

Mathematische Modellformulierung: Elektrifizierung der LKW-Flotte

Optimierungsproblem

Ziel: Minimierung der jährlichen Gesamtkosten für die Flottenplanung eines Logistikdepots unter Berücksichtigung von Diesel- und Elektro-LKW, Ladeinfrastruktur und Batteriespeicher.

Modelltyp: Gemischt-ganzzahliges lineares Programm (MILP)

Solver: Gurobi (via PuLP)

Inhaltsverzeichnis

1. Indexmengen	1
2. Parameter	1
2.1 Zeitparameter	1
2.2 Fahrzeugparameter (pro Typ $f \in \mathcal{F}$)	1
2.3 Routenparameter (pro Route $r \in \mathcal{R}$)	2
2.4 Ladesäulenparameter (pro Typ $l \in \mathcal{L}$)	2
2.5 Energiekosten und Netzparameter	2
2.6 Speicherparameter	3
2.7 Big-M Parameter	3
3. Entscheidungsvariablen	3
3.1 Binärvariablen (0 oder 1)	3
3.2 Kontinuierliche Variablen (≥ 0)	4
4. Zielfunktion	4
4.1 Kostenkomponenten	4
5. Nebenbedingungen	6
NB1: Tourenabdeckung	6
NB2: Typzuweisung (NB_Typzuweisung)	6
NB3: E-Fahrzeug-Identifikation (NB_IsElectric)	7
NB4: Fahrzeug-Aktivierung (NB_Aktivierung)	7
NB5: Zeitliche Überlappung (NB_EineRoute)	7
NB6: Maximale Ladesäulenanzahl	7
NB7: Netzleistungsbegrenzung	7
NB8: Spitzenlasterfassung	8
NB9: Energiebilanz am Netzanschlusspunkt	8
NB10: Speicher-SOC-Bilanz	8
NB11: Speicher-Leistungsbegrenzung	8
NB12: Speicher-Modus (Exklusives Laden/Entladen)	8
NB13: Speicher-SOC-Grenzen	9
NB14: Fahrzeug-SOC-Bilanz	9
NB15: Fahrzeug-SOC-Grenzen	9
NB16: Ladeleistung begrenzt durch Säule	9
NB17: Laden nur für E-Fahrzeuge	10
NB18: Gesamtladeleistung pro Fahrzeug	10

NB19: IsCharging-Verknüpfung (χ -Kopplung).....	10
NB20: Ladepunkt-Kapazität	10
NB21: Ladesäulen-Gesamtleistung	11
NB22: On-Route-Verknüpfung	11
NB23: Nachts angesteckt bleiben (NB_STAY).....	11
NB24: Ladeunterbrechungsverbot	11
NB25: Vollladen-Erkennung.....	11
NB26: Nach Vollladen nicht mehr laden.....	12
NB27: Kein Säulenwechsel während Laden.....	12
NB28: Zwangsfreigabe tagsüber bei Volladung.....	12
NB29: Kein Laden während Fahrt.....	12
NB30: Ein Fahrzeug maximal an einer Säule	13
NB31: Diesel nicht angesteckt	13
NB32: Sofortiges Anstecken nachts wenn Laden nötig (NB_SOFORT)	13
6. Modellgröße.....	13
7. Notation Zusammenfassung	13

1. Indexmengen

Symbol	Beschreibung	Aussprache	Werte
\mathcal{V}	Menge der Fahrzeuge	„V“	$\{v_1, v_2, \dots, v_{20}\}$
\mathcal{F}	Menge der Fahrzeugtypen	„F“	{ActrosL,eActros400,eActros600}
\mathcal{F}^D	Menge der Diesel-Typen	„F-Diesel“	{ActrosL}
\mathcal{F}^E	Menge der Elektro-Typen	„F-Elektro“	{eActros400,eActros600}
\mathcal{R}	Menge der Touren/Routen	„R“	20 Touren
\mathcal{L}	Menge der Ladesäulentypen	„L“	{Alpitronic-50,Alpitronic-200,Alpitronic-400}
\mathcal{T}	Menge der Zeitschritte	„T“	{1,2, ...,96} (je 15 Minuten)
\mathcal{T}^{Nacht}	Nacht-Zeitschritte	„T-Nacht“	$\{73, \dots, 96\} \cup \{1, \dots, 24\}$ (18:00–06:00)
\mathcal{T}^{Tag}	Tag-Zeitschritte	„T-Tag“	$\{25, \dots, 72\}$ (06:00–18:00)

