



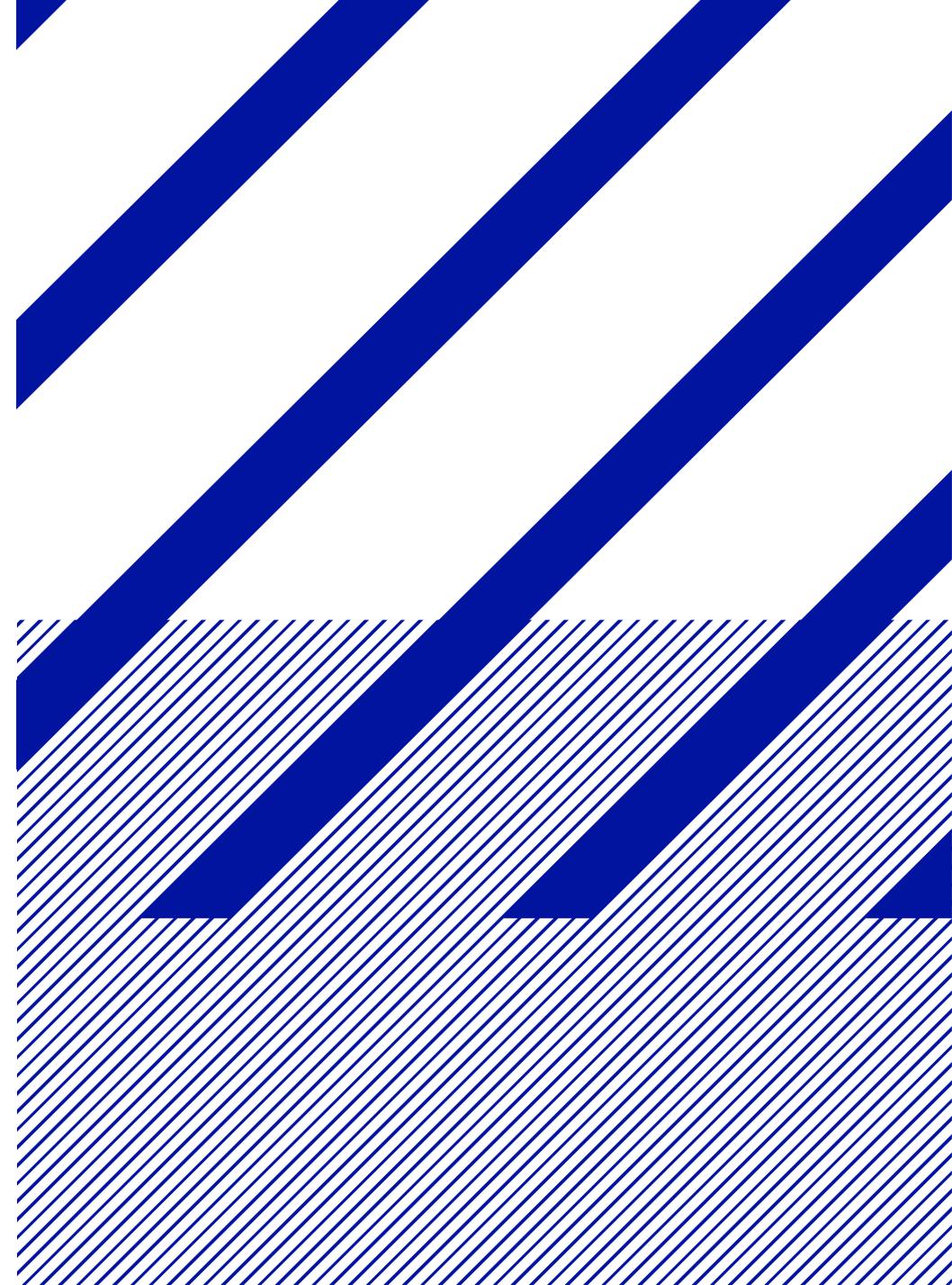
# Optimierung des Eigenverbrauchs einer PV-Anlage

mit Batteriespeicher, Wärmepumpe  
und Elektroauto

VDI Bezirksgruppe Rheine

Prof. Dr.-Ing. Tilman Philip Sanders

Leistungselektronik und elektrische Energietechnik

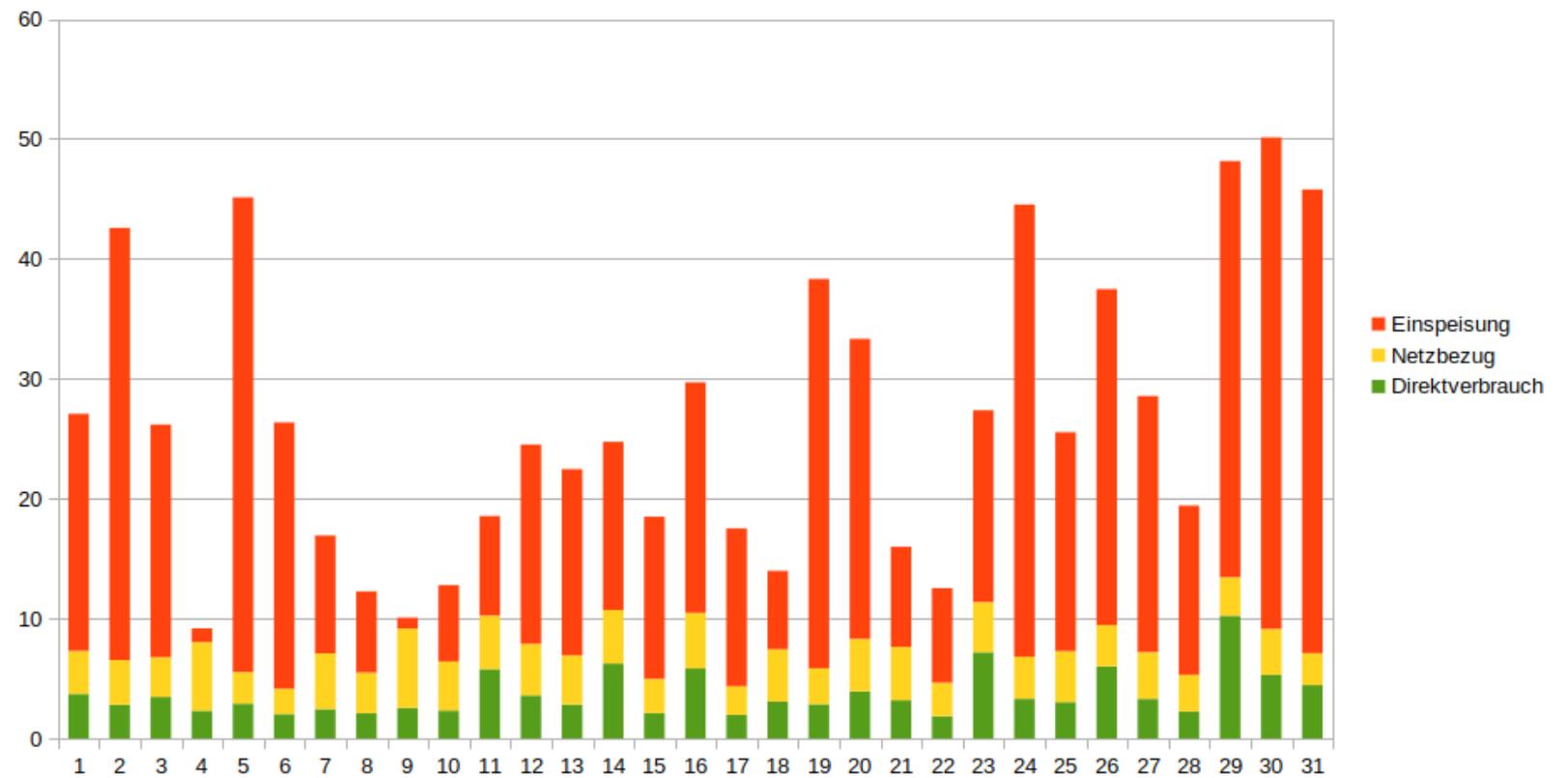


# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

## Warum?

- Gemessener Stromverbrauch und Ertrag im März 2021
- Haus in Steinfurt, 8,99 kWp PV-Anlage (Ost-Süd-West)
- Es gibt jeden Tag genug Strom aus der PV-Anlage, trotzdem wird nur ca. 50% des Bedarfs aus dem selbst erzeugten Strom gedeckt.

März 2021 (PV ohne Speicher)



# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

## Optimierung 1 - Batteriespeicher

---

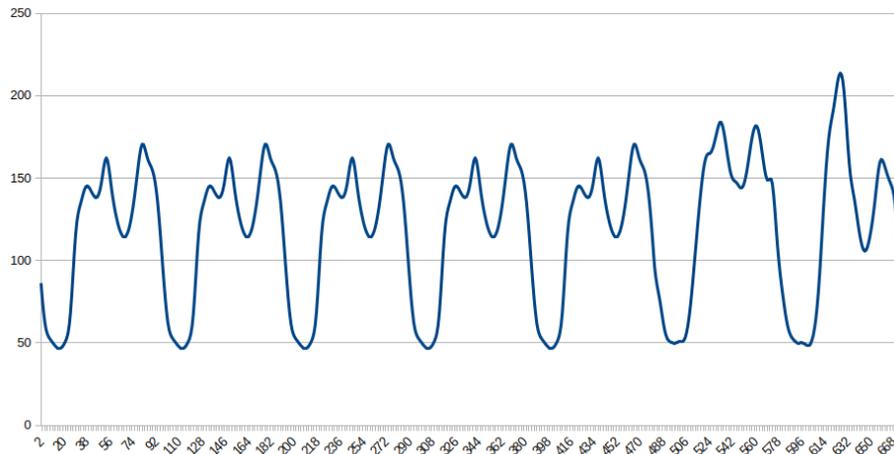
- Wie groß müsste der Speicher sein?
- Welcher Speichertyp sollte gewählt werden?
- Wie viel kostet er? / Lohnt sich das?
- Sicherheit?
- Zusatznutzen?

# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

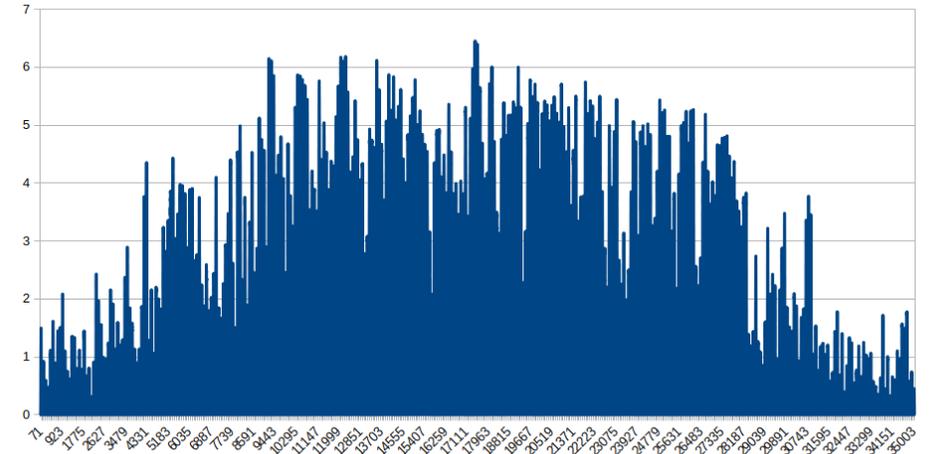
## Batteriespeicher - Auslegung

- Wie groß müsste der Speicher sein?
- Eigene Rechnung:
  - Lastprofil „H0“, skaliert auf Verbrauch von 3500 kWh pro Jahr
  - PV-Anlage mit 9 kWp, Erzeugungsprofil aus 15-Minuten-Daten der deutschen Netzbetreiber
  - „Simulation“ in Tabellenkalkulation mit variabler Batteriegröße (35.040 Zeilen)

Lastprofil H0 (Watt, 1 Woche)



