

Dokumentation

Simulationsprogramm Gesamtkonzept: Strom



Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	4
2	Quick-Start.....	5
2.1	Online ausführen	5
2.2	Bearbeiten des Programms.....	6
3	Eingabe der Parameter.....	8
3.1	Input Parameter	8
3.2	Pfad Eingabe.....	8
3.3	Tarif Eingabe.....	9
3.4	PV-Anlage Eingabe.....	10
3.5	Batteriespeicher Eingabe	10
3.6	ELKW Eingabe	12
3.7	WELKW Eingabe	12
3.8	EPKW Eingabe.....	13
4	Komponenten im Simulationsprogramm	14
4.1	Lastganganalyse.....	14
4.2	Photovoltaik Anlage	14
4.3	Mobilitätskonzepte	16
4.4	Peak-Shaving mit Batteriespeicher	20
5	Aufbau des Programms	24
5.1	Beschreibung	24
5.2	Lastgang einlesen	25
5.3	Simulation PV-Anlage	25
5.4	Analyse des Lastgangs	25
5.5	Simulation E-LKW mit festen Batterien oder Wechselsystem	27
5.6	Simulation Peak-Shaving	29
5.7	Logik.....	32
6	Berechnungen Kosten und Business-Case.....	35
6.1	PV-Anlage	35
6.2	Batteriespeicher	37
6.3	Diesel LKW (LKW)	38
6.4	E-Lkw mit fester Batterie (E-LKW)	39
6.5	E-Lkw mit Wechselsystem (WE-LKW).....	40
6.6	Ladestationen E-LKW (LS E-LKW)	40

6.7	Ladestationen für E-PKW (LS E-PKW)	41
7	Ausgabe und Resultate.....	42
7.1	Bilanz Lastgang	42
7.2	Bilanz PV-Anlage.....	42
7.3	Bilanz E-LKW	43
7.4	Bilanz WE-LKW	43
7.5	Bilanz E-PKW.....	44
7.6	Bilanz Batteriespeicher.....	44
7.7	Kosten der Variante.....	44
8	Literaturverzeichnis	46
9	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis.....	47
9.1	Abbildungsverzeichnis.....	47
9.2	Tabellenverzeichnis.....	47
10	Anhang: Details Simulation	49

1 Einführung

Das vorliegende Dokument enthält die Beschreibung zum Simulationsprogramm «Gesamtkonzept: Strom»

Die Grundfunktionen des Simulationsprogramms sind:

1. Bilanzierung eines Lastgangs über ein Jahr
2. Bilanzierung der PV-Anlage aus Produktionsdaten oder Simulationsdaten aus Polysun
3. Bilanzierung eines Batteriespeicher für Peak-Shaving in Kombination mit Eigenverbrauchserhöhung.
4. Bilanzierung von E-LKWs mit festen oder Wechsel-Batterien
5. Bilanzierung von Ladestationen für E-Mobilität

Im Simulationsprogramm werden mehrere Varianten nacheinander simuliert und anschliessend verglichen, um die optimalen Komponenten zu ermitteln.

Ein Grossteil der Dokumentation ist im Simulationsprogramm integriert.

2 Quick-Start

In diesem Abschnitt wird kurz beschrieben, wie das Programm ohne Vorkenntnisse oder installiertes Python gestartet und bearbeitet werden kann.

2.1 Online ausführen

Durch My Binder kann das Simulationsprogramm ohne installiertes Python verwendet werden. Dafür werden alle Ressourcen online aufgerufen.

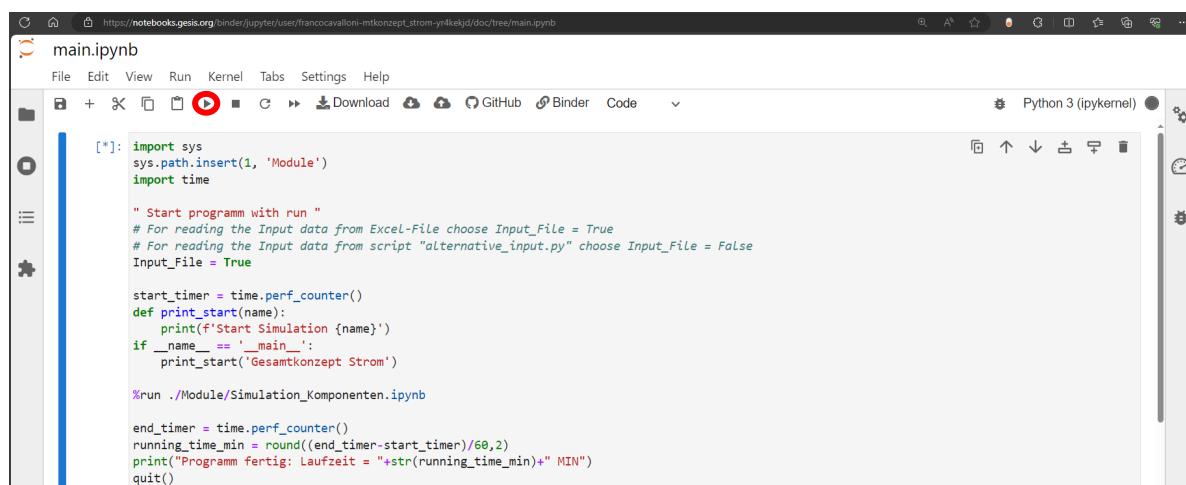
Das Simulationsprogramm ist durch folgenden Link zugänglich:

https://mybinder.org/v2/gh/francocavalloni/Gesamtkonzept_Strom/HEAD?labpath=%2Fmain.ipynb

Achtung:

Es kann aufgrund der Server Kapazität von «my Binder» (mybinder.org) zu einer langen Ladezeit oder einem Error kommen. Dies kann passieren, wenn der Link über einen längeren Zeitraum nicht aufgerufen wurde. Durch mehrere Versuche oder einen anderen Zeitpunkt kann die Verbindung hergestellt werden und die Knotenpunkte für die Abbilder des Projekts wiederhergestellt werden. Nachdem das Programm einmal vollständig geladen hat, sollten die nächsten Versuche schnell gelingen und erfolgreich sein.

Nach dem das Jupyter Notebook gestartet hat, geht das «main.ipynb» Skript auf. Die Ansicht nach dem erfolgreichen Start ist in Abbildung 1 aufgeführt. Um das Programm zu starten, muss die Start Taste (rot markiert) gedrückt werden.



```
import sys
sys.path.insert(1, 'Module')
import time

# Start programm with run "
# For reading the Input data from Excel-File choose Input_File = True
# For reading the Input data from script "alternative_input.py" choose Input_File = False
Input_File = True

start_timer = time.perf_counter()
def print_start(name):
    print(f'Start Simulation {name}')
if __name__ == '__main__':
    print_start('Gesamtkonzept Strom')

%run ./Module/Simulation_Komponenten.ipynb

end_timer = time.perf_counter()
running_time_min = round((end_timer-start_timer)/60,2)
print("Programm fertig: Laufzeit = "+str(running_time_min)+" MIN")
quit()
```

Abbildung 1: Startansicht.

Für das Anpassen der Input Parameter muss das File «Input_Parameter.xlsx» heruntergeladen werden. Dieses kann nun angepasst werden und wieder hochgeladen werden. In Kapitel 3 ist die Eingabe für die Input Parameter beschrieben.

<p>Ordner öffnen (Orange markiert). Herunterladen der Input Parameter für Anpassungen durch Rechts-Klick.</p>	<p>Hochladen der angepassten Input Parameter durch Verschieben. Alternativ durch Option Hochladen (Button grün markiert).</p>

Tabelle 1: Anpassen der Input Parameter

Nach einer Inaktivität von 10 Minuten wird die Verbindung zum Server abgebrochen und es erscheint die Meldung in Abbildung 2. Danach muss der Link wieder neu aufgerufen werden.

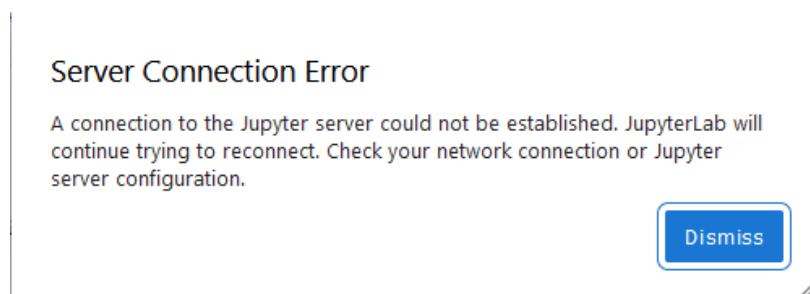


Abbildung 2: Error nach Inaktivität

Bei jedem Aufrufen wird ein Abbild des Projektes erstellt und dieses Abbild kann nicht erneut aufgerufen werden. Es muss wieder ein neues mit dem Ursprungs-Link erstellt werden.

2.2 Bearbeiten des Programms

Um das Programm zu erweitern oder zu bearbeiten und diese Änderungen zu speichern muss das Python Projekt, indem das Programm sich befindet, auf Github geöffnet werden. Der Link für Github ist nachfolgend aufgeführt:

https://github.com/francocavalloni/Gesamtkonzept_Strom

Mit einem Python Interpreter wie PyCharm kann das Projekt mit dem Link geklont werden und somit auf dem eigenen Rechner bearbeitet und wieder hochgeladen werden.

Damit die Version auf my Binder aktualisiert wird, muss das Repository wieder neu hochgeladen werden. Das geschieht auf der Homepage von my Binder (mybinder.org).

Im Python Workshop IBRE von Raphael Schreiber ist beschrieben, wie Python und Pycharm installiert werden können und die Verbindung mit Github hergestellt wird. (Schreiber, 2023)

3 Eingabe der Parameter

In diesem Abschnitt wird das Excel für die Eingabe der Input Daten für die Variantenbildung beschrieben.

Für ein schnelles Anpassen der wichtigen Parameter für die Variantenbildung sind die Eingabe Parameter farblich kodiert. In Tabelle 2 ist die Farbkodierung der Eingabe Parameter beschrieben.

Eingabefelder der Parameter sind gelb markiert.
Dunkelroter Text sind starre Parameter durch das System definiert (zb. Tarife)
Blauer Text sind flexible Parameter für die Systemoptimierung (z.B. Modus Batteriespeicher)
Grüner Text sind Dateipfade

Tabelle 2: Farbkodierung für Eingabe Parameter

3.1 Input Parameter

Dies ist das zweite Blatt mit Bezeichnung «Input» im Excel File «input_parameter.xlsx». Durch die Werte werden die Komponenten der Simulation ein oder ausgeschalten. Die Maske in Excel ist in Tabelle 3 aufgeführt.

Beschreibung	Eingabe	Wert	Variabel
Exceldatei erstellen mit den Resultaten	"True" oder "False"	True	excel
Diagramme ausgeben	"True" oder "False"	True	plot
Bilanzierung des Lastgangs	"True" oder "False"	False	LG_Sim
Simulation PV	"True" oder "False"	True	PV_Sim
Simulation und Bilanzierung von ELKWs mit festen Batterien	Anzahl 0-3 ELKWs (0 = keine)	0	ELKW_Sim
Simulation und Bilanzierung von ELKWs mit Wechselbatteriesystem	Anzahl 0-3 WELKWs (0 = keine)	0	WELKW_Sim
Simulation von EPKWs	"True" oder "False"	True	EPKW_Sim
Simulation Speicher	"True" oder "False"	False	SP_Sim

Tabelle 3: Input Parameter

Durch unterschiedliche Kombinationen der Komponenten werden die Varianten gebildet.

3.2 Pfad Eingabe

Dies ist das dritte Blatt mit Bezeichnung «Path» im Excel File «input_parameter.xlsx». Durch die Werte werden Pfade für die Ausgabedatei und für die Input Dateien bestimmt.

Typ	Beschreibung	Eingabe Pfad	Eingabe Seite	Variabel
Ausgabedatei	Dateiname der Ausgabedatei der Simulation mit den Resultaten. Anpassen für verschiedene Varianten	Test_Output_3.xlsx	-	out put _excel_S
Lastgang Simulation	Ordner für die einzulesenden Daten Pfad und Dateiname (mit Dateityp bsp. .xlsx) für den einzulesenden Lastgang angeben. Eingelesen wird das entsprechende Blatt im Excel (gezählt von links nach rechts).	Daten_Input Beispiel_Lastgang_einlesen.xlsx	- 4	r_DI_R r_LG_S
Lastgang für Peak Shaving Analyse	Wird nur verwendet wenn ein Lastgang eines Vorjahres vorhanden ist, um eine reale Peak-Shaving Simulation mit Erfahrungswerten zu testen. Für normale Simulation gleiche Werte wie beim Lastgang Simulation.	Beispiel_Lastgang_einlesen.xlsx	-	r_LG_A
PV- Anlagen	Pfad und Dateiname (mit Dateityp bsp. .xlsx) für die PV-Anlage (Die Fassade ist auf Blatt 2, Dach Süd auf Blatt 3, Dach Ost/West auf Blatt 4 und der "Carport" auf Blatt 5)	Beispiel_PV_Input_aus_Polysun.xlsx	-	r_PV
Mobilität	Fahrdaten von LKWs für die Berechnung des Fahrprofils und Energiebedarf der ELKWs	Beispiel_LKW_Fahrdaten.xlsx	-	r_LKW

Tabelle 4: Pfad Eingabe

Für das Starten einer Simulation sind die Input Daten notwendig, diese werden beim Start des Programmes eingelesen. Die Pfade und Dateinamen müssen eindeutig definiert sein.
Die Ausgabedatei muss für jede einzelne Variante umbenannt werden.

3.3 Tarif Eingabe

Dies ist das vierte Blatt mit Bezeichnung «Tarife» im Excel File «input_parameter.xlsx».

Beschreibung	Wert	Einheit	Variabel
Variation der Energietarife (1= 100% = Basis)	1	-	Tar_var
Mehrwertsteuer	0.077	-	mwst
Leistungsspitzenpreis ohne MWST	7.5	CHF/kW	leistungsspitzenpreis
Hochtarif ohne MWST	0.16	CHF/kWh	hochtarif
Niedertarif ohne MWST	0.14	CHF/kWh	niedertarif
Rückliefertarif	0.09	CHF/kWh	rueckspeisungstarif
Tarif Schnellladen extern	0.5	CHF/kWh	tarif_schnellladen
Kapitalzins (WACC 2024)	4.13%	-	Zi ns_WACC
Startzeit für Hochtarif (Mo-Fr)	06:00:00	hh:mm:ss	zeit_hochtarif_woche_start
Endzeit für Hochtarif (Mo-Fr)	20:00:00	hh:mm:ss	zeit_hochtarif_woche_ende
Startzeit für Hochtarif (Sa)	06:00:00	hh:mm:ss	zeit_hochtarif_samstag_start
Endzeit für Hochtarif (Sa)	13:00:00	hh:mm:ss	zeit_hochtarif_samstag_ende

Tabelle 5: Eingabe Tarife

Nachfolgend sind die nicht selbsterklärenden **Parameter** beschrieben:

Variation der Energietarife: Durch diesen Parameter werden die Energietarife um einen Faktor erhöht oder vermindert. Diese Grösse beeinflusst den Hochtarif, Niedertarif, Rückspeisetarif und den Tarif Schnellladen. Bei Wert 2 werden die Tarife verdoppelt und bei Wert 0.5 werden die Tarife halbiert.

Tarif Schnellladen extern: Dieser Tarif wird für die E-LKW und WE-LKW für externe Ladung mit 100 kW verwendet.

Kapitalzins: Der Kapitalzins wird für die Berechnung der Business-Cases verwendet. Für die untersuchten Komponenten wird der WACC für die Stromversorgung, welcher von der Elcom festgelegt wird, verwendet.

3.4 PV-Anlage Eingabe

Dies ist das fünfte Blatt mit Bezeichnung «Photovoltaik» im Excel File «input_parameter.xlsx».

Typ	Beschreibung	Wert	Einheit	Variabel
Simulation PV	Von Inputblatt vorgegeben, muss "True" sein für Simulation	True	-	-
installierte Leistung	Total (Summe aus allen Flächen)	2548	kWp	-
installierte Leistung	Dach (Süd Ausrichtung)	0	kWp	dach_süd
installierte Leistung	Dach (Ost/West Ausrichtung)	1206	kWp	dach_ostwest
installierte Leistung	Fassade Süd	299	kWp	fassade_süd
installierte Leistung	Fassade West	213	kWp	fassade_west
installierte Leistung	Fassade Nord	299	kWp	fassade_nord
installierte Leistung	Fassade Ost	231	kWp	fassade_ost
installierte Leistung	Dach "Carport" (Ost/West Ausrichtung)	300	kWp	carport
Capex Funktion	Capex PV berechnet aus der Funktion (Marktbeobachtungsstudie 2020). Eingabe "True" oder "False". Für die Funktion True eingeben. Für eigenen Capex False eingeben.	True	-	capex_pv_fnct
Capex	Eigene Eingabe für den Capex der PV-Anlage, wenn Capex Funktion False.	0	CHF	Capex_PV
Betriebskosten	Eingabe der Betriebskosten als Anteil vom Capex	1.0%	-	BK_PV
Einmalvergütung Funktion	EIV berechnet aus der Funktion nach Pronovo AG (Stand 2023). Eingabe "True" oder "False".	True	-	EIV_pv_fnct
Einmalvergütung	Eingabe einer individuellen Einmalvergütung für die gesamte PV-Anlage, wenn Einmalvergütung Funktion False.	0	CHF	EIV
Flächenbedarf Fassade	Aus dem PV-Input Excel-File übernommen	4.64	m ² /kWp	A_Bedarf_Fassade
Vergleichskosten Fassade	Vergleichskosten für eine alternative Fassade	70	CHF/m ²	Vergleich_Fassade

Tabelle 6: Eingabe PV-Anlage

Nachfolgend sind die nicht selbsterklärenden **Parameter** beschrieben:

Capex Funktion: Durch diese Einstellung wird die Funktion aus der hinterlegten Marktbeobachtungsstudie verwendet. Diese sollte regelmässig angepasst werden.

