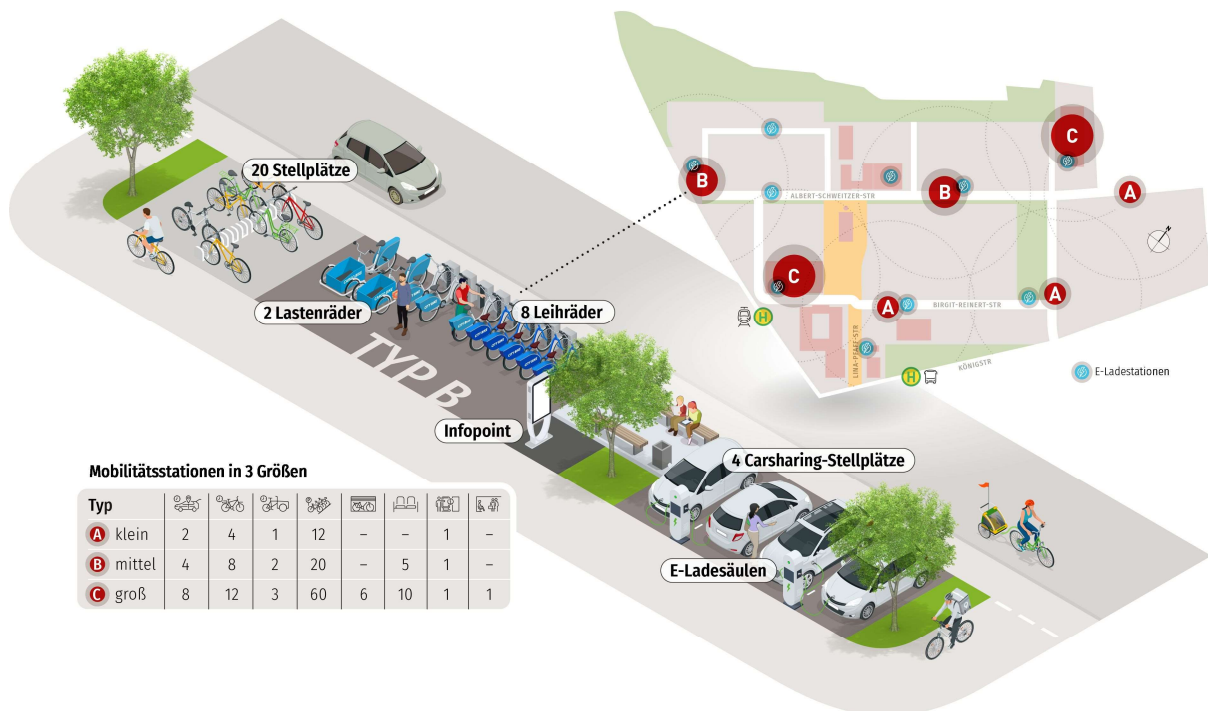


E-Mobilität im Pfaff-Quartier: Ladeinfrastruktur und bidirektionales Laden

Themenbericht erstellt im Rahmen des Schlussberichts
zum Verbundvorhaben EnStadt:Pfaff
„Implementierung des Reallabors Pfaff-Areal Kaiserslautern“



E-Mobilität im Pfaff-Quartier: Ladeinfrastruktur und bidirektionales Laden

Themenbericht erstellt im Rahmen des Schlussberichts zum
Verbundvorhaben EnStadt:Pfaff:

„Implementierung des Reallabors Pfaff-Areal Kaiserslautern - Integrierte
Konzepte, innovative Technologien und sozialwissenschaftliche Forschung
im Leuchtturm für klimaneutrale Quartiere“

Teilvorhaben EnStadt:Pfaff: „Fraunhofer SozioMobil“

Förderndes Ministerium:	Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
Projektträger:	Forschungszentrum Jülich GmbH
Förderkennzeichen:	03SBE112G
Projektlaufzeit:	01.10.2017 – 31.12.2024
Autoren:	Gerhard Stryi-Hipp, Niels Reiners, Matti Sprengeler
Ausführende Stelle:	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE Heidenhofstr. 2, 79100 Freiburg
Veröffentlicht:	Juli 2025

Die Verantwortung der Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Das Verbundprojekt EnStadt:Pfaff wurde von 8 Partnern durchgeführt und als Leuchtturmprojekt gemeinsam gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Titelbild: Grafik einer Mobilitätsstation im Pfaff-Quartier mit E-Ladesäulen

Quelle: Triolog / EnStadt:Pfaff

Weitere Informationen zu EnStadt:Pfaff: <https://pfaffquartier-klimaneutral.de/>

Zusammenfassung

Die Mobilität spielt eine wichtige Rolle bei der Erreichung der Klimaneutralität eines Quartiers. Im Vorhaben EnStadt:Pfaff wurden deshalb verschiedene damit zusammenhängende Fragestellungen untersucht. Da künftig der größte Teil der Pkws elektrisch angetrieben wird und diese auch in den Quartieren geladen werden, muss der dafür benötigte Strombedarf klimaneutral bereitgestellt und in die Quartiersenergiebilanz eingerechnet werden. Um zu ermitteln, in welchem Umfang voraussichtlich im Quartier geladen wird, müssen Modelle entwickelt und Annahmen getroffen werden, wann welche E-Fahrzeuge wo und wie geladen werden. Entsprechende Berechnungen wurden für das Pfaff-Quartier durchgeführt.

Die Voraussetzung für die erfolgreiche Einführung der E-Mobilität ist die ausreichende Verfügbarkeit einer Ladeinfrastruktur. Für das Laden gibt es verschiedene Use-Cases, im nicht öffentlichen Raum mit der eigenen Wallbox im Einfamilienhaus oder in der Tiefgarage im Mehrfamilienhaus oder bei der Arbeit sowie im öffentlichen Raum während dem Einkaufen auf dem Kundenparkplatz oder an Ladesäulen am Straßenrand oder an zentralen Lade-Hubs. Welche E-Mobilisten welche Infrastruktur voraussichtlich in welchem Umfang nutzen werden, hängt von ihren Bedarfen, ihren Lebensgewohnheiten, aber auch den Angeboten in Bezug auf Verfügbarkeit, Zeitaufwand und Kosten ab. In EnStadt:Pfaff wurde untersucht, welche Nutzergruppen im Quartier mit welchen Ladebedarfe vermutlich vorhanden sein werden, in welchem Umfang sie zu welchen Zeitpunkten und mit welcher Dauer sie vermutlich Ladebedarf haben und welche Ladeinfrastruktur notwendig ist, um diese Bedarfe zu befriedigen (siehe Kapitel 2).

E-Fahrzeuge sind wesentlich effizienter und im Betrieb kostengünstiger als Verbrennerfahrzeuge. Allerdings erfordert der Ausbau der Ladeinfrastruktur umfangreiche Investitionen. Dies betrifft die Bereitstellung der benötigten elektrischen Leistung durch einen entsprechenden Ausbau des Verteilnetzes und die Aufstellung von Transformationen sowie den Aufbau der Ladepunkte unter Berücksichtigung der Lastverschiebungspotenziale durch entsprechende Ladestrategien (siehe Kapitel 3). Damit Unternehmen in die Ladeinfrastruktur investieren und diese betreiben, braucht es Geschäftsmodelle, die für alle Beteiligten auskömmlich sind. In EnStadt:Pfaff wurde untersucht, inwieweit Ladeinfrastruktur im Rahmen von Energie-Communities betrieben bzw. genutzt werden kann und inwieweit der Einsatz von Blockchains bei deren Geschäftsmodell sinnvoll ist (siehe Kapitel 4).

Das Laden von E-Fahrzeugen wird die Stromlastprofile in Quartieren deutlich verändern, beispielsweise würde der Strombedarf am Abend deutlich ansteigen, wenn viele Bewohnerinnen und Bewohner abends nach Hause kommen und gleichzeitig ihr E-Fahrzeug mit voller Leistung laden. Durch kontrolliertes Laden, das die Ladeleistung intelligent auf den Zeitraum verteilt, in dem die E-Fahrzeuge an den Ladepunkt angeschlossen sind, lässt sich die Lastkurve deutlich glätten und die Belastung des Stromnetzes reduzieren. E-Fahrzeuge können allerdings auch aktiv zur Stabilisierung des Stromnetzes beitragen, indem sie bei Bedarf Strom aus ihrer Fahrzeugbatterie ins Stromnetz zurückspeisen. Das sogenannte bidirektionale befindet sich noch in der Erprobung und es stellt sich die Frage, in welchem Umfang es künftig die Stromversorgung im Quartier durch systemdienliches Laden der E-Fahrzeuge unterstützen kann. Um dies zu untersuchen, wurde im Rahmen von EnStadt:Pfaff ein Labor aufgebaut, das im Anschlussvorhaben für die Erforschung dieser Fragestellungen genutzt wird (siehe Kapitel 5).

Inhalt

Zusammenfassung	3
Abkürzungen.....	5
Tabellen	5
Abbildungen.....	6
1 Einleitung	7
2 Untersuchungen zum Bedarf an Ladeinfrastruktur	10
2.1 Vorgehen bei der Berechnung einer bedarfsgerechten Ladeinfrastruktur	10
2.2 Beispielhafte Ergebnisse der Berechnung von Ladeinfrastrukturbedarf	12
2.2.1 Berechnung der Ladeinfrastrukturbedarfe	15
2.2.2 Ladepunktbedarfe im Pfaff-Quartier.....	16
3 Lastverschiebungs-Potenziale beim Laden von E-Fahrzeugen.....	17
3.1 Wirkleistungsbezogene Auswirkungen der E-Fahrzeuge auf Netzknotenpunkte	18
3.2 Wirkleistungsbezogene Auswirkungen der E-Mobilität auf Niederspannungsverteilnetze ..	19
3.3 Glättung von Lastspitzen durch gesteuertes Laden.....	20
3.4 Einfluss der Ladestrategien auf die Anzahl der Ladepunkte der einzelnen Leistungsklassen	21
3.5 Lösungsstrategien bei auftretenden Netzengpässen	23
3.6 Zusammenfassung der Auswirkung der E-Mobilität auf das Verteilnetz	24
4 Integration von E-Fahrzeugen in Energie-Communities	26
5 Aufbau eines E-Mobil- und Batterielabors im Pfaff-Quartier	27
6 Literatur	30

Abkürzungen

AC	Wechselstrom (Alternating Current)
BEV	Vollelektrische E-Fahrzeuge (Battery Electric Vehicles)
DC	Gleichstrom (Direct Current)
MiD	Mobilität in Deutschland
NEP	Nationale Plattform Elektromobilität
PHEV	Plug-In-Hybrid E-Fahrzeuge (Plug-In-Hybrid Electric Vehicles)
PV	Photovoltaik
VD	Verweildauer

Tabellen

Tabelle 1: Nutzungsspezifische Verweildauern (VD) im Normalladebereich ab 60 Minuten.....	13
Tabelle 2: Ergebnisse der Berechnungen der wirkleistungsbezogenen Auswirkungen auf die Netzknotenpunkte	18

Abbildungen

Abbildung 1: Prognostizierter Bestand an E-Pkw von 2025 bis 2030 auf Grundlage der Herstellerbefragung E-Pkw 2024 unterschieden nach BEV und PHEV , Quelle: Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur [5]	7
Abbildung 2: Lade-Use-Cases zur Ladung des eigenen E-Pkws, Quelle: Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur [5]	8
Abbildung 3: Annahmen zu Flächennutzungen im Pfaff-Quartier	12
Abbildung 4: Durchschnittliches tägliches Verkehrsaufkommen im Pfaff-Quartier differenziert nach Nutzergruppen.....	13
Abbildung 5: Aktivitäten-spezifisches Tageszielverkehrsaufkommen in Abhängigkeit der Pkw-Fahrten im Normalladebereich	14
Abbildung 6: Aktivitätenspezifisches Tageszielverkehrsaufkommen in Abhängigkeit der Pkw-Fahrten im Schnellladebereich.....	15
Abbildung 7: Quantifizierte Ladepunktzahl der Besucher, Kunden & Auszubildenden	16
Abbildung 8: Szenarien A1 & A2: Gesamtübersicht des Ladepunktbedarfs im halbprivaten und (halb-) öffentlichen Raum in Abhängigkeit des Baufeldes.....	17
Abbildung 9: Gesamtnetzbelastung der Transformatorenstation V bei koordiniertem Laden, Quelle: P. Nguyen.....	20
Abbildung 10: Anzahl der berechneten Ladepunkte in ihren jeweiligen Leistungsklassen für das gesamte Pfaff-Quartier mit der Ladestrategie Direktladen	22
Abbildung 11: Anzahl der berechneten Ladepunkte in ihren jeweiligen Leistungsklassen für das gesamte Pfaff-Quartier mit der Ladestrategie Minimale Ladeleistung	22
Abbildung 12: Anzahl der berechneten Ladepunkte in ihren jeweiligen Leistungs- klassen für das gesamte Pfaff-Quartier mit der Ladestrategie Mini- mierte Netzbelastung	23
Abbildung 13: E-Roaming-Prozess heute, Quelle: Universität Bayreuth [14]	26
Abbildung 14: Grafik der neu errichteten Energiezentrale des Pfaff-Quartiers mit dem Forschungslabor im vorderen Teil, die beiden E-Fahrzeug-Ladepunkte und Stellplätze befinden sich auf der Vorderseite des Gebäudes, Quelle: Triolog / EnStadt: Pfaff.....	28
Abbildung 15: Verschaltung der Komponenten des E-Mobil- und Batterie-Labors, Quelle: Fraunhofer ISE	29

1 Einleitung

Die E-Mobilität ist ein wichtiger Baustein der Energiewende. Am 1. Oktober 2024 waren in Deutschland 49,4 Mio. Pkws gemeldet, davon 1,6 Mio. rein batterieelektrisch betriebene Elektrofahrzeuge (BEV, Battery Electric Vehicles) und 3,4 Mio. Hybrid-Fahrzeuge [1]. Im Netzentwicklungsplan der Bundesnetzagentur wurde erwartet, dass die Zahl der E-Fahrzeuge bis zum Jahr 2027 auf 27,8 bis 37,8 Mio. und bis zum Jahr 2045 auf 36,8 Mio. bis 44,9 Mio. ansteigen wurde [2]. Die Bundesregierung hat das Ziel gesetzt, Deutschland mit 15 Millionen Elektro-Pkw und einer Million öffentlich zugänglichen Ladepunkten bis 2030 zum Leitmarkt für E-Mobilität zu machen. Hierzu hat die Bundesregierung mit dem Masterplan Ladeinfrastruktur II eine Gesamtstrategie für den Ausbau der Ladeinfrastruktur entwickelt. [3] Es gibt also einen großen Konsens über den Ausbau der E-Mobilität in Deutschland.

