

Integration der Elektromobilität in Stromnetze

Prof. Dr.-Ing. Norbert Graß



Kofinanziert von der
Europäischen Union



efre-bayern.de

1 Energie und Leistung von EV-Ladevorgängen am Netz

Ladeszenarien, zeitlicher Verlauf, Energiebedarf PKW, LKW Hochrechnung Beispiel D, Nutzbare Speicherkapazitäten, Flexibilitäten

2 Netzstabilität, Eigenschaften von Stromrichtern

Netzfolgende und netzbildende Systeme

3 Anforderungen an EV durch regenerative Netze

Volatile Stromerzeugung, variable Preise, Prognose

4 Ladeparks mit unterschiedlichen Ladeleistungen

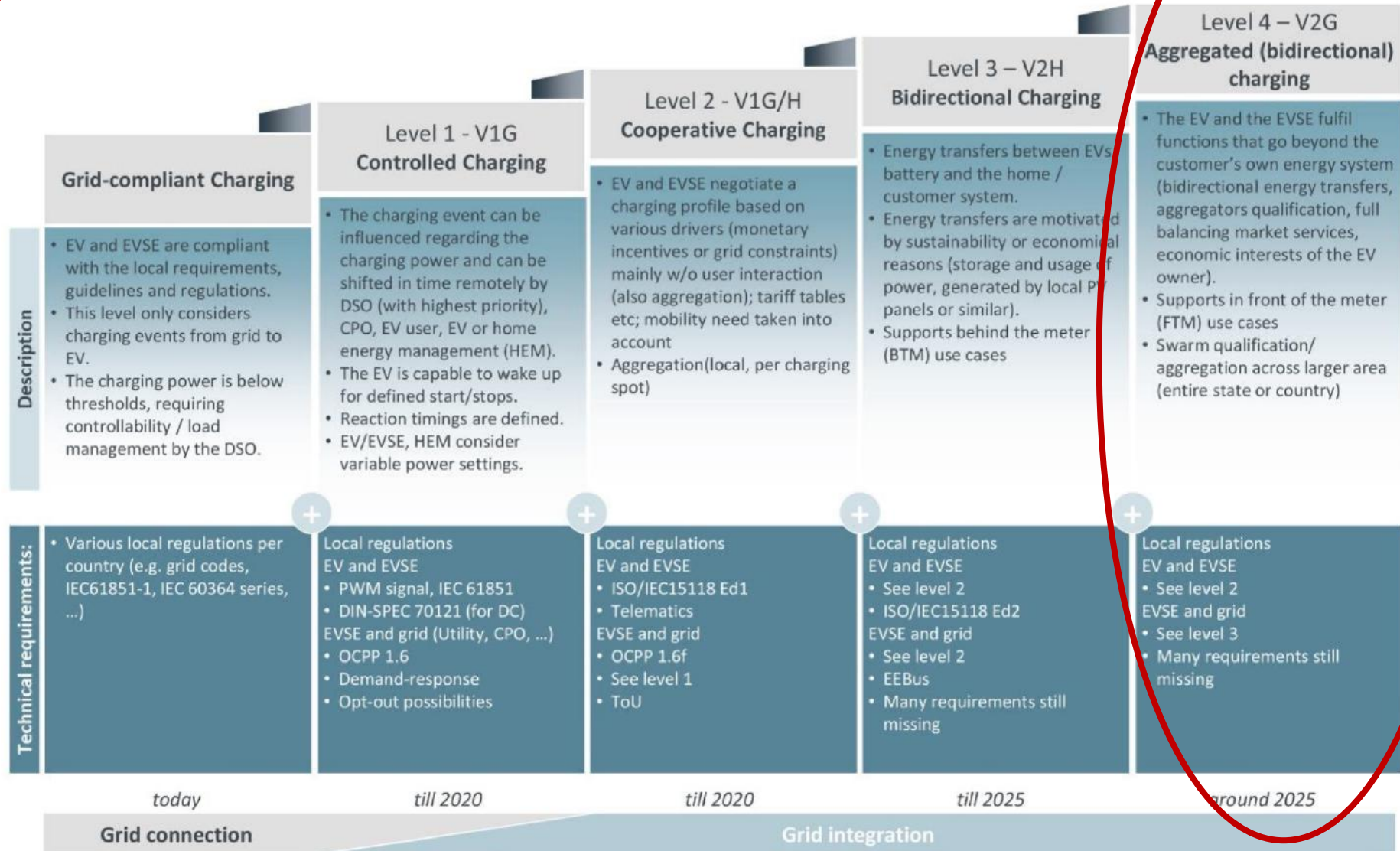
Netzbezug und netzfreundliches Laden, Bedarf von Speichern, Ladeleistungen



Leistungs- und Energiebedarf – Beispiel Deutschland

- Anzahl EV 2025 in D: - ca. 2 Mio
- Anzahl zugelassener PKW in D: - ca. 49 Mio
- Fahrleistungen PKW Durchschnitt D: - PKW 35 km
 - LKW 450 km
- **Bedarf Schnellladung:**
 - während langer Fahrt
 - kein Stromanschluss am Standplatz
 - keine zeitliche Flexibilität
- **Zeitlich steuerbare Ladung:**
 - Stromanschluss am Standplatz
 - max. Komfort für Nutzer
 - zeitlich flexible Ladung





EV – electric vehicle, EVSE – electric vehicle supply equipment, DSO- distributed system operator ,CPO – charge point operator

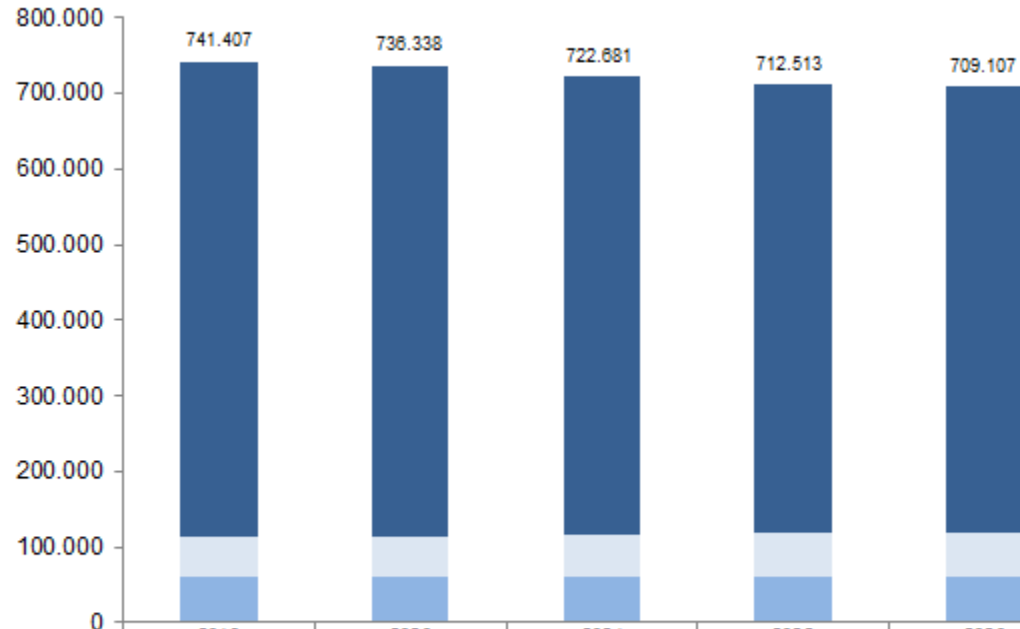
Coordination Office CharIN

c/o innos - Sperlich GmbH



Strombedarf für 46 Mio E-Autos, Fahrleistungen

Jahresfahrleistung
in Mio. km



	2019	2020	2021	2022	2023
Personenkraftwagen	627.950	622.728	608.795	594.477	591.132
Lastkraftwagen bis 3,5 t zGM	51.937	53.495	55.371	58.991	57.520
Übrige Kraftfahrzeuge	61.520	60.115	60.515	61.044	60.455
Kraftfahrzeuge insgesamt	741.407	738.338	722.881	712.513	709.107

