



PV-Zubau von 35 GW und mehr!

Massiver Netzausbau notwendig ?

Oder gibt es andere Wege ?

VESE Frühjahrstagung 2024

Bern | Samstag 1. Juni 2024

Lars Huber

www.pv2grid.ch

Agenda

- Ausgangslage
- Peak Shaving
- Entwicklung Stromverbrauch
- Netzkapazitäten
- Netzintegration

Vorstellung & Abgrenzung

Abgrenzung

Heute hier als Privatperson und nicht im Namen meines heutigen Arbeitgebers

Die meisten Forschungsergebnisse sind auf www.pv2grid.ch publiziert

Lars Huber

www.pv2grid.ch



Berufliche Stationen

- Elektroniker
- Software Entwicklung
- 2011-2013 : PV-Planung
- 2014-2020 : Smart Meter Lieferant
- 2021-2023 : Fachspezialist PV
- ab 2024 : Systemtechnik bei Stadtwerk

Leidenschaft

- Forschung für die Energiewende
- PV-Produktionsverhalten und PV-Netzintegration bestimmten während 12 Jahren grosse Teile meiner Freizeit

Ausgangslage

Ausgangslage

Ziele

- Fossile Energieträger hinter uns lassen
- Elektrifizierung von Verkehr und Gebäuden
- Bandkraftwerke (KKW) sollen vom Netz
- Geplante Stromproduktion mit PV
 - 2035 : 35 TWh
 - 2050 : 45 TWh

Ausgangslage

IST-Heute

- Strom-Endverbrauch 2023 (Swissgrid): 53.5 TWh
- Strom-Gesamtverbrauch 2023 (Swissgrid): 62.1 TWh
- Transit: 21.6 TWh
- PV-Ausbaustand Ende 2023: ca. 6 GW
- PV-Produktion gemäss Ausbaustand: ca. 11%
(vom Endverbrauch)

- Leistungen 2023
 - Pmax Produktion eingespeist: 15.3 GW
(nur Kraftwerke mit Lastgangmessung)
 - Pmax Endverbrauch: 9.6 GW
 - Pmax Gesamtverbrauch: 10.1 GW

Ausgangslage

Aussagen

- Das heutige Stromnetz kann die künftige Menge von PV auf keinen Fall aufnehmen
- Wir müssen das Stromnetz massiv und zu hohen Kosten ausbauen
- Das Stromnetz ist für maximal 12-15 GW Photovoltaik ausgelegt
- Im Sommer werden wir deutlich zu viel Strom und im Winter viel zu wenig haben

...stimmt das wirklich?

Ausgangslage

Definitionen

Generator

- Eine Menge von PV-Modulen in gleicher Ausrichtung (Neigung und Himmelsrichtung)

Dimensionierung

- Leistung Wechselrichter / Leistung Generator
 - 60 kVA / 100 kWp = 60%

Leistungsbegrenzung

- **statisch:** maximale Leistung einmalig im Wechselrichter festgelegt (Bau oder Software)
- **dynamisch:** maximale Leistung am Wechselrichter passt sich in Echtzeit stetig an, typischerweise wegen Eigenverbrauch und Lastmanagement
- **netzgesteuert:** Netzbetreiber kann über Kommunikation die Leistung in n-Stufen begrenzen
- **weitere dynamisch:** WR-Funktionen wie $P(U)$, $Q(U)$, $P(f)$,

Peak Shaving

Eigenschaften bei der Leistungsbegrenzung

Peak Shaving

UMFRAGE

Mit welchem jährlichen Minderertrag der PV-Produktion muss gerechnet werden, wenn die Wechselrichter auf 60% limitiert werden?

PV-Anlage: Ost-West Dach im Mittelland

1. unter 2%
2. ca. 5%
3. ca. 10%

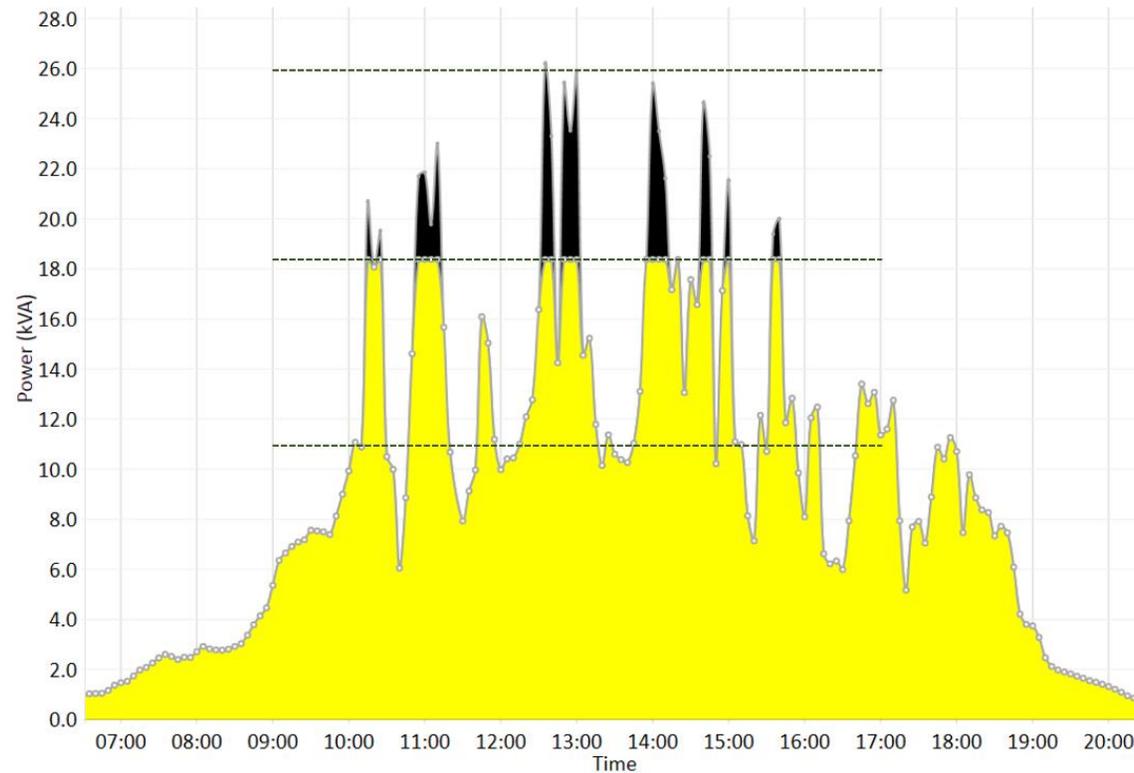
Peak Shaving

Datenbasis für Analysen

- Analysen beruhen auf realen Produktionsdaten
- 300-400 PV-Anlagen
- Ca. 1500 Produktionsjahre
- 5-Minuten Auflösung
- Vergleich Lastgang VNB: 15-Minuten
- Analysen ohne Beachtung von Eigenverbrauch (Worst Case)
→ mit Eigenverbrauch weniger Minderertrag durch Peak Shaving

Peak Shaving

Funktionsweise der Analysen



- Prinzip ist einfach
 - Originaler Produktionslastgang (5 min) nehmen
 - Maximale Leistung schrittweise reduzieren und Minderertrag ausrechnen (schwarze Fläche)
 - Bild zeigt Begrenzung bei 62%
- Nebeneffekt der Leistungsbegrenzung: kleinere Leistungssprünge bedeutet kleinere Spannungsschwankungen im Netz (Umfang Kurve verkleinert)

