

LIFT

Logistics Infrastructure & Fleet Transformation

Dokumentation und Anwenderleitfaden

Brian Dietermann¹, Anna Paper¹, Philipp Rosner¹

¹Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München

11. November 2025

Zusammenfassung

Das Softwaretool LIFT dient zur Unterstützung des Planungsprozesses der Elektrifizierung von Nutzfahrzeugflotten sowie des begleitenden Ausbaus des Energiesystems am dazugehörigen Depot. Über eine grafische, webbasierte Benutzeroberfläche lassen sich der Ist-Zustand von Flotte und Depot sowie ein mögliches Elektrifizierungs- und Ausbauszenario definieren. Basierend auf einer Energiesystem-Zeitschrittsimulation berechnet LIFT techno-ökonomische Kennzahlen für beide Szenarien und vergleicht diese. Somit lassen sich erste Erkenntnisse über den Effekt der beabsichtigten Maßnahmen treffen und bereits eine erste Planung der Depot-Erweiterung ableiten. Die mit LIFT erarbeitete Ersteinschätzung ist die Basis für weitere Schritte in der Detailauslegung und Realisierung eines entsprechenden Projektes.

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage und Zielsetzung	4
2	Verwendung und grafische Benutzeroberfläche	4
3	Methodik	5
3.1	Energiesystem	5
3.2	Konzept	6
3.3	Zeitschrittsimulation und komponentenweise Kosten- und Emissionsberechnung	7
3.3.1	Standortverbrauch	8
3.3.2	Netzanschluss	8
3.3.3	PV-Anlage	9
3.3.4	Stationärspeicher	9
3.3.5	Ladeinfrastruktur	9
3.3.6	Flotte	10
3.4	Technische Kennzahlen	12
3.5	Wirtschaftliche Kennzahlen	13
3.6	Ökologische Kennzahlen	14
4	Parameter und Standardwerte	14
4.1	Simulationsparameter	14
4.2	Komponenten	14
4.2.1	Netzanschluss	14
4.2.2	PV-Anlage	14
4.2.3	Stationärspeicher	15
4.2.4	Ladeinfrastruktur	15
4.2.5	Flotte	15
5	Quellen	16

Abkürzungen

CAPEX capital expenditures

GUI grafische Benutzeroberfläche

LIFT Logistics Infrastructure and Fleet Transformation

OPEX operational expenditures

PV Photovoltaik

Offene ToDos:

Formelzeichen glattziehen: Sowohl den Aufbau der verwendeten Zeichen prüfen als auch deren konsistente Verwendung durch das ganze Dokument

Berechnung/Formelzeichen für Ladeinfrastruktur/Flotte konsistent gestalten

Standardwerte mit Quellen belegen

Standardwerte in Tabelle mit sinnvoller Formatierung überführen

1 Ausgangslage und Zielsetzung

Das Softwaretool Logistics Infrastructure and Fleet Transformation (LIFT) wurde am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München in Zusammenarbeit mit der Rödl GmbH entwickelt. Es unterstützt die Elektrifizierung von Flotten und den begleitenden Ausbau des Depot-Energiesystems (inkl. *Ladeinfrastruktur*) bereits in der frühen Phase mit techno-ökonomischen Potentialabschätzungen.

LIFT schafft dies, indem es die Ist-Situation (*Baseline*-Szenario) von Depot und Flotte mit einem möglichen Elektrifizierungs- und Ausbauplan (*Expansion* Szenario) vergleichend darstellt. Für beide wird mit den definierten Parametern jeweils eine Zeitschrittsimulation der Energieflüsse in Depot und Flotte über ein Jahr ausgeführt, auf deren Grundlage alle weiteren techno-ökonomischen Kennzahlen und der Vergleich der beiden Szenarien erstellt wird. Um die beschriebenen Anforderungen zu erfüllen, arbeitet LIFT mit Vereinfachungen und Annahmen, die in einer frühen Planungsphase der Elektrifizierung noch vertretbar sind.

Komplexere Szenarien wie aktive Flexibilitätssteuerung durch Energiemanagement oder individuelle Mobilitätsprofile und/oder automatisierte Komponentendimensionierung erfordern dann einerseits detailliertere Daten als auch komplexere Modellierung mit mathematischer Optimierung zur Auflösung der getroffenen Vereinfachungen. Diese Schritte sind mit anderen Werkzeugen als LIFT im Nachgang des Beratungsgesprächs durchzuführen. Die Anwendung solcher Tools, die oft nicht über eine grafische Benutzeroberfläche verfügen und ggf. an die jeweilige Anwendung angepasst werden müssen, und vor allem die Interpretation ihrer Ergebnisse erfordert Expertenwissen und Rechenzeit.

2 Verwendung und grafische Benutzeroberfläche

LIFT ist in Python programmiert und verfügt über eine browserbasierte grafische Benutzeroberfläche (GUI), die auf der *streamlit*-Bibliothek basiert. Die Installation von LIFT, entweder auf einem lokalen Rechner oder auf einem Server ist im *readme* des dazugehörigen *git repository* beschrieben. Es zeigt zusätzlich, wie der Berechnungsalgorithmus von LIFT losgelöst von der GUI für eine skalierbare Bewertung vieler Szenarien eingesetzt werden kann. Dieses Dokument beschränkt sich auf die Verwendung von LIFT zur Simulation einzelner Szenarien über die integrierte und in Abbildung 1 dargestellte GUI.