Einmalvergütung Funktion: Durch diese Einstellung wird die Funktion aus den Daten zur Berechnung der Einmalvergütung von Pronovo AG verwendet. Die Funktion sollte jährlich angepasst werden.

Flächenbedarf Fassade: Dies wird zur Berechnung der Vergleichskosten Fassade verwendet. Die Angabe in m²/kWp ist aus dem ersten Blatt des Excel Files «PV_Input_aus_Polysun» zu entnehmen.

3.5 Batteriespeicher Eingabe

Dies ist das sechste Blatt mit Bezeichnung «Speicher» im Excel File «input_parameter.xlsx».

Typ	Beschreibung	Wert	Einheit	Variabel
Simulation von Speicher	Von Inputblatt vorgegeben, muss "True" sein für Simulation	True	-	-
Maximale Anzahl Speicherpakete	Es werden Speicher iterativ untersucht bis zu einer maximalen Anzahl Speicherpakete. (Bei einer Anzahl von 4 und einer Kapazität von 136 kWh werden die Speicher mit 136, 272, 408 und 544 kWh untersucht.)	3	-	SP_N
Speicherkapazität	Kapazität eines Speicherpakets	136	kWh	SP_Kap
Modus für den Speicher	Eingabe: 0, 1, 2, oder 3. Beschreibung: 0: nur Peak-Shaving und keine EV-Erhöhung (immer Netzladen) 1: nur Wochenende EV-Erhöhung + Netzladen nur in der Nacht 2: auch bei tiefen Lasten EV-Erhöhung (Eigenverbrauchsgrenze) z.B. vor und nach Rückspeisung 3: Fokus EV-Erhöhung, bedeutet kein Netzladen	1	-	Eigenverbrauch
Sicherheitsfaktor	Für die Peak-Shaving Analyse wird ein Anteil der gesamten Speicherkapazität reserviert als Sicherheitsmarge	10%	-	Faktor_Grenze
Grenze für Netzladen	Grenze für das Aufladen durch das Netz als Anteil der gesamten Speicherkapazität. (Unterstützt EV-Erhöhung)	100%	-	Faktor_Laden
Ladeverlust	Verlust durch Lade- und Entladevorgang	5%	-	Ladeverlust
Eigenverbrauchsgrenze	Grenze für Modus 2, wenn der Lastgang unter diesem Wert in kW wird der Speicher entladen. (Sollte so gewählt werden, dass nur vor und nach Rückspeisung entladen wird, das heisst tiefer als Grundlast)	50	kW	Eigenverbrauch_grenze
Capex Funktion	Capex Speicher berechnet aus der Funktion (Quelle Intillion 2021) für die Funktion "True" eingeben, wenn eigene Investitionskosten verwendet werden "False" eingeben	True	-	capex_sp_fct
Capex	Eigene Eingabe für den Capex des Speicher pro kWh, Wenn Capex Funktion False.	0	CHF/kWh	Capex_SP
Betriebskosten	Eingabe der Betriebskosten als Anteil des Capex	1.0%	-	BK_SP
Faktor Vergünstigung Capex	Um diesen Faktor wird die Investition reduziert. Bei 50% ist der Capex halb so hoch.	0%	-	Faktor_vergünstigung

Tabelle 7: Eingabe Batteriespeicher

Nachfolgend sind die nicht selbsterklärenden **Parameter** beschrieben:

Maximale Anzahl Speicherpakete: Durch die Anzahl wird bestimmt wie viele Speichervarianten untersucht werden. Zusammen mit der Kapazität wird bestimmt, was die höchste Speicherkapazität ist.

Modus für den Speicher: Grundsätzlich gilt, je höher der Wert für den Modus, desto mehr liegt der Fokus auf Eigenverbrauch.

0: Der Speicher wird immer vom Netz geladen, damit die Lastspitzen Reduktion möglichst hoch ist.

1: Der Speicher wird nur in der Nacht vom Netz geladen. Am Wochenende wird nicht vom Netz geladen und durch Laden mit PV-Überschuss der Eigenverbrauch erhöht.

2: Durch den Parameter **Eigenverbrauchsgrenze** wird eine Last vorgegeben. In diesem Modus entlädt sich der Speicher, sobald die Last unter dieser Grenze liegt. Dies ist sinnvoll, wenn der Speicher sich entlädt, vor und nach Rückspeisung und somit den Eigenverbrauch weiter erhöhen kann.

3: Der Speicher wird nur für die Eigenverbrauchserhöhung verwendet und entlädt sich so schnell wie möglich.

Sicherheitsfaktor: Die angestrebte Lastreduktion für Peak-Shaving, welche durch die Analyse des Lastgangs bestimmt wird und abhängig von der Speichergrösse ist, wird um den Sicherheitsfaktor reduziert.

Grenze für Netzladen: Durch diese Grenze kann bestimmt werden, dass der Speicher nie vollständig durch das Netz vollgeladen wird und Kapazität für die Eigenverbrauchserhöhung reserviert ist.

Capex Funktion: Durch diese Einstellung wird die Funktion, welche in Abschnitt 6.2 beschrieben ist, verwendet. Diese sollte regelmässig angepasst werden.

Faktor Vergünstigung Capex: Durch diesen Faktor kann eine Sensitivitätsanalyse und der Einfluss des Capex auf den Business-Case abgeschätzt werden.

3.6 ELKW Eingabe

Dies ist das siebte Blatt mit Bezeichnung «ELKW» im Excel File «input_parameter.xlsx».

Typ	Beschreibung	Wert	Einheit	Variabel
Anzahl ELKW	Von Inputs vorgegeben	3	-	-
Speicherpakete	Kapazität eines Speicherpakets (Quelle BAX E-LKW 7.5t)	42	kWh	el_kw_batterie_paket
Anzahl Speicherpakete pro ELKW	Bestimmt die gesamte Kapazität eines Fahrzeugs	3	-	el_kw_S
Verbrauch pro km	Quelle BAX 7.5t ELKW	0.63	kWh/km	verbr_auch_el_kw
Ladeleistung an DC intern	Maximale Ladeleistung an den internen Ladestationen. Pro ELKW wird eine DC-Ladestation einbezogen.	90	kW	ladeliste_dc
Schnellladung an Schnelladesäule extern	Wenn der ELKW unterwegs ist und der SOC unter der grenze_soc_raststätte_laden ist.	100	kW	schnell_ladung
SOC-Reserve	Falls Reserve vorhanden sein muss und der SOC nicht tiefer sinken darf.	0%	-	el_kw_reserve_akku
SOC-Limit: Ruhezeit	Ladelimite von Netzladen ausserhalb der Betriebszeiten (Status = 0)	10%	-	el_kw_soc_limit_ruhezeit
SOC-Limit: Laden extern (Raststätte)	Unter diesem SOC wird unterwegs an einer Raststätte mit Schnellladeleistung 30 Min geladen.	5%	-	grenze_soc_raststätte_laden

Tabelle 8: Eingabe ELKW

Nachfolgend sind die nicht selbsterklärenden **Parameter** beschrieben:

SOC-Reserve: Dies definiert einen Ladestand, der nicht unterschritten werden darf. Dies überschreibt das SOC-Limit: Laden an Raststätte falls höher.

SOC-Limit: Ruhezeit: Ausserhalb der Betriebszeiten der Fahrzeuge wird der Ladestand nicht höher vom Netz geladen. Dies begünstigt die Eigenverbrauchserhöhung.

SOC-Limit: Laden extern (Raststätte): Bei diesem Ladestand wird extern, wenn das Fahrzeug unterwegs ist, an einer Schnellladestation zum Beispiel an einer Raststätte 30 Minuten geladen.

3.7 WELKW Eingabe

Dies ist das achte Blatt mit Bezeichnung «WELKW» im Excel File «input_parameter.xlsx».

Typ	Beschreibung	Wert	Einheit	Variabel
Anzahl ELKW	Von Inputs vorgegeben	3	-	-
Speicherpakete	Kapazität eines Speicherpakets (Quelle BAX E-LKW 7.5t)	42	kWh	kapazi_t_ät_wechsel_battterie
Anzahl Speicherpakete pro WELK	Bestimmt die gesamte Kapazität eines Fahrzeugs	3	-	wel_kw_S
Verbrauch pro km	Quelle BAX 7.5t ELKW	0.63	kWh/km	verbr_auch_wel_kw
Ladeleistung an DC	Maximale Ladeleistung an den internen Ladestationen, pro WELKW wird eine DC-Ladestation einbezogen	90	kW	ladel_ei_stungDC
SOC-Reserve	Falls Reserve vorhanden sein muss und der SOC nicht tiefer sinken darf	0%	-	wel_kw_reserve_akku
SOC-Limit: Ruhezeit	Ladelimite von Netzladen ausserhalb der Betriebszeiten (Status = 0)	10%	-	wel_kw_soc_limi_t_ruhezeit
SOC-Limit: Wechsel extern (Wechselstation)	Unter diesem SOC wird unterwegs an einer Raststätte ein Speicherpaket gewechselt (Dauer 5min)	10%	-	soc_fuer_wechsel

Tabelle 9: WELKW Eingabe

Nachfolgend sind die nicht selbsterklärenden **Parameter** beschrieben:

SOC-Reserve: Dies definiert einen Ladestand, der nicht unterschritten werden darf. Dies überschreibt das SOC-Limit: Laden an Raststätte falls höher.

SOC-Limit: Ruhezeit: Ausserhalb der Betriebszeiten der Fahrzeuge wird der Ladestand nicht höher vom Netz geladen. Dies begünstigt die Eigenverbrauchserhöhung.

SOC-Limit: Wechsel extern (Wechselstation): Bei diesem Ladestand wird extern, wenn das Fahrzeug unterwegs ist, an einer Wechselstation ein Speicherpaket während 5 Minuten gewechselt.

3.8 EPKW Eingabe

Dies ist das neunte Blatt mit Bezeichnung «EPKW» im Excel File «input_parameter.xlsx».

Typ	Beschreibung	Wert	Einheit	Variabel
Simulation von EPKWs	Von Inputs vorgegeben	False	-	-
Anzahl der Ladestationen	Pro Ladestation ladet ein EPKW pro Tag	10	-	N_Ladestat_ionen
Mittlere Kapazität der EPKW	-	68	kWh	durchsch_kapazi_t_ät
Ladung pro Tag	In diesem Fall abgeschätzt durch einen durchschnittlichen Arbeitsweg von 50km (Hin- und Rückweg) bei einem Verbrauch von 0.2 kWh/km	10	kWh	epkw_ladekapazi_t_aet
Ladeleistung Station AC	Maximale Ladeleistung an den eigenen AC-Ladesäulen	22	kW	ladel_ei_stung_stati_onen
Anpassung der Ladeleistung	Vermeidung von Peaks-Verteilung über 2h (Laden mit 5.5kW)	25%	-	redukti_on_ladel_ei_stung
Wochenstart SOC	Annahme das Montags der mittlere SOC bei 50% liegt	50%	-	epkw_wochenstart_kWh

Tabelle 10: EPKW Eingabe

Anpassung der Ladeleistung: Die Ladeleistung wird auf diesen Faktor reduziert, um die Last der Ladestationen zu reduzieren.

4 Komponenten im Simulationsprogramm

In diesem Abschnitt werden die einzelnen Komponenten für das optimierte Gesamtkonzept Strom aufgezeigt.

4.1 Lastganganalyse

Der Lastgang ist wie ein Fussabdruck einzigartig und eine Charakteristik des zu untersuchenden Unternehmens. Dabei ist in vielen Fällen der Lastgang nicht beeinflussbar in der Optimierung. Dies würde bedeuten, dass die Prozesse des Unternehmens verändert und angepasst werden. In dieser Untersuchung wird der Lastgang als gegeben angenommen.

Der Lastgang über ein gesamtes Jahr ist die Grundlage für die Simulation. Dabei können für die Varianten Bildung unterschiedliche Lastgänge eingelesen werden. Im aktuellen Programm können zwei unterschiedliche Lastgänge eingelesen werden. Dabei dient ein Lastgang als «Erfahrungswerte» um die Grenzen für Peak-Shaving zu bestimmen. Dadurch wird berücksichtigt, dass beim Peak-Shaving in vielen Fällen der zukünftige Verbrauch nicht klar ist und somit eine Prognose für die zu erreichende Grenze erstellt werden. Dies ist im Abschnitt 4.4.1 genauer erläutert. Der andere Lastgang ist der für die Simulation und mit diesem werden die Komponenten bilanziert. Falls nur ein Lastgang eingelesen wird, werden die Peak-Shaving Grenzen mit diesem bestimmt. In diesem Fall wird das Optimum für das Peak-Shaving berechnet.

4.2 Photovoltaik Anlage

Eine PV-Anlage produziert in erster Näherung proportional zur auf die Modulebene einfallenden Globalstrahlung elektrische Energie. Betriebswirtschaftlich optimal wird die Energie direkt verbraucht, dies mit entsprechendem Einfluss auf den Residuallastverlauf. Dieser Einfluss ist in Abbildung 3 beispielhaft dargestellt.

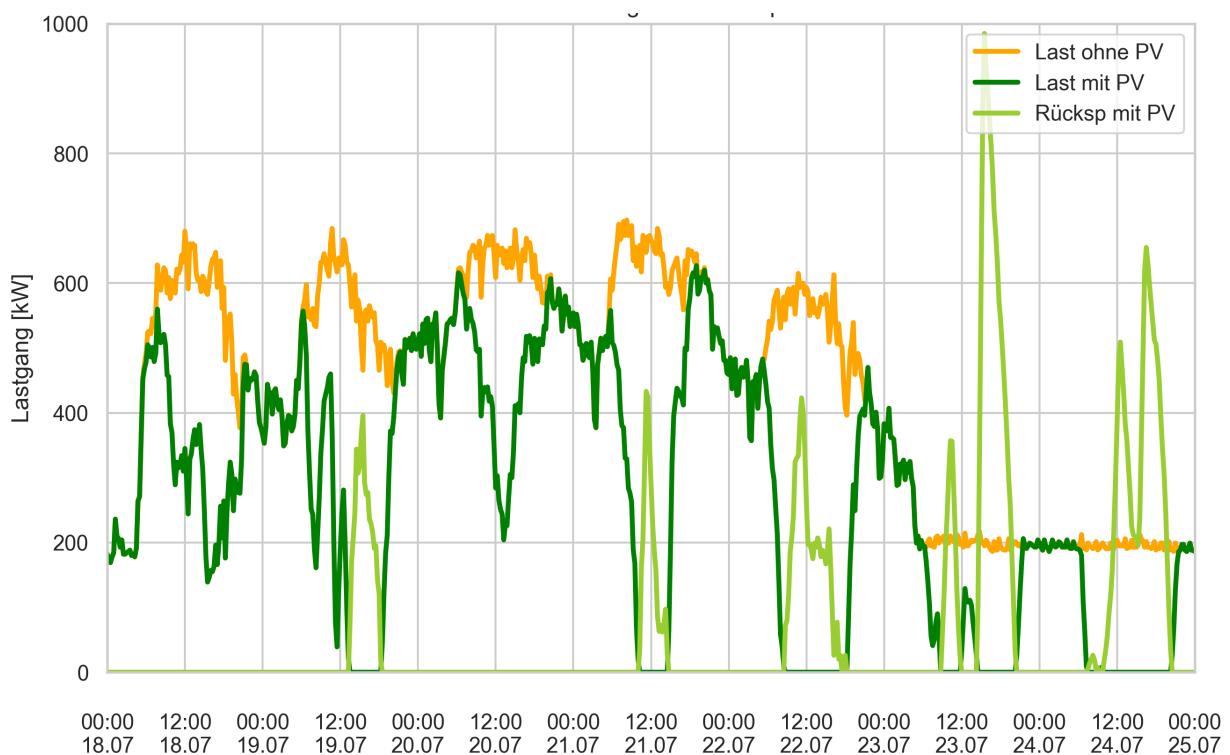


Abbildung 3: Beispielhafte Darstellung der Auswirkung einer PV-Anlage (2248 kWp) auf den Lastgang im Sommer

Der Effekt der PV-Anlage ist, dass die Last an sonnigen Tagen über die Tagesmitte reduziert wird und die Lastspitzen morgens und abends übrigbleiben. Durch einen Batteriespeicher können die Lastspitzen theoretisch weiter reduziert werden. In der Praxis besteht die Schwierigkeit, dass es pro Monat mit hoher Wahrscheinlichkeit mindestens einen stark bewölkten Tag gibt, so dass der Einfluss der PV-Anlage auf die monatlichen Leistungspreise ohne zusätzlichen Batteriespeicher gering ausfällt. In Abbildung 4 ist die Auswirkung einer gleichgrossen PV-Anlage auf den Lastgang im Winter dargestellt.