Quelle: Kraftfahrtbundesamt

Benötigte Antriebsenergie bei 100% der PKW elektrisch

Strecke/Jahr(D ges)	630.840	Mio km
Anz. PKW (D)	46	Mio
Strecke/Jahr(pro Fahrz)	13.714	km
Strecke/Tag(pro Fahrz)	37,6	km
Verbrauch	15,00	kWh/100km
Energie / Tag (Antrieb)	5,6	kWh

Stromerzeugung	Batterie EV	H2 EV	
Wirkungsgrad	90%	25%	
Ladeenergie / Tag	6,3	22,5	kWh
Faktor	111%	400%	
Ladeenergie / Tag (D ges)	288.054.795	1.036.997.260	kWh
Ladeenergie / Jahr(D ges)	105	379	TWh
W Netz ges.	640	640	TWh
Erhöhung Stromerzeugung	16%	59%	
Mittlere zus Leistung	12	43	GW
Speichergröße Fahrzeug	40	145	kWh
Zeitl Varianz Laden	6,4	6,4	Tage

ohm Energie und Leistung von EV-Ladevorgängen am Netz

Leistungs- und Energiebedarf – Beispiel Deutschland

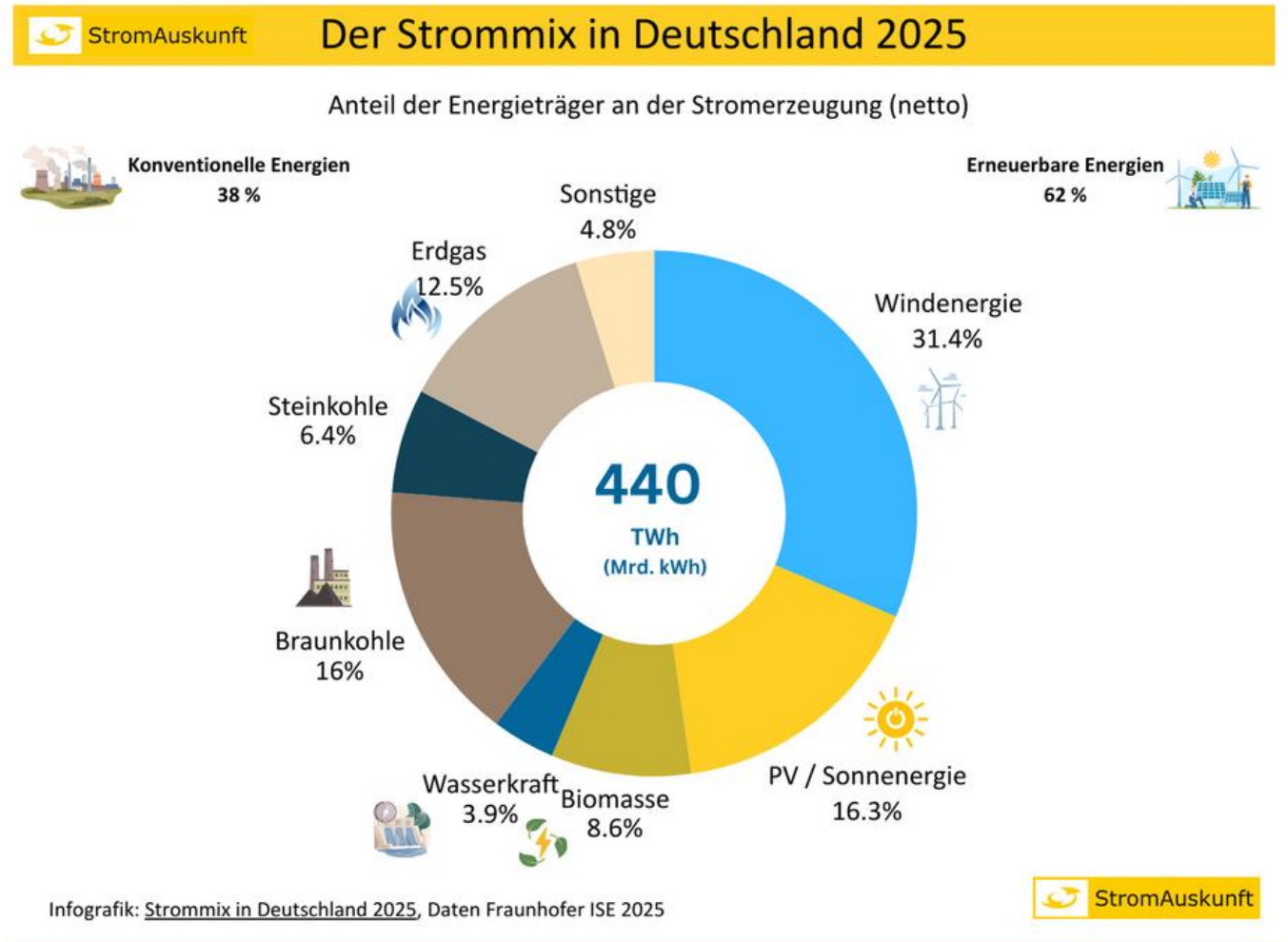
Zukunft: Alle Fahrzeuge **elektrisch**

Jahresfahrleistungen: (Quelle KBA)				EV Bedarf			Netzbetrieb							
Typ	Ges. Strecke [Mio km]	Anzahl Mio Fahrzeuge	km/Fahrzeug im Jahr	Verbrauch Wei/100 km [kWh]	Wges, inkl. Verluste 10% [TWh] Jahr	Wges, inkl. Verluste 10% [GWh] Tag	Mittlere zus. Netzleistung [GW]	Batterieenergie Fahrzeug [kWh]	Batterieenergie alle Fhz [GWh]	Anteil Stillstandszeiten	Speicher-nutzung flex	Ges. flex. Energie [GWh]	Flexibilität [d]	Dauerleistung mit Car ToGrid [GW]
PKW	626423	49	12784	17	117	321	13,4	60	2940	98,5%	50%	1449	2,3	60
LKW < 3,5t	38670	2,0	19008	30	13	35	1,5	100	203	97,8%	20%	40	0,6	2
LKW 3,5t .. 6t	3740	0,2	19839	40	2	5	0,2	150	28	97,7%	17%	5	0,5	0
LKW >6t	13520	0,3	41063	80	12	33	1,4	200	66	95,3%	15%	9	0,1	0
Sattelzug	18230	0,2	102832	120	24	66	2,7	300	53	88,3%	12%	6	0,0	0
Ges LKW	74160	2,7			50	138	5,7							
Gesamt	700583	52			168	459	19,1					1508		63

Bei 600 TWh im Jahr reicht das für 1 Tag:
Das wären aber 100%, d.h. ohne ein einziges KW !!!