Diese ist in zwei Bereiche aufgeteilt. Die linke Seitenleiste dient zur Definition der Eingabeparameter für die anschließenden Berechnungen, sowie der Einstellung der anzuzeigenden Sprache (aktuell sind Deutsch und Englisch verfügbar). Hierbei wird nach allgemeinen Parametern (Standort, Energiesystem und wirtschaftliche Kenngrößen), denen der Flotte (in vier Subklassen von Nutzfahrzeugen) und denen der Ladeinfrastruktur unterschieden. Für jeden Eingabeparameter stehen in der GUI Hilfetexte zur genaueren Erklärung zur Verfügung, die bei Positionierung des Mauszeigers über dem jeweiligen Fragezeichensymbol erscheinen. Die Simulation und Berechnung der Ergebnisse (siehe Abschnitt 3) wird am unteren Ende der Seitenleiste ausgelöst. Der rechte Hauptbereich der GUI visualisiert daraufhin die Ergebnisse. Berechnete Kennwerte werden jeweils vergleichend für Baseline- und Expansions-Szenario dargestellt, um Effekte der getroffenen Maßnahmen intuitiv beurteilen zu können. Für die angezeigten Ergebnisse und Grafiken sind ebenfalls erläuternde Hilfetexte durch Bewegung des Mauszeigers über das Fragezeichensymbol verfügbar.

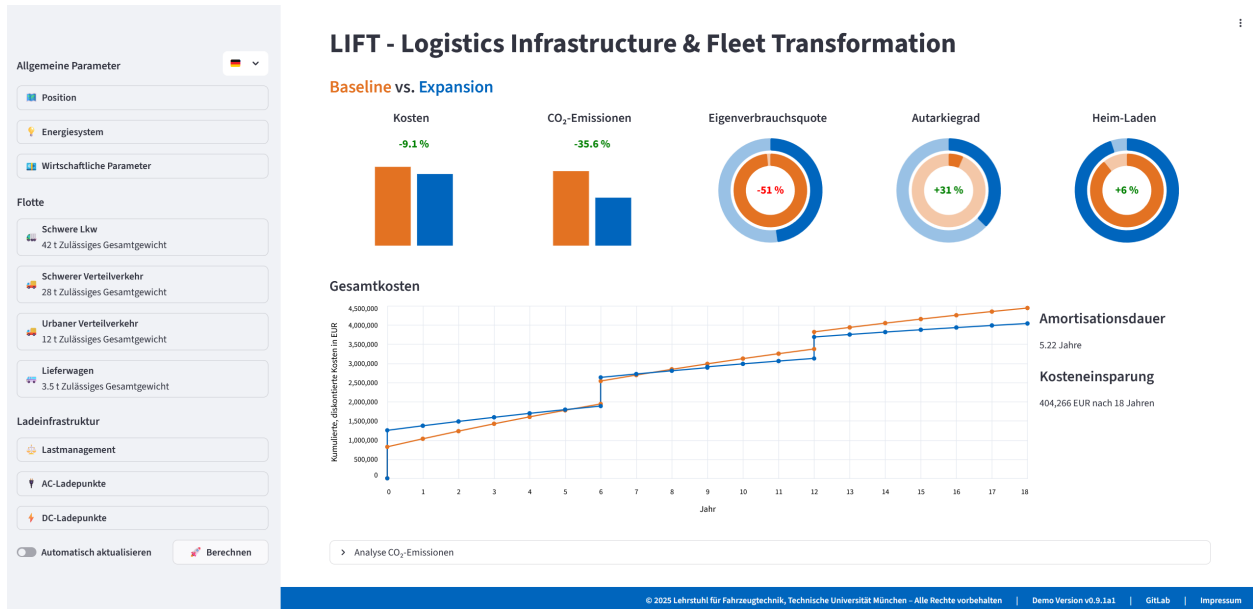


Abbildung 1: Die GUI von LIFT in Version 0.9.1a1 mit der linken Seitenleiste zur Eingabe der Szenario-Parameter und exemplarischer Darstellung von Ergebnissen im rechten Hauptbereich.

3 Methodik

Dieses Kapitel beschreibt die dem Tool LIFT zugrundeliegende Methodik sowie die methodischen Annahmen (inhärente Bestandteile der zugrundeliegenden Berechnungsmethodik). Quantitative Annahmen (Parameterwerte für die Einzelnutzung in der GUI) sind in Abschnitt 4 beschrieben.

3.1 Energiesystem

Das von LIFT modellierte Energiesystem besteht aus folgenden Komponenten:

- **Netzanschluss**

Der Netzanschluss stellt die Verbindung des lokalen Energiesystems zum öffentlichen Stromnetz dar und dient somit sowohl als Energiequelle (Bezug aus dem Netz) als auch -senke (Einspeisung in das Netz). Jedes modellierte Energiesystem beinhaltet genau einen Netzanschluss.

- **PV-Anlage**

Die Photovoltaik (PV)-Anlage dient zur Bereitstellung lokaler erneuerbarer Energie und wird somit als Energiequelle modelliert. Jedes modellierte Energiesystem beinhaltet genau eine PV-Anlage, deren Größe und damit Kosten auch mit Null parametrisiert werden können.

- **Stationärspeicher**

Im Stationärspeicher stellt einen stationären batterieelektrischen Speicher dar. Jedes

modellierte Energiesystem beinhaltet genau einen Stationärspeicher, dessen Größe und damit Kosten auch mit Null parametrisiert werden können.

- **Standortverbrauch**

Der Standortverbrauch beinhaltet den Verbrauch elektrischer Energie des Standorts (Gebäude, Werkstätten sowie sonstige Infrastruktur) exklusive der Energie für Ladeinfrastruktur bzw. Mobilität und wird im Energiesystem als Energiesenke modelliert. Jedes modellierte Energiesystem beinhaltet genau einen Standortverbrauch.

