

Elektroautos als mobile Energiespeicher – Potenzialanalyse einer Elektroautoflotte zur Nutzung überschüssiger Photovoltaik-Energie

Jakob Papouschek, Guntram Preßmair

e7 energy innovation & engineering, Hasengasse 12/2 - 1100 Wien, +43-1-907 80 26-19,
jakob.papouschek@e-sieben.at, www.e-sieben.at

Kurzfassung: In dieser Arbeit wird eine Fallstudie des Projekts „GAMES“ vorgestellt. Fragestellung der Arbeit ist, wieviel überschüssige PV-Energie von einer großen car-sharing Elektroautoflotte für den späteren Gebrauch gespeichert werden kann. Ermöglicht wird das durch die Ladetechnologien „smart charging“ und „V2G“ (vehicle-to-grid). Mit Hilfe eines mathematischen Optimierungsmodells, welches in der Softwareumgebung GAMS implementiert ist, wird das Potenzial der Elektroautoflotte überschüssige PV-Energie für den späteren Gebrauch zu speichern analysiert. Das modellierte Energiesystem ist in der Region Tel Aviv angesiedelt und basiert auf realen Energie- und Mobilitätsdaten. Die Ergebnisse sind ambivalent. Einerseits gelingt es einer großen Flotte von 42 000 Elektroautos ein gewisses Ausmaß an Energie für den späteren Gebrauch zu speichern. Eine große Elektroautoflotte kann bis zu 5% einer erheblichen Menge an überschüssiger PV-Energie speichern. Andererseits erscheint die maximal in der Flotte gespeicherte Energiemenge nicht systemrelevant, da sie nur 0,41% des Gesamtenergieverbrauches von Tel Aviv ausmacht.

Keywords: car-sharing Elektroautoflotte, Überschuss-PV Nutzung, smart charging, V2G

1 Hintergrund und zentrale Fragestellung

Eine essenzielle Fähigkeit zukünftiger Energiesysteme ist es Energie in Überschussphasen speichern zu können und bei Bedarf bereitzustellen. Elektromobilität ist weltweit auf dem Vormarsch und in Zukunft werden immer mehr Fahrzeuge mit Batterien als potenzielle Speichermöglichkeiten vorhanden sein. Fragestellung dieser Arbeit ist, ob die aggregierten Batteriekapazitäten zukünftiger Elektroautofloten, unter realistischem Mobilitätsverhalten, das Potenzial aufweisen systemrelevante Unterstützung für Energiesysteme zu leisten. Konkret wird untersucht, in welchem Ausmaß eine car-sharing Elektroautoflotte (free floating) überschüssige PV-Energie speichern und zu späteren Zeitpunkten bereitstellen kann.

Um die zuvor formulierte Forschungsfrage zu beantworten, wird in dieser Arbeit eine ausgewählte Fallstudie des Projektes „GAMES“ [1] vorgestellt. Die Fallstudie ist in dem urbanen Raum Tel Aviv lokalisiert und beinhaltet ein zukünftiges Energiesystem mit einer ambitioniert ausgebauten PV-Erzeugung und einer großen Elektroautoflotte. Das Energiesystem ist in etwa im Jahr 2030 angesiedelt. Die Fahrzeuge der Flotte verfügen über die technologische Ausstattung für intelligentes und bidirektionales Laden. Intelligentes Laden (smart charging) erlaubt signalgesteuertes Ladeverhalten, die Fahrzeuge laden abhängig von Energiepreis oder PV-Erzeugung. Bidirektionales Laden (V2G, vehicle-to-grid) ermöglicht es Elektroautos in ihrer Batterie gespeicherte Energie zu entladen und zum Beispiel an das Stromnetz zu verkaufen. Mit Hilfe eines mathematischen Optimierungsmodells, welches in der

Softwareumgebung GAMS implementiert ist, wird das Potenzial der Elektroautoflotte überschüssige PV-Energie für den späteren Gebrauch zu speichern analysiert. Die Hauptergebnisse basieren auf der Auswertung von 18 simulierten Szenarien, welche sich im Wesentlichen durch die Größe der PV-Produktion, der Flottengröße, das Mobilitätsverhalten und der angewandten Technologie (unkontrolliertes Laden, intelligentes Laden, bidirektionales Laden) unterscheiden. Darüber hinaus werden ebenfalls die folgenden Fragestellungen behandelt:

- Auswirkung von intelligentem Laden (smart charging) auf die PV-Überschussnutzung
- Auswirkung von bidirektionalem Laden auf die PV-Überschussnutzung
- CO₂-Einsparpotenzial durch intelligentes und bidirektionales Laden
- Auswirkung einer Fahrzeugumverteilung auf die Ergebnisse

Abschnitt 2 dieser Arbeit wird das mathematische Optimierungsmodell vorstellen und die ausgewählte Fallstudie inklusive der verwendeten Daten im Detail beschreiben. Abschnitt 3 wird die Hauptergebnisse präsentieren und Abschnitt 4 die daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen.

2 Methodische Vorgangsweise

2.1 Optimierungsmodell

Im Zuge des Projektes „GAMES“ wurde ein mathematisches Optimierungsmodell entwickelt mit dessen Hilfe das optimale Ladeverhalten einzelner Fahrzeuge einer Elektroautoflotte über einen gewählten Zeitraum bestimmt werden kann. Das Optimierungsmodell ist in der Software „GAMS“ (Generic Algebraic Modeling-System) implementiert und kann als „dynamic economic dispatch“ Modell bezeichnet werden [2]. Innerhalb des Zeitraumes der Optimierung wird das Ladeverhalten der einzelnen angesteckten Fahrzeuge (unter Berücksichtigung der PV-Produktion) optimiert, wobei die Gesamtenergiekosten der Flotte minimiert werden. Ebenfalls berücksichtigt werden die Kosten der Batteriedegradation, welche auf Grund von häufigem Laden und Entladen der Fahrzeugbatterien entstehen. Abbildung 1 gibt einen Überblick über das modellierte Energiesystem inklusive der innerhalb des Modelles möglichen Energieflüsse.

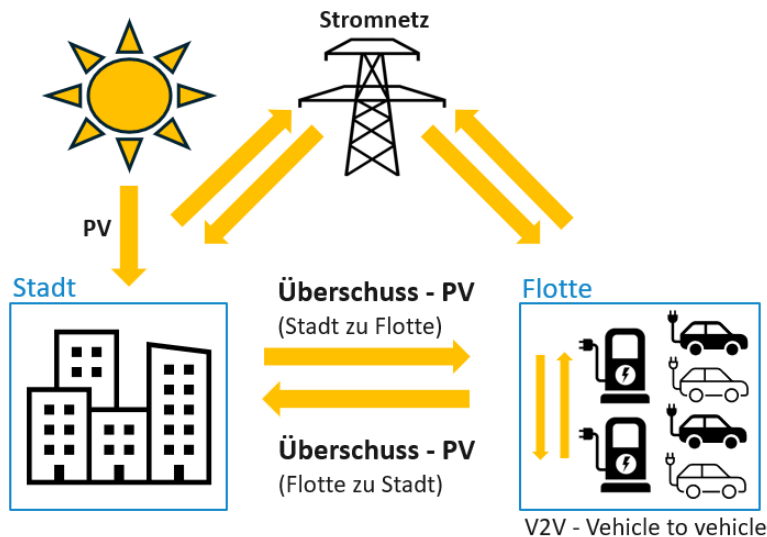


Abbildung 1: Schematische Darstellung Energiesystem

Das modellierte Energiesystem besteht aus zwei Hauptkomponenten, der Stadt und der Elektroautoflotte. Die Stadt muss in jedem Zeitschritt ihren Bedarf an Strom decken und kann dafür Strom entweder aus dem Stromnetz, direkt von der PV-Anlage oder auch von der Elektroautoflotte beziehen. Die PV-Produktion ist direkt der Stadt zugeordnet, daher verkauft die Stadt überschüssige PV-Energie direkt an das Netz oder transferiert Strom an die Elektroautoflotte. Die Flotte muss die Stromnachfrage der einzelnen Fahrzeuge befriedigen und bezieht daher Strom aus dem Netz. Falls verfügbar, kann die Autoflotte auch überschüssige PV-Energie nutzen, welche von der Stadt an die Flotte übertragen wird. Grundsätzlich ist es möglich, dass Fahrzeuge Strom aus ihren Batterien entladen und diesen an andere Fahrzeuge weitergeben können (V2V, vehicle-to-vehicle). Die Übertragung von Strom zwischen der Stadt und der Flotte erfolgt über einen lokalen Energiemarkt. Um mit Hilfe der mathematischen Optimierung die Gesamtkosten des Energiesystems zu minimieren, muss daher so viel überschüssige PV-Energie wie möglich in den Batterien der Autoflotte für den späteren Gebrauch gespeichert werden.