2. Parameter

2.1 Zeitparameter

Symbol	Beschreibung	Aussprache	Wert	Einheit
Δt	Zeitschrittänge	„Delta t“	0,25	h
D	Betriebstage pro Jahr	„D“	260	Tage/Jahr

2.2 Fahrzeugparameter (pro Typ $f \in \mathcal{F}$)

Symbol	Beschreibung	Aussprache	Actro sL	eActr os400	eActros6 00	Einheit
c_f^{CAPEX}	Anschaffungskosten (annuiisiert)	„c-Capex-f“	24.00 0	50.00 0	60.000	EUR/Jahr
c_f^{OPEX}	Betriebskosten (Wartung etc.)	„c-Opex-f“	6.000	5.000	6.000	EUR/Jahr
c_f^{KFZ}	KFZ-Steuer	„c-KFZ-f“	556	0	0	EUR/Jahr
c_f^{THG}	THG-Quoten-Erlös	„c-THG-f“	0	1.000	1.000	EUR/Jahr

Symbol	Beschreibung	Aussprache	Actros sL	eActros400	eActros600	Einheit
κ_f	Verbrauch	„Kappa-f“	26	105	110	L/100km bzw. kWh/100km
Q_f^{max}	Batteriekapazität	„Q-max-f“	0	414	621	kWh
$P_f^{max,Fzg}$	Max. Ladeleistung	„P-max-Fzg- f“	0	400	400	kW
SOC_f^{min}	Min. Ladezustand (10%)	„SOC-min-f“	0	41,4	62,1	kWh

2.3 Routenparameter (pro Route $r \in \mathcal{R}$)

Symbol	Beschreibung	Aussprache	Einheit
d_r	Gesamtdistanz der Route	„d-r“	km
d_r^{Maut}	Mautpflichtige Distanz	„d-Maut-r“	km
t_r^{start}	Startzeitschritt	„t-start-r“	–
t_r^{end}	Endzeitschritt	„t-end-r“	–

2.4 Ladesäulenparameter (pro Typ $l \in \mathcal{L}$)

Symbol	Beschreibung	Aussprache	Alpi- 50	Alpi- 200	Alpi- 400	Einheit
c_l^{CAPEX}	Anschaffungskosten	„c-Capex-l“	3.000	10.000	16.000	EUR/Jahr
c_l^{OPEX}	Betriebskosten	„c-Opex-l“	1.000	1.500	2.000	EUR/Jahr
P_l^{max}	Max. Ladeleistung	„P-max-l“	50	200	400	kW
n_l^{Spots}	Anzahl Ladepunkte	„n-Spots-l“	2	2	2	–

2.5 Energiekosten und Netzparameter

Symbol	Beschreibung	Aussprache	Wert	Einheit
p^{Arbeit}	Arbeitspreis Strom	„p-Arbeit“	0,25	EUR/kWh
$p^{Leistung}$	Leistungspreis Strom	„p-Leistung“	150	EUR/kW
p^{Grund}	Grundgebühr Strom	„p-Grund“	1.00 0	EUR/Jahr
p^{Diesel}	Dieselpreis	„p-Diesel“	1,60	EUR/L
p^{Maut}	Mautgebühr (Diesel)	„p-Maut“	0,34	EUR/km
$p^{Netz,Basis}$	Basis-Netzanschluss	„P-Netz-Basis“	500	kW
$P^{Netz,Erw}$	Erweiterung Netzanschluss	„P-Netz-Erweiterung“	500	kW
$c^{Netz,Erw}$	Kosten Netzerweiterung	„c-Netz-Erweiterung“	10.0 00	EUR/Jahr
L^{max}	Max. Anzahl Ladesäulen	„L-max“	3	–

2.6 Speicherparameter

Symbol	Beschreibung	Aussprache	Wert	Einheit
$c^{Sp,P}$	Speicher-CAPEX Leistung	„c-Speicher-P“	30	EUR/kW
$c^{Sp,E}$	Speicher-CAPEX Kapazität	„c-Speicher-E“	350	EUR/kWh
α^{OPEX}	OPEX-Rate Speicher	„Alpha-OPEX“	0,02	-
η	Round-Trip-Wirkungsgrad	„Eta“	0,98	-
η^{ch}	Ladewirkungsgrad Fahrzeuge	„Eta-charge“	0,95	-
DoD	Max. Entladetiefe	„DoD“	0,975	-