Peak Shaving

Charakteristik

Leistungsbegrenzung

PVA-1

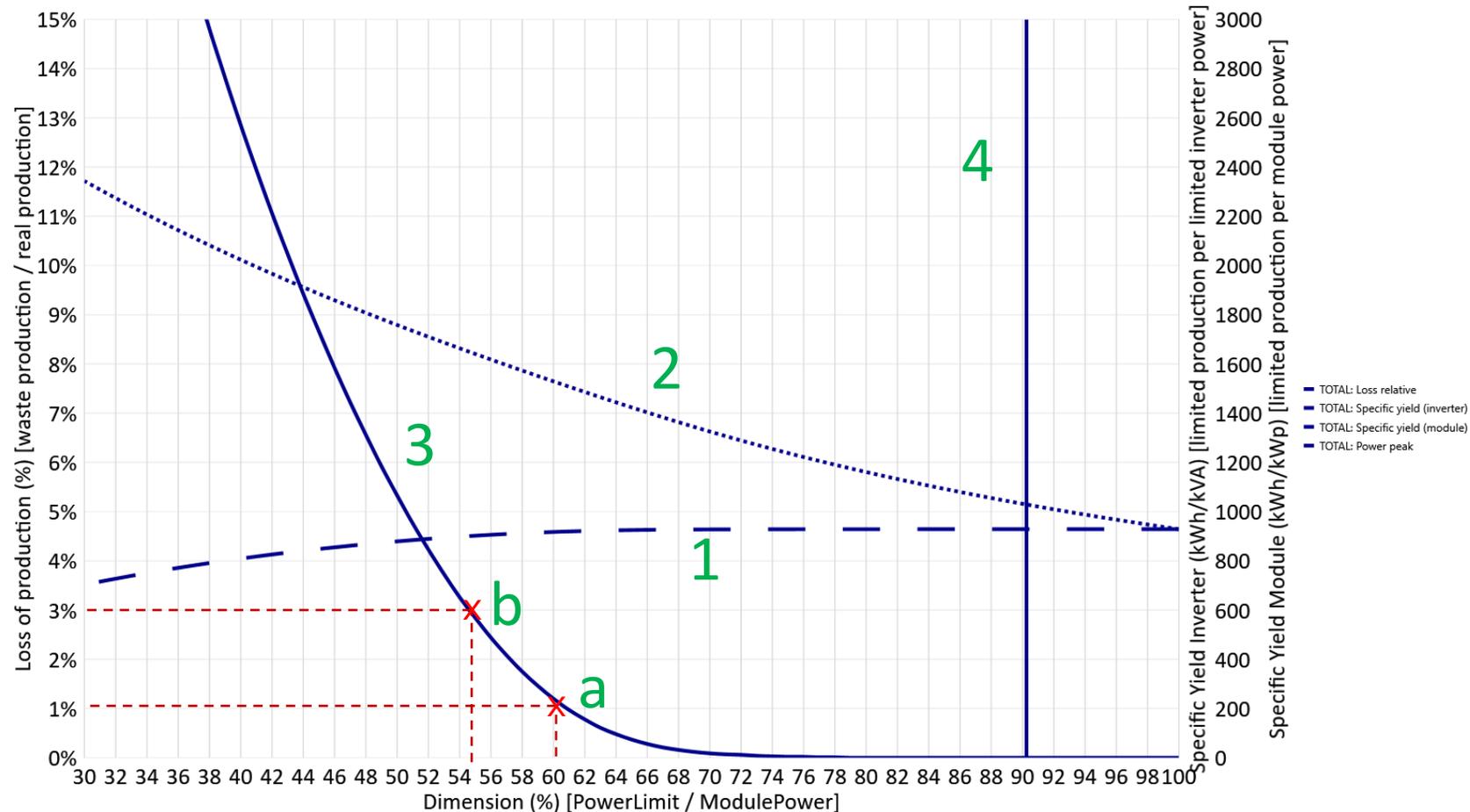
Typische Ost-West Anlage
Mittelland

Dimensionierung: 95%

Peak: 90%

Original: 930 kWh/kWp

Betreiber: VNB



Kurven (in Abhängigkeit der Dimensionierung)

1. Spezifischer Ertrag PV-Module
2. Spezifischer Ertrag Wechselrichter / Netzanschluss
3. Minderertrag
4. Erreichte Maximalleistung

Achsen

- X: Dimensionierung (P_{WR}/P_{MOD})
Y: Minderertrag / Spez. Ertrag pro kWp ; kVA

Schnittpunkte

- a. 1% Minderertrag bei 60% Dim.
b. 3% Minderertrag bei 55% Dim.



37% der reservierten Netzkapazität für 1% der Produktion

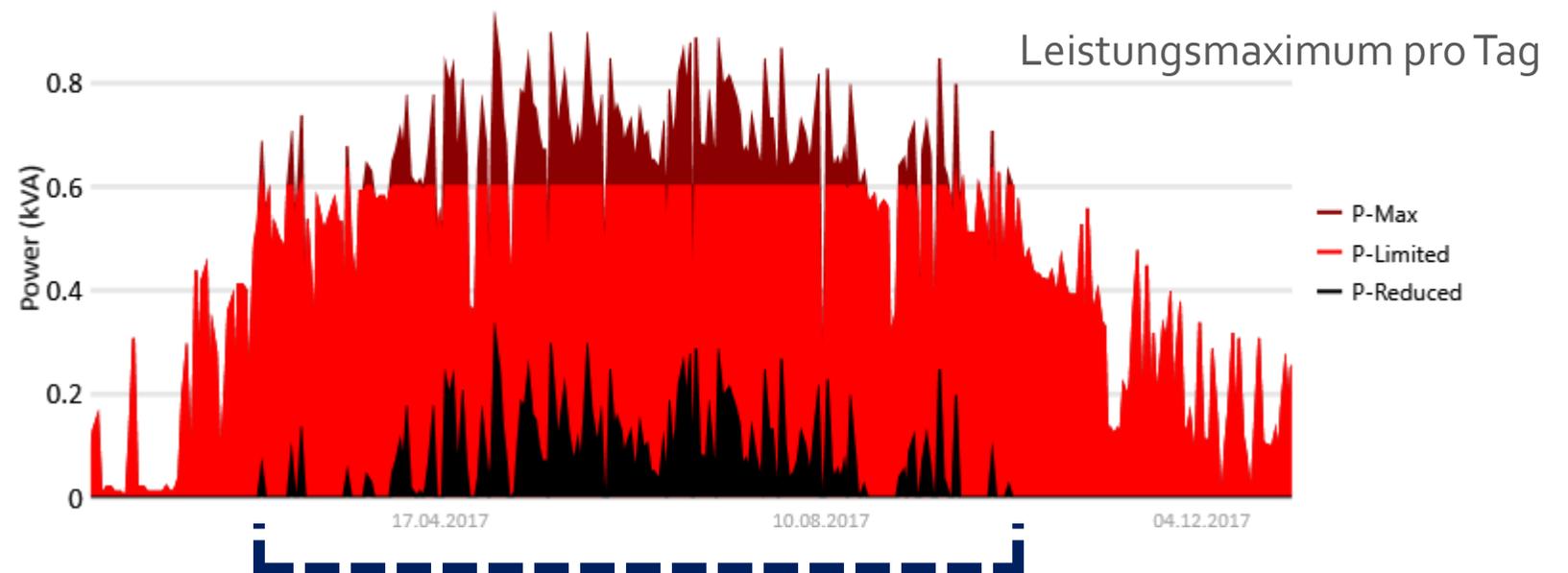
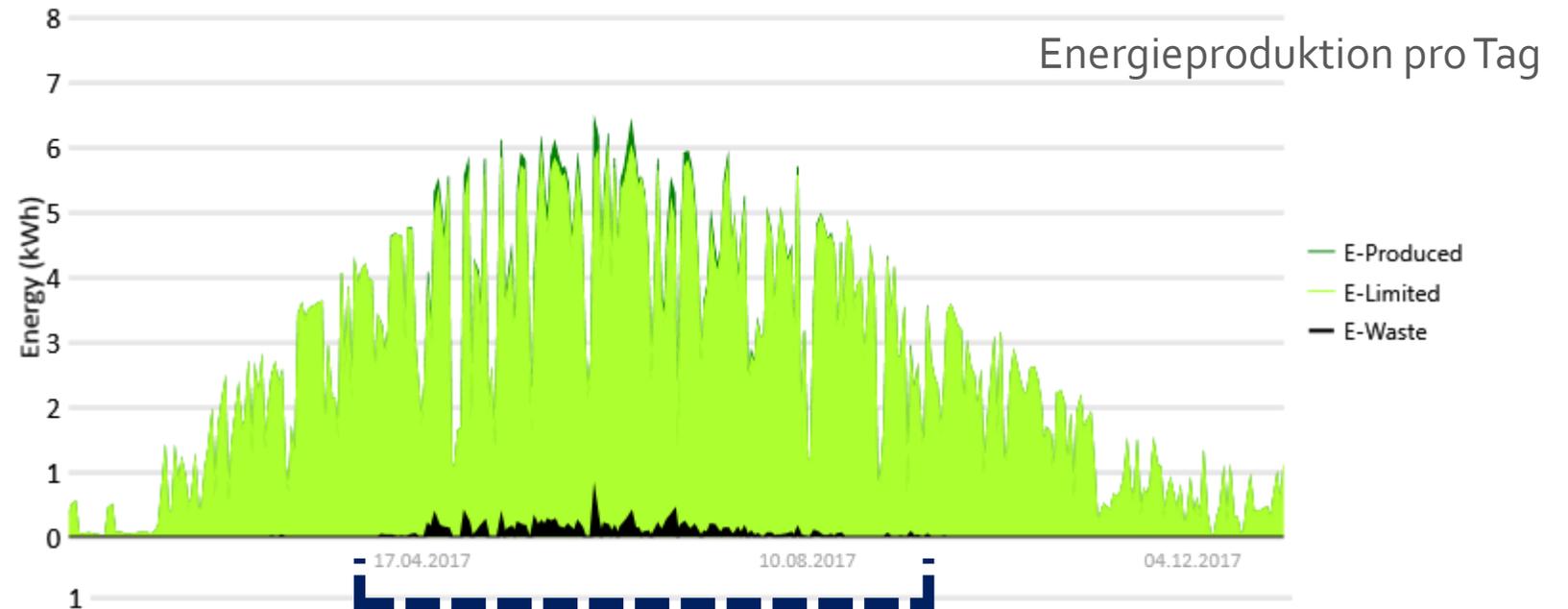
Peak Shaving

Charakteristik Leistungsbegrenzung

PVA-1

Typische Ost-West Anlage
Mittelland

Dimensionierung: 95%
Begrenzung: 60%
Minderertrag: 1%
Netzkapazität eingespart: 37%