Laut einer Befragung der Fahrzeughersteller im Jahr 2024 ergibt sich entsprechend ihres erwarteten Absatzes für das Jahr 2030 sogar ein Bestand von insgesamt 16,6 Mio. E-Pkw. Diese setzen sich zusammen aus 13,4 Mio. vollelektrischen E-Fahrzeuge (BEV) und 3,2 Mio. Plug-In-Hybrid E-Fahrzeuge (PHEV, Plug-In-Hybrid Electric Vehicles). Die 16,6 Mio. E-Pkws würden einem Anteil von 34 Prozent aller zugelassenen Pkw entsprechen. Die prognostizierte Entwicklung der Batteriekapazität pro E-Fahrzeug steigert sich nach Ansicht der Hersteller bis 2030 im Mittel auf 73 bis 97 kWh und der prognostizierte Energieverbrauch von BEV sinkt bis 2030 auf 13,0 bis 16,5 kWh je 100 km. Der entsprechende Markthochlauf ist in Abbildung 1 dargestellt. [4]



Abbildung 1: Prognostizierter Bestand an E-Pkw von 2025 bis 2030 auf Grundlage der Herstellerbefragung E-Pkw 2024 unterschieden nach BEV und PHEV, Quelle: Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur [5]

Um die Transformation der Mobilität von fossilen Verbrennerfahrzeugen zu E-Fahrzeugen zu erreichen, ist ein rascher Aufbau einer ausreichenden Ladeinfrastruktur für E-Fahrzeuge erforderlich. Die Ladepunkte für E-Fahrzeuge teilen sich auf in öffentliche und nicht öffentliche Ladepunkte. Die Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur unterscheidet in Abbildung 2 weiter in Lade-Use-Cases zur Ladung des eigenen E-Pkws im nicht öffentlichen Bereich im Eigenheim, im Mehrparteienhaus oder im Unternehmen. Für das öffentliche Laden werden die Lade-Use-Cases Kundenparkplatz, Straßenraum, Lade-Hub und Lade-Hub Achse, die an Verkehrsachsen liegen, unterschieden. Im öffentlichen Bereich müssen zusätzlich noch die Lade-Use-Cases innerorts (Kundenparkplatz oder Straßenraum) und überregional differenziert werden. [5]

ABBILDUNG 01: UNTERSCHIEDLICHE LADE-USE-CASES ZUR LADUNG DES EIGENEN E-PKW

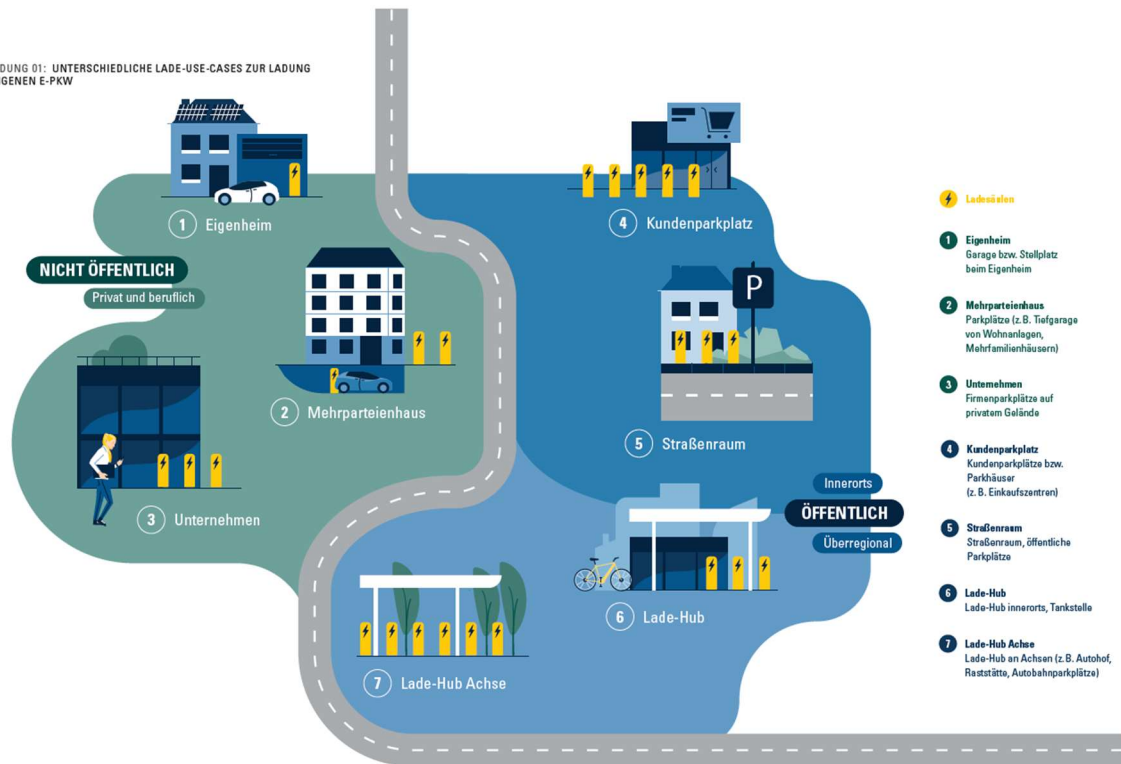


Abbildung 2: Lade-Use-Cases zur Ladung des eigenen E-Pkws, Quelle: Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur [5]

Klimaneutrale Quartieren müssen vor diesem Hintergrund eine ausreichende Kapazität von E-Ladeinfrastruktur bereitstellen, sowohl für das nicht-öffentliche Laden in Eigenheimen, Mehrfamilienhäusern und in Unternehmen, als auch das öffentliche Laden auf Kundenparkplätzen und im Straßenraum.

Im Vorhaben EnStadt:Pfaff wurde bei der Berechnung des Energiesystems für das klimaneutrale Pfaff-Quartier angenommen, dass 100 % der Pkws im Quartier vollelektrische E-Fahrzeuge sind. Andere klimaneutrale Treibstoffe wie Wasserstoff oder E-Fuels wurden nicht in Betracht gezogen, da aufgrund ihrer auch langfristig deutlich höheren Kosten ein nennenswerter Einsatz möglicherweise auf Langstrecken in Frage kommt, aber im urbanen Raum unwahrscheinlich ist. Dementsprechend wurde für das Pfaff-Quartier der zusätzliche Strombedarf für das Laden der E-Pkws der Bewohner:innen, Besucher:innen und Beschäftigten im Quartier mit einberechnet.

Die Ladeinfrastruktur für das Pfaff-Quartier ist bislang nicht konkret geplant, da es noch große Unsicherheiten darüber gibt, wie schnell der Markthochlauf der E-Fahrzeuge tatsächlich stattfinden wurde, wo und bei welchen Gelegenheiten, wie oft und wie lange die E-Fahrzeuge geladen werden. Die Antworten auf diese Fragen hängen auch von den technologischen Fortschritten ab, was beispielsweise die Batteriekapazität der E-Fahrzeuge, die angebotene Ladeleistung, die Ladetechnik (mit Kabel oder induktiv) sowie die Ladetechnik angeht. Beispielsweise wäre langfristig auch denkbar, dass die dann autonom fahrenden E-Fahrzeuge selbständig zu E-Ladehubs fahren und laden.

Eine wichtige Frage bei der Dimensionierung der Ladeinfrastruktur ist auch, in welchem Maße die E-Fahrzeuge für kontrolliertes oder bidirektionales Laden zur Verfügung stehen. Beim kontrollierten Laden wurde die Ladeleistung so gesteuert, dass die (kostengünstig) verfügbare elektrische Leistung optimal auf alle angeschlossenen E-Fahrzeuge verteilt wurde, d.h. zeitweise mit reduzierter Leistung geladen

wurde, aber das E-Fahrzeug trotzdem zum vereinbarten Zeitpunkt den gewünschten Ladezustand aufweist. Beim Bidirektionalen Laden stellt das E-Fahrzeuge zusätzlich seine Batterie in definierten Grenzen zur Einspeisung von Strom in das Stromnetz zur Verfügung. Im zuvor festgelegten Zeitraum, in dem das E-Fahrzeug abgestellt und an den Ladepunkt angeschlossen ist, kann nun das Lademanagement die Be- und Entladung der Batterie so steuern, dass die Beladung möglichst kostengünstig und am Stromangebot orientiert erfolgt und zusätzlich bei Bedarf Strom aus der Batterie des E-Fahrzeug ins Stromnetz zurückgespeist wurde, wenn dies ökonomisch attraktiv ist. Das Lademanagement gewährleistet, dass am Ende der vereinbarten Standzeit der gewünscht Ladestand erreicht ist.

Kontrolliertes und bidirektionales Laden reduzieren den Bedarf an elektrischer Anschlussleistung und ermöglichen ein systemdienliches Laden der E-Fahrzeuge. Allerdings bedarf es dafür ein Lademanagement, E-Fahrzeuge, die dies zulassen, eine Kommunikation zwischen dem Lademanagement und dem E-Fahrzeug sowie ein Abrechnungssystem, die für das bidirektionale Laden geeignet sind. Kontrolliertes Laden wurde zunehmend am Markt angeboten und ist besonders für Gemeinschaftsgaragen von Mehrfamilienhäuser und für Parkhäuser relevant. Denn durch kontrolliertes Laden können mehr Ladepunkte installiert werden, da nicht für jeden Ladepunkt die maximale Leistung am Anschlusspunkt zu jeder Zeit bereitgestellt werden muss.

Das bidirektionale Laden dagegen wurde zwar schon in einigen Pilotprojekten demonstriert und seine Machbarkeit nachgewiesen, am Markt ist es bislang aber nur sehr eingeschränkt verfügbar. Beispielsweise bietet VW bidirektionales Laden für sein ID E-Fahrzeuge an, wenn eine spezielle Wallbox und Batteriesystem vom Hersteller E3/DC verwendet wurde. Dabei begrenzt sich das bidirektionale Laden auf das sogenannte vehicle2 home-Laden, d.h. der Strom aus der E-Fahrzeug-Batterie wurde nur in das Gebäudenetz zurückgespeist und dort genutzt, aber nicht in das öffentliche Netz. Das vehicle2grid-Laden, bei dem die E-Fahrzeuge an öffentlichen Ladesäulen stehen und ins Stromnetz einspeisen, ist derzeit noch nicht möglich. Weiter ist von Herstellerseite die Funktion des bidirektionalen Ladens auf max. 10.000 kWh Entladen oder max. 4.000 kWh Entladen begrenzt. [6]

Der ADAC hat eine Übersicht über am Markt verfügbare E-Fahrzeugen für bidirektionales Laden erstellt. Stand Mai 2025 stehen 12 Fahrzeugfamilien unterschiedlicher Hersteller bereit, die die Funktion bidirektionales Laden zur Verfügung stellen. Davon sind aber 4 E-Fahrzeugtypen, die nur vehicle2load-Entladung anbieten, d.h. es befindet sich eine Schuko-Steckdose im Fahrzeug, an der ein elektrisches Gerät eingesteckt werden kann. Die restlichen E-Fahrzeugtypen bietet vehicle2home an mit dem Hinweis, dass vehicle2grid vorbereitet ist. 3 der 8 E-Fahrzeugfamilien weisen einen CHAdeMo-Stecker auf, der in Europa selten eingesetzt wurde und 2 dieser 3 Fahrzeuge ist am Markt nicht mehr erhältlich. Somit wurden Mitte 2025 folgende 5 E-Fahrzeug(familien) angeboten, die bidirektionales Laden als v2h anbieten: Cupra Born, Skoda Enyaq, Volvo EX90, VW ID.3 – 5/Buzz und Polestar 3. [7]

Vor diesem Hintergrund wurde im Vorhaben EnStadt:Pfaff einerseits untersucht, wie die Ladeinfrastruktur im Pfaff-Quartier optimiert geplant werden kann und andererseits ein E-Mobil- und Batterielabor eingerichtet, das Tests im Bereich Bidirektionales Laden ermöglicht. Die entsprechenden Aktivitäten sind im Folgenden beschrieben.

2 Untersuchungen zum Bedarf an Ladeinfrastruktur in Quartieren

Die Berechnung optimierter Ausbaustrategien für E-Mobil-Ladeinfrastrukturen unter verschiedenen Fragestellungen war Gegenstand von zwei Master- und einer Bachelorarbeit, die im Rahmen des Vorhabens EnStadt:Pfaff beim Fraunhofer ISE erstellt wurden. „Ermittlung einer bedarfsgerechten Ladeinfrastruktur für Elektroautos auf Basis der zukünftigen E-Mobilitäts-Entwicklung. Im Rahmen des Projekts EnStadt:Pfaff in Kaiserslautern.“ von Julia Ackermann [8] und “Quantifying the demand for public charging infrastructure of electric vehicles” von Tobias Bahmer [9] untersuchten den optimierten Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur und „Wohin mit den Ladesäulen?“ von Katharina Matulla [10] entwickelte ein Konzept zur Identifizierung von Standorten der öffentlichen Ladeinfrastruktur.

Im Folgenden sind beispielhaft die Ergebnisse der Arbeit von Julia Ackermann zusammengefasst.

