das reale Verhalten von Elektrofahrzeugen, welche im Labor vermessen und getestet werden, auf mehrere simulierte Mittel- und Niederspannungsnetze mit je mehreren hundert Fahrzeugen zu skalieren.

Die zentrale Kommunikations- sowie Verwaltungskomponente der FlexEVELab-Infrastruktur stellt das verwendete SCADA-System dar. Diese Komponente erlaubt den Zugriff auf alle Steuerdaten der im Labor verwendeten Komponenten. Dabei können die Steuerdaten ausgelesen, beschrieben, sowie dargestellt werden. Die dafür verwendete Open-Source Software ScadaBr [8] stellt dafür eine Web Services-Schnittstelle zur Verfügung, um den Datenaustausch über internetbasierende Kommunikation zu ermöglichen. Diese Schnittstelle wird benutzt, um die Simulationsinfrastruktur EVSim mit dem FlexEVELab zu koppeln. Diese Möglichkeit der Kopplung wird ebenso bei der bereits implementierten Simulation (siehe Abschnitt 2) eingesetzt.

Die Simulationsinfrastruktur EVSim könnte sich direkt über diese Schnittstelle mit der Laborinfrastruktur verbinden. Trotzdem wurde für die Kopplung dieser beiden Infrastrukturen ein anderer Weg gewählt. Dabei wird eine zusätzliche Softwarekomponente dem System hinzugefügt. Diese Komponente fungiert als Konverter und stellt die Daten der Laborinfrastruktur der Simulationsumgebung zur Verfügung. Abbildung 3 zeigt die Architektur dieser Systemkopplung.

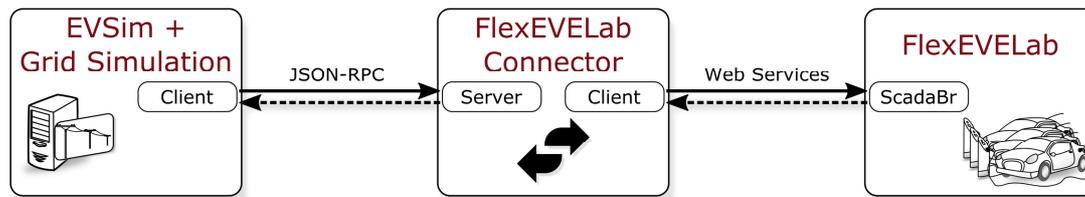


Abbildung 3: Architektur der Kopplungskomponente

Die Kommunikation zwischen dem SCADA-System der Laborinfrastruktur und dem Konverter basiert weiterhin auf der Web Services-Schnittstelle. Die Anbindung der Simulationssoftware EVSim und dem Konverter erfolgt über eine TCP-basierende Remote Procedure Call (RPC)-Schnittstelle. Dabei wird das JSON-RPC-Protokoll zur Kommunikation eingesetzt. Dieses Protokoll ist durch seine Einfachheit und der Klartextübertragung gekennzeichnet, welche besonders während der Parametrierung einer neuen Simulationsausführung hilfreich ist. Der Konverter implementiert den RPC-Server und stellt der Simulationsinfrastruktur EVSim verschiedene Methoden zur Steuerung der angeschlossenen Hardware im Labor zur Verfügung. Die Simulation hat für die Kommunikation einen RPC-Client implementiert, welcher während des Simulationsablaufes die Nachrichtenübertragung auslöst. Dadurch ist die Simulationsumgebung EVSim in der Lage berechnete Daten mit Hilfe des Konverters an die Laborumgebung zu übertragen.

Die Einführung einer speziell darauf ausgelegten Komponente zur Kopplung der beiden Infrastrukturen verschlechtert das Zeitverhalten beim Datenaustausch, da ein zusätzlicher Prozess während der Übertragung ausgeführt werden muss. Die wichtigen Zykluszeiten, die während des Ladevorganges eines Elektrofahrzeuges auftreten, liegen im Sekundenbereich. Daher kann diese Verschlechterung des Zeitverhaltens vernachlässigt werden.

