



OST
Ostschweizer
Fachhochschule



**Wirtschaftlicher Einsatz von Batteriespeichern durch
Multi-Use Anwendungen (Teil 2):**

«Peak-Shaving» & «Notstrom» Modellierung

Matthias Berthold,
Institut für Energiesysteme (IES)

T direkt +41 58 257 31 51

Matthias.Berthold@ost.ch

Thurgauer Technologietag 2023, Sulgen, am 11. Mai 2023

Technik Buchs / Institut für Energiesysteme (IES)



energieschweiz

IES | Institut für
Energiesysteme

OST – Ostschweizer Fachhochschule: Die nahe Fachhochschule

IES Institut für Energiesysteme

Engineering a net zero future that works



OST Campus
Buchs



OST Campus
Rapperswil-Jona



OST Campus
St. Gallen



Akkreditiertes
Wärmepumpen
Prüfzentrum

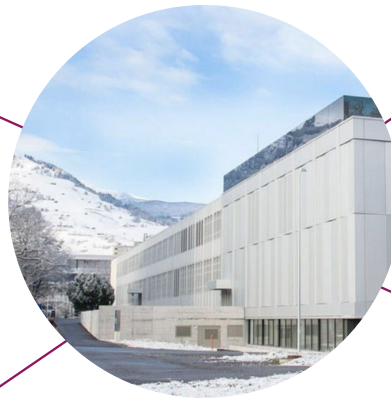
Wärmepumpen
Feldmessungen

Klima- und Kältetechnik

Wärmepumpen
Technologie



Wohngebäude



IES Institut für
Energiesysteme



(Agri-)Photovoltaik

Dezentrale
Energieversorgung

Elektrische und
thermische Netze

Energieversorgung



Leistungselektronik

Thermomanagement

Prüfstandsentwicklung

Mobilität



Industrie-
Wärmepumpen

Energieanalyse

Effizienzerhöhung

Industrie

Ihre Ansprechpartner am Thurgauer Technologietag:



Prof. Dr. Matthäus Alberding
+41 58 257 33 60
matthaeus.alberding@ost.ch



Matthias Berthold
+41 58 257 31 51
matthias.berthold@ost.ch



Modellfeature 1: „Notstromversorgung“



Energiemenge für einen Notbetrieb („Stromausfall“) wird vorgehalten.

→ Akkuspeicher wird im Normalbetrieb nicht unter eine Mindestenergiemenge (Reserve-Kapazität) entladen

Modell-Algorithmus sehr einfach → „Eigener Akku“:

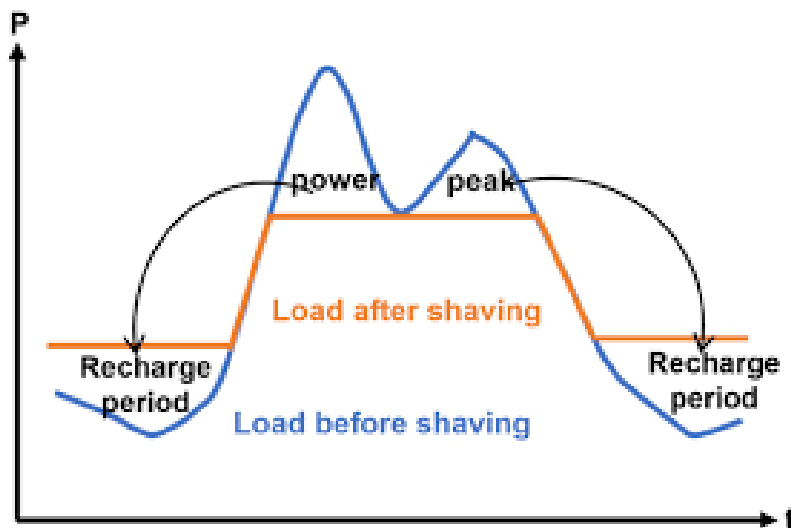
- Kosten (CAPEX und OPEX) sowie Verluste werden mit Akku_Ges berechnet & berücksichtigt
- Reserve-Kapazität hilft bei der Lebensdauer, da wegen der höheren Kapazität die „relativen“ Ladeleistungen kleiner sind (Wunsch: C-Rate ≤ 1)

Modellfeature 2: Peak-Shaving („Reduktion der Leistungsspitzen“)

Beim Peak-Shaving wird die maximale Netz-Bezugsleistung (und somit die „Netzbelastung“) reduziert.