2.1 Vorgehen bei der Berechnung einer bedarfsgerechten Ladeinfrastruktur

Die Masterarbeit zeigte auf, mit welchen Methoden und Parametern eine Strategie für den bedarfsgerechten Ladeinfrastrukturausbau im Pfaff-Quartier entwickelt werden kann. In erster Linie resultieren die Bedarfe von Ladeinfrastruktur aus den vielseitigen Bedürfnissen der Nachfrage, also den E-Fahrzeughaltern. Das Bedürfnis nach Mobilität und der Ausübung von unterschiedlichen Aktivitäten sollte aufgrund des relativ hohen Zeitaufwands für den Ladevorgang eines Elektrofahrzeugs nicht geschmälert werden. Aus diesem Grund wurde die Ausbaustrategie auf die Mobilitätsverhaltenskompatibilität und die Verknüpfung von unterschiedlichen Aktivitätenzwecken der Nutzergruppen ausgerichtet. Die Aufenthaltsorte und -zwecke einzelner Nachfragegruppen im Pfaff Quartier wurden untersucht, um daraus die Anzahl der Ladepunkte sowie deren Lokalisation zu ergründen. Weiterhin sind die Ladeleistungen auf die Aufenthaltsdauern von Personen an unterschiedlichen Aktivitätenorten abgestimmt, so dass keine zusätzliche Zeit von Elektrofahrzeughaltern benötigt wurde, um den Ladevorgang durchzuführen.

In einem Konversionsgebiet wie dem Pfaff-Quartier sind die Nachfragegruppen sowie deren Aktivitätszwecke noch weitestgehend unbekannt. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass die Nutzergruppen und deren Aktivitäten aus baulichen Planvorgaben und -empfehlungen abgeleitet werden können. So wurden insgesamt 83 Annahmen für zukünftige Gebäudeflächennutzungen getätigt, die als Basis für die Identifikation der Schätzungen von Verkehrsaufkommen und Ladeleistung, sowie statistischen Auswertungen und stochastischen Wahrscheinlichkeitsberechnungen zweckdienlich werden. Außerdem wurde aufgezeigt, dass sich das Verfahren zur Verkehrsaufkommensschätzung auch in diesem Zusammenhang eignet, um herauszufinden, welche Nutzergruppen die unterschiedlichen Flächennutzungen frequentieren und um die Intensität der Fahrzeugankünfte pro Tag zu ermitteln. Weiter wurden statistische Auswertungen der MiD-Studie vorgenommen, welche wichtige Erkenntnisse zu den Aufenthaltsdauern und -zeiten der Personen liefert. In drei verschiedenen Szenarien wurde abgebildet, inwiefern die Ladeinfrastrukturbereitstellung dimensioniert werden muss, um die Ladebedarfe an unterschiedliche zukünftige E-Mobilitätsbestände im Pfaff-Quartier anzupassen. Es fällt auf, dass mit fortschreitendem Markthochlauf von E-Mobilität weitere Flächennutzungen hinzukommen, deren Nutzergruppen einen Bedarf an Ladeinfrastruktur beanspruchen. Die erarbeitete Methodik zur Berechnung von Ladepunkten kann schließlich flexibel auf die jeweiligen Szenarien reagieren und so einen sukzessiven Aufbau von Ladepunkten im Pfaff-Quartier abbilden.

Da das Pfaff-Quartier eine hohe Nutzungsdurchmischung zum Zweck des Wohnens, Arbeitens, der Bildung und Forschung anstrebt, geht die Vielfalt der Flächennutzungen mit der Diversität der potenziellen Nachfragegruppen sowie mit deren jeweiligen Bedürfnissen nach Ladeinfrastruktur einher.

Aus den Ergebnissen dieser Arbeit geht hervor, dass der Normalladeinfrastrukturbedarf im Quartier überwiegt, welcher vornehmlich von den Bewohnern und Beschäftigten beansprucht wurde. Dabei wurde der Bereitstellung von Ladeinfrastruktur für Bewohner eine untergeordnete Bedeutungsträchtigkeit beigemessen. Der Grund dafür liegt darin, dass diese Nachfragegruppe den Ladevorgang zukünftig über privat zur Verfügung stehende Stellplätze in Quartiersgaragen vornehmen kann. Dies hat zur Folge, dass die Förderung der E-Mobilität für Bewohner nur schwer durch die öffentliche Hand stimuliert werden kann. Nichtsdestoweniger kann die private E-Mobilität der Bewohner in einem gewissen Maße gefördert werden, indem ausreichend Leerrohre auf den Bewohnerstellplätzen der Quartiersgaragen bereitgestellt werden. Um die Dimensionen der erforderlichen Infrastrukturen abzuschätzen, kann eine überschlägige Berechnung zum künftigen Elektrofahrzeugbestand getätigt werden.

Demgegenüber liegt die Möglichkeit der Bereitstellung von Ladeinfrastruktur für Beschäftigte auf Seiten der Unternehmen. Um zu bemessen, wie viel Ladeinfrastruktur die Beschäftigten der einzelnen Unternehmen und Branchen zukünftig bereitstellen zu müssen, wurde die Anzahl der Ladepunkte mithilfe des Warteschlangensystems berechnet. Die Parameter der Ladeleistung, der Frequentierung und der Verweildauer fungieren in diesem Zusammenhang als Haupteingangsparameter. Weiterhin wurde abgebildet, wie das derzeitige Pkw-Fahrverhalten in Deutschland auf die Bedarfsermittlung von Ladeinfrastruktur übertragen werden kann: So wurde zum einen die Parkzeit mit der Verweilzeit an der Ladestation verglichen und zum anderen davon ausgegangen, dass die Nutzer der Ladeinfrastruktur zu keinem Zeitpunkt dazu bereit sind, sich in eine Warteschlange einzugliedern. Darüber hinaus kann die Qualität der Abfertigung an der Ladestation in zwei unterschiedlichen Szenarien präsentiert werden. Nachdem die Ladepunktzahl der Beschäftigten getätigt war, erfolgte deren Verortung lediglich auf Baufeldebene. Dies geschieht vor dem Hintergrund, dass die Beschäftigten ihren Ladevorgang auf unternehmenseigenen Stellplätzen durchführen können. Für den Ausbau der Ladeinfrastruktur von Beschäftigten ist zu prüfen, inwiefern das Potential der wechselseitigen Nutzung von Ladeinfrastruktur zwischen Bewohnern und Beschäftigten aufgrund von unterschiedlichen, durchschnittlichen Belegungszeiteausgeschöpft werden kann.

Die Kunden und Besucher bilden diejenige Nutzergruppe ab, welche sowohl Schnell- als auch Normalladeinfrastruktur beansprucht. Aus den unterschiedlichen Aktivitätenzwecken der Kunden und Besucher resultiert, dass die Ermittlung der jeweiligen Ladeleistungen am aufwendigsten ist. Dennoch können die Ladepunkte ebenfalls mithilfe der Warteschlangentheorie berechnet werden, wenngleich diese Berechnung auf die spezifischen Aktivitätenzwecke der Kunden und Besucher sowie dessen unterschiedlichen Bedarfe nach Ladeleistungen ausgelegt wurde. Die Verortung der Ladepunkte geschieht in einem ersten Schritt mithilfe der Nutzwertanalyse, welche zum einen für die Identifikation von Schnellladepotentialen und zum anderen von Normalladepotentialen bereitstellt. Die Analyse der Gebäudeflächennutzwerte bietet dabei das Potential, richtungsweisende Empfehlungen flächennutzungsspezifischen Ladeleistungen zu geben. So ergibt sich beispielsweise, dass Besucher mit dem Zweck Arztbesuch, sowie mit dienstlichem Zweck die höchsten Schnellladepotentiale aufweisen. Zusätzlich konnte aufgezeigt werden, welche Ladeleistungspotentiale die einzelnen Baufelder aufweisen.

Obschon der Fokus dieser Ausbaustrategie auf der Bereitstellung von Ladeinfrastruktur im (halb-) öffentlichen Raum liegt, liefert die Untersuchung weiterer Nutzergruppen des privaten und halbprivaten Bereichs das Potential, dass ein frühzeitiger Dialog von unterschiedlichen Betreibern der Ladeinfrastruktur hergestellt werden kann. Dieser Dialog bietet die Chance, dass Ressourcen gespart werden, ohne dass die Abdeckung des Bedarfs einzelner Nachfragegruppen geschmälert wurde. Eine Möglichkeit liegt, wie bereits in Kapitel sechs aufgezeigt, in der wechselseitigen Bereitstellung von Ladeinfrastruktur.

Schließlich kann die erarbeitete Strategie zum Ladeinfrastrukturausbau im Pfaff-Quartier einige Perspektiven der Bemessung von nutzerspezifischen Ladebedarfen aufzeigen. Auch wenn die tatsächliche Installation der Ladepunkte aufgrund von unterschiedlichen Ladeinfrastrukturbereitstellern ungewiss bleibt, ermittelt die vorliegende Arbeit erste Erkenntnisse zur notwendigen Bereitstellung der Anzahl von Ladepunkten und den möglichen Standorten.

2.2 Beispielhafte Ergebnisse der Berechnung von Ladeinfrastrukturbedarf

In diesem Kapitel werden beispielhaft Berechnungsergebnisse der Masterarbeit dargestellt. Für die Berechnungen wurden 83 verschiedene Annahmen zu einzelnen Flächennutzungen im Pfaff-Quartier getätigt, die sich auf eine Gesamtbruttogrundfläche von 246.387 m² beziehen. Etwa 60 % der Flächen wird zum Arbeiten genutzt. Büros machen etwa 23 %, Forschungsinstitute etwa 10 % und Publikumsorientierte Dienstleistungen etwa 6 % der Flächen aus. 26 % der verfügbaren Flächen werden dem Wohnen und etwa 13 % dem Parken in den drei Quartiersgaragen zugeordnet. Die angenommenen Nutzungen der einzelnen Baufelder des Quartiers sind in Abbildung 3 dargestellt.

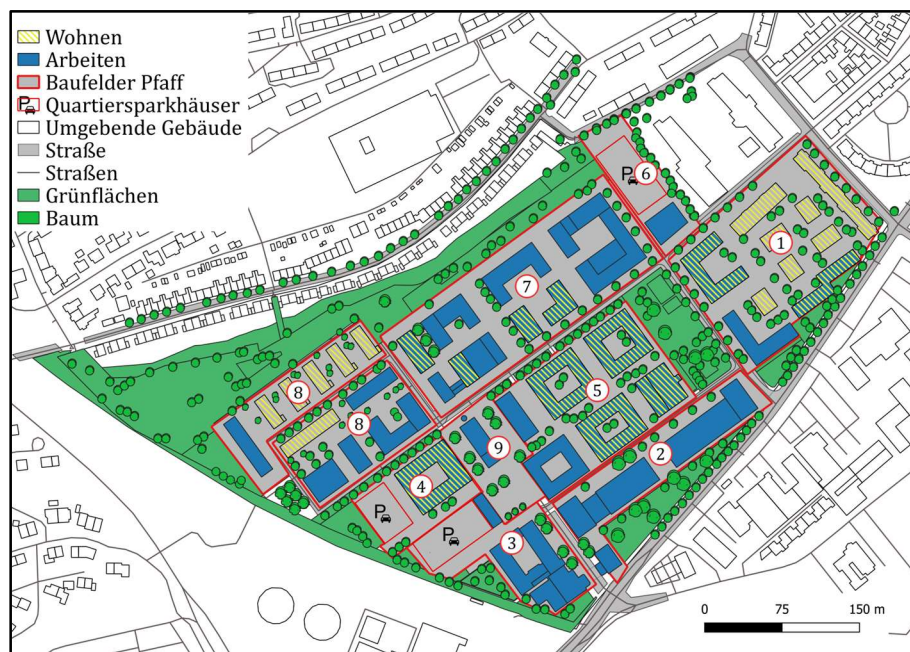


Abbildung 3: Annahmen zu Flächennutzungen im Pfaff-Quartier, Quelle: Julia Ackermann

Das Verkehrsaufkommen wurde aus den künftigen Nutzerstrukturen abgeleitet. Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse der zugehörigen Verkehrsaufkommensschätzung. Die Berechnungen bilden die mittleren täglichen Pkw-Fahrten ab. Mit durchschnittlich 4.605 Pkw-Fahrten pro Tag verursachen die Kunden- und Besucher knapp über die Hälfte des gesamten Verkehrsaufkommens im Quartier. Dabei fungieren die

„Publikumsorientierten Dienstleistungen“ mit 2.569 Pkw-Fahrten pro Tag, als verkehrsintensivste Flächennutzungen im Kunden- und Besucherverkehr gefolgt von den Beschäftigten mit einem durchschnittlichen täglichen Verkehrsaufkommen von 2.643 Pkw-Fahrten. Das geringste Verkehrsaufkommen wird durch Gäste der Bewohner, mit lediglich 59 Pkw-Fahrten pro Tag erzeugt.

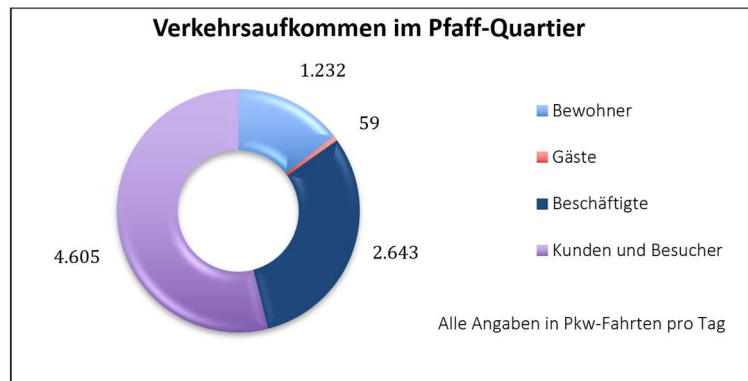


Abbildung 4: Durchschnittliches tägliches Verkehrsaufkommen im Pfaff-Quartier differenziert nach Nutzergruppen

Mit warteschlangentheoretischen Berechnungen sowie einer Nutzwertanalyse wurden die Verweildauern ebenjener Aktivitätenorte in Abhängigkeit der erforderlichen Ladeleistung berechnet. Die differenzierte Berechnung der Verweildauern erfolgt für alle Aktivitätenzwecke ab 5 Minuten. Dabei liegt die hochgerechnete Gesamtfallzahl der Stichprobe für alle relevanten Personen-Wege bei 22,49 Millionen. Die mittleren Verweildauern im Normalladebereich über 60 Minuten werden in der Tabelle 1 dargestellt. Es zeigt sich, dass 96 % der Personen etwa 7:27 Stunden am Arbeitsplatz verweilen. Ähnlich lange verweilen Personen zum Zweck der „Ausbildung“ in diesen Bereichen des Normalladepotentials – etwa 6:15 Stunden. Weiterhin ist festzustellen, dass weniger als die Hälfte der Personen für den „Arztbesuch“ (48 %) oder „Dienstleistungen“ (34 %) über 60 Minuten an einem Ort verweilen. Daraus ergibt sich, dass deren Verweildauern im Vergleich zu den weiteren betrachteten Aktivitätenzwecken am kürzesten ausfallen.

