

Energie- und Lademanagement für eine CO₂-neutralen Beladung von batterieelektrisch betriebenen Service-Fahrzeugen auf dem Flughafenvorfeld

Sebastian Flemming, Steffi Naumann, Peter Bretschneider

Institutsteil Angewandte Systemtechnik (AST) des Fraunhofer IOSB, Ilmenau, Deutschland

Abstract

Im Projekt: ALEC (Alternation * Light * Electric * Constructions) ist eine der Zielstellungen die Realisierung einer CO₂-neutralen elektrischen Nachladung von batterieelektrisch betriebenen Service-Fahrzeugen auf dem Flughafenvorfeld zu ermöglichen. Für die Umsetzung der obenstehenden Zielsetzung stellen die Autoren ihr Konzept und den Umsetzungstand zum Zusammenspiel zwischen lokalem Lademanagementsystem (LMS) und überlagertem Energiemanagementsystem (üEMS) vor. Das LMS übernimmt hierbei die Funktion der Datenaufbereitung und -aggregation verschiedener Informationen der einzelnen Elektrofahrzeuge. Unter Verwendung der aggregierten Informationen aus den LMS und der erwarteten Energiebereitstellung aus lokalen, erneuerbaren Quellen ermittelt das üEMS die optimale, CO₂-minimale elektrische Nachladung der Elektrofahrzeugflotte auf dem Flughafenvorfeld. Der auf diesem Weg generierte Flottenladefahrplan wird abschließend im LMS disaggregiert und fahrzeugspezifische Ladefahrpläne generiert.

1. Motivation

Im Bereich des Flughafenvorfelds kommt eine Vielzahl an Nutzfahrzeugen für verschiedenste Aufgaben zum Einsatz. Dabei handelt es sich derzeit überwiegend um dieselgetriebene Spezialfahrzeuge mit entsprechenden aufgabenbezogenen Aufbauten. Der Einsatzbereich bzw. auch der Einsatzradius der Fahrzeuge ist dabei im Gegensatz zu anderen urbanen Fahrzeugflotten auf einen relativ kleinen Bereich beschränkt und durch zyklisch wiederkehrende Aufgaben und Aktivitäten der Fahrzeuge gekennzeichnet und dadurch zeitlich relativ gut planbar. Dies bietet ideale Voraussetzung für das geplante Vorhaben zur Elektrifizierung von Arbeitsfahrzeugen und der Vorbereitung einer zukünftig autonomen Arbeitsfähigkeit der Fahrzeugflotte auf dem Flughafenvorfeld.

2. Hintergrund und Zielstellung

Für die Erreichung der Ziele der Bundesregierung zur Reduktion von CO₂-Emissionen steht insbesondere die Energiebereitstellung für den Verkehrssektor vor großen Veränderungen. Im Koalitionsvertrag vom Februar 2018 haben sich CDU und SPD zum Pariser Klimaschutzabkommen bekannt. Des Weiteren wurden bereits in der vorhergehenden Legislaturperiode die Klimaschutzziele für die einzelnen energierelevanten Sektoren beschlossen. Für den Verkehrssektor bedeutet dies eine Reduktion der klimarelevanten Treibhausgasemissionen um 40 Prozent bis zum Jahr 2030. Aufgrund der in den letzten Jahren im Verkehrsbereich leicht gestiegenen CO₂-Emissionen stellen die formulierten Ziele eine immense Herausforderung dar. [1]

Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen des Projektes ein universeller batterieelektrischer Geräteträger mit Arbeitsgeräte-Wechselsystem für Einsatzwechsellätigkeit auf dem Flughafenvorfeld elektrifiziert. Eine Möglichkeit die energiebedingten Emissionen im Verkehrsbereich zu reduzieren stellt der Einsatz von batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen dar. Eine CO₂-neutrale Beladung kann allerdings nur

dann erfolgen, wenn die hierfür notwendige elektrische Energie aus regenerativen Quellen bzw. Erneuerbaren Energien Anlagen stammt. Zur Sicherstellung einer ökologisch elektrischen Nachladung der E-Fahrzeugflotte soll ein Energiemanagementsystem in Verbindung mit einem lokalen Lademanagement zum Einsatz kommen. Zur Unterstützung der Weiterverbreitung der Elektromobilität können gewerblich genutzte Fahrzeugflotten eine Vorreiterrolle einnehmen, die gleichzeitig eine Vorbildfunktion für den Individualverkehr bilden.

