Mikrocontroller-gesteuerter Netzanschlusspunkt-Demonstrator für ein modulares Netz- und Kommunikationslabor

Andreas Stadler*, Maik Plenz, Detlef Schulz
Professur für Elektrische Energiesysteme
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
Hamburg, Deutschland
*andreas.stadler@hsu-hh.de

***Kurzfassung* – Durch den Zubau von erneuerbaren Energieerzeugern und Ladeinfrastruktur für die Elektromobilität in den Niederspannungsnetzen wird das elektrische Energieversorgungssystem immer stärker belastet. Die dabei entstehenden Überlastungen machen eine zukünftige Steuerung des Last- und Lademanagements zur intelligenten Reduktion der Netzbelastung notwendig. Zur Entwicklung dieser Steuerung entsteht im Projekt „Durchgehend digital gesteuerte Netz- und Ladeinfrastruktur für Land-, Luft- und Wasserelektromobilität" (dtec emob) ein Mikrocontroller-basierter Netzanschlusspunkt-Demonstrator. Basierend auf einzelnen Erzeuger- und Verbrauchermodulen können unterschiedlich konfigurierte Netzanschlusspunkte mit verschiedenen internen Steuerungszielen dargestellt werden. Die Integration von realen Messsystemen und die Skalierung der Lasten ermöglicht die Entwicklung mit realen Eingangssignalen. Dieser Bericht beschreibt das Konzept und zeigt beispielhaft einen Aufbau bestehend aus je einem PV-, Haushaltslast-, Elektromobilitäts- und Energiemanagementmodul.**

Stichworte – Netzlabor, Lastsimulation, Demonstrator, Netzanschlusspunkt, dtec.bw

NOMENKLATUR

dtec emob	Durchgehend digital gesteuerte Netz- und Ladeinfrastruktur für Land-, Luft- und Wasserelektromobilität
EMS	Energiemanagementsystem
EMT	Elektromobilitätsträger
LIS	Ladeinfrastruktur
A in m²	Fläche der PV-Anlage
c_{EV1}, c_{EV3} in W	Ladeleistungskonstanten des Elektroautos am Anfang und Ende des Ladevorgangs
c_{EV2} in W/%	Konstante für den SOC abhängigen Abfall der Ladeleistung
c_{EV4} in W	Maximale Leistung des E-KFZ im Rückspeisebetrieb
c_{PV}	PV-Anlagenspezifischer Vorfaktor
E_{PV} in W/m²	Solarstrahlung
$i_{\mathrm{m,H}}$, $i_{\mathrm{m,T}}$ in A	Gemessener Strom: im Smart Meter eines Haushalts und im Transformatorabgang
P_{ges} , $P_{\mathrm{a,ges}}$ in W	Gesamte und angefragte Leistung aller unter dem Netzanschlusspunkt angeschlossenen Komponenten
P_{EV}, $P_{\mathrm{EV,b}}$, $P_{\mathrm{EV,g}}$, $P_{\mathrm{EV,u}}$ in W	Leistungen des simulierten Elektroautos, rückspeisenden, gesteuerten und ungesteuerten
$P_{\mathrm{g,max}}$ in W	Vorgegebene maximale Ladeleistung des Ladepunktes
P_{PV} in W	Leistung der simulierten PV-Anlage
s_{L}, s_{R}	Logische Zustände für das Laden mit reduzierter Leistung und das Rückspeisen
SOC, SOC_0, $SOC_{\mathrm{b,min}}$, SOC_{S1}, SOC_{S2}, SOC_{Ziel} in %	Ladezustand („State of charge"), Ausgangsladezustand, Mindestladezustand, Ladezustand 1 und 2 der Umschaltpunkte der Ladekurve, Zielladezustand
t, t_0 in s	Zeit, Ladebeginn
$t_{\mathrm{EV,ges}}$, $t_{\mathrm{EV,min}}$ in s	Gesamte Standzeit des Elektroautos und minimale Standzeit für die Ladung
t_{x} in s	Betrachteter Zeitschritt im Ablaufdiagramm
$u_{\mathrm{m,H}}$, $u_{\mathrm{m,T}}$ in V	Gemessene Spannung: am Smart Meter eines Haushalts und am Transformatorabgang

I. EINLEITUNG

Für das Einhalten der Klimaschutzziele Deutschlands und der Europäischen Union werden konventionelle Kohle- und Atomkraftwerke durch regenerative, dezentrale Erzeuger ersetzt. Bedingt durch die hohe Fluktuation der verfügbaren Wind- und Sonnenenergie kommt es deshalb zu hohen Gradienten und Dynamiken in der Energieerzeugung.