Hingegen erhöht diese zusätzliche Komponente die Flexibilität der Architektur. Neue Teile bzw. Ladesäulen können schnell hinzugefügt oder entfernt werden. Ebenso lassen sich unterschiedliche Implementierungen einer Komponente parallel im System betreiben. Neben der beschriebenen Laborinfrastruktur FlexEVELab erlaubt der Konverter in Zukunft die Anbindung von weiteren EV-Ladestationen, welche über verschiedene Kommunikationsprotokolle angesteuert werden können. Zu diesen Protokollen zählen unter anderem das Open Charge Point Protocol (OCPP), die ISO 15118 oder die IEC 61850. Bei jeder Datenübertragung zwischen Simulationsumgebung und Konverter über das JSON-RPC-Protokoll wird eine Identifizierungsnummer übertragen. Dadurch kann der Konverter verschiedene Ladestationen gleichzeitig ansprechen, obwohl sie über verschiedene Kommunikationsprotokolle an das System angebunden sind. Durch diese Entkopplung kann das Verhalten mehrerer im Labor befindlicher Elektrofahrzeuge in einem komplexen simulierten Energienetz untersucht werden, für dessen Berechnung auch spezielle Computercluster zum Einsatz kommen können.

Die Verbindung mittels des erläuterten Konverters erlaubt eine Hardware-In-The-Loop-Simulation zwischen der im Labor angesteckten Elektrofahrzeuge, der elektrischen Energienetzsimulation DiGILENT PowerFactory [9] und der Simulationsinfrastruktur EVSim. Das zeitliche Verhalten des realen Elektrofahrzeuges im Labor, wie die virtuelle Ankunft an bzw. Abfahrt von der Ladestation, ist ebenfalls in der Simulationsumgebung hinterlegt. EVSim steuert den zeitlichen Ablauf der Simulation, welche neben einer 1:1 skalierten „Echtzeit“

auch die Möglichkeit hat, die Ablaufgeschwindigkeit adaptiv, zu Zeiten in der das reale Fahrzeug nicht geladen wird, zu beschleunigen (offline Simulation). Das Konzept einer sogenannten multi-rate Simulation wird nachfolgend anhand der Ankunft des Elektrofahrzeuges an der Ladesäule bzw. den Zyklus während des Ladevorganges erläutert.

