

ANWENDUNG EINES MASTER-SLAVE-REINFORCEMENT-LEARNING-ALGORITHMUS IN EINEM MEHRSTUFIGEN STROMNETZ ZUR NUTZUNG DER FLEXIBILITÄT UND VERMEIDUNG VON LASTSPITZEN

Dennis Versen, Yuzhuo Fu, Maik Plenz, Andreas Stadler, Amra Jahic, Detlef Schulz

Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, Elektrische Energiesysteme,
Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg, Germany, versend@hsu-hh.de,
www.hsu-hh.de/ees

1 Thema

Die Elektrifizierung des Verkehrs spielt eine wichtige Rolle bei der Reduzierung von Treibhausgasemissionen. Im Jahr 2024 erreichte der Anteil von Elektrofahrzeugen (EV) an den Neuzulassungen in Deutschland 20 % [1]. Neben privaten Pkw erstreckt sich der Trend zur Elektrifizierung auch auf den öffentlichen Verkehr sowie die Logistikbranche. Da die meisten Ladepunkte für Elektrofahrzeuge an Nieder- (LV) und Mittelspannungsnetze (MV) angeschlossen sind, können Verteilnetze (DG) bei gleichzeitiger Ladung einer großen Anzahl von Elektrofahrzeugen Engpassprobleme aufweisen.

Der traditionelle Ansatz zur Bewältigung von Netzengpässen ist der Netzausbau, der jedoch häufig aufgrund von Lieferkettenproblemen und unzureichenden personellen Ressourcen verzögert wird [2]. Daher benötigen Verteilnetzbetreiber (DSO) ein Lastmanagementsystem, um Netzengpässe zu entschärfen, bevor der Netzausbau abgeschlossen ist. Für private Ladepunkte in Niederspannungsnetzen sind DSOs berechtigt, Leistungsbegrenzungen für Ladevorgänge von Elektrofahrzeugen festzulegen, wenn kritische Netzzustände identifiziert werden [3]. Bei einigen großen Stromverbrauchern in Mittelspannungsnetzen, wie etwa Busdepots und Logistikzentren, können DSOs die von Elektrofahrzeugflotten bereitgestellte Flexibilität nutzen, sofern beide Parteien zustimmen. Mit den Leistungsbegrenzungen für private Ladevorgänge steht den DSOs eine große Anzahl steuerbarer Geräte über mehrere Spannungsebenen hinweg zur Verfügung, um Netzengpässe zu vermeiden.

Allerdings bestehen mehrere Herausforderungen bei der optimalen Nutzung dieser Flexibilität in einem mehrstufigen Verteilnetz. Erstens ist es schwierig, Echtzeit-Messdaten von großflächig eingesetzten Smart Metern (SM) auf Haushaltsebene zu erhalten. In der Standardkonfiguration werden die Stromverbrauchsprofile der Smart Meter nur einmal täglich an die DSOs übermittelt [4]. Dadurch bleibt das kumulierte Flexibilitätspotenzial eines Niederspannungsnetzes unsichtbar, was die Nutzung dieser Flexibilität auf höheren Spannungsebenen verhindert und die Steuerbarkeit des gesamten Verteilnetzes reduziert. Darüber hinaus stellen die Verwaltung großer Mengen an Messdaten sowie die Echtzeitnutzung von Flexibilität zu Steuerungszwecken in zentralisierter Form ein Skalierungsproblem dar. Die rechnerische Komplexität der optimalen Lastflussberechnung unter Verwendung des Interior-Point-Verfahrens steigt exponentiell mit der Anzahl der Netzknoten [5]. Werden

Niederspannungsnetze berücksichtigt, kann die Lösungszeit des Optimierungsproblems die Anforderungen von Echtzeitanwendungen nicht erfüllen. Ziel dieser Arbeit ist der Auftakt der Entwicklung eines größeren Lastmanagementsystems, das die Flexibilität von Elektrofahrzeugen über mehrere Spannungsebenen hinweg koordiniert, um Überlastungen im Verteilnetz zu vermeiden. Gleichzeitig sollen die gesamten Energieanforderungen der Elektrofahrzeuge möglichst vollständig erfüllt werden. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf den Niederspannungsnetzen. Die Frage die sich stellt ist, lassen sich die Aufgaben der Niederspannungsnetze koordinieren und eignen sich die Niederspannungsnetze in einem Verbund zusammenzuarbeiten um Lasten über Spannungsebenen zu steuern.

2 Methode

Der in dieser Arbeit vorgeschlagene Rahmen des Lastmanagementsystems ist in Abbildung 1 dargestellt. Mithilfe einer Master-Slave (MS) -Struktur wird die optimale Nutzung der Flexibilität in einem mehrstufigen Verteilnetz als ein Markov-Entscheidungs-Prozess (MDP) formuliert. Jeder Slave-Controller konzentriert sich ausschließlich auf lokale Messdaten und adressiert hauptsächlich lokale Engpässe im Niederspannungsnetz, während der Master-Controller für die übergeordnete Auslastung im Mittelspannungsnetz verantwortlich ist.