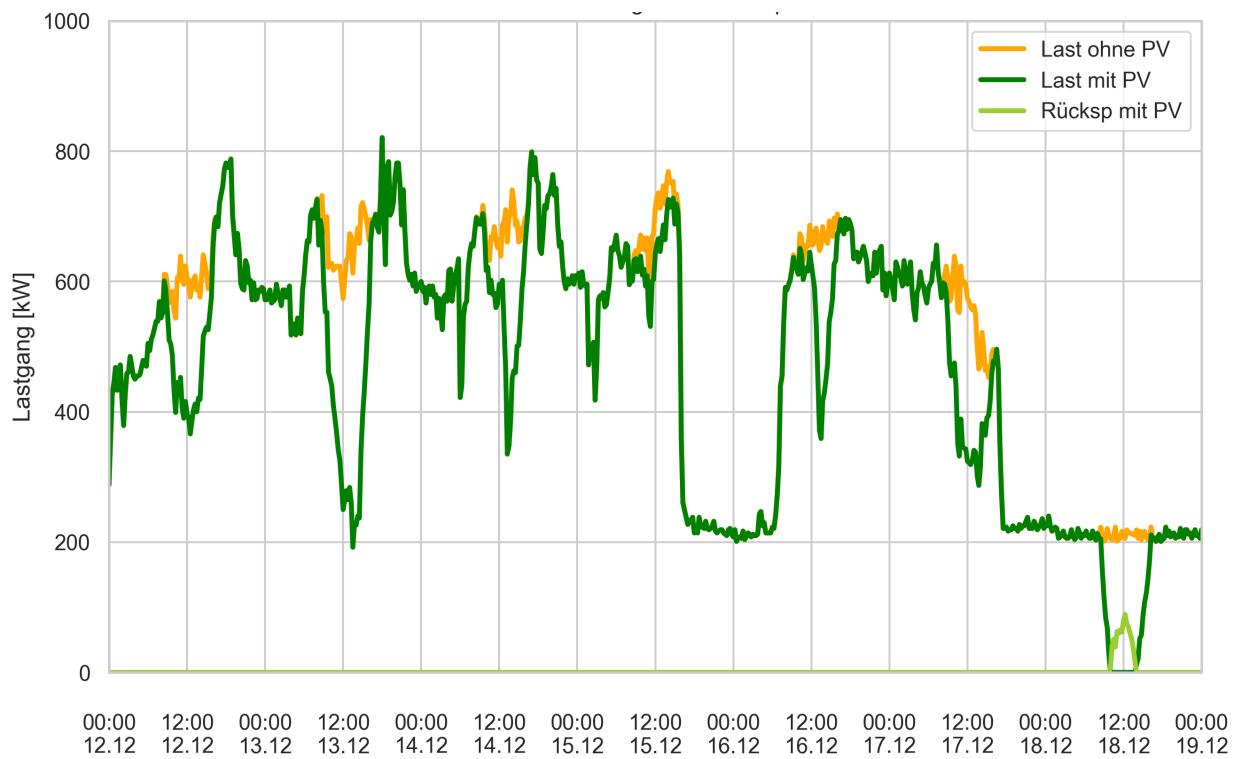


Abbildung 4: Beispielhafte Darstellung der Auswirkung einer PV-Anlage (2248 kWp) auf den Lastgang im Winter

Es ist ersichtlich, dass die höchste Lastspitze dieser Woche im Winter durch die PV-Anlage nicht reduziert werden konnte.

In Tabelle 11 sind beispielhaft PV-Anlage Flächen und die Jahresproduktion ausgewiesen.

Bezeichnung	berechnete Fläche m ²	Leistung kWp	Jahresproduktion kWh	Vollaststunden h
Dach Süd	6181	509	536'275	1054
Dach Ost/West	6181	1206	1'082'721	897
Fassade Süd	1388	299	212'183	710
Fassade West	988	213	130'007	611
Fassade Nord	1388	299	84'269	282
Fassade Ost	1075	231	80'835	350
Carport Dach Ost/West	1660	300	269'244	897

Tabelle 11: Flächen der PV-Anlage Komponenten und Jahresproduktion

Die Vollaststunden werden mit der maximalen Produktionsleistung und der Jahresproduktion berechnet. Es ist ein Kennwert für die Effizienz der Anlage. Die Dach Süd Ausrichtung weist die höchsten Vollaststunden auf. Dem gegenüber steht die Dach Ost/West Ausrichtung mit tieferen

Vollastsunden jedoch eine doppelt so hohe Jahresproduktion aufgrund einer deutlich besseren Flächenausnutzung. Ein weiterer Vorteil der Ost/West Ausrichtung ist ein flacheres Produktionsprofil, dies begünstigt den Eigenverbrauch. Bei den Fassaden gehen die Vollaststunden mit der Himmelsrichtung. Im Vergleich sind die Vollaststunden der Westfassade beinahe doppelt so hoch wie die der Ost Fassade. Dies liegt daran, dass die West Fassade um ein paar Grad nach Süden gerichtet ist und gleichzeitig die Ostfassade nach Nord gerichtet ist. Mit den Vollaststunden kann abgeschätzt werden, welche Fassade sich am meisten oder am wenigsten lohnt.

4.3 Mobilitätskonzepte

In diesem Kapitel werden die untersuchten Mobilitätskonzepte für das Gesamtkonzept Strom erläutert. Die Mobilitätskonzepte beziehen sich auf E-LKW mit fester Batterie (E-LKW), E-LKW mit Wechselsystem für die Batterie (WE-LKW) und Ladestationen für E-PKW.

4.3.1 E-LKW

Für die Simulation wurden folgende Abläufe definiert und Annahmen getroffen:

- Verbrauch von BAX übernommen: 0.6 kWh/km
- Preisstruktur übernommen von BAX 7.5t Long Range (ca. 200km) detaillierte Beschreibung in Abschnitt 6.4
- Laden intern bei Mittagspausen, beladen und Ruhezeit
- Laden auswärts über Mittag bei langen Strecken
- Schnellladung 30 Minuten extern an Raststätte, falls unterwegs und Ladestand 5%
- Pro E-LKW eine DC-Ladestation mit max. 150 kW (möglich laden von 3 Fahrzeugen mit 90kW + 60 kW + 22kW)

In Abbildung 5 ist beispielhaft eine lange Distanz mit einem E-LKW dargestellt.

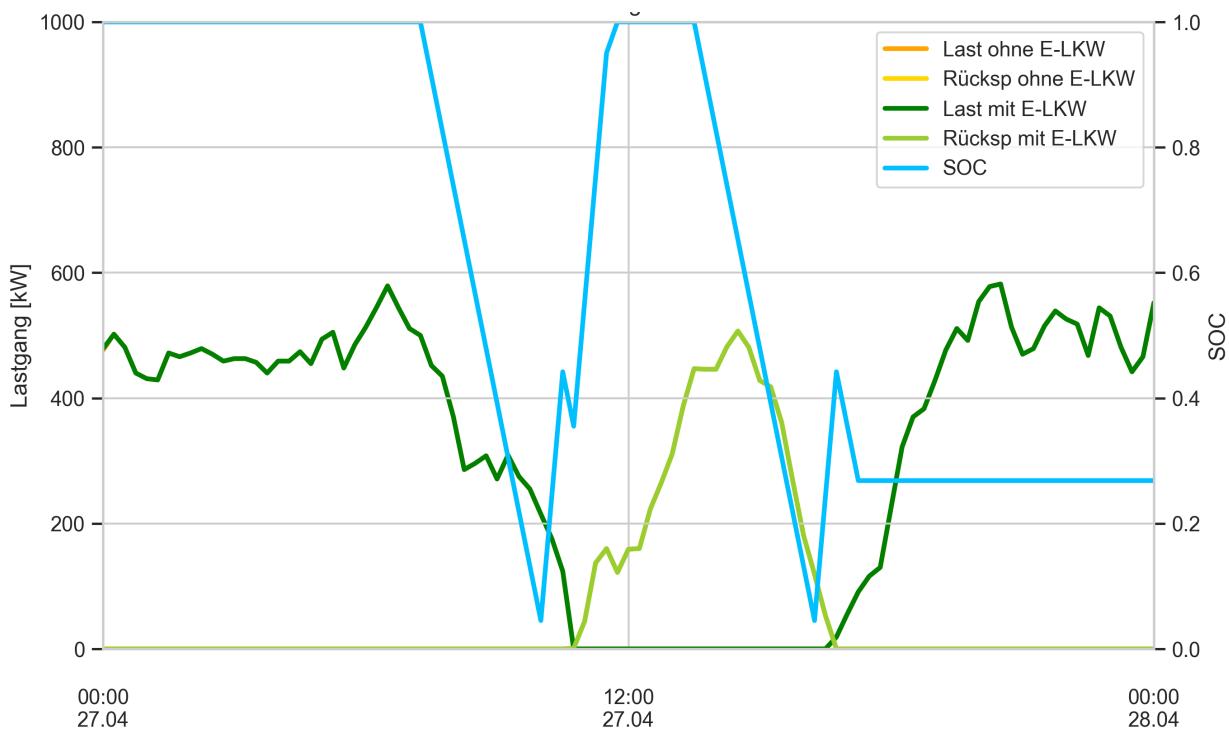


Abbildung 5: E-LKW lange Strecke

Es ist ersichtlich, dass bei 5% SOC an einer Raststätte 30 Min geladen wird, um das Ziel zu erreichen. Um ca. 11 Uhr wird das Ziel erreicht und in der Mittagspause wird der E-LKW wieder vollgeladen. Auf dem Rückweg muss wieder eine Pause von 30 Min an einer Raststätte einberechnet werden. Diese Verzögerung von insgesamt einer Stunde führt dazu, dass der E-LKW, sobald er intern angekommen ist, nicht mehr mit PV-Überschuss geladen werden kann.

In Abbildung 6 ist ein Wochenprofil eines E-LKWs dargestellt.

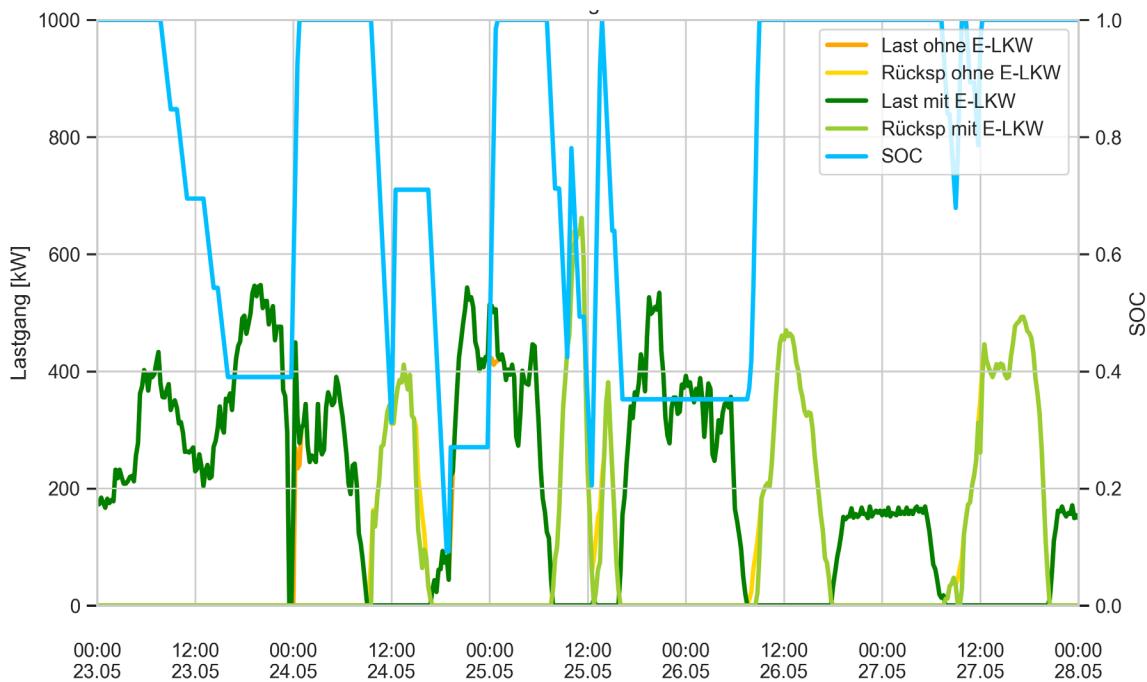


Abbildung 6: E-LKW Wochenprofil mit Eigenverbrauchserhöhung

Es ist ersichtlich, dass oft mit PV-Überschuss geladen werden kann und somit der Eigenverbrauch erhöht wird. Am 26.05 ist gut ersichtlich, wie erst geladen wird, sobald PV-Überschuss vorhanden ist, um die Batterie vollzuladen. Bei langen Strecken wird in der Nacht davor die Batterie voll geladen. Ansonsten wird in der Nacht nicht geladen, damit am nächsten Tag mit PV Überschuss geladen werden kann und somit der Eigenverbrauch erhöht wird.

4.3.2 E-LKW mit Wechselsystem (WE-LKW)

Zurzeit gibt es keinen Anbieter mit Nachweis für ein Wechselsystem im Bereich der E-LKWs. In Deutschland hat der chinesische Hersteller NIO eine Pilotanlage für Batterien Wechsel von PKWs 2022 in Betrieb genommen. Stand August 2023 sind 7 Power Swap Stations in Deutschland. Bei der Wechselstation von NIO dauert der Wechsel einer Batterie inklusive Kontrolle des Zustandes insgesamt fünf Minuten. (NIO, 2023)

Es gibt Berichte über die Entwicklung von Wechselstationen für E-LKWs in China vom Unternehmen CATL. Diese sind auf dem Stand von Pilotanlagen. (Zhang, 2023)



Abbildung 7: Vorschau Wechselsystem E-LKW von CATL (Zhang, 2023)

Es liessen sich keine spezifischen Informationen über den Betrieb solcher Wechselstationen finden. Dies bedeutet für die Evaluation der Technologie: Noch nicht fertig entwickelt. Es ist unklar, ob sich diese Wechselsysteme in Europa und der Schweiz etablieren können. Der Vorstoss von NIO in Deutschland ist ein wichtiger Schritt in den Ausbau eines Netzwerkes in Europa von Wechselstationen. Für den Vergleich mit marktfähigen Technologien wie die der konventionellen E-LKWs wird der Indikator TRL (Technology Readiness Level) miteinbezogen. Durch die Recherche wird der TRL für E-LKWs mit Wechselbatterien und Wechselstationen auf 6 eingeschätzt. Das heisst, es gibt Prototypen in Einsatzumgebung. (NASA)

Für die Simulation wurden folgende Abläufe definiert und Annahmen getroffen:

- Fahrzeugkosten wie von BAX E-LKW ohne Batteriespeicher
- Gleicher Verbrauch wie E-LKW mit 0.6 kWh/km aufgrund gleicher Grösse
- Wechselbatterien mit Kapazität von 42 kWh (Referenz BAX)
- Pro Fahrzeug 3 Wechselbatterien = 126 kWh Kapazität -> ca. 200 km Reichweite
- Dauer eines Batteriewechsels für ein Batteriepaket mit 42 kWh Kapazität: 5min
- Batteriepakete werden gemietet. Die Kosten wurden dabei von NIO bezogen, die 100 kWh Batteriepakete für 289 € pro Monat vermieten.
- Keine eigene Wechselstation für Taracell – aufwändig und hohe Kosten
- Batteriewechsel nur bei Auswärtsladen z.B. Raststätten
- W-ELKW werden wie E-LKW in Lupfig mit einer DC-Ladestation geladen
- Pro WE-LKW eine DC-Ladestation mit max. 150 kW (bietet auch Möglichkeit laden von 3 Fahrzeugen mit 90kW + 60 kW + 22kW)
- technologischer Reifegrad 6 für E-LKWs mit Batteriewehselsystem

In Abbildung 8 ist beispielhaft eine lange Distanz mit einem E-LKW mit Wechselsystem dargestellt.

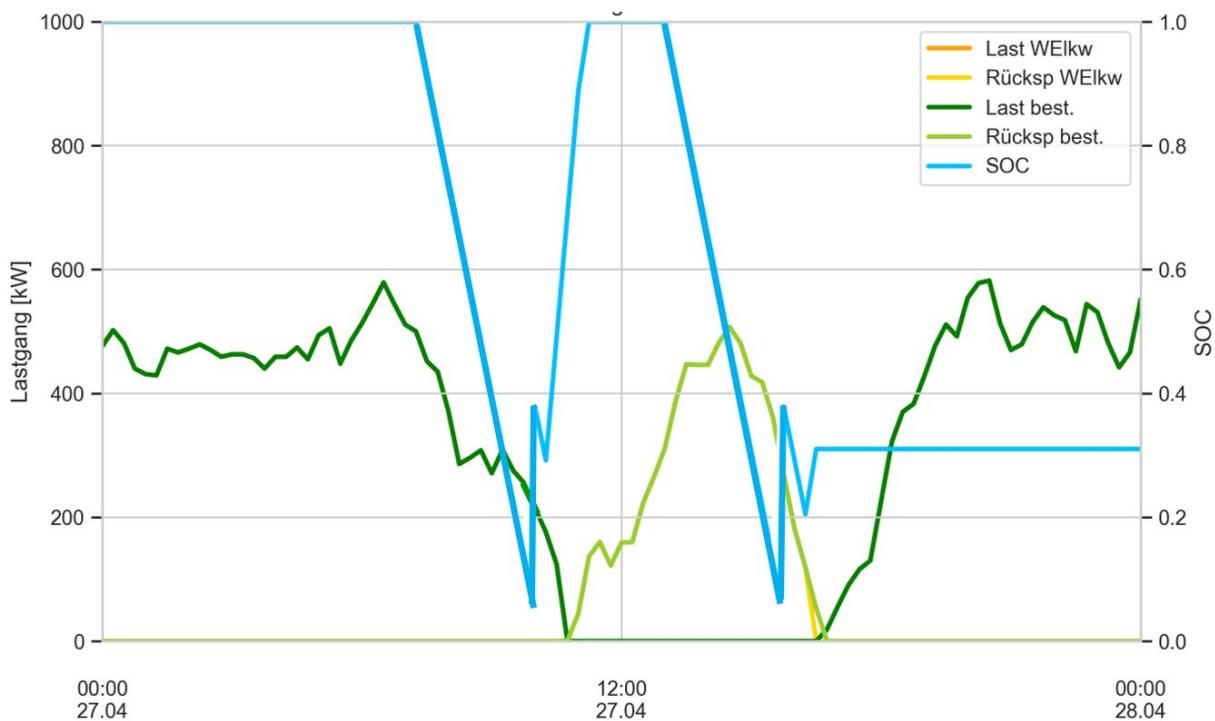


Abbildung 8: E-LKW mit Wechselsystem Strecke Ecublens (434 km)

Im Vergleich zu der langen Strecke mit einem E-LKW mit fest installierter Batterie, kann durch das Wechselsystem an einer Wechselstation in 5min anstatt 30 min geladen werden. (NIO, 2023) Dies führt dazu, dass am Abend noch mit PV-Überschuss geladen werden kann.