Das Optimierungsmodell ist als Zeitreihe in Zeitschritten t von je 15 Minuten aufgebaut. Basierend auf den Mobilitätsdaten der Fahrzeugflotte (Abschnitt 2.2) sind jedem Ladepunkt a eine Anzahl an Ladevorgängen cs („charging sessions“) zugeordnet. Die als „charging sessions“ bezeichneten Zeiträume umfassen die Phasen, in denen einzelne Elektroautos an ihren Ladepunkten stehen und Energie auf- bzw. entladen können. Das Kernelement der mathematischen Optimierung ist die Zielfunktionen, welche entweder maximiert oder minimiert wird. In dieser Fallstudie stellt die Zielfunktion die Gesamtkosten des Energiesystems dar, welche minimiert werden sollen. Dadurch wird das Potenzial der Elektroautoflotte ermittelt, überschüssige PV-Energie für den späteren Gebrauch zu speichern. Zusätzlich zu der Zielfunktion sind die Energiebilanz-Gleichung und die Batteriegleichung integrale Bestandteile des Modelles.

- **Zielfunktion:** Kernformel des Optimierungsmodelles. Summe der Gesamtkosten des Energiesystems. Die Gesamtkosten setzen sich aus den Energiekosten der einzelnen Ladestationen und der Stadt, den Batteriedegradations-Kosten und den Erlösen für in das Netz eingespeiste Energie zusammen.

$$\begin{aligned} \text{Gesamtkosten} = & \sum_{t,a} p_{\text{sup}(t,a)} * E_{\text{sup}(t,a)} - \sum_{t,a} p_{fi(t,a)} * E_{fi(t,a)} \\ & + \sum_{t,a,cs} \frac{E_{EVd(t,a,cs)}}{\eta_{EVd(cs)}} * p_{batdeg} + \sum_{t,a,cs} \frac{E_{EVc(t,a,cs)}}{\eta_{EVc(cs)}} * p_{batdeg} \end{aligned}$$

- **Energiebilanz:** Essenzielle Formel, um ein Gleichgewicht der Energieflüsse innerhalb des Energiesystems zu gewährleisten.

$$\begin{aligned} E_{fi(t,a)} + E_{sold(t,a)} + \sum_{cs} E_{EVc(t,a,cs)} - \sum_{cs} E_{EVd(t,a,cs)} - E_{sup(t,a)} - E_{bought(t,a)} \\ = E_{PV(t,a)} - E_{demand(t,a)} \end{aligned}$$

- **Batteriegleichung:** Die Gleichung stellt den SOC (State of charge) jeder einzelnen Autobatterie dar. Die Gleichung ist für jedes Fahrzeug aktiv, dass sich an einer Ladestation befindet. Zusätzlich sorgt die Gleichung dafür, dass die einzelnen Fahrzeuge nicht über ihre jeweiligen Batteriekapazitäten hinaus Strom in ihre Batterien laden können.

$$\begin{aligned} \text{SOC}_{(t,a,cs)} = & \text{SOC}_{arr(t,a,cs)} + \text{SOC}_{t-1,a,cs} + \\ & E_{EVc(t,a,cs)} * \eta_{EVc(cs)} - \frac{E_{EVd(t,a,cs)}}{\eta_{EVd(cs)}} \end{aligned}$$

- **Energiebilanz – Lokaler Energiemarkt:** Sorgt für ein Gleichgewicht zwischen der über den lokalen Energiemarkt gekauften und verkauften Energie.

$$\sum_{t,a} E_{bought(t,a)} = \sum_{t,a} E_{sold(t,a)}$$

Tabelle 1: Abkürzungen Optimierungsmodell

t	Zeitschritt
a	Akteur (Stadt oder einzelne Ladestation)
cs	Charging session – Ladezeitraum/Ladevorgang
E_{sup}	Gekaufte Energie aus dem Netz
E_{fi}	Eingespeiste Energie in das Netz
p_{sup}	Preis für gekaufte Energie aus dem Netz
p_{fi}	Preis für eingespeiste Energie in das Netz
E_{sold}	Verkaufte Energie über den lokalen Energiemarkt
E_{bought}	Gekaufte Energie über den lokalen Energiemarkt
p_{batdeg}	Kosten Batteriedegradation [3]
η_{EVc}	Ladeeffizienz
η_{EVd}	Entladeeffizienz
E_{PV}	PV-Produktion
E_{demand}	Energieverbrauch (Stadt)
SOC	Ladestand Elektroautobatterie
SOC_{arr}	Ladestand Elektroautobatterie bei Ankunft

2.2 Daten

2.2.1 Mobilitätsdaten

Die im Optimierungsmodell verwendeten Mobilitätsdaten basieren auf realen Mobilitätsdaten, welche von dem car-sharing Anbieter „Auto Tel“ aus Tel Aviv bereitgestellt worden sind. Der Optimierungszeitraum beträgt zirka 4 Monate. Auf Grundlage der realen Daten wurde in [4] eine Simulationsstrategie durchgeführt um zwei verschiedene Datensets zu erzeugen. Dadurch können die ursprünglichen Mobilitätsdaten unter zwei verschiedenen Fahrzeug-Verteilungsstrategien analysiert werden:

- Basis-Datenset: Rein crew-geführte Verteilungsstrategie ohne Anreize für die Fahrzeugnutzer/innen zur aktiven Verteilung der Fahrzeuge. Die Fahrzeugnutzer/innen stellen die Fahrzeuge am Ende ihrer Buchungszeit und nach ihren getätigten Fahrten wahllos in der Stadt ab. Entweder werden die Fahrzeuge erneut gebucht oder ein/e Mitarbeiter/in von „Auto Tel“ bringt das Fahrzeug am nächsten Morgen bei Bedarf zu einer Ladestation.
- Relokation-Datenset: Dynamisch, hybride Verteilungsstrategie aus Nutzer/innen und Mitarbeiter/innen. Nutzer/innen der Elektroautos erhalten Anreize die Fahrzeuge in bestimmten nachfrageabhängigen Gebieten der Stadt abzuholen oder abzustellen. Mitarbeiter/innen von „Auto Tel“ platzieren die Flottenfahrzeuge nachfrageabhängig neu.

Zusammengefasst basieren die Ergebnisse dieser Fallstudie auf zwei verschiedenen Datensätzen von car-sharing Elektroautoflotten. Einerseits wird ein Basiszenario verwendet, andererseits ein Szenario in dem die Elektrofahrzeuge aktiv in der Stadt abgestellt und umverteilt werden. Beide Szenarien basieren auf realen Mobilitätsdaten des car-sharing Anbieters „Auto Tel“. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die wichtigsten Merkmale der beiden verwendeten Datensets.

Tabelle 2: Flottencharakteristik

Flottencharakteristik	Basis-Daten	Relokation-Daten
Flottengröße (Anzahl Elektroautos)	150	150
Zeitperiode	121 Tage	121 Tage
Anzahl Ladestationen	10	10
Anzahl Ladevorgang	1087	2997
Durchschnittliche Stehzeiten zwischen Fahrten	33,64 h	10,48 h
Durchschnittliche Batteriekapazität	46,57 kWh	43,25 kWh
Durchschnittliche Ladeleistung	11,09 kW	10,75 kW
Durchschnittlicher SOC zu Beginn der Stehzeit	9,98%	9,96%
Durchschnittlicher SOC am Ende der Stehzeit	62,34%	57,38%
Anteil Stehzeit (%) *	7,21%	8,40%
Anteil Stehzeit (Fahrzeugäquivalent) **	10,82/150	12,59/150

* Anteil der Ladezeiten am Gesamtzeitraum. Prozentualer Anteil der aggregierten Stehzeiten der einzelnen Autos innerhalb des gesamten modellierten Zeitraumes.

** Wie in *, nur in Fahrzeugäquivalent ausgedrückt. Zum Beispiel sind innerhalb der Basisdaten von 150 Fahrzeugen umgerechnet 10,82 die ganze Zeit gestanden.

Zusammengefasst enthalten die Relokation-Daten ca. 3-mal so viele Fahrten und Stehzeiten als die Basis-Daten, was in signifikant kürzeren Fahrten resultiert. Zusätzlich haben die Fahrzeuge in dem Relokation-Datenset im Durchschnitt etwas (16%) längere Stehzeiten.