Häufig Anreiz durch die Netzbetreiber bei Gewerbetarifen: Netzkosten sind z.B. abhängig von der monatlichen, maximalen Bezugsleistung: $\text{Netzkosten} = k * P_{\text{MonMax}} + \text{Grundgebühr}$

Wichtig: Peak-Shaving **verändert den zeitlichen Verlauf** des Energiebezuges, nicht aber den Energiebedarf (eher geringfügige Erhöhung wegen Akku-Verluste)



Modell-Algorithmus (Grundprinzip):

➤ Akku-Entladen, sobald:

- ✓ $(P_{\text{Bezug}} > P_{\text{MonMax}})$ UND
- ✓ solange („State-of-Charge“ (SOC) > 0%)

➤ Akku-Laden, sobald:

- ✓ $(\text{SOC} < 100\%)$ UND
- ✓ $(P_{\text{Bezug}} < P_{\text{MonMax}})$

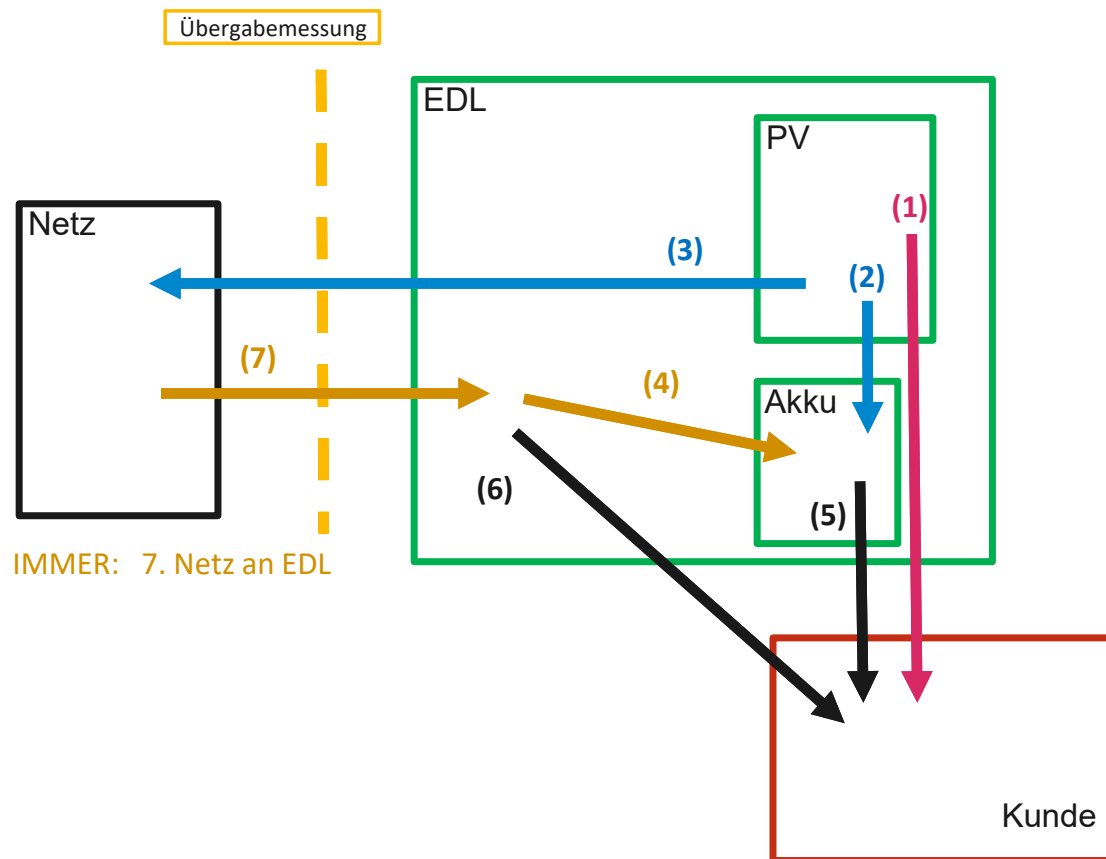
Bildquelle: ["Review of Peak Shaving Features of the Power Box", F. Kamarulazam, et al, John Wiley and Sons, Mar 2022,](#)

Modell – Inputgrössen:

Wichtigsten Inputgrössen, welche abgebildet wurden:

- ❖ **Jahreszeitreihen in 15-Minutenauflösung** [35'040 Werte (= 365 d/a * 96 W/d)] des
 - ❖ Netzbezug des Kunden (Kundenlastgang) und die
 - ❖ PV-Einspeisung
- ❖ **Fünf Tarifsysteme** mit jeweils **zwei Zeitbereichen** (HT und NT) und einer **Netz- und Energiekomponente** (Grundgebühr, Energiepreis Rp./kWh, Leistungspreis CHF/kW)
- ❖ **Akkuspeicher:**
 - ❖ Speicher-Kapazität («Hoher Impact auf Akku-Kosten»)
 - ❖ max. Lade-/Entladeleistung («Impact auf die Akku-Lebensdauer»)
 - ❖ Wirkungsgrade & Standby-Verluste («Effizienz & Kosten»)
 - ❖ Akku-Kosten (CAPEX, OPEX, Lebensdauer und Kapitalzins)

Energieflüsse (Physikalisch + Abrechnung)



Energieflüsse & Prio

- (1) PV an Kunde
- (2) PV an Akku (inkl. Verluste)
- (3) PV an Netz
- (4) EDL an Akku (inkl. Verluste)
- (5) Akku an Kunden
- (6) EDL an Kunde
- (7) Netz an EDL