Definitionen / Teilbereiche

- **Stabilitätsbegriff aus der Systemtheorie:**
Reaktion des Systems auf schnelle Änderungen
Leistungsgleichgewicht
Einspeiseleistung == Verbrauchsleistung
Frequenzhaltung, Messgröße im Netz
- **Zeitliche Anforderung der Leistungsbereitstellung**
Volatile Quellen
Speicher, Elektrofahrzeuge
verschiebbare Lasten
- **Spannungshaltung**
Netzimpedanz,
Übertragungsnetz, Verteilnetz, ca. $\pm 10\%$
Blindleistung



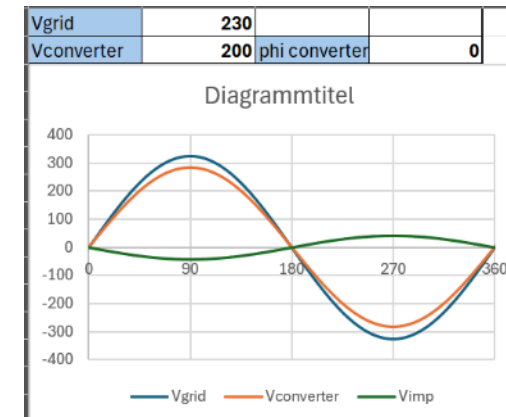
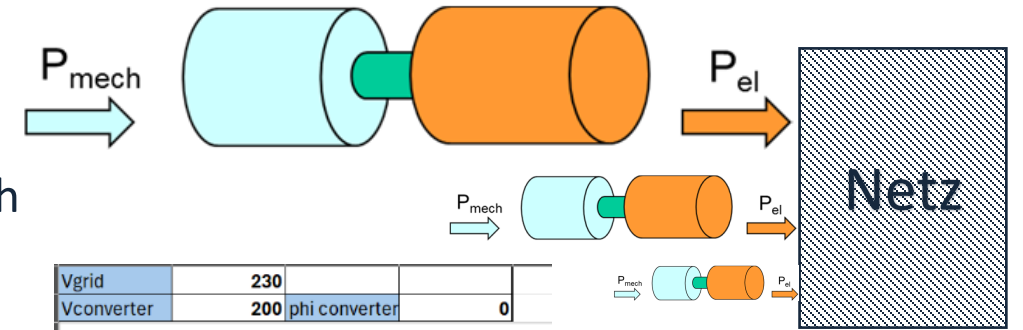
Konventionell

- Frequenzbildung in rotierenden Systemen
- Überall verfügbare Messgröße
- Rotierende Masse als Energiespeicher
- Leistungsänderung von Kraftwerksart abhängig → Grundlast / Spitzenlast
- Frequenzregelung , Zielwert 50,000 Hz, Reaktion bei Abweichung vorher festgelegt



Leistungselektronik

- Nachbildung der Eigenschaften von Synchrongeneratoren möglich
- „**Netzfolgend**“ oder „**netzbildend**“ über Software
- Energiereserve über rotierende Masse → elektrischer Speicher
- Leistungsänderung im ms – Bereich
- **Zeitverhalten über Software beliebig „gestaltbar“**



ohm Zeitliche Anforderung der Leistung- / Energiebereitstellung

Konventionell / Historie:

- Erzeugung an Verbrauch anpassen
- Bei besonders teuren KW: Anreiz für Verbrauch z.B. Nachtspeicherheizungen mit Rundsteuerung
- **Grundlast – Spitzenlast...**

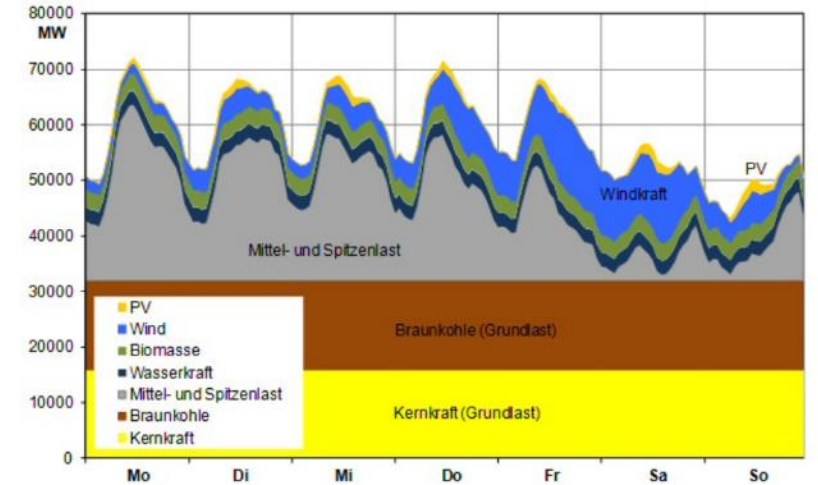
Leistungselektronik, regenerative (volatile) Quellen

- Ziel: Max. Nutzung der Erzeugungsanlagen
- PV Leistung korreliert grob mit Verbrauch
- Zeitlich verschiebbare Lasten:
 - Wärmepumpen
 - Elektrofahrzeuge
- Speicher
 - Stationär
 - Bidirektionaler Betrieb Elektrofahrzeuge

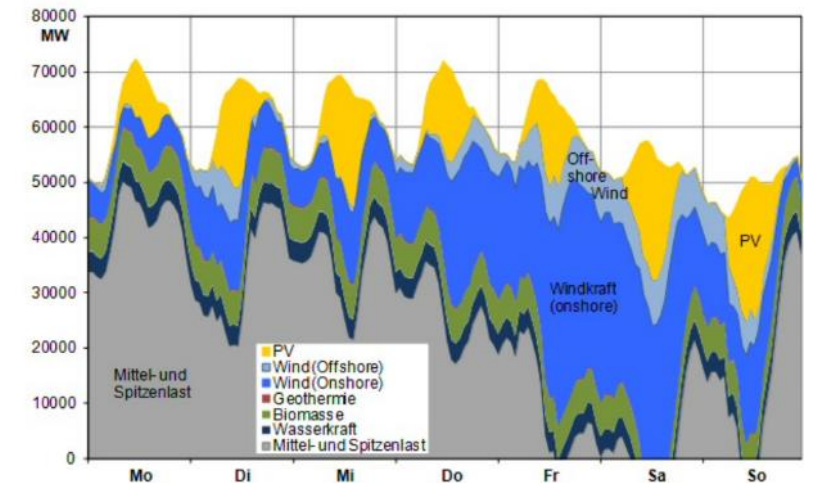
Variable Erzeugung



Variable Lasten



Aktuelle Stromerzeugung über eine Juliwoche (Grafiken (3): Martin Hofmann/Volker Quaschnig)



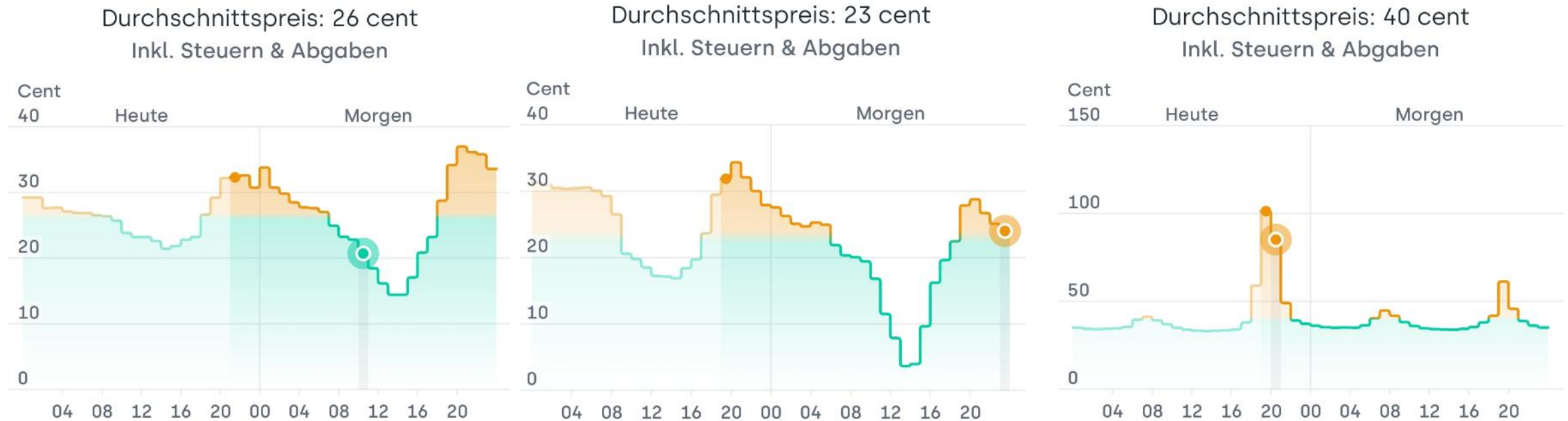
Stromerzeugung über eine Juliwoche im Jahr 2020, Ausbau nach BEE-Prognose