2.2.2 Energieverbrauch Tel Aviv

Der geschätzte Strombedarf von Tel Aviv für das Jahr 2030 wird als Grundlage der Berechnungen verwendet. Da keine genauen Energieverbrauchsdaten für Tel Aviv oder Israel veröffentlicht werden, wird der Verbrauch indirekt berechnet. Diese Berechnungen beruhen auf der Annahme, dass Israel (mit Ausnahme der Energieexporte in die palästinensischen Gebiete) über ein geschlossenes Elektrizitätssystem verfügt, so dass die Energienachfrage/der Energieverbrauch in etwa der Energieerzeugung entspricht. Folglich werden die verfügbaren stündlichen Energieerzeugungsdaten Israels aus dem Jahr 2022 [5] erstens auf den geschätzten Bedarf des Jahres 2030 hochskaliert (89 TWh abzüglich künftiger Exporte von rund 7 TWh) [5],[6],[7] und zweitens auf die Größe von Tel Aviv skaliert.

2.2.3 Photovoltaik-Produktion Tel Aviv

Die zuvor beschriebenen Energieerzeugungsdaten aus dem Jahr 2022 unterteilen die Energieproduktion in verschiedene Energiequellen, einschließlich PV-Produktion. Daher ist es möglich, die künftige PV-Erzeugung für 2030 zu extrapolieren und sie dann in Abhängigkeit

von verschiedene PV-Ausbauzielen hochzurechnen. In dieser Fallstudie werden zwei verschiedene Ausbauziele verwendet: 33% und 50% der künftigen Stromerzeugung durch PV. Insbesondere das 50%-Ziel ist ausgesprochen ehrgeizig und erhöht die PV-Produktion erheblich, kann aber als realistisches langfristiges Ziel über 2030 hinaus angesehen werden. Die in der Fallstudie verwendeten PV-Produktionszahlen ermöglichen einen PV-Überschuss in der Mittagszeit. Die PV-Produktion des 50%-Zieles erzeugt einen beachtlichen Überschuss von 8,6% des Gesamtenergieverbrauches der Stadt. Die PV-Produktion des 33%-Zieles erzeugt allerdings nur einen sehr geringen Überschuss von 0,56% des Gesamtenergieverbrauches. Daher eignet sich defacto nur die PV-Erzeugung des 50%-Zieles für eine systemrelevante Nutzung von Überschuss-PV.

2.2.4 Energiepreisstruktur

Tabelle 3 gibt einen Überblick über die in der Fallstudie verwendeten Preisstruktur.

Tabelle 3: Preisstruktur Tel Aviv

Preiskategorie	Beschreibung	Durchschnittspreis
1: Statische Preise 2022 – Supply	Statische Preise als Median der Großhandelspreise. Reale Daten aus Israel. Netzgebühren werden nicht verrechnet, da Netzgebühren in Israel hauptsächlich basierend auf leistungsbasierenden Einmalzahlungen auftreten. Wechselkurs: ₪4,12/€1	0,12 NIS(₪)/kWh 0,029 EUR/kWh
2: Statische Preise 2022 – Feed in	In dieser Fallstudie gehen die analysierten Szenarien von einem PV-Überschuss zu Spitzenzeiten aus, der aufgrund des geschlossenen Energiesystems in Israel nicht exportiert oder verkauft werden kann. Folglich gibt es keine Nachfrage und keinen Preismechanismus.	0 NIS(₪)/kWh 0 EUR/kWh

2.2.5 Flottengröße

Die ursprüngliche Flottengröße in den Mobilitätsdaten (150 Fahrzeuge) wird auf eine angemessene Größe für das Jahr 2030 hochskaliert. Annahme in dieser Arbeit ist, dass ein beträchtlicher Anteil der zugelassenen Elektroautos in Form von car-sharing genutzt wird. Auf Grundlage von [5] wird eine mögliche Anzahl von Fahrzeugen geschätzt. Da die Prognosen im Allgemeinen stark variieren und der Hochlauf der Elektromobilität nicht linear verläuft, werden 2 verschiedene Szenarien betrachtet.:

- Kleine Flotte mit 10 500 Fahrzeugen – Konservative Schätzung
- Große Flotte mit 42 000 Fahrzeugen – Optimistische Schätzung

Da die Mobilitätsdaten der 150 Elektroautos fixiert sind, werden stattdessen der Energieverbrauch von Tel Aviv und die PV-Produktion nach unten skaliert.

2.3 Szenariodesign

Im Zuge dieser Arbeit wurden 18 verschiedene Szenarien modelliert und analysiert. Dabei wurden die folgenden Variablen in den jeweiligen Szenarien variiert (Tabelle 4):

Tabelle 4: Variable Parameter der einzelnen Modellszenarien

	Variable Parameter
Flottengröße	10 500 Elektroautos – Kleine Flotte
	42 000 Elektroautos – Große Flotte
Technologie	Ungesteuertes Laden
	Gesteuertes Laden (smart charging)
	Bidirektionales Laden (V2G)
PV-Erzeugung	33% - Ziel
	50% - Ziel
Mobilitätsverhalten	Basis
	Relokation

Tabelle 5 gibt einen Überblick über das Design der einzelnen Szenarien. Die ersten 12 Szenarien beziehen sich auf die Basis-Mobilitätsdaten. Szenario 13-18 verwenden die alternativen Relokation-Daten, wodurch unterschiedliches Fahrverhalten miteinander verglichen werden kann. S1-S3 starten mit einer kleinen Flotte und einer kleinen PV. In S4-S6 wird die PV-Erzeugung erhöht, alles andere bleibt gleich. In den nächsten Szenarien S7-S9 wird die Flottengröße erhöht und die PV wieder zurück auf 33% gesetzt. In S10-12 wird die PV auf das 50%-Ziel erhöht, alles andere gleich. S13-18 wiederholen S7-S12, nur die Mobilitätsdaten der Flotte wird verändert und die Relokation-Daten werden verwendet.

Tabelle 5: Überblick Szenariodesign

Szenario	Mobilitätsverhalten	Flottengröße	Technologie	PV-Erzeugung
1	Basis	10500	Kontrolliertes Laden	33%
2	Basis	10500	Smart charging	33%
3	Basis	10500	V2G	33%
4	Basis	10500	Kontrolliertes Laden	50%
5	Basis	10500	Smart charging	50%
6	Basis	10500	V2G	50%
7	Basis	42000	Kontrolliertes Laden	33%
8	Basis	42000	Smart charging	33%
9	Basis	42000	V2G	33%
10	Basis	42000	Kontrolliertes Laden	50%
11	Basis	42000	Smart charging	50%
12	Basis	42000	V2G	50%
13	Relokation	42000	Kontrolliertes Laden	33%
14	Relokation	42000	Smart charging	33%
15	Relokation	42000	V2G	33%
16	Relokation	42000	Kontrolliertes Laden	50%
17	Relokation	42000	Smart charging	50%
18	Relokation	42000	V2G	50%

3 Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden die wichtigsten Ergebnisse der mathematischen Modellierung nach Themenbereichen geordnet dargestellt. Zuerst (3.1) wird die primäre Forschungsfrage beantwortet, wieviel überschüssige PV-Produktion von der Flotte genutzt werden kann. Zusätzlich werden ausgewählte Szenarien graphisch dargestellt. Danach werden die Ergebnisse mit Fokus auf die car-sharing Flotte betrachtet (3.2). Hier wird ebenfalls der Aspekt einer möglichen CO₂-Reduktion durch PV-Überschuss Nutzung behandelt. Zuletzt werden ökonomische Ergebnisse isoliert vorgestellt (3.3).

3.1 Hauptergebnis: PV-Überschussnutzung

Tabelle 6 stellt die Hauptergebnisse dar, welcher Anteil einer möglichen Überschuss-PV von einer car-sharing Elektroautoflotte gespeichert werden kann. Zusätzlich wird die dementsprechende absolute Energiemenge in GWh angegeben. Der Zeitraum beträgt 121 Tage.

Tabelle 6: Hauptergebnisse – Überschuss-PV Nutzung

Szenario	PV-Überschuss Nutzungsrate	Absolute Energiemenge
1	0,61%	0,13 GWh
2	2,0%	0,43 GWh
3	5,91%	1,26 GWh
4	0,16%	0,50 GWh
5	0,33%	1,11 GWh
6	1,26%	3,99 GWh
7	2,42%	0,52 GWh
8	7,73%	1,65 GWh
9	22,39%	4,79 GWh
10	0,63%	2,00 GWh
11	1,3%	4,11 GWh
12	4,99%	15,77 GWh
13	3,76%	0,80 GWh
14	9,26%	1,98 GWh
15	18,22%	3,92 GWh
16	1,17%	3,71 GWh
17	1,90%	6,04 GWh
18	3,72%	11,83 GWh

* In Prozent der gesamten überschüssigen PV-Produktion.