- **Ladeinfrastruktur**

In LIFT können mehrere Klassen von Ladeinfrastruktur mit unterschiedlichen Leistungen in das Energiesystem integriert werden. Von jeder Klasse kann eine beliebige positive Anzahl von Ladepunkten (oder Null) definiert werden.

- **Flotte**

Eine Flotte setzt sich aus unterschiedlichen Subflotten zusammen, in der jeweils Fahrzeuge des gleichen Typs und Nutzungsprofils zusammengefasst werden. Innerhalb der gleichen Subflotte können sowohl konventionell als auch batterieelektrisch angetriebene Fahrzeuge definiert werden. Jede Subflotte kann aus einer individuellen positiven Anzahl Fahrzeuge bestehen.

3.2 Konzept

Den Kern von LIFT stellt eine Zeitschrittsimulation dar, die die Energieflüsse im Energiesystem und der Flotte des Depots regelbasiert simuliert. Unterabschnitt 3.3 beschreibt die dabei angewandten Regeln und Kosten- / Emissionsberechnungen der jeweiligen Komponenten. Die Ergebnisse letzterer lassen sich zwei distinkten Quellen zuordnen: Investitionen bzw. Aufbau (CAPEX) und Betrieb (OPEX). CAPEX hängen direkt von den Eingangsparametern ab und werden daher unabhängig von der Zeitschrittsimulation für die einzelnen Komponenten berechnet. Die OPEX jeder Komponente ergeben sich jedoch erst durch die simulierten Energieflüsse und sind somit auf die Ergebnisse der Zeitschrittsimulation angewiesen. Kosten und Emissionen werden über alle Komponenten im Simulationszeitraum addiert (Unterabschnitt 3.6) und Kosten werden zusätzlich unter Annahme eines Kapitalkostensatzes über den deutlich längeren Projektzeitraum T_{prj} diskontiert und extrapoliert (siehe Unterabschnitt 3.5). Im Gegensatz zu den Kosten und Emissionen erfolgt die Berechnung der technischen Kennzahlen des Systems auf System- statt Komponentenebene und basierend auf geflossenen Energien, da sie teilweise von Interaktionen der Komponenten abhängen (siehe Unterabschnitt 3.4). In Kombination der technischen und ökonomischen Ergebnisse werden techno-ökonomische Kennzahlen berechnet, die für die Bewertung des Szenarios herangezogen werden können. In den folgenden Kapiteln wird zuerst die Berechnung der aggregierten technischen (), wirtschaftlichen und ökologischen (Unterabschnitt 3.6) Kennzahlen aufgezeigt.

3.3 Zeitschrittsimulation und komponentenweise Kosten- und Emissionsberechnung

Die in LIFT verwendete Zeitschrittsimulation simuliert die Energieflüsse im Energiesystem des Depots und der zugehörigen Flotte beginnend ab T_{start} über einen Simulationszeitraum T_{sim} mit einem Zeitschritt von T_{step} . Wirkungsgrade sind in der Simulation nicht berücksichtigt. Für die weitere Berechnung werden die folgenden Ergebnisse der Simulation herangezogen:

- die aus dem öffentlichen Netz bezogene (E_{Bezug}^{Netz}) und die ins öffentliche Netz eingespeiste Energie ($E_{Einspeisung}^{Netz}$)
- die Lastspitze der aus dem Netz bezogenen Energie (P_{max}^{Netz})
- die potenziell erzeugbare (E_{Pot}^{PV}) sowie die nicht abgerufene bzw. gekappte PV-Energie ($E_{Kappung}^{PV}$)
- die vom Standortverbrauch benötigte Energie ($E_{gesamt}^{Standort}$)
- die von der Flotte über die installierte Ladeinfrastruktur am Depot geladene Energie (E_{Depot}^{Flotte})
- die von der Flotte während der Fahrt geladene Energie ($E_{On-Route}^{Flotte}$)
- die von den Fahrzeugen zurückgelegten Distanzen aufgeteilt nach Subflotte und Antriebsart (d_a^f mit Subflotte f und Antriebsart (konventionell oder elektrisch) a)

In einem ersten Schritt werden diese vom Simulationszeitraum linear auf einen Zeitraum von einem Jahr skaliert. Dabei wird die Annahme getroffen, dass im Simulationszeitraum alle relevanten Charakteristika abgebildet werden. Dazu zählen beispielsweise saisonale Schwankungen in der Auslastung der Fahrzeugflotte oder bei der verfügbaren PV-Energie. Wird LIFT nicht über die GUI verwendet, ist diese Annahme bei der Definition des Simulationszeitraums zu beachten.

Die Zeitschrittsimulation selbst simuliert alle im Energiesystem vertretenen Komponenten. Die folgenden Abschnitte erklären detailliert die Annahmen, die für die einzelnen Komponenten getroffen wurden und wie für diese Komponenten Kosten und Emissionen berechnet werden. Dabei werden basierend auf der Simulation die jährlichen Betriebskosten berechnet und unabhängig von der Simulation die einmalig auftretenden Investitionskosten einer Komponente mit der vorgegebenen Größe. Das Vorgehen für die Berücksichtigung der Lebensdauer und von Ersatzinvestitionen ist für alle Komponenten identisch und wird in Unterabschnitt 3.5 beschrieben.