Hoch- Niedertarif Fenster, Börsenpreise

- **Atypische Netznutzung:** Feste, vorab bekannte Zeitfenster für hohen und niedrigen Tarif
Energieversorger gibt Zeiten und Preise bekannt
- **Börsenabhängige Tarife** mit kurzfristiger Prognose (z.B. ein bis zwei Tage)

Starke Schwankungen, wenige Stunden



Quelle: Tibber



Kofinanziert von der
Europäischen Union

- Konventionell **Wasserspeicher**
 - Erweiterung eher schwierig
- **Wärmespeicher**
 - Kurzeit: Wasser, Phasenübergang
 - Langzeit: Sand, Feststoffe, Isolierung
- **Lithium-Batterien / Elektrofahrzeuge**
 - Hohe Effizienz – viele Ladezyklen
 - Energieinhalt Kosten
 - Kurzzeitspeicherung
- **Wasserstoff**
 - Geringe Effizienz
 - wenige Ladezyklen
 - Wärmenutzung → dezentral
 - Große Energiemengen speicherbar
 - Saisonal nutzbar

		50 Mio	
	Stausee	E-Autos D	
P	900	500000	MW
W	20	2500	GWh
Tentl	22	5 h	



Quelle: [Home - Nant de Drance \(nant-de-drance.ch\)](http://nant-de-drance.ch)

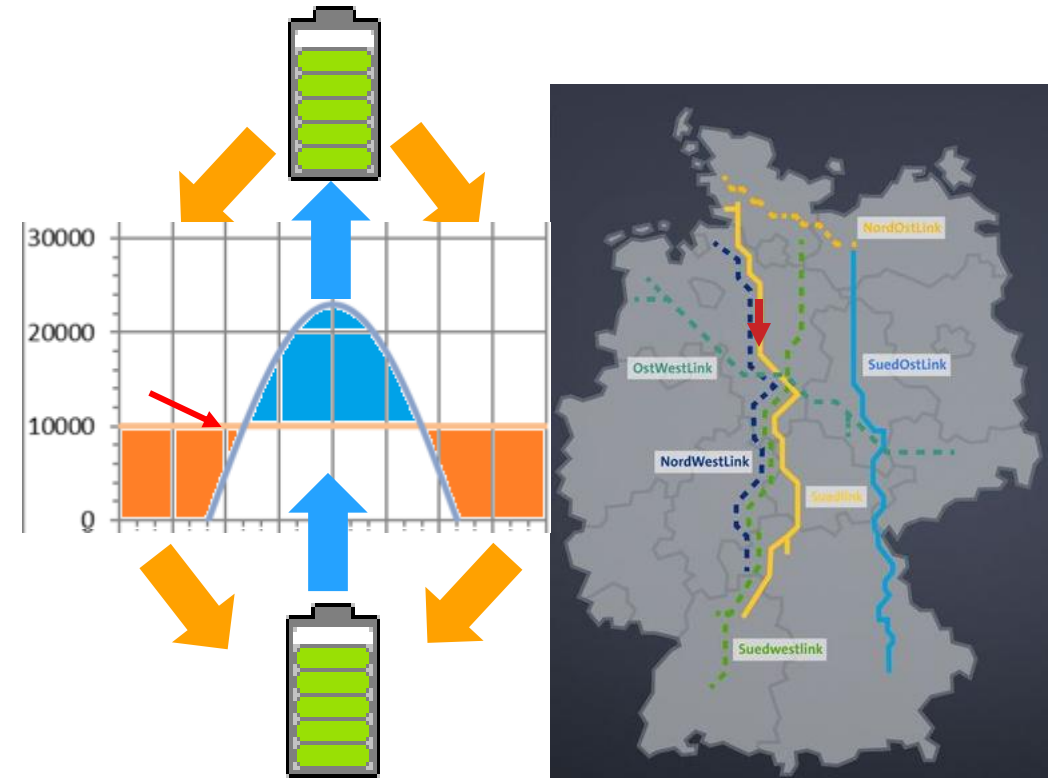
Batterialterung durch Ladezyklen, Business Case EV



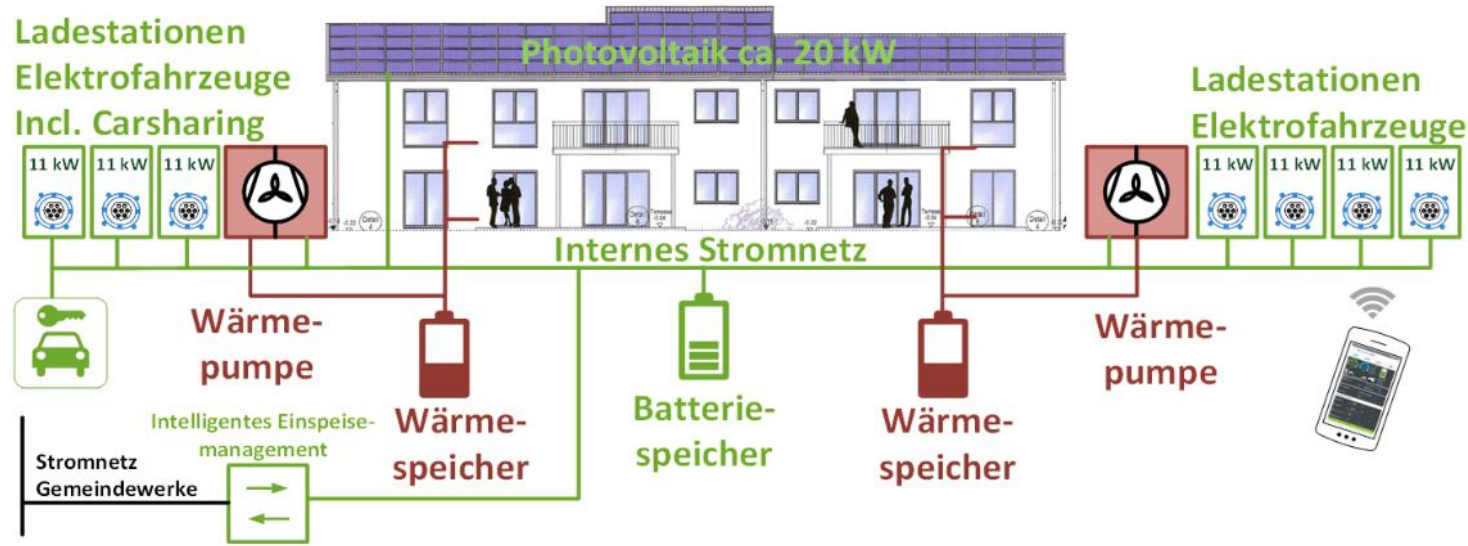
Nicht genutzte Ladezyklen

Netzüberlastung durch PV, Wind?