Das mittelständisch geprägte Konsortium beabsichtigt daher die Entwicklung eines universellen batterieelektrischen Geräteträgers für Flughafenvorfelddanwendungen mit:

- einem universellen Wechselsystem für Arbeitsgeräte als An-, Auf- oder Vorbau,
- einer standardisierten Energie- und Steuerungsschnittstelle zwischen Fahrzeug und Arbeitsgerät,
- einer Vorbereitung für vollautomatisierte Fahrfunktionen sowie
- einem fahrzeug- und flottenübergreifenden Energiemanagement für Fahr- und Arbeitsaufgaben.

3. Ansatz

Die Abteilung Energiesysteme des Fraunhofer IOSB-AST entwickelt im Rahmen des Vorhabens das Energie- und Lademanagementsystem zur Bewirtschaftung der E-Fahrzeugflotte auf dem Flughafenvorfeld am Flughafen Erfurt/Weimar.

Die Aufteilung der Managementaufgabe zur nachhaltigen Beladung der Elektrofahrzeugflotte zwischen einem lokalen Lademanagementsystem (LMS) und übergeordneten Energiemanagementsystem (üEMS) soll der Anonymisierung fahrzeug- bzw. fahrerspezifischen Informationen, sowie der Bedarfs-, Einspeise- und Einsatzprognosen weiterer flexibler Betriebsmittel des Flughafens und zur Performanceverbesserung der Optimierungsaufgabe dienen. Hierzu erscheint das Management und die optimierte Beladung mehrerer, verteilter Elektrofahrzeugflotten mittels eines übergeordneten Energiemanagementsystems zweckmäßiger realisierbar, als jede Fahrzeugbeladung einzeln zu optimieren. Hierzu soll das lokale LMS die energierelevanten Daten der Einzelfahrzeuge der Elektrofahrzeugflotte auf dem Flughafenvorfeld sammeln, aufbereiten und zusammengefasst dem üEMS zu Verfügung stellen. Mit den Informationen aus dem LMS und der prognostizieren Energiebereitstellung aus den am Flughafen installierten Erneuerbaren Energieanlagen soll das üEMS einen Flottenladefahrplan u.a. zur optimalen, CO₂-minimalen Beladung generieren.

4. Übersicht des Gesamtsystems

Die Abbildung 1 gibt einen Überblick über die teilhabenden Projektpartner und den jeweils bearbeiteten Teilsysteme. Dargestellt ist ein Schema zur Visualisierung der Schnittstellen und des Zusammenspiels der einzelnen Systeme zur Integration und optimalen Beladung von Elektrofahrzeugen auf dem Vorfeld des Flughafen Erfurt/Weimar.

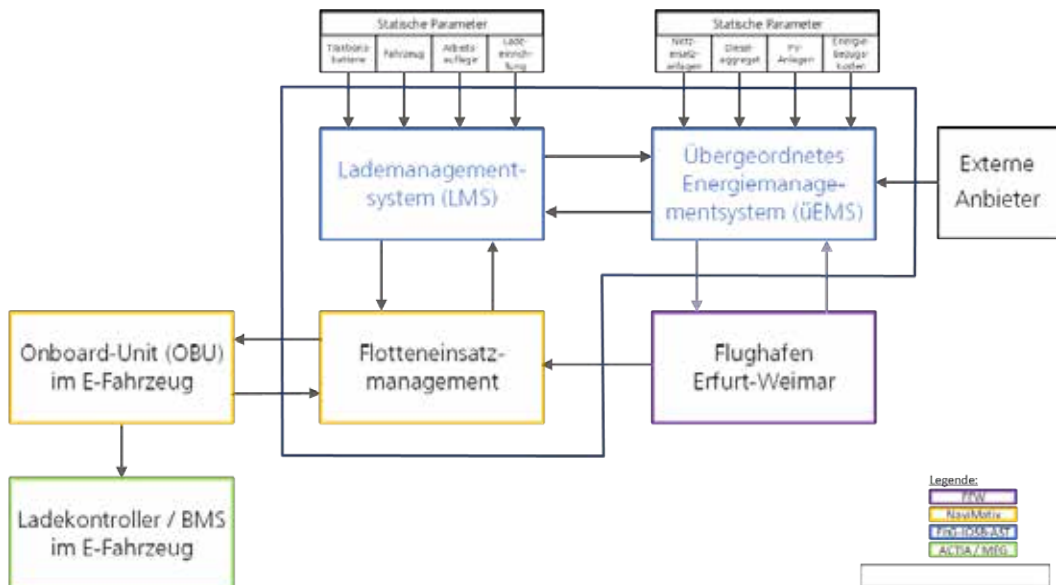


Abbildung 1: Übersicht des Gesamtsystems

Im Folgenden liegt der Fokus auf dem Zusammenspiel zwischen den Systemen des Flotteneinsatzmanagements (NaviMatix), Lademanagementsystems (Fh-IOSB-AST) und Energiemanagementsystems (Fh-IOSB-AST), die in Abbildung 1 durch blaue Umrahmung gekennzeichnet sind.