Für die Errichtung bzw. beim Kauf einer Komponente k entstehen bis auf den Standortverbrauch sowohl Kosten $C_{Invest, einmalig}^k$ als auch Emissionen, jeweils in Abhängigkeit der Dimensionierung der Komponente S^k sowie den spezifischen Kosten c_{Invest}^k und Emissionen $co2_{Invest}^k$ pro Größeneinheit der Komponente. Sowohl die verursachten Kosten also auch Emissionen werden durch Multiplikation der spezifischen Kosten bzw. Emissionen mit der Dimensionierung der Komponente berechnet:

$$Y_{Invest, einmalig}^k = S^k \cdot y_{Invest}^k \quad \text{mit } Y \in \{C, CO2\} \text{ und } y \in \{c, co2\} \quad (1)$$

3.3.1 Standortverbrauch

Der Standortverbrauch modelliert den Energieverbrauch des Gebäudes und sonstiger Infrastruktur des Depots exklusive möglicherweise vorhandenen Ladepunkte. Für den Standortverbrauch werden Standardlastprofile des BDEW verwendet, die auf den jährlichen Energieverbrauch des Standorts skaliert werden. Aufgrund ihrer stündlichen Auflösung und der ihnen zugrunde liegenden Methodik sind sie jedoch nur bedingt geeignet, einen realen Lastgang nachzubilden, da sie eine stark geglättete Charakteristik aufweisen. Das verfälscht die in der Simulation auftretenden Lastspitzen am Netzanschlusspunkt, die normalerweise gemittelt über einen 15-minütigen Zeitraum bestimmt werden. Da die Zielsetzung von LIFT jedoch darin besteht, mit einer möglichst geringen Datengrundlage erste Ergebnisse zu erzielen, kann in diesem Schritt des Planungsprozesses mit Standardlastprofilen gearbeitet werden. In weiteren Planungsphasen ist davon jedoch abzuraten, um ein realistischeres Verhalten abbilden zu können. Für den Energieverbrauch des Standorts fallen nur indirekt Kosten und Emissionen durch die aus der PV-Anlage und über den Netzanschlusspunkt bezogene Energie an. Diese sind somit in den beiden genannten Komponenten abgebildet.

3.3.2 Netzanschluss

Die Dimensionierung des Netzanschlusses wird in kW angegeben, da Blindleistung in der Simulation nicht berücksichtigt wird.

Investitionskosten und -emissionen

Für die Errichtung des Netzanschlusspunktes mit der in der GUI definierten Größe S^{Netz} entstehen sowohl Kosten $C_{Invest,einmalig}^{Netz}$ als auch Emissionen $CO2_{Invest,einmalig}^{Netz}$. Diese werden nach Gleichung 1 berechnet. Die angenommenen spezifischen Kosten c_{Invest}^{Netz} , spezifischen Emissionen $co2_{Invest}^{Netz}$ und die Lebensdauer ls^{Netz} sind in Unterunterabschnitt 4.2.1 aufgeführt.

Betriebskosten und -emissionen

In Abhängigkeit des Energiedurchsatzes in Bezugs- und Einspeiserichtung sowie der Spitzenlast fallen Betriebskosten für den Netzanschlusspunkt an:

$$\begin{aligned} C_{Betrieb,jrl}^{Netz} = & E_{Bezug}^{Netz} \cdot c_{Bezug}^{Netz} \\ & + E_{Einspeisung}^{Netz} \cdot c_{Einspeisung}^{Netz} \\ & + P_{max}^{Netz} \cdot c_{Spitzenlast}^{Netz} \end{aligned} \quad (2)$$

Die spezifischen Kosten für den Bezug (c_{Bezug}^{Netz}) und die Einspeisung ($c_{Einspeisung}^{Netz}$) sowie die aufgetretene Spitzenlast ($c_{Spitzenlast}^{Netz}$) lassen sich über die GUI definieren. Die spezifischen Emissionen ($co2_{Bezug}^{Netz}$) hingegen sind als Annahme in der GUI hinterlegt und im Anhang aufgeführt. Für verkaufte Energie entstehen weder positive noch negative Emissionen. Die Betriebsemissionen berechnen sich analog zu Gleichung 2:

$$CO2_{Betrieb,jrl}^{Netz} = E_{Bezug}^{Netz} \cdot co2_{Bezug}^{Netz} \quad (3)$$

3.3.3 PV-Anlage

Die potenzielle PV-Leistung wird für den angegebenen Standort und die optimale Ausrichtung einer nicht-beweglichen PV-Anlage in stündlicher Auflösung von PVGIS für das Jahr 2023 abgerufen. Neuere Daten oder Daten mit einer höheren zeitlichen Auflösung sind bei diesem Anbieter nicht verfügbar.

Investitionskosten und -emissionen

Für die Errichtung der PV-Anlage mit der in der GUI definierten Größe S^{PV} entstehen sowohl Kosten $C_{Invest,einmalig}^{PV}$ als auch Emissionen $CO2_{Invest,einmalig}^{PV}$. Diese werden nach Gleichung 1 berechnet. Die angenommenen spezifischen Kosten c_{Invest}^{PV} , spezifischen Emissionen $co2_{Invest}^{PV}$ und die Lebensdauer ls^{PV} sind in Unterunterabschnitt 4.2.2 aufgeführt.

Betriebskosten und -emissionen

Während des Betriebs entstehen weder Kosten noch Emissionen.

