

Elektrifizierung der Logistik: Lohnt sich der Umstieg auf Elektro-Lkw?



Motivation

Die Anschaffungskosten batterieelektrischer Lkw sind bei gleichzeitig steigender Reichweite in den letzten Jahren deutlich gesunken. Zusätzlich hat der Bund die Mautbefreiung von e-Lkw bis 2031 verlängert und schafft somit weitere Investitionssicherheit. Aus diesem Grund prüfen insbesondere Logistikunternehmen aktuell den schrittweisen Umstieg von konventionellen Diesel-Lkw auf batterieelektrische Lkw. Neben höheren Investitions- und Fixkosten für solche Fahrzeuge spielen insbesondere der Aufbau einer geeigneten Ladeinfrastruktur, mögliche Engpässe im Netzanschluss sowie die operative Einbindung der Ladevorgänge in den täglichen Tourenbetrieb eine zentrale Rolle.

In dieser Fallstudie betrachten Sie ein einzelnes Logistikdepot, von dem aus täglich eine feste Menge an Touren gefahren wird. Ziel ist es, im Rahmen eines Beratungsmandats, ein Optimierungsmodell zu entwickeln, das strategische Entscheidungen zum Aufbau einer Lkw-Flotte sowie Ladeinfrastruktur am Depot abbildet und dabei die operativen Entscheidungen zur Touren- und Ladeplanung integriert.

Rahmenbedingungen

Ladeinfrastruktur und Energieversorgung

Am Depot können Ladesäulen unterschiedlicher Leistung installiert werden. Für jede Ladesäule fallen jährliche Investitions- und Betriebskosten (CAPEX/OPEX) an. Die Anzahl installierbarer Ladesäulen ist aufgrund örtlicher Gegebenheiten auf 3 Einheiten begrenzt. In Vorgesprächen mit dem Logistikunternehmen wurde festgelegt, dass auf

Ladeinfrastruktur des Anbieters „Alpitronic“ zurückgegriffen wird (siehe [Link](#)). Weitere Informationen zur angebotenen Ladeinfrastruktur finden Sie in den bereitgestellten Daten, z.B. auch zur maximalen Leistung (in kW) und Anzahl von Ladepunkten.

Eine unbedingt zu beachtende Einschränkung ist die maximal am Standort verfügbare Netzanschlussleistung in Höhe von 500kW. Die Netzbezugsleistung am Standort darf diese in keinem Fall überschreiten. Es besteht jedoch die Möglichkeit, die Netzanschlussleistung durch einen neuen Transformator zu erhöhen. Die jährlichen Kosten für die Erweiterungsoption betragen 10.000€. Durch die Erweiterung stehen weitere 500kW Leistung zur Verfügung.

Eine weitere Option ist, einen Batteriespeicher zu installieren. Die Leistung (in kW) und Kapazität (in kWh) des Speichers sind im Rahmen der Optimierung festzulegen. Mithilfe des Batteriespeichers kann die Netzanschlussleistung künstlich erhöht werden, d.h. durch die Entladung des Speichers können Lastspitzen gekappt werden. Folgende Informationen zum Speicher sind gegeben:

- CAPEX von 30€ pro kW Leistung p.a.
- CAPEX von 350€ pro kWh Kapazität p.a.
- OPEX von 2% der Gesamtinvestition (CAPEX Leistung & Kapazität)
- Round-Trip-Efficiency von 98%
- Maximale Entladetiefe (Depth of Discharge) von 97,5%

Aktuell hat das betrachtete Logistikunternehmen einen Festpreistarif für den Bezug von Strom abgeschlossen. Es ist ein Arbeitspreis pro bezogener kWh von 0,25€ vereinbart. Die jährliche Grundgebühr beträgt 1.000€. Neben dem Arbeits- gibt es auch einen Leistungspreis für die Netznutzung. Dieser wird wie folgt berechnet: Über das gesamte Jahr wird die maximale Bezugsleistung in kW aus dem Netz ermittelt. Diese wird mit dem Leistungspreis verrechnet. Bei einer maximalen Bezugsleistung von 150kW und einem Leistungspreis von 150€/kW würden beispielsweise Kosten von 22.500€ entstehen.

Lkw-Flotte

Aktuell setzt das Logistikunternehmen ausschließlich Diesel-Lkw vom Typ Mercedes-Benz Actros L als Sattelzugmaschine ein. Für die Fahrzeuge fallen jährliche Leasing- (CAPEX) und Wartungskosten (OPEX) an. Zudem müssen Diesel-Lkw eine Maut in Höhe von rd. 34ct/km auf Mautstraßen zahlen (vereinfachende Annahme) und es fallen jährliche Kfz-Steuern an. Als elektrische Alternativen zu den konventionellen Lkw kommen nur der eActros 400 und 600 in Frage. Für diese fallen ebenfalls jährliche Leasing- (CAPEX) und Wartungskosten (OPEX) an. Von der Maut und Kfz-Steuer ist der e-Lkw befreit. Weitere technische Merkmale wie maximale Ladeleistung und Batteriekapazität entnehmen Sie bitte der entsprechenden Datei. Außerdem können die batterieelektrischen Fahrzeuge am THG-Quotenhandel teilnehmen, d.h. pro Jahr und Fahrzeug erhält das Logistikunternehmen einen Erlös aus der Quotenvermarktung (vgl. entsprechende Datei).