Abbildung 2 stellt die Hauptergebnisse aller Szenarien graphisch dar, zusätzlich zur PV-Überschuss Nutzungsrate wird auch der Anteil der genutzten PV-Energie an der gesamten Energienachfrage der Stadt dargestellt. Das ermöglicht eine grobe Einschätzung der Größenordnung der transferierten Energiemengen.

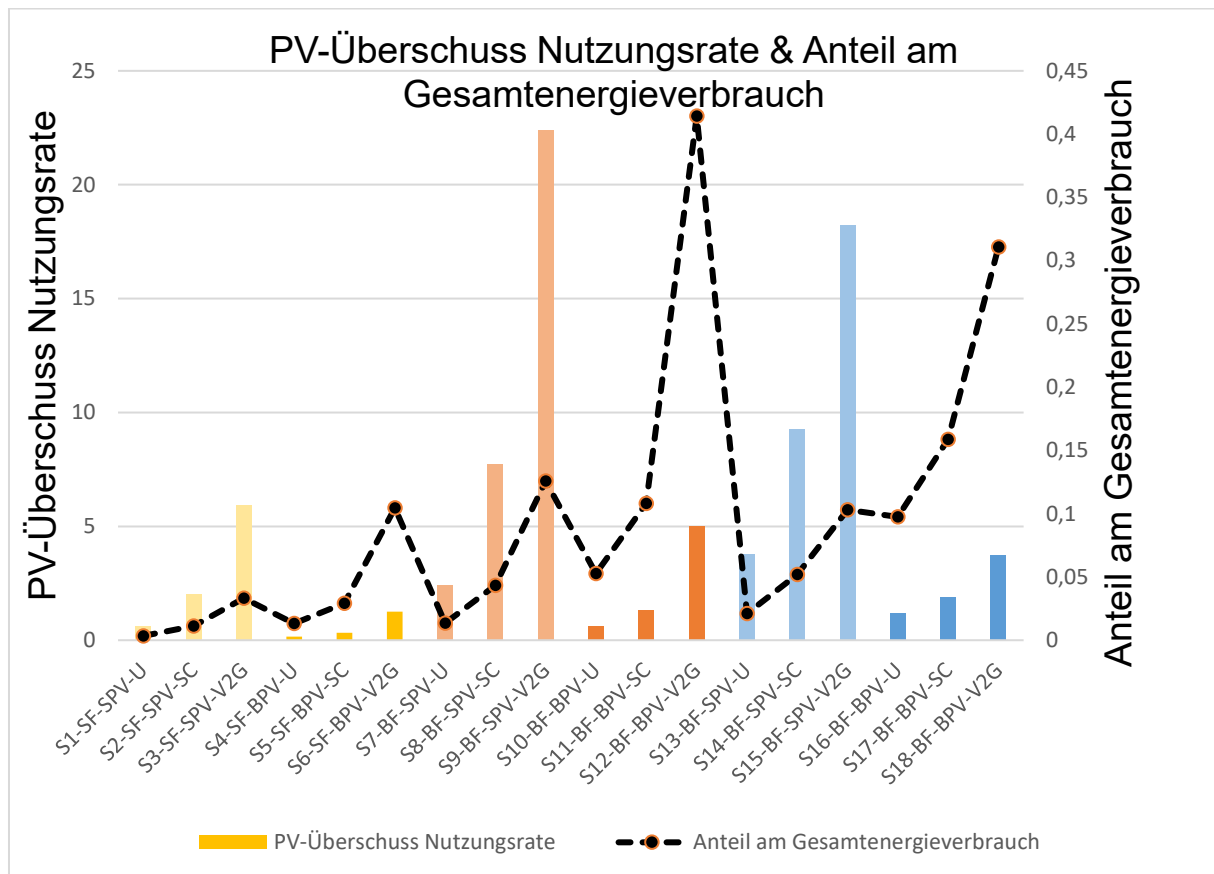


Abbildung 2: Illustration der Hauptergebnisse aller Szenarien, die PV-Überschuss Nutzungsrate. Zusätzlich wird der Anteil der genutzten Überschuss-PV am gesamten Stromverbrauch der Stadt dargestellt. Der Farbcode Gelb und Orange wird für die Szenarien der Basis-Daten verwendet, Hellblau für die Szenarien der Relokation-Daten. Dunkel eingefärbte Szenariobalken stehen für eine große PV (50%-Ziel). U = Unkontrolliertes Laden, SC = Smart charging, V2G = vehicle-to-grid, SF = Kleine Flotte (small fleet, 10 500), BF = Große Flotte (big fleet, 42 000), SPV = Kleine PV (small PV, 33%-Ziel), BPV = Große PV (big PV, 50%-Ziel)

Aus den in Abbildung 2 präsentierten Ergebnissen lassen sich die folgenden Schlussfolgerungen ableiten:

- Smart charging und V2G erhöhen die PV-Überschuss Nutzungsrate in jedem Szenarioblock. V2G erzielt immer das beste Ergebnis.
- Die höchste PV-Überschuss Nutzungsrate von 22,39% wird in Szenario 9 erreicht. Das Set-Up ist eine große Flotte mit einer kleinen PV. Dadurch, dass der PV-Überschuss mit 0,56% des Gesamtenergieverbrauches der Stadt sehr gering ist, gelingt einer großen Flotte eine relativ große PV-Überschuss Nutzungsrate.
- Vergleicht man S7-12 mit S13-18 kann man die Unterschiede zwischen den zwei verschiedenen Mobilitätsdaten erkennen. Die ungesteuerten Relokation-Szenarien (S13 & S16) erreichen beide einen höheren PV-Nutzungsgrad als die ungesteuerten Basis-Szenarien (S7-S10). Dies lässt sich zum einen durch etwas längere Standzeiten in den Relokation-Daten und zum anderen durch ein für die PV-Überschussnutzung vorteilhaftes Mobilitätsverhalten (mehr Standzeit in PV-Überschusszeiten) erklären. Die Smart-Charging-Szenarien der Relokation-Daten (S14 & S17) erzielen aus den

gleichen Gründen höhere Ergebnisse als ihre Basis-Pendants (S8 & S11). Die Szenarien S15 und S18 mit V2G erzielen jedoch niedrigere Ergebnisse als die entsprechenden Basis-Szenarien (S9 und S12). Dies lässt sich durch kürzere durchschnittliche Standzeiten erklären, die das Potenzial für V2G verringern.

- Die absolut größte Energiemenge erreicht Szenario 12 mit einer großen PV und einer großen Flotte (4,99% PV-Überschuss Nutzungsrate), wobei 15,77 GWh überschüssige PV-Energie von der Flotte genutzt werden. Allerdings ist das im Vergleich mit der gesamten Energienachfrage der Stadt nur 0,41%.

In einer alternativen Version von S12 wird mit doppelter Ladeleistung und doppelten Batteriekapazitäten der Elektroautos gerechnet, wobei eine PV-Überschuss Nutzungsrate von 9,42% erreicht wird. Rechnet man S12 nur mit verdoppelten Batteriekapazitäten, ohne die Ladeleistung zu erhöhen, wird eine PV-Überschussnutzungsrate von 6,76% erzielt. Diese Zahlen verdeutlichen, dass nicht nur die aggregierte Batteriekapazität wichtig ist, sondern auch die Ladeleistung von großer Bedeutung ist. Dies ist insbesondere bei kurzen Stehzeiten der Fall.

Die folgende Abbildung 3 versucht, die Ereignisse grafisch darzustellen und zu einem besseren Verständnis beizutragen. Abbildung 3 zeigt Szenario 12 auf der Basis eines durchschnittlichen Tages. Szenario 12 erreicht bezüglich der absoluten Energiemenge die größte genützte Überschussenergiemenge. Das ausgewählte Szenario beinhaltet eine große PV und eine große Flotte innerhalb der Basis-Daten. Der gesamte modellierte Zeitraum (121 Tage) wird zu einem durchschnittlichen Tag zusammengefasst. Der obere Graph zeigt den Energieverbrauch der Stadt und die PV-Leistung. Die mittlere Abbildung zeigt die durchschnittliche freie Batteriekapazität der Flotte sowie den durchschnittlichen Ladezustand der gesamten Flotte. Der untere Graph beinhaltet die jeweils geladene und entladene Energiemenge der Flotte.