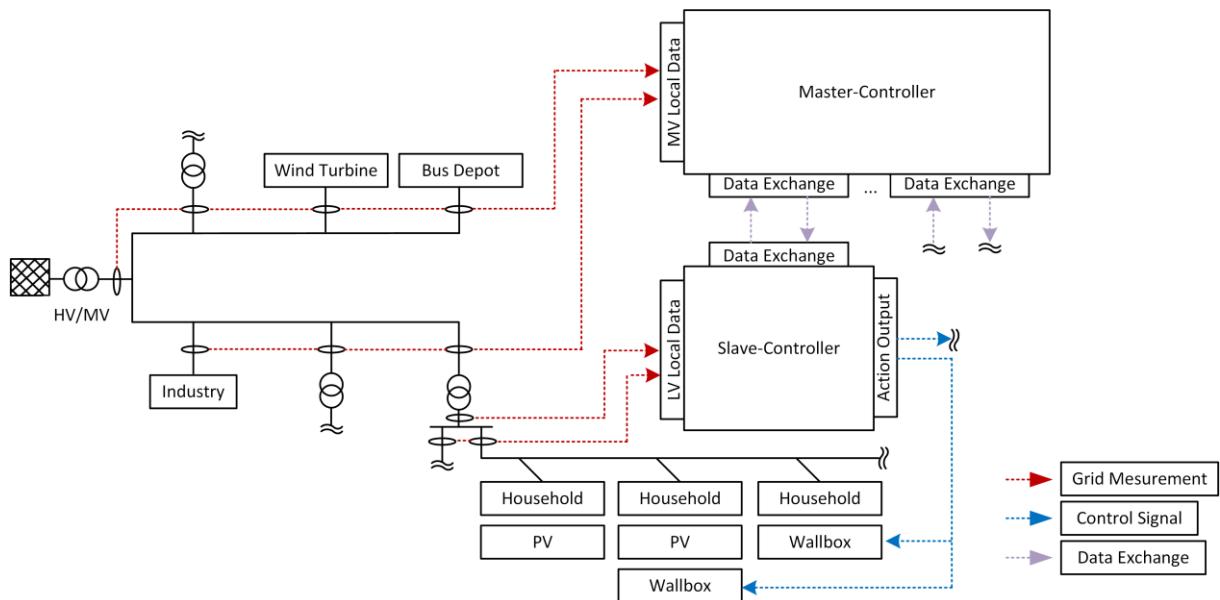


Abbildung 1: Struktur des Master-Slave Lastmanagementsystems

Die Regelstrategie des MS-Multi-Agenten-Systems wird mithilfe von Reinforcement-Learning-(RL-)Algorithmen (MARL) durch die Interaktion mit einer simulierten Trainingsumgebung erlernt. In der Ausführungsphase nach dem Trainingsprozess berechnen die RL-basierten Controller die erforderlichen Steuersignale ausschließlich auf Basis von Echtzeit-Messdaten, anstatt auf umfassende physikalische Netzmodelle zurückzugreifen. Die Idee dieses Ansatzes basiert hierbei auf der Entwicklung eines

MS-MARL Systems, wie er unter anderem in der Arbeit [6] vorgestellt wird und zur Lösung von strategischen Computerspielen verwendet wird.

Im Rahmen dieser Arbeit wird untersucht, inwiefern intelligente Regelalgorithmen zur Lösung realer Anwendungsprobleme beitragen können, wodurch neues Wissen in diesem Forschungsfeld generiert wird.

Referenz

- [1] Kraftfahrt-Bundesamt, „Fahrzeugzulassungen im Dezember 2024 - Jahresbilanz,“ [Online]. Available:
https://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Fahrzeugzulassungen/2025/pm01_2025_n_12_24_pm_komplett.html. [Zugriff am 19.12.2025].
- [2] Bundesnetzagentur, „Zustand und Ausbau der Verteilernetze 2022,“ 2023.
- [3] Bundesnetzagentur, „BK6-22-300,“ 2023.
- [4] Bundesamt für Justiz, „§ 34 Messstellenbetriebsgesetz - MsBГ“.
- [5] A. Eltved, J. Dahl und M. Andersen, „On the robustness and scalability of semidefinite relaxation for optimal power flow problems,“ *Optimization and Engineering*, pp. 375-392, 2020.
- [6] F. L. & Y. W. Xiangyu Kong, „REVISITING THE MASTER-SLAVE ARCHITECTURE IN,“ in *arxiv*, 2017.
- [7] Bundesnetzagentur, „BK6-22-300 Beschluss,“ 2023.
- [8] Bundesamt für Justiz, „§ 52 Messstellenbetriebsgesetz - MsBГ“.