5. Vorgehen und Umsetzung

Zur Umsetzung des Ansatzes und zur sinnvollen Verteilung der Managementaufgabe zwischen Lademanagementsystem und übergeordnetem Energiemanagementsystem zur optimalen elektrischen Nachladung von Elektrofahrzeugflotten wurde sich für das nachfolgend beschriebene Vorgehen und Umsetzung entschieden. Der Ansatz gliedert sich in 3 Schritte:

- Ermittlung der Flottenflexibilität,
- Ermittlung des optimalen Flottenladefahrplans und
- Disaggregation des Flottenladefahrplans zur Generierung fahrzeugspezifischer Ladefahrpläne,

die im Folgenden beschrieben werden.

1. Lademanagement – Ermittlung der Flottenflexibilität

Das LMS ermittelt in einem ersten Schritt die Flexibilität, die die Einbindung von Elektrofahrzeugen auf der Verbrauchsseite des Flughafens bietet. Die fahrzeugspezifischen Flexibilitäten basieren auf den auf den Flugplan abgestimmten Fahrzeugeinsatzplänen, Zustandsdaten und statischen Parametern der Elektrofahrzeuge. Diese Informationen werden dem LMS aus dem Flotteneinsatzmanagement zu Verfügung gestellt.

Abbildung 2 visualisiert die über das Flotteneinsatzmanagement bereitgestellten fahrzeugspezifischen

Daten. Die Daten enthalten Informationen zu Zeiträumen während denen die Elektrofahrzeuge nicht im Einsatz sind und prinzipiell für eine Beladung an einem Ladepunkt zur Verfügung stehen. Des Weiteren sind Informationen enthalten zum erwarteten Ladegrad (eSoC – expected state of charge) der Traktionsbatterie zu Beginn eines Ladefensters (bzw. bei Ankunft am Ladepunkt) und die ladepunktspezifische, maximal mögliche Ladeleistung sowie die zur Abarbeitung der Fahr- und Arbeitsaufträge erforderliche Energie.

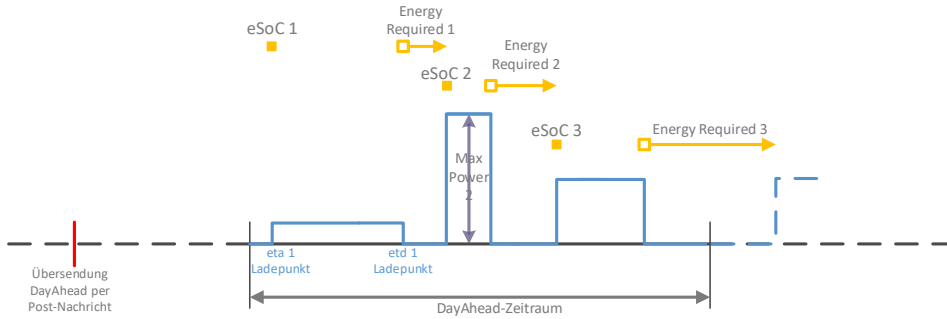


Abbildung 2: Visualisierung der Daten aus dem Flotteneinsatzmanagement

Mit den Daten aus dem Flotteneinsatzmanagement werden durch das Lademanagement die fahrzeugspezifischen Informationen vorverarbeitet und zu einer Flottenflexibilität zusammengefasst. Aus den zur Verfügung stehenden Informationen und statischen Parametern zum Fahrzeug sowie der Ladeeinrichtung erfolgt die Ermittlung der fahrzeugspezifischen Flexibilität. Hierzu werden aus dem erwarteten Ladegrad der Traktionsbatterie bei Ankunft eines Elektrofahrzeugs am Ladepunkt und dem Energiebedarf zur Abarbeitung der nachfolgenden Einsätze, die minimal erforderliche Beladung und die maximal mögliche Beladung jedes Elektrofahrzeugs ermittelt und mit dem Ladefenster verknüpft. Abbildung 3 visualisiert exemplarisch die in diesem Schritt ermittelten Daten am Beispiel von 2 Ladefenstern.