S12 / Basis-Daten / 42 000 Fahrzeuge / 50% PV-Ziel / V2G

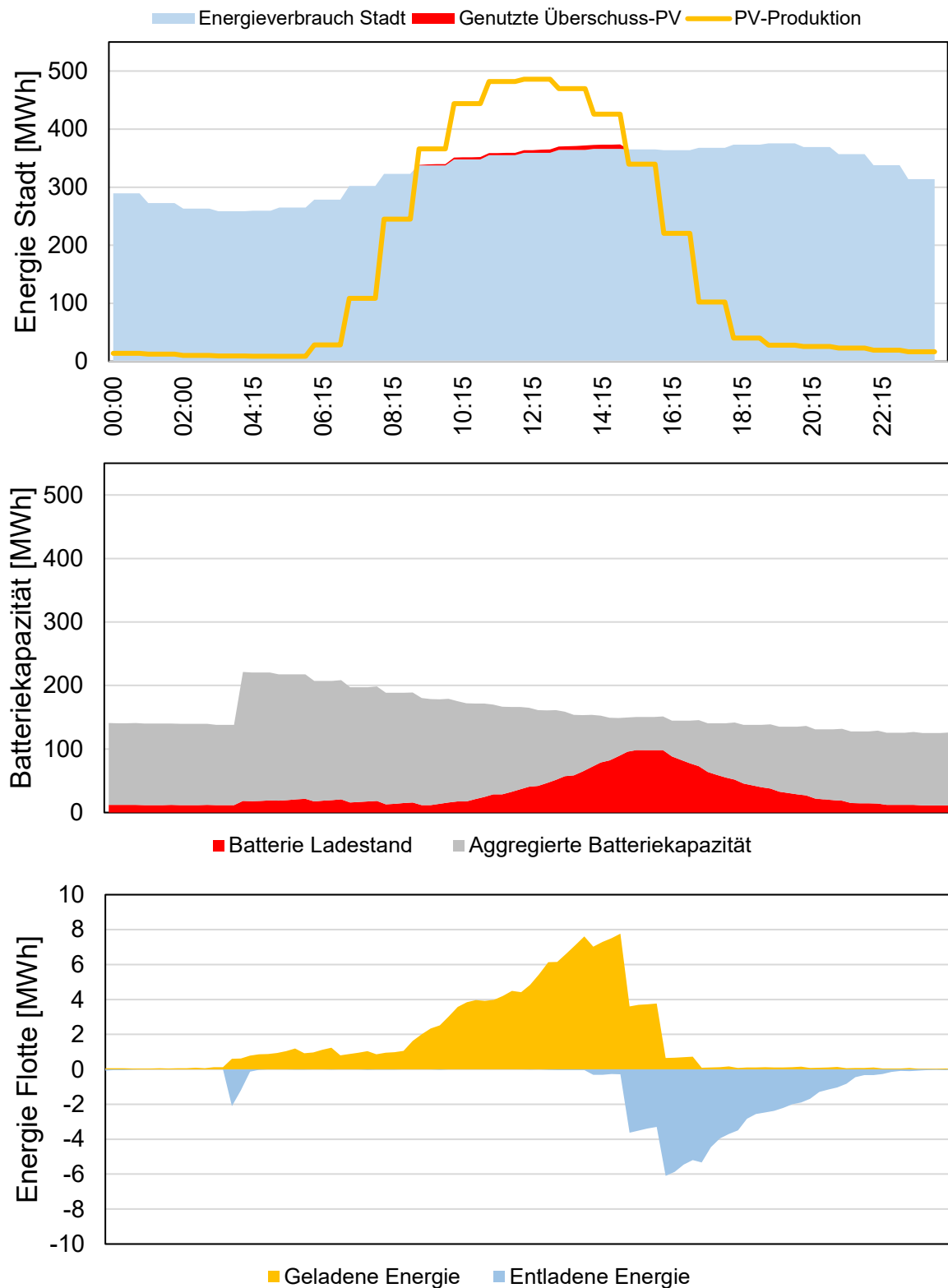


Abbildung 3: Illustriert S12 zusammengefasst als durchschnittlicher Tag. Der obere Teil zeigt den Bedarf der Stadt in jedem Zeitschritt sowie die PV-Produktion. Zusätzlich wird die Menge der genutzten überschüssigen PV-Energie visualisiert. Der mittlere Teil zeigt die durchschnittliche freie

Batteriekapazität und den durchschnittlichen Ladestand der ungenutzten Flotte. Außerdem im unteren Teil die von der Flotte geladene und entlade Energie dargestellt.

Abbildung 3 beschreibt ein Szenario mit V2G. Die Elektroautos sind sich eines möglichen PV-Überschusses bewusst und laden die benötigte Energiemenge entsprechend auf. Außerdem sind sie in der Lage überschüssige Energie zu speichern und an die Stadt oder andere Fahrzeuge zu übertragen. Die übertragene überschüssige PV-Energie erscheint minimal, obwohl sie von der absoluten Menge her deutlich größer ist als zum Beispiel in Szenario 10 oder 11. Relativ wird nur eine geringe Menge an Überschussenergie von der Flotte verwertet. Während der PV-Überschusszeit ist der schrittweise Ladevorgang der Flotte deutlich ersichtbar. Der Ladevorgang kulminiert am Ende der Überschusszeit und wird von einer Entladephase abgelöst, in der ein Großteil der gespeicherten Energie in die Stadt verlagert wird. Zusammengefasst ist zu erkennen, dass obwohl die verfügbare Batteriekapazität optisch groß erscheint, ein geringer Anteil des PV-Überschusses ausreicht, um die Batteriekapazitäten nahezu auszulasten.

3.2 Ergebnisse aus der Flottensicht

3.2.1 Einsparungspotential Netzenergie

In diesem Abschnitt werden die modellierten Ergebnisse isoliert aus Flottensicht betrachtet. Genauer gesagt wird präsentiert wieviel Netzenergie aus Flottensicht eingespart werden kann, wenn die Fahrzeuge statt Netzenergie so viel überschüssige PV-Energie wie möglich verwenden. Die folgende Abbildung 4 stellt dar, um wie viel Prozent sich die aus dem Netz bezogene Energiemenge in jedem Szenario reduziert (verglichen mit einem Szenario ohne PV). Energie, welche in den Szenarien inklusive V2G zurück in die Stadt fließt, wird in der folgenden Abbildung nicht berücksichtigt. Diese Energiemengen werden im nächsten Unterpunkt betrachtet.