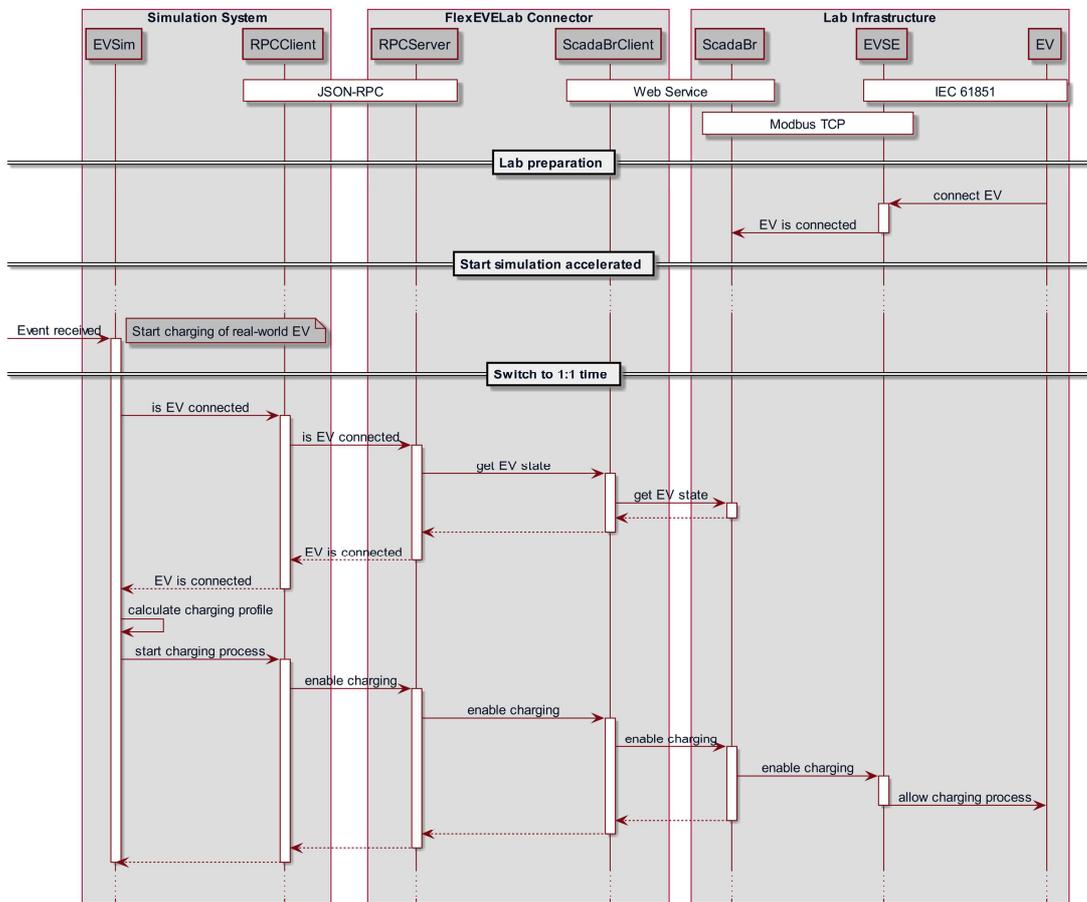


Abbildung 4: Ablaufdiagramm für den Beginn eines Ladevorganges

Abbildung 4 zeigt den schematischen Ablauf beim Verbinden des Elektrofahrzeuges mit der Simulation. Noch vor der Simulation muss ein Elektrofahrzeug an die Laborinfrastruktur angeschlossen werden. Das System erkennt das Fahrzeug, verhindert aber noch den Ladevorgang. Anschließend kann die Simulation mit einer beschleunigten Ausführung gestartet werden. Die Simulation läuft so lange beschleunigt (offline), bis in den Simulationsdaten das Ereignis (Event) zum Laden des angeschlossenen Fahrzeuges auftritt. Daraufhin wird die Ausführungsbeschleunigung mit der Echtzeit synchronisiert und die Simulation läuft in 1:1 skaliert Zeit mit der Realität. Danach überprüft die Simulation, ob tatsächlich ein reales Fahrzeug an der realen Ladestation im Labor angeschlossen ist. Es berechnet das Profil des Ladevorganges und startet anschließend den Ladevorgang an der realen Ladesäule.

Während des Ladevorganges werden zyklisch Informationen zwischen der Simulation und der Laborinfrastruktur ausgetauscht. Dieser Zyklus wird in Abbildung 5 dargestellt. Die aktuellen Leistungen des Ladevorganges werden vom Messsystem der Laborinfrastruktur gemessen. Diese gemessenen Werte liest die Simulationsumgebung aus und leitet sie an die Energienetzsimulation weiter. Diese berechnet anschließend die Spannungen im simulierten Energienetz. Die Spannung am virtuellen Knotenpunkt der Ladestation in der Simulation wird

zurück an die Laborinfrastruktur übermittelt, wo sie als Vorgabewert für den Leistungsverstärker verwendet wird. Dieser beeinflusst die reale Versorgungsspannung der Ladesäule bzw. des angeschlossenen Elektrofahrzeuges. Ebenso werden die in der Simulation berechneten Werte für die Regelung der Ladeleistungen herangezogen. Der im EVSim implementierte Regler berechnet aufgrund der Netzverhältnisse die entsprechenden Ladeströme der Elektrofahrzeuge. Diese Stromwerte werden ebenfalls der Laborinfrastruktur übermittelt und an der Ladesäule eingestellt. Dabei handelt es sich nach der Definition im Standard IEC 61851 um den maximal Ladestrom, den ein Elektrofahrzeug für den Ladevorgang verwenden darf.