Tabelle 1: Nutzungsspezifische Verweildauern (VD) im Normalladebereich ab 60 Minuten

MiD ID	Aktivitäten-Zweck	Gesamte Stichprobengröße (VD > 5 min)	Verweildauer (VD)	Anteil	Fallzahl (VD > 60 min)
1	Arbeit	1.631.245	7:27	96%	11.273.426
2	Dienstlich	2.053.732	3:35	59%	1.717.593
3	Ausbildung	729.443	6:15	93%	717.274
503	Einkaufsbummel	1.039.654	2:22	62%	646.650
504	Dienstleistungen	678.226	2:11	34%	231.595
601	Arztbesuch	1.963.918	1:55	48%	948.948
702	Besuch kultureller Einrichtung	509.983	3:06	94%	480.928
704	Sport	2.063.760	2:20	92%	1.892.453
706	Gastronomiebesuch	1.358.592	2:13	74%	1.010.934

Neben den Verweildauern im Normalladebereich, sind ebenso die des Schnellladebereichs zu betrachten. Diametral zum Normalladen erhalten die Zwecke „Dienstleistungen“ und „Arztbesuch“ zu 84 % und 85 % die verhältnismäßig größten Stichprobenanteile. Der 7 %-ige Anteil des Zwecks „Arbeit“ ist vernachlässigbar gering. Außerdem zeigt sich, dass beim Zweck Ausbildung nicht allein prozentual ein geringer Personenanteil in den Bereichen des Schnellladens verweilt, sondern darüber hinaus die erreichte Fallzahl von 95.262 sehr gering ausfällt. Eine ähnlich geringe Fallzahl erhält der Zweck „Besuch kultureller Einrichtung“, bei dem lediglich 125.175 Personenwege zu ermitteln sind.

Die Tageszielverkehre, die dem Normalladebereich zuzuordnen sind, können Abbildung 5 entnommen werden. Zunächst ist anzumerken, dass die Zwecke „Einkaufsbummel“ sowie „Dienstleistungen“ nicht aufgeführt werden, da die errechneten Zielverkehrsanteile für den Normalladebereich („kleinflächiger Einzelhandel“ = 5 Fahrten pro Tag, „Dienstleistungen“ = 1 Fahrt pro Tag) sehr geringfügig und damit nicht abbildbar sind.

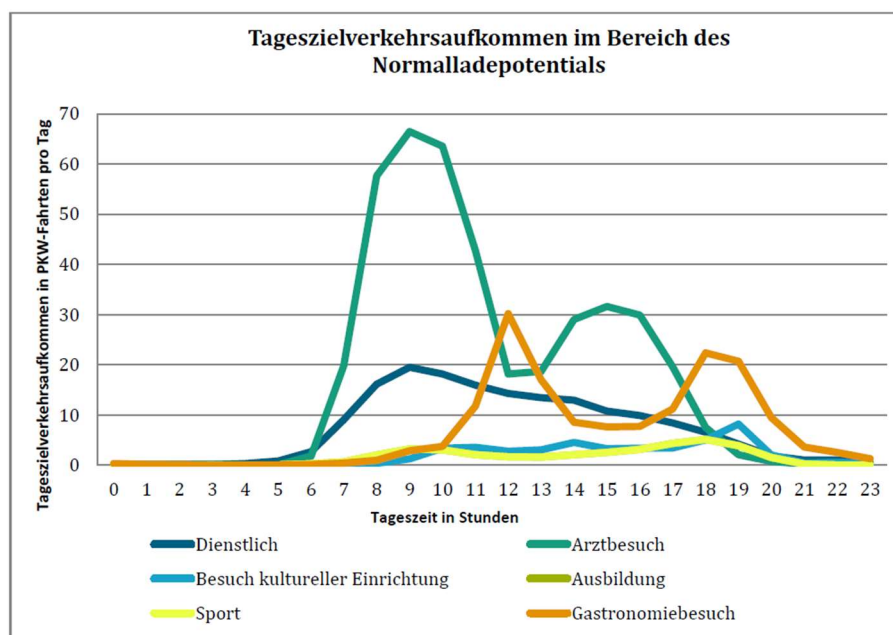


Abbildung 5: Aktivitäten-spezifisches Tageszielverkehrsaufkommen in Abhängigkeit der Pkw-Fahrten im Normalladebereich, Quelle: J. Ackermann

Fahrzeugankünfte mit dem Zweck „Arztbesuch“ finden insbesondere am frühen Morgen statt. Darüber hinaus ist am Nachmittag noch eine weniger intensive Belastungsspitze zwischen 14 und 16 Uhr zu erkennen. Darüber hinaus weist ebenso der „Gastronomiebesuch“ eine prägnante Mittagsspitze und einen abendlichen, weniger intensiven Spitzenstundenbereich von 17 bis 20 Uhr auf. An dieser Stelle sind die Intensitäten der Ankünfte etwa halb so groß, wie die der Arztbesuche. Weiterhin fällt auf, dass dieser Zweck auch am späteren Abend frequentiert wird. Ein wenig schwächer ausgeprägt erscheinen die Zielverkehre des Zwecks „Dienstlich“, welche nach einer leichten Morgenspitze um neun Uhr, annähernd linear bis etwa 20 Uhr abnehmen. Die geringsten Fahrzeug-Ankünfte werden hinsichtlich der Aktivitätszwecke „Sport“ und „Besuch kultureller Einrichtung“ mit weniger als zehn Fahrten pro Stunde generiert. Ebenjene Ankünfte verfügen jedoch dabei über leichte Spitzen in den Abendstunden. Insgesamt zeigt sich, dass die Verteilung der Fahrzeugankünfte relativ versetzt stattfindet. So liegen beispielsweise die Spitzenstunden der Gastronomie in den schwächer frequentierten Stunden der Arztbesuche und umgekehrt.

Weiterhin sind auch die Fahrzeuge zu untersuchen, welche das Quartier für eine kürzere zeitliche Dauer besuchen und sich dementsprechend im Bereich des Schnellladepotentials bewegen. Die zeitlichen Ankunftsverteilungen sind Abbildung 6 zu entnehmen. Die Abbildung der Spitzenstunden erfolgt analog zum Tageszielverkehrsaufkommen im Bereich des Normalladepotentials. Dennoch sind die Verkehrsbelastungen für den Aktivitätenzweck „Arztbesuch“ deutlich größer. Die morgendlichen Spitzenstunden erreichen annähernd 150 Fahrzeug-Ankünfte pro Stunde. Am Nachmittag erreichen etwa 70 Fahrzeuge das Quartier für ebenjenen Zweck in den Spitzenzeiten. Außerdem zeigt sich eine marginale Steigerung der Ankunftsintensitäten im Bereich des dienstlichen Zwecks. Demgegenüber weisen die Zwecke „Sport“ und „Ausbildung“ weniger Ankünfte auf, als im Bereich des Normalladepotentials.

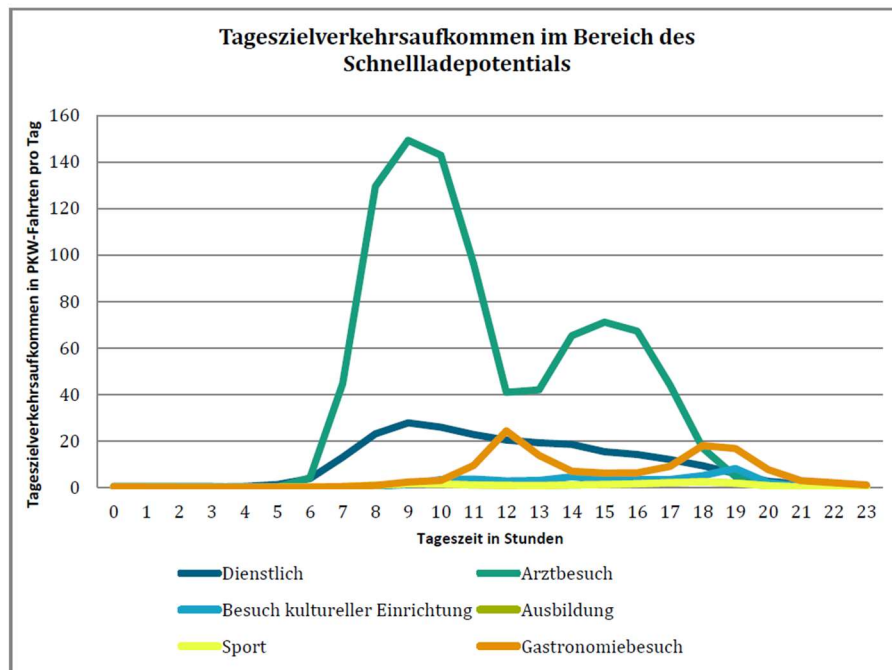


Abbildung 6: Aktivitätenspezifisches Tageszielverkehrsaufkommen in Abhängigkeit der Pkw-Fahrten im Schnellladebereich, Quelle: Eigene Darstellung

2.2.1 Berechnung der Ladeinfrastrukturbedarfe

Aus den vorgestellten Grundlagen wurden die folgenden Ladeinfrastrukturbedarfe errechnet.

Ladeinfrastrukturbedarf der Bewohner und Gäste: Insgesamt werden anhand der Verkehrsaufkommensschätzung 697 Haushalte für das Pfaff-Quartier erwartet, die 627 E-Fahrzeuge besitzen. Vor dem Hintergrund, dass alle Bewohner über einen privaten Stellplatz in einer der drei Quartiersgaragen verfügen, können diese den Ladevorgang über Nacht vor Ort ausüben. Darüber hinaus werden sie für die durchschnittlichen täglichen Wege keine weitere Ladeinfrastruktur beanspruchen. Die Verortung der Ladestandorte findet daher auf dem privaten Stellplatz statt.

Ladeinfrastrukturbedarf der Beschäftigten: Für die Beschäftigten des Quartiers wird die Anzahl der notwendigen Ladepunkte einzig für die Normalladinfrastruktur berechnet. Als Eingangsparameter dient die mittlere Verweildauer von 7,27 Stunden und die mittleren Ankünfte zwischen sechs und 22 Uhr. Demnach werden in Szenario A 1 insgesamt 530 Ladepunkte erforderlich. Dabei liegt das gesamte, erwartete Zielverkehrsaufkommen bei 1.322 Fahrten, wodurch ca. 40 % der ankommenden Fahrzeuge einen

Ladepunkt zur Verfügung haben. Demgegenüber sind in Szenario A 2 mit 266 Ladepunkten nur etwa die Hälfte im Pfaff-Quartier zu installieren. Daraus ergibt sich eine Ladepunktverfügbarkeit für 20 % der ankommenden Fahrzeuge.

Ladeinfrastrukturbedarf von Kunden, Besuchern und Auszubildenden: Die Ergebnisse der für die Nutzergruppen der Besucher, Kunden und Auszubildenden beziehen sich zunächst auf die erforderliche Ladepunktzahl, um im Anschluss die Resultate der Verortung der berechneten Ladepunkte aufzuführen. Für die ladeleistungsspezifischen Ladepunkte werden die Service- und Ankunftsdaten in Abhängigkeit des Aktivitätszwecks errechnet. Dabei sind die Ankunftsdaten zum Zweck „Einkaufsbummel“ und „Dienstleistungen“ sehr geringfügig, was dazu führt, dass für diese Zwecke keine Ladepunkte errichtet werden. Die Resultate der Berechnungen können Abbildung 7 entnommen werden.

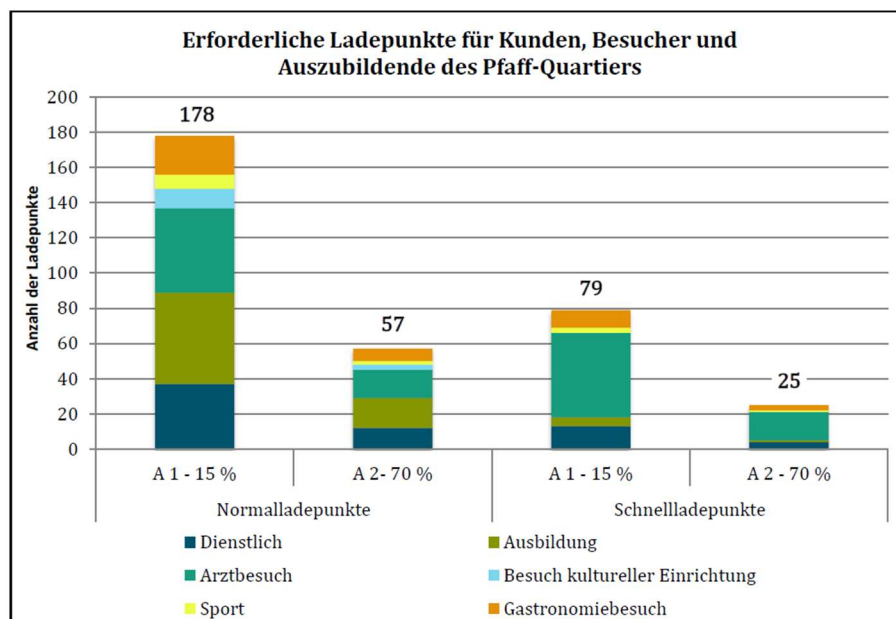


Abbildung 7: Quantifizierte Ladepunktzahl der Besucher, Kunden & Auszubildenden, Quelle: J. Ackermann

Im Szenario A 1 wird eine Installation von insgesamt 257 Ladepunkten erforderlich, wenngleich davon 79 Ladepunkte Schnellladeleistungen und 178 Ladepunkte Normalladeleistungen beanspruchen. Im Normalladebereich sind die Aktivitäten „Ausbildung“ und „Arztbesuch“ ausschlaggebend für den hohen Ladepunktbedarf. Demgegenüber machen allein die „Arztbesuche“ den überwiegenden Schnellladebedarf aus. Ferner besteht kein Schnellladebedarf für den Zweck „Besuch kultureller Einrichtung“. Im Szenario A 2 ist das Verhältnis der Ladepunkte zum Aktivitätszweck analog zu dem in A 1 zu beschreiben. Jedoch wird in A 2 die Errichtung von lediglich 57 Normalladepunkten und 25 Schnellladepunkten erforderlich.