Peak Shaving

Charakteristik Leistungsbegrenzung

PVA-2

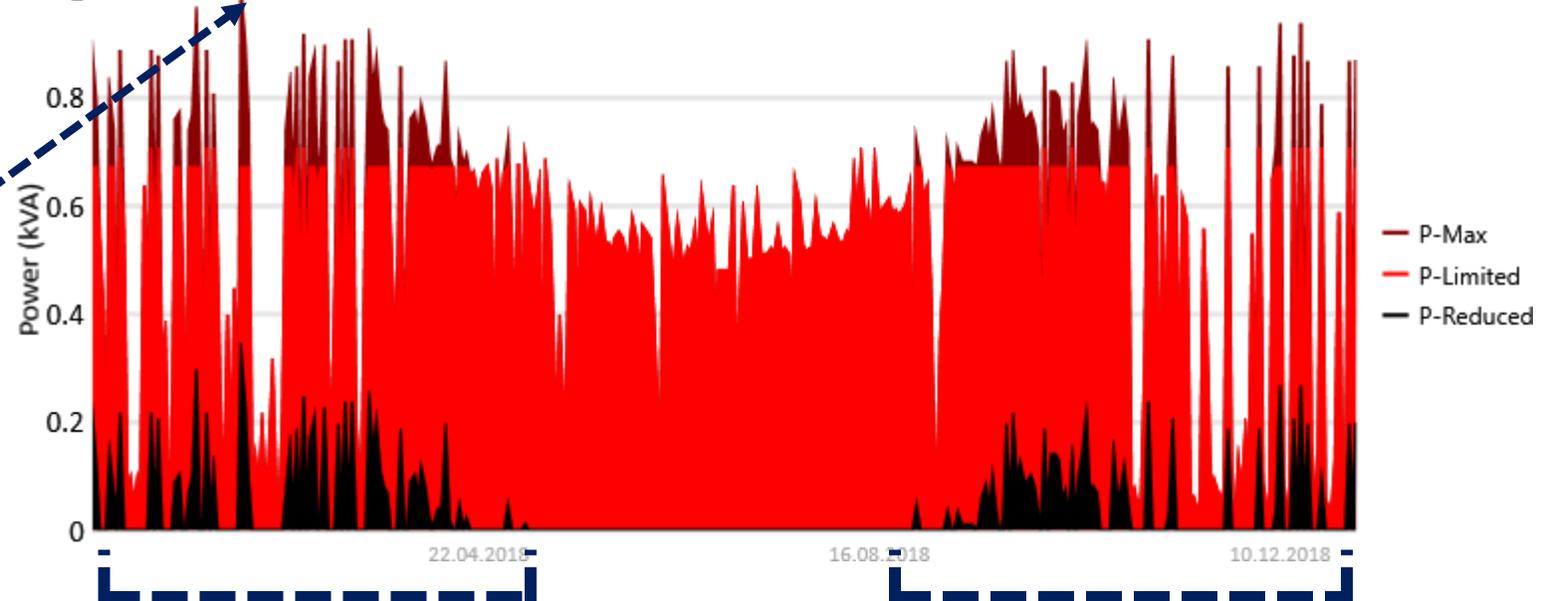
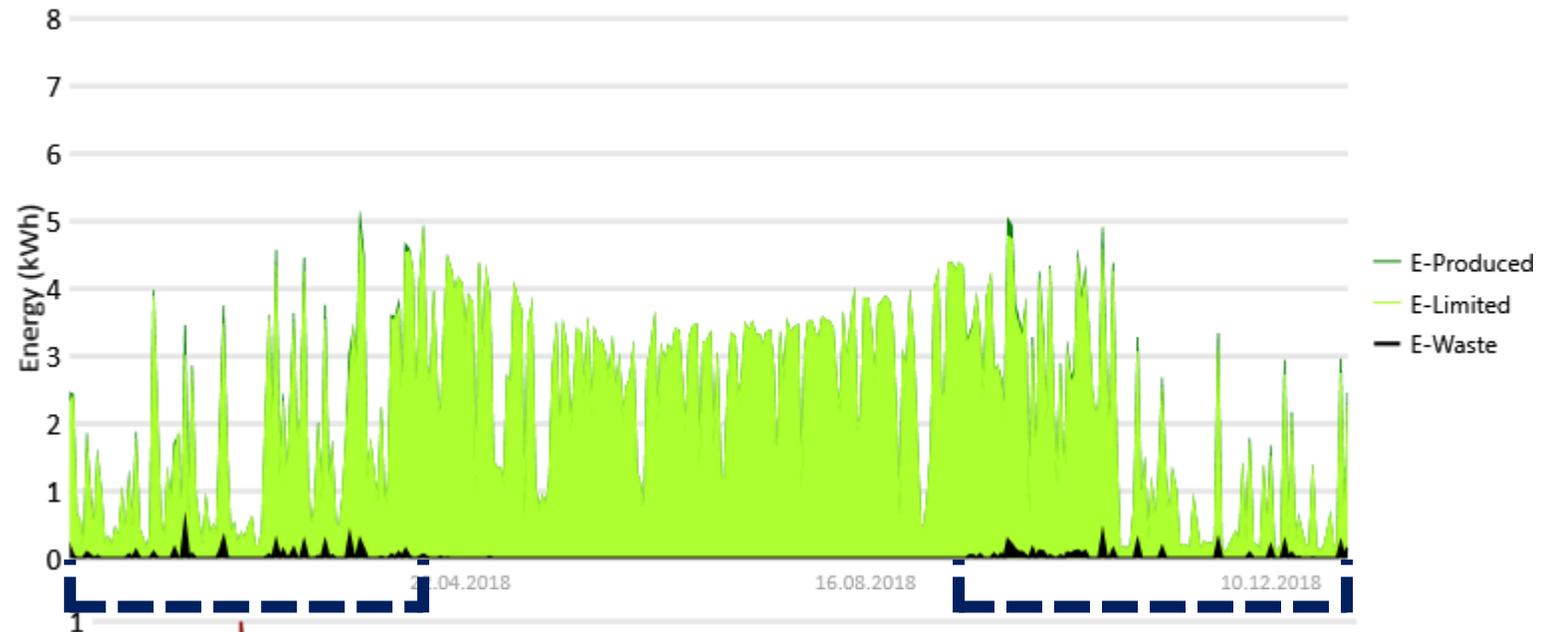
Fassade Süd Mittelland