4.3.3 E-PKW Ladestationen

Annahmen:

- 10 Ladestationen
- Strecke ein Arbeitsweg ca. 30 km pro Tag
- Täglicher Verbrauch aufgerundet = $50\text{km} * 0.2 \text{kWh/km} = 10\text{kWh}$ pro Fahrzeug und Tag
- Erhöhter Bedarf nach dem Wochenende 34 kWh (Hälften einer durchschnittlichen Akkukapazität 68kWh)
- Hohe Priorität mit PV-Überschuss laden
- Fahrzeuge müssen bis spätestens 16:00 vollgeladen sein

In Abbildung 9 ist ein Wochenprofil der 10 Ladestationen dargestellt.

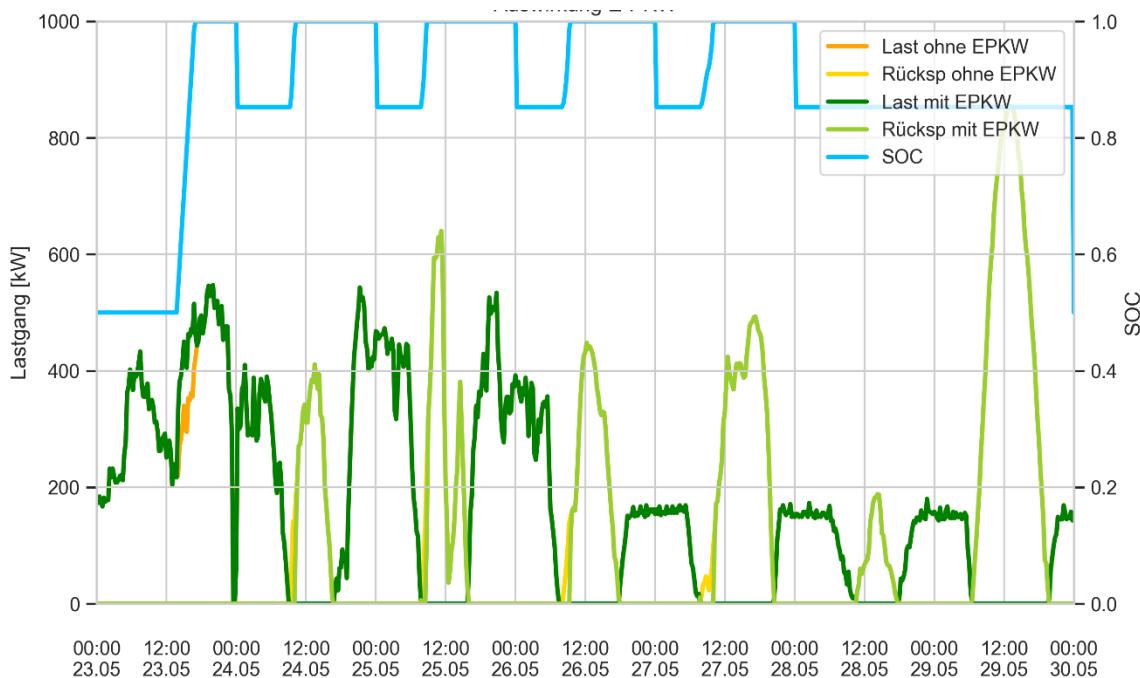


Abbildung 9: Wochenprofil E-PKW mit Eigenverbrauchserhöhung

Die Fläche zwischen der gelben und hell-grünen Kurve ist entspricht der Photovoltaik-Eigenverbrauchserhöhung.

4.4 Peak-Shaving mit Batteriespeicher

Peak-Shaving ist für Unternehmen mit einem Leistungstarif eine effektive Möglichkeit, Kosten zu sparen. Dies geschieht prioritätär mittels eines Managements der flexiblen Lasten. Sind diese Möglichkeiten ausgeschöpft, kann ein Batteriespeicher weitere Spitzen abfangen und somit den Lastgang glätten. Dies reduziert die maximal bezogene Leistung pro Monat und somit die Belastung für das Stromnetz. Typischerweise wird mit einem Tagesspeicher gearbeitet. Der Speicher wird über Nacht geladen und steht am Morgen für die Lastspitzenreduktion bereit. Eine PV-Anlage hilft nur in sehr geringem Umfang, die Lastspitzen zu reduzieren, ihr Beitrag ist primär die durch Eigenverbrauch reduzierte Energiebeschaffung aus dem Stromnetz.

Das Ziel ist, eine möglichst hohe Lastspitzenreduktion zu erzielen. Auf den ersten Blick würde der Speicher optimalerweise jeden Tag ganz entladen werden. Dies ist im Peak-Shaving-Betrieb nicht möglich, da sichergestellt werden muss, dass auch am Abend noch Spitzen geglättet werden können. Das Bereithalten dieser Kapazität hat Priorität. Ansonsten hat das Peak-Shaving keine Wirkung, da jeden Monat die höchste Lastspitze abgerechnet wird.

Die Priorität des Speichereinsatzes liegt beim Peak-Shaving. Daneben wird er zur Erhöhung des Eigenverbrauchs eingesetzt, wenn Lastspitzen ausgeschlossen werden können. Dies ist in der Regel an Wochenenden und Feiertagen der Fall.

Um die höchste Lastspitze monatlich effektiv mit einem Speicher zu reduzieren, muss zu Beginn des Monats eine Lastgrenze (Peak-Shaving-Grenze) definiert werden. Diese Grenze orientiert sich an Erfahrungswerten des Lastverlaufs und an der Speicherkapazität. Mit der Batterie muss für jeden Tag genügend Energie und Leistung bereitgestellt werden, um alle Lastspitzen eines Tages auf diese Grenze zu reduzieren. Falls der Speicher nicht mit PV-Überschuss geladen wurde, wird er in der Nacht aus dem Netz geladen, damit er bereits am Morgen bereit ist, hohe Lastspitzen abzufangen. In Abbildung 10 ist beispielhaft ein Wochenverlauf dargestellt.

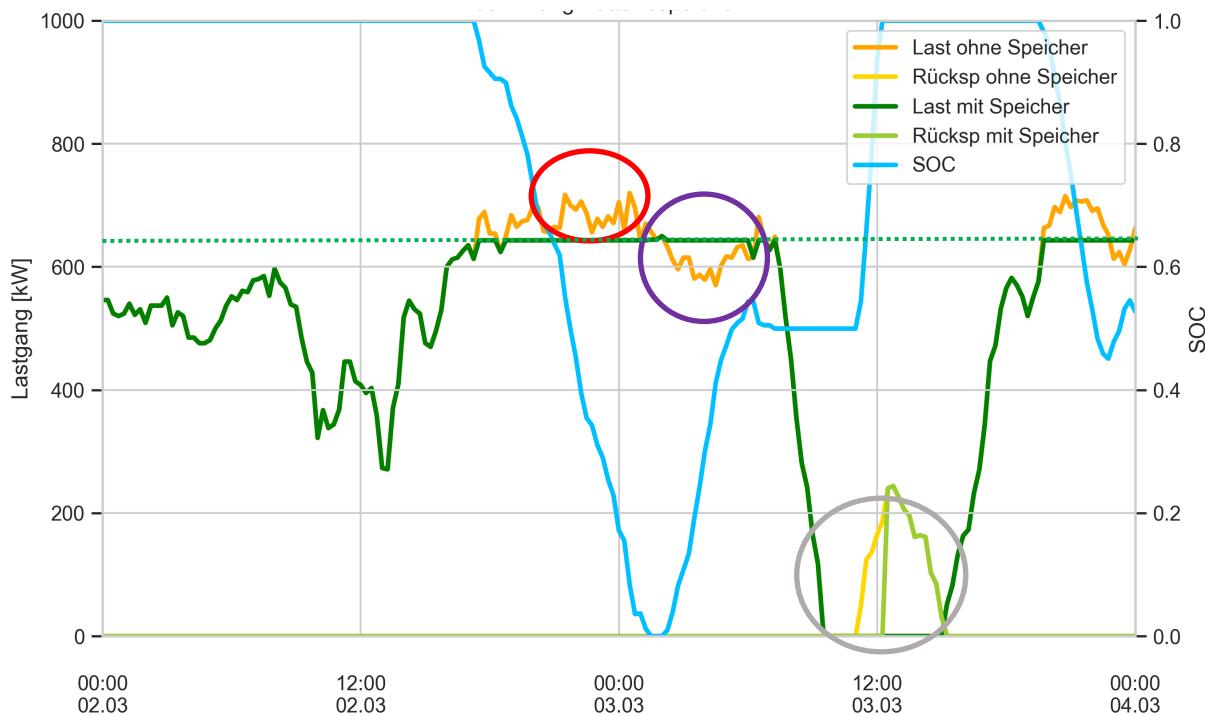


Abbildung 10: Beispielhafte Darstellung der Funktionsweise von Peak-Shaving mit einem Batteriespeicher
 (Kreis rot: Lastspitzenreduktion, violett: Speicher laden, grau: Eigenverbrauchserhöhung)

Die Last ist am Tag tiefer als in der Nacht, dies liegt an der Produktion der PV-Anlage. Somit wurden die Lastspitzen in die Nacht verschoben. In rot ist die Lastspitzenreduktion markiert. Sobald der Speicher Ladestand (SOC) unter 100% liegt, wird geladen, sobald die Last unter der definierten Lastgrenze ist. Dies ist eine Lasterhöhung und hier violett markiert. Am Wochenende wird der Eigenverbrauch der PV-Anlage erhöht.

Die Schwierigkeit beim Peak-Shaving ist, die definierte Grenze über den ganzen Monat nicht zu überschreiten. Falls die grossen Verbraucher keine zeitliche Flexibilität im Einsatz aufweisen, keine umfassende Überwachung vorhanden ist oder keine Prozessoptimierung durchgeführt wurde, können unvorhersehbare Lastspitzen auftreten. Um die Wahrscheinlichkeit für die Einhaltung der Grenze zu erhöhen, kann die angestrebte Lastreduktion verkleinert werden, damit für unvorhersehbare Ereignisse eine Reserve im Speicher vorhanden ist.

4.4.1 Risiko Peak-Shaving

Im Betrieb ist es schwierig, eine Prognose für den ganzen Monat für den Lastgang zu treffen. Das Peak-Shaving ist davon abhängig, welche Lastgrenze für den Monat festgelegt wird. Wenn die Erfahrungswerte eines Jahres für ein neues Jahr verwendet werden, sind diese Werte mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht mehr zutreffend. Wenn versucht wird, eine Peak-Shaving-Grenze einzuhalten, welche an diesem Tag nicht eingehalten werden kann, ist der Speicher leer, bevor alle Spitzen dieses Tages abgefangen wurden. So hat das Einhalten der Grenze auf den Rest des Monats keinen Einfluss – es zählt in der Abrechnung nur die höchste Leistung des Monats.

In Abbildung 11 ist ein Fall violett dargestellt, bei welchem der Speicher zu früh leer ist, weil die Peak-Shaving Grenze zu tief gewählt wurde. Die Lastspitzenreduktion ist somit für diesen Monat viel geringer als geplant.

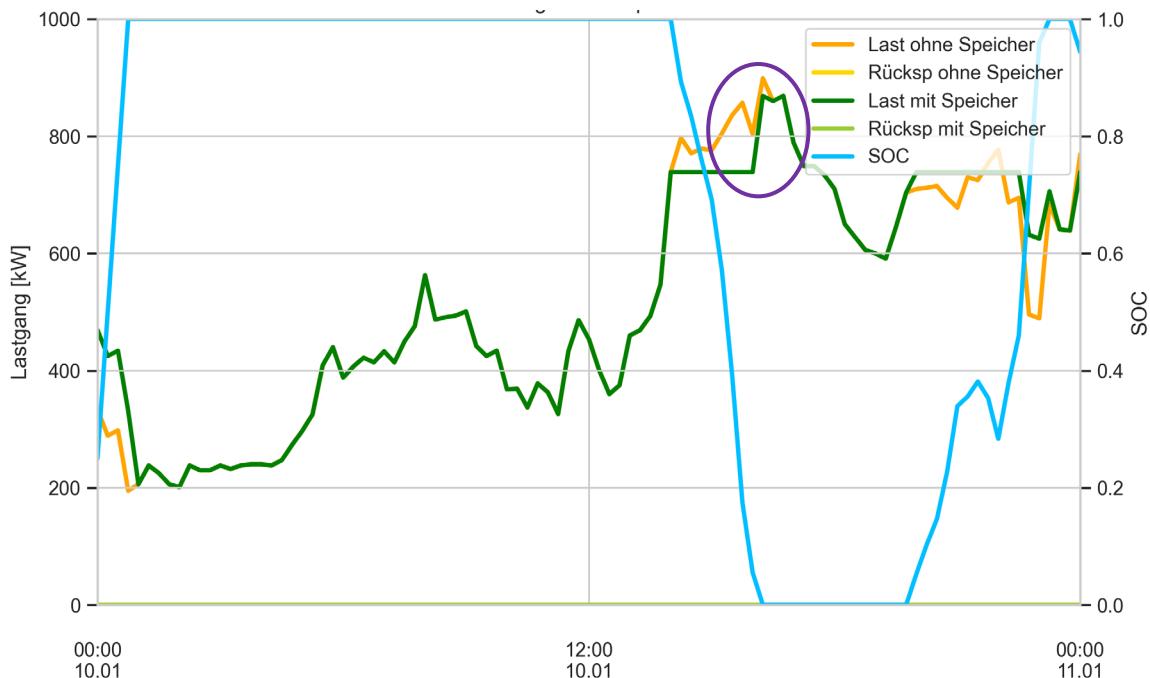


Abbildung 11: Beispielhaftes Risiko Peak-Shaving, ohne Marge

Dies ist ein Risiko beim Peak-Shaving. Aus diesem Grund wurde eine Marge definiert, mit dieser das Risiko vermindert wird und die Peak-Shaving-Grenze mit höherer Wahrscheinlichkeit eingehalten wird. Die Marge reduziert die maximal mögliche Lastspitzenreduktion der entsprechenden Speicherkapazität um einen prozentualen Anteil. In Abbildung 12 ist die jährliche Lastspitzenreduktion mit unterschiedlichen Margen dargestellt.

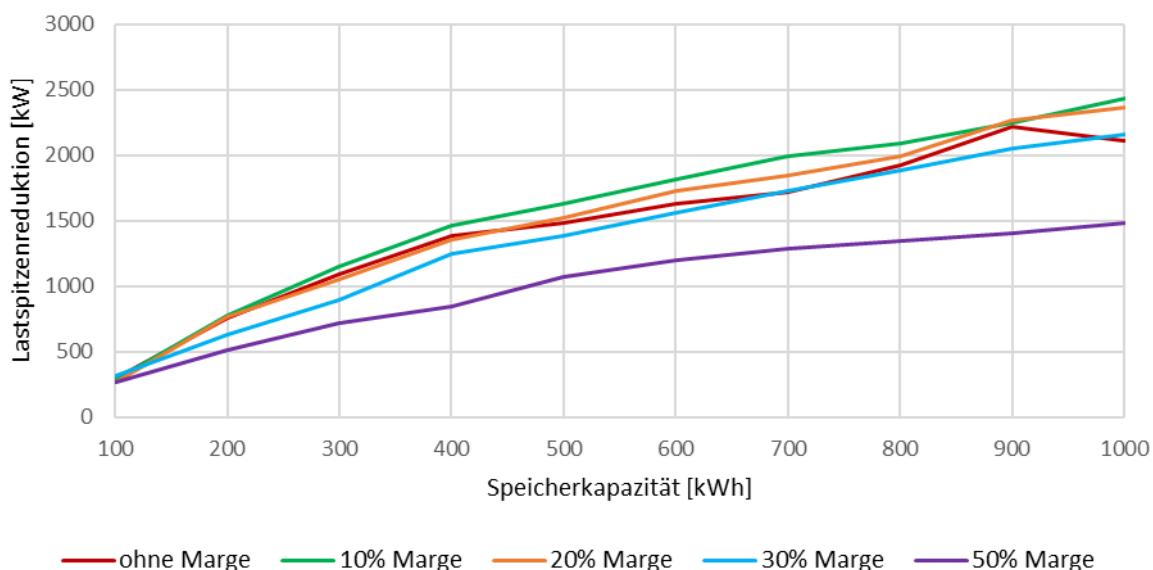


Abbildung 12: Beispielhafte jährliche Lastspitzenreduktion, Einfluss der Marge

Es gibt offensichtlich einen Trade-off zwischen Kapazitätsreserve und Überschreitung der vorgegebenen Leistungsbegrenzung. Eine 10 %-Marge gegenüber der theoretisch möglichen Leistungsreduktion aus Vergangenheitsdaten erzielt in diesem Fall die höchste Lastspitzenreduktion

für die meisten Batteriegrößen. Aus diesem Grund wird für die Resultate aus der Simulation mit einer Marge von 10 % gerechnet.