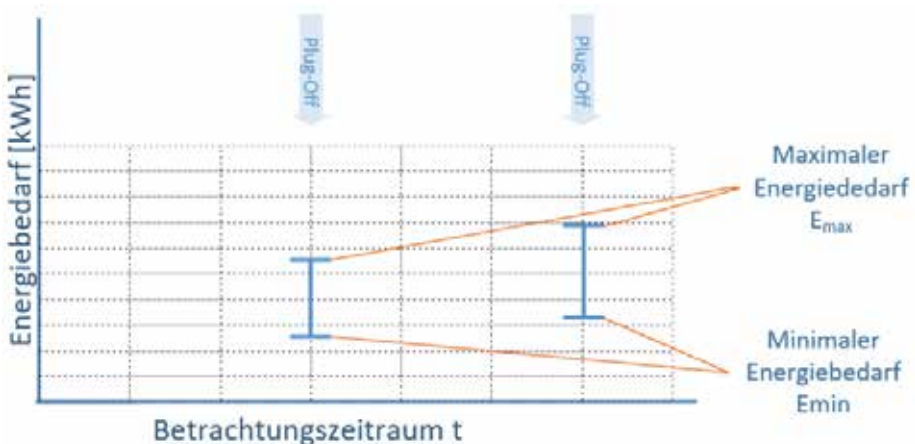


Abbildung 3: Minimale erforderliche Beladung und maximale mögliche Beladung

Des Weiteren werden aus den erwarteten Ankunfts- und Abfahrtszeiten sowie der am jeweiligen

Ladepunkt zur Verfügung stehenden maximalen Ladeleistung fahrzeugspezifische Ladefensterzeitreihen generiert. Somit wird die Flexibilität, die die Elektrofahrzeuge auf dem Flughafenvorfeld bieten, aus der flexiblen Beladung zwischen dem Mindestenergiebedarf und der maximal möglichen Beladung jedes Fahrzeuges, den Zeiträumen währenddessen die Fahrzeuge grundsätzlich für eine Beladung zur Verfügung stehen und der am jeweiligen Ladepunkt verfügbaren, maximalen Ladeleistung beschrieben. Nach dem Aufbereiten der Informationen zu fahrzeugspezifischen Flexibilitäten werden diese durch das LMS aggregiert und zu einer Flottenflexibilität zusammengefasst und dem üEMS zur Verfügung gestellt. Abbildung 4 dient der qualitativen Darstellung einer aggregierten Flottenflexibilität und der enthaltenen Informationen.