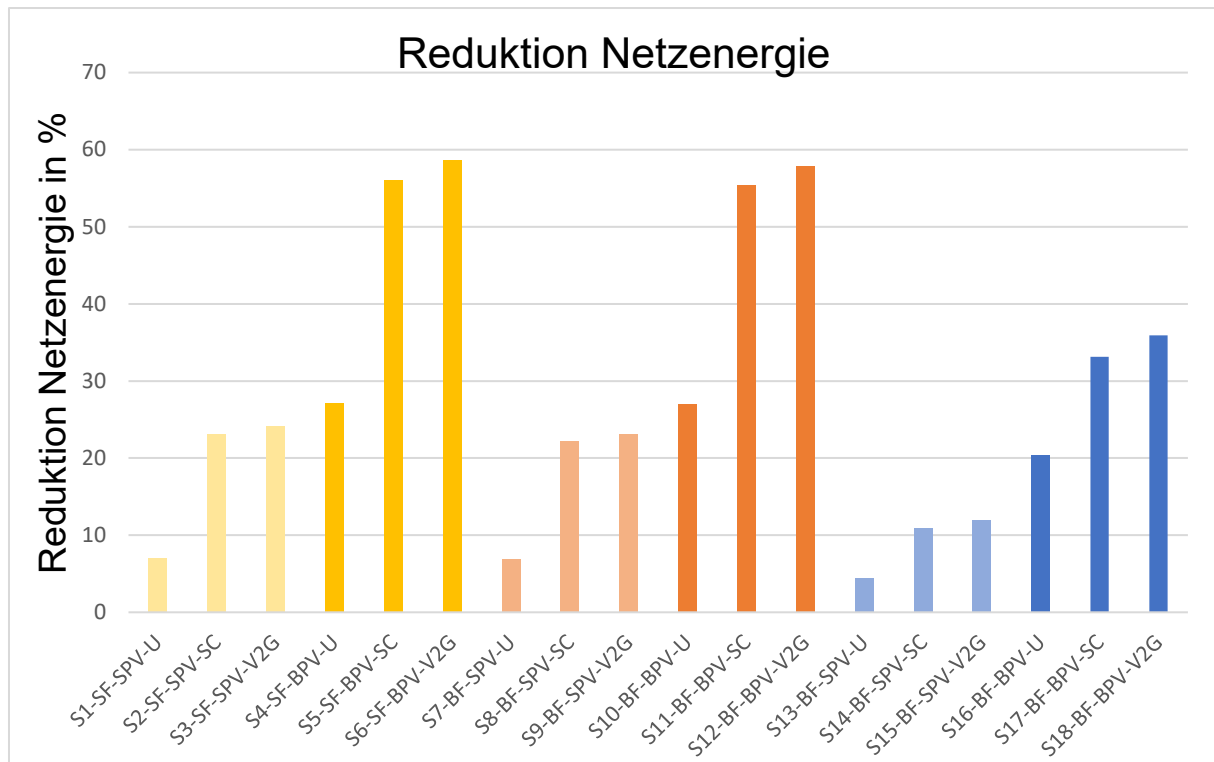


Abbildung 4: Zeigt um wieviel Prozent weniger Netzenergie in den einzelnen Szenarien von der Flotte bezogen werden muss, im Vergleich zu einem Szenario ohne PV. Netzenergieerduktion wird durch genutzte Überschuss-PV ermöglicht. U = Unkontrolliertes Laden, SC = Smart charging, V2G = vehicle-to-grid, SF = Kleine Flotte (small fleet, 10 500), BF = Große Flotte (big fleet, 42 000), SPV = Kleine PV (small PV, 33%-Ziel), BPV = Große PV (big PV, 50%-Ziel)

Die Analyse von Abbildung 4 führt zu folgenden Schlussfolgerungen:

- Die Flotte kann Netzenergie um bis zu 58% reduzieren, dieses Ergebnis wird in Szenario 6 mit einer kleinen Flotte, einer großen PV und V2G erreicht.
- Generell ermöglichen smart charging und V2G in allen Szenarioblocken Energieeinsparungen im Vergleich zu den jeweiligen ungesteuerten Basisszenarien. V2G führt jedoch nicht zu einer viel größeren Reduzierung als smart charging. In den Ergebnissen wird überschüssige PV hauptsächlich zurück in die Stadt transferiert und nicht via V2V (vehicle-to-vehicle) zu anderen Fahrzeugen. Dieses Verhalten lässt sich durch die Effizienz der Lade- und Entladevorgänge und die Degradation der Batterien erklären.
- Höhere PV-Produktion ist gleichbedeutend mit einer stärkeren Reduzierung der Netzenergie
- Die Unterschiede zwischen einer großen und einer kleinen Flotte sind minimal. Sobald irgendein PV-Überschuss auftritt, ist dieser ausreichend groß, dass sowohl die große als auch die kleine Flotte ihr Potential voll ausschöpfen können.

3.2.2 CO₂-Reduktion durch eingespeiste Energie

In diesem Unterpunkt der Arbeit wird zusätzlich zur eingesparten Netzenergie auch die Energie mit einberechnet, welche mit Hilfe von V2G von der Flotte zurück in die Stadt verschoben wird. Abbildung 5 gibt einen Überblick über die Energieflüsse zwischen Stadt und Flotte aus dem Szenario 12.

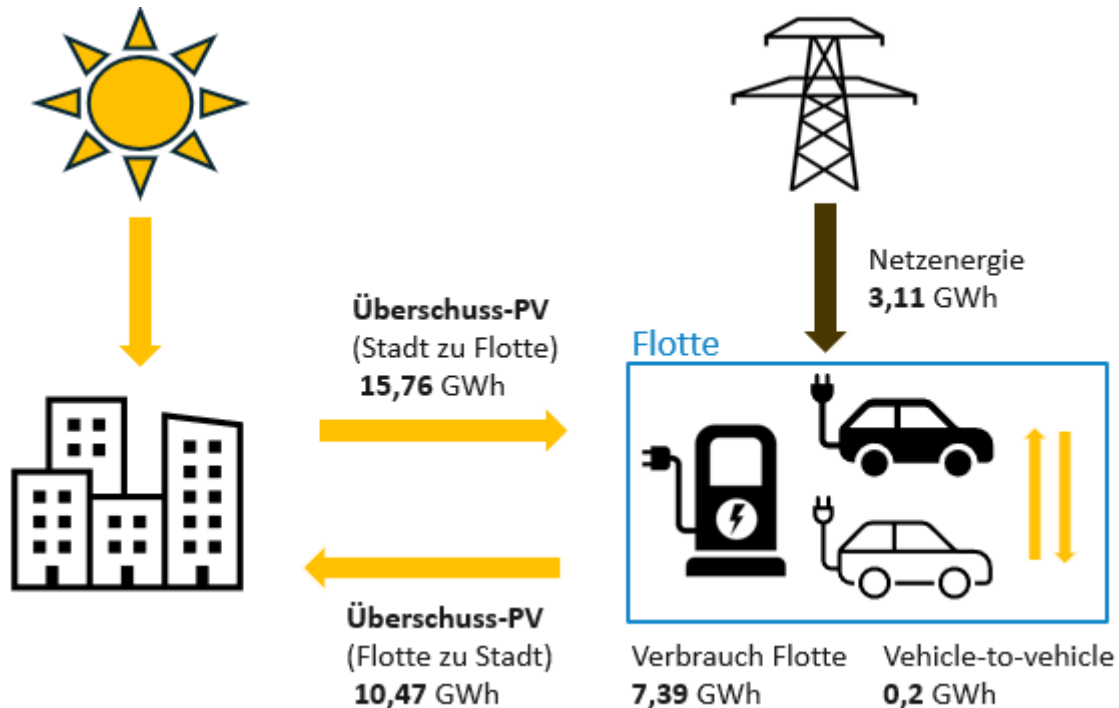


Abbildung 5: Zeigt die Energieflüsse zwischen der Stadt und der Flotte aus Szenario 12 (große Flotte, große PV). Der Verbrauch der Flotte entspricht nicht exakt der Bilanz aus geladener und entladener Energie auf Grund von Lade- und Entladeeffizienzen.

Aus Abbildung 5 ist ersichtlich, dass eine beträchtliche Energiemenge (Überschuss-PV) von der Stadt in die Flotte und wieder zurück fließt. Die transferierten Energiemengen sind dabei größer als der ursprüngliche Bedarf der Flotte. Basierend auf der Annahme, dass PV-Energie eine CO₂-arme und Netzenergie eine CO₂-intensive Energieform ist, kann durch die Nutzung von überschüssiger PV-Energie die CO₂-Bilanz des Gesamtsystems verbessert werden. Die CO₂-Emissionen für PV-Energie (erneuerbar) und nicht-erneuerbare Quellen werden unter Verwendung von Emissionsfaktoren für den gesamten Lebenszyklus der verbrauchten Brennstoffe und der verwendeten Kraftwerke berechnet, wie im Projekt „electricitymaps“ [9] dargestellt. Da das in dieser Fallstudie verwendete erneuerbare Profil (PV-Produktion) die gesamte in der Region Tel Aviv erzeugte erneuerbare Energie repräsentiert, wird für die verbleibende benötigte Energie (Netzenergie) ein Mix auf fossilen Brennstoffen (Kohle, Gas, andere) mit für Israel typischen Verhältnissen angenommen [5]. Als Ergebnis werden zwei verschiedene Werte Gramm CO₂-Äquivalent pro kWh (gCO₂eq/kWh) berechnet, welche in den folgenden Berechnungen verwendet werden:

- PV-Energie = 45 gCO₂eq/kWh
- Netzenergie = 500 gCO₂eq/kWh

Tabelle 7 zeigt die CO₂-Bilanz der ausgewählten Szenarien S10-S12. Das Hauptergebnis ist die mögliche CO₂-Reduktion der einzelnen Szenarien durch smart charging und V2G.

Tabelle 7: CO₂-Reduktion S10-S12

Szenario	Flotte		Stadt		Summe	
	Netzennergie [GWh]	PV [GWh]	Netzennergie [GWh]	PV [GWh]	CO ₂ [t]	CO ₂ - Reduktion [t]
10	5,41	2,00	2209	1586	1 178 728	0
11	3,31	4,11	2209	1586	1 177 771	956
12	3,13	4,29	2198	1597	1 172 987	5740

Die Ergebnisse aus Tabelle 7 zeigen, dass eine große Fahrzeugflotte mit 42 000 Elektroautos innerhalb von 121 Tagen 5740 Tonnen CO₂ reduzieren kann. Dennoch ist die reduzierte Menge im Vergleich mit dem Ausstoß des gesamten Systems (Stadt plus Flotte) gering. Da die gefahrenen Gesamtkilometer und der Gesamtenergieverbrauch der Flotte aus den verwendeten Daten bekannt sind, kann nun für jedes Szenario ein CO₂-Ausstoß pro gefahrenem Kilometer in Verbindung mit den zuvor vorgestellten Emissionsreduktionswerten berechnet werden. Für das unkontrollierte Szenario (S10) wird die CO₂-Intensität der Flotte pro gefahrenem Kilometer ermittelt. Zur Berechnung der spezifischen Emissionen im smart charging- (S11) und V2G-Szenario (S12) werden die insgesamt erzielten CO₂-Einsparungen durch die gefahrenen Kilometer geteilt und von dem Wert im unkontrollierten Szenario abgezogen.