3.3.4 Stationärspeicher

Der Speicher wird mit einer Leistungslimitation von 0,5 C sowohl in Lade- als auch Entladung betrieben. Dieser Wert entspricht gängigen Modellen für Stationärspeicher. Bei einem 10 kWh Speicher entspricht das einer maximalen Leistung von 5 kW. Die Betriebsstrategie des Speichers sieht eine sogenannte Nulllastregelung am Netzanschlusspunkt vor. Dabei versucht der Speicher im lokalen Netz überschüssige Energie, die durch die PV-Anlage erzeugt, aber nicht lokal verbraucht werden kann, einzuspeichern. Nur, wenn die maximale Ladeleistung des Speichers überschritten wird oder er aufgrund eines zu hohen Ladezustands keine weitere Energie einspeichern kann, wird die überschüssige Energie über den Netzanschlusspunkt ins öffentliche Stromnetz eingespeist. Sollte der Bedarf im lokalen Energiesystems des Depots nicht aus lokalen Quellen gedeckt werden können, wird zuerst der Speicher entladen, bevor zusätzliche Energie aus dem öffentlichen Netz bezogen wird.

Investitionskosten und -emissionen

Für die Errichtung des Stationärspeichers mit der in der GUI definierten Größe $S^{Speicher}$ entstehen sowohl Kosten $C_{Invest,einmalig}^{Speicher}$ als auch Emissionen $CO2_{Invest,einmalig}^{Speicher}$. Diese werden nach Gleichung 1 berechnet. Die angenommenen spezifischen Kosten $c_{Invest}^{Speicher}$, spezifischen Emissionen $co2_{Invest}^{Speicher}$ und die Lebensdauer $ls^{Speicher}$ sind in Unterunterabschnitt 4.2.3 aufgeführt.

Betriebskosten und -emissionen

Während des Betriebs entstehen weder Kosten noch Emissionen.

3.3.5 Ladeinfrastruktur

LIFT unterstützt unterschiedliche Typen von Ladeinfrastruktur. Die in der GUI vordefinierten Ladepunkttypen sind in Unterunterabschnitt 4.2.4 aufgeführt. Von jedem Ladepunkttyp können mehrere Ladepunkte existieren. Die gesamte Ladeinfrastruktur unterliegt einem

Lastmanagement. Dieses kann entweder statisch oder dynamisch ausgelegt sein. Das statische Lastmanagement begrenzt in jedem Zeitschritt die für die gesamte Ladeinfrastruktur typübergreifend zur Verfügung stehende Ladeleistung auf einen in der GUI definierten Wert. Dieser wird normalerweise bestimmt, indem die Spitzenlast des Standortverbrauchs von der maximalen Leistung des Netzananschlusspunktes abgezogen wird. Für große Simulationszeitschritte (> 15 min) verhält sich das statische Lastmanagement nicht realistisch. Grund hierfür ist die starke Glättung des Standortlastgangs, dessen Lastspitzen normalerweise maßgeblich zur Definition der maximalen Leistung des statischen Lastmanagements berücksichtigt werden. Das dynamische Lastmanagement berechnet für jeden Zeitschritt die für die Flotte zur Verfügung stehende Leistung. Dazu wird die maximale Leistung des Netzan Anschlusses, die aktuell zur Verfügung stehende PV-Leistung und die maximale Leistung des Stationärspeichers unter Berücksichtigung des Ladezustands addiert und von diesem Wert der Standortverbrauch subtrahiert. Die verbleibende Leistung steht der Ladeinfrastruktur zur Verfügung.

Investitionskosten und -emissionen

Für die Errichtung eines einzelnen Ladepunktes n vom Typ m entstehen die in der GUI definierten Kosten $C_{\text{Invest, einmalig}}^{\text{Ladepunkt},m,n}$. Zur Berechnung der Investitionskosten aller Ladepunkte eines Typs $C_{\text{Invest, einmalig}}^{\text{Ladepunkt},m,n}$ werden die Kosten der einzelnen Ladepunkte desselben Typs aufsummiert. Eine Aggregation der verschiedenen Ladepunkttypen ergibt aufgrund der Möglichkeit unterschiedlicher Lebensdauern je nach Typ keinen Sinn. Die bei der Herstellung eines Ladepunktes entstehenden Emissionen $CO2_{\text{Invest, einmalig}}^{\text{Ladepunkt},mn}$ sind in Unterunterabschnitt 4.2.4 aufgeführt. Die Berechnung der Emissionen aller Ladepunkte eines Typs erfolgt analog zu den Kosten.

Betriebskosten und -emissionen

Während des Betriebs entstehen weder Kosten noch Emissionen, da die Energie vom lokalen Energiesystem bereitgestellt wird.

3.3.6 Flotte

Eine Flotte besteht aus mehreren Subflotten, die jeweils Fahrzeuge des gleichen Typs beinhalten. Die Mobilitätsprofile einer Subflotte beinhalten eine Zeitreihe, in der die Anwesenheit am Depot sowie der Energieverbrauch von Fahrten definiert wird. Diese Profile werden stochastisch gesamplet. Die maximale Ladeleistung eines Fahrzeugs berechnet sich aus dem fahrzeugspezifischen Limit und dem Limit des für das Fahrzeug definierten Ladepunktes. Beide Werte lassen sich in der GUI einstellen. Je nach Konfiguration sind sowohl die Anzahl zur Verfügung stehender Ladepunkte als auch die im Zeitschritt zur Verfügung stehende Ladeleistung eine knappe Resource. Aus diesem Grund werden die Fahrzeuge priorisiert und erhalten gemäß dieser Priorisierung Zugriff auf Ladeinfrastruktur und Ladeleistung. Dazu wird für jedes Fahrzeug zu jedem Zeitpunkt der Simulation eine Flexibilitätszeit errechnet. Diese gibt an, in wie vielen Zeitschritten das Fahrzeug spätestensmöglich mit dem Laden beginnen muss, um die nächste Fahrt ohne On-Route Laden erfüllen zu können. Das Fahrzeug mit der geringsten Flexibilitätszeit erhält die höchste Priorität bei der Vergabe der Ladepunkte und Ladeleistung. Jedes Fahrzeug ist nur mit dem in der GUI definierten Ladepunkt

kompatibel. Ist kein Ladepunkt dieses Typs mehr vorhanden, kann das Fahrzeug in diesem Zeitschritt nicht laden. Aufgrund des Priorisierungsalgorithmus' können Fahrzeuge in jedem Zeitschritt einem anderen Ladepunkt zugeordnet sein, was in der Realität mit einem hohen manuellen Aufwand für das Umstecken und -parken der Fahrzeuge verbunden wäre. Fahrzeuge, deren Ladezustand während einer Fahrt auf oder unter 0 % fällt, werden auf der Fahrt nachgeladen, jedoch nur soweit, dass sie mit einem Ladezustand von exakt 0 % wieder am Depot ankommen.