2.7 Big-M Parameter

Symbol	Beschreibung	Aussprache	Wert	Einheit
M^{SOC}	Big-M für SOC-Constraints	„M-SOC“	621	kWh
M^{Sp}	Big-M für Speicher	„M-Speicher“	10.00 0	kW
M^{ch}	Big-M für Ladeleistung	„M-charge“	400	kW
ε	Minimalladeleistung	„Epsilon“	0,1	kW

3. Entscheidungsvariablen

3.1 Binärvariablen (0 oder 1)

Symbol	Beschreibung	Aussprache	Index
use_v	Fahrzeug v wird eingesetzt	„use-v“	$v \in \mathcal{V}$
$\tau_{v,f}$	Fahrzeug v ist vom Typ f	„Tau-v-f“	$v \in \mathcal{V}, f \in \mathcal{F}$
ϵ_v	Fahrzeug v ist ein E-LKW	„Epsilon-v“	$v \in \mathcal{V}$
$x_{v,r}$	Fahrzeug v fährt Route r	„x-v-r“	$v \in \mathcal{V}, r \in \mathcal{R}$
y_l	Ladesäule l wird installiert	„y-l“	$l \in \mathcal{L}$
$w_{v,l,t}$	Fahrzeug v belegt Ladepunkt an Säule l zum Zeitpunkt t	„w-v-l-t“	$v \in \mathcal{V}, l \in \mathcal{L}, t \in \mathcal{T}$
$\omega_{v,t}$	Fahrzeug v ist auf Route zum Zeitpunkt t	„Omega-v-t“	$v \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T}$
$\chi_{v,t}$	Fahrzeug v lädt aktiv zum Zeitpunkt t	„Chi-v-t“	$v \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T}$
γ	Netzanschluss wird erweitert	„Gamma“	-
σ_t	Speicher-Modus: 1=Laden, 0=Entladen	„Sigma-t“	$t \in \mathcal{T}$
$\delta_{v,r}$	Fahrzeug v fährt Route r mit Diesel	„Delta-v-r“	$v \in \mathcal{V}, r \in \mathcal{R}$
$\phi_{v,r,f}$	Fahrzeug v fährt Route r mit Typ f	„Phi-v-r-f“	$v \in \mathcal{V}, r \in \mathcal{R}, f \in \mathcal{F}$

Symbol	Beschreibung	Aussprache	Index
$\mu_{v,t}$	Fahrzeug v ist zum Zeitpunkt t vollgeladen	„Mü-v-t“	$v \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T}$
$\nu_{v,t}$	Fahrzeug v benötigt Laden (SOC < Schwellwert)	„Nü-v-t“	$v \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T}$

3.2 Kontinuierliche Variablen (≥ 0)

Symbol	Beschreibung	Aussprache	Index	Einheit
$SOC_{v,t}$	Ladezustand Fahrzeug v zum Zeitpunkt t	„SOC-v-t“	$v \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T}$	kWh
$p_{v,l,t}^{ch}$	Ladeleistung Fahrzeug v an Säule l zum Zeitpunkt t	„p-charge-v-l-t“	$v \in \mathcal{V}, l \in \mathcal{L}, t \in \mathcal{T}$	kW
p_t^{Netz}	Netzbezug zum Zeitpunkt t	„p-Netz-t“	$t \in \mathcal{T}$	kW
P_{Peak}	Maximale Bezugsleistung (Spitzenlast)	„P-Peak“	–	kW
P^{sp}	Installierte Speicherleistung	„P-Speicher“	–	kW
E^{sp}	Installierte Speicherkapazität	„E-Speicher“	–	kWh
SOC_t^{sp}	Ladezustand Speicher zum Zeitpunkt t	„SOC-Speicher-t“	$t \in \mathcal{T}$	kWh
$p_t^{sp,ch}$	Speicher-Ladeleistung zum Zeitpunkt t	„p-Speicher-charge-t“	$t \in \mathcal{T}$	kW
$p_t^{sp,dis}$	Speicher-Entladeleistung zum Zeitpunkt t	„p-Speicher-discharge-t“	$t \in \mathcal{T}$	kW

4. Zielfunktion

$$\min C^{Gesamt} = C^{LKW} + C^{Lade} + C^{Strom} + C^{Netz} + C^{Speicher} + C^{Diesel} + C^{Maut} - C^{THG}$$

Aussprache: „Minimiere C-Gesamt gleich C-LKW plus C-Lade plus C-Strom plus C-Netz plus C-Speicher plus C-Diesel plus C-Maut minus C-THG“

Bedeutung: Die jährlichen Gesamtkosten setzen sich zusammen aus den Fahrzeugkosten, Ladeinfrastrukturkosten, Stromkosten, Netzkosten, Speicherkosten, Dieselkosten und Mautkosten, abzüglich der THG-Quoten-Erlöse.