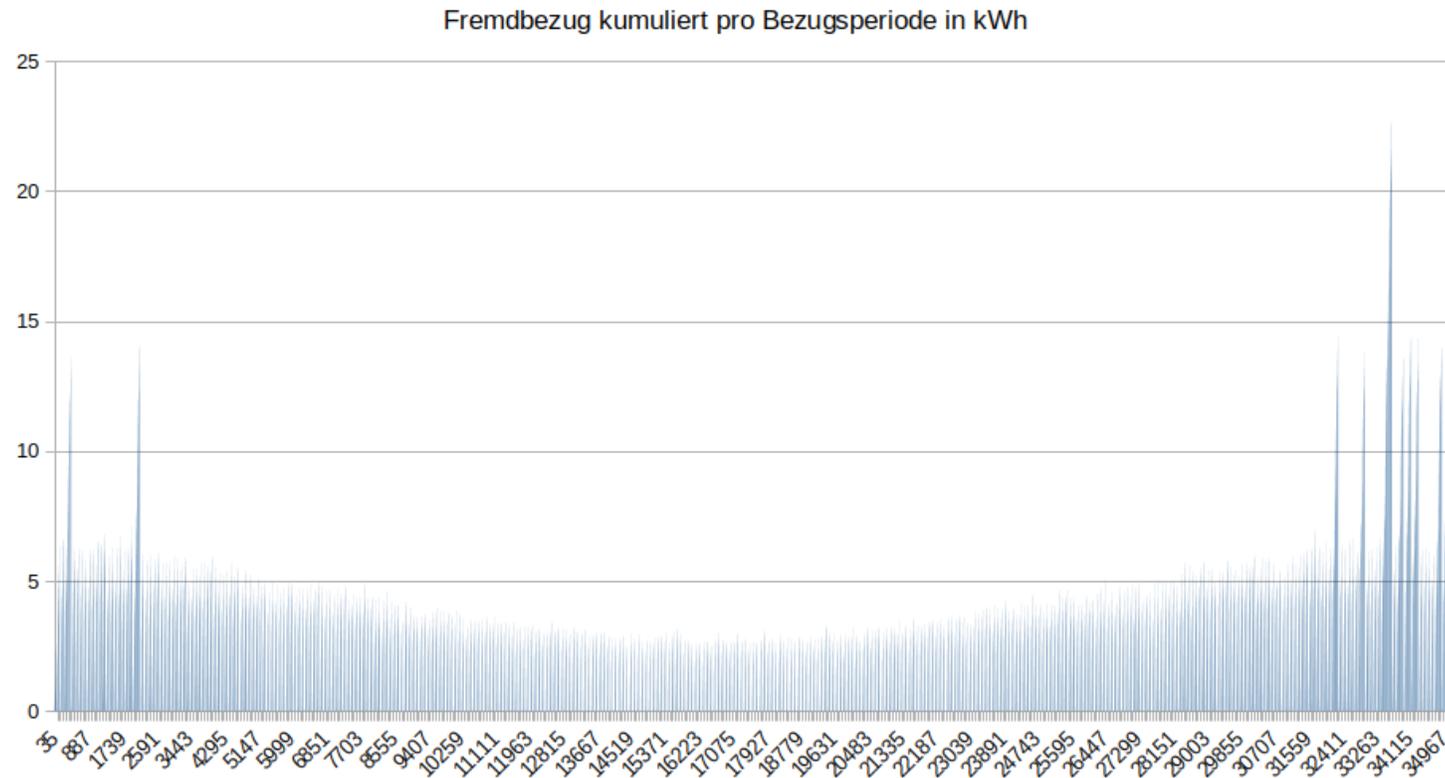
PV-Leistung / kW (Ertrag)



# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

## Batteriespeicher - Auslegung

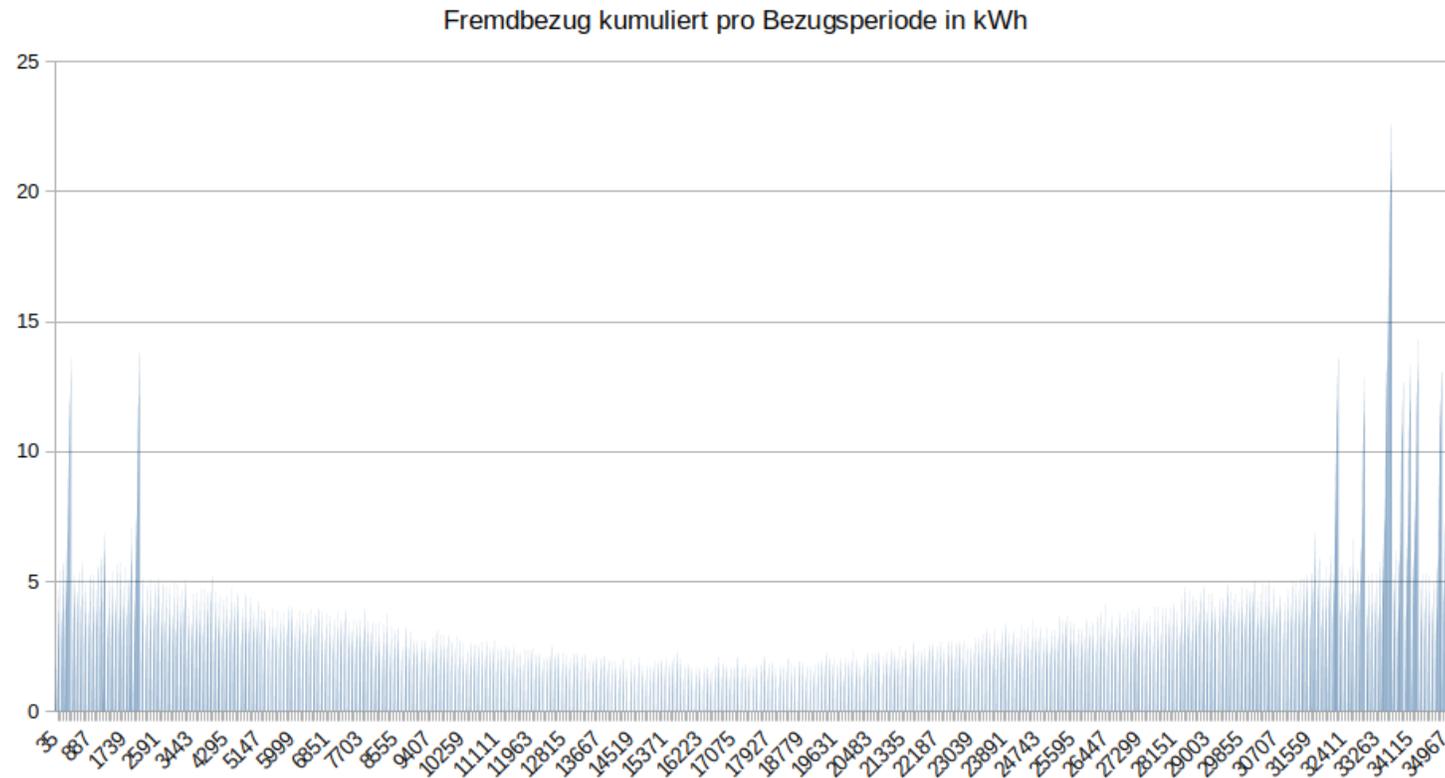
- Simulation: 3500 kWh/a, 9 kWp, keine Batterie → 52,77% aus PV, 1653 kWh aus Netz



# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

## Batteriespeicher - Auslegung

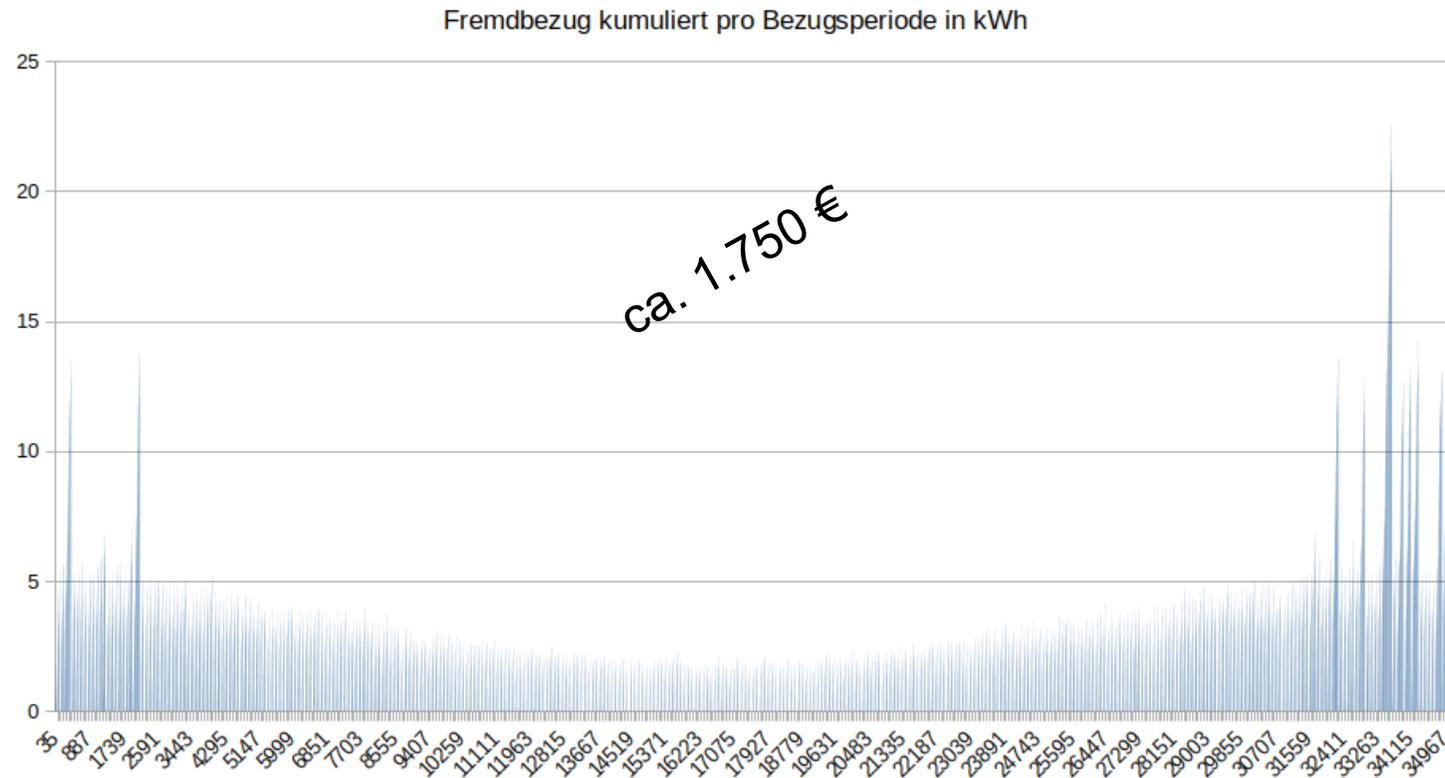
- Simulation: 3500 kWh/a, 9 kWp, 1 kWh Batterie → 61,89% aus PV, 1334 kWh aus Netz



# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

## Batteriespeicher - Auslegung

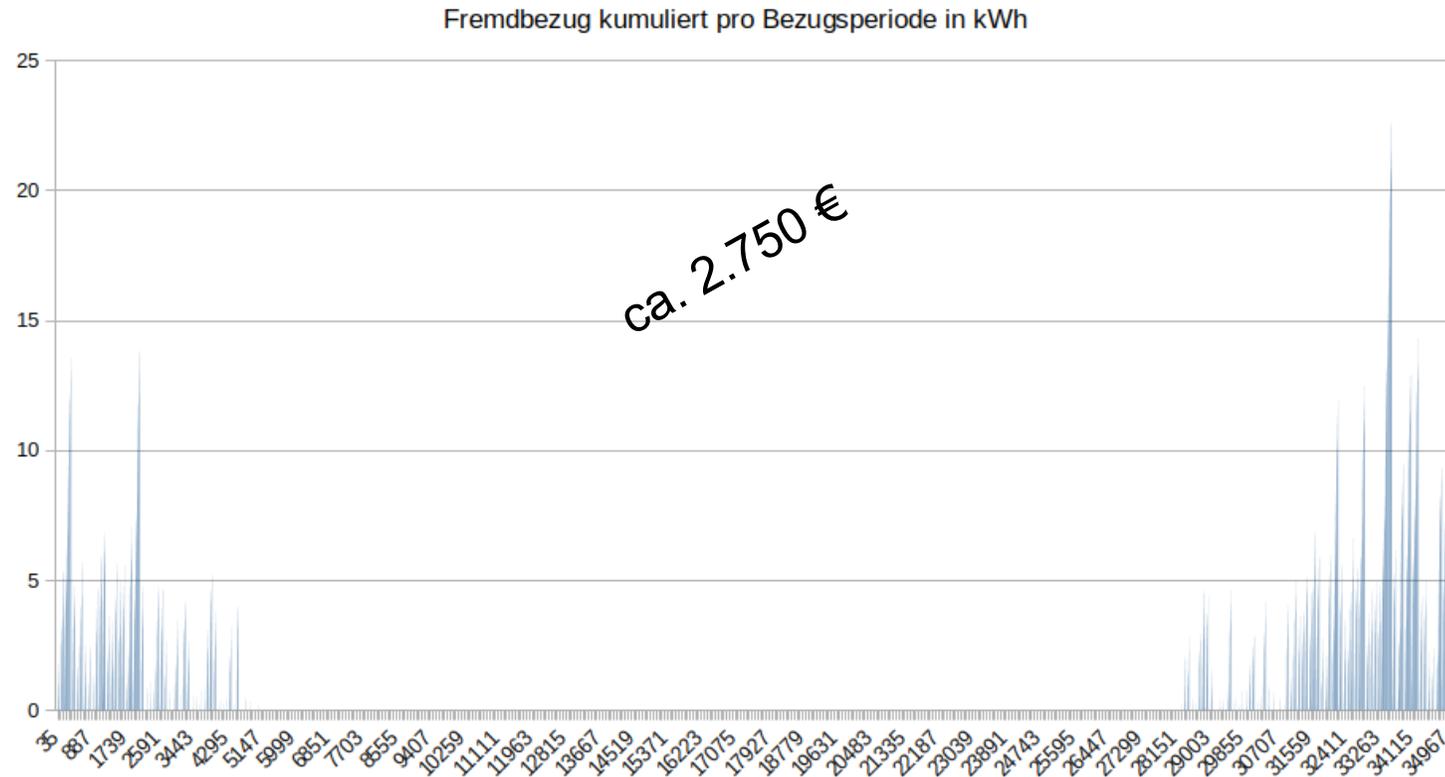
- Simulation: 3500 kWh/a, 9 kWp, 1 kWh Batterie → 61,89% aus PV, 1334 kWh aus Netz



# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

## Batteriespeicher - Auslegung

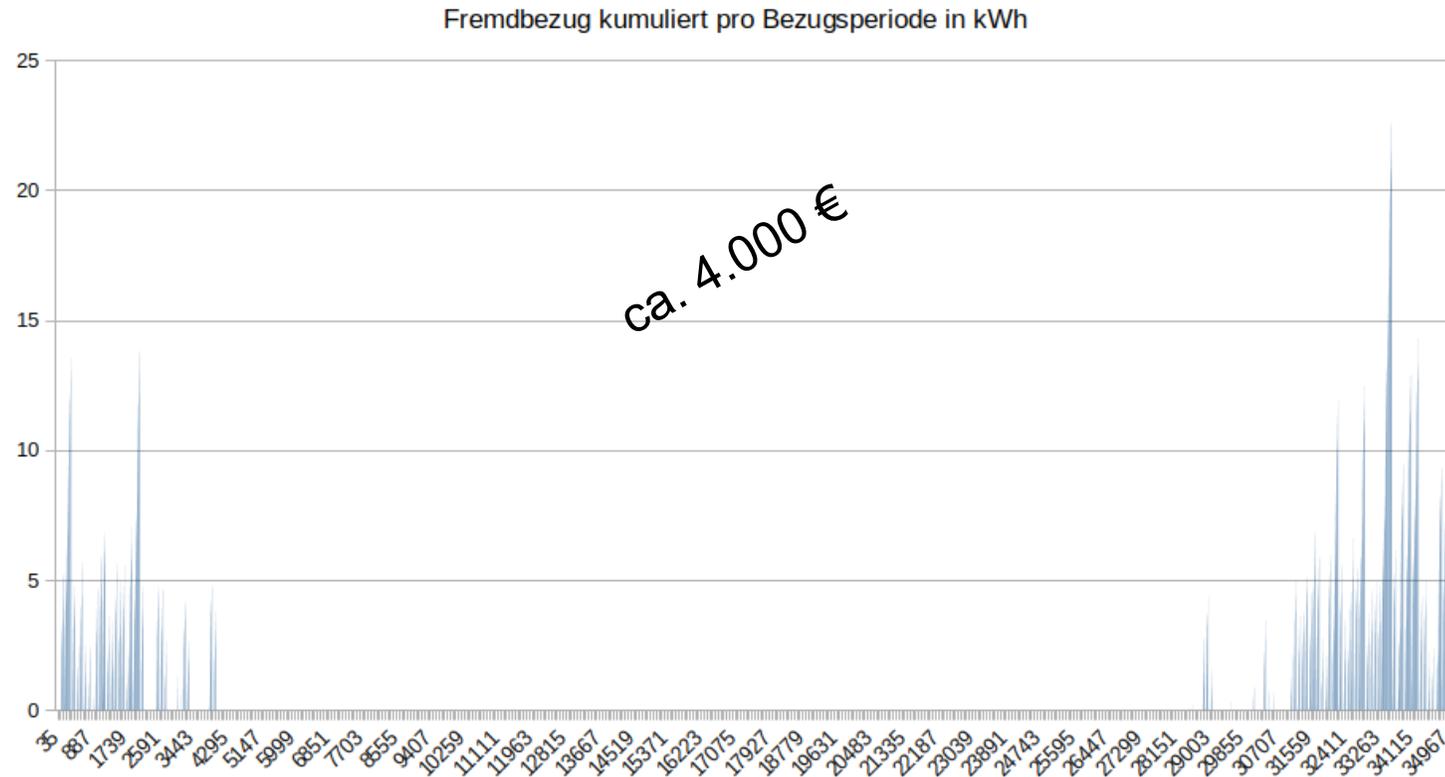
- Simulation: 3500 kWh/a, 9 kWp, 5 kWh Batterie → 87,68% aus PV, 431 kWh aus Netz



# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

## Batteriespeicher - Auslegung

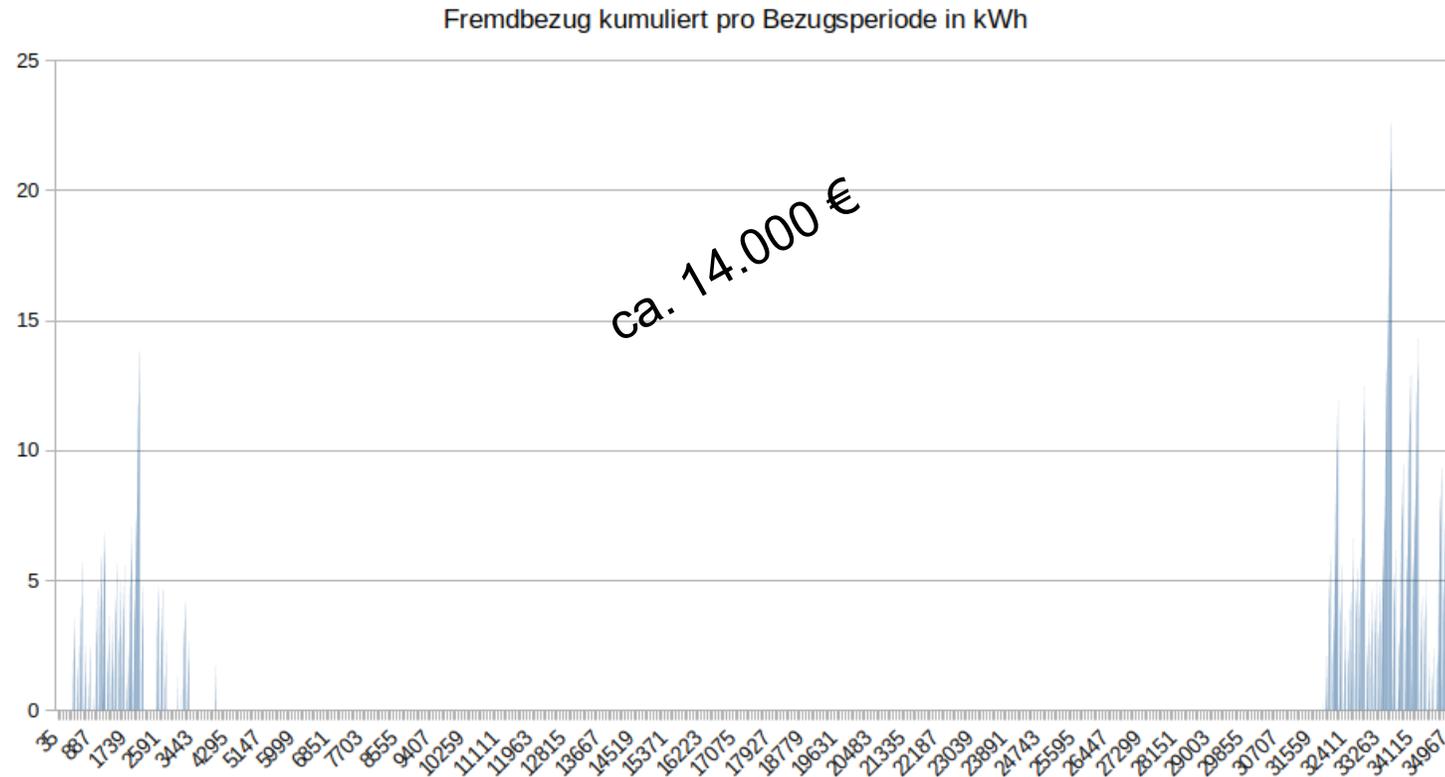
- Simulation: 3500 kWh/a, 9 kWp, 10 kWh Batterie → 89,38% aus PV, 372 kWh aus Netz



# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

## Batteriespeicher - Auslegung

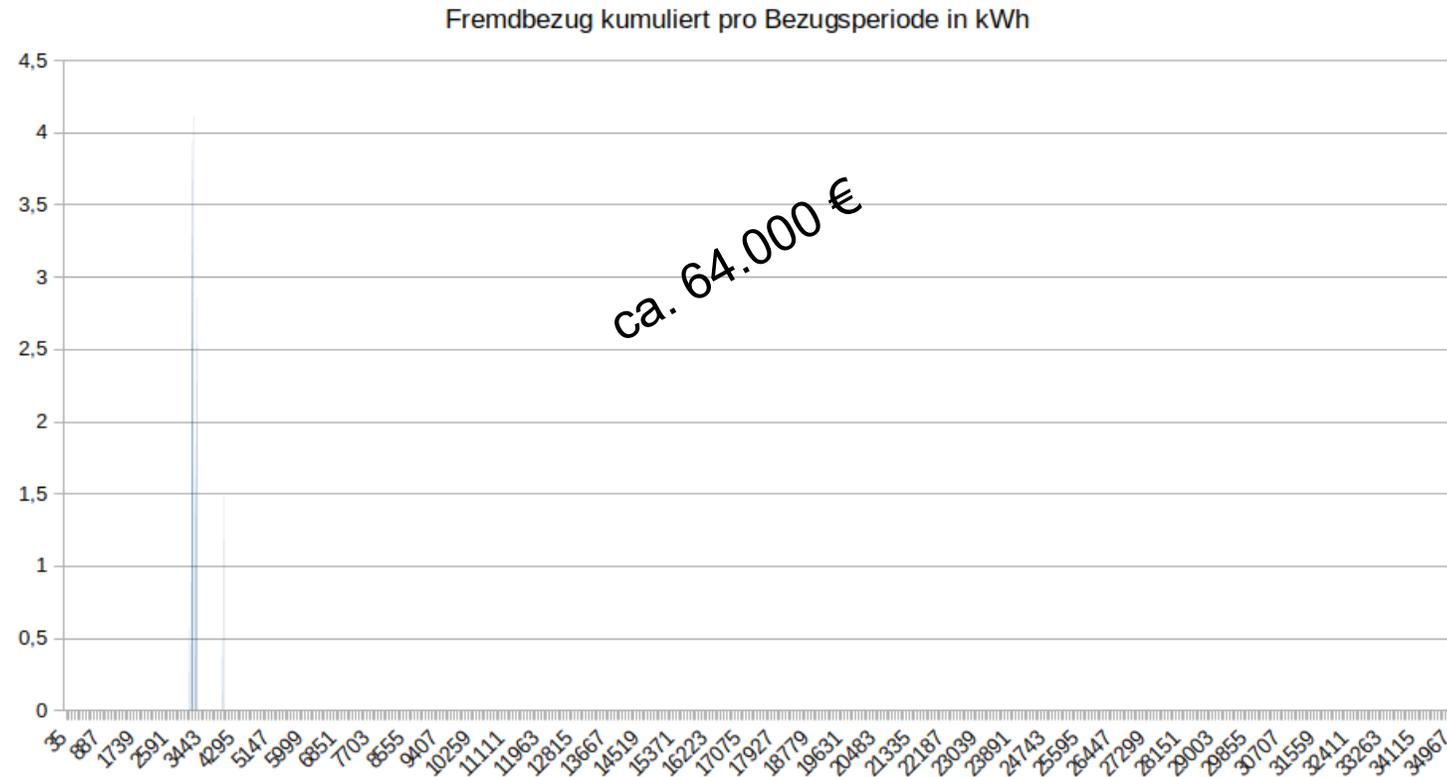
- Simulation: 3500 kWh/a, 9 kWp, 50 kWh Batterie → 91,75% aus PV, 289 kWh aus Netz



# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

## Batteriespeicher - Auslegung

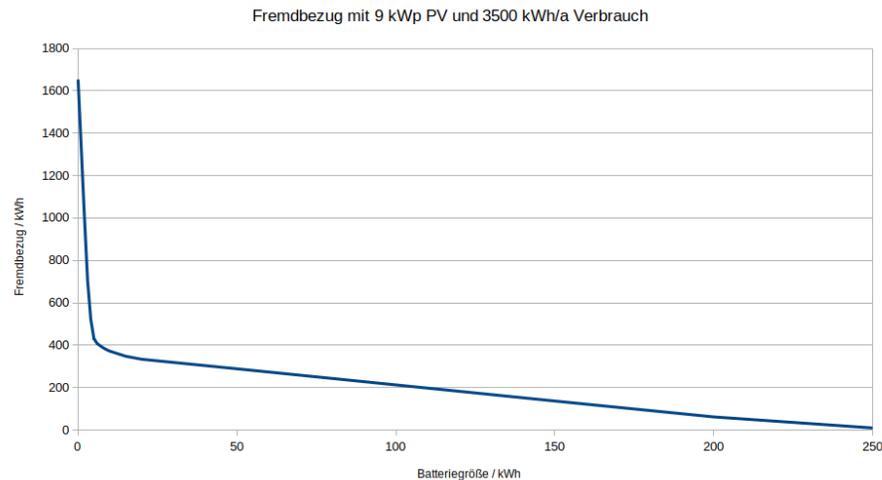
- Simulation: 3500 kWh/a, 9 kWp, 250 kWh Batterie → 99,72% aus PV, 10 kWh aus Netz



# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

## Batteriespeicher - Auslegung

- Simulation:  
3500 kWh/a, 9 kWp
- Kosten:  
250 €/kWh + 1.500 € Wechselrichter  
(15 Jahre Lebensdauer, nur Material!)