Investitionskosten und -emissionen

Beim Kauf eines einzelnen Fahrzeugs n in der Subflotte f entstehen die in der GUI definierten Kosten $C_{\text{Invest, einmalig}}^{\text{Fahrzeug}, f, n}$. Zur Berechnung der Investitionskosten aller Fahrzeuge einer Subflotte $C_{\text{Invest, einmalig}}^{\text{Fahrzeug}, f, n}$ werden die Kosten der einzelnen Fahrzeuge derselben Subflotte aufsummiert. Eine Aggregation der verschiedenen Subflotten ergibt aufgrund der Möglichkeit unterschiedlicher Lebensdauern je nach Subflotte keinen Sinn. Die bei der Herstellung eines Fahrzeugs entstehenden Emissionen $CO2_{\text{Invest, einmalig}}^{\text{Fahrzeug}, f, n}$ sind im Unterunterabschnitt 4.2.5 aufgeführt. Die Berechnung der Emissionen aller Fahrzeuge einer Subflotte erfolgt analog zu den Kosten.

Betriebskosten und -emissionen

Bei der Berechnung der Betriebskosten und Emissionen muss nach der Antriebsart des Fahrzeugs unterschieden werden. Für konventionell angetriebene Fahrzeuge einer Subflotte f berechnen sich die Kosten zu:

$$C_{\text{Betrieb}, jrl}^{\text{Fahrzeuge}, f, \text{ICEV}} = d_{\text{ICEV}}^f \cdot \left(c_{\text{Wartung}}^{f, \text{ICEV}} + c_{\text{Maut}}^{f, \text{ICEV}} \cdot x_{\text{Maut}}^{f, \text{ICEV}} + c^{\text{Diesel}} \cdot v^{f, \text{icev}} / 100 \right) \quad (4)$$

Dabei bezeichnet d_{ICEV}^f die gefahrene Distanz der Fahrzeuge der Subflotte, $c_{\text{Wartung}}^{f, \text{ICEV}}$ die spezifischen Wartungskosten pro Kilometer, $c_{\text{Maut}}^{f, \text{ICEV}}$ die spezifischen Mautkosten pro Kilometer, $x_{\text{Maut}}^{f, \text{ICEV}}$ den Anteil der mautpflichtigen Distanz an der Gesamtdistanz, c^{Diesel} die spezifischen Dieselskosten pro Liter und $v^{f, \text{icev}}$ den spezifischen Dieselvebrauch der Fahrzeuge auf 100 km. Bis auf den Anteil der mautpflichtigen Strecke und den spezifischen Diesel- und Mautkosten, die in der GUI eingestellt werden können, werden alle Parameter mit vordefinierten Werten parametrisiert, die in Unterunterabschnitt 4.2.5 aufgeführt sind. Die im Betrieb entstehenden Emissionen der Dieselfahrzeuge lassen sich aus dem benötigten Dieselvolumen und den spezifischen Emissionen für Diesel pro Liter $co2^{\text{Diesel}}$ (vordefiniert und in Unterunterabschnitt 4.2.5 aufgeführt) berechnen:

$$CO2_{\text{Betrieb}, jrl}^{\text{Fahrzeuge}, f, \text{ICEV}} = d_{\text{ICEV}}^f \cdot v^{f, \text{icev}} / 100 \cdot co2^{\text{Diesel}} \quad (5)$$

Für batterieelektrisch angetriebene Fahrzeuge einer Subflotte f berechnen sich die Kosten zu:

$$C_{\text{Betrieb}, jrl}^{\text{Fahrzeuge}, f, \text{ICEV}} = d_{\text{BEV}}^f \cdot \left(c_{\text{Wartung}}^{f, \text{BEV}} + c_{\text{Maut}}^{f, \text{BEV}} \cdot x_{\text{Maut}}^{f, \text{BEV}} \right) \quad (6)$$

Emissionen treten für batterieelektrische Fahrzeuge nicht auf. Die beim On-Route laden entstehenden Kosten und Emissionen werden lediglich auf Flottenebene berechnet.

$$C_{\text{Betrieb}, jrl, \text{On-Route}}^{\text{Flotte}} = E_{\text{On-Route}}^{\text{Flotte}} \cdot c_{\text{On-Route}}^{\text{Flotte}} \quad (7)$$

Für die Kosten werden die in der GUI definierten spezifischen On-Route Ladekosten $c_{On-Route}^{Flotte}$ verwendet, während für die Berechnung der beim On-Route Laden verursachten Emissionen die spezifischen Emissionen des öffentlichen Netzes herangezogen werden.

$$CO2_{Betrieb,jrl,On-Route}^{Flotte} = E_{On-Route}^{Flotte} \cdot co2_{Betrieb}^{Netz} \quad (8)$$

3.4 Technische Kennzahlen

Die technischen Kennzahlen dienen als Anhaltspunkte, ob sich die definierten Größen für Netzanschluss, PV-Anlage und Stationärspeicher sowie die gewählte Ladeinfrastruktur in einem für das System vorteilhaften Rahmen bewegen.