Zusätzlich wird das Netz durch die hinzukommenden Verbraucher im Bereich der Wärmepumpen und der Elektromobilität stark belastet. Beide Verbraucher benötigen

DOI: 10.24405/14588

jeweils in Abhängigkeit von der Nutzung und Auslegung teilweise zweistellige Kilowatt Bezugsleistungen. Dies übertrifft die typische Leistung eines Anschlusspunktes. Ein hoher Gleichzeitigkeitsfaktor durch beispielsweise gleichzeitiges Arbeitsende und ähnliche Wärmebedarfe führt dabei zu hohen Be- bzw. Überlastungen.

Um die fluktuierende Erzeugung und die neuen Verbraucher in einem stabilen Netz betreiben zu können werden komplexe Steuerungen nötig. Ein zentraler Baustein dabei ist das bisher kaum geregelte Niederspannungsnetz. Mithilfe von Energiemanagementsystemen sollen Erzeugung und Verbrauch gekoppelt werden. Im Projekt „Durchgehend digital gesteuerte Netz- und Ladeinfrastruktur für Land-, Luft- und Wasserelektromobilität“ (dtec emob) wird ein KI-basiertes Last- und Lademanagementsystemen zur Integration der Elektromobilität in das Verteilnetz, hier beispielhaft im Raum Hamburg, entwickelt. Dafür werden verschiedene Ladeinfrastrukturen und Elektromobilitätsträger, sowie deren gegenseitige Rückwirkungen und Steuerungsmöglichkeiten untersucht.

Zur Erprobung und Validierung der entwickelten Messmethodik und der Steuerung sowie der Kommunikation zwischen Steuersystem und Netzkomponenten entsteht im Projekt dtec emob ein modularer Demonstrator mit skalierten Lasten. Die einzelnen Module werden in verschiedenen Kombinationen und Parametrierungen vervielfältigt und zu „Netzanschlusspunktmodulen“ zusammengesetzt. In einem Laboraufbau werden mit einem Modul je Netzanschlusspunkt verschiedene Netzstrukturen und Netztopologien dargestellt. Durch die Nutzung von realer Messhardware und von realen Kommunikationsprotokollen kann die Entwicklung realitätsnah in einer abgesicherten Umgebung erfolgen.

In diesem Beitrag wird ein Konzept für den Aufbau, die Programmierung und die Kommunikation beschrieben. Anhand eines Netzanschlusspunktmoduls bestehend aus einem PV-Modul, einem Haushaltslastmodul, einem Elektromobilitätsmodul für Ladeinfrastruktur (LIS) und Elektromobilitätsträger (EMT) sowie einem internen Steuermoduls werden die Signale und Ergebnisse beispielhaft gezeigt.

Dieser Beitrag ist wie folgt gegliedert: In Kapitel II werden der theoretische Hintergrund und das Konzept der für den Aufbau verwendeten Methodik beschrieben. Die einzelnen Bestandteile und die Zusammenführung zu einem Netzanschlusspunktmodul sind in Kapitel III erklärt. Kapitel IV gibt einen Ausblick auf den weiteren Aufbau des Demonstrators und geplante Erweiterungen.

II. Theoretische Betrachtung und Konzept

An Netzanschlusspunkten in der Niederspannungsebene sind Verbraucher und Erzeuger mit unterschiedlichen Verhaltensmustern angeschlossen. Diese können nach ihrer Steuerbarkeit in drei Kategorien eingeteilt werden: ungesteuert, privat gesteuert und extern gesteuert.

Bei ungesteuerten Verbrauchern und Erzeugern wird die Leistungsaufnahme bzw. -abgabe nicht von außerhalb des Gerätes geregelt. Die bezogene bzw. abgegebene Energie ist zeitlich nicht verschiebbar. Hierzu zählen klassische Haushaltslasten wie Kühlschränke oder Durchlauferhitzer. In ihrer Leistungseinspeisung nicht beeinflusste Solaranlagen sind ein Beispiel für ungesteuerte Erzeuger.

Privat gesteuerte Verbraucher und Erzeuger können durch den Besitzer selber geregelt werden. Im Haushaltsbereich zählen z. B. Wasserboiler mit Speicherfunktion in diese Kategorie. Beispiele für Erzeuger sind Energiespeicher, die mit verschiedenen Zielen, wie der Lastspitzenkappung, eingesetzt werden. Die private Steuerung erfolgt üblicherweise aufgrund von externen Anreizen wie flexible Strompreise oder Leistungsbeschränkungen.

Extern gesteuerte Verbraucher und Erzeuger können zusätzlich zu einer privaten Regelung auch von außerhalb gesteuert werden. Extern gesteuerte Verbraucher können beispielsweise Wärmepumpen oder Elektroautos sein. Klassische extern gesteuerte Erzeuger sind abregelbare PV-Anlagen. Gründe für eine externe Leistungssteuerung liegen meist in der verfügbaren Netzkapazität, bei hohen Leistungen kann auch die Netzstabilität durch eine Über- bzw. Unterverfügbarkeit der elektrischen Energie gefährdet sein.