Touren

Das Logistikunternehmen hat einen fixen täglichen Tourenplan, der über alle Tage gleich ist. Der Tourenplan gilt Montag bis Freitag. Pro Jahr wird der Tourenplan an 260 Tagen gefahren. Jede Tour ist durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

- Routen-ID: Eindeutige Kennung der Route

- Routename: Beschreibung der Tour bzw. Zielort
- Distanz: Gesamte Fahrstrecke in Kilometern
- Mautpflichtige Distanz: Fahrstrecke in Kilometern, die über mautpflichtige Straßen zurückgelegt wird
- Startzeit: Abfahrtszeit der Tour
- Endzeit: Endzeit der Tour

Jede Tour muss von genau einem Lkw gefahren werden, entweder einen Diesel- oder einen e-Lkw.

Systemdynamik

Der Planungshorizont umfasst einen typischen Betriebstag, der in diskrete Zeitintervalle unterteilt ist (z. B. 15-Minuten-Zeitschritte). Der Tagesablauf wird zyklisch modelliert, sodass der Ladezustand der Batterien am Ende des Tages dem Anfangszustand des Folgetages entspricht. Wie bereits zum Ende des letzten Absatzes erwähnt, muss jede Tour durch einen Lkw gefahren werden. Für e-Lkw ist aber nicht nur zu entscheiden, welche Tour gefahren wird, sondern auch wie die Ladevorgänge zwischen den Touren zu gestalten sind. Wichtig ist: Zu jedem Zeitpunkt kann ein Ladepunkt an einer Ladesäule nur durch einen e-Lkw genutzt werden und die Ladeleistung über alle Ladepunkte darf die maximale Ladeleistung der Ladesäule nicht überschreiten. Außerdem ist darauf zu achten, dass die e-Lkw nur sehr eingeschränkt auf dem Betriebsgelände bewegt werden können, d.h. folgendes:

- In der Zeit zwischen 6:00 Uhr – 18:00 Uhr kann ein im Depot ankommender e-Lkw zwischengeparkt werden, bevor er an einen Ladepunkt angeschlossen wird und diesen belegt. Gleiches gilt für das Zwischenparken nach Abschluss eines Ladevorgangs.
- Während eines Ladevorgangs darf ein Lkw nicht den Ladepunkt wechseln oder kurzzeitig freigeben.
- Für den Fall, dass ein Lkw in der Zeit zwischen 18:00 Uhr – 6:00 Uhr in das Depot zurückkehrt und geladen werden muss, ist dieser sofort an einen Ladepunkt anzuschließen und belegt diesen bis zur nächsten Tourabfahrt oder bis er wieder bewegt werden kann.

Zielsetzung & Aufgabenstellung

Ziel ist es, eine Auslegung für die Flotte und Ladeinfrastruktur des Logistikunternehmens zu bestimmen, die die Gesamtkosten minimiert. Dabei müssen die operativen Abläufe – Zuordnung von Fahrzeugen zu Touren und Ladeplanung – berücksichtigt werden. Die Gesamtkosten umfassen:

- OPEX & CAPEX für Diesel- und e-Lkw (Leasing, Betrieb, Steuern, etc.),
- CAPEX & OPEX für die Ladeinfrastruktur,
- CAPEX für den Netzanschluss,
- CAPEX & OPEX für den Speicher,
- Stromkosten (Arbeits- und Leistungspreise),
- abzüglich möglicher Erlöse (z. B. THG-Quoten).

Teilaufgabe 1: Modellierung

Leiten Sie aus der beschriebenen Problemstellung ein gemischt-ganzzahliges Optimierungsmodell ab. Formulieren Sie geeignete Indexmengen, Parameter, Entscheidungsvariablen, eine Zielfunktion sowie alle relevanten Nebenbedingungen.

Teilaufgabe 2: Implementierung

Implementieren Sie Ihr Modell in Python mit einem geeigneten Optimierungstool (z. B. PySCIPOpt). Lösen Sie das Modell für die bereitgestellten Daten und stellen Sie die Lösung strukturiert dar.

Teilaufgabe 3: Analyse

Analysieren und interpretieren Sie die optimale Lösung. Identifizieren Sie Kostentreiber, Engpässe und zentrale Einflussfaktoren.

Teilaufgabe 4: Erweiterungen

Diskutieren Sie mögliche praxisrelevante Erweiterungen des Modells (z. B. Unsicherheiten, dynamische Strompreise, PV-Anlage zur Eigenstromversorgung). Eine konzeptionelle Beschreibung ist ausreichend, eine beispielhafte Implementierung wünschenswert.