5 Energie Tarife (Rp./kWh: HT & NT)

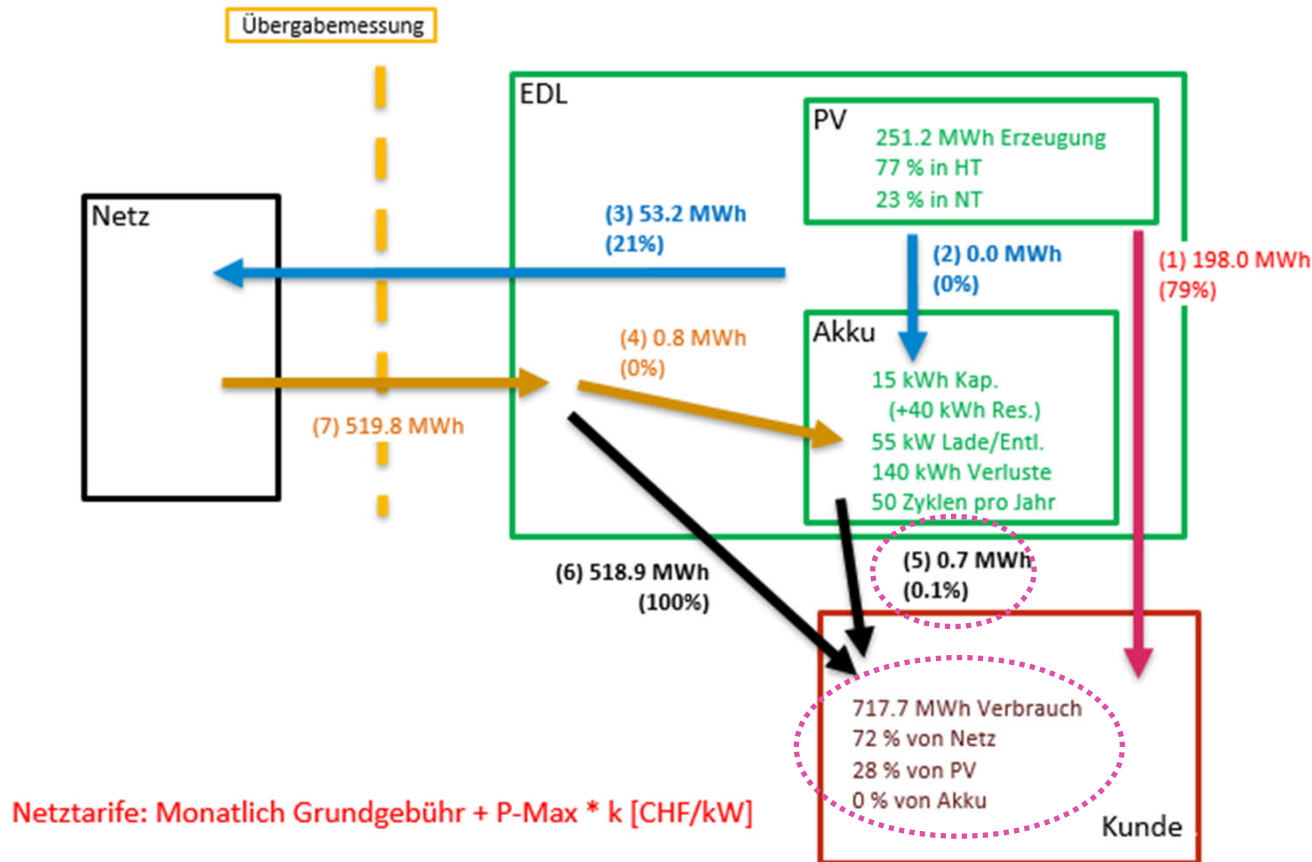
- (1) PV an Kunde (über EDL)
- (2) PV an Netz oder Akku (Gestehungskosten)
- (3) EDL an Netz von PV
- (4) EDL an Kunde (von Netz oder Akku)
- (5) Netz an EDL oder Akku

2 Netztarife (CHF/Mon & CHF/kW) – nur im HT:

Grund- & Leistungsabhängige Gebühren

Akku: Umwälzwirkungsgrad & StandBy-Verluste

Energieflüsse (Werte aus der Modellierung)



Energieaufteilung - Prio

- (1) PV an Kunde
- (2) PV an Akku (inkl. Verluste)
- (3) PV an Netz
- (4) EDL an Akku (inkl. Verluste)
- (5) Akku an Kunden
- (6) EDL an Kunde
- (7) Netz an EDL

5 Energie Tarife (Rp./kWh: HT & NT)

- (1) PV an Kunde (über EDL)
- (2) PV an Netz oder Akku (Gestehungskosten)
- (3) EDL an Netz von PV
- (4) EDL an Kunde (von Netz oder Akku)
- (5) Netz an EDL oder Akku