2.2.2 Ladepunktbedarfe im Pfaff-Quartier

Werden nun die berechneten Ladebedarfe des halbprivaten und (halb-) öffentlichen Bereichs quantifiziert, so ergeben sich zwei Szenarien, die die Verlustwahrscheinlichkeit B (k) mit A 1 gleich 15 % und A 2 gleich 70 % repräsentieren. In Abbildung 8 werden die Szenarien A 1 und A 2 bezogen auf die Baufelder dargestellt.



Abbildung 8: Szenarien A1 & A2: Gesamtübersicht des Ladepunktbedarfs im halbprivaten und (halb-) öffentlichen Raum in Abhängigkeit des Baufeldes, Quelle: J. Ackermann

Zunächst ist anzumerken, dass die Zuordnung der Ladepunkte lediglich auf Baufeldebene in Abhängigkeit des Aktivitätszwecks erfolgt. Eine genauere Zuordnung auf die Quartiersgaragen und Tiefgaragen wurde nicht vorgenommen. Im Szenario A 1, bei 15 % Verlustwahrscheinlichkeit, werden insgesamt 787 Ladepunkte auf neun Baufeldern realisiert. Dabei liegt das Verhältnis der Ladepunkte von Beschäftigten zu den Besuchern, Kunden und Auszubildenden bei etwa 2:1. Das Verhältnis von Normal- zu Schnellladepunkten liegt dabei bei 9:1, wohingegen im Szenario A 2 - bei einer 70 %-igen Wahrscheinlichkeit, dass weitere Kunden nicht bedient werden können - knapp die Hälfte, 348 Ladepunkte erforderlich werden. Dabei steigt das Verhältnis von Beschäftigten zu Auszubildenden, Besuchern und Kunden auf etwa 3:1 an. Ferner steigt das Verhältnis von Normalladern zu Schnellladern auf 13:1 an. Dies könnte aus den kürzeren Verweildauern der Kunden, Besucher und Auszubildenden resultieren, sodass ebenso weniger Ladepunkte pro Fahrzeug im Schnellladebereich erforderlich werden. Sofern die beiden Szenarien auf den unterschiedlichen Baufeldern verglichen werden, fallen ebenso die unterschiedlichen Verhältnisse der Ladepunktbedarfe auf. Das Ladepunktverhältnis auf Baufeld eins, zwei, fünf und sieben beträgt annähernd 1:2, wenngleich dieses auf den anderen Baufeldern etwa 1:3 beträgt. Dementsprechend zeigt sich auch an dieser Stelle, dass ein geringer Ladepunktbedarf eine stärkere Schwankung zwischen beiden Verlustwahrscheinlichkeitsszenarien mit sich bringt.

3 Lastverschiebungs-Potenziale beim Laden von E-Fahrzeugen

Bei der Planung der Quartiersinfrastruktur in Bezug auf die Stromversorgung müssen ausreichende Netzkapazitäten und Transformatoren für die Bereitstellung der benötigten elektrischen Leistung bereitstellen. Durch die Elektrifizierung der Wärmeversorgung und der Mobilität einerseits sowie die zunehmende lokale Stromerzeugung mit Photovoltaikanlagen werden sich die Strombedarfe, Spitzenlasten und Lastkurven in den Quartieren künftig deutlich von der bisherigen Situation unterscheiden. Wie die entsprechenden Anforderungen an die Infrastruktur sein werden, hängt allerdings nicht nur vom

tatsächlichen Ausbau der Photovoltaikanlagen, Wärmepumpen sowie E-Fahrzeugen und Ladeinfrastruktur ab, sondern u.a. auch vom Einsatz von Flexibilitäten wie stationären Batterien, dem bidirektionalen Laden von E-Fahrzeugen, einem Demand-Side-Management und dem Einsatz intelligenten Energiemanagement ab. Wärmepumpen kommen im Pfaff-Quartier aufgrund der zentralen Wärmeversorgung nicht zum Einsatz, doch die Ladeinfrastruktur bietet durch bidirektionales Laden die Möglichkeit der Lastverschiebung, deren Möglichkeiten untersucht wurden.

Am Fraunhofer ISE wurde hierzu eine Masterarbeit von Simon Lambert erstellt, die Strategien für den Ausbau von öffentlicher Ladeinfrastruktur in Städten untersucht und entwickelt hat [11]. wurde diesen Fragen detailliert nachgegangen. Weiter wurde von Philipp Nguyen eine Masterarbeit mit dem Titel „Untersuchung von energetischen Auswirkungen durch E-Mobilität in Niederspannungsverteilnetzen anhand optimierter Ladestrategien im Rahmen von Ausbaustrategien für Ladeinfrastruktur“ [12] erstellt, deren Ergebnisse im Folgenden beschrieben sind.

3.1 Wirkleistungsbezogene Auswirkungen der E-Fahrzeuge auf Netzknotenpunkte

Zur Untersuchung und Steuerung der wirkleistungsbezogenen Auswirkungen von Ladevorgängen an ausgewählten Netzknotenpunkten sowie der Bestimmung der notwendigen Ladeinfrastruktur wurden im Rahmen der Arbeit vier Ladestrategien entwickelt. Hierbei wurden zur Bestimmung der wirkleistungsbezogenen Auswirkungen die Ladestrategien Direktladen, Minimale Ladeleistung sowie Minimierte Netzbelastung angewandt, um daraufhin in einem fiktiven Szenario eine Überlastung des Stromnetzes zu simulieren. Die Untersuchung von Netzengpässen ist mithilfe der Ladestrategie Koordiniertes Laden und dem Optimierungsproblem Maximale Auslastung der Stromnetze durchgeführt worden. Die Ergebnisse der Berechnungen im Rahmen der wirkleistungsbezogenen Auswirkungen auf die Knotenpunkte sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Ergebnisse der Berechnungen der wirkleistungsbezogenen Auswirkungen auf die Netzknotenpunkte

Elektromobilität im Pfaff-Quartier											
Netzknotenpunkt	Anzahl Elektrofahrzeuge					Verfügbare Netzkapazität					
	Beschäftigte	Kunden	Wirtschaft	Bewohner	Gesamt						
Transformatorstation II	372	1.576	255	-	2.223	1.197 kW					
Transformatorstation III	237	233	75	-	545	1.197 kW					
Transformatorstation IV	31	53	13	58	155	1.197 kW					
Transformatorstation V	168	398	37	39	642	1.197 kW					
Transformatorstation VI	241	21	69	38	369	1.197 kW					
Netzknotenpunkt	Ladestrategie	Lastspitze		Auslastung Transformatorstation		Anzahl der Ladepunkte					
		Ohne Elektromobilität	Mit Elektromobilität	Ohne Elektromobilität	Mit Elektromobilität	3,7 kW	7,4 kW	11 kW	22 kW	50 kW	Gesamt
Transformatorstation II	Direktladen	281,18 kW	1.196,00 kW	23,49%	99,92%	-	4	116	110	336	566
	Minimale Ladeleistung		988,48 kW		82,58%	420	44	28	11	63	
	Minimierte Netzbelastung		689,78 kW		57,63%	320	72	55	28	91	
Transformatorstation III	Direktladen	541,67 kW	873,06 kW	45,25%	72,94%	-	-	46	44	115	205
	Minimale Ladeleistung		702,55 kW		58,69%	179	3	5	-	18	
	Minimierte Netzbelastung		607,27 kW		50,73%	177	2	6	1	19	
Transformatorstation IV	Direktladen	313,21 kW	474,80 kW	26,17%	39,66%	-	3	12	15	33	63
	Minimale Ladeleistung		340,97 kW		28,49%	43	2	5	1	12	
	Minimierte Netzbelastung		324,75 kW		27,13%	43	2	4	4	10	
Transformatorstation V	Direktladen	460,55 kW	785,77 kW	38,48%	65,64%	-	7	40	41	100	188
	Minimale Ladeleistung		698,27 kW		58,33%	144	11	11	3	19	
	Minimierte Netzbelastung		566,75 kW		47,35%	147	10	14	2	15	
Transformatorstation VI	Direktladen	434,35 kW	753,76 kW	36,29%	62,97%	-	-	46	40	138	224
	Minimale Ladeleistung		572,15 kW		47,80%	179	13	5	1	26	
	Minimierte Netzbelastung		530,71 kW		44,33%	182	11	5	-	26	

Im Folgenden wird auf die in der Arbeit untersuchten Fragestellungen, die diese Ergebnisse beeinflussen und die im Zuge der Bearbeitung erlangten Erkenntnisse eingegangen.

3.2 Wirkleistungsbezogene Auswirkungen der E-Mobilität auf Niederspannungsverteilnetze

Um ein realitätsnahes Maximum der wirkleistungsbezogenen Auswirkungen der E-Mobilität auf die Netze abbilden zu können, ist im Rahmen der Arbeit die Ladestrategie Direktladen als Optimierungsproblem formuliert worden. Direktladen bedeutet dabei, dass der Fahrer das E-Fahrzeugs zu Beginn des Parkvorgangs an den Ladepunkt anschließt und dieses mit maximaler Ladeleistung geladen wird.

Zur Realisierung dieser Ladestrategie wurden den Ladeleistungen zeitliche Kosten zugeordnet, wobei die zugewiesenen Kosten zu Beginn des Betrachtungszeitraums am geringsten sind und mit steigender Dauer zunehmen. Bei einer Minimierung der Kosten ist es demnach im Optimierungsproblem am günstigsten, möglichst frühzeitig den Energiebedarf der Elektrofahrzeuge zu decken. Dies hat die Durchführung des Ladevorgangs mit maximaler Ladeleistung zur Folge.

Bei der Betrachtung der einzelnen Transformatorenstationen mit den zusätzlichen Lasten der E-Mobilität wird deutlich, dass der Einfluss der Ladevorgänge bei dem Szenario Direktladen auf die Gesamtnetzbelastung enorm ist. Ohne die E-Mobilitätslasten sind die Transformatoren zu keinem Zeitpunkt über 50 % ausgelastet, die höchste Auslastung weist hierbei die Transformatorenstation III mit einer Tageslastspitze von 541,67 kW und einer dementsprechenden Transformatorenauslastung von 45,25 % auf. Der niedrigste Leistungsbedarf ist diesbezüglich bei der Lastganglinie der Transformatorenstation II zu finden, bei dieser wird maximal eine Leistung von 281,18 kW bei einer Auslastung der Transformatoren von 23,49 % nachgefragt.

Mit den zusätzlichen Lasten der E-Mobilität steigen die Tageslastspitzen bedeutend an. Die größte absolute Änderung erfährt hierbei die zuvor am niedrigsten ausgelastete Transformatorenstation II mit einer Steigerung der Lastspitze von 281,18 kW auf 1.196,00 kW und einer dementsprechenden Änderung von 914,82 kW. Dies kommt durch das große Parkaufkommen aufgrund des in diesem Versorgungsgebiet geplanten Parkhauses zustande. Die geringste Steigerung der Transformatorbelastung ist bei Transformatorenstation IV zu erkennen, hierbei steigt die nachgefragte Lastspitze von 313,21 kW auf 474,80 kW und damit lediglich um 141,59 kW. Im Schnitt aller Transformatorenstationen steigt die Netzbelastung um 406,49 kW und damit um eine Transformatorauslastung von 33,96 % an. Werden die Transformatorenauslastungen in ihrer Gesamtheit betrachtet, so ist festzustellen, dass keine Transformatorstation durch die Last der E-Mobilität überlastet wird. Jedoch arbeitet die Transformatorenstation II mit einer maximalen Transformatorenauslastung von 99,92 % knapp an der Grenze einer Betriebsmittelüberlastung. Die restlichen Trafos weisen jedoch eine maximale Auslastung von 72,94 % bis 39,66 % - eine Untersuchung zur Verringerung der zu installierenden Nennscheinleistung scheint bei diesen angebracht.

Anfangs war vermutet worden, dass die Lastspitzen durch die Belastungen der E-Mobilität verstärkt in den frühen Abendstunden zwischen 17 und 20 Uhr auftreten werden. Dies kann jedoch nur in eingeschränktem Maße bestätigt werden. Die Tageslastspitzen für die Trafostationen II-VI treten um 17:11 Uhr, 08:04 Uhr, 16:24 Uhr, 15:22 Uhr und 16:54 Uhr auf, demzufolge lediglich eine von fünf im Zeitraum zwischen 17 und 20 Uhr. Beispielhaft ist in Abbildung 9 die berechnete Gesamtnetzbelastung für die Transformatorenstation V für den Fall des koordinierten Ladens dargestellt.

