

Stromspeicherung

Voraussetzung für
Elektroenergie aus Sonne und Wind

Sigismund KOBE

Institut für Theoretische Physik, Technische Universität Dresden

<https://tu-dresden.de/mn/physik/itp/das-institut/beschaeftigte/kobe>

Dresdner Seniorenakademie Wissenschaft und Kunst, WS 2021/2022, N-04
Dresden, 11. November 2021

GALAPAGOS

Aeroporto Ecologico





Speicher →

**Straßen-
Beleuchtung
autark**



„Mein Kraftwerk“ (EE, autark)

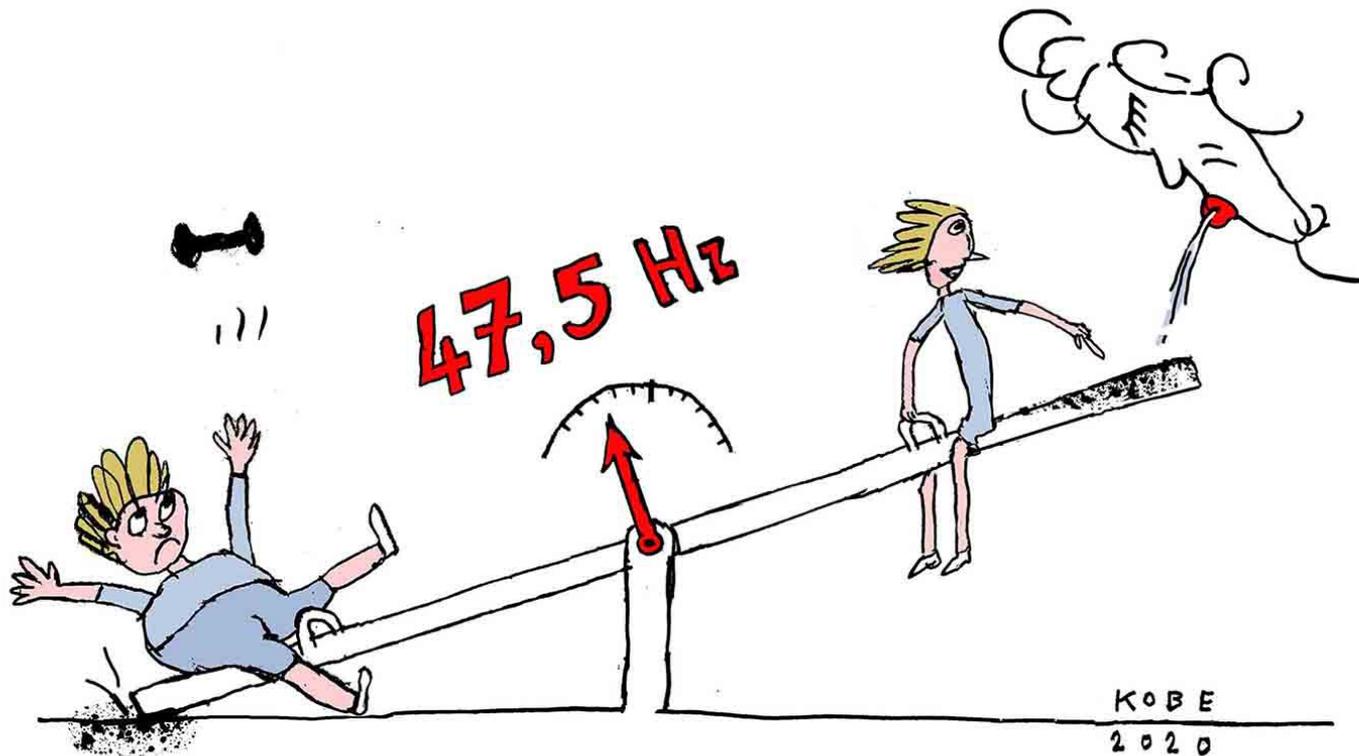
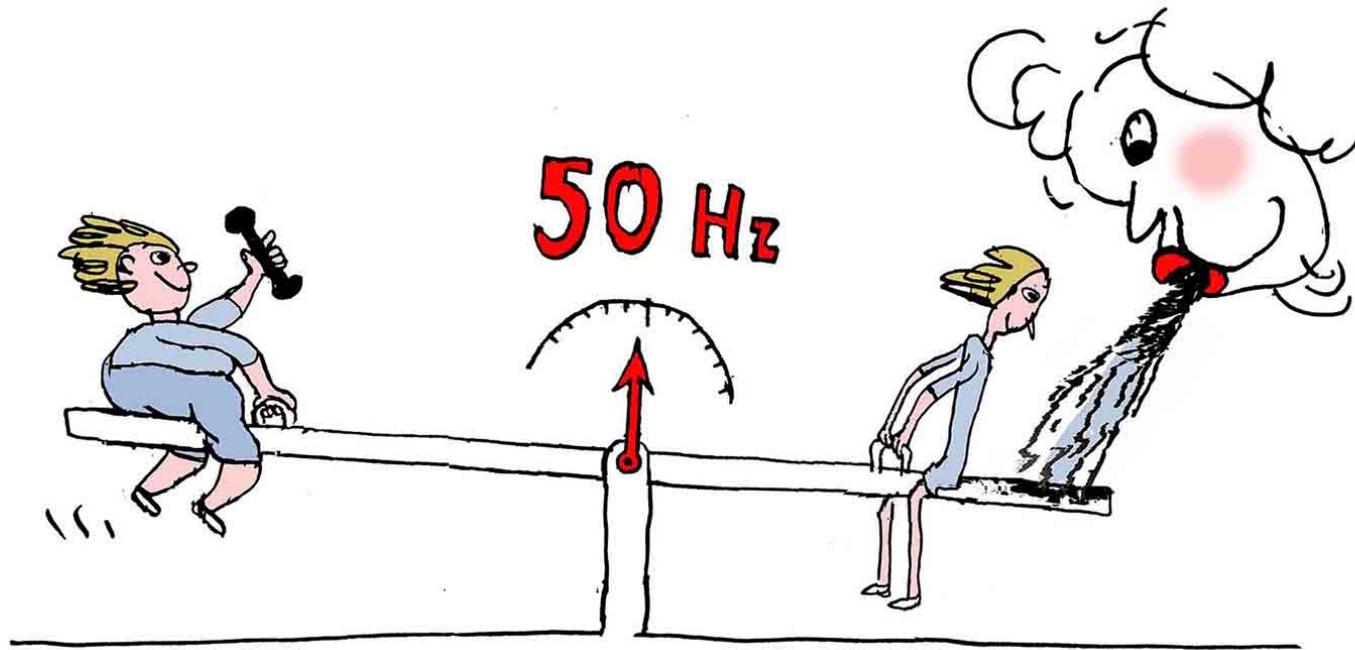