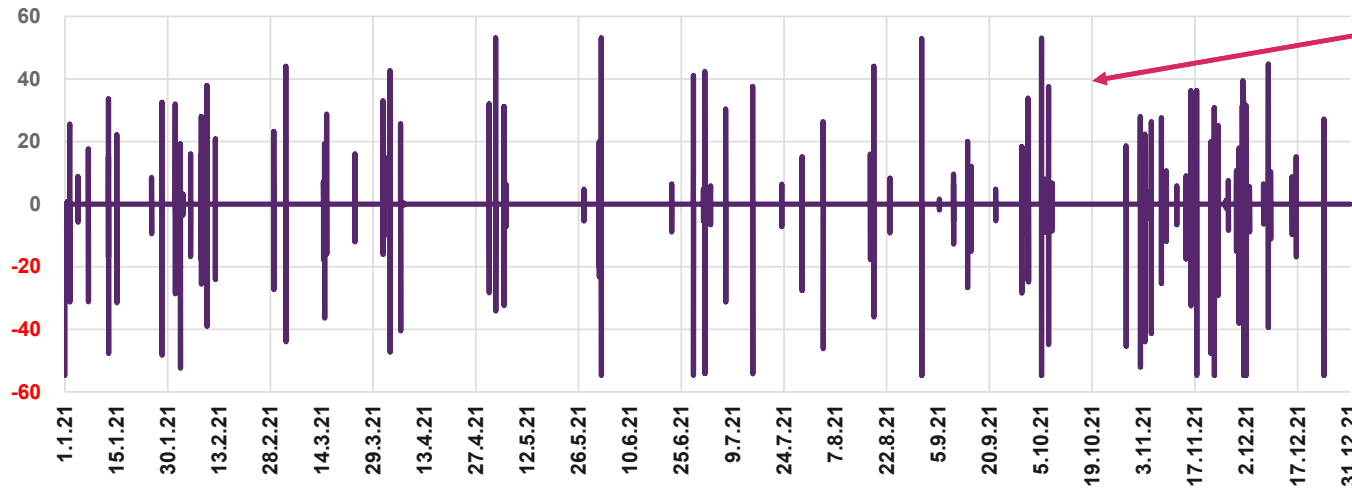
2 Netztarife (CHF/Mon & CHF/kW) – nur im HT:

Grund- & Leistungsabhängige Gebühren

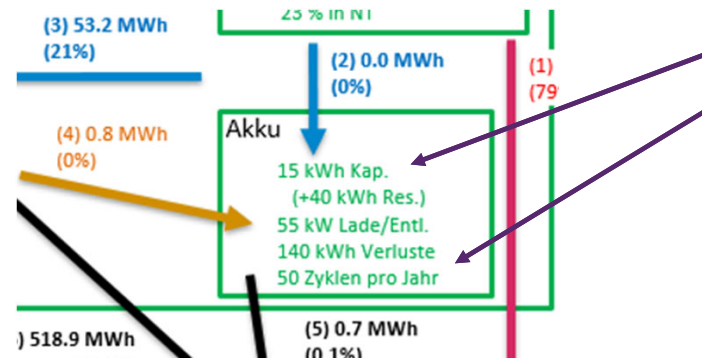
Akku: Umwälzwirkungsgrad & StandBy-Verluste

Einsatzweise des Akkus (Aus der Modellierung - Jahresdarstellung)

Jahresgang von P_Akku



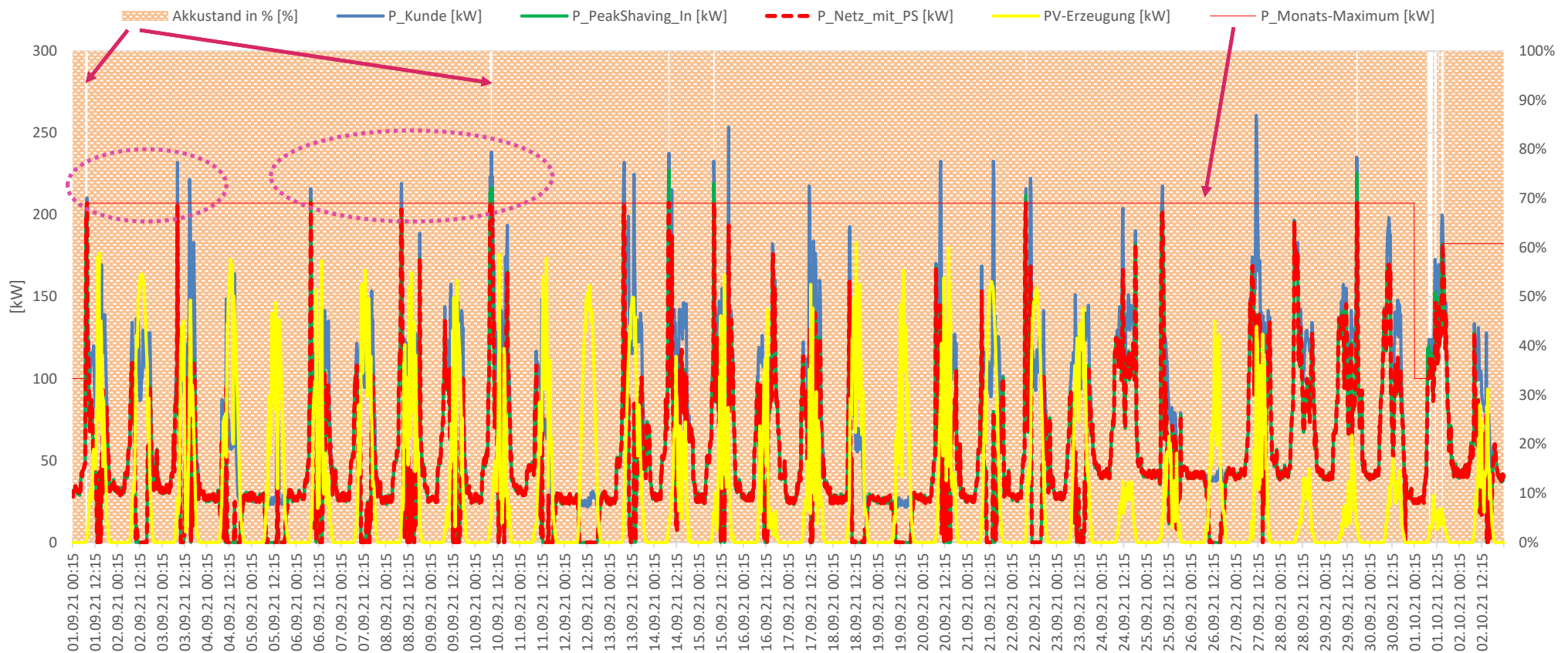
Akku-Einsatz: Nur sehr kurze, aber hohe „Leistungsspitzen“
(15 kWh / 55 kW → kaum Energie-Umsatz)