In der Praxis werden, aufgrund von Marktpotenzialen bei der Bereitstellung von Flexibilitäten, Haushaltsgeräte aus der „nicht gesteuerten“-Kategorie in die „privat gesteuerte“-Kategorie verschoben. Ein aktuelles Beispiel ist die „intelligente“ Waschmaschine mit der Einstellungsmöglichkeit, den Waschvorgang erst bei hoher Energieverfügbarkeit zu starten.

Falls eine Steuerung der Verbraucher und Erzeuger erfolgt, wird diese durch Anschlusspunkt-interne und -externe Energiemanagementsysteme (EMS) umgesetzt. Interne EMS von Haushalten haben üblicherweise das Ziel der Eigenverbrauchsoptimierung, der Kostenreduktion des gekauften Stroms und der Steigerung des Komforts. Externe EMS werden beispielsweise von Netzbetreibern eingesetzt um Überlastungen von Netzkomponenten zu vermeiden oder auszugleichen.

Bei der theoretischen Entwicklung von EMS muss eine Unterscheidung zwischen simulativ möglichen und realen Informationsflüssen erfolgen. Damit die Regelung des EMS auch in der Realität zu sinnvollen Ergebnissen führt, sollten nur reale Informationsflüsse und die daraus ableitbaren Informationen verwendet werden.

Beispielsweise kann simulativ der Energieverbrauch von jedem Haushaltsgerät erfasst und für das EMS genutzt werden. In einem realen Haushalt müsste dafür Messequipment vor jedem Gerät integriert werden. Dieses Messverfahren wird als „intrusive load monitoring“ bezeichnet [1] und aufgrund der Kosten und der Komplexität in Haushalten nicht umgesetzt. Hier müssen geeignete Berechnungsverfahren eingesetzt werden um aus der Gesamtlast auf einzelne aktive Geräte rückschließen zu können (z. B. non-intrusive load monitoring [2]).

Mithilfe von Laboraufbauten werden die verschiedenen primären Informationsflüsse und die daraus ableitbaren weiteren Informationen analysiert. Dabei wird die Notwendigkeit, die Qualität und die optimale Datenverfügbarkeit untersucht.

In Abbildung 1 ist das Konzept eines Netzanschlusspunktmoduls und der Anbindung in das Gesamtsystem dargestellt. Dabei sind Mikrocontroller-basierte Simulationen in schwarz und der elektrische Anschluss in rot dargestellt. Die drei Komponenten „Haushaltslasten“, „PV-System“ und „LIS und EMT“ bekommen die benötigten Informationen zur

Leistungsberechnung wie z.B. das Wetter und die Ladezustände (SOC_0 , SOC_{Ziel}) als Eingangsgrößen vom Informationsmodul. Der darauf basierende simulierte elektrische Bedarf wird addiert und mithilfe eines Lastmoduls elektrisch dargestellt. Ein intelligentes Messgerät (Smart-Meter) misst Strom $i_{\text{m,H}}$ und Spannung $u_{\text{m,H}}$ und führt diese in das interne EMS als Feedback-Schleife zurück. Dieses gibt darauf basierend für die steuerbaren Bestandteile das Steuersignal vor. Das externe EMS erhält Signale über den Energiebedarf des Anschlusses durch das Smart-Meter und ein Messgerät ($i_{\text{m,T}}$, $u_{\text{m,T}}$) am Transformatorabgang. Zudem werden das Wetter und der Strompreis von dem Informationsmodul übertragen. Je nach betrachtetem Szenario können auch Informationen vom LIS und EMT-Modul übertragen werden.

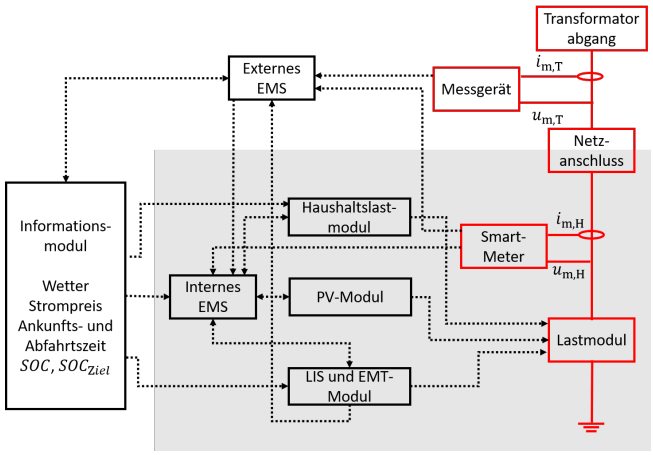

ABBILDUNG 1: AUFBAU EINES NETZANSCHLUSSPUNKTMODULS EINES HAUSHALTS (GRAUER HINTERGRUND) UND DER ANBINDUNG IN DAS GESAMTSYSTEM; SCHWARZ: SIMULIERTE ELEMENTE; ROT: ELEKTRISCHE ANBINDUNG; GEPUNKTET: INFORMATIONSFLUSS.