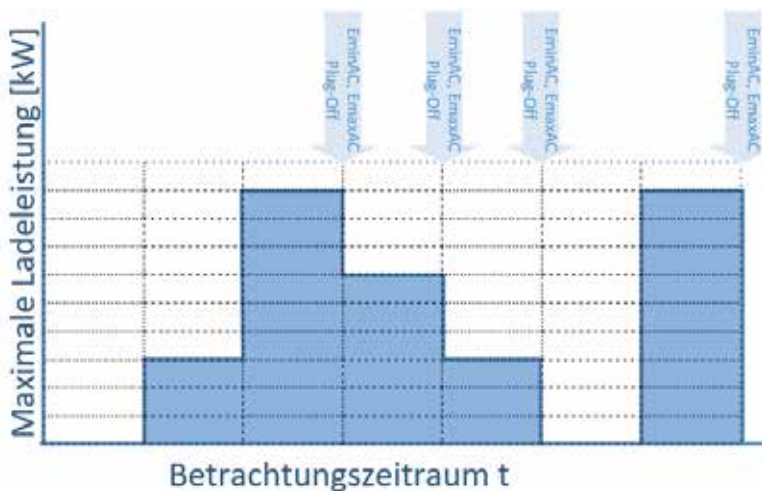


Abbildung 4: Visualisierung der Flexibilitätsaggregation durch LMS

2. Übergeordnetes Energiemanagement – Ermittlung des optimalen Flottenladeplans

Das üEMS dient u.a. der Optimierung der Beladung der Elektrofahrzeugflotte und ermittelt einen optimalen Ladefahrplan für die gesamte E-Flotte. Entsprechend der Zielstellung einer CO₂-neutralen bzw. CO₂-minimalen Flottenbeladung soll im Rahmen des Projektes die elektrische Energie aus lokalen Dach-Photovoltaikanlagen zum Einsatz kommen, welche auf mehreren Gebäuden auf dem Flughafengelände installiert sind. Die Zielfunktion der Optimierung zur Generierung des optimalen Flottenladefahrplans für diesen Anwendungsfall verfolgt die Zielstellung der optimalen Ausnutzung der Energiebereitstellung aus lokalen PV-Anlagen zur Beladung der Elektrofahrzeuge auf dem Flughafenvorfeld. Abbildung 5 zeigt die im üEMS einlaufenden Daten zur Ermittlung des optimalen Flottenladefahrplans auf Basis von Testdatensätzen für 3 elektrisch betriebene Servicefahrzeuge. Hierzu zählen die Prognose der erwarteten Bereitstellung elektrischer Energie aus den am Flughafen installierten PV-Anlagen und das zur Beladung nutzbare, aggregierte Ladefenster im Betrachtungszeitraum. Des Weiteren ist der aus den Eingangsdaten, in Verbindung mit der Zielfunktion ermittelte optimale Ladefahrplan der Elektroflotte dargestellt.

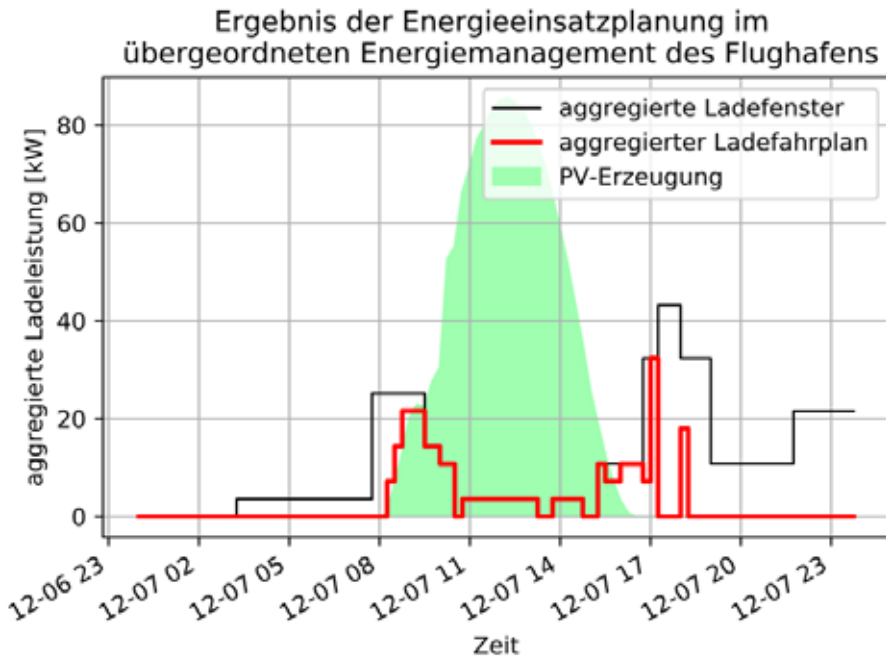


Abbildung 5: Visualisierung der Eingangsdaten der Optimierung (aggregierte Ladefenster und prog. Energiebereitstellung PV-Anlage) und der im üEMS generierte optimale Flottenladefahrplan

Es wird deutlich, dass der Ladefahrplan für die gesamte Fahrzeugflotte vorrangig für die Zeiten generiert wird in der die Versorgung bzw. die Beladung der Elektrofahrzeuge über die lokalen PV-Anlagen erfolgen kann. Des Weiteren ist zu sehen, dass auch Beladungen in Zeiten erfolgt, wenn keine Energiebereitstellung aus den PV-Anlagen zur Verfügung steht. Aus Sicht des üEMS und den dort einlaufenden aggregierten Informationen aus dem LMS ist eine Beladung außerhalb der Zeiten der PV-Erzeugung notwendig, um die Mindestbeladung zu gewährleisten und die Betriebsfähigkeit der Elektrofahrzeuge zur Erfüllung der Fahr- und Einsatzaufträge aufrechtzuerhalten. Eine Bewertung des Flottenladefahrplans kann erst nach Durchführung der Disaggregation des Flottenladefahrplans zu fahrzeugspezifischen Ladefahrplänen erfolgen.