- Wo genau treten Überlastungen auf ?
 - Übertragungsnetz
 - Ortsnetz
 - Strecken identifizieren
- Aufgabe Netzbetreiber
 - Regelung über Anreize
 - Echtzeit / Prognose
- Flexibilitäten
 - Elektrofahrzeuge
 - Wärmepumpen
 - Wärmespeicher
 - Kurzzeitspeicher
 - Langzeitspeicher



ohm Beispiel Projekt sEnsys



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



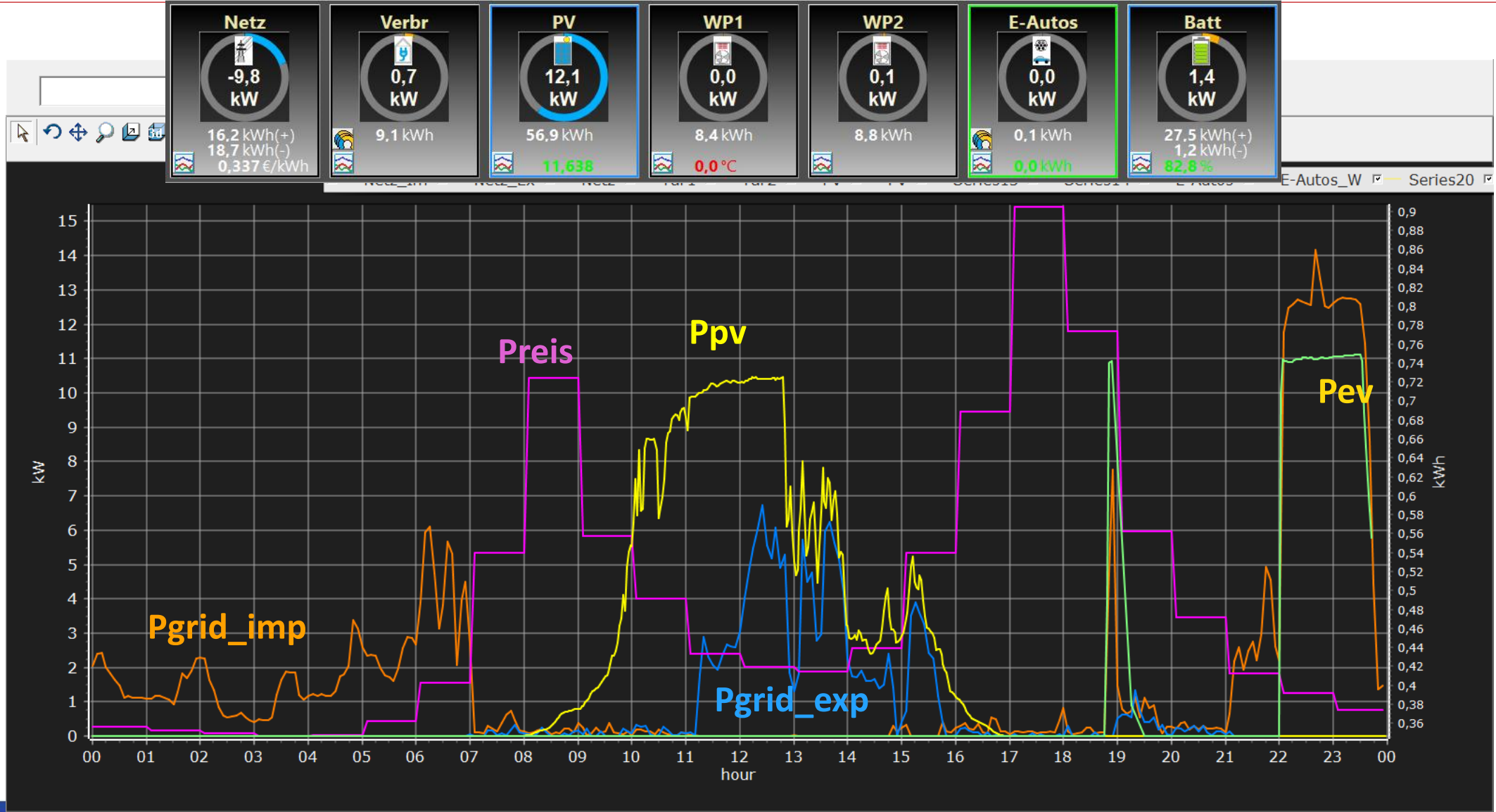
- Mustersanierung eines Mehrfamilienhauses einer in Erlangen
- Plus-Energie-Gebäude, KfW 40 Standard
- PV, Second-Life-Batteriespeicher
- E-Mobilität

→ Ökonomische Aspekte



Kofinanziert von der
Europäischen Union

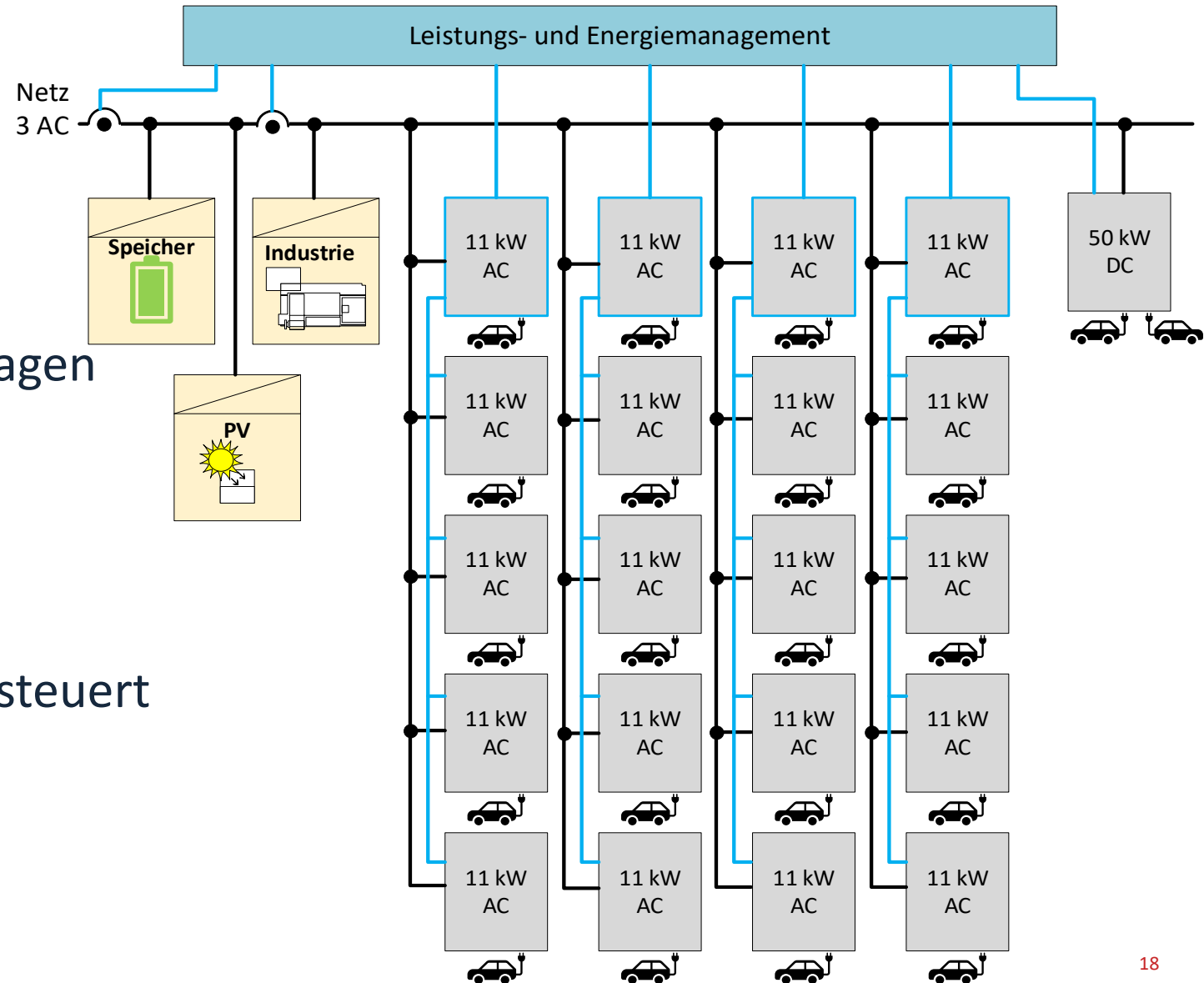
ohm Wohnanlage: EV Ladung, variablen Strompreisen, PV, Batt