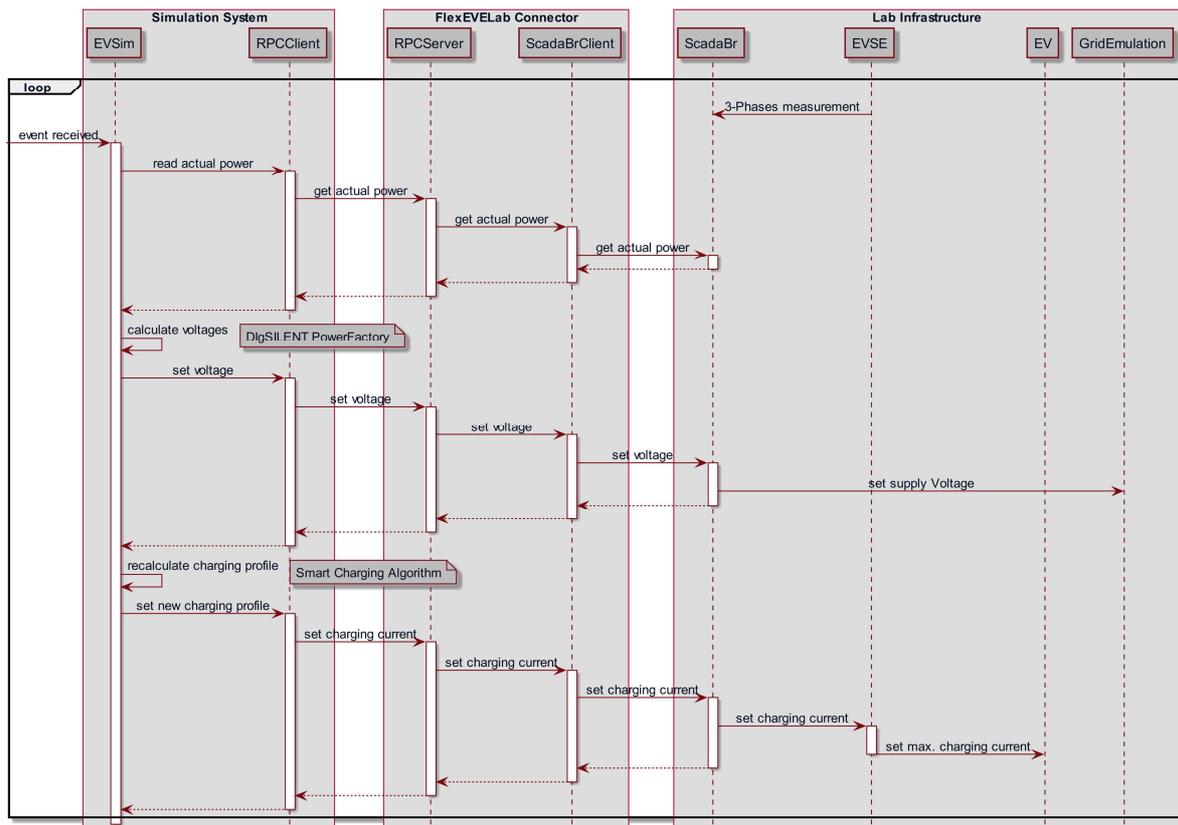


Abbildung 5: Ablaufdiagramm für einen Simulationsschritt während eines Ladevorganges

Die eigens dafür entwickelte Konverter-Komponente ermöglicht eine flexible und leicht zu konfigurierbare Verbindung zwischen der Simulationsinfrastruktur EVSim und der im Labor befindlichen Ladesäulen bzw. der Elektrofahrzeuge. Die damit entstehende Hardware-In-The-Loop-Architektur wird im Folgenden für die Ausführung von verschiedenen Szenarien eingesetzt.

5 Testsznarien

Zur Demonstration der hybriden Simulations-Test-Umgebung FlexEVElab wurde ein typischer Anwendungsfall von gesteuertem Laden zur Steigerung der Direktnutzung von Eigenenerzeugung aus PV gewählt. Der Testfall umfasst die folgenden Teile:

- Typisches Niederspannungsnetz, bzw. Struktur
- Realistische Bedarfsprofile der Haushalte

- Unsymmetrische Berechnung (Dreiphasen / 4-Leiter Darstellung)
- Ladung simulierter Elektroautos (typische Wegketten und daraus resultierender Energiebedarf)
- Ladung eines realen Autos inklusive Kommunikation über standardisierte Protokolle
- Steuerung des Ladevorgangs in Abhängigkeit der erzeugten Leistung, mit dem Ziel nur (eigenerzeugte) erneuerbare Energie zu verwenden.

Das wesentliche Ziel dieser Untersuchung sind die Möglichkeiten der realen Komponente des Elektrofahrzeugs (sowie Ladesäule) auf dynamische Vorgabewerte zu reagieren und die daraus entstehenden Auswirkungen darzustellen.

Aufgrund des Wesens der gekoppelten Simulation (Co-Simulation) ohne iterativen Prozess der Lösung der Modellgleichungen – zum Beispiel Synchronisation über die Simulationszeit oder Echtzeit – entstehen Fehler in Abhängigkeit der Schrittweite [10]. Sind die zeitlichen Dynamiken der Modelle vernachlässigbar innerhalb eines Zeitschritts (quasi-stationär) ist auch der Fehler im Allgemeinen sehr gering. Wird die Kopplung zusätzlich über die Echtzeit synchronisiert, ist die Schrittweite der gekoppelten Simulation abhängig von der Dauer die für die Lösung der Gleichungssysteme benötigt wird (Rechenzeit) sowie des maximalen Fehlers durch Verzögerung der Propagation der Lösung des vorangegangenen Schritts.

Besonders im Hinblick auf unterschiedliche Konfiguration der Szenarien (Einspeiseleistungen, Reglerparameter, etc.) entsteht die Anforderung an beschleunigte Testläufe. Die in der Zeit skalierten Größen der Momentanwerte (z.B.: Leistungen, Spannungen) bleiben dabei unverfälscht, die Zeitintervall abhängigen Größen (z.B.: Energie, Ladung) müssen umgerechnet d.h. ebenfalls skaliert werden.