4.1 Kostenkomponenten

LKW-Kosten

$$C^{LKW} = \sum_{v \in \mathcal{V}} \sum_{f \in \mathcal{F}} (c_f^{CAPEX} + c_f^{OPEX} + c_f^{KFZ}) \cdot \tau_{v,f}$$

Aussprache: „C-LKW gleich Summe über alle Fahrzeuge v und alle Typen f von Klammer c-Capex-f plus c-Opex-f plus c-KFZ-f Klammer zu mal Tau-v-f“

Bedeutung: Summe der jährlichen Fahrzeugkosten (Anschaffung + Betrieb + Steuer) für alle eingesetzten Fahrzeuge.

THG-Quoten-Erlöse

$$C^{THG} = \sum_{v \in \mathcal{V}} \sum_{f \in \mathcal{F}^E} c_f^{THG} \cdot \tau_{v,f}$$

Aussprache: „C-THG gleich Summe über alle Fahrzeuge v und alle E-Typen f von c-THG-f mal Tau-v-f“

Bedeutung: Jährliche Erlöse aus der THG-Quote für alle Elektro-LKW.

Ladeinfrastrukturkosten

$$C^{Lade} = \sum_{l \in \mathcal{L}} (c_l^{CAPEX} + c_l^{OPEX}) \cdot y_l$$

Aussprache: „C-Lade gleich Summe über alle Ladesäulen l von Klammer c-Capex-l plus c-Opex-l Klammer zu mal y-l“

Bedeutung: Jährliche Kosten für installierte Ladesäulen.

Stromkosten

$$C^{Strom} = p^{Grund} + p^{Leistung} \cdot P^{Peak} + p^{Arbeit} \cdot D \cdot \sum_{t \in \mathcal{T}} p_t^{Netz} \cdot \Delta t$$

Aussprache: „C-Strom gleich p-Grund plus p-Leistung mal P-Peak plus p-Arbeit mal D mal Summe über alle t von p-Netz-t mal Delta-t“

Bedeutung: Stromkosten bestehend aus Grundgebühr, Leistungspreis (basierend auf Spitzenlast) und Arbeitspreis (basierend auf Jahresenergieverbrauch).

Netzkosten

$$C^{Netz} = c^{Netz,Erw} \cdot \gamma$$

Aussprache: „C-Netz gleich c-Netz-Erweiterung mal Gamma“

Bedeutung: Kosten für die optionale Erweiterung des Netzanschlusses.

Speicherkosten

$$C^{Speiche} = (1 + \alpha^{OPEX}) \cdot (c^{Sp,P} \cdot P^{Sp} + c^{Sp,E} \cdot E^{Sp})$$

Aussprache: „C-Speicher gleich Klammer eins plus Alpha-OPEX Klammer zu mal Klammer c-Speicher-P mal P-Speicher plus c-Speicher-E mal E-Speicher Klammer zu“

Bedeutung: Jährliche Speicherkosten (CAPEX für Leistung und Kapazität, plus 2% OPEX).

Dieselkosten

$$C^{Diesel} = D \cdot p^{Diesel} \cdot \frac{\kappa_{ActrosL}}{100} \cdot \sum_{v \in V} \sum_{r \in R} d_r \cdot \delta_{v,r}$$

Aussprache: „C-Diesel gleich D mal p-Diesel mal Kappa-ActrosL durch hundert mal Summe über v und r von d-r mal Delta-v-r“

Bedeutung: Jährliche Dieselkosten für alle Diesel-LKW basierend auf gefahrenen Kilometern.

Mautkosten

$$C^{Maut} = D \cdot p^{Maut} \cdot \sum_{v \in V} \sum_{r \in R} d_r^{Maut} \cdot \delta_{v,r}$$

Aussprache: „C-Maut gleich D mal p-Maut mal Summe über v und r von d-Maut-r mal Delta-v-r“

Bedeutung: Jährliche Mautkosten für Diesel-LKW auf mautpflichtigen Strecken.