5 Aufbau des Programms

In diesem Kapitel wird der Aufbau des Simulationsprogramms erläutert.

5.1 Beschreibung

Das Simulationsprogramm wurde in Python geschrieben. In einem Hauptskript werden die Parameter und einzulesenden Dateien definiert. Durch Ausführen dieses Hauptskripts startet das ganze Programm und durchläuft die 35'040 Zeitschritte des abgebildeten Jahres.

In Abbildung 13 ist die Gesamtstruktur des Programms dargestellt.

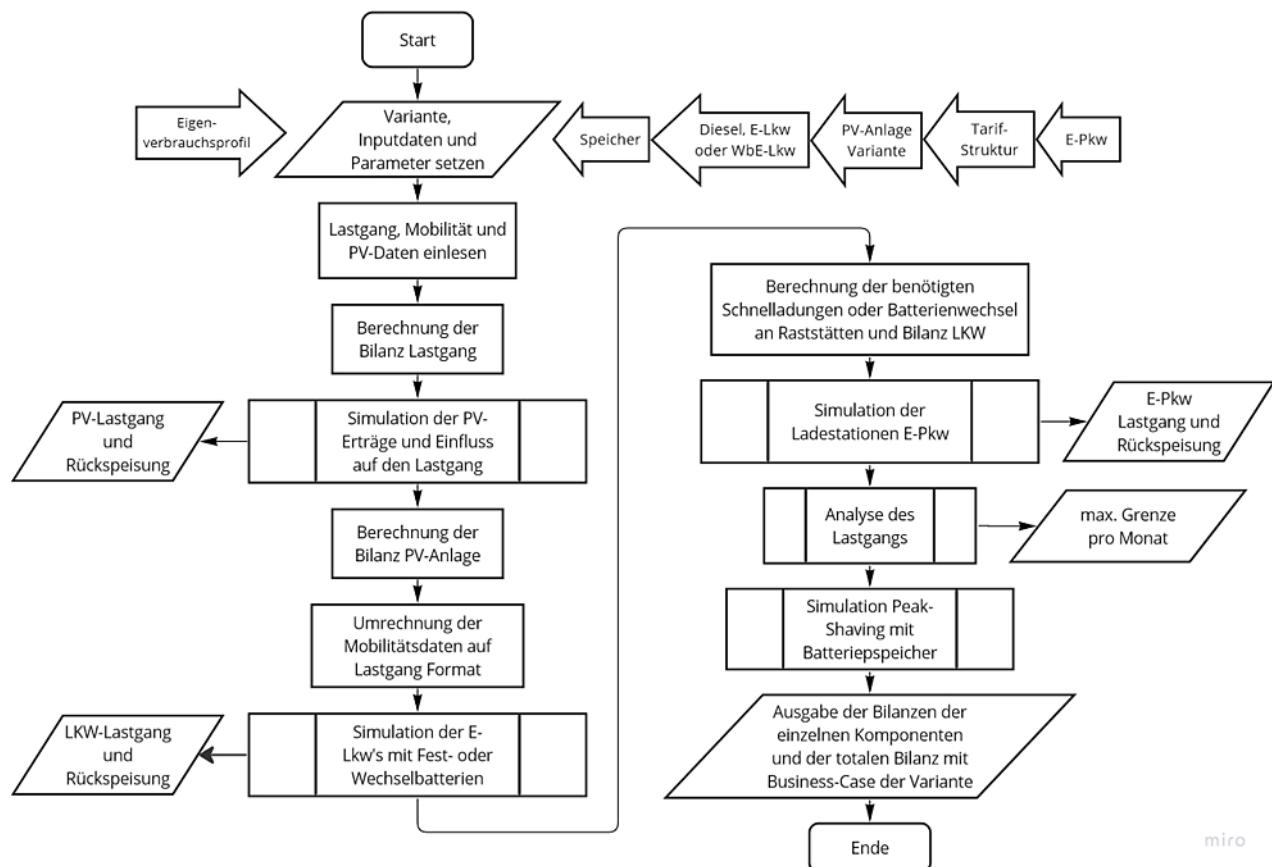


Abbildung 13: Programmstruktur Hauptskript

Das Programm ist in mehrere Module unterteilt. In Abbildung 13 sind die Module mit einem doppelten Rahmen hervorgehoben. Die Module sind im Hauptskript «Simulation_Komponenten.ipynb» enthalten. Das Hauptskript wird durch das «Main.ipynb» gestartet.

Als erstes wird der Lastgang eines Jahres des eingelesenen Standorts bilanziert, bevor die Komponenten simuliert werden.

Im nächsten Schritt wird die PV-Anlage in den Lastgang eingerechnet, abhängig von den ausgewählten Flächen. Dies produziert einen neuen Lastgang durch den Eigenverbrauch der PV-Anlage und zusätzlich einen Lastgang der Rückspeisung. Die geschieht im Skript «read_LG_PV_V1.py».

Nachfolgend werden die Mobilitätsdaten der LKWs in ein Fahrprofil im Lastgang Format umgerechnet. In dieser Form können die E-LKWs simuliert werden und die Auswirkung auf den

Lastgang, den Eigenverbrauch und die Rückspeisung bilanziert werden. Zusätzlich werden die nötigen Schnellladungen an Raststätten oder Batteriewechsel an Wechselstationen berechnet.

Im Anschluss wird die Auswirkung der 10 Ladestationen für E-PKWs auf den Lastgang, den Eigenverbrauch und die Rückspeisung berechnet und bilanziert.

Im nächsten Schritt wird der angepasste Lastgang analysiert und abhängig von der Speichergrösse berechnet, wie die Lastspitzen reduziert werden können. Danach wird für das Peak-Shaving ein Batteriespeicher simuliert und versucht, die vorab berechnete Lastspitzen Reduktion bei optimalem Lademanagement zu erreichen. Zum Schluss werden alle Jahresbilanzen und Resultate der einzelnen Komponenten berechnet in Excel geschrieben. Die Resultate umfassen die energetischen sowie finanziellen Kennzahlen der entsprechenden Variante.

5.2 Lastgang einlesen

Im Verlauf des Programms werden unterschiedliche Lastgänge berechnet. Als erstes wird der Lastgang für die Simulation eingelesen. Mit diesem Lastgang wird im Modul «read_LG_PV» der Eigenverbrauch und die Rückspeisung aus der PV-Anlage berechnet und dies ergibt somit einen neuen Lastgang mit Bezeichnung «kW_PV_S». Dieser Lastgang wird als Basis für die Simulation der weiteren Komponenten verwendet.

Falls eine Peak-Shaving Analyse mit Erfahrungswerten aus einem vorherigen Jahr durchgeführt werden sollte, muss ein zusätzlicher Lastgang eingelesen werden. Dieser Lastgang wird nur verwendet, um die maximal mögliche Lastreduktion durch Peak-Shaving zu ermitteln. In der Simulation werden diese Lastreduktionen als Richtwerte verwendet. Dadurch fällt die effektive Lastreduktion tiefer aus, als wenn für die Berechnung der maximal möglichen Lastreduktion der gleiche Lastgang wie für die Simulation verwendet wird. Dies gibt eher einen Hinweis auf das Potenzial, wenn es gut funktioniert. Mit dem Faktor für die Peak-Shaving Grenze (Faktor_Grenze) kann ein Sicherheitsfaktor implementiert werden, welcher den realen Einfluss der unvorhersehbaren Spitzen einbezieht.

Die Peak-Shaving Analyse wurde für verschiedene Lastgang Typen durchgeführt, mit dem Ergebnis, das bei einem Sicherheitsfaktor von 10% reale Einflüsse berücksichtigt werden und durch eine höhere Sicherheitsmarge die Lastreduktion wieder abnimmt.

5.3 Simulation PV-Anlage

Die Produktion der PV-Anlage wird in Polysun simuliert oder Produktionsdaten einer bestehenden PV-Anlage eingelesen, falls diese untersucht oder erweitert werden soll.

Dabei wird abhängig von Standort, Flächen und Ausrichtung die Produktion mit hinterlegten Wetterdaten gerechnet. Die Wetterdaten stammen dabei von Meteonorm 7.2. Diese Daten wurden aus Polysun exportiert und in das Simulationstool in Python eingelesen. Für die Bilanz der PV-Anlage wurde ein neuer Lastgang berechnet, indem der Eigenverbrauch abgezogen wurde. Zusätzlich wird die Lastspitzen Reduktion durch die PV-Anlage berechnet. Die überschüssige Energie wird ins Netz gespiesen.

Aus den Jahresbilanzen Ersparnis aus Eigenverbrauch, Lastspitzenreduktion und Einnahmen durch die Rückspeisung abzüglich der Betriebs- und Investitionskosten wird der Business-Case der PV-Anlage berechnet.

5.4 Analyse des Lastgangs

Die Analyse umfasst eine Abschätzung, ob der Fokus der Simulation auf Peak-Shaving oder Eigenverbrauch liegt. Zudem wird das Potenzial durch Peak-Shaving ermittelt. Dafür wird für diverse

Speichergrössen die maximal mögliche Lastreduktion pro Tag und anschliessend pro Monat bestimmt. Diese Lastreduktion ist jedoch auch abhängig von der PV-Anlagen Grösse. Um diese miteinzubeziehen, wird jeweils ein neuer Lastgang mit einer vorgegebenen PV-Anlage berechnet. Falls das Unternehmen schon eine bestehende PV-Anlage in Betrieb hat, wird zuerst der Referenz-Lastgang berechnet, indem der Eigenverbrauch der bestehenden PV-Anlage addiert wird und anschliessend mit einer neuen PV-Anlage ein neuer Eigenverbrauch bestimmt und vom Referenz-Lastgang abgezogen wird, um den PV-Lastgang zu erhalten. Der Überschuss vom Eigenverbrauch wird als Rückspeiseenergie berechnet. Die Resultate aus der Analyse sind die monatlichen Leistungs-Limiten für Peak-Shaving als Erfahrungswert in Abhängigkeit von der Speichergrösse und PV-Anlagen Grösse.

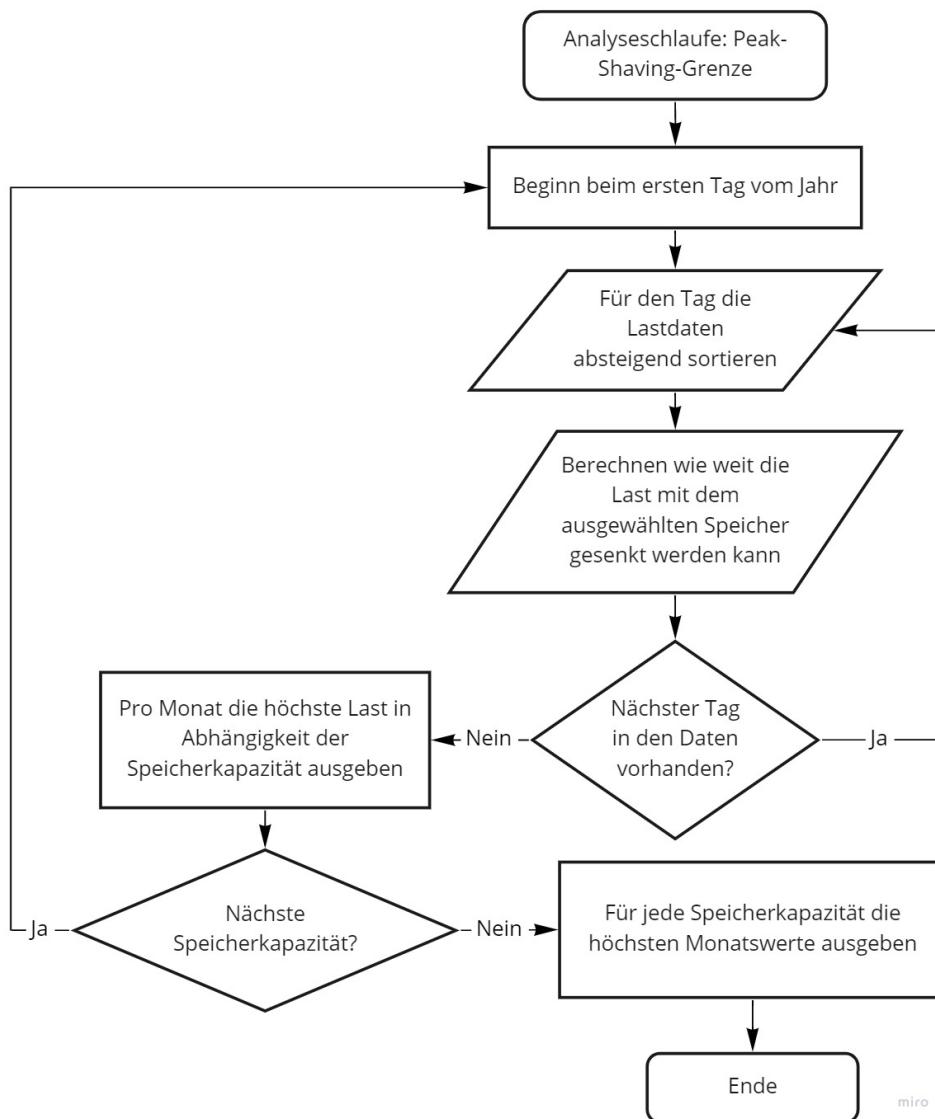


Abbildung 14: Programmstruktur Analyseskript

1. PV_Lastgang_A und Speichergrössen einlesen. Der PV_Lastgang_A wird mit der neuen PV-Anlage berechnet.
2. Leistungen nach Datum (Tage) sortieren.
3. Pro Tag die maximale Leistung (15min-Mittelwert) finden und die Differenz zur zweithöchsten Leistung des entsprechenden Tages von der Speicherkapazität als Energie (Leistungsmittelwert pro 15min/4) abziehen, anschliessend von den beiden höchsten

Leistungen die Differenz zur zweithöchsten Leistung als Energie abziehen, dieses Muster wiederholen, bis die Summe der abgezogenen Leistungen pro Tag (in Energie umgerechnet) die Speicherkapazität übersteigt.

4. Wiederholen für jeden Tag im Jahr.
5. Ausgeben (oder ausgehen von) der höchsten Leistung pro Monat, die erreicht wurde, nach Abzug der Energien.
6. Wiederholen für mehrere Speicherkapazitäten.

Maximale Lastreduktion pro Speichergröße als Resultat.

5.5 Simulation E-LKW mit festen Batterien oder Wechselsystem

Die Simulation der E-LKW mit festen Batterien und der E-LKW mit Wechselsystem (WE-LKW) ist sehr ähnlich und unterscheidet sich durch auswärts laden an Schnellladesäulen für die E-LKW oder Batterie Wechsel an einer Wechselstation für WE-LKW.

Im ersten Schritt werden die Mobilitätsdaten in ein Lastgang Format umgewandelt. Idealerweise werden für die Modellierung der LKWs reale Fahrdaten über ein Jahr verwendet. In diesem Beispiel sind die Daten von 3 LKWs durch das Excel «Beispiel_LKW_Fahrdaten.xlsx» eingelesen worden. Die wichtigen Daten umfassen:

- Zeitfenster Betrieb
- Arbeitszeit
- Lenkzeit
- Pause
- Strecke
- Zielort(e)
- Anzahl beladen in Künten

Aus diesen Daten werden die Fahrprofile erstellt und gleichzeitig der Status des Fahrzeuges festgelegt. Der Status gibt Auskunft über die Verfügbarkeit der Fahrzeuge. Im Fahrprofil wird die Strecke pro 15min berechnet. Dies entspricht der gleichen Auflösung des Lastgangs und der Abrechnung für den Strombezug. In Abbildung 15 ist ein beispielhaftes Fahrprofil eines LKW dargestellt.

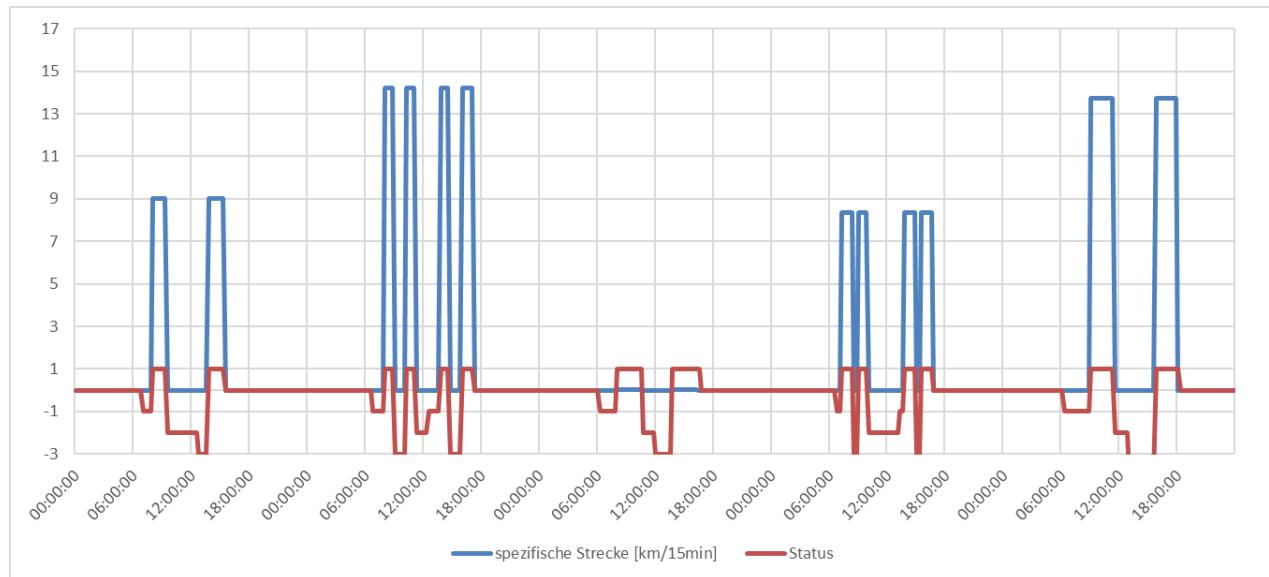


Abbildung 15: Beispielhaftes Fahrprofil eines LKW

In Tabelle 12 ist die Definition der Status aufgeführt und wie die Steuerung für das Laden der E-LKWs gehandhabt wird.