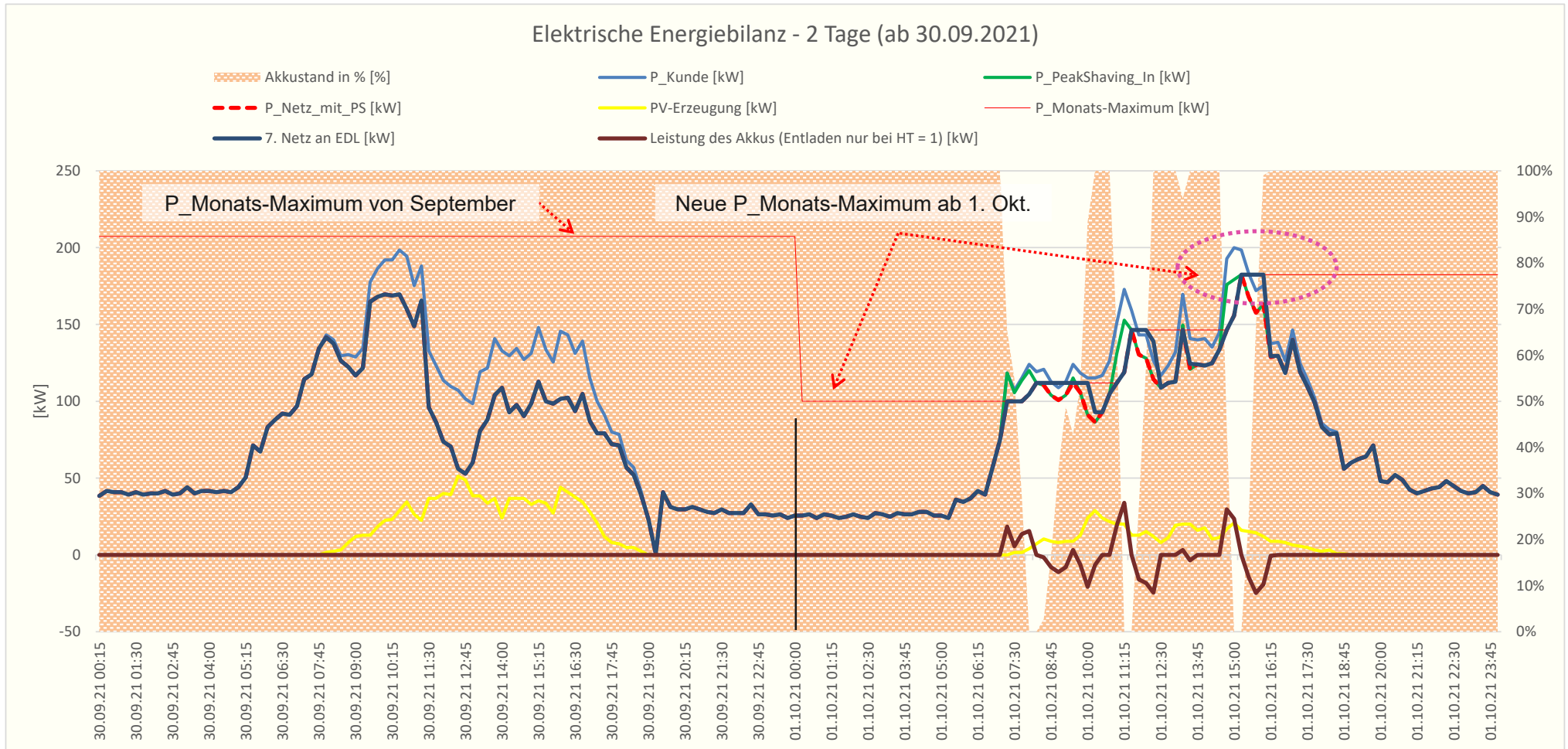
- Sehr geringe Akkukapazität von 15 kWh,
- Nur 50 Teilzyklen mit je 15 kWh waren für Peak-Shaving im Jahresverlauf erforderlich (0.1% des Kundenverbrauchs vom Akku!)
- Akku-Ladung erfolgt vollständig über das Netz
(keine Gleichzeitigkeit mit PV-Einspeisung & Akku-Lade-Anforderung)
- PV-Anlage reduziert auch Netzbezugsleistungs-Spitzen
(Im Jahresschnitt um 20.5 kW pro Monat, wird separat ausgewiesen)