3. Lademanagement – Disaggregation des Flottenladeplans zur Generierung fahrzeugspezifischer Ladefahrpläne

Das LMS erhält vom üEMS den optimalen Flottenladefahrplan. Zur Beladung der einzelnen Fahrzeuge ist der Flottenladefahrplan zu disaggregieren und in fahrzeugspezifische Ladefahrpläne zu überführen. Die Disaggregation erfolgt auf Basis eines Prioritätsansatzes, bei dem das Fahrzeug mit der höchsten Priorität beladen wird. Als Prioritätskriterium wurde die theoretisch erforderliche Ladeleistung gewählt, die benötigt wird, um die minimal erforderliche Fahrzeugbeladung (Mindestenergiebedarf) bis zum erwarteten Plugoff zu bedienen. Das Prioritätskriterium wird für alle Fahrzeuge bestimmt, welche sich im betrachteten Zeitschritt an einem Ladepunkt befinden und einen Mindestenergiebedarf aufweisen. Anschließend wird für das E-Fahrzeug mit der höchsten Priorität die Ladestufe erhöht. Darauf aufbauend erfolgt die Prüfung, ob sich das Fahrzeug, in Folge der Erhöhung der Ladestufe weiterhin Prior darstellt oder ob ein anderes Fahrzeug nun eine höhere Priorität besitzt. Auf diesem Weg werden

die im optimierten Flottenladefahrplan verfügbaren Ladestufen auf die einzelnen Fahrzeuge verteilt, die sich im betrachteten Zeitschritt an einem Ladepunkt befinden. Sobald die Energiebedarfe zur minimal erforderlichen Beladung bedient wurden und noch Ladestufen im optimierten Flottenladefahrplan verteilbar sind, werden die Energiebedarfe zur maximal möglichen Beladung der Fahrzeuge bedient, bis entweder die fahrzeugspezifische Traktionsbatterie vollständig geladen wurde, das Ladefenster endet oder im optimalen Flottenladefahrplan keine Ladestufen zur Verfügung stehen.

Zur Verdeutlichung dienen die nachfolgenden Darstellungen. Die Abbildung 6 visualisiert das aggregierte Ladefenster, den aggregierten, optimalen Flottenladefahrplan und die kumulierten Ladeleistungen der disaggregierten, fahrzeugspezifischen Ladefahrpläne und dient zur visuellen Plausibilisierung der Ergebnisse.

Aggregiertes Ladefenster (LMS) und aggregierter Ladefahrplan (üEMS) mit kumulierter Ladeleistung aller eFahrzeuge

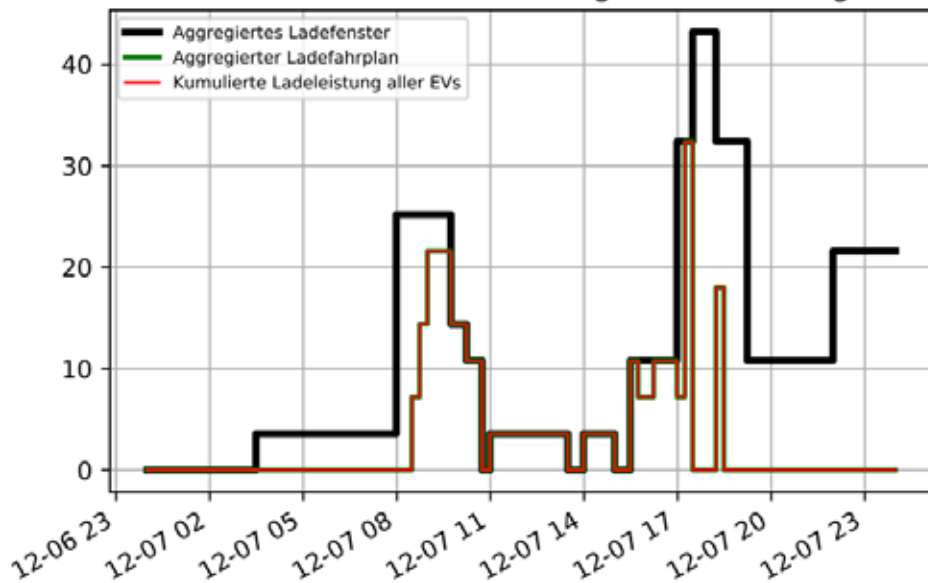


Abbildung 6: Darstellung des aggregierten Ladefensters, des aggregierten, optimalen Flottenladefahrplan sowie die kumulierten Ladeleistungen der disaggregierten, fahrzeugspezifischen Ladefahrpläne

Es wird deutlich, dass der aggregierte, optimale Flottenladefahrplan (grün) einen Teil des aggregierten Ladefensters (schwarz) nutzt und die kumulierte Ladeleistung der disaggregierten, fahrzeugspezifischen Ladefahrpläne (rot) dem aggregierten, optimalen Flottenladefahrplan (grün) entspricht. Somit wird der vom üEMS vorgegebene Flottenladefahrplan vom LMS eingehalten und konnte auf die einzelnen Fahrzeuge verteilt werden.