Die **Eigenverbrauchsquote** $\gamma_{Eigenverbrauch}$ gibt an, welcher Anteil der potenziell lokal erzeugbaren PV-Energie am Standort selbst verbraucht wurde. Dazu zählen der Standortverbrauch und die am Standort in die Fahrzeuge geladene Energie. Ein zu hoher Eigenverbrauch deutet meist auf eine für den Verbrauch am Standort zu klein dimensionierte PV-Anlage hin. Die Eigenverbrauchsquote berechnet sich zu:

$$\gamma_{Eigenverbrauch} = 1 - \frac{E_{Kappung}^{PV} + E_{Einspeisung}^{Netz}}{E_{Pot}^{PV}} \quad (9)$$

Der **Autarkiegrad** $\gamma_{Autarkie}$ gibt an, welcher Anteil der lokal verbrauchten Energie am Standort selbst, im Fall von LIFT lediglich über die PV-Anlage, erzeugt wurde. Zur lokal verbrauchten Energie zählen der Standortverbrauch und die am Standort in die Fahrzeuge geladene Energie. Ein zu hoher Autarkiegrad deutet meist auf eine für den Verbrauch am Standort zu groß dimensionierte PV-Anlage hin. Der Autarkiegrad berechnet sich zu:

$$\gamma_{Autarkie} = \frac{E_{Pot}^{PV} - E_{Kappung}^{PV} - E_{Einspeisung}^{Netz}}{E_{Depot}^{Flotte} + E_{gesamt}^{Standort}} \quad (10)$$

Eine hohe Eigenverbrauchsquote führt normalerweise zu einem niedrigen Autarkiegrad und umgekehrt. Zu einem gewissen Grad lässt sich dieser Zielkonflikt durch die Verwendung eines Stationärspeichers kompensieren.

Der Wert **Heim-Laden** gibt an, welcher Anteil der von der Flotte insgesamt geladenen Energie am Depot geladen wurde. Ein geringer Anteil an am Depot geladener Energie deutet auf zu wenige Ladepunkte bzw. Ladepunkte mit zu geringer Ladeleistung oder eine Limitation durch einen zu geringen Netzanschluss hin. Da meistens die Energiekosten am Depot im Vergleich zum On-Route Laden geringer ausfallen, ist hier ein möglichst hoher Wert anzustreben.

$$\gamma_{Heim-Laden} = \frac{E_{Depot}^{Flotte}}{E_{Depot}^{Flotte} + E_{On-Route}^{Flotte}} \quad (11)$$

3.5 Wirtschaftliche Kennzahlen

Bei der Berechnung der wirtschaftlichen Kennzahlen wird zwischen Investitions- und Betriebskosten unterschieden. Während Investitionskosten immer am Anfang eines Jahres auftreten, fallen Betriebskosten erst am Ende des Jahres an. Für jedes Jahr im betrachteten Projektzeitraum werden beide Kostenarten getrennt berechnet und anschließend diskontiert. Der Diskontierungsfaktor v^j für das Jahr j berechnet sich für eine Abzinsungsrate r zu

$$v^j = \frac{1}{(1+r)^{j-z}}, \quad \text{mit } z = \begin{cases} 1 & \text{Investitionskosten} \\ 0 & \text{Betriebskosten} \end{cases} \quad \text{und } j \in \{1, 2, \dots\} \quad (12)$$

Die initialen Investitionskosten für eine Komponente entstehen am Anfang des Projektzeitraums, also am Beginn des ersten Jahres. Nach Ablauf der Lebensdauer der Komponente wird dann eine entsprechende Ersatzinvestition getätigt. Damit ergeben sich die Zeitpunkte der Investitionen zu den Anfängen der Jahre $n \cdot ls_k$, $n \in \{0, 1, 2, \dots\}$. Unter der Annahme, dass sich der Wertverlust einer Komponente über deren Lebensdauer linear verhält, ergibt sich am Ende der Projektlaufzeit der Restwert

$$C_{\text{Restwert}}^k = \begin{cases} -C_{\text{Invest, einmalig}}^k \cdot \left(1 - \frac{(T_{prj} \bmod ls)}{ls}\right) & \text{if } T_{prj} \bmod ls \neq 0 \\ 0 & \text{if } T_{prj} \bmod ls = 0 \end{cases} \quad (13)$$

Der so berechnete Restwert wird am Beginn des auf den Projektzeitraum folgenden Jahres verbucht. Nach der zuvor gegebenen Definition wird der Restwert als negative Kosten dargestellt. Deshalb gilt:

$$C_{\text{Restwert}}^k \leq 0 \quad \forall k \quad (14)$$

Damit ergeben sich für eine Komponente k die zwei Kostenvektoren C_{Invest}^k und C_{Betrieb}^k :

$$C_{\text{Invest}}^k = \begin{pmatrix} C_{\text{Invest, einmalig}}^k \\ 0 \\ \vdots \\ C_{\text{Invest, einmalig}}^k \\ 0 \\ \vdots \\ C_{\text{Restwert}}^k \end{pmatrix}, \quad C_{\text{Betrieb}}^k = \begin{pmatrix} C_{\text{Betrieb, jrl}}^k \\ C_{\text{Betrieb, jrl}}^k \\ \vdots \\ C_{\text{Betrieb, jrl}}^k \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{mit } C_{\text{Invest}}^k, C_{\text{Betrieb}}^k \in \mathbb{R}^{T_{prj}+1 \times 1} \quad (15)$$

Jährliche Betriebskosten $C_{\text{Betrieb, jrl}}^k$ treten dabei jedes Jahr unverändert auf. Lediglich im letzten Eintrag des Vektors, der das Jahr nach der Projektlaufzeit darstellt, treten keine Kosten mehr auf. Dieser Eintrag dient lediglich der Restwertgutschrift.