Größe Batterie / kWh	Netzbezug / kWh	Kosten Batterie / €	Kosten Batterie / ct/kWh
0	1653	0	0
1	1334	1750	36,6
2	1007	2000	20,6
3	706	2250	15,8
4	522	2500	14,7
5	431	2750	15,0
6	408	3000	16,1
7	397	3250	17,3
8	387	3500	18,4
9	379	3750	19,6
10	372	4000	20,8
15	348	5250	26,8
20	334	6500	32,9
50	289	14000	68,4
100	213	26500	122,7
150	137	39000	171,5
200	62	51500	215,8
250	10	64000	259,7

# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

## Batteriespeicher - Kosten

- Kosten:  
250 €/kWh + 1.500 € Wechselrichter (nur Material!)
- Ergebnis hier: Speicher kostet z.B. 15 ct/kWh
- Es kommt dazu:
  - Fehlende Einspeisevergütung (ca. 8 ct/kWh)
  - Verluste (ca. 25%)
  - Installation (?)
- → Reale Kosten 25,7 ct/kWh + X, Ersparnis von ca. 32 ct/kWh (Strompreis)
- → Gewinn von 1.100 € in 15 Jahren

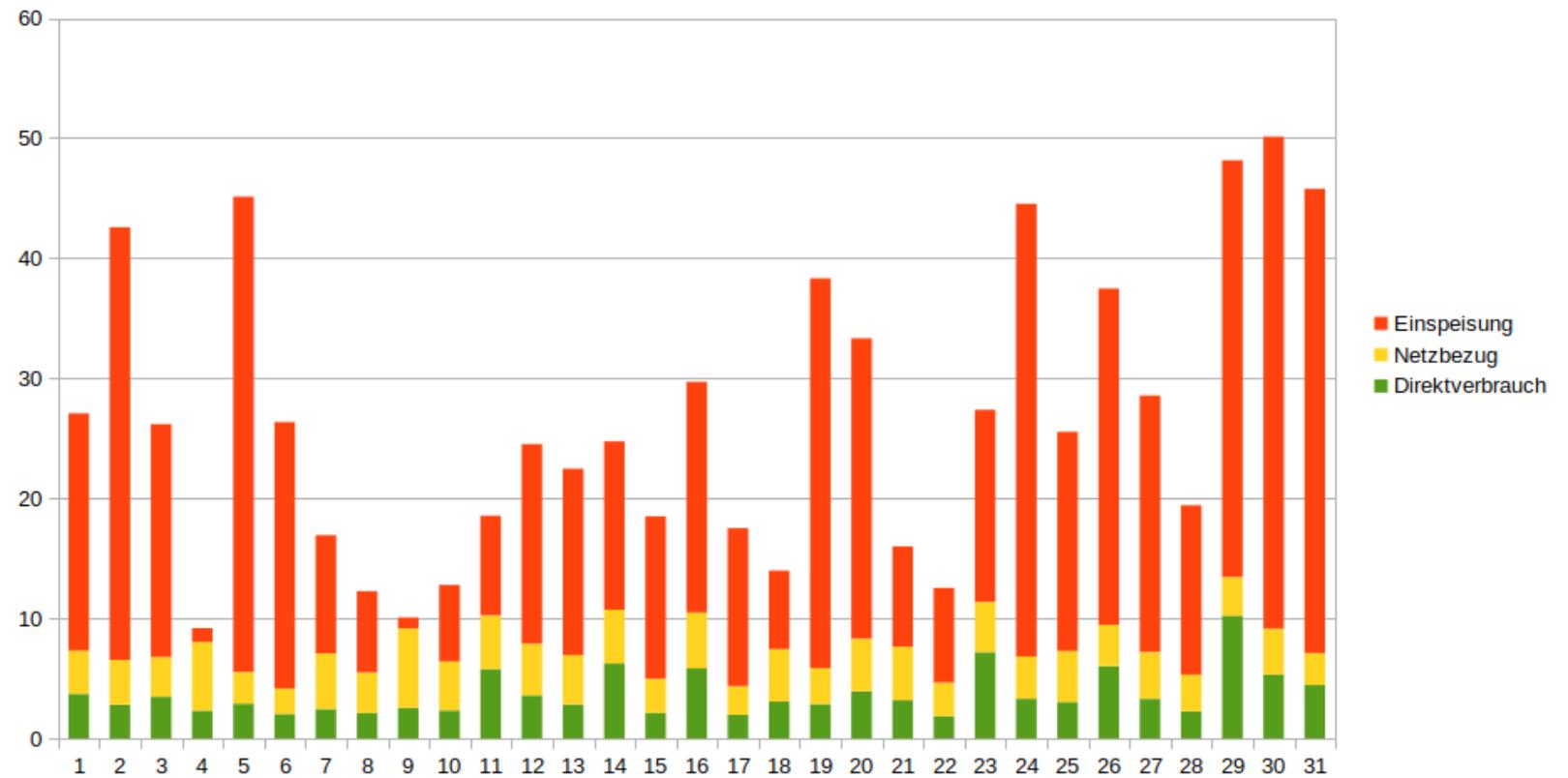
Größe Batterie / kWh	Netzbezug / kWh	Kosten Batterie / €	Kosten Batterie / ct/kWh
0	1653	0	0
1	1334	1750	36,6
2	1007	2000	20,6
3	706	2250	15,8
4	522	2500	14,7
5	431	2750	15,0
6	408	3000	16,1
7	397	3250	17,3
8	387	3500	18,4
9	379	3750	19,6
10	372	4000	20,8
15	348	5250	26,8
20	334	6500	32,9
50	289	14000	68,4
100	213	26500	122,7
150	137	39000	171,5
200	62	51500	215,8
250	10	64000	259,7

# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

## Rückblick

- Gemessener Stromverbrauch und Ertrag im März 2021
- Haus in Steinfurt, 8,99 kWp PV-Anlage (Ost-Süd-West)
- Es gibt jeden Tag genug Strom aus der PV-Anlage, trotzdem wird nur ca. 50% des Bedarfs aus dem selbst erzeugten Strom gedeckt.

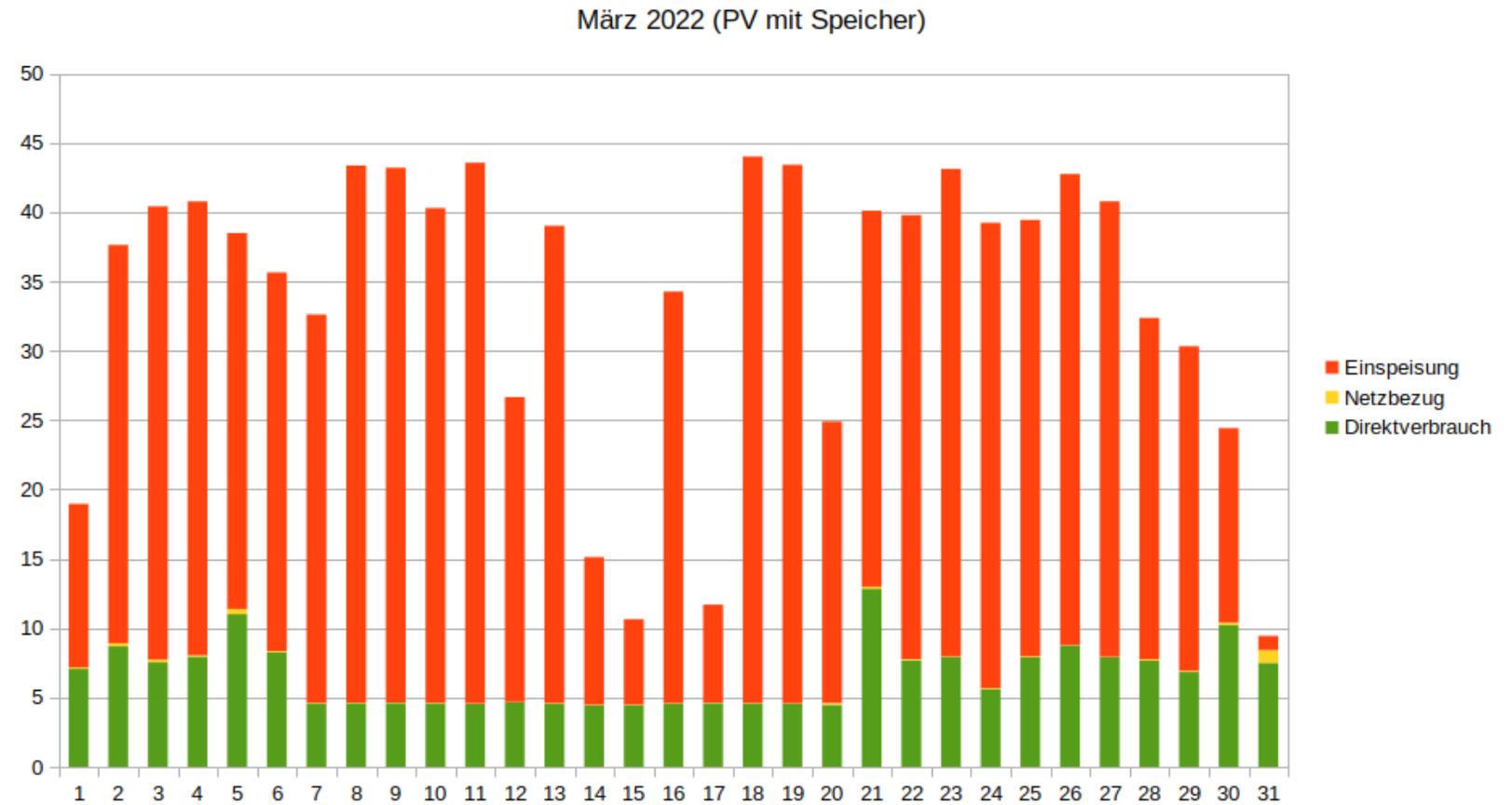
März 2021 (PV ohne Speicher)



# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

## Optimierung mit Batteriespeicher - Ergebnis

- Gemessener Stromverbrauch und Ertrag im März 2022
- Haus in Steinfurt, 8,99 kWp PV-Anlage (Ost-Süd-West)  
**Batterie 7 kWh / 3 kW**
- Kaum noch Netzbezug, fast 100% Deckung des Eigenbedarfs an Strom.



# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

## Optimierung mit Batteriespeicher - Speichertyp

---

- Bleibatterie
  - Kosten ca. 120 €/kWh, ca. 400 Zyklen bei 50% Entladung
  - → Kosten liegen dann bei 240 €/kWh
  - Lebensdauer in obiger Simulation mit 5 kWh **ca. 2 Jahre!**
- LiFePO<sub>4</sub> (Lithium-Eisenphosphat)
  - Kosten ca. 250 €/kWh, ca. 6000 Zyklen bei 95% Entladung
  - → Kosten effektiv ca. 265 €/kWh
  - Lebensdauer in obiger Simulation mit 5 kWh ca. 24 Jahre (15 Jahre garantiert)
- Li-NMO (Lithium-Nickel-Mangan, Standard in Laptops, Handys, Autos, ...)
  - Kosten etwas geringer als LiFePO<sub>4</sub>, Lebenserwartung auch, **instabil bei Fehlern → Feuer!**

# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

## Optimierung mit Batteriespeicher – weitere Speichertypen

---

- Na-Ionen-Batterie
  - Vermutlich für stationären Speicher gut geeignet
  - Derzeit außerhalb China noch schlecht verfügbar
  - Schwerer als Li-Ion, aber auch günstiger
- Mg-Ionen-Batterie
  - Forschung in China
  - Vermutlich Nachfolger von Li-Ionen mit hoher Energiedichte
- Wasserstoff
  - Wirkungsgrad als Stromspeicher extrem schlecht (derzeit <20%), daher nur für andere Anwendungen (Wirkungsgrad Strom zu Wasserstoff OK → Ersatz für Erdgas, Industrie, ...)

# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

## Optimierung mit Batteriespeicher – Zusammenfassung

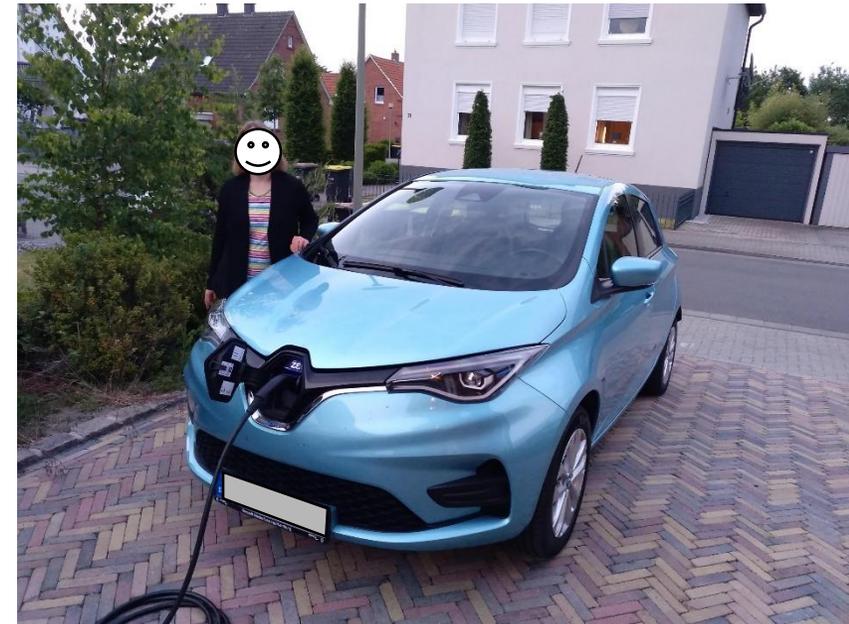
---

- Batteriespeicher lohnt sich derzeit immer noch nur bei günstigem Angebot und richtiger Auslegung.
- Speicher mit Kleinspannung (48 V) sind viel günstiger als Hochvolt-Speicher (200 V .. 600 V), der Installationsaufwand ist aber höher.
- $\text{LiFePO}_4$  ist derzeit die einzige empfehlenswerte Technologie für Speicher im Wohnhaus.
- Zusatznutzen: Je nach Wechselrichter Notstrom oder Ersatzstrom möglich.
- Klimaschutz: Wegen Speicherverlusten und Belastung bei der Produktion und Entsorgung schädlich, solange der Ertrag aus Erneuerbaren im gesamten Verbundnetz (ganz Europa) nicht höher ist als der Verbrauch!

# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

## Was geht noch?

- Elektroautos haben eine große Batterie (ca. 40 .. 80 kWh).  
→ Integration ins Optimierungskonzept!
- 1. Problem: Wallbox kann nur zwischen 6 A und 32 A pro Phase einstellen.
  - Einphasig: 1,38 kW bis 4,60 kW (max. 20 A einphasig)
  - Dreiphasig: 4,14 kW bis 22,08 kW
  - → Dreiphasiges Laden passt nicht zur Erzeugung einer kleinen PV-Anlage!
- 2. Problem: Keine einheitliche Kommunikationsschnittstelle!
  - Alles vom selben Hersteller oder
  - Protokollkonverter oder eigene Steuerung!

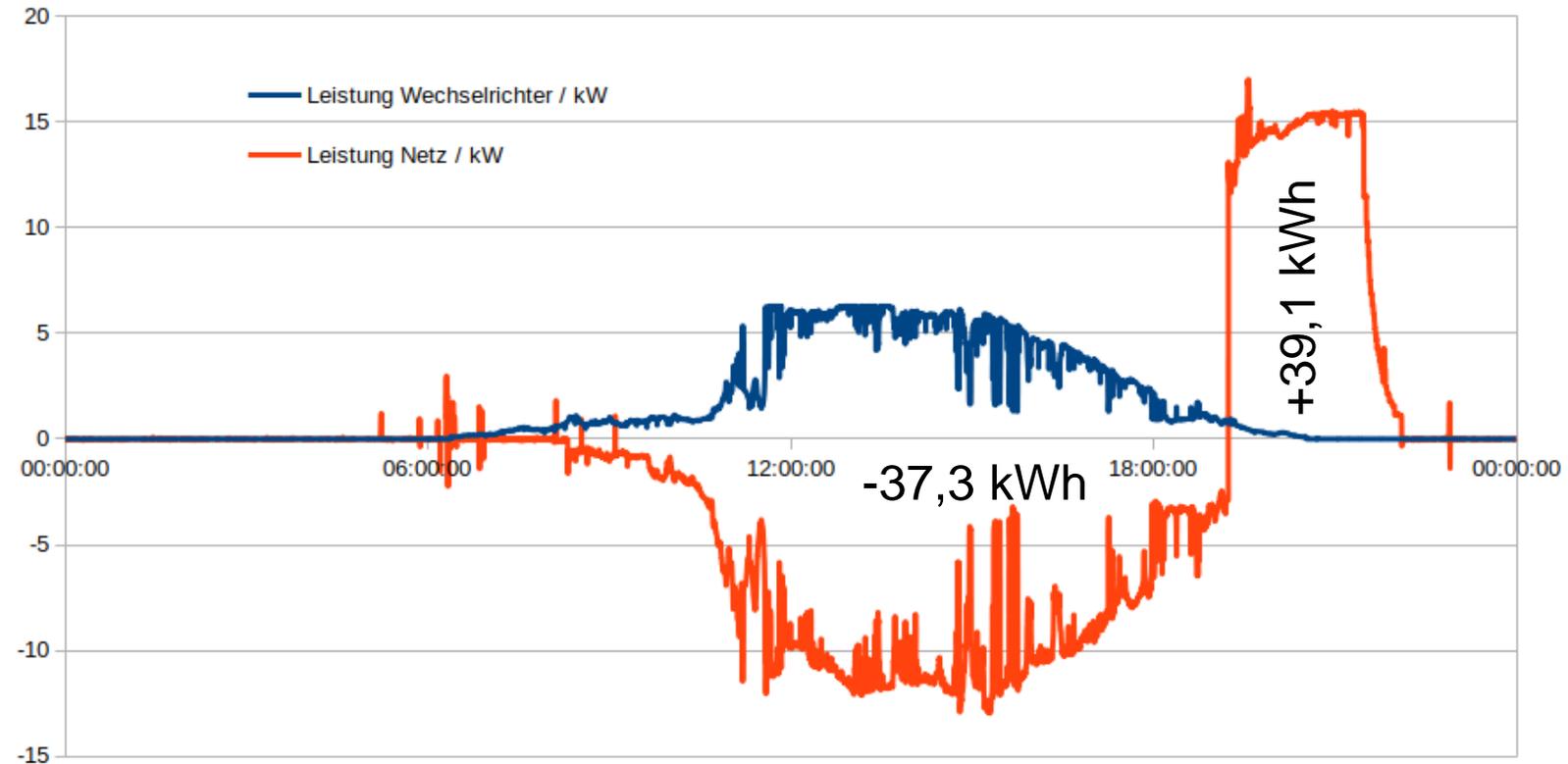


# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

Optimierung mit Batteriespeicher und E-Auto – So nicht!

- Gemessener Stromverbrauch am 15.05.2023
- Haus in Steinfurt, 29,815 kWp PV-Anlage (Ost-Süd-West-Nord)  
Batterie 7 kWh / 3 kW  
Renault Zoe 52 kWh (ca. 600 km/Woche)
- Auto kommt am Abend nach Hause und wird gleich aufgeladen.

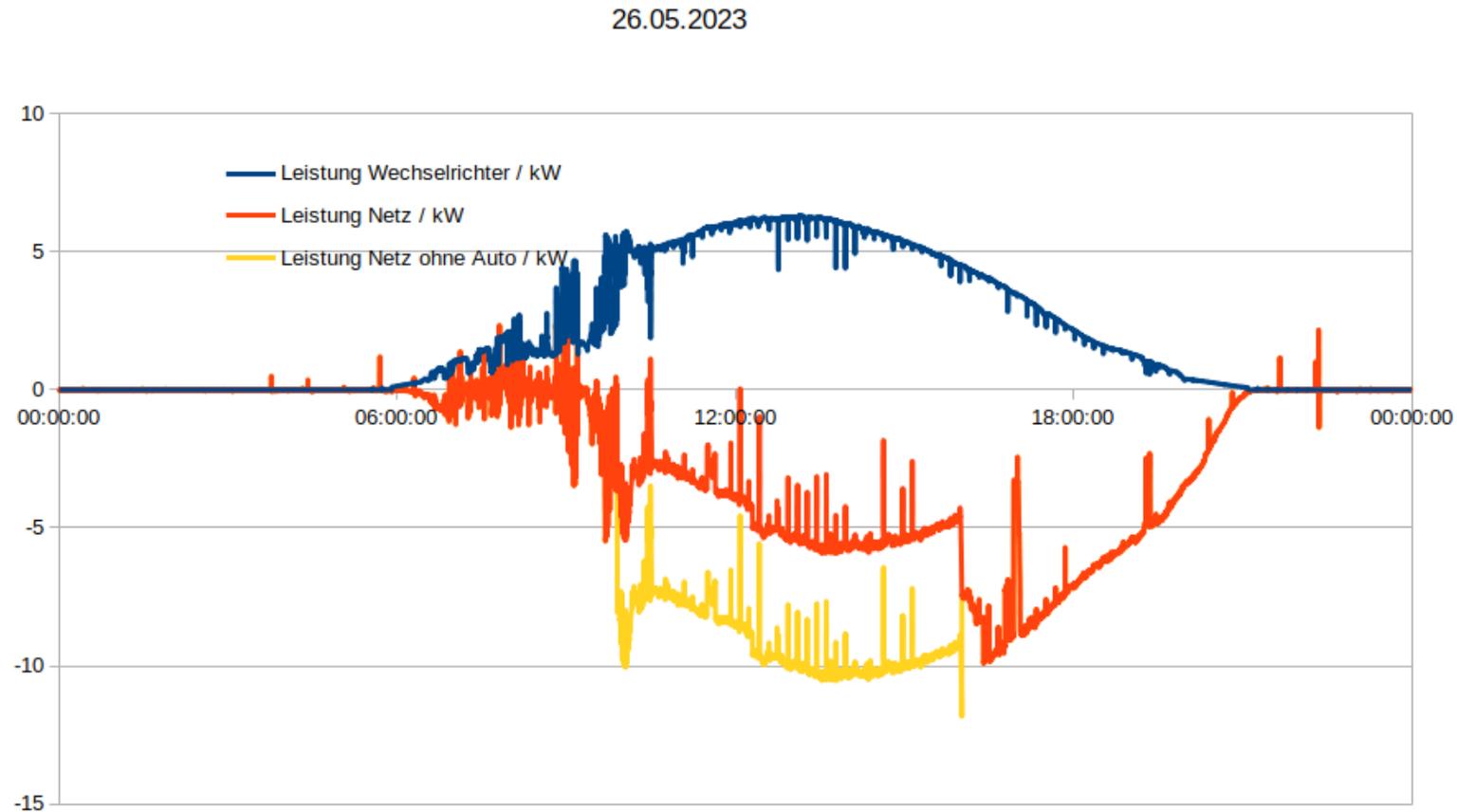
15.05.2023



# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

## Optimierung mit Batteriespeicher und E-Auto – So!

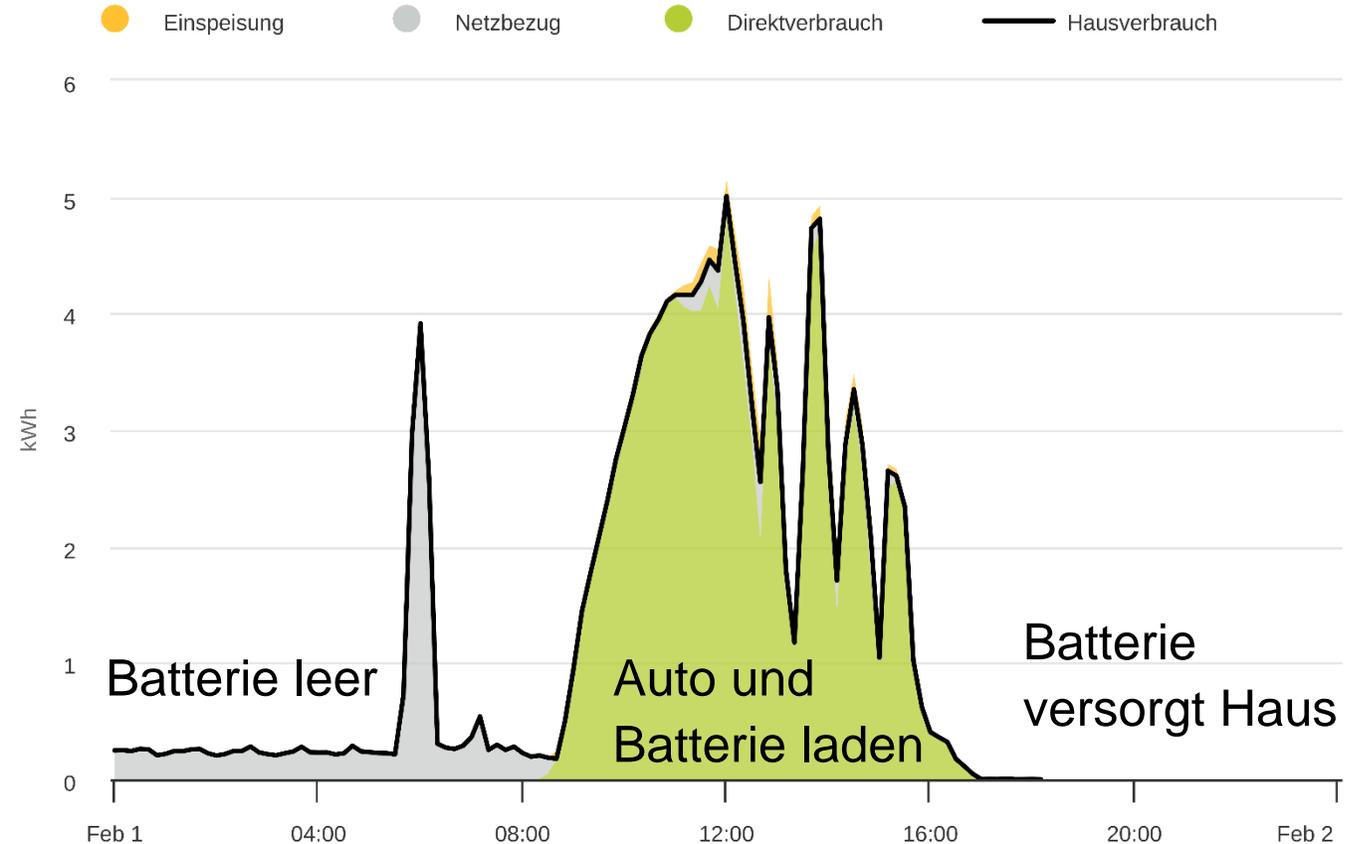
- Gemessener Stromverbrauch am 26.05.2023
- Haus in Steinfurt, 29,815 kWp PV-Anlage (Ost-Süd-West-Nord)  
Batterie 7 kWh / 3 kW  
Renault Zoe 52 kWh (ca. 600 km/Woche)
- Auto wird von der Steuerung zugeschaltet sobald die PV-Leistung ausreicht.
- Ertrag > 100 kWh, Auto nur ~40 kWh



# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

## Optimierung mit Batteriespeicher und E-Auto – Oder so!

- Gemessener Stromverbrauch am 01.02.2024
- Haus in Steinfurt, 29,815 kWp PV-Anlage (Ost-Süd-West-Nord)  
Batterie 7 kWh / 3 kW  
Renault Zoe 52 kWh (ca. 600 km/Woche)
- Ladeleistung des Autos wird von der Steuerung an die Erzeugung angepasst.
- Batterie wird auch voll.



# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

## Optimierung mit Batteriespeicher und E-Auto - Zusammenfassung

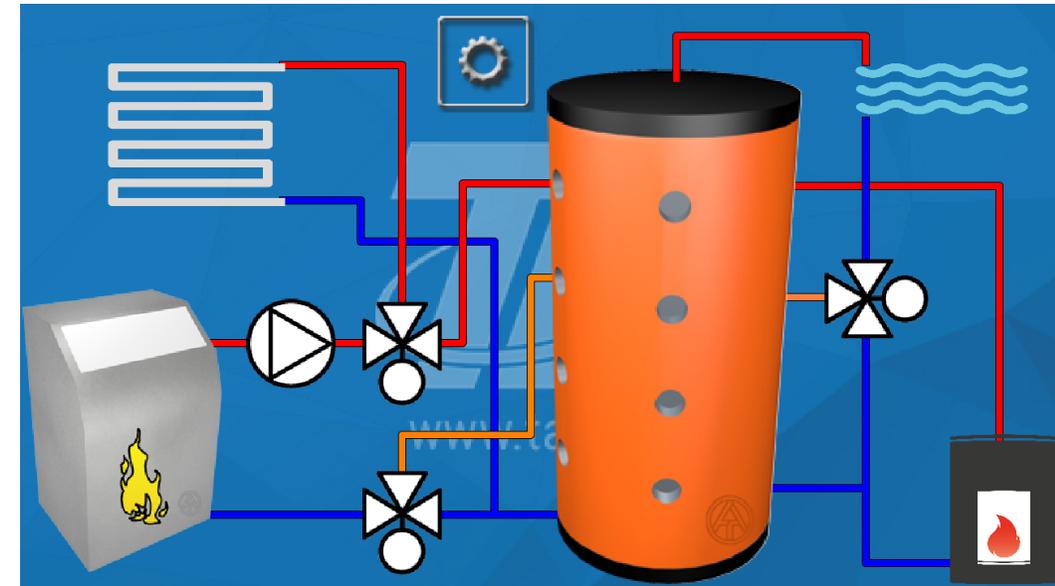
---

- Anpassung der Ladeleistung eines E-Autos an die PV-Leistung wegen fehlender Standardisierung der Kommunikation zwischen Wechselrichter und Wallbox nicht trivial.
- Ladung des Autos kostet ohne Steuerung ca. 12,80 €, mit Steuerung (und genug Sonne) nur 3,20 €. (Für ca. 200 km Fahrt.)
- Zur Info: Alle PKWs in Deutschland fahren pro Jahr insgesamt  $9,12 \cdot 10^{11}$  km, bei 20 kWh/100km sind das 182,4 TWh pro Jahr. Ca. 650 TWh Strom werden pro Jahr in Deutschland verbraucht, die Umstellung aller PKWs auf Elektroautos würde also zu einem Mehrverbrauch von 28% führen.
- Wenn alle knapp 50 Mio PKWs in Deutschland aber gleichzeitig mit 11 kW laden würden, würde das normale Maximum der Erzeugungsleistung aber zu 660% überschritten werden.  
→ Steuerung der Wallboxen notwendig!

# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

## Geht noch mehr?

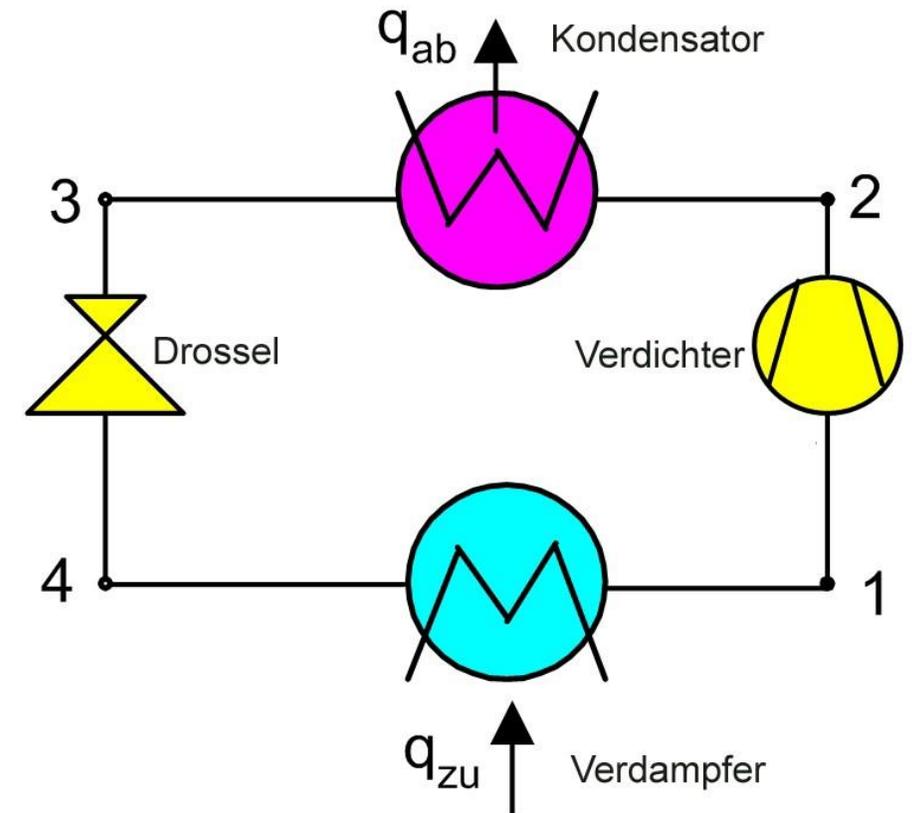
- Im Sommer ist noch viel Strom übrig, manchmal auch in der Übergangszeit (Frühling / Herbst).
- Ein Pufferspeicher für 800l Warmwasser ist in der Heizungsanlage schon vorhanden.
- Eine Wärmepumpe macht aus Strom Wärme (oder Kälte), macht das Sinn?
- Ein Pufferspeicher kostet nur ca. 33 €/kWh, gegenüber >250 €/kWh bei der Batterie.



# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

## Wärmepumpe

- In der Wärmepumpe wird ein Kältemittel bei zwei verschiedenen Drücken in einem Kreislauf geführt.
- Bei niedrigem Druck verdampft das Kältemittel bei niedriger Temperatur und nimmt dort Wärme auf, bei hohem Druck kondensiert das Kältemittel bei hoher Temperatur und gibt die Wärme wieder ab.
- Die Leistungszahl gibt an, wie viel mehr Wärme „raus kommt“ als Strom „rein geht“.
- Theoretische Grenze:  $\varepsilon = \frac{Q_{ab}}{W_{zu}} < \frac{T_{ab}}{T_{ab} - T_{zu}}$  (nach Carnot)



Wikimedia Commons, Volker Sperlich, CC BY-SA 2.0

# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

## Wärmepumpe - Leistungszahl

- Die tatsächliche Leistungszahl liegt deutlich unter dem theoretischen Maximalwert.

Umgebungstemperatur	Temperatur Wärmeabgabe	Leistungszahl gemessen	max. Leistungszahl
-15 °C	35 °C	2,5	6,2
-7 °C	35 °C	3,2	7,3
+2 °C	35 °C	3,7	9,3
+10 °C	35 °C	4,6	12,3

Messwerte Wolf BWL-1-10 nach [https://www.ntb.ch/fileadmin/NTB\\_Institute/IES/pdf/Projekte\\_WPZ/PruefResLW170918.pdf](https://www.ntb.ch/fileadmin/NTB_Institute/IES/pdf/Projekte_WPZ/PruefResLW170918.pdf)

- Eine hohe Temperatur der Wärmequelle und eine niedrige Temperatur der Wärmesenke sind wünschenswert!

# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

## Wärmepumpe – Auswahl einer Wärmepumpe

- Es gibt viele verschiedene Wärmepumpen zu kaufen. Welche ist die richtige?

Wärmequelle	Wärmesenke		
	Luft	Wasser (Heizung)	Wasser (Brauchwasser)
Luft	Luft-Luft-WP	Luft-Wasser-WP	Luft-Wasser-WP (Effizienz!!)
Boden (Fläche)	-	Wasser-Wasser-WP	Wasser-Wasser-WP (Effizienz!)
Boden (Tiefenbohrung)	-	Sole-Wasser-WP	Sole-Wasser-WP

- Luft-Luft-Wärmepumpen sind als Klimaanlage bekannt und sehr einfach zu installieren.
- Luft-Wasser-Wärmepumpen können an eine Heizungsanlage mit geringer Vorlauftemperatur angeschlossen werden, am besten mit einer Fußbodenheizung.
- Wärmepumpen mit einem Kollektor im Erdboden oder einer Tiefenbohrung sind noch aufwändiger zu installieren, haben aber wegen der höheren Quellentemperatur eine größere Leistungszahl, vor allem im Winter.

# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

## Wärmepumpe – Kältemittel

- Auch beim verwendeten Kältemittel gibt es Unterschiede.

Kältemittel	Name	GWP	Kommentar
R410A	-	2088	Mischung aus R32 und R125
R134a	Tetraflourethan	1430	Älteres Kältemittel, schlechtere Eigenschaften als R410A und R32
R32	Diflourmethan	677	Brennbar, geringes GWP, gute Leistungszahlen
R290	Propan	3	Sehr brennbar, derzeit am häufigsten in WP verwendet
R774	CO <sub>2</sub>	1	Nicht brennbar, Druck sehr hoch, vermutlich bald in allen PKWs

- Solange das Kältemittel nicht entweicht, ist das GWP (Global Warming Potential) egal. Aber irgendwann kommt es meistens doch raus...

# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

## Wärmepumpe – Ergebnis

- Hier fiel die Wahl auf eine Luft-Wasser-Wärmepumpe mit dem Kältemittel R32.
- Diese kann im Sommer auch kühlen, über die Fußbodenheizung.

– Vorsicht:  $\varepsilon_{\text{Kältemaschine}} = \frac{Q_{zu}}{W_{zu}} \neq \varepsilon_{\text{Wärmepumpe}} = \frac{Q_{ab}}{W_{zu}}$

Die Wärmepumpe ist nicht die einzige Wärmequelle!  
 Der Gesamtverbrauch des Hauses liegt daher höher.