Zur weiteren Plausibilisierung des Zusammenspiels zwischen üEMS und LMS dienen Abbildung 7 bis Abbildung 9. Für jedes Fahrzeug wurde die zur Beladung nutzbaren Ladefenster und die im LMS generierten fahrzeugspezifischen Ladefahrpläne (blau), sowie die dynamische Entwicklung der Mindestbeladung (orange), die maximal mögliche Beladung (grün) und des Prioritätskriteriums (rot) dargestellt.

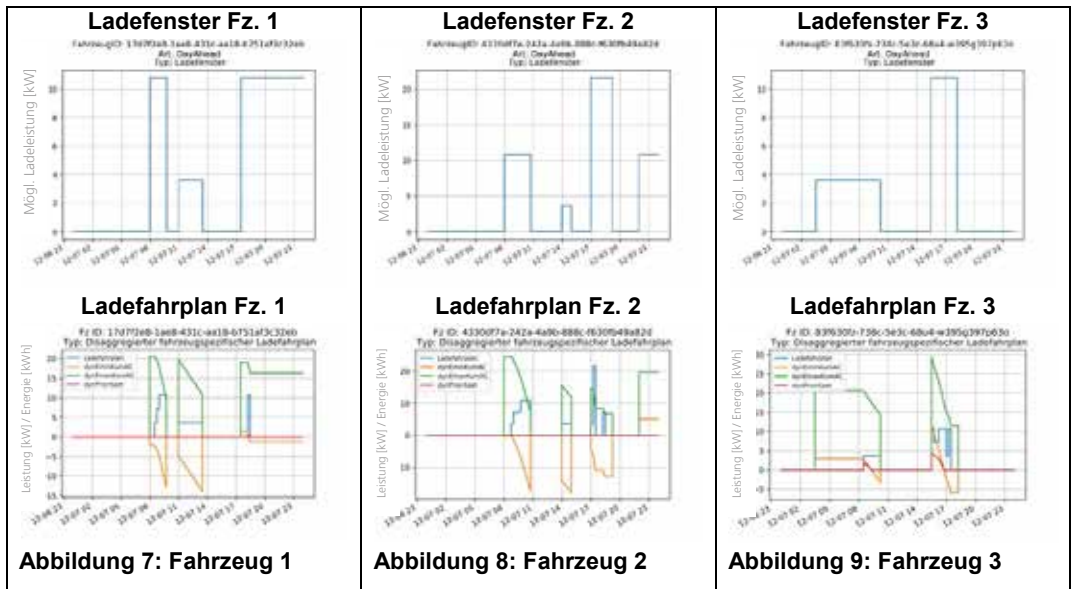


Abbildung 7: Fahrzeug 1

Abbildung 8: Fahrzeug 2

Abbildung 9: Fahrzeug 3

Der aggregierte Flottenladefahrplan aus dem üEMS stellt 08:30 Uhr zum ersten Mal im Betrachtungszeitraum eine Ladeleistung von 7,2 kW (2 Ladestufen) zur Verfügung (vgl. Abbildung 6). Daraufhin erfolgt unter Einbeziehung der zuvor beschriebenen Kriterien die Generierung individueller, fahrzeugspezifischer Ladepläne durch das LMS. Weil Fahrzeug 3 (Abbildung 9) als einziges Fahrzeug einen Mindestenergiebedarf (orange) aufweist, der vor dem Plug-Off des Fahrzeugs bedient werden muss, um den nachfolgenden Einsatz erfüllen zu können, wird für das Fahrzeug das Prioritätskriteriums (rot) berechnet. Da lediglich für Fahrzeug 3 das Prioritätskriteriums berechnet wird, ist das Fahrzeug automatisch Prior. Somit wird bei der Generierung der fahrzeugspezifischen Ladefahrpläne (blau) die Ladestufe (+3,6 kW) für Fahrzeug 3 erhöht. Aus dem Ladefenster des Fahrzeuges 3 (Abbildung 9 oben) geht hervor, dass am Ladepunkt keine höhere Ladeleistung bzw. weitere Ladestufe zur Verfügung steht. Die im aggregierten Flottenladefahrplan noch verfügbare Ladestufe in diesem Zeitschritt wird auf das Fahrzeug 1 (Abbildung 7) verteilt und damit die Energie der maximal möglichen Beladung bedient. 8:45 Uhr stehen im aggregierten Flottenladefahrplan 4 Ladestufen zur Verfügung. Aufgrund der Prioeren Beladung des Fahrzeugs 3 wird die Beladung aufrechterhalten. Für das Fahrzeug 1 wird die Ladung um eine weitere Ladestufe erhöht und das Fahrzeug 2 beginnt die Beladung. Durch die Beladung der Fahrzeuge wird der fahrzeugspezifische Mindestbedarf als auch die maximal mögliche Beladung beeinflusst. Des Weiteren beeinflusst die in einem Ladefenster tatsächlich geladene Energie den Mindestenergiebedarf und die maximal mögliche Beladung in den nachfolgenden Ladefenstern eines Fahrzeugs. Besitzt der Mindestenergiebedarf (organe) einen negativen Wert, ist das jeweilige Elektrofahrzeug ausreichend zur Bewältigung des nachfolgenden Einsatzes beladen. Erreicht die maximal mögliche Beladung (grün) 0 kWh ist die Traktionsbatterie des Elektrofahrzeugs vollständig geladen.