Einsatzweise des Akkus (Aus der Modellierung - Monatsdarstellung)

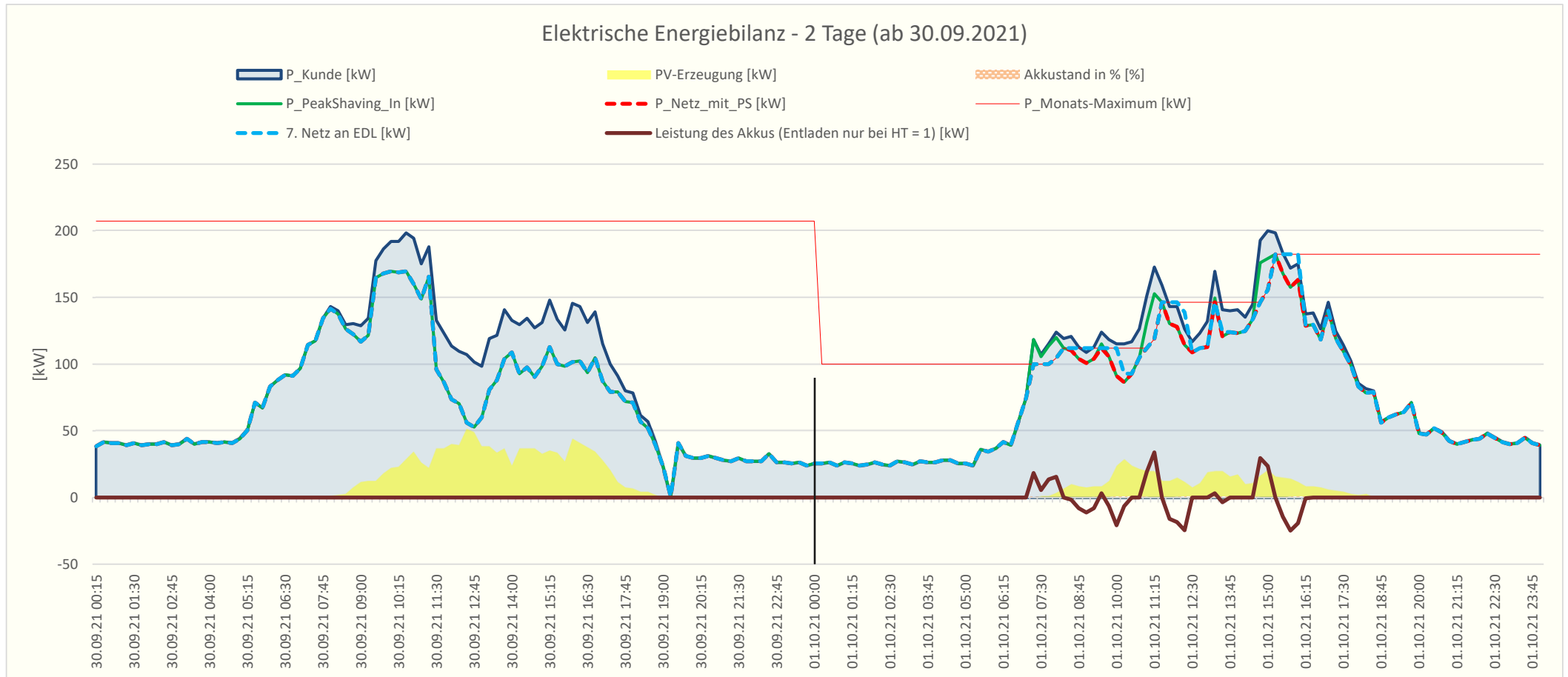
Elektrische Energiebilanz 31 Tage (ab 01.09.2021)



Einsatzweise des Akkus (Aus der Modellierung - Zweitages Darstellung)



Einsatzweise des Akkus (Aus der Modellierung – Zweitages Darstellung)



Viele Infos (z.B. Netzkosten auf „Monatsbasis“) → Analyseaufwand?