Status	Beschreibung	E-LKW	E-LKW mit Wechselsystem
1	Unterwegs extern	Schnellladung extern (Raststätte)	Batteriewechsel extern an Wechselstation
0	Keine Arbeitszeit- LKW steht intern	Ladestation (Priorität Eigenverbrauch)	Ladestation (Priorität Eigenverbrauch)
-1	Beladen intern	Ladestation (Priorität Eigenverbrauch)	Ladestation (Priorität Eigenverbrauch)
-2	Mittagspause intern	Ladestation (Priorität Eigenverbrauch)	Ladestation (Priorität Eigenverbrauch)
-3	Ausladen extern	Kein Laden möglich	Kein Laden möglich

Tabelle 12: Fahrprofil Status Definition

Dabei ist die Unterscheidung zwischen intern und extern wichtig. Bei intern steht der LKW innerhalb der Systemgrenzen und bei extern ausserhalb der Systemgrenze. Dies ist relevant für die Wahl des Tarifes bei Netzbezug und ob das Fahrzeug für die Eigenverbrauchserhöhung verfügbar ist.

Während der Simulation wird für jedes Fahrzeug individuell über ein Jahr in 15-min Schritten die Auslastung gerechnet. Dies gelingt durch folgende Schritte:

1. Bestimmung vom Status des Fahrzeugs
2. Unterwegs: Verbrauch bestimmen
3. Verfügbarkeit für Laden mit PV-Überschuss oder Netz
4. Schnellladung auswärts über Mittag bei langen Strecken
5. Bedarf an Schnellladungen unterwegs oder Batterie Wechsel an Raststätte
6. Berechnung der Verzögerung durch Pausen an Raststätten
7. Bilanzierung der Bezugstarife

Zum Schluss werden die Jahreskosten berechnet. Diese ergeben sich aus dem Netzbezug, dem Eigenverbrauch (Entschädigung der PV-Anlage), auswärts laden, den Investitions- und Unterhaltskosten für das Fahrzeug und die Ladestation. Der gesamte Ablauf der Simulation für die E-LW oder WE-LKW Fahrzeuge ist in Abbildung 16 dargestellt.

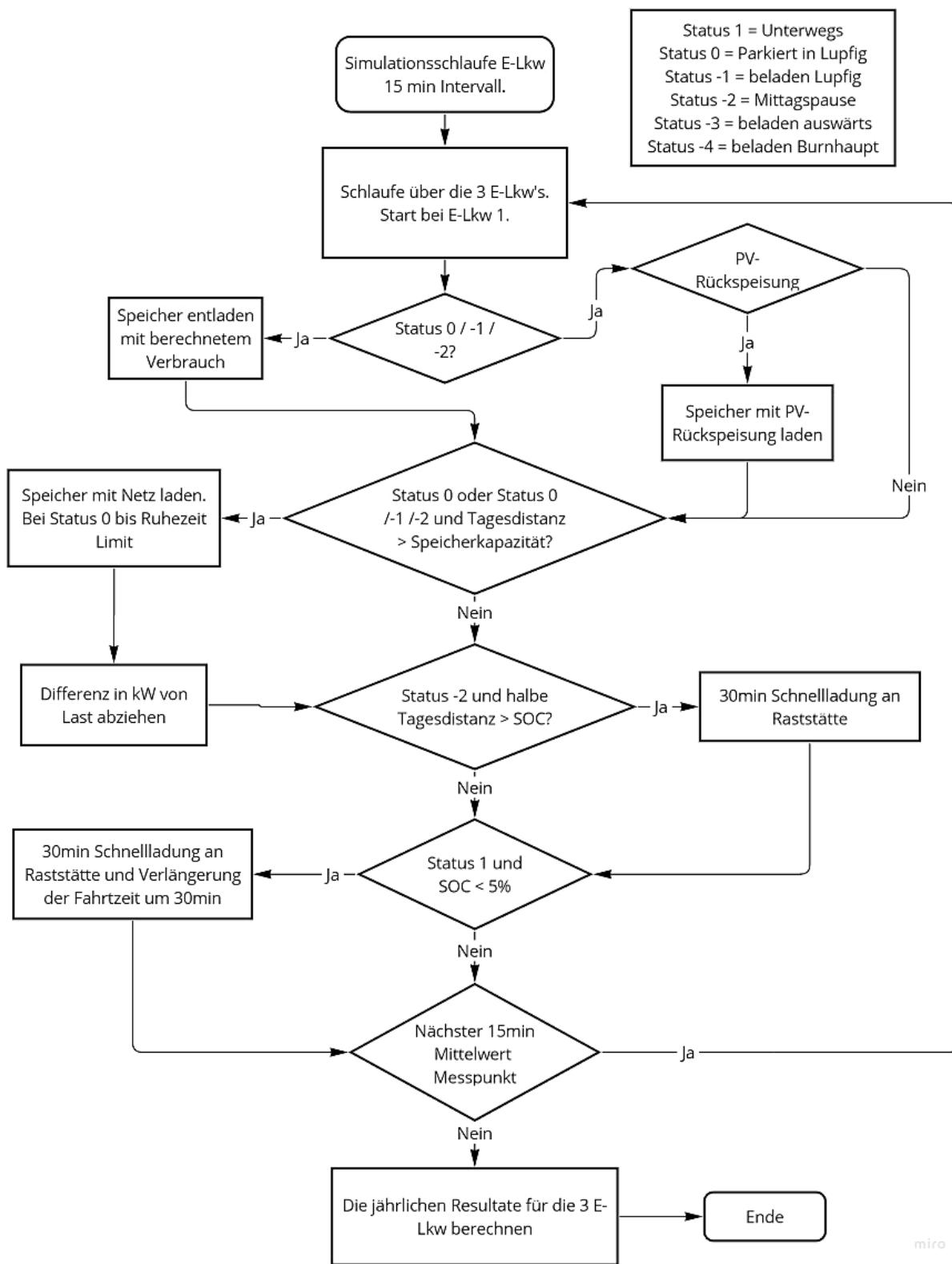


Abbildung 16: Programmstruktur: Simulation von E-LKWs

5.6 Simulation Peak-Shaving

In der Simulation Peak-Shaving werden die Daten aus der Analyse als Erfahrungswerte eingelesen. Für ein ausgewähltes Jahr wird in viertelstündlichen Schritten das Peak-Shaving und die Eigenverbrauchserhöhung berechnet. Für die PV-Anlage wird die Produktion, das Peak-Shaving, die Rückspeisung und die Eigenverbrauchserhöhung berechnet. Für den Speicher kann vorab definiert

werden, ob nur Peak-Shaving oder dazu der Eigenverbrauch aus der PV-Anlage erhöht wird. Um den Business-Case von PV und Speicher trotzdem isoliert zu berechnen, wurden Transferpreise festgelegt, diese sind in Abschnitt 3.4.2 erläutert.

Für jedes 15min-Intervall wird der Ladestand des Speichers kontrolliert und, falls dieser nicht voll ist, abgeklärt, ob er geladen werden kann. Er kann geladen werden, falls die Last tiefer als die entsprechende Peak-Shaving Grenze ist und diese Grenze mit dem Laden aus dem Netz nicht überschritten wird. Für das Laden hat Überschuss aus der PV-Anlage die höchste Priorität und es wird versucht, den Speicher nicht vorab mit Netzstrom zu füllen, bevor er mit PV-Überschuss geladen werden könnte. Aus diesem Grund wird am Wochenende möglichst nicht mit Netzstrom geladen. Falls trotzdem notwendig, wird nur in der Niedertarifzeit geladen. In der Nacht auf Montag wird sichergestellt, dass der Speicher vollgeladen wird.

Nachdem kontrolliert wurde, ob der Speicher geladen werden kann, wird für den 15 Min Intervall untersucht, ob die Last die Peak-Shaving-Grenze überschreitet oder ob der Eigenverbrauch erhöht werden kann. Falls die Peak-Shaving-Grenze überschritten ist, werden die Lastspitzen reduziert, soweit es der Ladestand des Speichers zulässt. Bei der Eigenverbraucherhöhung wird untersucht, ob der Eigenverbrauch zu Zeiten des Hoch- oder Niedertarifs stattgefunden hat.

Zum Schluss wird für jeden Monat die höchste Lastspitze ermittelt und die Lastspitzenreduktion zum Fall ohne PV und/oder ohne Speicher berechnet. Aus den Einsparungen durch die Lastspitzenreduktion und die Eigenverbrauchserhöhung wird der Business-Case berechnet. Die Eigenverbrauchserhöhung durch den Speicher wird um den bezogenen PV-Überschuss mit dem Rückspeisetarif vermindert. Somit sind die beiden Business-Cases PV-Anlage und Batteriespeicher eigenständig.

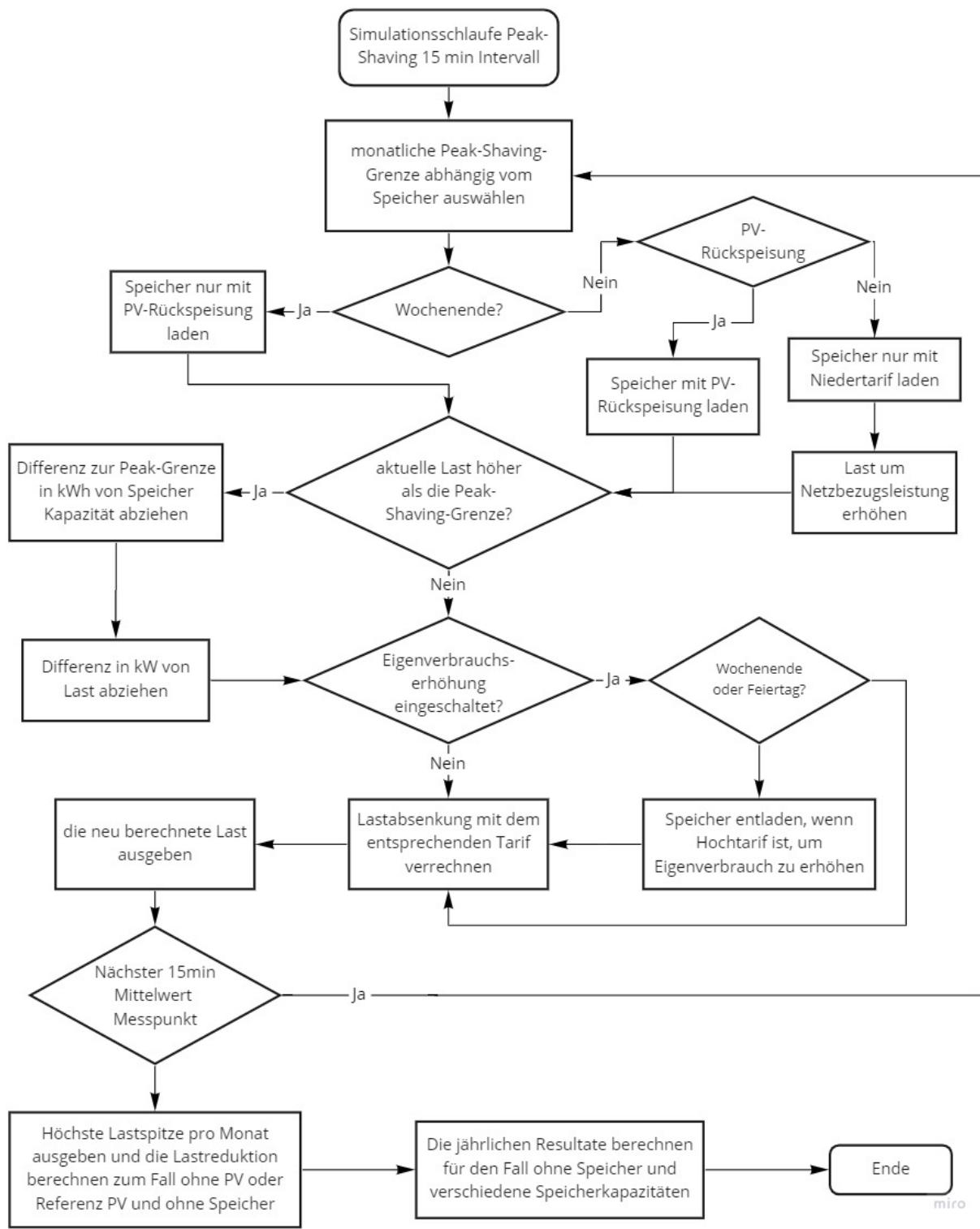


Abbildung 17: Programmstruktur Peak-Shaving mit Batteriespeicher

- Alle Input Daten einlesen. Als Lastgang kann ein unterschiedlicher als in die Analyse eingelesen werden.
- Die aus der Analyse ermittelten monatlichen Lastreduktionen durch einen Speicher werden, falls ausgewählt, mit einer Sicherheitsmarge reduziert, um bei einem unerwarteten Tagesverlauf nicht den Speicher zu entleeren, bevor die letzte Leistungsspitze kommt, welche höher als die vorgegebene Lastreduktionsgrenze ist.

3. Die Berechnungsschlaufe der Simulation berechnet für jeden 15 Minuten-Messpunkt die Reduktionsmöglichkeit für den Lastgang mit der PV-Anlage und dem Speicher und regelt den Ladezustand des Speichers. Zudem wird die Einsparung durch Peak-Shaving und Eigenverbrauch berechnet.

Laden des Speichers:

Der Speicher wird geladen, wenn zu diesem Zeitpunkt die Last unter der definierten Peak-Shaving Grenze ist und der Speicher nicht voll ist. Falls Überschussstrom aus der PV-Anlage vorhanden ist, wird mit diesem geladen. Ansonsten wird mit Netzstrom geladen. Dabei wird beachtet, dass dadurch die Peak-Shaving Grenze nicht überschritten wird. Netzstrom wird nur bei Niedertarif bezogen und über das Wochenende oder an Feiertagen wird nicht mit Netzstrom geladen, damit der Speicher frei ist für Überschussstrom aus der PV-Anlage.

Peak-Shaving:

Der Speicher wird entladen, wenn die vorgegebene Peak-Shaving-Limite für die entsprechende Speichergrösse überschritten ist, solange der Speicher nicht leer ist.

Eigenverbrauchserhöhung:

Speicher wird entladen, wenn er vom Peak-Shaving freigegeben ist. Dies ist an Wochenenden der Fall oder wenn die Last sehr tief ist aufgrund von hohem PV-Eigenverbrauch.

SOC:

Der Ladestand des Speichers wird nach den Aktionen, die Einfluss auf den Ladestand haben, berechnet.

Tarifabrechnung:

Es wird die Eigenverbrauchseinsparung durch die PV-Anlage und den Speicher mit dem zeitabhängigen Tarif abgerechnet.

Monatliche Abrechnung:

Die Lastspitzenreduktion durch die PV-Anlage und durch den Speicher wird monatlich bestimmt.

4. Jahreswerte bestimmen für PV-Anlage Speicher und kombiniertes System.
5. Ausgeben der Resultate und Abbildungen.

5.7 Logik

In diesem Abschnitt wird die der Simulation hinterlegte Logik erläutert.

5.7.1 Simulation Prioritäten

In der Simulation werden in Echtzeit für jeden Messpunkt in 15 Minuten-Schritten die Speicher- und PV-Anlagen-Bewirtschaftung berechnet. Für die Entscheidungen werden Prioritäten gesetzt. Die Prioritäten wurden nach der Auswirkung auf den Lastgang bestimmt.

1. Priorität	Eigenverbrauch durch PV-Anlage
2. Priorität	Eigenverbrauchserhöhung durch E-LKW
3. Priorität	Eigenverbrauchserhöhung durch E-PKW
4. Priorität	Peak-Shaving durch Speicher
5. Priorität	Eigenverbrauchserhöhung durch Speicher

Tabelle 13: Prioritäten der Simulation

Der Eigenverbrauch aus der PV-Anlage hat dabei höchste Priorität, passiv wird dabei, je nach PV-Produktion, Peak-Shaving durch PV betrieben.

Die zweite Priorität hat das Laden der E-LKWs mit Überschussstrom aus der PV-Anlage, der dadurch zu Eigenverbrauch wird. Anstatt im Hoch- oder Niedertarif wird der Rückspeisetarif für diesen Strom abgerechnet.

Die dritte Priorität hat das Laden der E-PKWs mit Überschussstrom aus der PV-Anlage, der dadurch zu Eigenverbrauch wird. Anstatt im Hochtarif wird der Rückspeisetarif für diesen Strom abgerechnet.