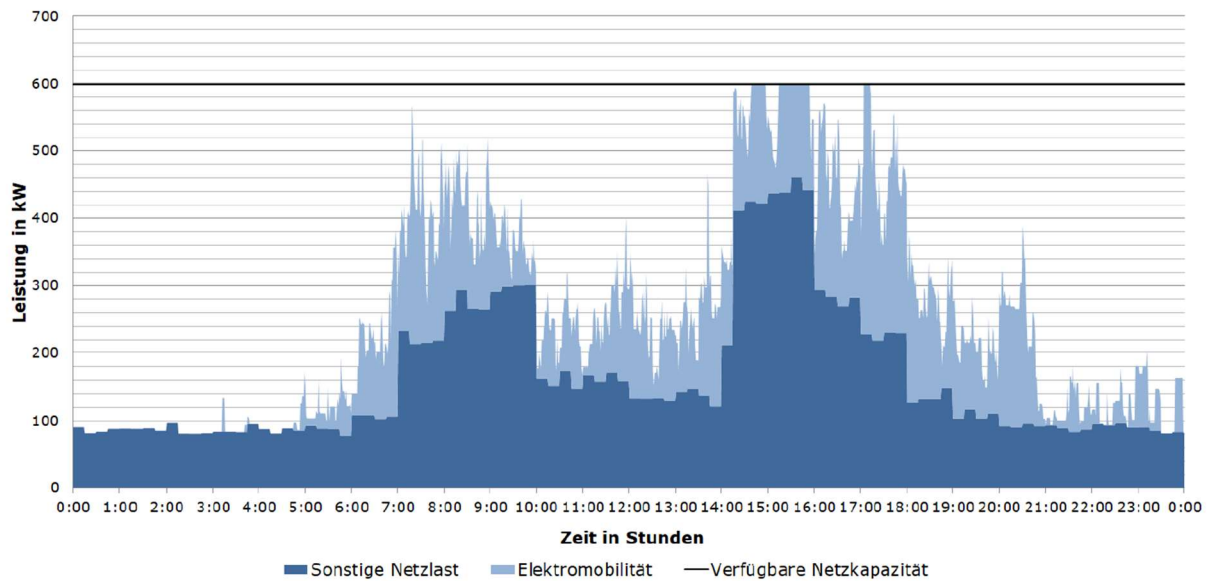


Abbildung 9: Gesamtnetzbelastung der Transformatorstation V bei koordiniertem Laden, Quelle: P. Nguyen

Eine mögliche Erklärung liegt in der Verteilung der Nutzergruppen in den Untersuchungsgebieten mit einer im Vergleich zu den anderen Nutzergruppen sehr geringen Anzahl von Elektrofahrzeugen im Bewohnerverkehrsbereich. Die Ladekurve der E-Fahrzeuge überlagert nämlich insbesondere nach der Ankunft Zuhause die bereits vorhandene Lastspitze der Privathaushalte. Da das Pfaff-Quartier jedoch ein relativ geringes Aufkommen an Bewohnerparkverkehr aufweist, ist es denkbar, dass diese Überlagerung nur in abgeschwächtem Maße auftritt.

3.3 Glättung von Lastspitzen durch gesteuertes Laden

Bei der Ladestrategie Minimale Ladeleistung wird die nachgefragte Ladeleistung der einzelnen Ladevorgänge jedes E-Fahrzeugs auf die gesamte Parkzeitdauer gestreckt und somit in seinem Wert minimal, jedoch findet dabei keinerlei Betrachtung der Auslastung der Stromnetze statt. Mithilfe der Ladestrategie Minimierte Netzbelastung wird nun die resultierende Last der Elektrofahrzeuge in Zusammenspiel mit der bestehenden Netzlast aus den Sektoren Haushalte sowie Gewerbe, Handel und Dienstleistungen abzüglich der Photovoltaikeinspeisung minimiert. Dementsprechend wird die Ladestrategie Minimale Ladeleistung mit weniger Nebenbedingungen beschrieben und ist somit in der Lösung des Optimierungsproblems mit einem geringeren Aufwand verbunden, wohingegen die Strategie Minimierte Netzbelastung das Minimum der Gesamtnetzbelastung darstellt.

Die Potenziale zur Absenkung der Spitzenlast mithilfe der Ladestrategie Minimale Ladeleistungen bewegen sich zwischen 87,5 kW bei Transformatorstation V bis hin zu 207,52 kW bei Transformatorstation II, im Schnitt konnte die Netzbelastung damit um 156,19 kW und dementsprechend die Transformatorauslastung um 13,05 % reduziert werden. Die resultierende maximale Transformatorauslastung liegt infolgedessen für die einzelnen Transformatorstationen zwischen 28,49 % und 82,58 %. Weitaus größere Potentiale zur Lastverschiebung sind jedoch mit der Ladestrategie Minimierte Netzbelastung zu erzielen.

Hierbei schwanken die möglichen Lastspitzenreduzierungen zwischen 150,05 kW bei Transformatorstation IV bis hin zu 506,22 kW bei Transformatorstation II. Im Kontext der Auslastung der Transformatoren sinkt diese auf Werte zwischen 27,13 % und 57,53 %.

Werden die Transformatorauslastungen ohne E-Mobilität mit denen mit E-Mobilität und der Ladestrategie Minimierter Netzbelastung verglichen, so ist erkennbar, dass abgesehen von Transformatorstation II sämtliche Transformatorauslastungen lediglich um maximal 10 % steigen. Selbst bei dem hohen Verkehrsaufkommen an Transformatorstation II bleibt die maximale Auslastung unter 60 %, obwohl diese um 34,14 Prozentpunkte ansteigt.

Abschließend kann gefolgert werden, dass durch die Anwendung eines Lademanagementsystems die Lastspitzen in erheblichem Umfang geglättet werden können. Die Anzahl der Fahrzeuge und deren jeweiligen Parkzeiträume bieten genug Flexibilität, sodass die Auslastung der Transformatoren um bis zu 506,22 kW bzw. 42,29 % gesenkt werden kann. Vor dem Hintergrund, dass die Transformatoren insgesamt eine maximale Auslastung von 57,63 % aufweisen und der Annahme, dass die Betriebsmittel im Niederspannungsnetz bis zu 100 % belastet werden dürfen, wird eine detaillierte Überprüfung zur Senkung der zu installierenden Nennscheinleistungen empfohlen.

3.4 Einfluss der Ladestrategien auf die Anzahl der Ladepunkte der einzelnen Leistungsklassen

Im Rahmen der Erarbeitung einer Ausbaustrategie für die Ladeinfrastruktur ist es notwendig, die Anzahl der notwendigen Ladepunkte und deren jeweiligen Ladeleistungen zu bestimmen. Hierbei wurde zunächst die maximale Anzahl an Ladepunkten entsprechend der Anzahl der E-Fahrzeuge im Untersuchungsgebiet ermittelt.

Im nächsten Schritt wurden den einzelnen Parkvorgängen der Elektroautos freie Ladepunkte zugeordnet, sofern die angegebene Ladeleistung des Ladepunktes ausreicht. Sollte die Ladeleistung eines jeden freien Ladepunkts nicht ausreichen, so wurde die Ladeleistung eines ausgewählten Ladepunkts auf die benötigte Übertragungsleistung des Autos angehoben. Der Ladepunkt, welcher hierbei ausgewählt wurde, weist die geringste Differenz zur benötigten Übertragungsleistung des E-Fahrzeugs auf. Ist dem Ladevorgang ein Ladepunkt zugeordnet worden, so ist dieser für den Parkzeitraum nicht mehr für andere Fahrzeuge verfügbar. Nachdem alle Parkvorgänge des Betrachtungszeitraums Ladepunkten zugeordnet worden sind, entspricht die Anzahl der notwendigen Ladepunkte der maximalen Anzahl an gleichzeitig parkenden Fahrzeugen.

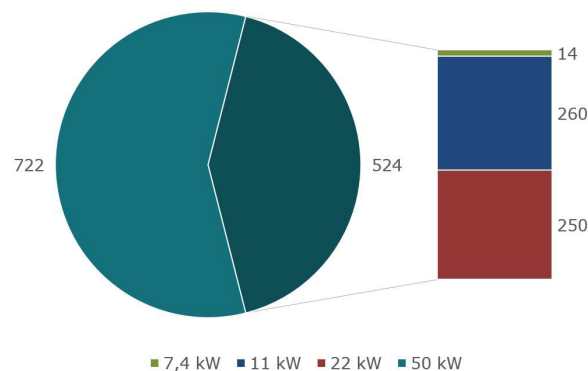


Abbildung 10: Anzahl der berechneten Ladepunkte in ihren jeweiligen Leistungsklassen für das gesamte Pfaff-Quartier mit der Ladestrategie Direktladen

Im Rahmen der Berechnungen der einzelnen Ladestrategien wurden den einzelnen Parkvorgängen Ladepunkte zugewiesen. Abbildung 10 zeigt die Verteilung der Ladepunkte in ihren Leistungsklassen und unterteilt in Normalladepunkte unter 22 kW und Schnellladepunkte über 22 kW Ladeleistung mit Direktladen. Da bei der Ladestrategie Direktladen mit der technisch maximal möglichen Ladeleistung geladen wird, spiegelt die Verteilung der einzelnen Ladepunkte in die Leistungsklassen die Verteilung der Fahrzeugmodelle im Quartier wider. Demzufolge nutzt der überwiegende Anteil der Fahrzeuge im Pfaff-Quartier Schnellladen mit Gleichstrom, die niedrigste Leistungsklasse von 3,7 kW wird nicht benötigt. In einer ersten Abschätzung ergibt sich somit bei einem Gesamtverkehrsaufkommen von 3.934 Fahrzeugen im Quartier ein Verhältnis von 5,45 Elektroautos pro Ladepunkt für die Schnellladepunkte und 7,51 für Normalladepunkte. Nach der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) [13] gilt für einen bedarfsgerechten Ausbau von Ladeinfrastruktur im öffentlichen Bereich ein Verhältnis von 165 Autos pro Ladepunkt für Schnellladeinfrastruktur und 16,5 Fahrzeuge für Normalladeinfrastruktur (Stand 2018). Demnach ist das errechnete Verhältnis der Autos zu den Ladepunkten vergleichsweise gering. Da im Rahmen der Zuweisung von Parkvorgängen angenommen wurde, dass keiner der Vorgänge vorzeitig abgebrochen wird, stellt die Anzahl der Ladepunkte eine obere Grenze dar.

Wie Abbildung 11 im Vergleich zu Abbildung 10 zeigt, verändert sich die Verteilung Leistungsklassen der Ladepunkte bei einer Veränderung der Ladestrategie enorm. Die Ergebnisse der Ladepunktzuweisung verhalten sich erwartungsgemäß mit dem Optimierungsziel der Minimierung der Ladeleistung. Von den 722 Schnellladepunkten, welche bei der Ladestrategie Direktladen benötigt werden, sinkt die Anzahl auf 138, wohingegen die Anzahl der Ladepunkte der Normallader und insbesondere der niedrigsten Leistungsklasse 3,7 kW stark ansteigt.

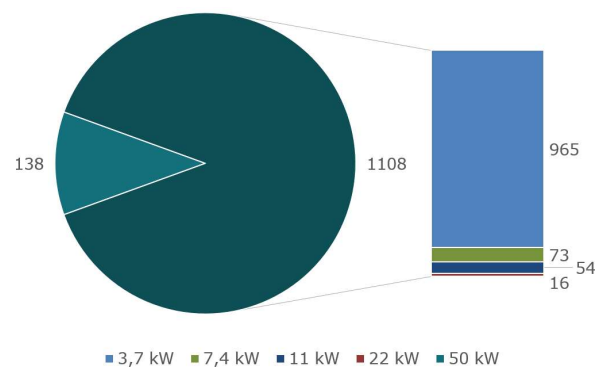


Abbildung 11: Anzahl der berechneten Ladepunkte in ihren jeweiligen Leistungsklassen für das gesamte Pfaff-Quartier mit der Ladestrategie Minimale Ladeleistung

Von den insgesamt 1.246 notwendigen Ladepunkten befinden sich nunmehr mit 1.108 Punkten 88,92 % im Normalladebereich. Der Anteil der Schnelllader an der Gesamtanzahl sinkt derweil von 57,95 % auf 11,08 %. Abhängig von der Ladestrategie kann der Schnellladepunktbedarf somit stark gesenkt werden, in diesem Fall um 584 Ladepunkte und dementsprechend 46,87 Prozentpunkte.

Bei der Ladestrategie Minimale Netzbelastung werden die Ladevorgänge der Fahrzeuge derart gesteuert, sodass sich ein Minimum der Gesamtnetzbelastung ergibt. Es ist daher möglich, dass es für eine minimale Tageslastspitze netztechnisch günstiger ist, Elektrofahrzeuge mit hohen Ladeleistungen zu

Zeiten geringer sonstiger Netzbelastung zu laden. Diese Annahme konnte im Rahmen der Untersuchungen dieser Ladestrategie bestätigt werden, die Verteilung der Ladepunkte ist in Abbildung 12 dargestellt.

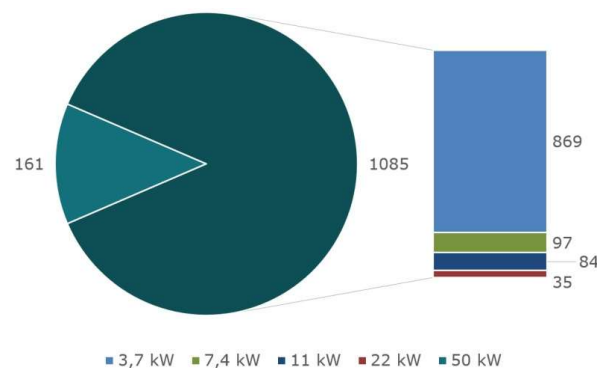


Abbildung 12: Anzahl der berechneten Ladepunkte in ihren jeweiligen Leistungs- klassen für das gesamte Pfaff-Quartier mit der Ladestrategie Mini- mierte Netzbelastung

Wie in der Abbildung zu erkennen ist, steigt die Anzahl der Schnellladepunkte um 23 Punkte an, wohingegen ausschließlich die niedrigste Leistungsklasse um 96 Ladepunkte schrumpft. Basierend auf den Untersuchungen mit der Ladestrategie Minimierte Netzbelastung lässt sich nun festhalten, dass für eine optimierte Lastspitze Schnelllader von Vorteil sind, jedoch am Beispiel des Pfaff-Quartiers bereits ein Anteil von 12,92 % an der Gesamtanzahl der Ladepunkte ausreichend sind.