Die genauen Zahlen sind in der folgenden Tabelle 8 enthalten. Es ist zu beachten, dass der g CO₂/km-Wert im V2G-Szenario negativ wird, da die emissionsarme PV-Energie wiederverwendet wird und somit der CO₂-Verbrauch der Stadt reduziert wird. In einem weiteren Schritt fließen die berechneten gCO₂/km in eine Lebenszyklusanalyse ein, um die Auswirkungen von intelligentem Laden und V2G über die gesamte Lebensdauer eines Elektrofahrzeugs zu messen. Die endgültigen Ergebnisse beruhen auf einer Lebenszyklusanalyse für verschiedene Fahrzeugantriebstechnologien [8]. In der vorliegenden Studie wurden nur die Werte für die Kraftstoff-/Energieemissionen angepasst.

Tabelle 8: CO₂ pro gefahrenem Kilometer

CO _{2eq} [g/km]	Fahrzeug produktion	Batterie produktion	Wartung	Treibstoff/ Energie	Verwe ndung	Summe
Diesel	36,7	0	7,3	26,3	143,1	213,4
Benzin	35,0	0	7,1	42,1	163,9	248,1
Flotte - Ungesteuertes Laden (S10)	39,1	19,2	6,9	60,3	0	125,5
Flotte - Smart charging (S11)	39,1	19,2	6,9	39,7	0	104,9
Flotte - V2G (S12)	39,1	19,2	6,9	-63,5	0	1,7

Laut den in Tabelle 8 präsentierten Ergebnissen kommt es innerhalb des Set-ups dieser Fallstudie zu einer drastischen Reduktion des CO₂-Ausstoßes pro gefahrenem Kilometer in S12. Ermöglicht wird diese Reduktion durch die Annahme, dass ein durchschnittliches Elektroauto mit Hilfe von V2G „saubere“ PV-Energie zurück in die Stadt transferiert und dadurch CO₂-intensive Energie im Gesamtsystem einspart. Damit wird ebenfalls die negative CO₂-Bilanz pro Kilometer aus Tabelle 7 begründet. Das CO₂-Reduktionspotenzial ist daher natürlich nur solange vorhanden, wie es CO₂-intensive Energie im System gibt, welche durch PV-Energie ersetzt werden kann.

3.3 Ökonomische Ergebnisse

Der folgende Abschnitt wird die wichtigsten ökonomischen Erkenntnisse der beschriebenen Fallstudie vorstellen. Die ökonomischen Ergebnisse werden aus den Modellierungsergebnissen berechnet und beziehen sich auf den Zeitraum eines Jahres. Die berechneten monetäre Werte der PV-Überschuss Nutzung sind auffallend gering, was auf den in dieser Studie verwendeten sehr niedrigen Energiepreis zurückzuführen ist.

Geht man davon aus, dass 33% des Energiebedarfs durch PV-Energie gedeckt werden, ergibt sich ein PV-Energieüberschuss im Wert von rund 2 023 000 €. In dieser Studie werden maximal 22,39 % (S9, große Flotte von 42 000 E-Fahrzeugen) der überschüssigen Energie genutzt, was ca. 453 000 € entspricht. Das entspricht 0,12 % des Gesamtenergieverbrauchs der Region Tel Aviv, der mit 361 000 000 € beziffert wird. S9 umfasst die V2G-Technologie, mit der die Flotte ausgestattet werden muss.

Geht man davon aus, dass 50 % des Energiebedarfs durch PV-Energie gedeckt werden, so ergibt sich ein PV-Energieüberschuss im Wert von rund 29 991 000 €. In dieser Studie wird mit 0,41 % des Gesamtenergieverbrauchs der Stadt die absolut höchste PV-Überschussnutzungsrate erreicht. 4,99 % (S12, große Flotte von 42 000) der überschüssigen Energie wird genutzt, was ca. 1 499 000 € entspricht. Dies entspricht 0,41 % des Gesamtenergieverbrauchs von Tel Aviv, der mit 361 000 000 € bewertet wird.

Um einen monetären Wert pro EV zu beschreiben, wird ein Basisszenario gewählt: S12 (Basis-Daten, große PV, große Flotte). Beachten Sie, dass der Geldwert pro Fahrzeug sinkt, wenn die Kosten für eine mögliche Batteriedegradation der Flotte aufgrund von V2G (zusätzlich übertragene Energie) einbezogen werden. Es wird eine Batteriedegradation von 2 Cent/kWh angenommen. S12: Eine große Flotte (42.000 E-Fahrzeuge) kann 4,99% der überschüssigen PV im Wert von 29.991.000€ nutzen (große PV). Dies entspricht ca. 1 499 000 € insgesamt und ca. 35,7 € pro E-Fahrzeug pro Jahr. Wenn diese Gewinne vollständig auf die Flotte umgelegt werden, sinken die Ladekosten pro Jahr von etwa 15,3 € (Szenario ohne PV) auf -20,4 € pro Auto. Man beachte, dass die Ladekosten des vergleichbaren S11 (kein V2G, nur intelligentes Laden) ca. 6,8 € (statt 15,3 € ohne PV) betragen, die durch V2G auf -20,4€ reduziert werden. Diese Verringerung um 27,2 € verursacht allerdings zusätzliche Batteriedegradierungskosten von 31,7 € pro EV und Jahr. In diesem Beispiel negieren die Batteriedegradierungskosten jeden Gewinn, der durch V2G erzielt wird.

Wird ein möglicher CO₂-Preis in die bisherigen Berechnungen einbezogen, verbessern sich die Ergebnisse um die Emissionseinsparungen. Es wird ein relativ hoher CO₂-Preis von 100 €/tCO₂ angewendet. S12: Zu den 1 499 000 € aus der PV-Überschussnutzung kommen 1 722 000 € an Emissionseinsparungen hinzu. Der monetäre Wert pro E-Fahrzeug und Jahr ändert sich somit auf 76,69 € pro E-Fahrzeug und 44,99 € inklusive Batterieabnutzung.

Zusammengefasst zeigen die Ergebnisse aller Szenarien, dass ein durchschnittliches E-Fahrzeug überschüssige PV-Energie im Wert von etwa 1,2 € bis 36 € pro Jahr nutzen kann. Die niedrigen Werte sind jedoch hauptsächlich auf die in dieser Fallstudie angenommenen extrem niedrigen Energiekosten in Kombination mit kurzen Standzeiten der Fahrzeuge zurückzuführen. In den Szenarien, in denen ungesteuertes oder gesteuertes Laden angewendet wird, spielt eine mögliche Degradation der Batterie eine untergeordnete Rolle, da die E-Fahrzeuge ohnehin geladen werden müssen. Anders verhält es sich in den V2G-Szenarien, in denen der Batterieschaden den monetären Gewinn aus zusätzlich übertragener Energie (PV-Überschussnutzung) übersteigt. Wenn jedoch ein CO₂-Preis in die Überlegungen einbezogen wird, wird die Anwendung von V2G trotz hoher Batteriedegradationskosten rentabel. In der spezifischen Konstellation dieser Fallstudie, die sehr niedrige Energiepreise beinhaltet, können die potenziellen Erträge aus der CO₂-Reduktion sogar die monetären Gewinne aus der PV-Überschussnutzung durch V2G übersteigen. Im Allgemeinen erscheinen die monetären Werte der PV-Überschussnutzung gering. Selbst im Maximalszenario (S12) wird überschüssige PV-Energie im Wert von 1,5 Millionen Euro genutzt, was im Vergleich zum Gesamtverbrauch der Stadt von etwa 360 Millionen Euro unbedeutend ist. In einer anderen Konstellation, z. B. in Mitteleuropa, könnten die monetären Werte pro Fahrzeug deutlich höher sein. Die Energiekosten pro kWh könnten in Mitteleuropa bis zu 10-mal höher sein (30 Eurocent/kWh). In Kombination mit längeren Standzeiten der Flotte und größeren Batteriekapazitäten wären sogar 20-mal höhere Werte möglich. Das würde einen monetären Wert pro Jahr und EV von über 700 € bedeuten. In dieser Größenordnung spielen die CO₂-Einsparungen und die Kosten für den Abbau der Batterien kaum eine Rolle.