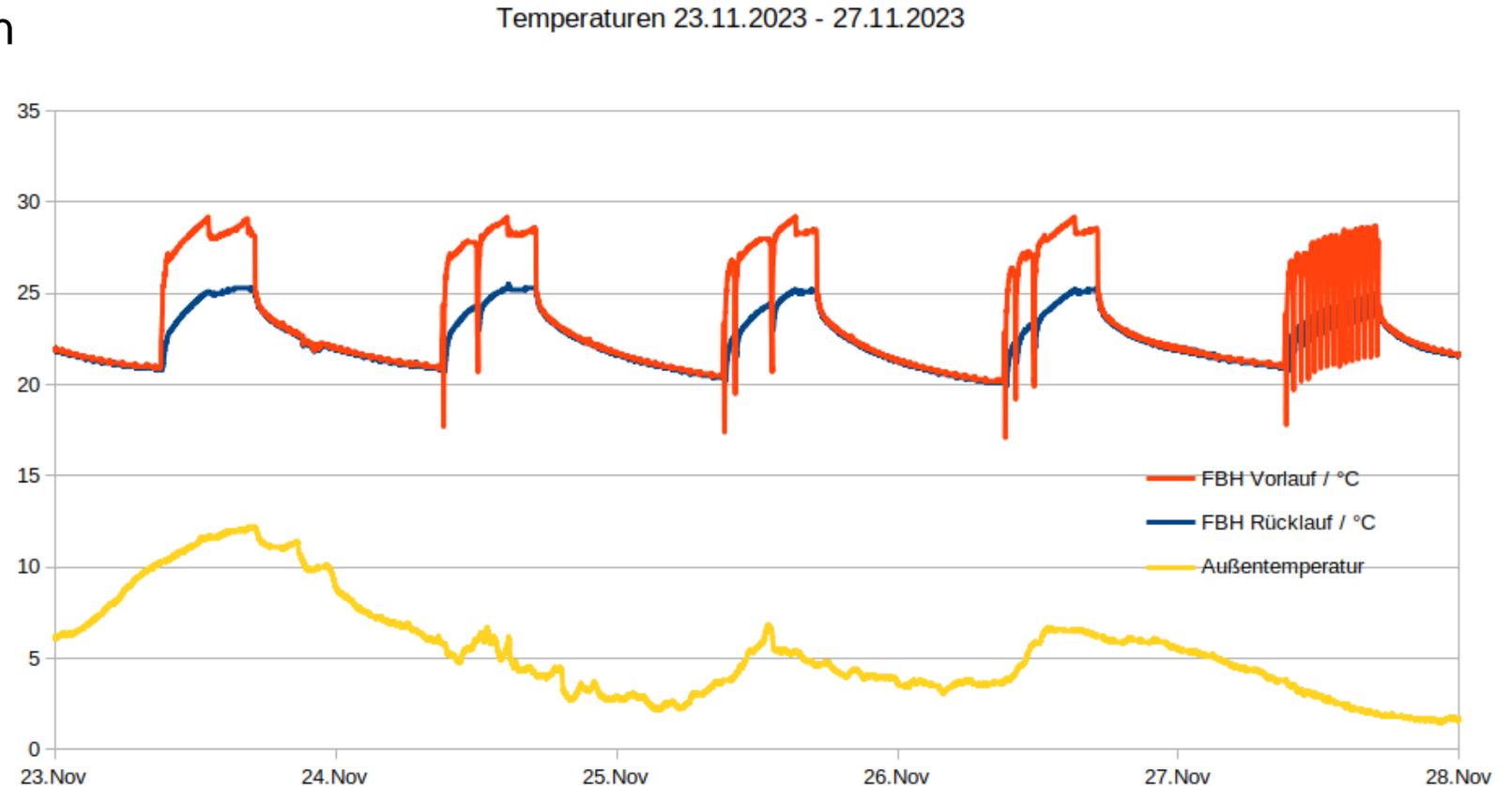
	Strom / kWh	Wärme / kWh	Leistungszahl
Heizen gesamt	573	2481	4,33
Kühlen gesamt	126	1041	8,26

	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember	Januar
Heizen	-	-	-	-	5,40	3,56	4,91	4,34
Kühlen	7,67	8,07	8,47	8,08	-	-	-	-

# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

## Wärmepumpe – Einfluss der Außentemperatur

- Bei niedrigen Außentemperaturen fängt die Wärmepumpe an den Verdampfer (außen) zu enteisen.
- Dazu wird der Kreisprozess umgekehrt, etwas Wärme wird also wieder von innen nach außen gepumpt.
- Das verschlechtert die Leistungszahl.



# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

## Wärmepumpe – Zusammenfassung

---

- In diesem Fall konnte eine Wärmepumpe relativ einfach an die vorhandene Heizungsanlage angeschlossen werden.
- Die erreichten Leistungszahlen entsprechen den Erwartungen für eine Luft-Wasser-WP.
- Das Gebäude an sich erwies sich in diesem Fall als ausreichend zur Energiespeicherung zwischen Tag und Nacht, der Pufferspeicher wurde bisher gar nicht genutzt.
- Die verbrauchte Energiemenge zum Kühlen im Sommer ist sehr gering und konnte immer aus der PV-Anlage bezogen werden.
- Im Winter wurde teilweise die noch vorhandene Gasheizung verwendet, wenn die Wetterbedingungen schlechte Leistungszahlen verursachten.

# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

## PV auf der Nordseite – Sinnvoll?

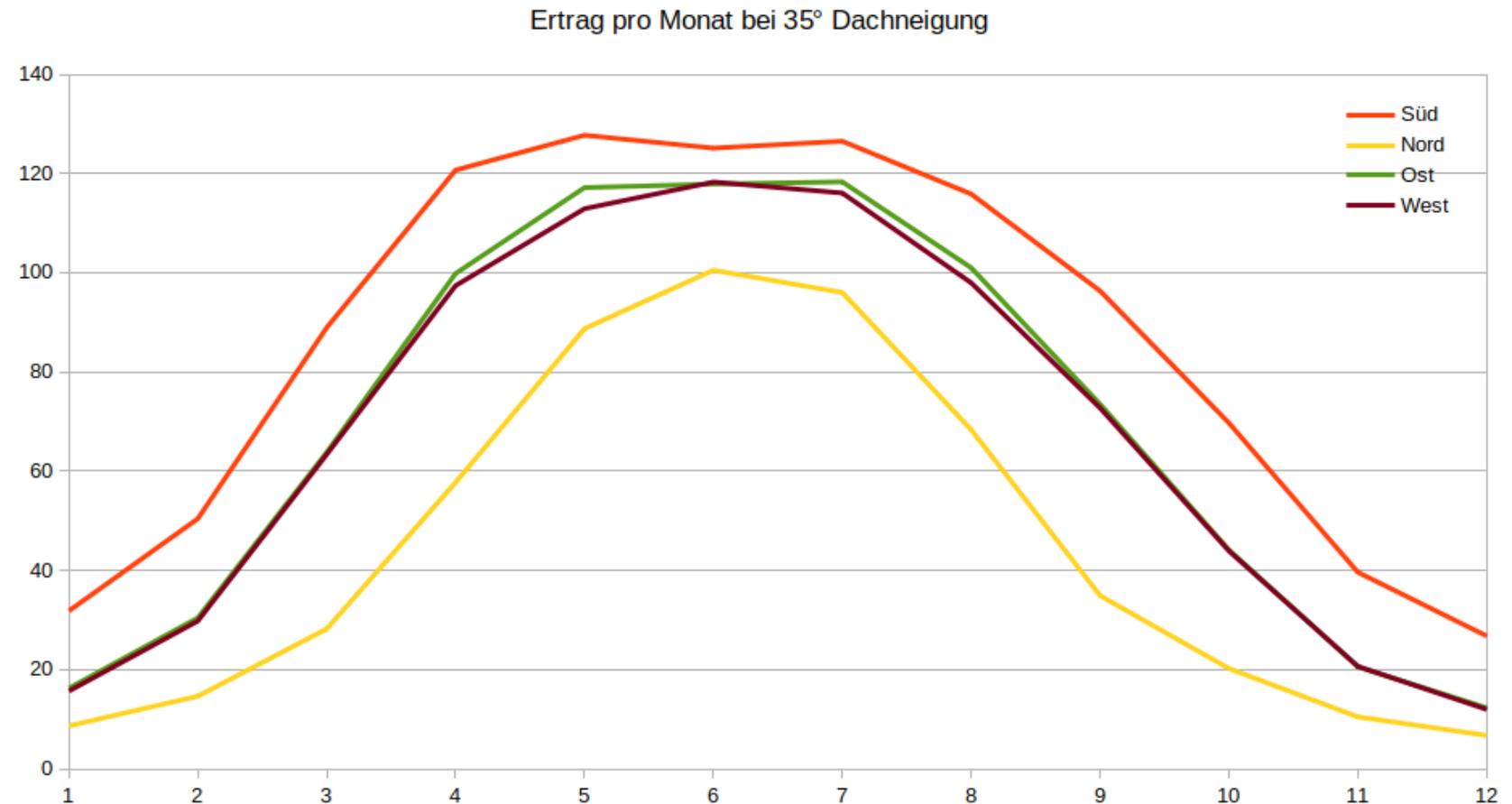
---

- Manchmal gibt es große Dachflächen auf der Nordseite eines Gebäudes. Können diese auch für eine PV-Anlage genutzt werden?
- Die zu erwartenden Erträge können mit dem kostenlosen Online-Tool PVGIS leicht ermittelt werden.  
[https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en)
- Es wird benötigt:
  - Der Standort (auf Karte anklicken).
  - Die zu installierende Generatorleistung (kWp, ca. 0,2 kWp/m<sup>2</sup>).
  - Die Himmelsrichtung der Dachfläche (-90° ist Ost, 0° ist Süd, 90° ist West, 180° ist Nord).
  - Die Dachneigung (0° liegt flach, 90° steht senkrecht).

# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

## PV auf der Nordseite – Simulationsergebnisse

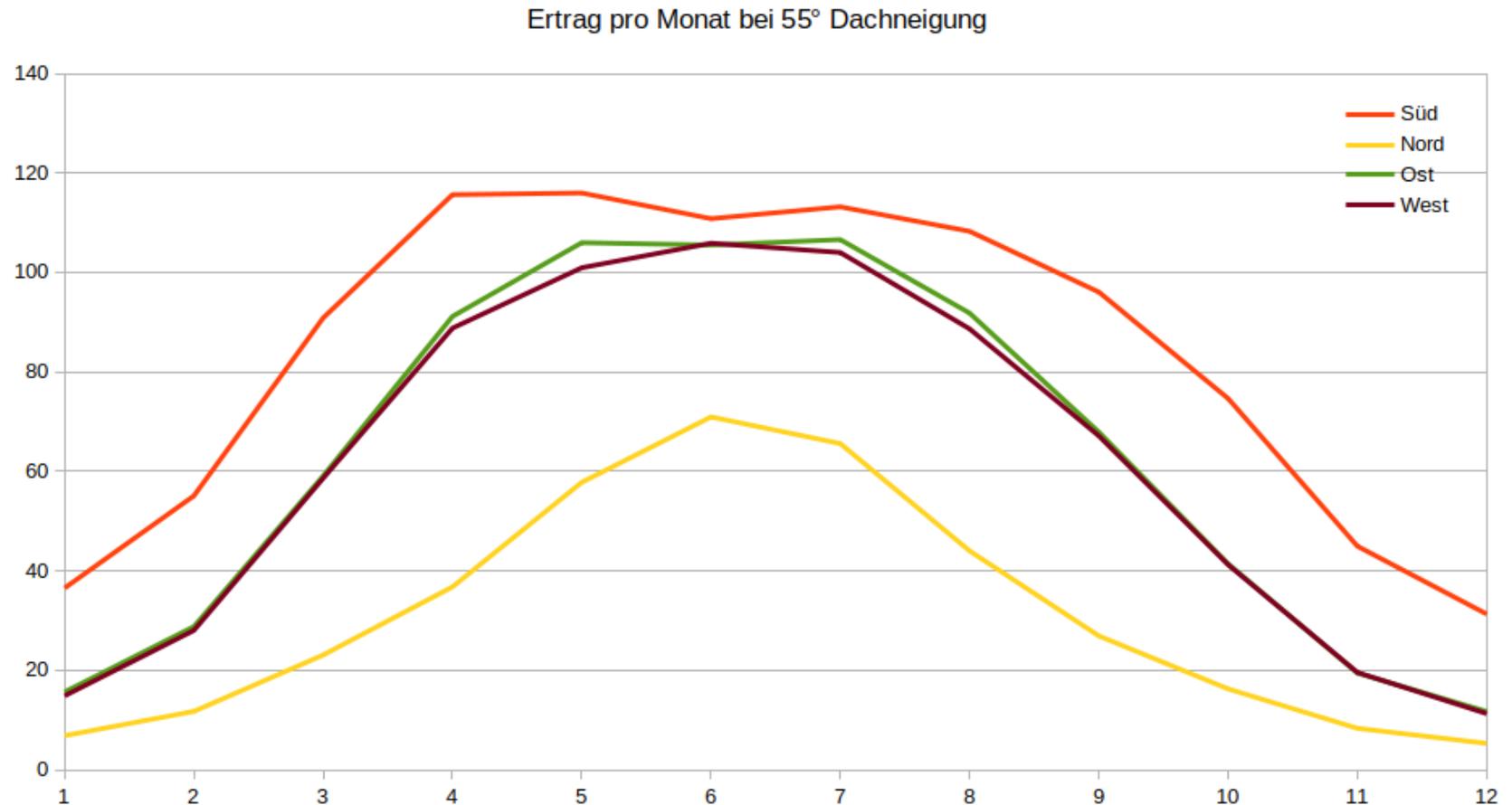
- Zusammenfassung einiger Simulationsergebnisse für eine 1 kWp PV-Anlage in Steinfurt.
- Angegeben sind die monatlichen Erträge in kWh.
- Die Dachneigung beträgt hier 35°.



# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

## PV auf der Nordseite – Simulationsergebnisse

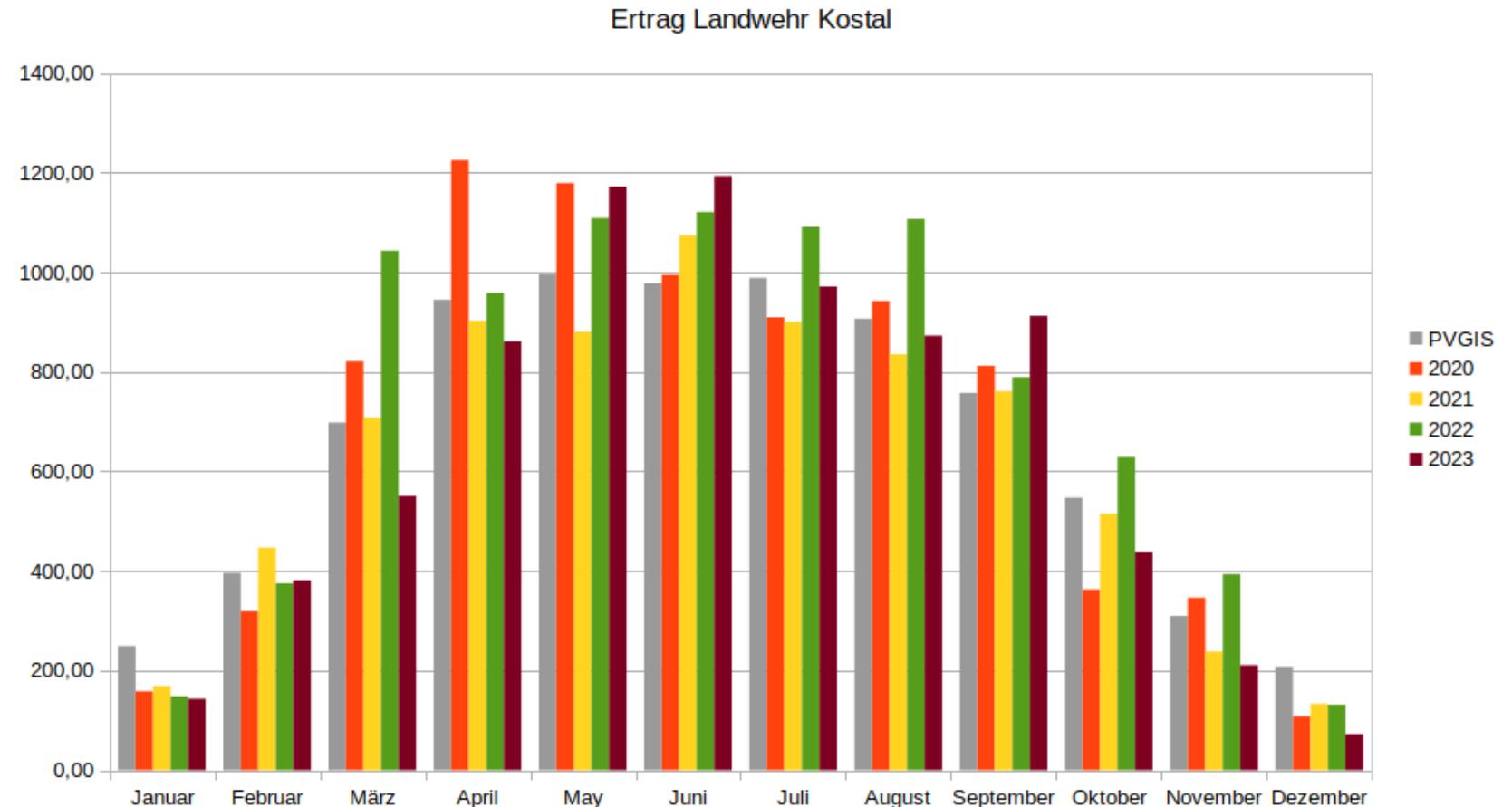
- Zusammenfassung einiger Simulationsergebnisse für eine 1 kWp PV-Anlage in Steinfurt.
- Angegeben sind die monatlichen Erträge in kWh.
- Die Dachneigung beträgt hier 55°.



# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

## PV auf der Nordseite – Stimmt die Simulation denn?

- Vergleich der Simulation mit einer Anlage aus drei Teilen mit West – Süd – Ost Ausrichtung.
- Übereinstimmung ist insgesamt gut.
- Große Schwankungen zwischen den Jahren.



# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

## PV auf der Nordseite – Simulationsergebnisse

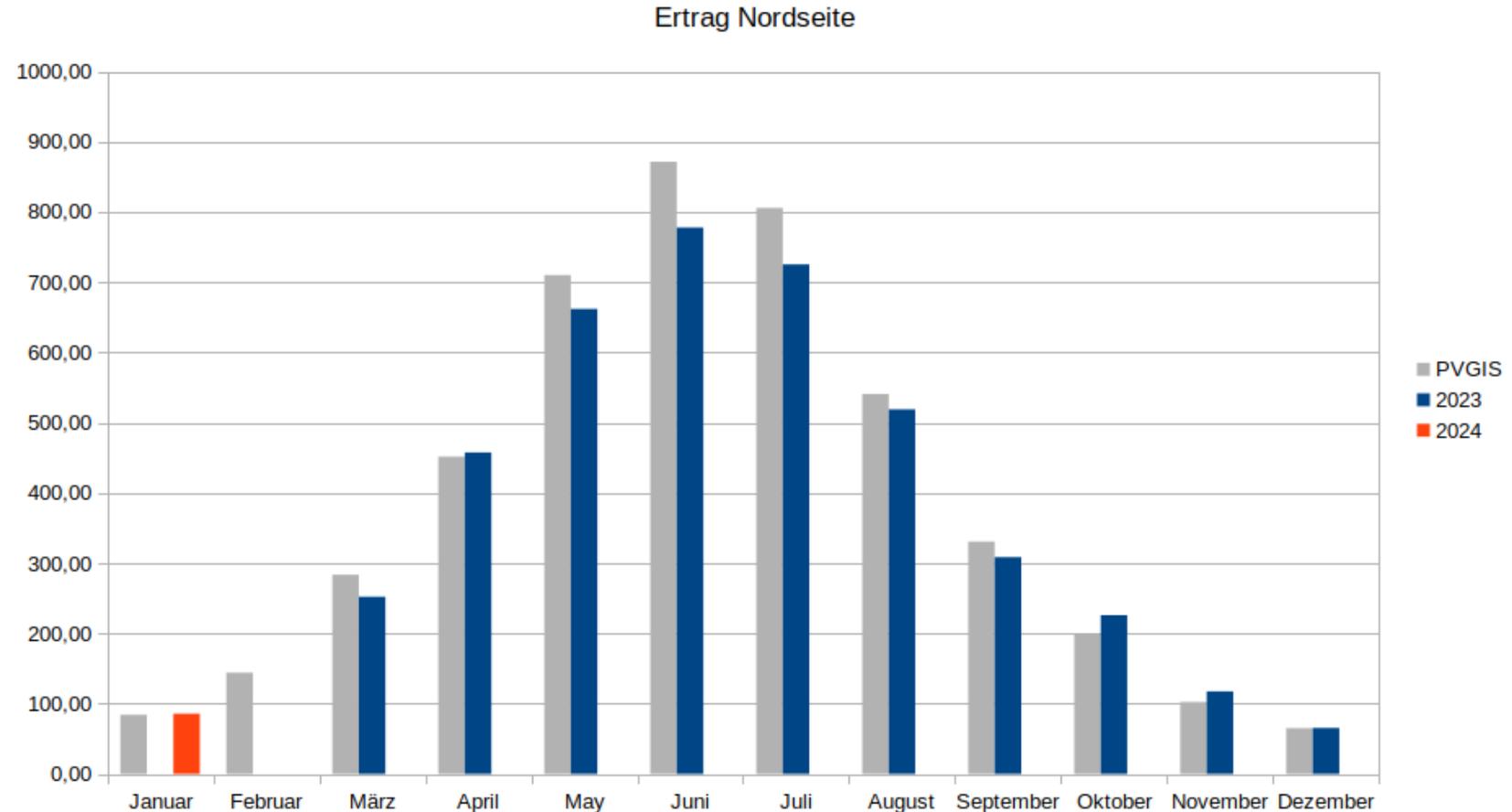
- Annahmen:
  - Herstellungskosten 1200 €/kWp
  - Vergütung 8 ct/kWh, Strompreis 32 ct/kWh

	Jahresertrag		Amortisationszeit			
			Volleinspeisung		Eigennutzung	
35° / Süd	1020	KWh / kWp	14,7	Jahre	3,7	Jahre
35° / Nord	535	KWh / kWp	28,0	Jahre	7,0	Jahre
35° / Ost	815	KWh / kWp	18,4	Jahre	4,6	Jahre
35° / West	801	KWh / kWp	18,7	Jahre	4,7	Jahre
55° / Süd	993	KWh / kWp	15,1	Jahre	3,8	Jahre
55° / Nord	374	KWh / kWp	40,2	Jahre	10,0	Jahre
55° / Ost	745	KWh / kWp	20,1	Jahre	5,0	Jahre
55° / West	729	KWh / kWp	20,6	Jahre	5,1	Jahre

# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

## PV auf der Nordseite – Messergebnisse

- 12,285 kWp auf der Nordseite.
- Ca. 55° Dachneigung.
- Ertrag in kWh.
- Gute Übereinstimmung mit der Simulation.



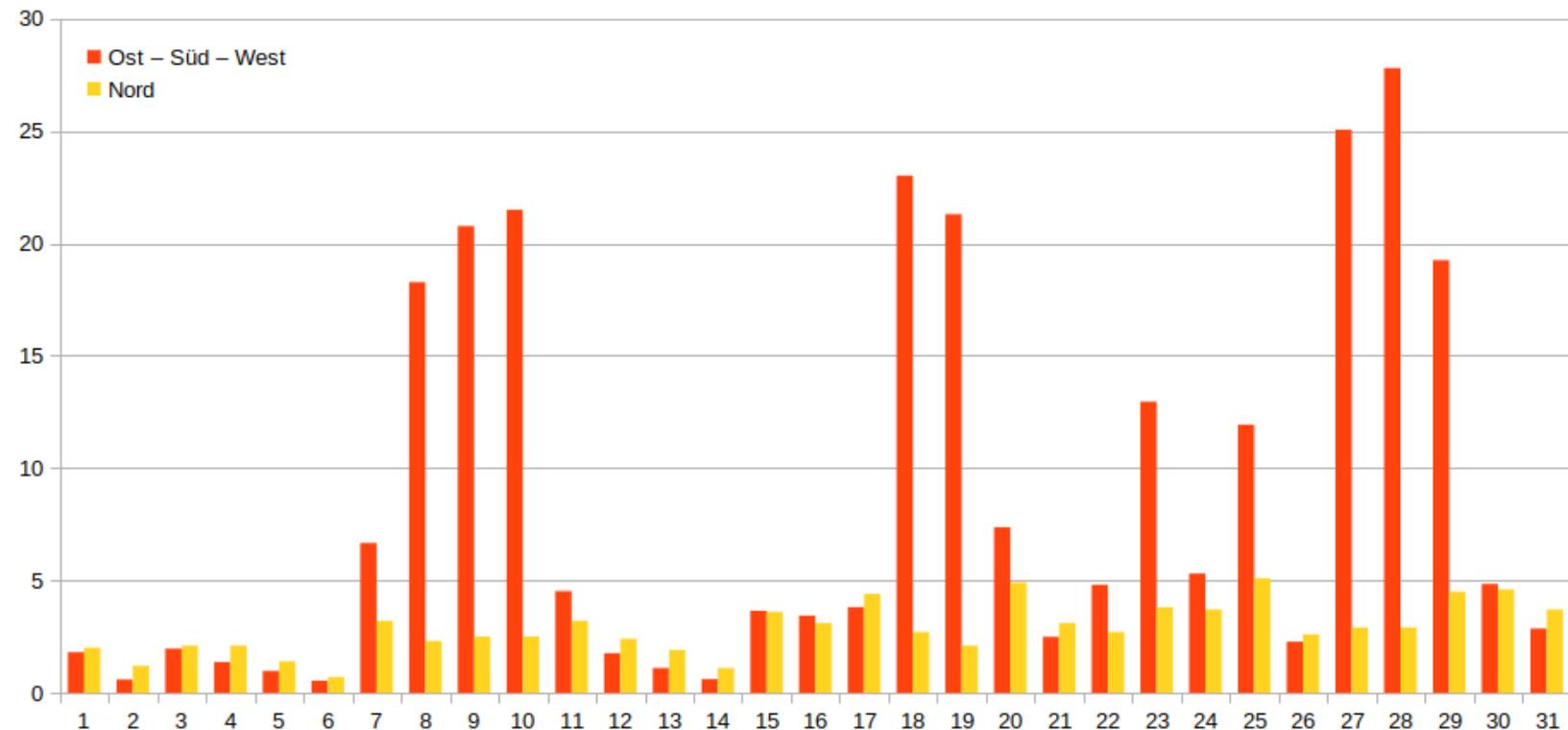
# PV-Eigenverbrauchsoptimierung

## PV auf der Nordseite – Messergebnisse im Detail

- Vergleich der Anlage mit drei Teilen in Ost – Süd – West  
Ausrichtung mit der Anlage in Nord-Ausrichtung.
- Nord-Ausrichtung ist weniger Wetterabhängig (→ Streulicht).
- Höherer Eigennutzungsgrad der Nordanlage  
→ Amortisation eher über Einsparung statt Vergütung (im Gegensatz zu anderen Ausrichtungen).

Vergleich Ertrag Ost-Süd-West - Nord / kWh

Januar 2024





# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Prof. Dr.-Ing. Tilman Philip Sanders  
Leistungselektronik und elektrische Energietechnik

Stegerwaldstraße 39 fon +49 (0)2551.9 62069  
D-48149 Münster fax +49 (0)2551.9 64060

tilman.sanders@fh-muenster.de  
www.fh-muenster.de/energie