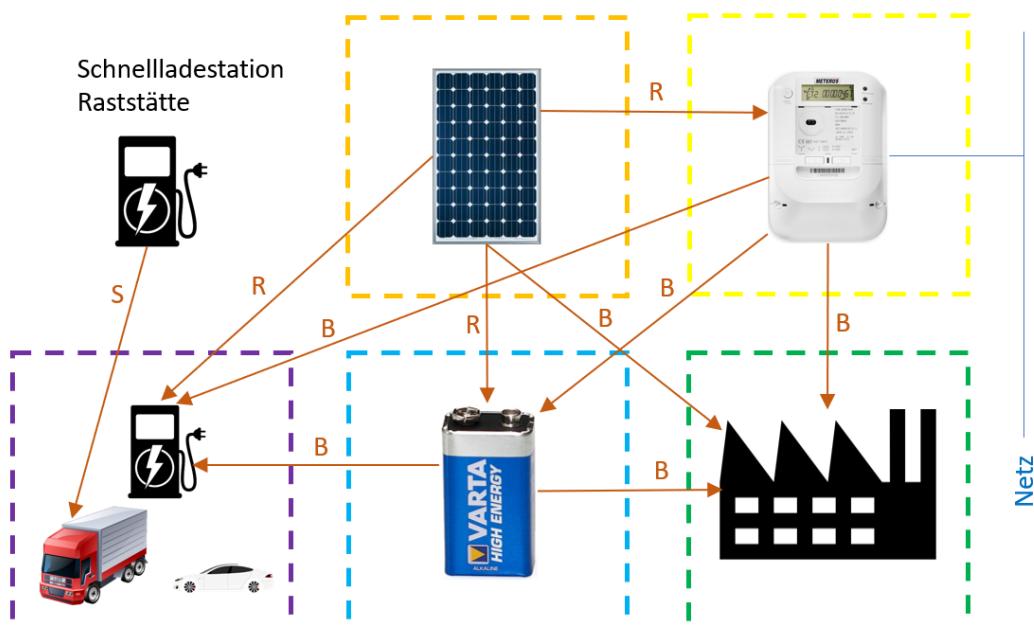
Die vierte Priorität hat das Peak-Shaving des Netzbezugs mit dem Batteriespeicher. Dabei wird pro Monat und Tag versucht, die maximale Lastspitze um einen Betrag zu reduzieren. Dieser Betrag wird zuvor in der Analyse ermittelt, indem gerechnet wird, welche Lastreduktion mit welcher Speichergrösse beim aktuellen Lastgang möglich ist, um diese Lastreduktion zu verifizieren.

Die fünfte Priorität hat das Laden des Speichers mit Überschussstrom aus der PV-Anlage, der dadurch zu Eigenverbrauch wird. Anstatt im Niedertarif wird der Rückspeisetarif für diesen Strom abgerechnet.

Die letzte Priorität hat die Eigenverbrauchserhöhung durch den Batteriespeicher an Tagen, an welchen kein Peak-Shaving in Frage kommt. Zum Beispiel an Wochenenden oder Feiertagen.

5.7.2 Simulation Transferpreise

Für die Simulation und Interpretation der Resultate müssen die system-internen Transferpreise klar definiert sein. Dazu werden vier Teilsysteme unterschieden: das Netz, der Verbraucher, die Ladestationen, die PV-Anlage und der Speicher. In Abbildung 18 sind die Transferpreise ersichtlich.



Verrechnete Transferpreise

R = Rückliefertarif EW; B = Bezugstarif EW; S = Schnellladungstarif

Abbildung 18: Schema Transferpreise

Um die Bilanzen für die einzelnen Komponenten zu berechnen, müssen die Teilsysteme klar abgegrenzt sein. Falls zum Beispiel mit Überschussstrom aus der PV-Anlage geladen wird, muss bei der Berechnung der Einsparung durch die Eigenverbrauchserhöhung diese bezogene Energie abgezogen werden. Durch die definierten Transferpreise ist dies möglich und der Business-Case «PV-Anlage», die Jahreskosten «E-LKW», die Jahreskosten «E-PKW Ladestationen» und der Business-Case «Speicher» sind eigenständig. Für den Business-Case der E-LKW mit Wechselsystem ist die «Schnellladestation Raststätte» substituiert mit einer Wechselstation und der verrechnete Transferpreis ist der Schnellladungstarif + Grundgebühr.

6 Berechnungen Kosten und Business-Case

In diesem Abschnitt werden die zugrunde liegenden Daten der Kosten und der Business-Case Berechnung für die PV-Anlage, den Batteriespeichers und die Mobilität erläutert.

Die Investitionskosten für den Business-Case werden als Jahreskosten über die Annuität (a) berechnet. Dazu werden noch die jährlichen Unterhaltskosten BU berücksichtigt.

$$Jahreskosten = Capex \times a + BU$$

Formel 3-1

Die Annuität a wird basierend auf dem kalkulatorischen Zinssatz z und der Nutzungsdauer N bestimmt.

$$a = \frac{z \times (1+z)^N}{(1+z)^N - 1}$$

Formel 3-2

	PV-Anlage	Batteriespeicher stationär	Diesel Lkw	E-Lkw	E-Lkw Batterie	E-Lkw mit Wechselsystem
Zinssatz z [%]	4.13	4.13	4.13	4.13	4.13	4.13
Nutzungsdauer N [Jahre]	25	15	20	20	10	20

Tabelle 14: hinterlegte Zahlen zur Berechnung der Annuität (Zinssatz nach WACC) (BFE, 2023)

Die Investitionskosten (Capex) werden für die Komponenten getrennt berechnet.

6.1 PV-Anlage

Für die PV-Anlage werden die Investitionskosten anhand der Peakleistung P_{peak} [kWp] und den spezifischen Kosten C_{spec} [CHF/kWp] berechnet.

$$Capex_{PV} = P_{peak} \times C_{spec}$$

Formel 3-3

Die spezifischen Kosten variieren je nach Peak-Leistung. Die zugrundeliegenden Werte und Berechnungen werden im Folgenden erläutert und stützen sich auf die Erkenntnisse der Preisbeobachtungsstudie PV 2020. Aufgrund der krisenbedingten Preisanstiege in den darauffolgenden Jahren wurden die Daten aus der Studie des Jahres 2020 einbezogen. In der folgenden Abbildung sind die spezifischen Kosten pro kWp abhängig von der Anlagengröße von über 3'000 Datensätzen dargestellt. (Leguay, 2021)

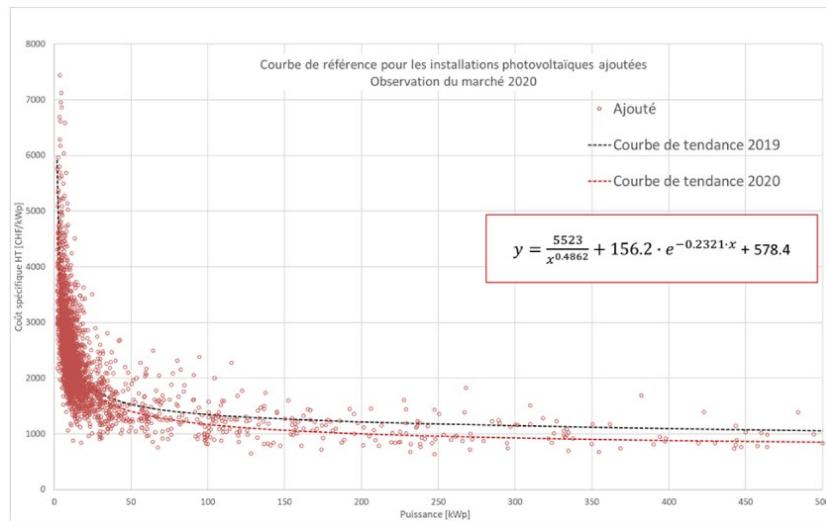


Abbildung 19: spezifischen Kosten pro kWp abhängig von der Anlagengrösse

Die spezifischen Kosten pro kWp ergeben sich somit aus der folgenden Funktion:

$$C_{spec} = \frac{5523}{P_{peak}^{0.4862}} + 156.2 \times e^{-0.2321 \times P_{peak}} + 578.4 \text{ CHF/kWp}$$

Formel 3-4

Für die Kosten der Fassaden PV-Anlage wurden die spezifischen Kosten um 50% erhöht.

In Tabelle 15 sind die Kosten der einzelnen PV-Anlage Varianten aufgeführt.

Bezeichnung	Leistung	Jahresproduktion	spez. Investition	Investitionskosten	EIV
	kWp	kWh	CHF/kWp	CHF	CHF
Dach Süd	509	536'275	845	430'058	157'470
Dach Ost/West	1206	1'082'721	754	909'347	331'619
Fassade Süd	299	212'183	1386	414'162	116'629
Fassade West	213	130'007	1479	314'755	84'810
Fassade Nord	299	84'269	1386	414'162	116'629
Fassade Ost	231	80'835	1455	336'384	91'469
Carport Dach Ost/West	300	269'244	2596	778'752	60'000

Tabelle 15: PV-Anlagen Kosten mit EIV (Einmalvergütung)

Einmalvergütung

Die Einmalvergütung wird nach der Funktion von Pronovo berechnet. Die Funktion unterscheidet zwischen Dach und Fassaden PV-Anlagen (Pronovo, 2023)

Dach:

$$EIV = -0.019 \times P_{peak}^2 + 274.94 \times P_{peak} + 3630$$

Formel 3-5

Fassade:

$$EIV = -0.019 \times P_{peak}^2 + 374.94 \times P_{peak} + 3630$$

Formel 3-6

Vergleichskosten Fassaden

Für die Varianten Vergleiche können bei den Fassaden PV-Anlagen als Vergleichskosten zu einem Standard-Fassadenprofil 70.-/m² abgezogen werden. (Taracell, 2022/2023)

Betriebskosten

Für die jährlichen Betriebskosten der PV-Anlage wurde 1% der Investitionskosten angenommen.

Formel 3-7

$$BU_{PV} = Capex_{PV} * 1\% \text{ CHF/a}$$

6.2 Batteriespeicher

Durch einen Austausch mit Axpo Grid AG und der Speicherherstellerin Intilion GmbH konnte eine realistische Preisstruktur für Batteriespeicher in die Simulation integriert werden. (Ciprietti, 2021) (Suellwald, 2021) Die Analyse im Größenbereich von 100 kWh bis 2 MWh erfolgte anhand der Batteriespeicher der Intilion GmbH. Ein sogenannter Scalebloc kann aus einzelnen Modulen skaliert werden. Er enthält neben dem eigentlichen Batteriespeicher ein Feuerwarn- und Löschsystem, einen Wasser- und Staubschutz, Schutz vor Überspannung und Schutz der Batterie. Der Hersteller gibt eine Lebensdauer von 15 Jahren an. Das Speichersystem Scalebloc ist durch die Verwendung in der Schweiz, speziell im Peak-Shaving Bereich, repräsentativ für die Simulation und Berechnung des Business-Cases. In der Tabelle 16 sind die ermittelten und abgeschätzten Daten, die durch Literaturrecherche und weitere Erfahrungswerte gestützt werden und für die aktuelle Situation als repräsentativ betrachtet werden dürfen, dargestellt. (Energieschweiz, 2018)

Module	Speicherkapazität	Modulkosten	Installation und Netzanschluss	Unterhaltskosten	CAPEX	Spezifische Kosten
Anzahl	kWh	CHF	CHF	CHF/a	CHF	CHF/kWh
1	68	60'000	13'750	738	73'750	1085
2	136	118'000	19'375	1374	137'375	1010
4	272	225'000	30'063	2551	255'063	938
8	544	400'000	49'000	4490	449'000	825
16	1088	600'000	77'500	6775	677'500	623

Tabelle 16: Capex und Opex Speichersysteme (Quelle: Axpo und Intilion, 2021)

Aus den Daten in Tabelle 16 wurde eine Funktion für den Capex gebildet. Diese ist in Abbildung 20 dargestellt.

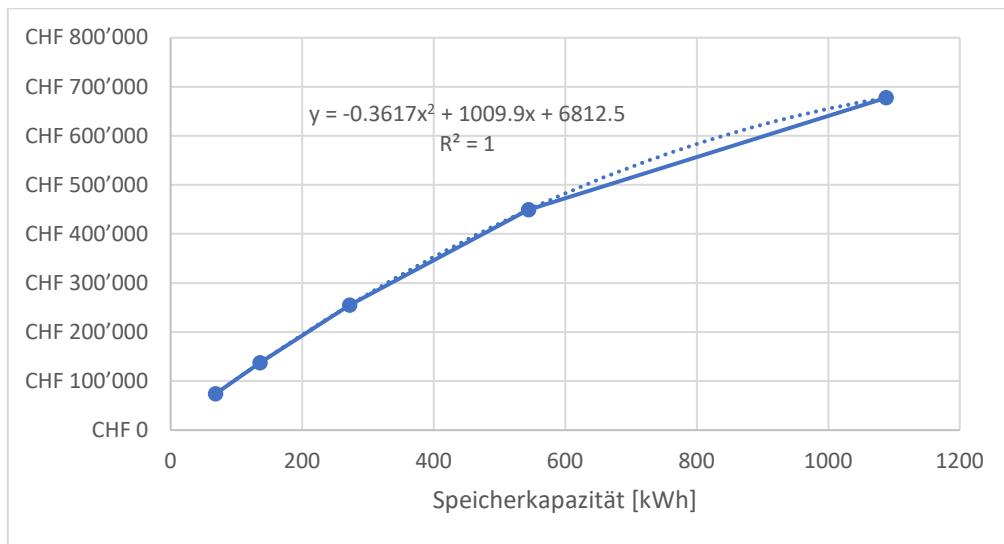


Abbildung 20: Funktion Capex Batteriespeicher (2021)

Für den Batteriespeicher werden die spezifischen Investitionskosten anhand der ermittelten Funktion gebildet, wobei E_{kWh} die nutzbare Speicherkapazität in kWh ist.

$$Capex_{BS} = -0.3617 \times E_{kWh}^2 + 1009.9 \times E_{kWh} + 6812.5 \text{ CHF/kWh}$$

Formel 3-8

Für die jährlichen Betriebskosten des Batteriespeichers wurde 1% der Investitionskosten angenommen.

$$BU_{BS} = Capex_{BS} * 1\% \text{ CHF/a}$$

Formel 3-9

6.3 Diesel LKW (LKW)

Die Kosten für Diesel LKWs sind ein reales Beispiel für die Kosten von 7.5 t LKWs. Die Angaben beziehen sich auf die bestehenden 3 LKWs.

	Bezeichnung	Total Kosten	Jahreskosten
Investitionskosten 3 LKWs	$Capex_{LKW}$	590'812 CHF	-
Betriebskosten (Service etc.)	BU_{LKW}	-	36'470 CHF
Energiekosten (Treibstoff + Steuern)	-	-	36'684 CHF

Tabelle 17: Kostenstruktur Diesel LKWs (Taracell, 2022/2023)

Aufgrund unterschiedlicher Investitionskosten für die Diesel LKWs wird direkt mit der Summe gerechnet.

6.4 E-Lkw mit fester Batterie (E-LKW)

Durch eine Anfrage an BAX wurden die Kosten für einen E-LKW in der Kategorie 7.5t aufgenommen. BAX wurde von BPW Bergische Achsen und Paul Nutzfahrzeuge GmbH entwickelt. Die Informationen von BAX wurden in die Simulation integriert. Da BAX einer der einzigen 7.5t E-LKW vertreibt, gibt es keine Vergleichskosten. Dies ist eine Unsicherheit der Kosten für einen E-LKW 7.5 t. In Tabelle 18 sind die Angaben von BAX aufgeführt.

	Bezeichnung	Batteriekapazität	Reichweite	Total Kosten
Long-range E-Lkw 7.5t komplett mit 3 Batteriepaketen	$Capex_{E-LKW}$	126 kWh	200 km	190'000 CHF
Mid-Range	-	84 kWh	130 km	175'000 CHF
Batteriepaket 42 kWh	-	42 kWh	-	15'000 CHF
Wartungsvertrag	BU_{E-LKW}	-	-	550 CHF pro Monat

Tabelle 18: Angaben BAX E-LKW 7.5t (BAX, 2023)

Die Kosten für ein Batteriepaket mit 42 kWh ergeben sich aus der Differenz der Mid- und Long-range Varianten.

Für die Simulation wird nur die Long Range Variante berücksichtigt. Von BAX sind keine Wartungs- oder Unterhaltskosten ausgewiesen. Deswegen werden die Wartungskosten von den Renault 12.5t E-LKWs miteinbezogen. Es wird angenommen, dass die Wartungskosten für einen E-LKW mit 7.5t oder 12.5t ähnlich ausfallen.

Durch einen weiteren Austausch mit Renault wurden die Kosten für einen E-LKW in der Kategorie 12.5t aufgenommen. Die Angaben von Renault sind in Tabelle 19 aufgeführt.

Renault Trucks E-Tech 12.5t	Reichweite	Total Kosten
D16 6 x 94 kWh	450 km	476'000 CHF
D16 4 x 94 kWh	300 km	422'000 CHF
D16 6 x 66 kWh	310 km	440'000 CHF
Batteriepaket 94 kWh	-	27'000 CHF
Excellence Wartungsvertrag bei 40'000km/a	-	550 CHF pro Monat

Tabelle 19: Angaben Renault E-LKW 12.5t (Renault, 2023)

Diese Kosten von Renault dienen als Vergleich zu den Fahrzeugkosten von BAX. Aufgrund der Kostenunterschiede und der Substitution von 7.5t Diesel LKWs wurden nur die 7.5t E-LKWs von BAX in die Untersuchung miteinbezogen.

6.5 E-Lkw mit Wechselsystem (WE-LKW)

Für diese untersuchte Alternative der Mobilität gibt es noch keine Vergleichssysteme in der Schweiz oder im europäischen Raum.