5. Nebenbedingungen

NB1: Tourenabdeckung

$$\sum_{v \in V} x_{v,r} = 1 \quad \forall r \in R$$

Aussprache: „Summe über alle Fahrzeuge v von x-v-r gleich eins für alle Routen r“

Bedeutung: Jede Tour muss von genau einem Fahrzeug gefahren werden.

NB2: Typzuweisung (NB_Typzuweisung)

$$\sum_{f \in F} \tau_{v,f} = use_v \quad \forall v \in V$$

Aussprache: „Summe über alle Typen f von Tau-v-f gleich use-v für alle Fahrzeuge v“

Bedeutung: Jedes aktive Fahrzeug hat genau einen Typ; inaktive Fahrzeuge haben keinen Typ.

NB3: E-Fahrzeug-Identifikation (NB_IsElectric)

$$\epsilon_v = \sum_{f \in \mathcal{F}^E} \tau_{v,f} \quad \forall v \in \mathcal{V}$$

Aussprache: „Epsilon-v gleich Summe über alle E-Typen f von Tau-v-f für alle Fahrzeuge v“

Bedeutung: Ein Fahrzeug ist genau dann ein E-LKW, wenn es einem Elektro-Typ zugeordnet ist.

NB4: Fahrzeug-Aktivierung (NB_Aktivierung)

$$x_{v,r} \leq use_v \quad \forall v \in \mathcal{V}, r \in \mathcal{R}$$

Aussprache: „x-v-r kleiner gleich use-v für alle Fahrzeuge v und alle Routen r“

Bedeutung: Ein Fahrzeug kann nur Routen fahren, wenn es aktiviert ist.

NB5: Zeitliche Überlappung (NB_EineRoute)

$$\sum_{r \in \mathcal{R}(t)} x_{v,r} \leq 1 \quad \forall v \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T}$$

wobei $\mathcal{R}(t) = \{r \in \mathcal{R}: t_r^{start} \leq t < t_r^{end}\}$

Aussprache: „Summe über alle zum Zeitpunkt t aktiven Routen r von x-v-r kleiner gleich eins für alle v und t“

Bedeutung: Ein Fahrzeug kann zu jedem Zeitpunkt höchstens eine Route fahren.

NB6: Maximale Ladesäulenanzahl

$$\sum_{l \in \mathcal{L}} y_l \leq L^{max}$$

Aussprache: „Summe über alle Ladesäulen l von y-l kleiner gleich L-max“

Bedeutung: Es können maximal 3 Ladesäulen installiert werden.

NB7: Netzeleistungsbegrenzung

$$p_t^{Netz} \leq P^{Netz,Basis} + P^{Netz,Erw} \cdot \gamma \quad \forall t \in \mathcal{T}$$

Aussprache: „p-Netz-t kleiner gleich P-Netz-Basis plus P-Netz-Erweiterung mal Gamma für alle t“

Bedeutung: Der Netzbezug ist durch den (ggf. erweiterten) Netzanschluss begrenzt.

NB8: Spitzenlasterfassung

$$P^{Peak} \geq p_t^{Netz} \quad \forall t \in \mathcal{T}$$

Aussprache: „P-Peak größer gleich p-Netz-t für alle t“

Bedeutung: Die Spitzenlast ist das Maximum aller Netzbezüge.

NB9: Energiebilanz am Netzanschlusspunkt

$$p_t^{Netz} + p_t^{Sp,dis} = \sum_{v \in V} \sum_{l \in L} p_{v,l,t}^{ch} + p_t^{Sp,ch} \quad \forall t \in \mathcal{T}$$

Aussprache: „p-Netz-t plus p-Speicher-discharge-t gleich Summe der Ladeleistungen plus p-Speicher-charge-t für alle t“

Bedeutung: Netzbezug plus Speicherentladung deckt Fahrzeugladung plus Speicherladung.

NB10: Speicher-SOC-Bilanz

$$SOC_t^{Sp} = SOC_{t-1}^{Sp} + (\eta \cdot p_t^{Sp,ch} - p_t^{Sp,dis}) \cdot \Delta t \quad \forall t \in \mathcal{T}$$

Aussprache: „SOC-Speicher-t gleich SOC-Speicher-t-minus-eins plus Klammer Eta mal p-Speicher-charge-t minus p-Speicher-discharge-t Klammer zu mal Delta-t“

Bedeutung: Der Speicher-SOC ergibt sich aus dem vorherigen SOC plus Ladung (mit Wirkungsgrad) minus Entladung.