Dimensionierung WR: 68%

Peak Süd-Gen.: 96%

Begrenzung WR: 67%

Minderertrag: 1%



Peak Shaving

Charakteristik Leistungsbegrenzung

PVA-2

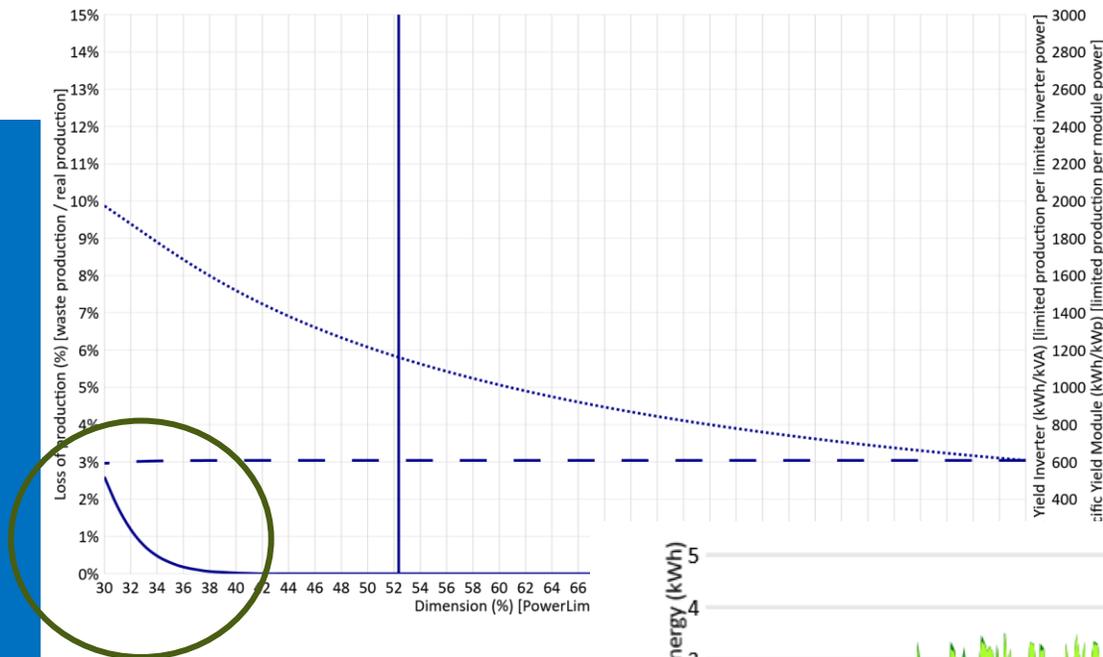
Komplettes Gebäude
Mittelland

Dimensionierung: 73%

Peak: 52%

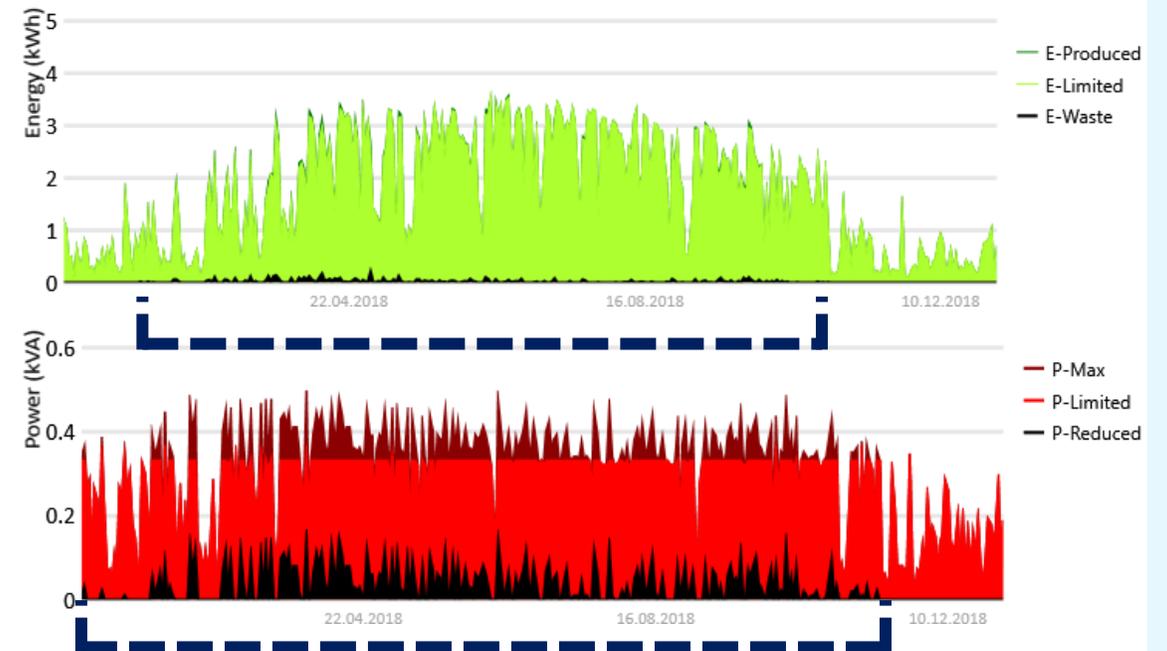
Begrenzung: 33%

Minderertrag: 1%



Verschwendung

- 40% Netzanschluss über Peak reserviert
- 120% Netzanschluss über Kurve «-1%» reserviert
- > 120% mehr reserviert als notwendig wenn mit Einbezug Eigenverbrauch

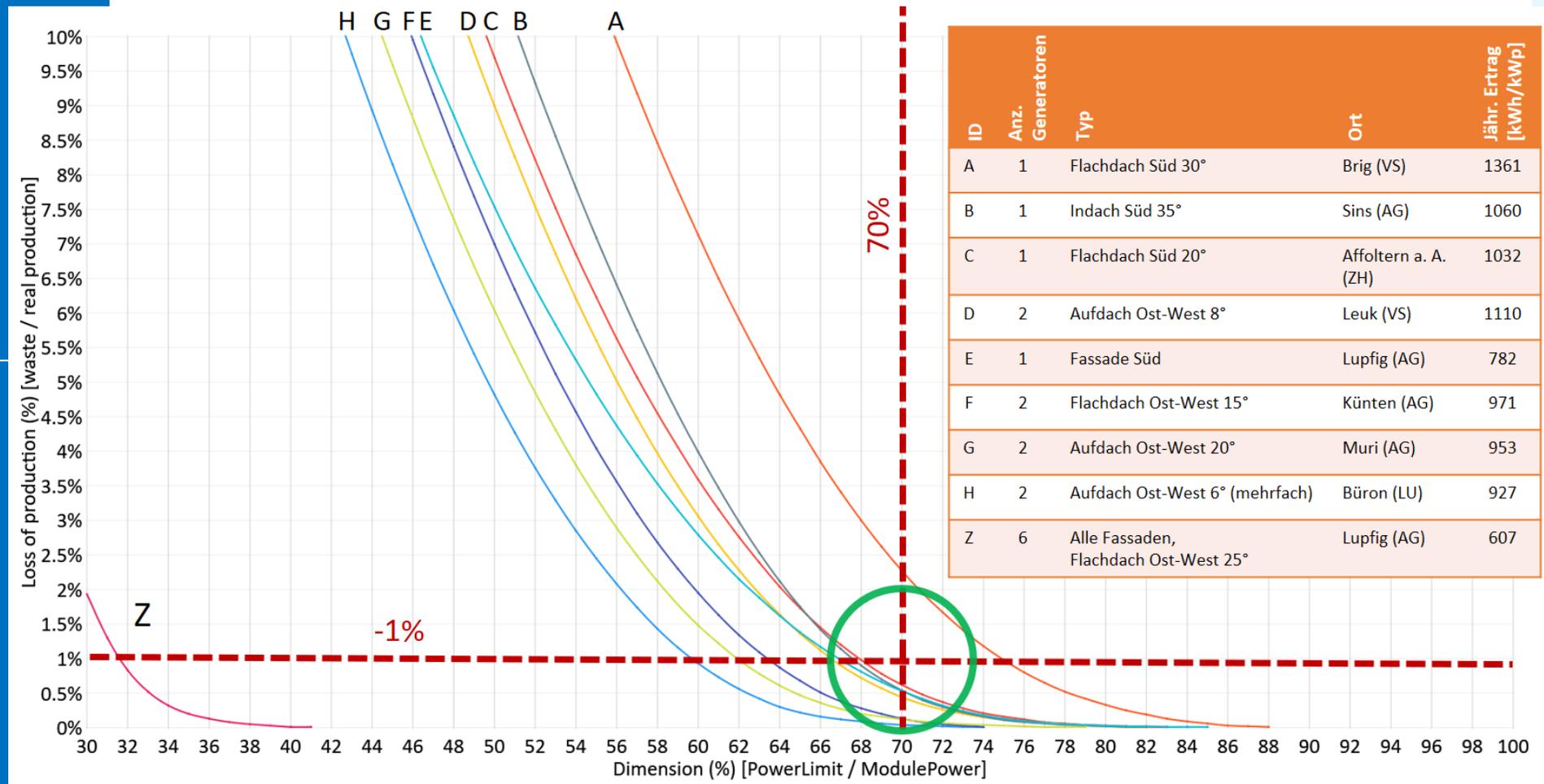


Netzanschluss: Freigabe von 55% möglich

Peak Shaving

Anlagenvergleich beim Minderertrag

Analyse OHNE Einbezug von Eigenverbrauch oder Speicher!



Quelle: www.pv2grid.ch/photovoltaik/anlagenvergleich

Peak Shaving

Anlagenvergleich bei minus 1% Ertrag

- Pro Anlage auf 1% Minderertrag analysiert
 - Analyse OHNE Einbezug von Eigenverbrauch oder Speicher!
- Sehr unterschiedliches Produktions- und Leistungsbegrenzungs-Verhalten
- Vertikale Anlagen haben Produktionsverluste im Winter
- Je mehr unterschiedliche Generatoren, desto konstanter und flacher die Produktion

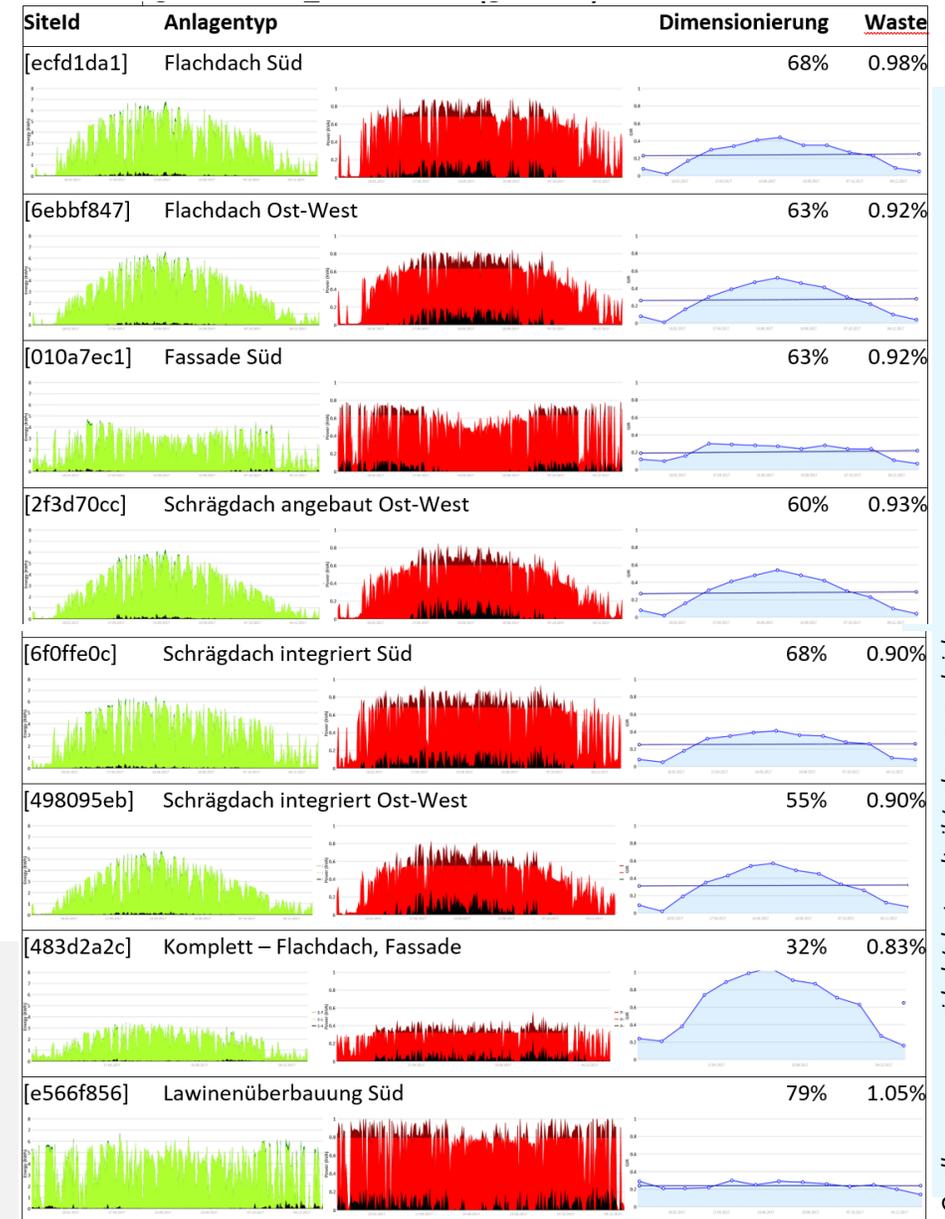
Erklärung Grafik:

grün: Energie pro Tag

rot: Leistungmaximum pro Tag

schwarz: Minderertrag/Leistungseinsparung

blau: GIR (www.pv2grid.ch/netzintegration/bewertungskennzahlen)



Entwicklung Stromverbrauch

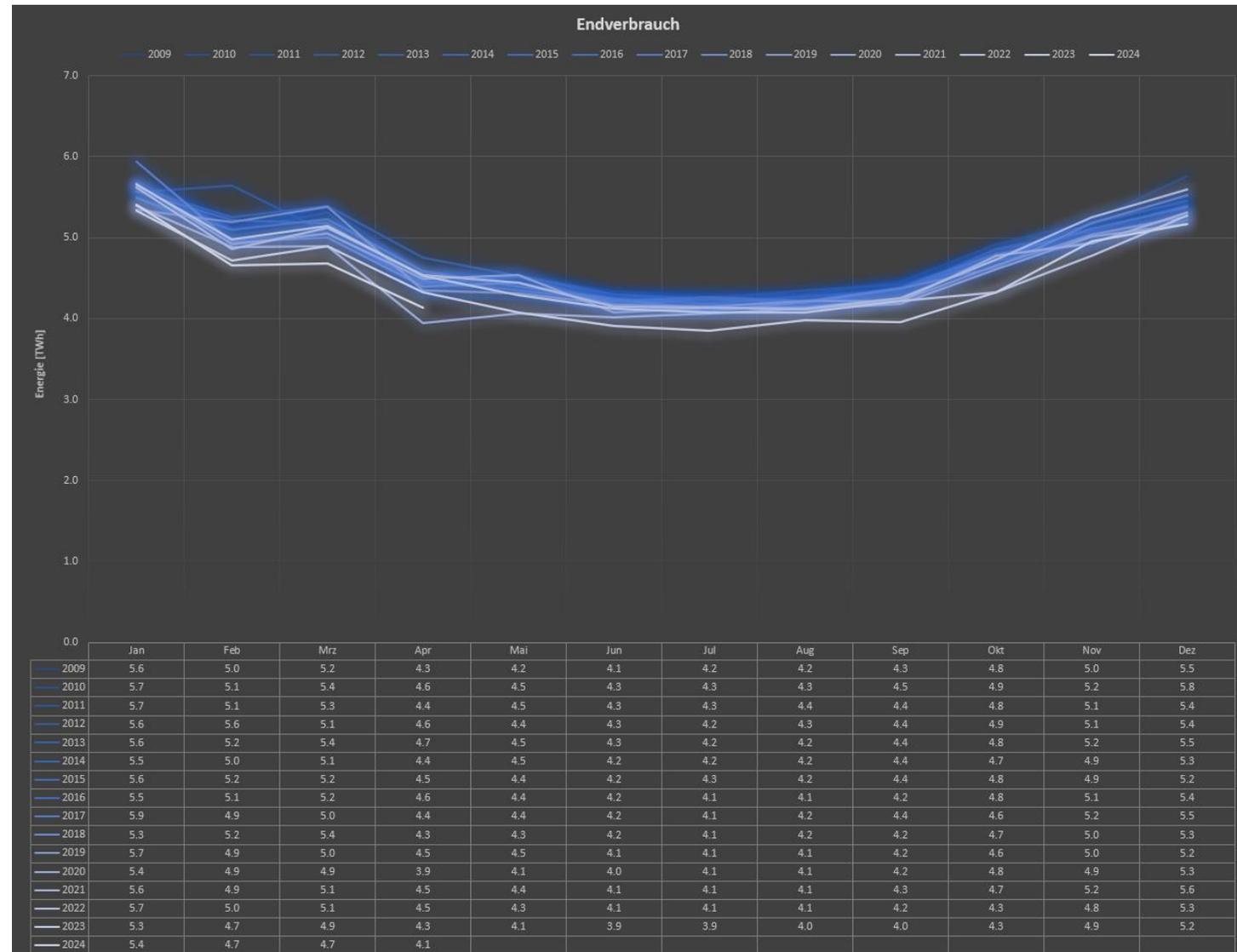
Stromverbrauch

Endverbrauch

OHNE Netzverluste, Speicherpumpen
und Eigenverbrauch Kraftwerke

Je dunkler die Linie, umso älter
das Jahr

Je heller die Linie, umso neuer
das Jahr



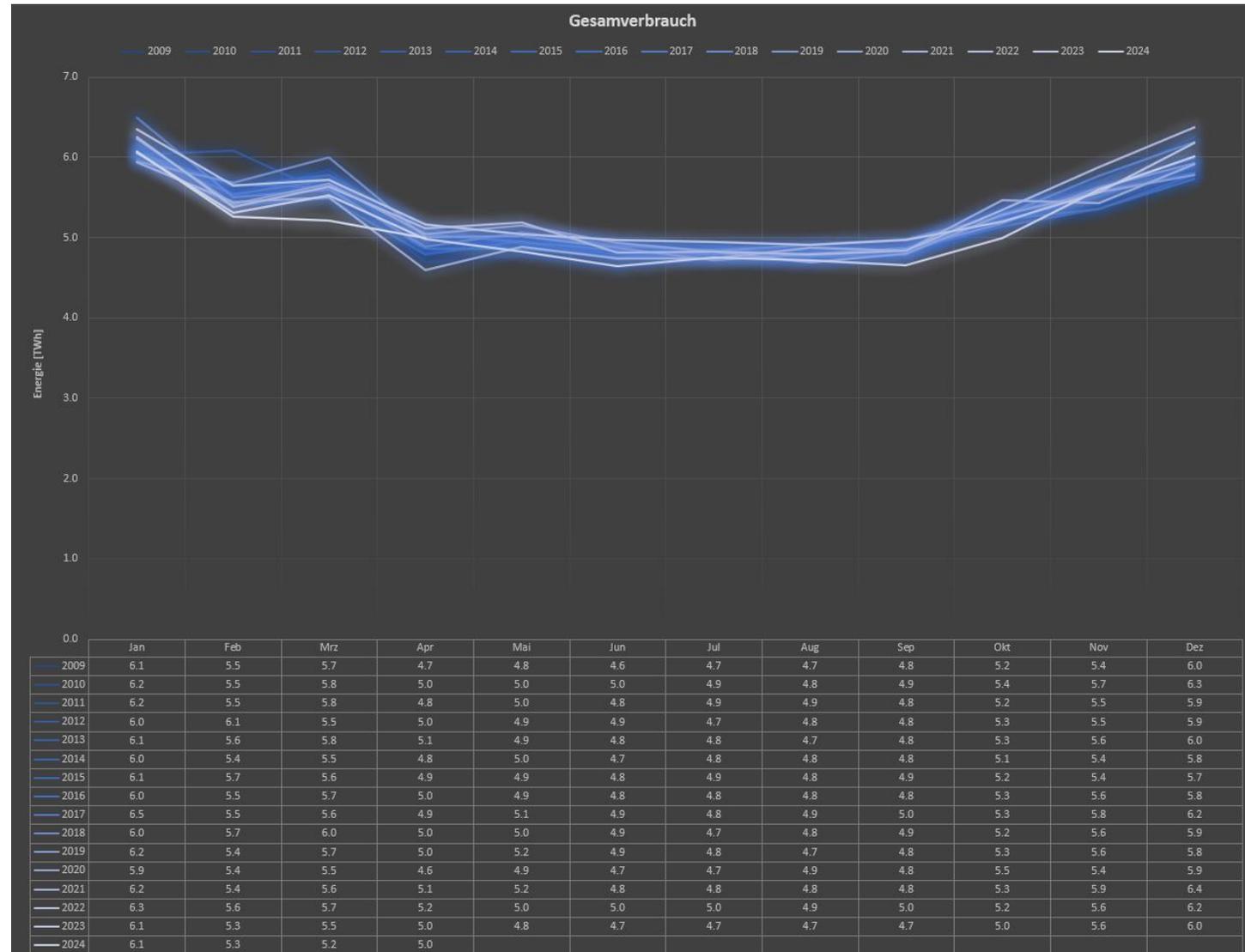
Stromverbrauch

Gesamtverbrauch

MIT Netzverluste, Speicherpumpen
und Eigenverbrauch Kraftwerke

Je dunkler die Linie, umso älter
das Jahr

Je heller die Linie, umso neuer
das Jahr

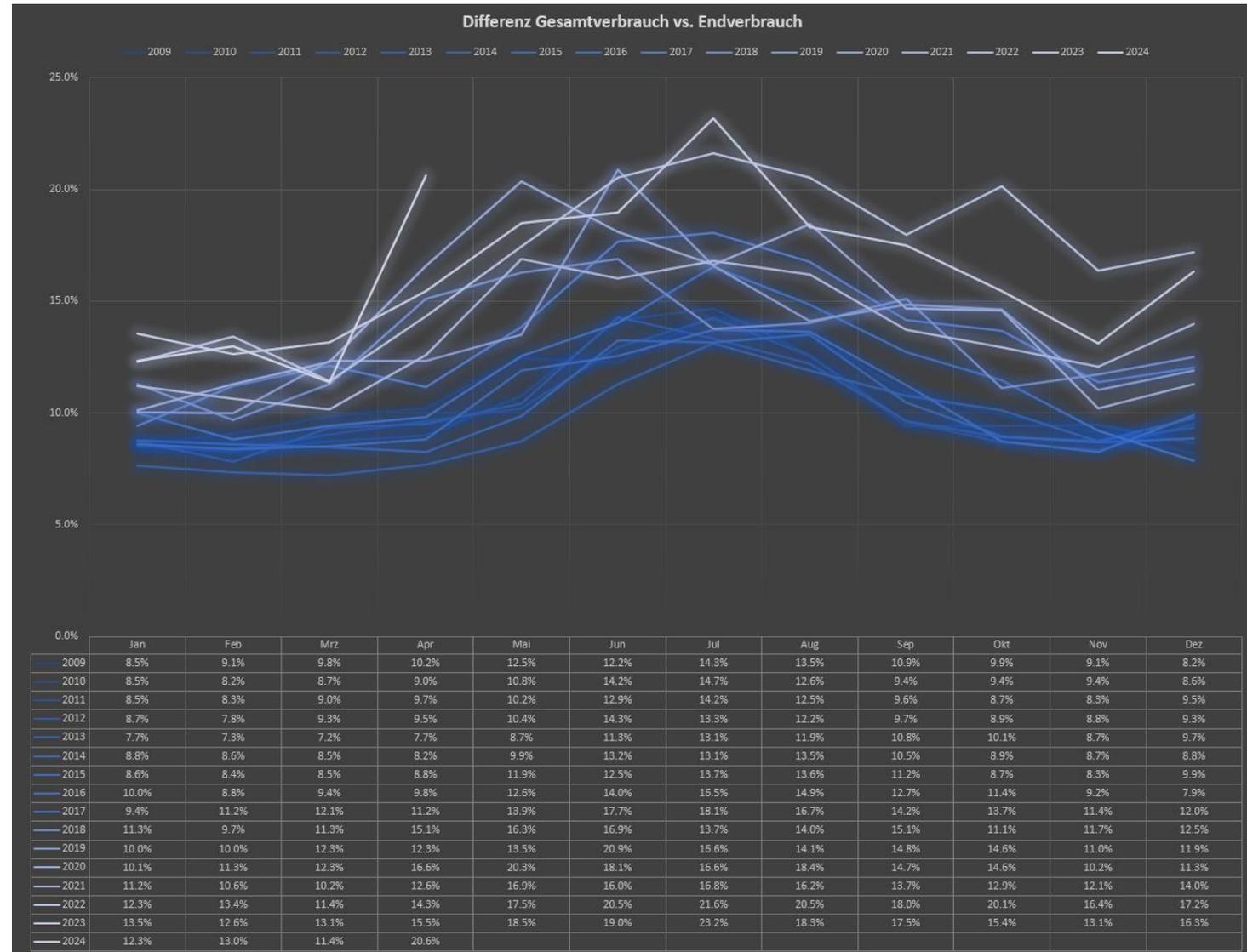


Stromverbrauch

Differenz
Gesamtverbrauch vs.
Endverbrauch

Je dunkler die Linie, umso älter
das Jahr

Je heller die Linie, umso neuer
das Jahr



Stromverbrauch

Unsicherheiten bei den Messdaten

Grund

- ungemessener Eigenverbrauch bei PV-Anlagen

- Behauptung 1: Winter-PV-Produktion wird zu tief erfasst
 - Viel PV-Produktion wird ungemessen direkt vor Ort verbraucht
- Behauptung 2: Sommerverbrauch zu tief gemessen
 - Viel Bedarf kann direkt durch PV-Produktion vor Ort gedeckt werden (ungemessen)