Im speziellen Fall dieser Untersuchung wurden die Lastprofile eines Tages (1440 Minuten) auf 144,4 Sekunden skaliert (eine Sekunde in der Simulation entsprechen 10 Minuten). Zusätzlich lassen sich über die Simulationsschrittweite (z.B.: 5 Minuten) die Auflösung und Genauigkeit steuern, bzw. durch Anpassen der Zeitskalierung eventuelle Verzögerung durch Kommunikation innerhalb eines zeit-diskreten Schritts berücksichtigen [11]. Für diesen Test wurde die Echtzeit (144,4 Sekunden) nochmals um den Faktor 4 verzögert um durch die auftretenden Kommunikationsverzögerungen keine systematischen Fehler zu verursachen. 4 Sekunden in der realen Zeit bedeuten 10 Minuten in der Simulationszeit.

Im Folgenden sind nur die Profile des realen Elektroautos dargestellt.

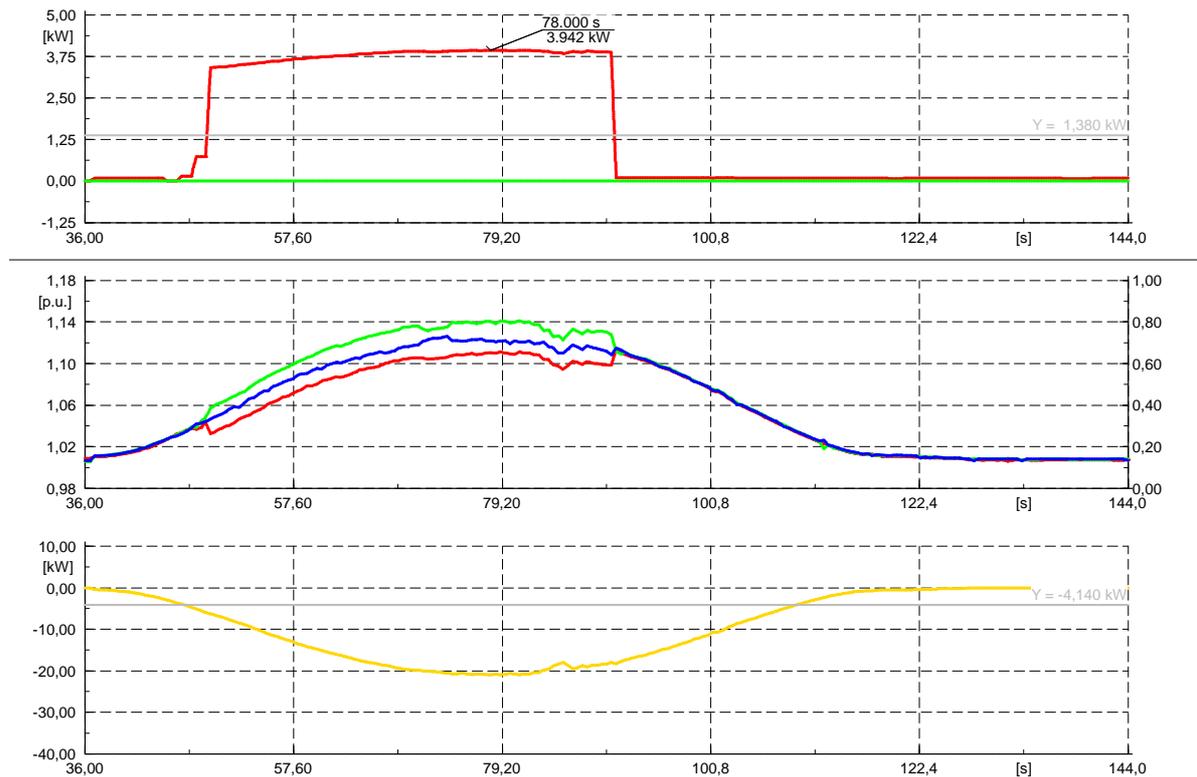


Abbildung 6: Resultierende Profile a) tatsächlich gemessenes gesteuertes Ladeprofil an der Ladesäule in die Simulation übertragen (1 phasiges Elektroauto) b) resultierende simulierte Spannungen an der Ladesäule (Asymmetrien) c) PV Profil (sonniger Tages) als Eingabe für die Ladesteuerung.