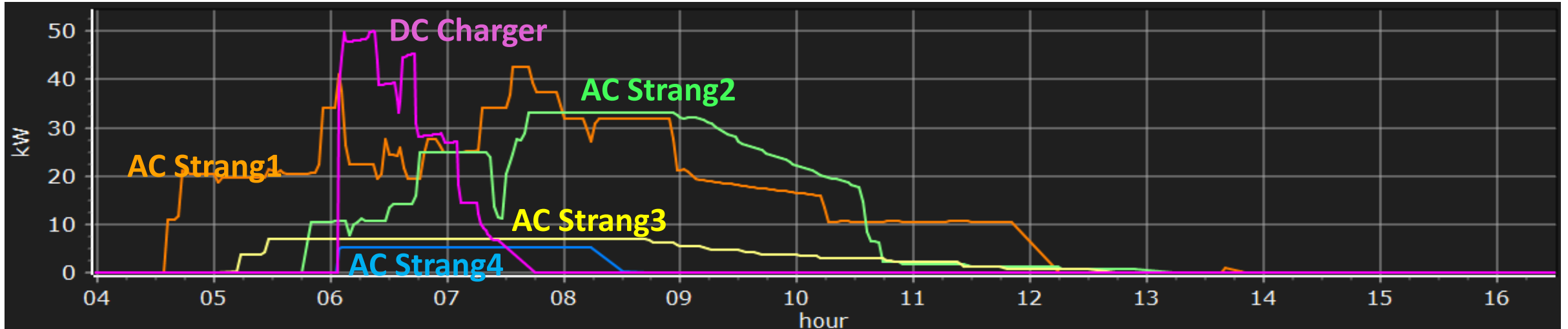
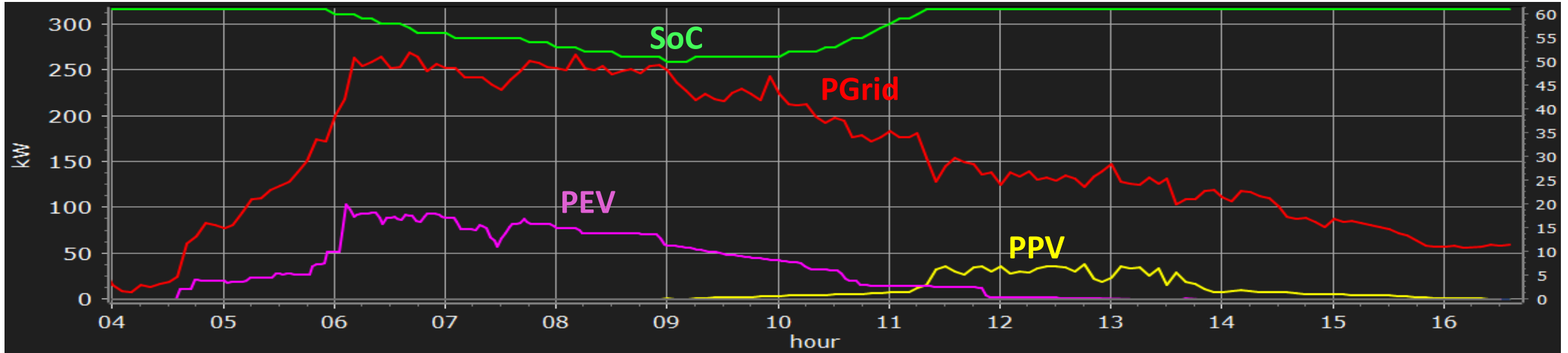
- Fluktuierende Stromerzeugung \leftrightarrow Steuerbare Lasten und Speicher
- EV-Batterie als Speicher, nur gesteuerte Ladung oder Bidirektionalität
- Variation der Ladeleistung \leftrightarrow Zeit
- Batterielebensdauer besser bei geringer Ladeleistung
- Schnellladung:
 - Fahrstrecke größer als EV-Reichweite
 - Gelegentlich, eher selten: Firmenparkplatz
 - Öffentliche Ladeparks, wenn zuhause oder an Arbeitsstelle keine Lademöglichkeit

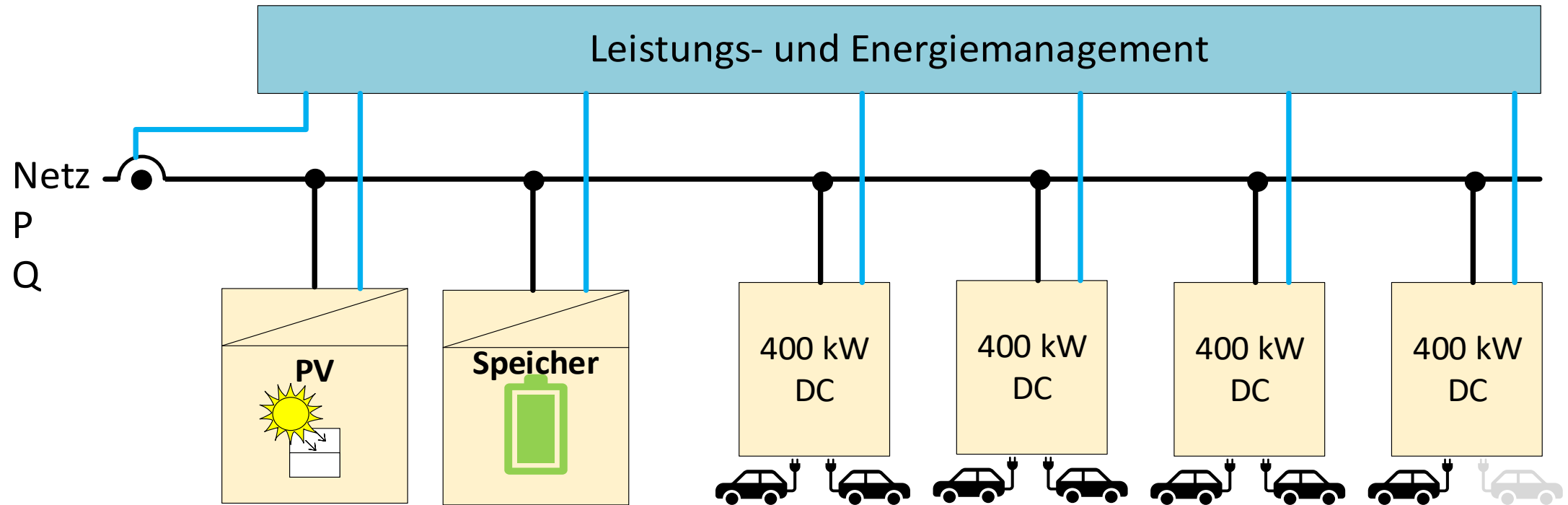
ohm Beispiel Ladepark „Industrie“

- 20 Stück AC Wallboxen 11 kW
- 1 DC Station 50 kW, 2 Ladepunkte
- Industrielle Fertigungsanlagen, nicht steuerbar
- Speicher für Lastspitzen Industrieanlagen
- PV Anlage ca. 100 kW
- Verweildauer ca. 8 h je Fahrzeug
- Ladebedarf bis zu 640 kWh am Tag
- Leistungs- und Energiemanagement steuert Ladebetrieb