III. BESTANDTEILE UND AUFBAU DES NETZANSCHLUSSMODULS

Durch die unterschiedlichen Bestandteile und Lastverhalten verschiedener Erzeuger und Verbraucher gibt es eine Vielfalt von Modulen, die im Laufe des Projekts dtec emob erstellt werden. Die beschriebenen umgesetzten Module stellen dabei die Grundlagen und den Ansatz für das weitere Vorgehen dar.

Um die mathematischen Grundlagen der einzelnen Module des Gesamtsystems einheitlich zu beschreiben, sind die im Folgenden erklärten Leistungen und Energien gemäß dem Verbraucherzählpfeilsystems angegeben. Dabei sind von den angeschlossenen Komponenten aufgenommene Leistungen P positiv dargestellt. Ins Netz eingespeiste Leistungen sind negativ dargestellt.

1) PV-Modul

Die Leistung einer PV-Anlage ist von verschiedenen Parametern abhängig. Zentrale äußere Einflüsse sind die Solarstrahlung und der Einstrahlwinkel der Anlage, die Verschattung und Verschmutzung sowie die Temperatur. Zudem gibt es anlagenspezifische Parameter wie die Zellenart, die Leistungswerte und das Verhalten des Reglers (bei Dachanlagen üblicherweise „Maximum Power Point Tracking“). Eine ausführliche Erklärung und Herleitung der zugehörigen PV-Modelle sind in [3] zu finden.

In dieser Arbeit wird die simulierte Leistung der PV-Anlage P_{PV} auf die Abhängigkeit von der Solarstrahlung E_{PV}, dem PV-anlagenspezifischen Vorfaktor c_{PV} sowie die Anlagenfläche A beschränkt. c_{PV} beinhatet dabei den Wirkungsgrad und sämtliche leistungsreduzierende Faktoren.

$$P_{\text{PV}} = -c_{\text{PV}} \cdot A \cdot E_{\text{PV}} \tag{1}$$

Da Niederspannungsnetze im städtischen Bereich räumlich beschränkt sind, wird für alle PV-Anlagen im betrachteten Gebiet dieselbe Solarstrahlung zur Berechnung verwendet. Als Datengrundlage werden die Messungen der Globalstrahlung [4] aus einer Messstation in Hamburg genutzt. Die Werte werden vom zentralen Informationsmodul an das PV-Modul gesendet.

B. Ladeinfrastruktur- und Elektroautomodul

Die Ladeleistung eines Elektroautos ist sowohl vom Fahrzeug- bzw. Batterietyp, als auch von der verwendeten Ladeinfrastruktur abhängig. Einflussfaktoren des Elektroautos beinhalten unter anderem die maximale Ladeleistung, die „normale“ vom Batteriemanagementsystem vorgegebene Ladekurve, die Batterietemperatur und den Gesundheitszustand der Batterie. Die Ladeinfrastruktur gibt eine bauartbedingte maximale Ladeleistung vor. Zudem kann die bereitgestellte Leistung durch externe Steuerungen begrenzt werden.

Verschiedene typische Ladekurvenformen und mathematische Ansätze zur Beschreibung wurden in [5] untersucht. Für diese Arbeit wird die ungesteuerte Ladeleistung $P_{\text{EV,u}}$ des simulierten Elektroautos durch die dreigeteilte, vom Ladezustand (SOC) abhängige, Ladekurve (2) dargestellt. Die beiden Ladezustände SOC_{S1} und SOC_{S2} stellen zwei Umschaltpunkte in der Ladekurve dar. Die Konstante c_{EV1} beschreibt die im ersten Teil der Kurve anliegende Ladeleistung, c_{EV2} beschreibt den SOC abhängigen Abfall der Ladeleistung. Die konstante Leistung im dritten Teil der Ladekurve c_{EV3} wird nach Gleichung (3) berechnet. Um den aktuellen Ladezustand zu berechnen, werden die Leistungen über die Zeit seit dem Ladebeginn t_0 integriert und zu dem Ausgangsladezustand SOC_0 addiert (6). Dabei wird vereinfachend ein Wirkungsgrad von 100 % angenommen.