Erste Zeilen:
MIN, MAX, AVG, SUM

Auch schon Reduktion wegen
PV im HT

Kosten mit / ohne PS, Diff in CHF

[illegible]

Energie-Verteilungen (Monat)

Akku-Kennwerte

Excel-Solver-Parameter Dialog:

Ziel festlegen: Gewinn

Bis: ☒ Max. ☐ Min. ☐ Wert: 0

Durch Ändern von Variablenzellen: Akku_Pmax; Akku_Emax

Unterliegt den Nebenbedingungen:

- \$AV\$9 >= Akku_Pmax
- Akku_Pmax >= Akku_E_Reserve

☒ Nicht eingeschränkte Variablen als nicht-negativ festlegen

Lösungsmethode auswählen: GRG-Nichtlinear

Lösungsmethode: Wählen Sie das GRG-Nichtlinear-Modul für Solver-Probleme, die kontinuierlich nichtlinear sind. Wählen Sie das LP Simplex-Modul für lineare Solver-Probleme und das EA-Modul für Solver-Probleme, die nicht kontinuierlich sind.

Hilfe **Lösen** **Schließen**

Excel-Datenblatt:

AR	AS	AT	AU	AV	AW
	Akku CHF	JK-CAPEX Akku	-13'637	CHF/Jahr	
		JK-OPEX Akku	-560	CHF/Jahr	
		Kosten wegen Verlustene		CHF/Jahr	
		Erlös wegen F	12'022	CHF/Jahr	
	Zielwert-Solver: Gewinn:		-2'175	CHF/Jahr	
	PS_Pmax_Start		50 kW		
	Solver-Lösung: Akku_Pmax		100.00	53.12	
	Akku_Emax		100.00	11.74	
	Akku_Emax-1		140.00	54.74	
	Akku an Kunde		5'744.07		

Monat	P_PV	PV_anKunde	EDL_an							
1	13.6	13.6	76.8							
2	163.2	152.0	68.0							
3	156.0	155.2	100.1							
4	202.4	182.4	93.6							
5	215.2	184.8	100.0	200.0	259.2	234.4	200.0	-24.8	-34.4	34%
6	209.6	190.4	83.6	130.4	264.8	230.4	130.4	-34.4	-100.0	100%
7	207.2	192.0	90.4	114.4	248.8	214.4	114.4	-34.4	-100.0	100%
8	188.8	181.6	100.0	141.6	240.0	216.0	141.6	-24.0	-74.4	74%
9	183.2	156.0	89.6	152.8	260.8	227.2	152.8	-33.6	-74.4	74%
10	154.4	136.8	73.8	170.6	264.8	246.4	170.6	-18.4	-75.8	76%
11	105.6	105.6	100.0	207.2	276.8	263.2	207.2	-13.6	-56.0	56%
12	69.6	69.6	100.0	216.8	308.0	308.0	216.8	-	-91.2	91%
Summe/AVG								-20.5	-79.7	80%

Excel – Solver:

Optima automatisch suchen:

- Zielzelle «**Gewinn**» → soll «**Maximiert**» werden
- Variablenzellen sind hier
 - ❖ «Akku_Pmax» (Leistung [kW]) und
 - ❖ «Akku_Emax» (Kapazität [kWh])
- Weitere Nebenbedingungen:
 - z.B. «C-Rate ≤ 1» (Akku_Eges ≥ Akku_Pmax)

Wichtig: Startbedingungen ggf. variieren, da je nach Lösungsmethode ein lokales Optimum gefunden wird

Wirtschaftlichkeit → Ergebnisse I (überraschend)

Startwerte (Generell):



- ❖ Netztarif 10 CHF/ kW & Monat
- ❖ Spez. Akkukosten = 800 CHF/kWh
- ❖ Nur Peak-Shaving (keine Reservekapazität für «Notstrom»)

A) «Meine erste Abschätzung»: Akku mit 150 kWh & 100 kW Lade-/Entladeleistung

- Peak wurde in 8 Monaten um die max. möglichen 100 kW reduziert (!), im Jahresschnitt waren es 86 kW. Dies entspricht einer Reduktion von 36%! [AVG($P_{\text{Kunde_MonMax}}$) von 244 kW auf 158 kW]
- ABER: Gewinn = - 2'395 CHF/Jahr (wie erwartet nicht rentabel)

B) «Solver – Lösung»: Akku-Kapazität von 150 kWh auf 14.7 kWh reduziert, Lade-/Entladeleistung von 100 kW auf 53.7 kW

- Ergebnis: Gewinn = + 5'383 CHF/Jahr
- «...nur Peak-Shaving rentabel...» (ohne «Notstromfunktion!», aber C-Rate ~ 4!)