Da es für E-LKWs mit Wechselsystem noch keine marktfähigen Fahrzeuge und Wechselstationen gibt, wurden für diese Kostenstruktur diverse Annahmen getroffen. Die Datengrundlage wurde mit den Pilotanlagen von NIO in Deutschland für E-PKWs und Ähnlichkeiten zu konventionellen E-LKWs von Bax aufgestellt.

Annahmen:

- Ähnliche Kostenstruktur wie E-LKW von BAX ohne den Batteriespeicher (BAX, 2023)
- Kosten Miete Batterie übernommen von NIO Modell EL7 (SUV): 300 CHF für 100kWh pro Monat (NIO, 2023)
- Aufgrund der unbekannten Kosten für eine Wechselstation und einer unrealistischen Anwendung im Bereich von wenigen E-LKWs wurde angenommen, dass die E-LKWs mit Wechselsystem in Lupfig ohne Batteriewechsel, sondern mit einer Ladestation geladen werden.
- Für einen Batteriewechsel an einer Wechselstation wird eine Grundgebühr von 20 CHF pro Wechsel zusammen mit dem Schnellladungstarif pro kWh der eingetauschten Batterie verrechnet.

In Tabelle 20 ist die Kostenstruktur für E-LKWs mit Wechselsystem aufgeführt.

Beschreibung	Bezeichnung	Batteriekapazität	Reichweite	Total Kosten
Long-range E-LKW 7.5t ohne Batterie	$Capex_{WE-LKW}$	-		145'000 CHF
Miete 3 Batteriepakete mit je 42 kWh	BU_{WE-LKW}	126 kWh	200 km	4'536 CHF pro Monat

Tabelle 20: Kostenstruktur E-LKW mit Wechselsystem

6.6 Ladestationen E-LKW (LS E-LKW)

In diesem Abschnitt werden die Kosten der Ladestationen für die Varianten mit E-LKW und WE-LKW eingeführt.

Die Kostenstruktur wurde von EKZ bereitgestellt.

Beschreibung	Bezeichnung	Kosten
DC Ladestation Kostad 150 kW (2 bis 3 Ladepunkte: 1x 150kW / 1x 90kW + 1x 60kW + 1x 22kW)	-	50'000 CHF pro Stück
Installation DC Ladestation	-	10'000 CHF pro Stück
Vorbereitung für Parkplätze (Lademanagement, Zähler, Wlan)	-	700 CHF pro Stück
Summe Investitionskosten	$Capex_{LS E-LKW}$	60'700 CHF pro Stück

Unterhaltskosten (Filter, Relais, Schmutz etc.)		1'000 CHF/a
Zusätzliche Kosten (Backend System, Remote Zugriff, öffentlicher Ladepunkt, Internet)		14.90 CHF/m
Summe Unterhaltskosten	$BU_{LS\ E-LKW}$	1'178.8 CHF/a

Tabelle 21: Kostenstruktur Ladestationen E-LKW und WE-LKW (Wütschert, 2023)

6.7 Ladestationen für E-PKW (LS E-PKW)

In diesem Abschnitt werden die Kosten der Ladestationen für alle Varianten mit 10 E-PKW Ladestationen eingeführt. Die Kostenstruktur wurde von EKZ bereitgestellt.

Beschreibung	Bezeichnung	Kosten
AC Ladestation Etrell Inch Pro 22 kW		1'200 CHF pro Stück
Installation AC Ladestation		1'000 CHF pro Stück
Vorbereitung für Parkplätze (Lademanagement, Zähler, Wlan)		700 CHF pro Stück
Summe Investitionskosten	$Capex_{LS\ E-PKW}$	2'900 CHF pro Stück
Unterhaltskosten (Relais, Schmutz etc.)		500 CHF/a
Zusätzliche Kosten (Backend System, Remote Zugriff, öffentlicher Ladepunkt, Internet)		14.90 CHF/m
Summe Unterhaltskosten	$BU_{LS\ E-PKW}$	678.8 CHF/a

Tabelle 22: Kostenstruktur Ladestationen E-PKW (Wütschert, 2023)

Falls die Ladestationen für E-PKW der Öffentlichkeit bereitgestellt werden, kann ein Energietarif von 0.55 – 0.8 CHF/kWh verlangt werden. (Wütschert, 2023)

7 Ausgabe und Resultate

In diesem Abschnitt werden beispielhaft Resultate der Simulation aufgezeigt.

7.1 Bilanz Lastgang

Die Resultate des Lastgangs werden wie in Tabelle 23 beispielhaft gezeigt bilanziert.

Bezeichnung	Lastgang 2022
Netzbezug [kWh/a]	4'840'230
Thermoölbezug [kWh/a]	0
mittlerer Netzbezug [kW/a]	553
mittlere monatliche Lastspitze [kW/a]	985
Kosten Netzbezug [CHF/a]	784'555
Kosten Thermoöl [CHF/a]	0
Kosten Lastspitzen [CHF/a]	88'624
Kosten total Lastgang bestehend, ohne weitere Komponenten [CHF/a]	873'179

Tabelle 23: Bilanz Lastgang

7.2 Bilanz PV-Anlage

Die Resultate der PV-Anlage werden wie in Tabelle 24 beispielhaft aufgezeigt, bilanziert.

Bezeichnung	2548 kWp
Produktion [kWh/a]	1'859'268
Volllaststunden [h]	730
Eigenverbrauch [kWh/a]	1'400'120
Rückspeisung [kWh/a]	459'148
Lastreduktion [kW/a]	570
jährliche Einsparung EV [CHF/a]	237'375
jährlicher Gewinn Rückspeisung [CHF/a]	41'323
jährliche Einsparung PS [CHF/a]	4'271
Einmalvergütung [CHF]	805'635
Investitionskosten [CHF]	1'162'477
jährliche Ausgaben [CHF/a]	60'323
jährliche Einnahmen [CHF/a]	282'970
Amortisationszeit [a]	8.8
Jahreskosten (25J) [CHF/a]	147'401
Business Case PV (25J) [CHF/a]	135'569

Tabelle 24: Bilanz PV-Anlage

In diesem Beispiel ist die PV-Anlage in 8.8 Jahren amortisiert und erzielt einen positiven Business-Case.

7.3 Bilanz E-LKW

Die Resultate der E-LKWs werden wie in Tabelle 25 beispielhaft aufgezeigt, bilanziert.

Bezeichnung	E-LKW 1	E-LKW 2	E-LKW 3
Speicherkapazität [kWh]	126	126	126
Verbrauch [kWh/km]	0.63	0.63	0.63
Energiebezug Speicher [kWh/a]	4'013	23'674	26'895
Netzbezug [kWh/a]	1'098	12'524	15'496
Eigenverbrauchserhöhung [kWh/a]	2'484	8'786	9'574
Auswärtsladen [kWh/a]	431	2'364	1'825
Mittagspause verlängert um [min]	0	45	15
Häufigkeit Pause an Raststätte 30min laden	5	9	10
Kosten Netzbezug [CHF/a]	172	2'011	2'473
Kosten Laden Auswärts [CHF/a]	216	1'182	912
Kosten Eigenverbrauch [CHF/a]	224	791	862
Summe Energiekosten [CHF/a]	611	3'984	4'248
Jahreskosten Inv + Unt [CHF/a]	22'977	22'977	22'977
Jahreskosten Ladestation DC Inv + Unt	7'307	7'307	7'307
Kosten total ELKW [CHF/a]	30'894	34'267	34'531

Tabelle 25: Bilanz E-LKW

7.4 Bilanz WE-LKW

Die Resultate der WE-LKWs werden wie in Tabelle 26 beispielhaft aufgezeigt, bilanziert.

Bezeichnung	WE-LKW 1	WE-LKW 2	WE-LKW 3
Speicherkapazität [kWh]	126	126	126
Verbrauch [kWh/km]	0.63	0.63	0.63
Energiebezug Speicher [kWh/a]	4'013	23'674	26'895
Netzbezug [kWh/a]	1'056	11'933	14'927
Eigenverbrauchserhöhung [kWh/a]	2'432	8'475	9'340
Auswärtsladen [kWh/a]	189	1'880	1'325
Mittagspause verlängert um [min]	0	45	15
Häufigkeit Batteriewechsel an Station [5min]	8	33	31
Laden durch Batteriewechsel [kWh/a]	336	1'386	1'302
Kosten Netzbezug [CHF/a]	164	1'914	2'381
Kosten Laden Auswärts [CHF/a]	95	940	662
Kosten Eigenverbrauch [CHF/a]	219	763	841
Kosten Batteriewechsel [CHF/a]	328	1'353	1'271
Summe Energiekosten [CHF/a]	806	4'970	5'155
Jahreskosten Inv + Unt [CHF/a]	21'929	21'929	21'929
Jahreskosten Ladestation DC Inv + Unt	7'307	7'307	7'307
Kosten total ELKW [CHF/a]	30'041	34'205	34'390

Tabelle 26: Bilanz WE-LKW

7.5 Bilanz E-PKW

Die Resultate der E-PKW werden wie in Tabelle 27 beispielhaft aufgezeigt, bilanziert.

Bezeichnung	Wert
Energiebezug Speicher [kWh/a]	38'140
Netzbezug [kWh/a]	21'939
Eigenverbrauchserhöhung [kWh/a]	16'201
Kosten Netzbezug [CHF/a]	3'781
Kosten Eigenverbrauch [CHF/a]	1'458
Investition 10 Ladestationen [CHF]	29'000
Unterhalt 10 Ladestationen [CHF/a]	6'788
Jahreskosten Inv + Unt [CHF/a]	10'711
Jahreskosten total [CHF/a]	15'950

Tabelle 27: Bilanz E-PKW

7.6 Bilanz Batteriespeicher

Die Resultate der Batteriespeicher werden wie in Tabelle 28 beispielhaft aufgezeigt, bilanziert.

Bezeichnung	136 kWh	272 kWh
Energiebezug Speicher [kWh/a]	20'523	41'399
Volllastzyklen	151	152
Netzbezug [kWh/a]	10'201	21'603
jährliche Lastreduktion [kW/a]	935	1'315
jährliche Eigenverbrauchserhöhung [kWh/a]	10'080	19'118
jährliche Einsparung PS [CHF/a]	7'010	9'862
jährliche Einsparung EV [CHF/a]	632	1'538
Investitionskosten [CHF]	137'469	254'745
Jahreskosten [CHF/a]	13'851	25'668
Business-Case Batteriespeicher [CHF/a]	-6'210	-14'268

Tabelle 28: Bilanz Batteriespeicher

7.7 Kosten der Variante

Die Resultate der Variante werden wie in Tabelle 29 beispielhaft aufgezeigt, ausgegeben.

Bezeichnung	Ohne Batteriespeicher	Batteriespeicher 136 kWh	Batteriespeicher 272 kWh
Netzbezug total [kWh/a]	3'489'965	3'480'325	3'471'657
Rückspeisung total [kWh/a]	422'700	404'456	388'578
Lastspitzen total [kW/a]	11'247	10'312	9'932
Auswärtsladen ELKW + Batteriewechsel bei Wechselsystem total [kWh/a]	33'114	33'114	33'114
Eigenverbrauch total [kWh/a]	1'436'568	1'454'812	1'470'690
Lastspitzenreduktion total [kW/a]	570	1'504	1'884
Kosten Netzbezug [CHF/a]	559'450	557'833	556'372

Kosten Lastspitzen [CHF/a]	84'352	77'343	74'490
Kosten Auswärtladen + Batteriewechsel bei Wechselsystem [CHF/a]	20'877	20'877	20'877
Kosten Strom [CHF/a]	664'679	656'053	651'739
Einnahmen Rückspeisung [CHF/a]	-38'043	-36'401	-34'972
Kosten Thermoöl [CHF/a]	0	0	0
Jahreskosten Investition und Unterhalt [CHF/a]	693'792	707'643	719'460
Kosten total Variante [CHF/a]	1'320'428	1'327'295	1'336'227

Tabelle 29: Kosten der Variante

8 Literaturverzeichnis

BAX. 2023. Herstellerangaben von BAX E-LKW. 2023.

BFE. 2023. WACC – Kalkulatorischer Zinssatz gemäss Art. 13 Abs. 3 Bst. b der Stromversorgungsverordnung (StromVV). [Online] 2023.
<https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/stromversorgung/stromversorgungsgesetz-stromvg/wacc.html>.

Ciprietti, O. 2021. *Angaben für stationäre Batteriespeicher von Axpo*. 2021.

Energieschweiz. 2018. *stationäre Batteriespeicher in Gebäuden*. 2018.

Leguay, G. 2021. *Photovoltaikmarkt: Preisbeobachtungsstudie 2020*. s.l. : Energieschweiz, 2021.

NASA. Definition Of Technology Readiness Levels . [Online]
https://esto.nasa.gov/files/trl_definitions.pdf.

NIO. 2023. Website von NIO news. [Online] 2023. https://www.nio.com/de_DE/news.

Pronovo. 2023. Tarifrechner Förderbetrag. [Online] 2023.
<https://pronovo.ch/de/services/tarifrechner/>.

Renault. 2023. Herstellerangaben Renault E-LKW. 2023.

Schreiber, R. 2023. Python Worksho IBRE. FHNW : s.n., 2023.

Suellwald, F. 2021. *Angaben für stationäre Batteriespeicher von Intillion*. 2021.

Taracell. 2022/2023. interne Informationen von Taracell. 2022/2023.

Wütschert, D. 2023. *Angaben für Ladestationen von EKZ*. 2023.

Zhang, P. 2023. CATL launches battery swap solution Qiji Energy for heavy-duty trucks. [Online] CNEVPOST, 2023. <https://cnevpost.com/2023/06/12/catl-launches-battery-swap-solution-qiji-energy-heavy-trucks/>.

9 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

9.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Startansicht	5
Abbildung 2: Error nach Inaktivität	6
Abbildung 3: Beispielhafte Darstellung der Auswirkung einer PV-Anlage (2248 kWp) auf den Lastgang im Sommer	14
Abbildung 4: Beispielhafte Darstellung der Auswirkung einer PV-Anlage (2248 kWp) auf den Lastgang im Winter.....	15
Abbildung 5: E-LKW lange Strecke	16
Abbildung 6: E-LKW Wochenprofil mit Eigenverbrauchserhöhung	17
Abbildung 7: Vorschau Wechselsystem E-LKW von CATL (Zhang, 2023)	18
Abbildung 8: E-LKW mit Wechselsystem Strecke Ecublens (434 km)	19
Abbildung 9: Wochenprofil E-PKW mit Eigenverbrauchserhöhung.....	20
Abbildung 10: Beispielhafte Darstellung der Funktionsweise von Peak-Shaving mit einem Batteriespeicher (Kreis rot: Lastspitzenreduktion, violett: Speicher laden, grau: Eigenverbrauchserhöhung)	21
Abbildung 11: Beispielhaftes Risiko Peak-Shaving, ohne Marge	22
Abbildung 12:beispielhafte jährliche Lastspitzenreduktion, Einfluss der Marge.....	22
Abbildung 13: Programmstruktur Hauptskript	24
Abbildung 14: Programmstruktur Analyseskript.....	26
Abbildung 15: Beispielhaftes Fahrprofil eines LKW	27
Abbildung 16: Programmstruktur: Simulation von E-LKWs	29
Abbildung 17: Programmstruktur Peak-Shaving mit Batteriespeicher	31
Abbildung 18: Schema Transferpreise	33
Abbildung 19: spezifischen Kosten pro kWp abhängig von der Anlagengrösse	36
Abbildung 20: Funktion Capex Batteriespeicher (2021)	38

9.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anpassen der Input Parameter.....	6
Tabelle 2: Farbkodierung für Eingabe Parameter	8
Tabelle 3: Input Parameter.....	8
Tabelle 4: Pfad Eingabe	9
Tabelle 5: Eingabe Tarife	9
Tabelle 6: Eingabe PV-Anlage	10
Tabelle 7: Eingabe Batteriespeicher.....	11

Tabelle 8: Eingabe ELKW	12
Tabelle 9: WELKW Eingabe.....	13
Tabelle 10: EPKW Eingabe	13
Tabelle 11: Flächen der PV-Anlage Komponenten und Jahresproduktion	15
Tabelle 12: Fahrprofil Status Definition	28
Tabelle 13: Prioritäten der Simulation	32
Tabelle 14: hinterlegte Zahlen zur Berechnung der Annuität (Zinssatz nach WACC) (BFE, 2023).....	35
Tabelle 15: PV-Anlagen Kosten mit EIV (Einmalvergütung)	36
Tabelle 16: Capex und Opex Speichersysteme (Quelle: Axpo und Intilion, 2021)	37
Tabelle 17: Kostenstruktur Diesel LKWs (Taracell, 2022/2023)	38
Tabelle 18: Angaben BAX E-LKW 7.5t (BAX, 2023).....	39
Tabelle 19: Angaben Renault E-LKW 12.5t (Renault, 2023)	39
Tabelle 20: Kostenstruktur E-LKW mit Wechselsystem	40
Tabelle 21: Kostenstruktur Ladestationen E-LKW und WE-LKW (Wütschert, 2023)	41
Tabelle 22: Kostenstruktur Ladestationen E-PKW (Wütschert, 2023)	41
Tabelle 23: Bilanz Lastgang.....	42
Tabelle 24: Bilanz PV-Anlage	42
Tabelle 25: Bilanz E-LKW	43
Tabelle 26: Bilanz WE-LKW.....	43
Tabelle 27: Bilanz E-PKW	44
Tabelle 28: Bilanz Batteriespeicher	44
Tabelle 29: Kosten der Variante	45

10 Anhang: Details Simulation