- 40% der installierten PV-Leistung braucht keine Produktionsmessung (Anlagen mit Wechselrichter unter 30kVA)
- Sind diese «Unsicherheiten» ein Problem bei der Energiewende?
→ Nein, die Tendenz ist aussagekräftig genug

Stromverbrauch

Künftiger Stromverbrauch?

- Stromeffizienz
 - Gemessener Endverbrauch 2009-2023 stabil bis zurück
 - Bevölkerungswachstum von 7.8 auf 8.9 Mio Bewohner (ca. 15%)
 - Wirtschaftswachstum (BIP total auch ca. 15%)
 - Elektrifizierung Ende 2023: 450K Wärmepumpen, 160K E-Autos
- Persönliche Einschätzung
 - Strom für Kühlung im Sommer wird zunehmen
 - Neubauten oder sanierte Gebäude verbrauchen weniger «Heiz-Strom», brauchen aber mehr «Kühl-Strom» im Sommer
→ gespeicherte Wärme im Gebäude bleibt über Nacht

Mehr Informationen:

www.pv2grid.ch/energiewende/wissenswertes

Netzkapazitäten

Netzkapazitäten

Wie viel Strom erträgt
unser **Verteilnetz**?

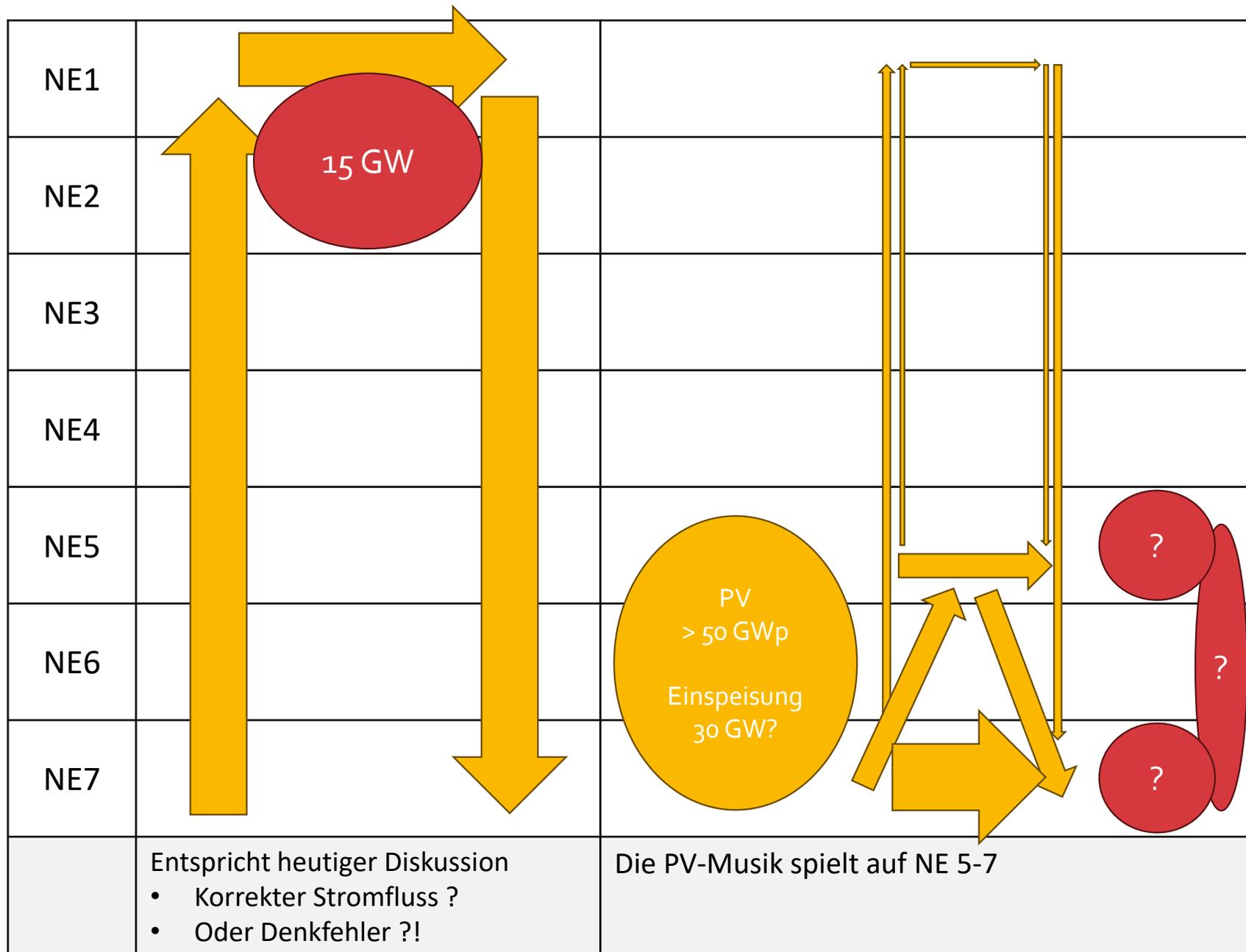
- In der öffentlichen Diskussion ist immer wieder die Rede von 15GW maximaler PV-Einspeisung
→ «für mehr PV-Leistung ist unser Stromnetz nicht ausgelegt»
- Oder wäre die Aufnahme von mehr PV-Strom möglich?
- FRAGE: wer hat jemals eine Aussage gehört, wie viel PV-Leistung unser **Verteilnetz** aufnehmen kann ???