5.1 Gesteuertes Laden bei PV Erzeugung an einem sonnigen Tag

Die Ladeleistung wird vom intelligenten Ladealgorithmus dynamisch an die vorhandene Einspeisung angepasst. Abbildung 6 zeigt die resultierenden Profile für den zeitskalierten Testlauf. Das erste Diagramm zeigt die tatsächlich gemessenen Leistungen (Ströme) an der Ladesäule, welche in die Netzsimulation übertragen werden und als Last in der unsymmetrischen Leistungsflussberechnung gerechnet wird. Nach etwa zwei Drittel der Zeit ist das Auto vollständig geladen und damit ist der Ladevorgang abgeschlossen.

Die mittlere Abbildung zeigt den typischen ansteigenden Spannungsverlauf durch eine (relativ große) PV Anlage (und einer relativ kleinen Kurzschlussimpedanz an diesem Verknüpfungspunkt). Zu sehen ist die Sternpunktverknüpfung (und die damit verbundene Anhebung einer Phase) durch die einphasige Belastung.

Das untere Diagramm zeigt eine (ideale) PV Einspeisung, die der Ladesteuerung (Übertragung nach EVSim) zur Vorgabe des Ladestroms dient.

5.2 Gesteuertes Laden bei PV Erzeugung an einem wolkigen Tag

Abbildung 7 zeigt im oberen Diagramm die Ladeleistung die tatsächlich an der Ladesäule gemessen wurde und in der Netzberechnung zu jedem Schritt übernommen wird.

Aufgrund der geringen Einspeisung wird das Auto nur zu Beginn geladen. In weiterer Folge kommt kein Laden mehr zustande. Dieses Verhalten hat mehrere Gründe, die im nächsten Abschnitt diskutiert werden.

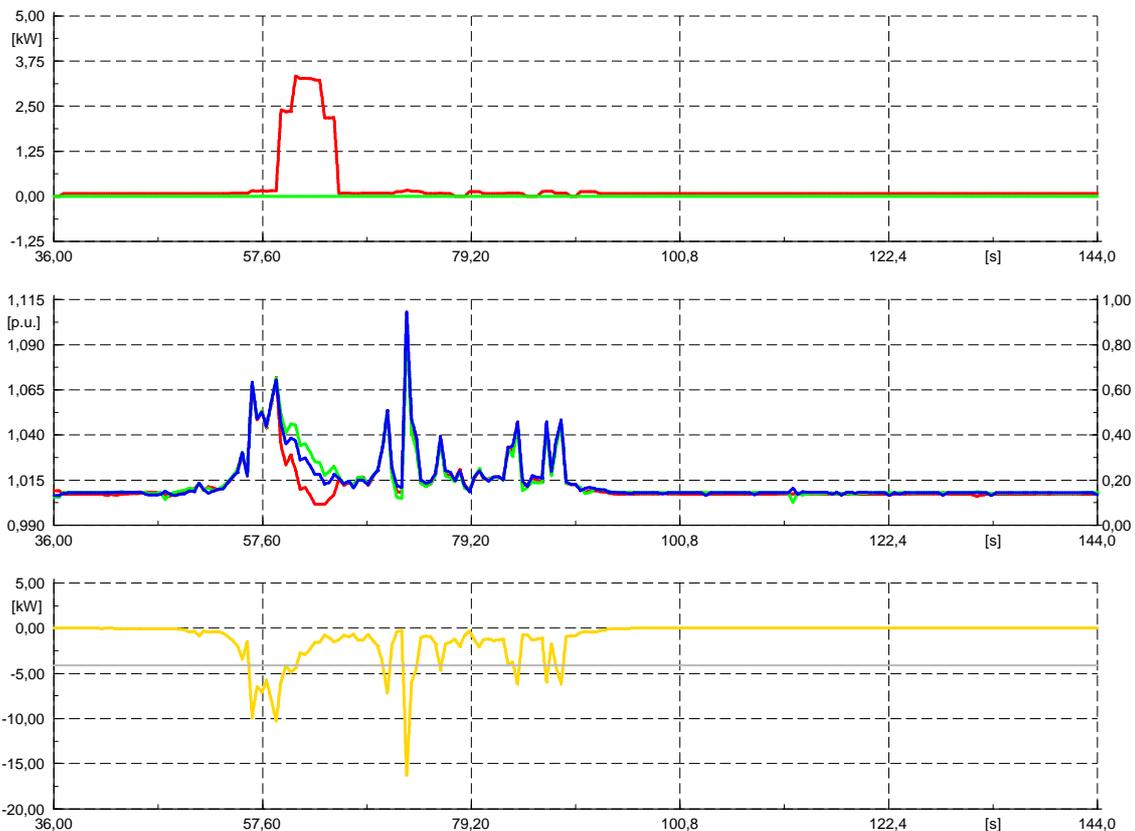


Abbildung 7: Resultierende Profile a) tatsächlich gemessenes gesteuertes Ladeprofil an der Ladesäule und in die Simulation übertragen b) resultierende simulierte Spannungen an der Ladesäule c) PV Profil (wolkiger Tag) als Eingabe für die Ladesteuerung.