NB11: Speicher-Leistungsbegrenzung

$$p_t^{Sp,ch} \leq P^{Sp} \quad \forall t \in \mathcal{T}$$

$$p_t^{Sp,dis} \leq P^{Sp} \quad \forall t \in \mathcal{T}$$

Bedeutung: Lade- und Entladeleistung sind durch die installierte Speicherleistung begrenzt.

NB12: Speicher-Modus (Exklusives Laden/Entladen)

$$p_t^{Sp,ch} \leq M^{Sp} \cdot \sigma_t \quad \forall t \in \mathcal{T}$$

$$p_t^{sp,dis} \leq M^{sp} \cdot (1 - \sigma_t) \quad \forall t \in \mathcal{T}$$

Bedeutung: Der Speicher kann zu jedem Zeitpunkt entweder laden ODER entladen, aber nicht beides gleichzeitig.

NB13: Speicher-SOC-Grenzen

$$(1 - DoD) \cdot E^{sp} \leq SOC_t^{sp} \leq E^{sp} \quad \forall t \in \mathcal{T}$$

Bedeutung: Der Speicher-SOC muss zwischen Minimum (basierend auf Entladetiefe) und Maximum (Kapazität) liegen.

NB14: Fahrzeug-SOC-Bilanz

$$SOC_{v,t} = SOC_{v,t-1} + \eta^{ch} \cdot \sum_{l \in \mathcal{L}} p_{v,l,t}^{ch} \cdot \Delta t - \sum_{r \in \mathcal{R}(t)} \sum_{f \in \mathcal{F}^E} \phi_{v,r,f} \cdot \kappa_{r,f}^{step}$$

wobei $\kappa_{r,f}^{step} = \frac{\kappa_f}{100} \cdot \frac{d_r}{t_r^{end} - t_r^{start}}$ der Verbrauch pro Zeitschritt ist.

Aussprache: „SOC-v-t gleich SOC-v-t-minus-eins plus Eta-charge mal Laden minus Verbrauch“

Bedeutung: Der Ladezustand eines Fahrzeugs ergibt sich aus dem vorherigen SOC plus Ladung (mit Wirkungsgrad $\eta^{ch} = 0,95$, d.h. 5% Ladeverluste) minus Energieverbrauch während der Fahrt.

NB15: Fahrzeug-SOC-Grenzen

$$SOC_{v,t} \leq \sum_{f \in \mathcal{F}^E} Q_f^{max} \cdot \tau_{v,f} \quad \forall v \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T}$$

$$SOC_{v,t} \geq \sum_{f \in \mathcal{F}^E} SOC_f^{min} \cdot \tau_{v,f} \quad \forall v \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T}$$

$$SOC_{v,t} \leq M^{soc} \cdot \epsilon_v \quad \forall v \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T}$$

Bedeutung: Der SOC muss im zulässigen Bereich des zugewiesenen Fahrzeugtyps liegen (10%-100%); Diesel-Fahrzeuge haben SOC = 0.

NB16: Ladeleistung begrenzt durch Säule

$$p_{v,l,t}^{ch} \leq P_l^{max} \cdot w_{v,l,t} \quad \forall v \in \mathcal{V}, l \in \mathcal{L}, t \in \mathcal{T}$$

Bedeutung: Die Ladeleistung ist durch die Säulenleistung begrenzt und nur möglich wenn der Ladepunkt belegt ist.

NB17: Laden nur für E-Fahrzeuge

$$p_{v,l,t}^{ch} \leq M^{ch} \cdot \epsilon_v \quad \forall v \in \mathcal{V}, l \in \mathcal{L}, t \in \mathcal{T}$$

Bedeutung: Nur E-LKW können laden.

NB18: Gesamtladeleistung pro Fahrzeug

$$\sum_{l \in \mathcal{L}} p_{v,l,t}^{ch} \leq \sum_{f \in \mathcal{F}^E} P_f^{max,Fzg} \cdot \tau_{v,f} \quad \forall v \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T}$$

Bedeutung: Die Gesamtladeleistung eines Fahrzeugs ist durch dessen maximale Ladeleistung begrenzt.