4 Schlussfolgerungen

Im Zuge der vorgestellten Fallstudie des Projekts „GAMES“ wurden die folgenden Schlussfolgerungen ausgearbeitet:

- **Ein begrenzter Anteil überschüssigen PV-Energie kann von einer E-Fahrzeugflotte genutzt werden.** Geht man von einer vergleichsweise geringen Menge an überschüssiger PV-Energie aus, kann eine ambitionierte E-Fahrzeugflotte von 42.000 E-Fahrzeugen (entspricht 1 E-Fahrzeug pro 35 Einwohner) bis zu 22,4 % der überschüssigen Energie nutzen. Bei einer großen Menge an überschüssiger PV-Energie kann die gleiche Flotte jedoch nur 5 % dieser Energie nutzen. (Die Werte beziehen sich auf das Stadtgebiet von Tel Aviv mit ca. 1,5 Millionen Einwohnern).
- **Die Menge der genutzten überschüssigen PV-Energie ist nicht systemrelevant.** Im Vergleich zum Gesamtenergieverbrauch des gesamten Systems (Stadtteil Tel Aviv und Elektroauto-Flotte) ist die Menge der genutzten überschüssigen PV-Energie minimal. Eine EV-Flotte von 42.000 EVs kann nur 0,41% der gesamten verbrauchten

Energie nutzen. In Euro ausgedrückt entspricht dies einer Nutzung von 1,5 Millionen € im Vergleich zu einem Gesamtenergieverbrauch von 360 Millionen €.

- **Das Mobilitätsverhalten wirkt sich auf das Potenzial der Flotte zur PV-Überschussenergie-Nutzung aus.** Sind die EVs der Flotte aktiver mit entsprechend häufigeren, aber kürzeren Standzeiten, sinkt das Potenzial von V2G (3,72% PV-Überschussnutzung im Vergleich zu 4,99%).
- **Intelligentes Laden kann die Energiekosten einer E-Fahrzeugflotte erheblich senken.** V2G kann sogar Gewinne erwirtschaften. Intelligentes Laden kann die Energiekosten um bis zu 56 % senken. In Geldwerten ausgedrückt bedeutet dies eine Reduzierung der jährlichen Ladekosten pro Fahrzeug von 15,4 € auf 6,7 €. V2G kann die Kosten von 15,4 € sogar in einen Gewinn von 20,2 € verwandeln.
- **Die monetären Werte pro Fahrzeug sind stark von den Energiepreisen abhängig.** Die in dieser Fallstudie berechneten monetären Werte pro E-Fahrzeug und Jahr sind bemerkenswert niedrig, da sie auf extrem niedrigen Energiepreisen, im Vergleich zu den Preisen in Mitteleuropa, basieren. Wenn stattdessen Ladekosten von zum Beispiel 30 Eurocent pro kWh angenommen werden, steigen die monetären Werte pro E-Fahrzeug und Jahr von 35,6 € auf 356 €. Darüber hinaus ist es denkbar, dass diese Werte ca. 720 € pro Jahr und Fahrzeug erreichen, wenn zum Beispiel die Batteriekapazität und die Ladeleistung pro E-Fahrzeug in Verbindung mit längeren Standzeiten deutlich höher wären.
- **Die Kosten der Batteriedegradation sind relevant.** In dieser Fallstudie haben die möglichen Batteriedegradationskosten pro kWh das Potenzial, das Ladeverhalten der EV-Flotte erheblich zu beeinflussen. In mehreren Szenarien dieser Studie würde V2G überhaupt nicht zum Einsatz kommen, da die Batterieverschleißkosten die Gewinne aus dem Energiehandel übersteigen würden. So stünden beispielsweise dem Mehrwert von 27,2 € durch V2G Kosten von 31,7 € gegenüber. Wenn die Energiekosten steigen, nimmt die prozentuale Bedeutung der Batteriedegradation natürlich ab.
- **V2G kann ein nahezu klimaneutrales Fahrzeug ermöglichen.** Der Einsatz von V2G wirkt sich CO₂-reduzierend auf das Gesamtsystem aus, da emissionsarme überschüssige PV-Energie anstelle von emissionsintensiver Netzenergie genutzt wird. So können in dieser Studie die Gramm CO₂ pro gefahrenem Kilometer von 60,3 CO₂eq [g/km] auf bis zu -63,5 CO₂eq [g/km] reduziert werden. Wird diese Emissionsreduktion in die Gesamt-CO₂-Bilanz eines E-Fahrzeugs über den gesamten Lebenszyklus eingerechnet, ergibt sich ein nahezu klimaneutrales Fahrzeug pro gefahrenem Kilometer.
- **Wenn Energiepreise niedrig sind, kann der monetäre Wert der CO₂-Reduzierung finanziell bedeutend sein.** Wenn V2G im Rahmen dieser Studie eingesetzt wird, entspricht der monetäre Wert der reduzierten Emissionen in etwa dem finanziellen Gewinn aus der überschüssigen PV-Energienutzung. Zum Beispiel können zusätzlich zu den 1,5 Millionen € ca. 1,7 Millionen € durch die CO₂-Reduktion erzielt werden. Diese Ergebnisse basieren auf relativ niedrigen Energiepreisen in Kombination mit einer ehrgeizigen Preisgestaltung für Emissionszertifikate. Nähern sich die angenommenen Energiepreise einem durchschnittlichen mitteleuropäischen Niveau, sinkt der Anteil der Gewinne aus der Emissionsminderung entsprechend.

- **Die großflächige Nutzung überschüssiger PV-Energie erfordert eine riesige E-Fahrzeugflotte.** Die aggregierten Batteriekapazitäten einer ehrgeizigen (42.000 E-Fahrzeuge - entspricht 1 E-Fahrzeug pro 35 Einwohner) zukünftigen E-Fahrzeugflotte reichen nicht aus, um überschüssige PV-Energie in einem systemrelevanten Ausmaß zu speichern und zu nutzen. Für eine großflächige Nutzung der überschüssigen PV-Energie sind um ein Vielfaches größere aggregierte Batteriekapazitäten notwendig. Darüber hinaus ist eine entsprechend hohe Ladeleistung pro E-Fahrzeug in Kombination mit ausreichend langen Stehzeiten (insbesondere in PV-Überschusszeiten) entscheidend.

5 Literatur

- [1] GAMES, „GAMES - Grid-Aware Mobility and Energy Sharing“. Verfügbar unter: <https://games-innovation.net/>
- [2] Soroudi, a., 2017. Power System Optimization Modeling in GAMS. DOI: 10.1007/978-3-319-62350-4_4
- [3] Lazard, 'Lazard's levelized cost of storage analysis—version 6.0'. 2020.
- [4] Rocchetta Roberto, Nespoli Lorenzo, Medici Vasco, Shemesh Aviva, Parag Yael, Maayan Tardif Jalomi, 'Optimization of Mobility Incentives in Electric Vehicle Car Sharing Sysytes: A Reinforcement Learning Framework'. Aug. 19, 2024.
- [5] Electricity Authority, Israel Electric Corporation, 'IEC - Report on the State of the Electricity Sector September 2023 - Summary of 2022 and Trends in 2023'. Sep. 2023.
- [6] G. Mittelman, R. Eran, L. Zhivin, O. Eisenhändler, Y. Luzon, and M. Tshuva, 'The potential of renewable electricity in isolated grids: The case of Israel in 2050', *Applied Energy*, vol. 349, p. 121325, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121325.
- [7] Israel, Ministry of Energy, 'National Energy Efficiency Program 2020-20230', Nov. 2020.
- [8] 'Electricitymaps'. Accessed: Aug. 20, 2024. [Online]. Available: <https://www.electricitymaps.com/>
- [9] ADAC, Joanneum Research, 'Treibhausgas-Bilanz: Welcher Antrieb kann das Klima retten?' Accessed: Sep. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/klimabilanz/>



Das Projekt GAMES wird im Rahmen des Programms ERA-Net Smart Energy Systems im Joint Call 2020 gefördert. Dabei erfolgt die Finanzierung durch das Horizon 2020 Programm der Europäischen Union (grant agreement no. 883973).

Zusätzliche Ausarbeitungen wurden im Rahmen des nachfolgenden ERA-Net Projekts QuantEEFlex (application no. 174518) durchgeführt.