$P = 91 \text{ W}_{\text{peak}}$
0,6 qm (PV-Fläche)
62 €



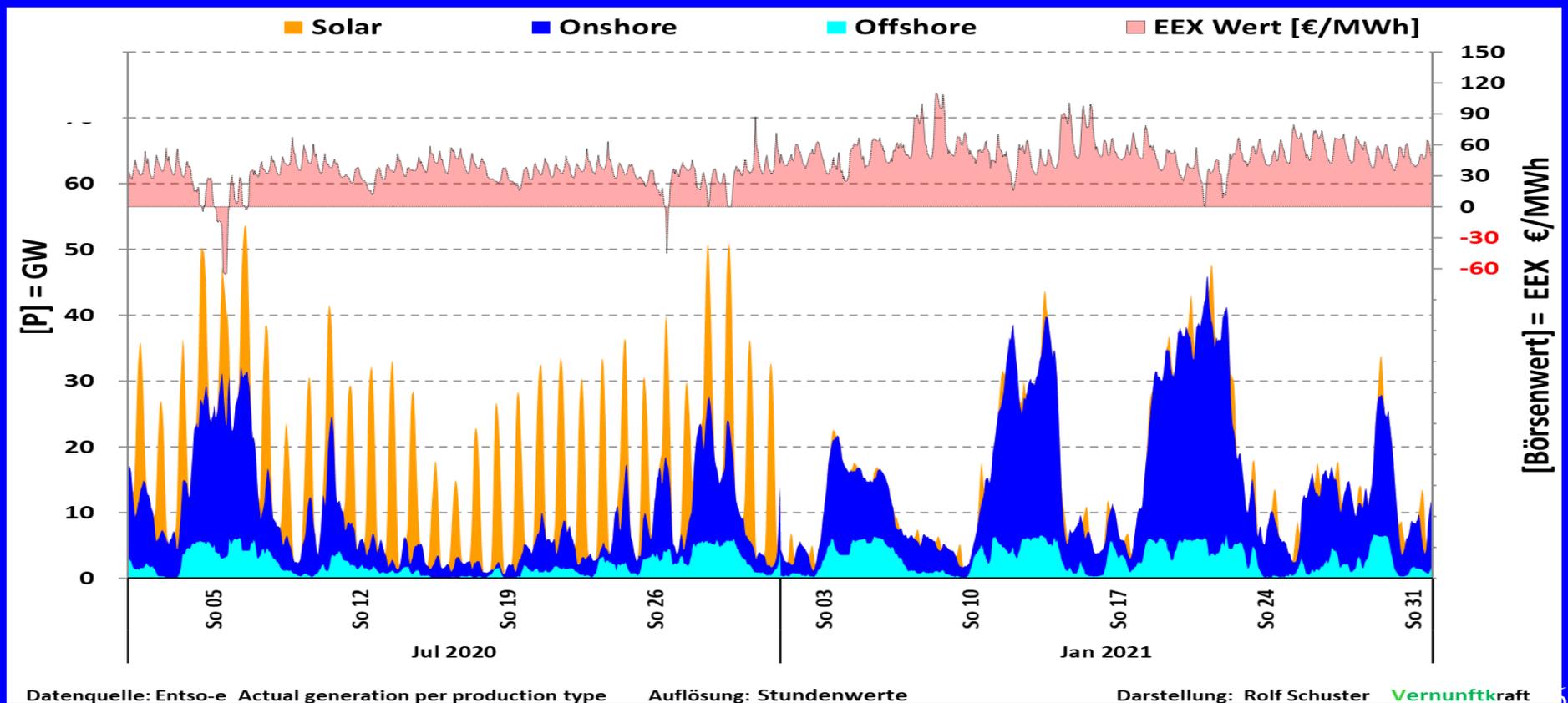
Laderegler, Wechselrichter
Akku, Messelektronik ...
315 €