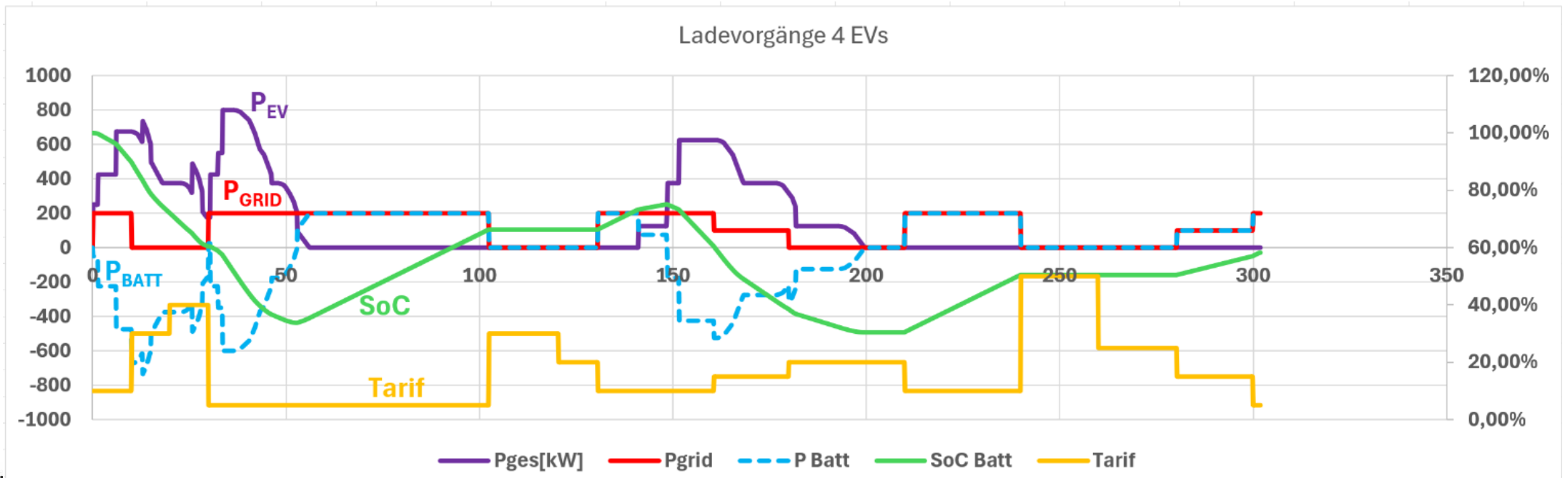
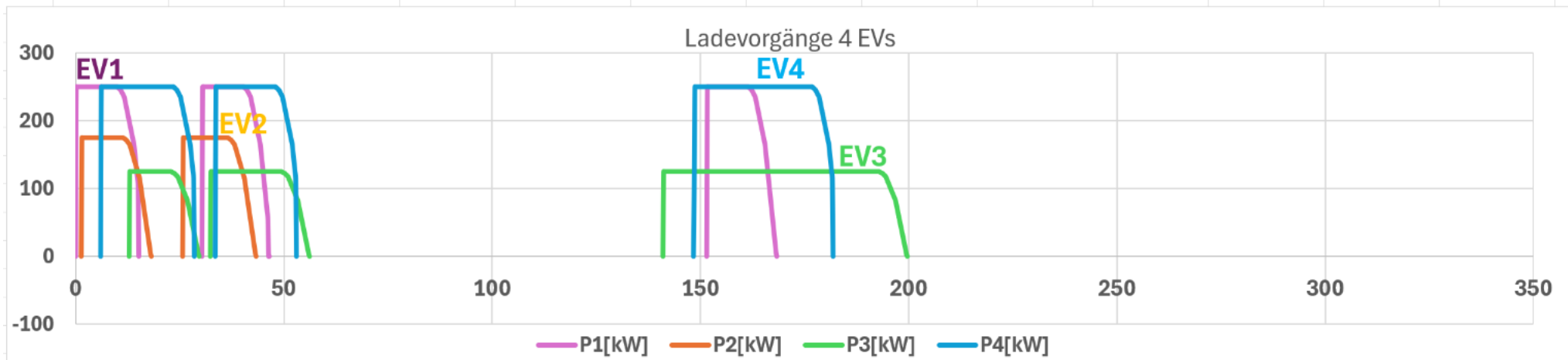


ohm Industrielle Produktionsanlage 20*AC(11 W) + 1*DC(50kW)



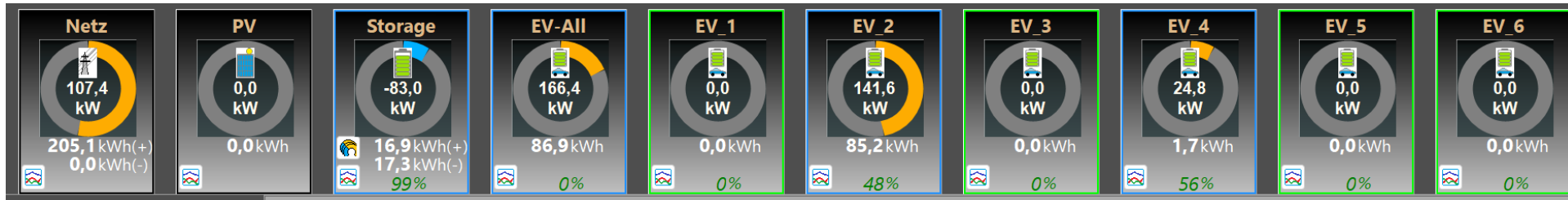


- Netz Wirkleistung begrenzt, Blindleistung zur Spannungsstabilisierung (ARE 4110)
- Fluktuierende Erzeugungsanlagen integrierbar
- Gegenläufige Anforderungen: max. Ladeleistung \leftrightarrow Netzunterstützung
- Energie- und Leistungsmanagement: Prognosen erforderlich, Kostenfunktionen, optimale Speichergröße
- Modularität \rightarrow Erweiterbarkeit



Battery and Cycle Control (BCC)