$$P(SOC)_{\text{EV,u}} = \begin{cases} c_{EV1}, & SOC \le SOC_{S1} \\ c_{EV1} - c_{EV2} \cdot (SOC_{S1} - SOC), & SOC_{S1} < SOC < SOC_{S2} \\ c_{EV3}, & SOC > SOC_{S2} \\ 0, & SOC = 100\,\% \end{cases} \tag{2}$$

$$c_{\text{EV3}} = c_{\text{EV1}} - c_{\text{EV2}} \cdot (SOC_{\text{S1}} - SOC_{\text{S2}}) \tag{3}$$

$$SOC(t) = SOC_0 + \int_{t_0}^{t} P(t)_{\text{EV,u}} dt \tag{4}$$

Die gesteuerte Ladeleistung $P_{\text{EV,g}}$ wird nach (5) berechnet. Überschreitet die ungesteuerte Leistung den vorgegebenen Maximalwert des Ladepunkts $P_{\text{g,max}}$, wird dieser als Ladeleistung festgelegt. Der SOC wird analog zu Gleichung (4) berechnet.

$$P(SOC)_{\mathrm{EV,g}} = \begin{cases} P(SOC)_{\mathrm{EV,u}}, & P(SOC)_{\mathrm{EV,u}} < P_{\mathrm{g,max}} \\ P_{\mathrm{g,max}}, & \text{sonst} \end{cases} \quad (5)$$

Für Simulationen in denen die Ladeinfrastruktur und das Elektroauto bidirektional betrieben werden wird im Rückspeisebetrieb die maximale Leistung c_{EV4} zurückgespeist (6). Limitierend dabei ist der SOC, der über dem Mindestladezustand $SOC_{\mathrm{b,min}}$ liegen muss.

$$P(SOC)_{\mathrm{EV,b}} = \begin{cases} -c_{\mathrm{EV4}}, & SOC > SOC_{\mathrm{b,min}} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (6)$$

Für eine erste Umsetzung der Gleichungen (2) bis (6) wurde ein ARM basierter Nucleo-64 Controller (STM32F401) verwendet. Die Steuerung für die Aktivierung des Ladens mit reduzierter Leistung und des Rückspeisebetriebs wird durch zwei digitale Eingänge implementiert. Dabei steuert der Schaltzustand s_{R} den Rückspeisebetrieb und s_{L} das Laden mit limitierter Leistung:

$$P(SOC)_{\mathrm{EV}} = \begin{cases} P(SOC)_{\mathrm{EV,u}}, & s_{\mathrm{R}} = 0 \ \wedge \ s_{\mathrm{L}} = 0 \\ P(SOC)_{\mathrm{EV,g}}, & s_{\mathrm{R}} = 0 \ \wedge \ s_{\mathrm{L}} = 1 \\ P(SOC)_{\mathrm{EV,b}}, & s_{\mathrm{R}} = 1 \end{cases} \quad (7)$$

Der obere Teil von ABBILDUNG 2 zeigt einen beispielhaften Verlauf der Ladeleistung und des SOC des simulierten Elektroautos. Die dabei verwendete Parametrierung ist in TABELLE I gegeben. ABBILDUNG 2 unten zeigt die zugehörenden Steuersignale für den Rückspeisebetrieb und das Laden mit limitierter Leistung, die aktiv („high“) oder inaktiv („low“) gesetzt sind. Die Simulation ist nach den Pfeilen und Nummern im oberen Teil der Abbildung in sieben Abschnitte unterteilt. Diese können den einzelnen Lademodi zugeordnet werden:

- Ungesteuertes Laden mit $P(SOC)_{\mathrm{EV,u}}$: 1,4,7
- Rückspeisung aus der Fahrzeugbatterie in das Netz mit $P(SOC)_{\mathrm{EV,b}}$: 2,6
- Laden mit reduzierter Leistung $P(SOC)_{\mathrm{EV,g}}$: 3
- Vollständig geladene Batterie: 5

Besonders zu beachten sind die Störsignale, die als kurzzeitige Signalpeaks sichtbar sind, wie zum Beispiel bei Minute 175 im Signal für das Laden mit limitierter Leistung.