Zusammengefasst ist die ausgewählte Ladestrategie entscheidend für die notwendige Anzahl der Ladepunkte der einzelnen Leistungsklassen. Bei sorgfältiger Planung von bedarfsgerechter Ladeinfrastruktur muss demnach ebenfalls auf die verfolgte Ladestrategie innerhalb eines Lademanagementsystems eingegangen werden. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass in diesem Modell die Unterscheidung der Ladeinfrastruktur in öffentliche, halböffentliche und private Ladepunkte vernachlässigt wurde.

3.5 Lösungsstrategien bei auftretenden Netzengpässen

Untersucht wurden zwei Möglichkeiten, Netzengpässen entgegenzuwirken: Die Verstärkung der installierten Nennscheinleistung der Betriebsmittel und die örtliche Verschiebung von E-Mobilitätslasten. Da im Zuge der Analyse der wirkleistungsbezogenen Auswirkungen der E-Mobilität im Pfaff-Quartier keinerlei Betriebsmittelüberlastungen festzustellen waren, sind zwei Szenarien entwickelt worden, welche eine Überlastung infolge von Ladevorgängen simulieren.

Im ersten Szenario ist angenommen worden, dass Trafostation V nicht über zwei Transformatoren mit je 630 kVA Nennscheinleistung verfügt, sondern lediglich über einen Transformator. Hierbei ist unter Einsatz der Ladestrategie Koordiniertes Laden eine Möglichkeit aufgezeigt worden, die Ladevorgänge derart zu verschieben, dass die Gesamtnetzbelastung unter der verfügbaren Netzkapazität bleibt. An dieser Stelle ist anzumerken, dass diese Ladestrategie ausschließlich anwendbar ist, insofern die minimale Gesamtnetzbelastung geringer ist als die verfügbare Kapazität.

Im zweiten Szenario wurde angenommen, dass Trafostation III lediglich über einen Transformator mit einer Nennscheinleistung von 630 kVA verfügt. Mittels des Optimierungsproblems Maximale Auslastung

des Stromnetzes wurden zwei E-Fahrzeuge identifiziert, welche unter Berücksichtigung von Netzrestriktionen der nächstgelegenen Trafostation zugeordnet werden konnten. Sollte dies aufgrund von fehlenden Netzkapazitäten der anderen Stationen nicht möglich sein, so muss die installierte Nennscheinleistung erhöht oder alternative Konzepte verfolgt werden, wie z.B. die Installation einer stationäre Batterie als Pufferspeicher.

3.6 Zusammenfassung der Auswirkung der E-Mobilität auf das Verteilnetz

Diese vorgestellte Abschlussarbeit zielte auf die Untersuchung von energetischen Auswirkungen der E-Mobilität in Niederspannungsverteilnetzen ab. Hierzu wurden vier verschiedene Ladestrategien untersucht, mit denen Lastzeitreihen für E-Fahrzeuge erstellt werden können. In Kombination mit Annahmen zu sonstigen Netzteilnehmern und der im Netz installierten Betriebsmittel ist eine Aussage über die lokale Auslastung des Verteilnetzes möglich. Bezüglich möglicher Grenzwertverletzungen infolge der Ladevorgänge der E-Fahrzeuge wurde ein Optimierungsverfahren erarbeitet, welches die maximale Anzahl der im Netz ohne Betriebsmittelüberlastungen ladbaren E-Fahrzeuge bestimmt. Im Anschluss der Berechnung der Ladeleistungen wurden den einzelnen Ladepunkten mithilfe des errechneten Ladeverhaltens Ladevorgänge zugeordnet und somit die notwendige Ladeinfrastruktur bestimmt.

Im Rahmen der Analyse des Stromnetzes im Pfaff-Quartier in Kaiserslautern wurden ausgewählte Tage mit besonders hoher Netzbelastung bei einer E-Mobilitätsdurchdringung von 100 % mithilfe von Ladestrategien analysiert. Hierbei zeigte sich, dass die wirkleistungsbezogenen Auswirkungen auf die Transformatorenauslastungen signifikant sind. Nichtsdestotrotz kam es aufgrund der hohen installierten Nennscheinleistungen der Trafos zu keinen Betriebsmittelüberlastungen. Die Lastspitze der Transformatoren stieg im Fall des Direktladens zwischen 141,59 kW bis 914,82 kW an, dementsprechend ebenfalls die maximale Transformatorauslastung um 11,83 Prozentpunkte bzw. 76,43 Prozentpunkte. Im Schnitt ist eine Erhöhung der Tageslastspitze um 406,49 kW und entsprechender Transformatorenauslastung um 33,96 Prozentpunkte zu beobachten. Es sind zwar keine Grenzwertverletzungen erkennbar, jedoch beträgt die Auslastung der Transformatorenstation II in der Lastspitze 99,92 %, diese arbeitet somit knapp an der Grenze zur Betriebsmittelüberlastung.

Die zusätzlich entstandenen Lastspitzen durch die E-Mobilität können jedoch mit gesteuerten Ladevorgängen erheblich gesenkt werden, für die untersuchten Transformatoren um bis zu 506,22 kW und damit 42,29 Prozentpunkten Transformatorauslastung. Die Tageslastspitzen können mithilfe des gesteuerten Ladens im Vergleich zum Direktladen zwischen 27,87 % bis 42,33 % gesenkt werden, die Last der E-Mobilität sinkt mithilfe der Strategie Minimierte Netzbelastung um 55,33 % bis 92,86 %. Bei vier von fünf untersuchten Netzgebieten im Quartier stieg infolge der Umstellung zu dieser Ladestrategie die maximale Auslastung der Trafos um weniger als 10 Prozentpunkte an. Bei diesen vier Netzgebieten stieg die Lastspitze im Schnitt um 5,84 % an, der Schnitt aller Transformatoren liegt bei 11,50 %.

Im Rahmen der Untersuchung der Ladepunkte ist eine notwendige Gesamtanzahl von 1.246 Ladepunkten für das Pfaff-Quartier festgestellt worden, dies entspricht der Summe der maximalen Anzahl an gleichzeitig parkenden Fahrzeugen der einzelnen Netzgebiete. Mithilfe der Ladestrategie Minimale Ladeleistung wurden die Ladeleistungen der einzelnen Parkvorgänge der Fahrzeuge minimiert, dabei kann festgestellt werden, dass für den überwiegenden Anteil der Ladepunkte die niedrigste Leistungsklasse von 3,7 kW ausreicht. Die Anzahl der Ladepunkte dieser Leistungsklasse beträgt 965 und entspricht

somit einem Anteil von 77,44 %. Der benötigte Energiebedarf der E-Fahrzeuge bedingt 138 Schnellladepunkte, welche einen Anteil von 11,08 % ausmachen. Denkbar ist es jedoch, dass es für eine minimale Tageslastspitze netztechnisch günstiger ist, E-Fahrzeuge mit hohen Ladeleistungen zu Zeiten geringer sonstiger Netzbelastung zu laden. Dies konnte im Rahmen der Analyse des Pfaff-Quartiers bestätigt werden, da bei der Ladestrategie Minimierter Netzbelastung der Anteil der Schnellladepunkte auf 12,92 % mit einer Anzahl von 161 ansteigt.

Zur Vorbeugung von Netzengpässen wurde eine Ladestrategie und ein Optimierungsverfahren entwickelt, das Koordinierte Laden und die Maximale Auslastung des Stromnetzes. Hierbei wurden Szenarien entwickelt, bei welchen das lokale Verteilnetz durch die Last der E-Mobilität überlastet ist. Beim Koordinierten Laden konnte die Ladeleistung derart verschoben werden, sodass ein sicherer Netzbetrieb gewährleistet ist. Im Szenario der Maximalen Auslastung des Stromnetzes ist es nicht möglich gewesen, die Lastspitze unter die Grenze der Netzkapazität zu senken. Infolgedessen wurde die minimale Anzahl an E-Fahrzeugen bestimmt, welche nicht im Netzgebiet laden können und anderen nahegelegene Netzgebiete zugewiesen wurden.

4 Integration von E-Fahrzeugen in Energie-Communities

Die Universität Bayreuth hat im Rahmen von EnStadt:Pfaff blockchainbasierte Anwendungsfälle für die Integration von E-Fahrzeugen in Energie-Communities untersucht. Ein Aspekt dabei waren flexible Lademodelle, wie bidirektionales Laden, die einen wichtigen Beitrag zur Netzstabilität leisten und so zur Reduktion von Netzengpässen und Lastspitzen beitragen. Die Integration von E-Pkws in das Stromnetz führt zu einer Vielzahl an Daten, die derzeit meist in isolierten Systemen und auf proprietärer Basis gespeichert werden. Ein Lösungsansatz, der diese Herausforderungen adressiert, ist die Nutzung von Blockchain-Technologien.

Vor diesem Hintergrund wurden fünf Anwendungsfälle für den Einsatz von Blockchain-Technologie im Zusammenhang mit E-Fahrzeug-Dienstleistungen in Energie-Communities analysiert und bewertet. Diese beinhalten (1) Engpassmanagement, (2) Mieter als Prosumenten, (3) tokenisierten Zertifikatehandel, (4) Bezahlprozesse von Ladevorgängen und (5) Standards und Identitätsmanagement. Die Bewertung erfolgt anhand der Kriterien „Technologische Reife“, „Digitalisierungsmöglichkeiten“, „Status der Erprobung“ und „Eignung für das EnStadt:Pfaff-Projekt“. Untersucht wurde u.a., wie die Bezahlprozesse von Ladevorgängen, an denen verschiedene Akteure beteiligt sind (siehe Abbildung 13), weiterentwickelt werden können. Dabei stand im Vordergrund, die praktische Relevanz der Blockchain-Technologie im Rahmen des EnStadt:Pfaff-Projekts zu prüfen [14]. Das Fraunhofer hat diese Untersuchungen unterstützt.

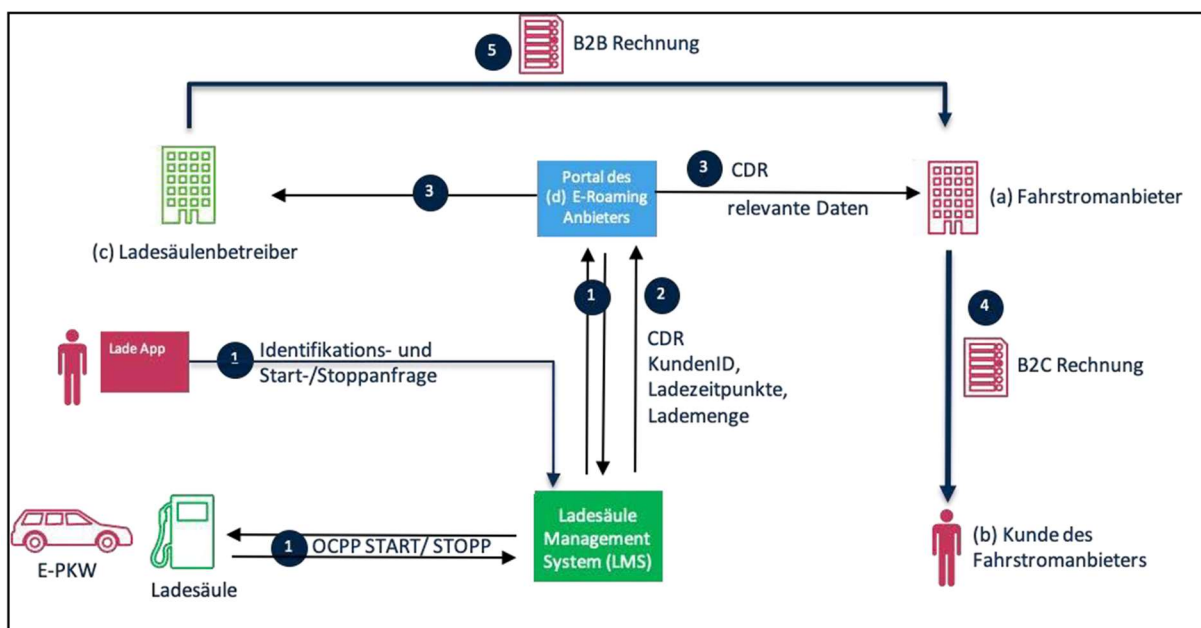


Abbildung 13: E-Roaming-Prozess heute, Quelle: Universität Bayreuth [14]

5 Aufbau eines E-Mobil- und Batterielabors im Pfaff-Quartier

Forschung und Entwicklung von bidirektionalem Laden ist Gegenstand einer Vielzahl von Forschungsprojekten in Wissenschaft und Industrie, die die verschiedenen Aspekte untersuchen. EnStadt:Pfaff hatte jedoch nicht das Ziel, das bidirektionale Laden selbst mit seinen verschiedenen Prozessen, sondern die Beiträge, die kontrolliertes und bidirektionales Laden zur Stabilisierung der Quartiersenergieversorgung leisten können, zu erforschen. Zum Zeitpunkt der Antragstellung war erwartet worden, dass während der Projektlaufzeit noch keine E-Fahrzeuge serienmäßig für das bidirektionale Laden (vehicle2grid) zur Verfügung stehen, was sich trotz deutlicher Verlängerung des Vorhabens bestätigt hat. Deshalb war die Einrichtung eines E-Mobil- und Batterielabors vorgesehen, in dem das kontrollierte und bidirektionale Laden an einem Forschungsfahrzeug untersucht werden kann.

Das E-Mobil- und Batterielabor sollte es aber auch ermöglichen, die Vorteile von Gleichstrom (DC) und Wechselstrom (AC)-Systemen zu untersuchen. Da sowohl die an das Energiesystem im Labor angeschlossene PV-Anlage (PV-Fassade), als auch die stationäre Batterie und das E-Fahrzeug Gleichstromsysteme sind, stellt sich die Frage, in welchem Umfang sich durch das Vermeiden der DC-AC- sowie AC-DC-Kopplung die Effizienz des Energiesystems erhöht werden kann. Es wurde erwartet, dass besonders größere Stromverbraucher von Gleichstromnetzen profitieren, so dass sie eine interessante Option für die Weiterentwicklung von lokalen Stromnetzen sind [15].