Netzkapazitäten

Denk- oder Betrachtungsfehler?

Kabel: NE1 / 3 / 5 / 7

Transformierung: NE2 / 4 / 6

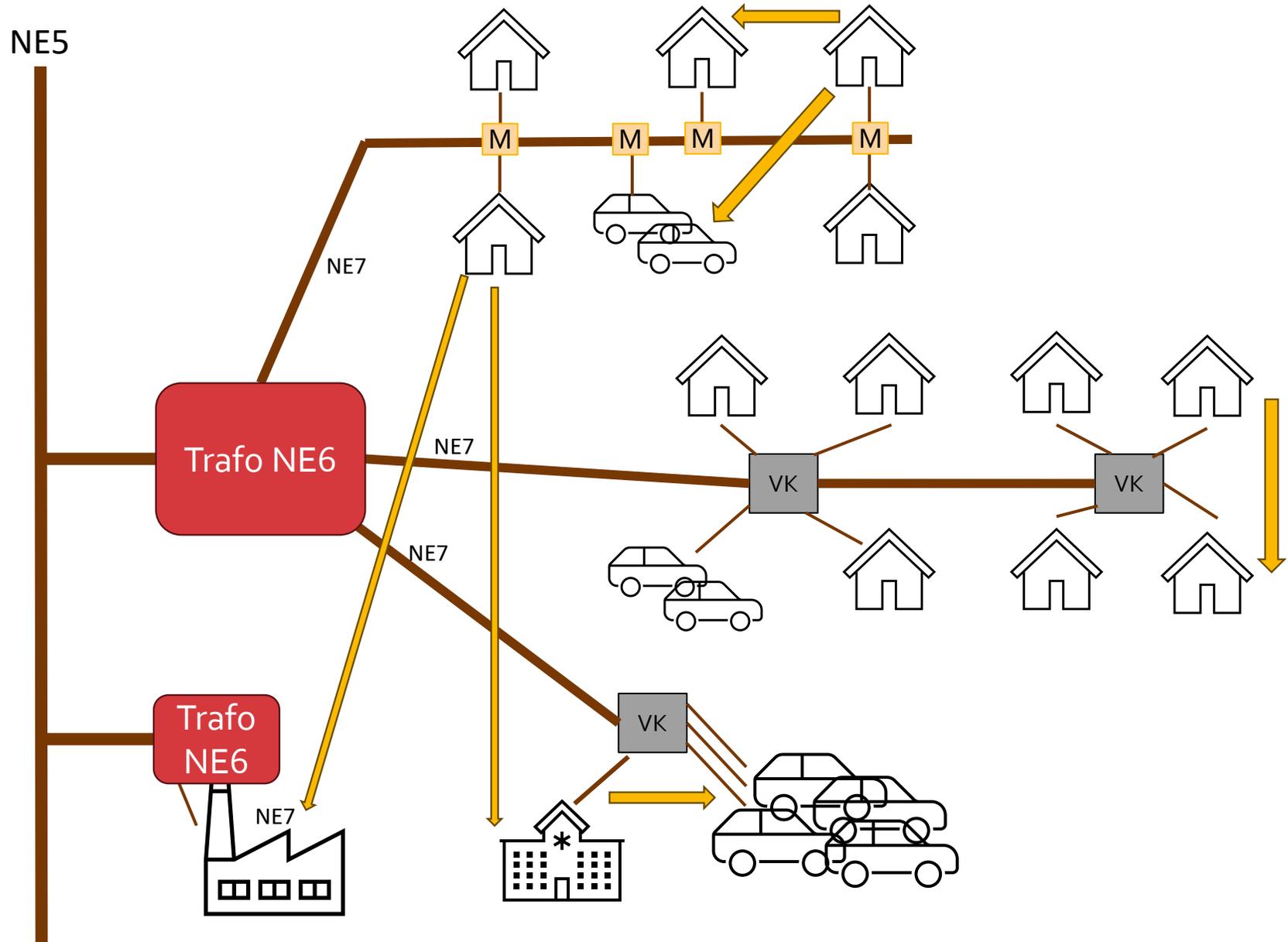


Netzkapazitäten

PV-Strom Verteilung
OHNE
Übertragungsnetz

M = Muffe

VK = Verteilkasten



Netzkapazitäten

Reales Netzgebiet

Reales Netzgebiet 2023 untersucht.

Einspeisung Vorlieferant auf NE5

Kunden auf NE5 und NE7

Was	Netzgebiet NE5-NE7	Schweiz NE1-NE7
Maximalleistung Endverbrauch	18 MW	10-12 GW
Endverbrauch	100 GWh	54 TWh
Trafoleistung NE6	70 MW	?
Abgangssicherung in Trafostationen	144'000 A → 100 MW	?

- Trafoleistung NE6 ist um Faktor 4 höher als die heutige gemessene Maximallast
- Abgangssicherungen NE7 in Trafostationen hat Faktor 5 höher
- Die Abgangskabel von den Trafos sind nochmals mit Faktor 1.5 höher abgesichert
- Wie hoch vermag der Multiplikator für die gesamte Schweiz sein?
 - NE1 mit Maximallast von 10-12 GW
 - NE6 Trafoleistung?
 - NE7 Stammkabelkapazität?

Netzintegration

Netzintegration

Ziel

Was ist das Ziel von Netzintegration?

- maximale PV-Produktion
mit
- minimalem Stromnetzbedarf

Netzintegration

Ausspeise- vs. Einspeiseleistung

Ausspeiseleistung NICHT gleich Einspeiseleistung

40A Anschluss ermöglicht 40A Bezug, aber nicht unbedingt 40A Einspeisung → ev. maximal 18A Einspeisung möglich

- Spannungshaltung
 - Wie das Wasser fließt der Strom von der höheren Spannung zur tieferen Spannung
 - Wenn die PVA einspeisen will, muss sie die Spannung am Netzanschluss erhöhen
- Gleichzeitigkeitsfaktor
 - Im Verbrauch wird oft mit einer Gleichzeitigkeit von 0.4 gerechnet, da sich die Verbraucher im zeitlichen Betrieb versetzen. Die Wetterbedingungen im Quartier werden wohl immer gleich sein → Gleichzeitigkeitsfaktor 1 bei Einspeisung

Netzintegration

Wann?

- Eine intelligente Netzintegration muss JETZT starten
- Zuwarten bedeutet
 - Unnötiger Netzausbau → Zusatzkosten und zeitliche Ausbremsung Transformation (Ressourcenknappheit)
 - Falsche Netzplanung
 - Teure Retrofit-Programme
- Effizientes Gesamtsystem
 - Nicht jede Kilowattstunde zählt!
 - Bsp. DE in Gaskrise → Fehler (persönliche Meinung)

Netzintegration

Wie?

- Vorschriften
- Anreize
- Lastmanagement
- Produktion und Verbrauch vor Ort
- Besser technische Lösungen als menschliche Verhaltensänderung

Weitere Informationen: www.pv2grid.ch/netzkosten/netzausbau

Netzintegration

Vorschriften und Anreize

- Künftige Stromversorgungsverordnung (StromVV)
 - Vernehmlassung: Begrenzung bis 3% Produktionsverlust → kostenlos
 - Zusätzlicher Wunsch: Oder Begrenzung PV bei 70% am Netzanschluss → kostenlos → einfacher Einstieg VNBS
- Werkvorschriften
 - Jede neue PV-Anlage maximal 70% Einspeisung von PV-Leistung
 - Generelle Einspeisebegrenzung wichtig für statische Netzplanung und Fairness aller PV-Betreiber im Leitungsstrang → PVA Anlage würde immer zuerst abregeln wegen PowerQuality → Q(U) und P(U)
- Weitergabe von Anschlussleistungen?
- Anreize
 - Eigenverbrauch → macht Power-Time-Slots für andere Verbraucher frei
 - Zusatzvergütung bei weiterer Senkung der Einspeiseleistung
 - heute: TOP40 Produkt von Elektra Jegenstorf (plus 8% vom Einspeisetarif)
 - künftig?: Plus 1-2 Rp/kWh wenn auf 60% Einspeiseleistung begrenzt
 - künftig?: Plus 2-3 Rp/kWh wenn auf 50% Einspeiseleistung begrenzt
 - FLEX Vergütung kommt von Netz- und nicht Energietopf !