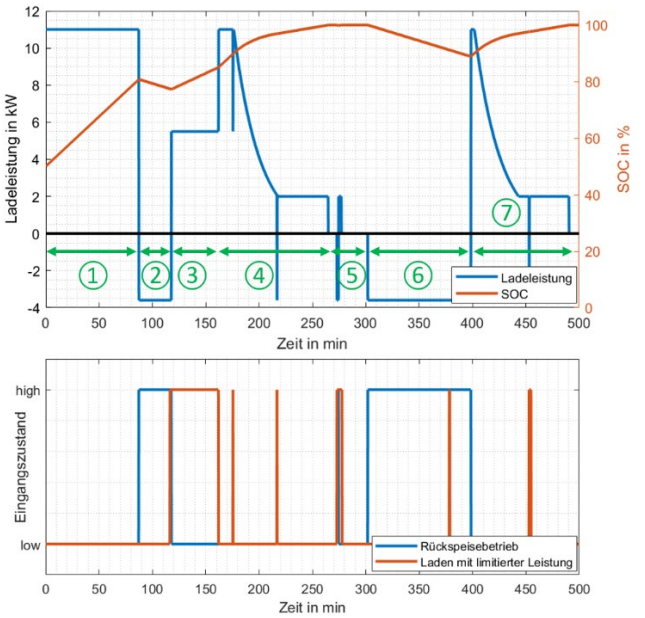

ABBILDUNG 2: BEISPIELHAFTE SIMULATIONSERGEBNISSE DER IMPLEMENTIERUNG DES LADEINFRASTRUKTUR- UND ELEKTROAUTOMODULS AUF EINEM MIKROCONTROLLER OBEN: SIMULIERTE LADELEISTUNG EINES ELEKTROAUTOS NACH DEN FORMELN (2) BIS (6) MIT DER IN TABELLE I GEZEIGTEN PARAMETRIERUNG; UNTEN: EINGANGSZUSTAND DER STEUERSIGNALE FÜR BIDIREKTIONALES LADEN UND LADEN MIT BESCHRÄNKTER LEISTUNG.

TABELLE I: VERWENDETE PARAMETER BEI DER IMPLEMENTIERUNG DES LADEINFRASTRUKTUR- UND ELEKTROAUTOMODULS.

Parameter	*Wert*
c_{EV1}	11 kW
c_{EV2}	1286 kW/%
c_{EV3}	2 kW
c_{EV4}	3,6 kW

Parameter	*Wert*
SOC_{S1}	90 %
SOC_{S2}	97 %
SOC_{bmin}	0 %
$P_{\mathrm{g,max}}$	5,5 kW

C. *Haushaltslastmodul*

Die Haushaltslasten werden in einem ersten Ansatz mithilfe des Lastprofilgenerators [6] erstellt und als nicht steuerbar angenommen. Aufgrund der detaillierten Berechnung des Generators besteht die Möglichkeit die Steuerbarkeit von einzelnen Verbrauchern als Erweiterung zu implementieren. ABBILDUNG 3 zeigt beispielhaft die Gesamtlast und die Last der Wasch- und Spülmaschine und des Trockners eines simulierten Dreipersonenhaushalts für die erste Oktoberwoche. Dabei ist das Potential von den drei potentiell einfach verschiebbaren Haushaltslasten gut erkennbar.

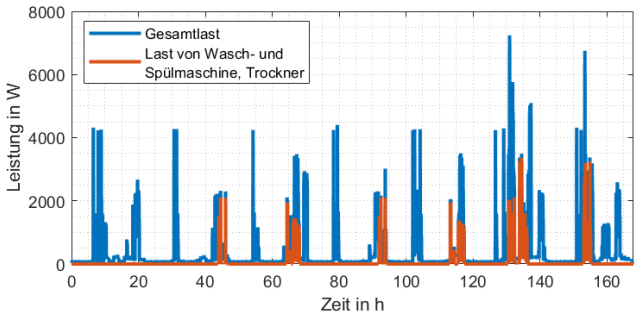

ABBILDUNG 3: SIMULIERTE LASTKURVE EINES DREIPERSONEN-HAUSHALTES FÜR DIE ERSTE OKTOBERWOCHE NACH *[6]*: GESAMTLAST UND VERBRAUCH VON WASCH- UND SPÜLMASCHINE UND TROCKNER.

D. Internes-Energiemanagmentsystem-Modul

Das „Interne-Energiemanagement-Modul“ steuert die steuerbaren Verbraucher und Erzeuger an einem Netzanschlusspunkt. Die zur Verfügung stehenden Informationen sind von der Ausbauart des Energiesystems abhängig. In dem in dieser Arbeit beschriebenen Modul soll den Eigenerbrauch einer PV-Anlage mithilfe eines bidirektionalen Autos maximiert werden.

Das Ablaufdiagramm des EMS ist in ABBILDUNG 4 dargestellt. Zu Beginn sieht das EMS die gesamte angefragte Last der Verbraucher $P_{\mathrm{a,ges}}$ für den Zeitschritt t_{x}. Falls diese die von der PV-Anlage erzeugte Leistung P_{PV} übersteigt, wird geprüft ob:

1. … das Elektroauto angeschlossen ist.
2. … die minimale Zeit, die benötigt wird um das Elektroauto auf den gewünschten Ladezustand zu laden $t_{\mathrm{EV,min}}$, geringer ist als die verfügbare Standzeit des Elektroautos $t_{\mathrm{EV,ges}}$.
3. … der benötigte Mindestladezustand $SOC_{\mathrm{b,min}}$ kleiner als der aktuelle Ladezustand $SOC(t_{\mathrm{x}})$ ist.