Es wird deutlich, dass die Fahrzeuge 1 und 2 in ihrem ersten Ladefenster keinen Mindestenergiebedarf besitzen, dennoch werden sie sinnvollerweise aufgrund der einsetzenden PV-Erzeugung (vgl. Abbildung 5) beladen und damit die Energie der maximal möglichen Beladung bedient. Aufgrund dieser Beladung haben beide Fahrzeuge auch zu Beginn des zweiten Ladefensters keinen Mindestenergiebedarf. Vor dem Hintergrund der PV-Erzeugung in dem Zeitbereich und der möglichen weiteren Beladung beider Fahrzeuge, werden diese mit der jeweils am Ladepunkt verfügbaren Ladeleistung (bzw. Ladestufe) weiter beladen.

Das beschriebene Zusammenspiel zwischen LMS und üEMS und dem verfolgten Ansatz der

Datenaggregation im LMS bedingt einen Informationsverlust, wodurch Unschärfen entstehen. Bei der Generierung des optimalen Flottenladefahrplans im üEMS und der Generierung fahrzeugspezifischer Ladefahrpläne im LMS wird dies deutlich. Die Optimierung sieht eine Beladung der Fahrzeuge auch außerhalb der Zeiten der PV-Erzeugung vor, um die Mindestenergiebedarfe der Fahrzeuge zu bedienen. Das üEMS hat lediglich Informationen zu einzelnen Ladefenstern, jedoch nicht darüber welches Fahrzeug zum betrachteten Ladefenster gehört. Dies führt dazu, dass eine Beladung eines Fahrzeuges in einem früheren Ladefenster über den minimalen Energiebedarf hinaus, in einem späteren Ladefenster im üEMS nicht berücksichtigt werden kann ohne die minimale Beladung aller Fahrzeuge zu jedem Zeitpunkt zu gefährden. In Folge wird an dem gezeigten Beispiel deutlich, dass auch Fahrzeugbeladungen außerhalb der Energiebereitstellung durch die PV-Anlagen vorgesehen werden, die bei fahrzeugspezifischer Betrachtung zum Teil nicht notwendig sind. Somit besteht beim gewählten Ansatz noch Verbesserungspotenzial hinsichtlich einer CO₂-minimalen Beladung von Elektrofahrzeugflotten.

Die dargestellten Ergebnisse stellen einen ersten Umsetzungsstand dar. Das Verhalten des Zusammenspiels zwischen LMS und üEMS ist noch mit weiteren Ladeszenarien zu untersuchen.

4. Literaturverzeichnis

- [1] Agora Verkehrswende: „Klimaschutz im Verkehr: Maßnahmen zur Erreichung des Sektorziels 2030.“. [Online]. Available: <https://www.agora-verkehrswende.de/veroeffentlichungen/klimaschutz-im-verkehr-massnahmen-zur-erreichung-des-sektorziels-2030/>. [Zugriff am 23.10.19]