Die diskontierten Kostenvektoren ergeben sich somit aus Gleichung 12 und Gleichung 15 zu

$$C_{u, \text{diskontiert}}^k = C_u^k \circ \begin{pmatrix} v_u^1 \\ v_u^2 \\ \vdots \\ v_u^{T_{prj}+1} \end{pmatrix} \quad \text{mit } u \in \{\text{Invest, Betrieb}\} \quad (16)$$

Diese beiden Vektoren werden als Grundlage für die Kostendarstellung in den Ergebnissen verwendet. Entweder als Zeitreihe, wie im Fall des Gesamtkostendiagramms, in dem die Gesamtkosten über die Projektlaufzeit aufgetragen sind, oder bereits aufsummiert, wie zur Berechnung der Projektgesamtkosten.

3.6 Ökologische Kennzahlen

Die ökologischen Kennzahlen werden analog zu den wirtschaftlichen Kennzahlen berechnet. Jedoch entfällt bei der Berechnung der ökologischen Kennzahlen die Diskontierung.

4 Parameter und Standardwerte

Formelz. Quelle	Parameter	Einheit	GUI-Wert
T_{Start}^{sim}	Startzeit der Simulation	keine	01.01.2023 00:00 (UTC+01:00)
T_{Dauer}^{sim}	Simulationszeitraum	Tag	365 Tage
$T_{Zeitschritt}^{sim}$	Simulationszeitschritt	Stunde	1 Stunde

Tabelle 1: Parameterdefinition, Formelzeichen und Standardwerte in LIFT. Wenn kein GUI-Wert angegeben ist, dann ist dieser Parameter in der GUI anpassbar.

4.1 Simulationsparameter

4.2 Komponenten

4.2.1 Netzanschluss

c_{Invest}^{Netz} : 200 €/kW
 $co2_{Invest}^{Netz}$: 0,0 kg/kW
 $co2_{Betrieb}^{Netz}$: 0.400 kg/kWh
 ls^{Netz} : 18 Jahre

4.2.2 PV-Anlage

c_{Invest}^{PV} : 900 €/kWp
 $co2_{Invest}^{PV}$: 798,0 kg/kWp
 ls^{PV} : 18 Jahre

4.2.3 Stationärspeicher

$c_{Invest}^{Speicher}$: 450 €/kWh
 $CO2_{Invest}^{Speicher}$: 69,0 kg/kWh
 $l_s^{Speicher}$: 9 Jahre

4.2.4 Ladeinfrastruktur

AC-Ladepunkte

$CO2_{Invest}^{Ladepunkt,AC}$: 65,4 kg
 $l_s^{SLadepunkt,AC}$: 6 Jahre

DC-Ladepunkte

$CO2_{Invest}^{Ladepunkt,DC}$: 6520 kg
 $l_s^{SLadepunkt,DC}$: 6 Jahre

4.2.5 Flotte

$CO2^{Diesel}$: 3,08 kg CO2-eq./l

Schwere Lkw

$S_{Batterie}$: 480 kWh
 $CO2_{Invest}^{Fahrzeug,BEV}$: 84600 kg
 $CO2_{Invest}^{Fahrzeug,ICEV}$: 54000 kg
 c_{Maut}^{BEV} : 0,0 €/km
 c_{Maut}^{ICEV} : 0,269 €/km
 $c_{Wartung}^{BEV}$: 0,1324 €/km
 $c_{Wartung}^{ICEV}$: 0,185 €/km
 v^{ICEV} : 27 l/100km
 l_s : 6 Jahre

Schwerer Verteilverkehr

$S_{Batterie}$: 400 kWh
 $CO2_{Invest}^{Fahrzeug,BEV}$: 59000 kg
 $CO2_{Invest}^{Fahrzeug,ICEV}$: 31200 kg
 c_{Maut}^{BEV} : 0,0 €/km
 c_{Maut}^{ICEV} : 0,242 €/km
 $c_{Wartung}^{BEV}$: 0,1324 €/km
 $c_{Wartung}^{ICEV}$: 0,185 €/km
 v^{ICEV} : 23 l/100km
 l_s : 6 Jahre

Urbaner Verteilverkehr

$S_{Batterie}$: 160 kWh

$CO2_{Invest}^{Fahrzeug,BEV}$: 26700 kg
 $CO2_{Invest}^{Fahrzeug,ICEV}$: 16200 kg
 c_{Maut}^{BEV} : 0,0 €/km
 c_{Maut}^{ICEV} : 0,137 €/km
 $c_{Wartung}^{BEV}$: 0,1051 €/km
 $c_{Wartung}^{ICEV}$: 0,1577 €/km
 v^{ICEV} : 19 l/100km
 ls : 6 Jahre

Lieferwagen

$S_{Batterie}$: 81 kWh
 $CO2_{Invest}^{Fahrzeug,BEV}$: 13870 kg
 $CO2_{Invest}^{Fahrzeug,ICEV}$: 8622 kg
 c_{Maut}^{BEV} : 0,0 €/km
 c_{Maut}^{ICEV} : 0,0 €/km
 $c_{Wartung}^{BEV}$: 0,0275 €/km
 $c_{Wartung}^{ICEV}$: 0,0339 €/km
 v^{ICEV} : 15 l/100km
 ls : 6 Jahre

5 Quellen