NB19: IsCharging-Verknüpfung (χ -Kopplung)

$$\sum_{l \in \mathcal{L}} p_{v,l,t}^{ch} \leq M^{ch} \cdot \chi_{v,t} \quad \forall v \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T}$$

$$\sum_{l \in \mathcal{L}} p_{v,l,t}^{ch} \geq \varepsilon \cdot \chi_{v,t} \quad \forall v \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T}$$

Bedeutung:

- Wenn $\chi_{v,t} = 1$, dann muss mindestens ε kW geladen werden
 - Wenn $\chi_{v,t} = 0$, dann darf nicht geladen werden
 - Koppelt die Binärvariable χ exakt mit der tatsächlichen Ladeleistung
-

NB20: Ladepunkt-Kapazität

$$\sum_{v \in \mathcal{V}} w_{v,l,t} \leq n_l^{Spots} \cdot y_l \quad \forall l \in \mathcal{L}, t \in \mathcal{T}$$

Aussprache: „Summe der Fahrzeuge an Säule l zum Zeitpunkt t kleiner gleich Anzahl Spots mal y-l“

Bedeutung: An jeder Ladesäule können maximal so viele Fahrzeuge gleichzeitig angeschlossen sein wie Ladepunkte vorhanden sind (nur wenn Säule installiert).

NB21: Ladesäulen-Gesamtleistung

$$\sum_{v \in \mathcal{V}} p_{v,l,t}^{ch} \leq P_l^{max} \cdot y_l \quad \forall l \in \mathcal{L}, t \in \mathcal{T}$$

Bedeutung: Die Gesamtladeleistung an einer Säule ist durch deren maximale Leistung begrenzt.

NB22: On-Route-Verknüpfung

$$\begin{aligned} \omega_{v,t} &\geq x_{v,r} \quad \forall v \in \mathcal{V}, t \in [t_r^{start}, t_r^{end}), r \in \mathcal{R} \\ \omega_{v,t} &\leq \sum_{r \in \mathcal{R}(t)} x_{v,r} \quad \forall v \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T} \end{aligned}$$

Bedeutung: $\omega_{v,t} = 1$ genau dann, wenn Fahrzeug v zum Zeitpunkt t eine Route fährt.

NB23: Nachts angesteckt bleiben (NB_STAY)

$$w_{v,l,t} - w_{v,l,t+1} \leq \omega_{v,t+1} \quad \forall v \in \mathcal{V}, l \in \mathcal{L}, t \in \mathcal{T}^{Nach}$$

Aussprache: „w-v-l-t minus w-v-l-t-plus-eins kleiner gleich Omega-v-t-plus-eins für alle v, l und Nacht-Zeitschritte t“

Bedeutung: Nachts (18:00-06:00) darf ein Fahrzeug einen Ladepunkt NUR verlassen, wenn es im nächsten Zeitschritt auf Route geht ($\omega_{v,t+1} = 1$). „Wer nachts ansteckt, bleibt bis zur Abfahrt.“

NB24: Ladeunterbrechungsverbot

$$\chi_{v,t} - \chi_{v,t+1} \leq \omega_{v,t+1} \quad \forall v \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T}$$

Aussprache: „Chi-v-t minus Chi-v-t-plus-eins kleiner gleich Omega-v-t-plus-eins“

Bedeutung: Ein laufender Ladevorgang darf nicht unterbrochen werden, außer das Fahrzeug fährt auf Route. Verhindert ineffiziente Lade-Pause-Lade-Muster.

NB25: Vollladen-Erkennung

$$\begin{aligned} SOC_{v,t} &\geq Q_f^{max} \cdot \mu_{v,t} - M^{SOC} \cdot (1 - \tau_{v,f}) \quad \forall v \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T}, f \in \mathcal{F}^E \\ \mu_{v,t} &\leq \epsilon_v \quad \forall v \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T} \end{aligned}$$

Bedeutung: $\mu_{v,t} = 1$ wenn die Batterie voll ist ($SOC = Q^{max}$). Nur E-LKW können vollgeladen sein.

NB26: Nach Vollladen nicht mehr laden

$$\chi_{v,t+1} \leq (1 - \mu_{v,t}) + \omega_{v,t+1} \quad \forall v \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T}$$

Aussprache: „Chi-v-t-plus-eins kleiner gleich eins minus Mü-v-t plus Omega-v-t-plus-eins“

Bedeutung: Wenn die Batterie zum Zeitpunkt t voll ist ($\mu_{v,t} = 1$) UND das Fahrzeug nicht auf Route geht ($\omega_{v,t+1} = 0$), dann darf nicht mehr geladen werden ($\chi_{v,t+1} = 0$).