Ist einer dieser Punkte nicht erfüllt, wird die Leistung P_{ges} (ggf. nach Reduktion der Ladeleistung) freigegeben und die Überprüfung beginnt erneut für den nächsten Zeitschritt $t_{\mathrm{x+1}}$. Sind 1,2 und 3 erfüllt, kann zusätzlich eine Rückspeisung aus der Fahrzeugbatterie stattfinden.

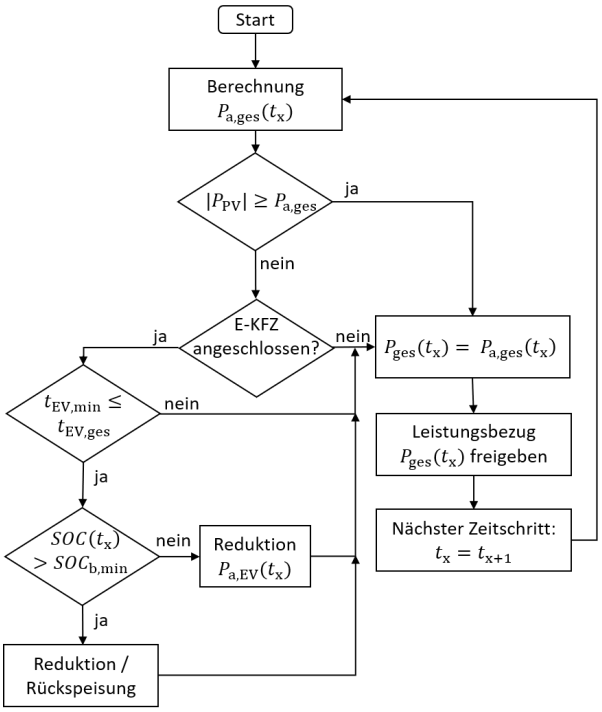

ABBILDUNG 4: ABLAUFDIAGRAMM DES ENERGIEMANAGEMENT-SYSTEMS DES NETZANSCHLUSSPUNKTMODULS.

E. Leistungsmodul

Mithilfe des Leistungsmoduls soll die aus den anderen Modulen resultierende Leistung am Lastanschlusspunkt elektrisch abgebildet werden. Dafür werden die Ausgangssignale der Verbraucher- und Erzeugermodule eingelesen und summiert. Mithilfe von einzeln zuschaltbaren Lasten werden verschiedene Leistungen abgebildet. Zusammen mit einem Smart-Meter können die Informationssignale dadurch aus der rein simulierten in eine reale Ebene übertragen werden.

Um die elektrische Last im Laborbetrieb zu reduzieren wird ein Skalierungsfaktor von 100 verwendet. Dadurch wird die Gesamtlast reduziert und laborfreundlich nachgestellt. Ein Netzmodell eines in Hamburg üblichen 630 kVA MS/NS-Transformators und der darunter liegenden Verbraucher, kann so mit einer elektrischen Last von 6,3 kW nachgestellt werden und an einer 16 A-CEE-Steckdose betrieben werden.

F. Gesamtmodul

In ABBILDUNG 5 ist ein praktischer Aufbau des beschriebenen Netzanschlusspunktmoduls bestehend aus einem Haushalt, einer PV-Anlage, einem Elektroauto und einem internen EMS dargestellt. Dabei wurden die einzelnen Elemente wie in den Unterkapiteln beschrieben umgesetzt. Die Kommunikation zwischen den Last- und Erzeugermodulen und dem EMS erfolgt über eine direkte serielle Kommunikation. Die Displays für die Leistung bzw. den SOC werden über die IIC-Kommunikation angesteuert.

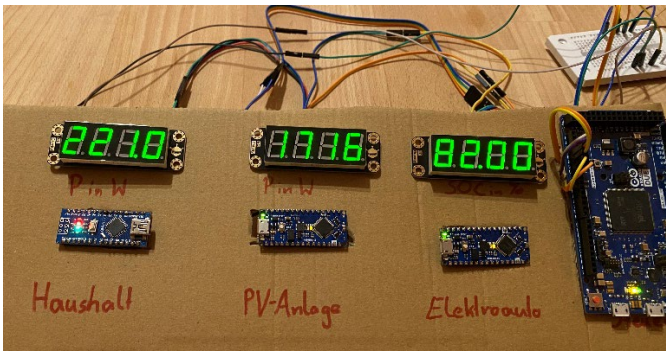

ABBILDUNG 5: PRAKTISCHER AUFBAU EINES NETZANSCHLUSSPUNKT-MODULS BESTEHEND AUS EINEM HAUSHALTSMODUL, EINEM PV-MODUL, EINEM ELEKTROMOBILITÄTSMODUL UND EINEM EMS (RECHTS), RECHTS OBEN: STROMVERSORGUNG.