→ **DOPPELTE PV-Leistung möglich**

Appell: Keine Angst vor intelligenter Einspeisebegrenzungen!

Netzintegration

Technische Massnahmen 1

- VSE-Arbeitsgruppe
 - Ziel (Branchenempfehlung): Spannungshaltung im Niederspannungsnetz – netzdienlicher PV-Betrieb auf NE7
 - AG-Mitglieder: VNBS, Swissolar, PV-Installateur, Berner Fachhochschule
- Intelligente Netzanschluss-Bewirtschaftung
 - Dynamische Leistungsbegrenzung am Netzanschluss → Eigenverbrauch und Speicher nutzen höhere Wechselrichterleistung
- Anpassung der Wechselrichter-Ländereinstellung wären gut
 - Vorkonfigurierte Schutz- und Betriebsmechanismen aktiviert

Netzintegration

Technische Massnahmen 2

Diese Qualitäts- und Schutzfunktionen kommen im Wechselrichter kostenlos mit...jedoch per Default deaktiviert

Q(U) im Wechselrichter

- Stufenlos
- Bei hoher Spannung wird mit Hilfe von induktiver Blindleistung die Spannung gesenkt.
- Die Massnahme kommt jedoch an die Grenze, wenn $-Q_{max}$ erreicht wurde (z.B. $\cos\phi$ 0.9)

P(U) im Wechselrichter

- Stufenlos
- Kein abruptes OFF
- Geht linear bis auf 0 kW
- Ab 110% der Spannung (253V) beginnt die Leistungsbegrenzung und somit Spannungssenkung

Bilderquelle: NA/EEA-NE7 – CH 2020

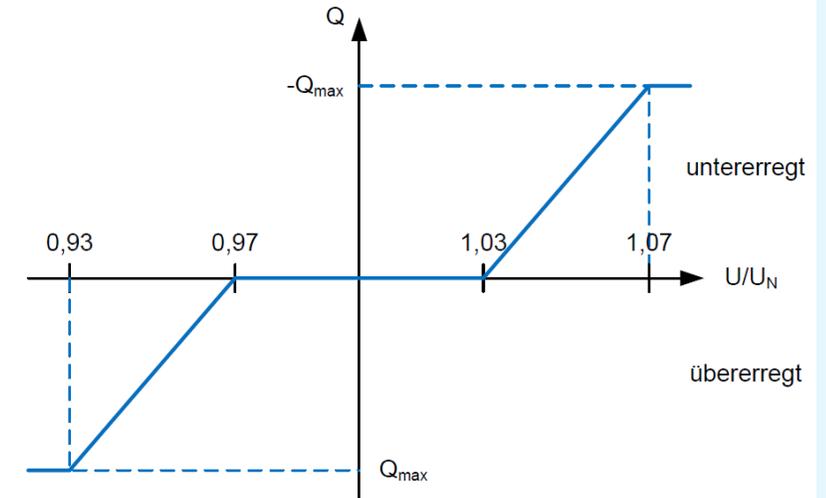


Abbildung 4: Beispiel Q(U) - Kennlinie in Niederspannung (Erzeugerzählpeilsystem)

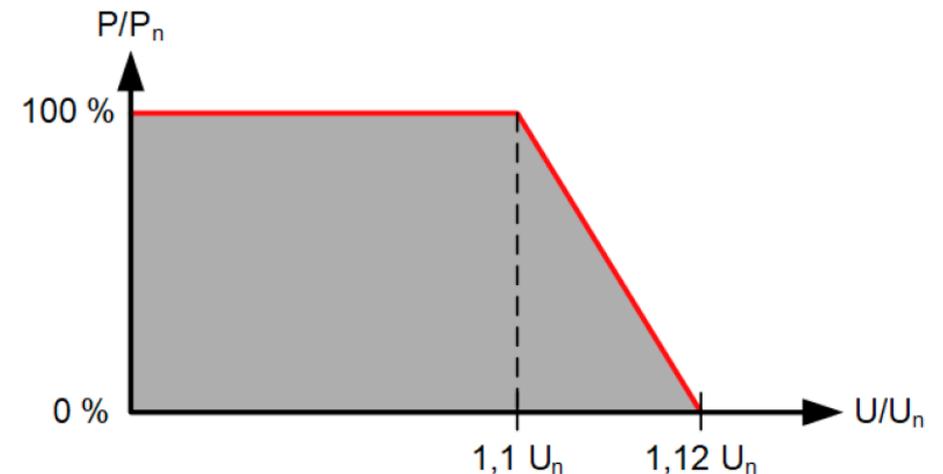


Abbildung 5 Beispiel Standardeinstellung der P(U)-Regelung

Grid protection criterias					
Parameter	Symbol	Einheit	Wert	Zeit	Bemerkung zum Parameter
Überspannung	U >>	V	276	≤ 100 ms	120% von U _n ^{a)}
Überspannung (Gleitender 10-Minuten Mittelwert)	U >	V	253	≤ 100 ms	110% von U _n ^{b), c)}
Unterspannung	U <<	V	184	≤ 1500 ms	80% von U _n ^{d)}
Unterspannung	U <	V	104	≤ 300 ms	45% von U _n ^{d)}
Unterfrequenz	f <	Hz	47,50	≤ 100 ms	
Überfrequenz	f >	Hz	51,50	≤ 100 ms	

Netzintegration

Wenn Schutzmechanismen greifen... 😊

Überspannung

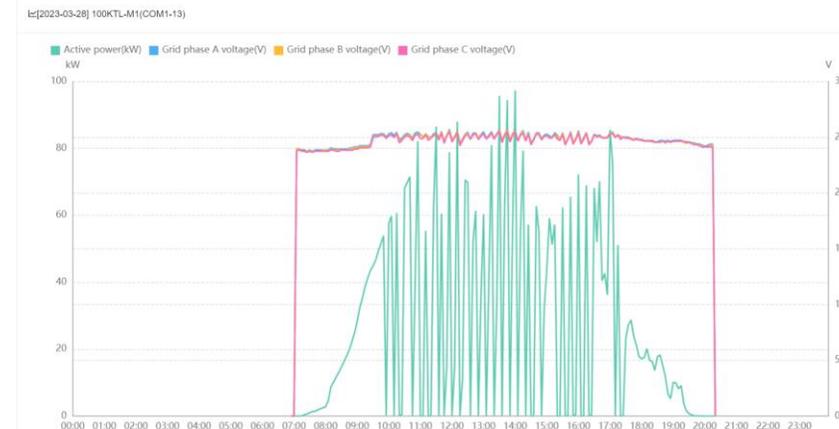
Q(U) war falsch programmiert (Vorzeichen vertauscht). Anstatt Spannung zu senken wurde Spannung angehoben.
Dann reagiert die Überspannungsüberwachung

Konfiguration Q(U)

FALSCH

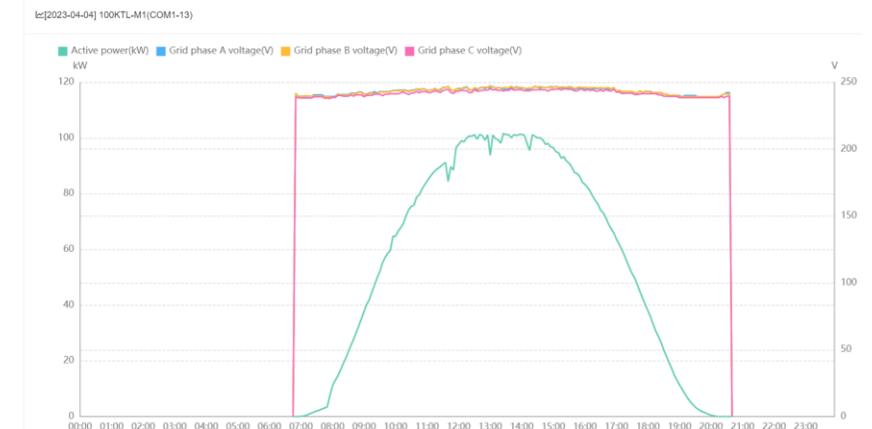
Korrekt

Date: 2023-03-28 Signal point: Selected: 4 Search Reset



Spannung steigt bis auf 257V → OFF → Pause → ON → und wieder von vorne

Date: 2023-04-04 Signal point: Selected: 4 Search Reset



Spannung nicht über 245V

Netzintegration

Und es funktioniert!



Bildquelle: Fabio Giddey

Wichtige Zahlen zum Praxisbeispiel CKW

- PV-Generator fast **40 kWp** (100%)
- Wechselrichter-Leistung entspricht **30 kVA** (75%)
- Maximal erlaubte Einspeiseleistung bei **23 kVA** (57%)
 - Parametriert in Wechselrichter **22.5 kVA** (56%)

- Produktion im Jahr 2022 = **43'010 kWh**
 - Ins Netz eingespeist = **18'130 kWh**
 - Eigenverbrauch = **24'880 kWh**

Quelle: Fabio Giddey

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

www.pv2grid.ch