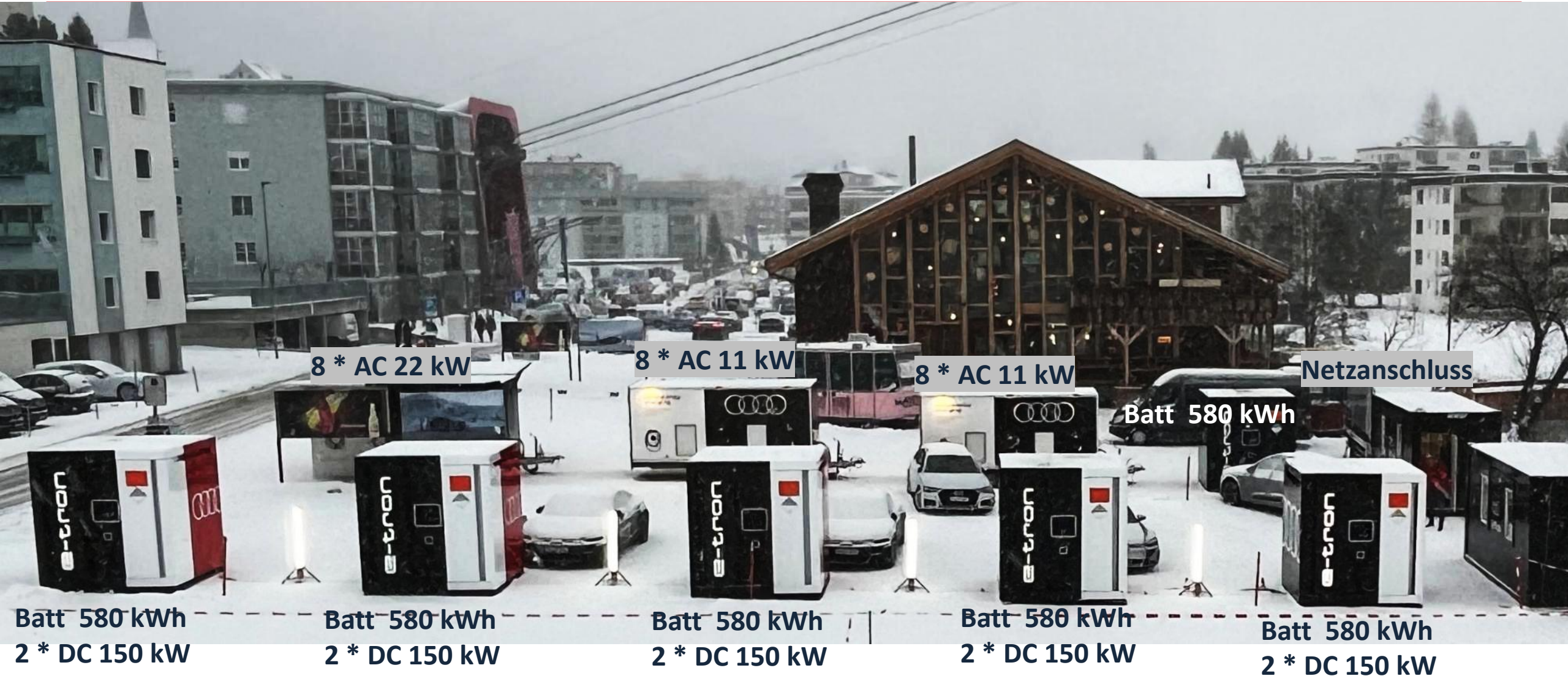




- Schnellladung
- Netz 200 kW
- Sec. Life Batterien
- Batterien
2,4MWh
- Last- und
Lademangement
- Netzstützung mit
Wirk- und Blind-
leistung



ohm Mobiler Ladepark



Quelle: TKL



Kofinanziert von der Europäischen Union

Leitsystem

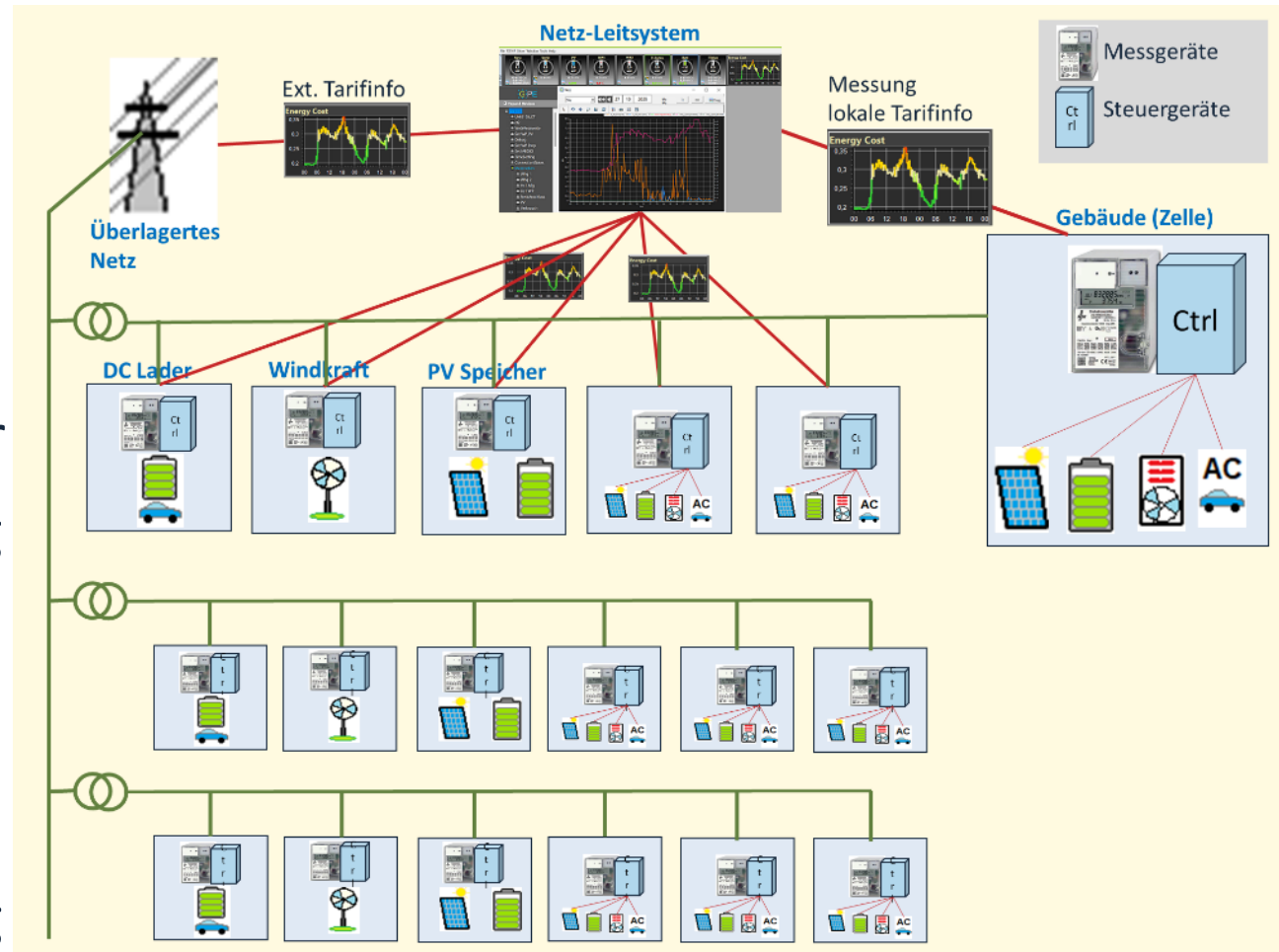
Optimiert Leistungsfluss **im Netzbereich**

- Auslastung der Leitungen
- Aushandeln von dynamischen Tarifen
- Wirtschaftlicher Anreiz für alle Teilnehmer
- Kostenfunktionen, Prognose: Optimierung

Smart Meter und Controller

Optimiert Leistungsfluss **in Anlage**

- Aushandeln von dynamischen Tarifen
- Kostenfunktionen, Prognose: Optimierung

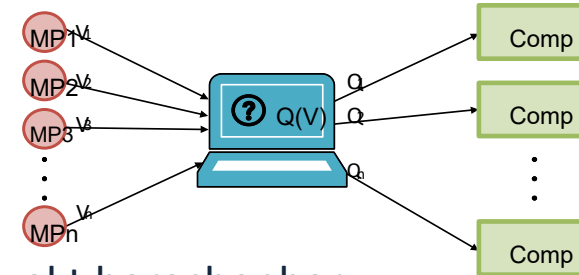


Systemtheoretische Regelungstechnik

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{ij} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \cdots \\ q_j \end{pmatrix} \geq \begin{pmatrix} \Delta U_{1_{\min}} \\ \Delta U_{2_{\min}} \\ \vdots \\ \Delta U_{i_{\min}} \end{pmatrix}$$

- Exakte Systembeschreibung
- Berechnung der Regelung und des Systemverhaltens
- Optimaler Betrieb
- Beispiele:
 - Stromregelung, Leistungsregelung
 - Frequenzsynchronisation
 - Blindleistung, Oberschwingungen
 - Fault Ride Through

KI



- Nicht exakt berechenbar
- Parameter nur teilweise bekannt
- Verhaltensweisen / Nutzung
- Gegensätzliche Anforderungen
- Beispiele:
 - Flexibilität nutzen
 - Kosten
 - Entscheidungen
 - Netzauslastung optimieren

Prof. Dr.-Ing. Norbert Graß

Norbert.Graß@th-nuernberg.de

Institut für leistungselektronische Systeme

ELSYS

Technische Hochschule Nürnberg

Prof. Dr.-Ing. Norbert Graß

Norbert.Graß@grass-pe.com

Grass Power Electronics GmbH

GPE

Nürnberg