5.3 Erkenntnisse aus der Kopplung mit realen Komponenten

Folgendes muss für die oben skizzierten Tests und für die Kopplung beachtet werden.

Beschleunigte Echtzeit: Um die Simulationszeit zu verkürzen wurde die Echtzeit skaliert. In der Abbildung 6 ist dabei deutlich zu erkennen, dass die real gemessene Leistungsaufnahme eine Rampe aufweist. Diese ist auf die Hersteller eigene Implementierung des Ladereglers zurückzuführen. Dabei handelt es sich um eine ca. 10-15 Sekunden andauernde reglerinternen Rampe. In dieser sehr schnell beschleunigten Echtzeit führt sie aber zu Verzögerungen bei der Einstellung des Sollwerts. Die beschleunigte Simulationszeit muss daher auf solche Phänomene angepasst werden.

Mindest-Ladestrom: Technologiebedingt benötigen viele Laderegler einen Mindeststrom, um mit dem Ladevorgang zu beginnen. In diesem Falle schaltet sich der Regler erst ab 6 Ampere Sollwertvorgabe ein. D.h. In Verbindung mit einer Optimierung der Direktnutzung der Erzeugung muss eine Strategie für die Unterschreitung des Mindestsollwerts realisiert werden. Dies betrifft auch das verwendete Simulationsmodell. Hier kann keine kontinuierliche

Ladesteuerung über den gesamten Strombereich simuliert werden, da in der Realität dieser nicht zur Verfügung steht.

6 Diskussion

Die hier beschriebene Kopplung der Simulationsinfrastruktur EVSim mit der Laborinfrastruktur FlexEVELab beruht auf einer zusätzlich entwickelten Softwarekomponente bzw. Adapter. Diese zusätzliche Komponente verschlechtert das Zeitverhalten beim Datenaustausch zwischen den beiden Infrastrukturen. Diese zusätzliche Zeitverzögerung spielt aber nur eine untergeordnete Rolle in dem normalerweise betrachteten Zeitbereich der Untersuchungen. Die Kommunikationsverzögerung beruht auf der Tatsache, da die Kommunikation zwischen dem eingebauten Controller in der Ladesäule und dem SCADA-System auf Modbus TCP basiert. Um hier den eingebauten Controller nicht zu überfordern, wurde eine niedrige Zykluszeit der Kommunikation von einer halben Sekunde gewählt.

Trotz des schlechteren Zeitverhaltens und des größeren Aufwandes bei der Implementierung und der Parametrierung wurde der Ansatz mit einer zusätzlichen Komponente gewählt, um eine bessere Abstraktion bei der Anbindung von Hardware zu ermöglichen. Dadurch können weitere Ladesäulen mit unterschiedlichen Kommunikationsprotokollen auf einfache Weise eingesetzt werden.

Bei der Hardware-In-The-Loop-Simulation mit Elektrofahrzeugen treten Hindernisse bei der Reproduzierbarkeit von Simulationen auf. Da Elektrofahrzeuge über einen Speicher verfügen sind sie nicht zustandslos und der Anfangszustand am Beginn der Simulation kann oft nur schwer eingestellt werden. Für die Untersuchung und Simulation des Ladeverhaltens kann dabei nur der Zustand einer vollständig entleerten Batterie als reproduzierbarer Zustand angenommen werden, welcher in der Realität nicht immer erreicht werden kann.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde die Kopplung von realer Hardware und simulierter Umgebung realisiert, um die Analyse der Auswirkung des gesteuerten Ladevorgangs auf das elektrische Netz zu ermöglichen. Dabei steht vor allem das Verhalten realer Komponenten im Vordergrund, um diese als validierte Modelle in der Simulation zu integrieren. Durch die geschlossene Kopplung der Komponenten im Hardware-in-the-loop und der Simulation können reale Bedingungen in die Netzsimulation übertragen werden um dort die Interaktion mit Ladesteuerungen zu analysieren.

Der derzeitige Implementierungsgrad des FlexEVELab und seiner Kopplung mit der EV-Sim Softwareumgebung entspricht dem eines ersten Funktionsprototypen oder Labordemonstrators. In der ersten Ausführung wurden die grundlegenden Funktionen getestet und validiert. Eine ganz klare Zielsetzung des weiteren Ausbaus des FlexEVELab ist es, derzeit gängige, oder zukünftig relevante Protokolle und Standards für die Kommunikation mit dem Elektrofahrzeug zu implementieren. Die drei vorrangigen Kommunikationsprotokolle hierunter sind: OCPP, IEC 61850, IEC 15118.