Wirtschaftlichkeit → Ergebnisse II (überraschend)

Weitere Solver-Lösungen mit folgenden Parametern:

- ❖ Netztarif 10 CHF/ kW & Monat / Betrachtung des reinen Peak-Shaving Gewinnes!
- ❖ Nebenbedingungen: Reservekapazität von 40 kWh, C-Rate ≤ 1



Wie verändern sich die **Akku-Parameter** sowie der **Peak-Shaving Gewinn** in Abhängigkeit der spez. **Akkukosten** (CHF/kWh)?

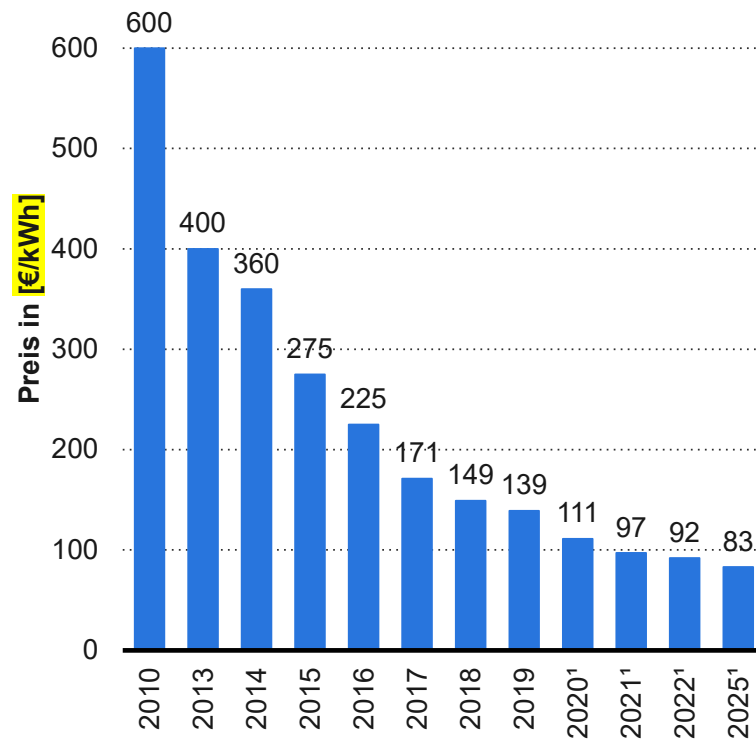
- Spez. Akkukosten haben kaum einen Einfluss auf die «optimalen» Akku-Kenndaten
(→ spez. Akkukosten steigen um Faktor 12 → Optimale Akkukapazität reduziert sich nur um 10% von 15.4 kWh auf 13.9 kWh)
- Aber deutlichen Einfluss auf den Gewinn (fällt mit steigenden Akkukosten)!



Akku-Kosten pro kWh	Akku (Kapazität / Leistung)	Gewinn
100 CHF/kWh (40 kWh Reserve, C-Rate ≤ 1)	40 + 15.4 kWh / 55.4 kW	4'767 CHF
200 CHF/kWh (40 kWh Reserve, C-Rate ≤ 1)	40 + 15.4 kWh / 55.4 kW	4'065 CHF
600 CHF/kWh (40 kWh Reserve, C-Rate ≤ 1)	40 + 14.7 kWh / 54.7 kW	1'256 CHF
800 CHF/kWh (40 kWh Reserve, C-Rate ≤ 1)	40 + 14.7 kWh / 54.7 kW	-148 CHF
1'200 CHF/kWh (40 kWh Reserve, C-Rate ≤ 1)	40 + 13.9 kWh / 53.9 kW	-2'843 CHF
(800 CHF/kWh (keine Reserve, beliebige C-Rate))	(14.6 kWh / 52.8 kW)	(3'950 CHF)

Anhang: Entwicklung der Akkukosten & Multi-Use (mit E-Auto)

Preise für Lithium-Ionen-Akkus (bis 2025)



Details: Horváth & Partners; BloombergNEF; 2010 bis 2019

Richtpreis-Angebote für stationäre Speicher:

- Speicher inkl. Wechselrichter: 1'000 CHF/kWh
- Installationskosten (hier) 200 CHF/kWh
- Gesamtkosten: 1'200 **CHF/kWh**

Multi-Use Akku inklusive Auto (Bidirektionales Laden):

Kfz- Modell	Kapazität		Preise Auto (ges.) [k€]	spez. Preise (Akku + Auto)	
	Brutto [kWh]	Netto [kWh]		Brutto [€/kWh]	Netto [€/kWh]
VW Id.3 Pro	62 kWh	58 kWh	40 k€	645	690
VW Id.3 Pro S	82 kWh	77 kWh	47 k€	573	610
VW id.4	82 kWh	77 kWh	46 k€	561	597
Renault Zoe	55 kWh	52 kWh	37 k€	673	712
Tesla Model 3	-	60 kWh	48 k€	-	800
Tesla Model Y	-	60 kWh	48 k€	-	800

Quellen (Akku-Preise): <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/534429/umfrage/weltweite-preise-fuer-lithium-ionen-akkus/>

(Auto-Preise): <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/kaufen/elektroautos-uebersicht/>

Vielen Dank für ihre Aufmerksamkeit!