IV. AUSBLICK

Die in diesem Beitrag dargestellten Grundlagen und die Methodik sollen im Projekt dtec emob für eine Vielzahl von Verbrauchern und Erzeugern angewendet werden. Zentrale Erweiterungen sind dabei:

- Steuerbare Haushaltslasten: In der bisherigen Beschreibung werden Haushaltslasten als nicht steuerbar angenommen. Mit einer spezifischen Analyse der einzelnen Haushaltslasten können mögliche Verschiebungen von Lasten in das System integriert werden.
- Heimspeicher: Diese werden zunehmend zusammen mit PV-Anlagen genutzt. Dadurch werden die Energieerzeugung und der Verbrauch zeitlich entkoppelt und ein höherer Eigenverbrauch erreicht.
- Wärmepumpen: Im Zuge der Energiewende werden in Neubauten von Einfamilien- und Doppelhäusern zunehmend Wärmepumpen verbaut. Aufgrund der aktuellen Verwerfungen im Gasmarkt werden Wärmepumpen zukünftig voraussichtlich auch in Bestandsbauten genutzt werden. Die hohen entstehenden Stromverbräuche sind temperatur-abhängig und treten in einem Netzgebiet häufig gleichzeitig bei mehreren Nutzern auf. Die dadurch entstehenden Gradienten erfordern eine Steuerung, welche mit diesem Demonstrator analysiert werden kann.
- Mittelspannungsebene: Bisher wird ausschließlich das Niederspannungsnetz betrachtet. Um die Auswirkungen der Steuerung auf höher Netzebenen zu analysieren kann zudem ein Teil der Mittelspannungs-ebene abgebildet werden. Dabei werden weitere Verbrauchs- und Erzeugertypen eingebunden.
- Mittelspannung – industrielle Verbraucher: Die bisherige Betrachtung beschränkt sich auf Haushaltsanschlüsse. In der zukünftigen Betrachtung sollen industrielle Anschlüsse auf der Mittelspannungsebene integriert werden, da diese anderen Lasteigenschaften besitzen. Dadurch können (Dys-)Synergien auftreten die genutzt oder verhindert werden sollten.

Von besonderem Interesse ist die Analyse der netzdienlichen, auf künstlicher Intelligenz basierenden, externe Steuerung sowie den Konflikten die zwischen dieser und einer internen Steuerung auftreten können.

V. DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich für die Förderung bei dtec.bw – Zentrum für Digitalisierungs- und Technologie-forschung der Bundeswehr [Projekt dtec emob].

LITERATUR

[1] A. Ridi, C. Gisler und J. Hennebert, „A Survey on Intrusive Load Monitoring for Appliance Recognition," IEEE, 82014, p. 3702–3707.

[2] G. W. Hart, „Nonintrusive appliance load monitoring," *Proceedings of the IEEE,* Bd. 80, Nr. 12, p. 1870–1891, 1992.

[3] M. G. Villalva, J. R. Gazoli und E. R. Filho, „Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays," *IEEE Transactions on Power Electronics,* Bd. 24, Nr. 5, p. 1198–1208, 2009.

[4] Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft, Institut für Hygiene und Umwelt, Hamburger Landesinstitut für Lebensmittelsicherheit, Gesundheitsschutz und Umweltuntersuchungen, „Messdaten: Globalstrahlung Marckmannstraße," 2022. [Online]. Available: https://luft.hamburg.de/clp/globalstrahlung/clp1/. [Zugriff am 29 9 2022].

[5] F. Heider, A. Jahic, M. Plenz, K. Tröger, D. Schulz, „(in Druck). A generic EV charging model extracted from real charging behaviour".

[6] Noah Pflugradt, *LoadProfileGenerator.* Jülich, 2021.

[7] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, *EEG in Zahlen: Vergütung, Differenzkosten und EEG-Umlage 2000 bis 2022.*

[8] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen und Bundeskartellamt, *Monitoringbericht 2021,* Bonn.

[9] Statista, „Lithium-Ionen-Batterien - Kosten pro kWh bis 2025," [Online]. Available: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/534429/umfrage/weltweite-preise-fuer-lithium-ionen-akkus/. [Zugriff am 6 10 2022].

[10] Bundesverband Solarwirtschaft e. V., *"Solarbatterie-Boom."* https://www.solarwirtschaft.de/2021/02/18/solarbatterie-boom/. [Zugriff am 06.10.2022]

[11] J. Weniger, V. Quaschning und T. Tjaden, „Optimale Dimensionierung von PV-Speichersystemen," *pv magazin,* Bd. 2013, p. 70–75, 2013.