Im Rahmen von EnStadt:Pfaff wurde auch der Einsatz von Batterien in Gebäuden und Quartieren untersucht, insbesondere deren Lebensdauer und Geschäftsmodelle [16]. Dabei wurden ausführliche Alterungstest mit Lithium-Ionen-Batterien von zwei verschiedenen Herstellern durchgeführt. An diesen Batterien können nun weitere Untersuchungen im System durchgeführt werden.

Das E-Mobil- und Batterielabor bietet also eine Testumgebung, die es erlaubt, verschiedene Fragestellungen zu untersuchen. Diese sind u.a.:

1. Unter welchen Bedingungen und in welchem Umfang kann ein E-Fahrzeug in der Praxis Strom aus der Fahrzeugbatterie in das Netz zurückspeisen. Wie können Algorithmen zur intelligenten Be- und Entladung netz- und systemdienlich gestaltet werden?
2. Welche (Effizienz-)Vorteile bietet der Einsatz eines reinen DC Systems gegenüber einem klassischen DC-AC-DC-Systems, bei dem PV-Anlage, stationäre Batterie und DC-Ladesäule über ein Wechselstromnetz miteinander verbunden sind?
3. Wie kann das Schnellladen von E-Fahrzeugen durch Kombination von limitiert bereitgestellter Netzleistung, aktueller PV-Leistung und Leistung der stationären Batterie beschleunigt und optimiert werden?
4. Unter welchen Bedingungen weist das bidirektionale Laden von E-Fahrzeugen welche Vorteile für das Quartiersstromnetz auf (Systemdienlichkeit)? Welche Rolle sollte das bidirektionale Laden von E-Fahrzeugen beim Aufbau der E-Mobil-Ladeinfrastruktur im Pfaff-Quartier spielen?

Die ursprüngliche Planung sah den Aufbau des Labors im ehemaligen Kesselhaus des Pfaff-Quartiers vor. Da dieses aufgrund einer mangelhaften Bausubstanz nicht saniert werden konnte, wurde beschlossen, das E-Mobil- und Batterielabor in der im Rahmen von EnStadt:Pfaff zu errichteten Energiezentrale

unterzubringen. Diese umfasst damit im hinteren Teil die Heizzentrale und im vorderen Teil das Labor mit einem abgetrennten Batterieraum (siehe Abbildung 14).

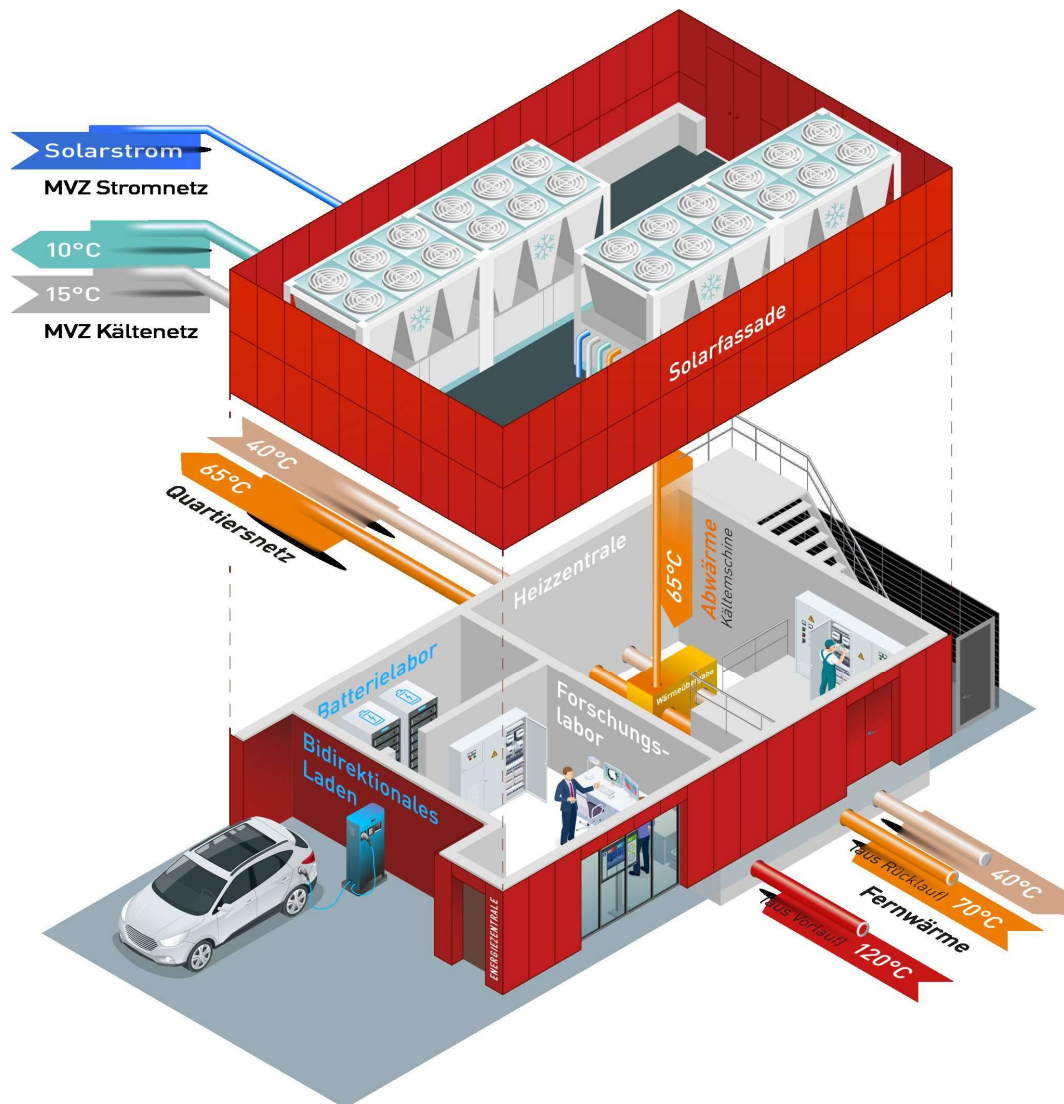


Abbildung 14: Grafik der neu errichteten Energiezentrale des Pfaff-Quartiers mit dem Forschungslabor im vorderen Teil, die beiden E-Fahrzeug-Ladepunkte und Stellplätze befinden sich auf der Vorderseite des Gebäudes, Quelle: Triolog / EnStadt: Pfaff

Das Herzstück des Labors ist ein großer Schaltschrank, der das DC-Hochvoltsystem und die DC-DC-Koppler, die die PV-Anlage und die beiden stationären Batterien sowie den AC-DC-Koppler, den den Netzan-schluss mit den DC-Hochvoltnetz verbinden. Weiter sind ein DC-Schnellladepunkt und ein AC-Ladepunkt an der Gebäudefassadeangebracht, die mit dem DC-Hochvoltnetz bzw. dem AC-Netz verbunden sind (siehe Abbildung 15).

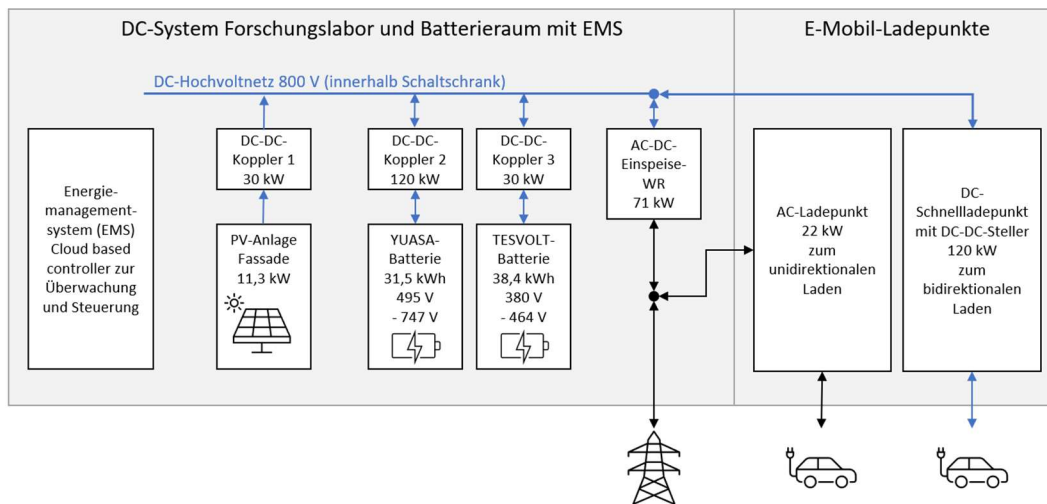


Abbildung 15: Verschaltung der Komponenten des E-Mobil- und Batterie-Labors, Quelle: Fraunhofer ISE

Aufgrund der Verzögerungen bei der Bereitstellung des Gebäudes für das E-Mobil- und Batterielabors konnte dieses erst zum Projektende fertiggestellt und eingerichtet werden. Deshalb konnten im Rahmen des Vorhabens noch keine Versuche durchgeführt werden. Diese erfolgen im Anschlussvorhaben von 2025 bis 2027, in dem sich ein Arbeitspaket mit den Untersuchungen zur E-Mobilität beschäftigt.

6 Literatur

- [1] Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), Hg., "Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Bundesländern, Fahrzeugklassen und ausgewählten Merkmalen: Bestand am 1. Oktober 2024," 2025. Zugriff am: 20. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Vierteljaehrlicher_Bestand/viertelj%C3%A4hrlicher_bestand_node.html
- [2] Bundesnetzagentur, Hg., "Genehmigung des Szenariorahmens für den Netzentwicklungsplan Strom 2025-2037/2045: Netzentwicklung Stromübertragungsnetz," 2025. Zugriff am: 20. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.netzentwicklungsplan.de/nep-aktuell/netzentwicklungsplan-20372045-2025>
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE). "Rahmenbedingungen und Anreize für Elektrofahrzeuge und Ladeinfrastruktur." Zugriff am: 20. Juni 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/rahmenbedingungen-und-anreize-fuer-elektrofahrzeuge.html>
- [4] NOW GmbH. "Herstellerebefragung E-Pkw, Marktentwicklung und Technologietrends: NOW veröffentlicht Factsheet zu Marktentwicklung aus Herstellerperspektive." Zugriff am: 20. Juni 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.now-gmbh.de/aktuelles/pressemitteilungen/166-millionen-elektro-pkw-bis-zum-jahr-2030/>
- [5] NOW GmbH, Hg., "Ladeinfrastruktur nach 2025/2030: Szenarien für den Markthochlauf: Neuauflage 2024," 2024. Zugriff am: 20. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2024/06/Studie_Ladeinfrastruktur-2025-2030_Neuauflage-2024.pdf
- [6] Volkswagen. "Strom laden, speichern und wieder abgeben - Ihr ID. wird smarter." Zugriff am: 20. Juni 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.volkswagen.de/de/elektrofahrzeuge/laden-und-reichweite/smarter-laden.html>
- [7] ADAC. "Das Elektroauto als Stromspeicher: So funktioniert bidirektionales Laden: 29.05.2025." Zugriff am: 20. Juni 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/laden/bidirektionales-laden/>
- [8] J. Ackermann, "Ermittlung einer bedarfsgerechten Ladeinfrastruktur für Elektroautos auf Basis der zukünftigen Elektromobilitäts-Entwicklung. Im Rahmen des Projekts EnStadt:Pfaff in Kaiserslautern,," Masterarbeit, Geographisches Institut, RWTH Aachen University, 2019.
- [9] T. Bahmer, "Quantifying the demand for public charging infrastructure of electric vehicles," Master Thesis, Faculty of Environment and Natural Resources, University of Freiburg, 2020.
- [10] K. Matulla, "Wohin mit den Ladesäulen?," Bachelorarbeit, Institut für Informatik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2019.

- [11] S. Lambert, "Development of optimized strategies for the expansion of public electric vehicle charging infrastructure in cities," Master Thesis, Institute for Power Electronics and Electrical Drives (ISEA), RWTH Aachen University, 2020.
- [12] P. Nguyen, "Untersuchung von energetischen Auswirkungen durch Elektromobilität in Niederspannungsverteilnetzen anhand optimierter Ladestrategien im Rahmen von Ausbaustrategien für Ladeinfrastruktur," Masterarbeit, Hochschule Trier, 2019.
- [13] Nationale Plattform Elektromobilität (NEP), "Fortschrittsbericht 2018 – Markthochlaufphase," 2018. Zugriff am: 20. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2021/12/2018_Fortschrittsbericht_2018_Markthochlaufphase.pdf
- [14] J. Strüker, M. Utz und J. Sedlmeir, "Einsatz der Blockchain-Technologie für Smart Grid Dienstleistungen durch E-PKW im Reallabor „EnStadt:Pfaff“: Schlussbericht des Verbundvorhabens EnStadt:Pfaff Implementierung des Reallabors Pfaff-Areal Kaiserslautern – Integrierte Konzepte, innovative Technologien und sozial-wissenschaftliche Forschung im Leuchtturm für klimaneutrale Quartiere; Teilvorhaben EnStadt:Pfaff - HS Fresenius Geschäftsmodelle," 2025.
- [15] DKE. "Gleichstrom: Anwendungen in Industrie & Privatwirtschaft: 01.08.2024 Fachinformation." Zugriff am: 20. Juni 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.dke.de/de/arbeitsfelder/core-safety/gleichstrom>
- [16] Lux, Stephan, Stryi-Hipp, Gerhard, "Untersuchungen zum Einsatz von Batteriespeichern in Quartieren: Lebensdauer und Geschäftsmodelle: Themenbericht erstellt im Rahmen des Schlussberichts zum Verbundvorhaben EnStadt:Pfaff „Implementierung des Reallabors Pfaff-Areal Kaiserslautern“,“ 2025.