Ein weiterer Fokus im Ausbau des FlexEVELab liegt in der Integration weiterer Hardware. Derzeit wird die FlexEVELab Umgebung als Single Input, Single Output (SISO) HIL-

Umgebung genutzt. Durch die gleichzeitige Verwendung von mehreren Ladesäulen, mitunter auch an verschiedenen Netzknoten angeschlossen, soll das FlexEVELab als Multiple Input, Multiple Output (MIMO) HIL-Umgebung nutzbar gemacht werden. In der ersten Ausbaustufe hiervon werden drei Ladesäulen gleichzeitig sowohl in Leistung als auch in Kommunikation angesteuert. Das FlexEVELab ist derzeit Teil der Infrastruktur des Forschungsprüfstandes im SmartEST Labor. Um eine Erweiterung der nutzbaren Ladeleistung zu ermöglichen muss die FlexEVELab Umgebung in den auch kommerziell genutzten Bereich des SmartEST portiert werden. Dort steht dann eine gesamte Anschlussleistung von bis zu 900 kW zur Verfügung. Im Zuge weiterer Projektarbeiten und Forschungstätigkeiten wird das Portfolio an unterstützten und durchgeführten Szenarien ständig weiterwachsen.

Das FlexEVELab bietet derzeit eine umfassende Forschungsinfrastruktur für die Evaluierung der Netzintegration von Elektromobilität, mit der sowohl komponentenbasierte als auch systemtechnische Fragestellungen behandelt werden können.

Danksagung

The research leading to these results was part of the FP7 projects Plan-GridEV and COTEVOS and has received funding from the European Union Seventh Framework Program (FP7/2007-2013) under grant agreement No. 608957 and No. 608934.



Literatur

- [1] McKinsey & Company, “Evolution, Electric Vehicles in Europe: gearing up for a new phase?,” 2014.
- [2] “COTEVOS – Developing Capacities for Electric Vehicle Interoperability Assessment,” Jan-2016. [Online]. Available: <http://cotevos.eu/>. [Accessed: 12-Jan-2016].
- [3] F. Lehfuss, M. Nöhrer, M. Faschang, S. Ledinger, and F. Kupzog, “Comprehensive Infrastructure for Electric Vehicle Charging Interoperability and Grid Compliance Testing,” in *DerLabJournal*, 2016.
- [4] M. Faschang, M. Nöhrer, J. Stöckl, and F. Kupzog, “Extensible Co-Simulation Framework for Electric Vehicle Charging Infrastructure Testing,” in *2014 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm): Architectures, Control, and Operation for Smart Grids, Microgrids and Distributed Resources*, Venice, Italy, 2014.
- [5] M. Stifter, S. Übermasser, and S. Henein, “Agent-Based Impact Analysis of Electric Vehicles on a Rural Medium Voltage Distribution Network Using Traffic Survey Data,” in *Highlights on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems*, J. M. Corchado, J. Bajo, J. Kozlak, P. Pawlewski, J. M. Molina, V. Julian, R. A. Silveira, R. Unland, and S. Giroux, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 405–416.
- [6] M. Stifter and S. Übermasser, “Dynamic simulation of power system interaction with large electric vehicle fleet activities,” in *PowerTech (POWERTECH), 2013 IEEE Grenoble*, 2013, pp. 1–6.
- [7] M. Stifter, A. Pacher, B. Bletterie, and S. Übermasser, “Betrachtung der Netzanschlussleistung eines Parkhauses bei kontrollierter Ladung von Elektrofahrzeugen,” in *13. Symposium Energieinnovation*, 2014.

- [8] “ScadaBR,” 2015. [Online]. Available: <http://www.scadabr.com.br/>.
- [9] “DIgSILENT PowerFactory,” 2016. [Online]. Available: <http://www.digsilent.de/index.php/products-powerfactory.html>.
- [10] M. Geimer, T. Krüger, and P. Linsel, “Co-Simulation, gekoppelte Simulation oder Simulatorkopplung? Ein Versuch der Begriffsvereinheitlichung,” *OP Ölhydraul. Pneum.*, vol. 50, no. 11–12, pp. 572 – 576.
- [11] M. Stifter, R. Schwalbe, F. Andren, and T. Strasser, “Steady-state co-simulation with PowerFactory,” in *2013 Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES)*, 2013, pp. 1–6.