NB27: Kein Säulenwechsel während Laden

$$w_{v,l,t} - w_{v,l,t+1} \leq \omega_{v,t+1} + (1 - \chi_{v,t}) \quad \forall v \in \mathcal{V}, l \in \mathcal{L}, t \in \mathcal{T}$$

Bedeutung: Ein Fahrzeug darf den Ladepunkt nur verlassen, wenn es auf Route geht ($\omega_{v,t+1} = 1$) ODER nicht aktiv lädt ($\chi_{v,t} = 0$). Verhindert Säulenwechsel während des aktiven Ladens.

NB28: Zwangsfreigabe tagsüber bei Vollladung

$$\sum_{l \in \mathcal{L}} w_{v,l,t+1} \leq (1 - \mu_{v,t}) + \omega_{v,t+1} \quad \forall v \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T}^{Tag}$$

Bedeutung: Tagsüber (06:00-18:00): Wenn ein LKW vollgeladen ist ($\mu_{v,t} = 1$) und keine Route fährt ($\omega_{v,t+1} = 0$), muss er den Ladepunkt freigeben. Verhindert Blockierung von Ladepunkten durch vollgeladene Fahrzeuge.

Hinweis: Nachts (18:00-06:00) gilt diese Regel NICHT - vollgeladene LKW bleiben am Ladepunkt angesteckt, siehe NB23.

NB29: Kein Laden während Fahrt

$$\sum_{l \in \mathcal{L}} w_{v,l,t} \leq 1 - \omega_{v,t} \quad \forall v \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T}$$

Bedeutung: Ein Fahrzeug kann nicht an einem Ladepunkt angesteckt sein, wenn es auf Route ist.

NB30: Ein Fahrzeug maximal an einer Säule

$$\sum_{l \in \mathcal{L}} w_{v,l,t} \leq 1 \quad \forall v \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T}$$

Bedeutung: Ein Fahrzeug kann nicht gleichzeitig an mehreren Ladesäulen angesteckt sein.

NB31: Diesel nicht angesteckt

$$w_{v,l,t} \leq \epsilon_v \quad \forall v \in \mathcal{V}, l \in \mathcal{L}, t \in \mathcal{T}$$

Bedeutung: Diesel-Fahrzeuge dürfen nicht an Ladepunkten angesteckt sein.

NB32: Sofortiges Anstecken nachts wenn Laden nötig (NB_SOFORT)

Hilfsvariable: $v_{v,t}$ (needs*charge) = 1 wenn $SOC * v, t <$ maximaler Routenverbrauch

$$SOC_{v,t} \geq \kappa_f^{max} \cdot \tau_{v,f} - M^{SOC} \cdot v_{v,t} - M^{SOC} \cdot (1 - \tau_{v,f}) \quad \forall v, t, f \in \mathcal{F}^E$$

$$v_{v,t} \leq \epsilon_v \quad \forall v \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T}$$

Hauptconstraint:

$$\sum_{l \in \mathcal{L}} w_{v,l,t+1} \geq \omega_{v,t} - \omega_{v,t+1} + v_{v,t+1} - 1 \quad \forall v \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T}^{Nacht}$$

Bedeutung: Wenn ein E-LKW nachts (18:00-06:00) von einer Route zurückkehrt ($\omega_{v,t} = 1, \omega_{v,t+1} = 0$) UND geladen werden muss ($v_{v,t+1} = 1$), dann muss er sofort an einen Ladepunkt angeschlossen werden.

Hinweis: Wenn der SOC ausreicht für die längste Route, darf der LKW ohne Ladepunkt zwischengeparkt werden.

6. Modellgröße

Komponente	Anzahl
Binärvariablen	ca. 19.000
Kontinuierliche Variablen	ca. 5.000
Variablen gesamt	ca. 24.000
Nebenbedingungen	ca. 75.000

7. Notation Zusammenfassung

Griechisch	Name	Verwendung
------------	------	------------

Griechisch	Name	Verwendung
τ	Tau	Typzuordnung
ϵ	Epsilon	E-LKW-Indikator
ω	Omega	On-Route-Indikator
χ	Chi	Is-Charging-Indikator
γ	Gamma	Netzerweiterung
σ	Sigma	Speicher-Modus
δ	Delta	Diesel-Route
ϕ	Phi	Typ-Route
μ	Mü	Volllade-Indikator
ν	Nü	Needs-Charge-Indikator
η	Eta	Wirkungsgrad
κ	Kappa	Verbrauch
α	Alpha	OPEX-Rate
ε	Epsilon (klein)	Minimalladaleistung

Dokumentation erstellt für DHBW Fallstudie SCM – Elektrifizierung der Logistik Stand: 03.02.2026