Ertrag seit 09.09.2021: 5 kWh (1,60 €), 2 kg CO₂-Emission vermieden
Problem ab November 2021: geringe Einspeisung → es droht Akku-Tiefentladung

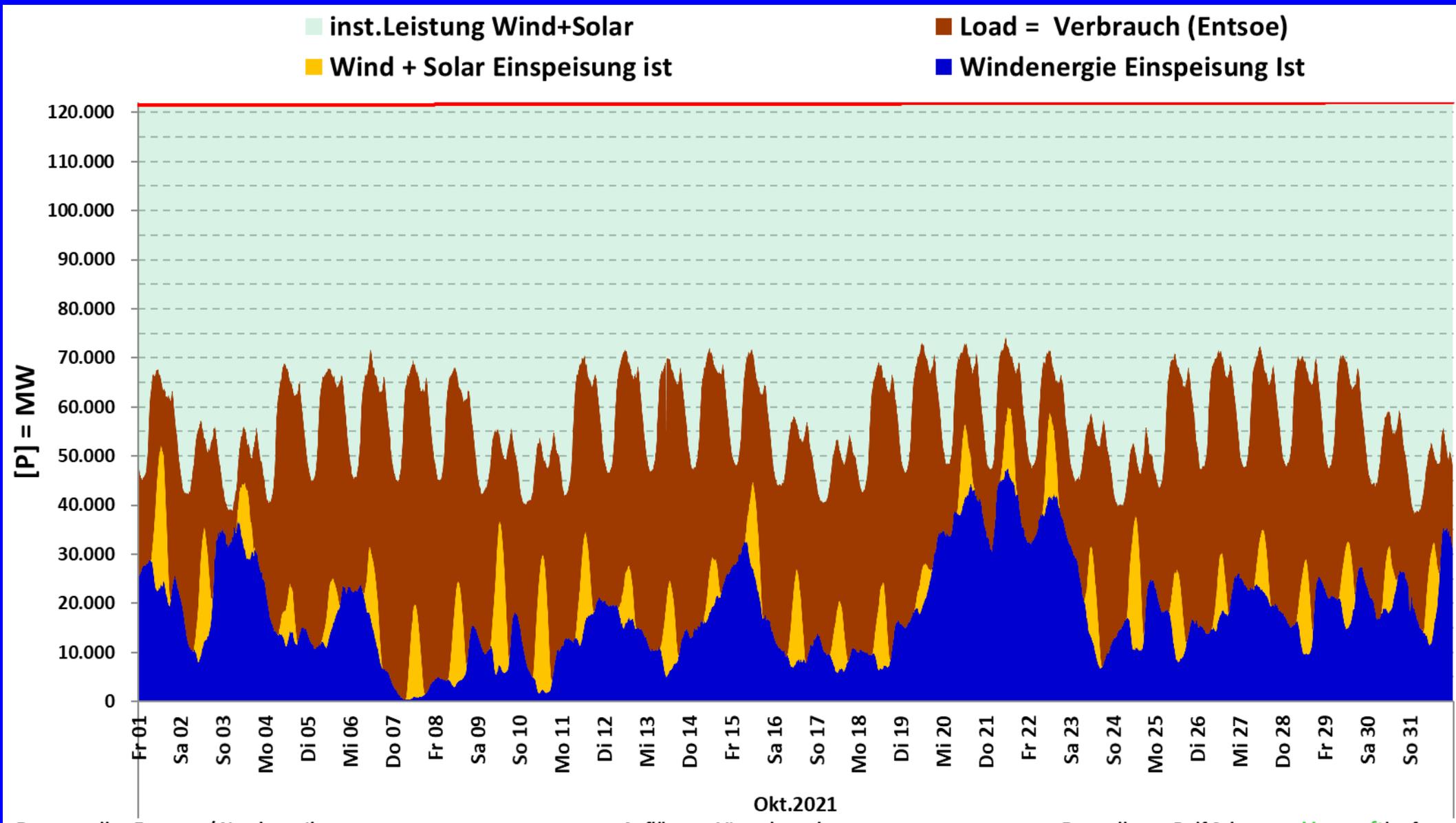


Problem

Verfügbarkeit:
Tag-Nacht und Sommer-Winter



PV-Einspeisung über ca. 4 Monate vernachlässigbar

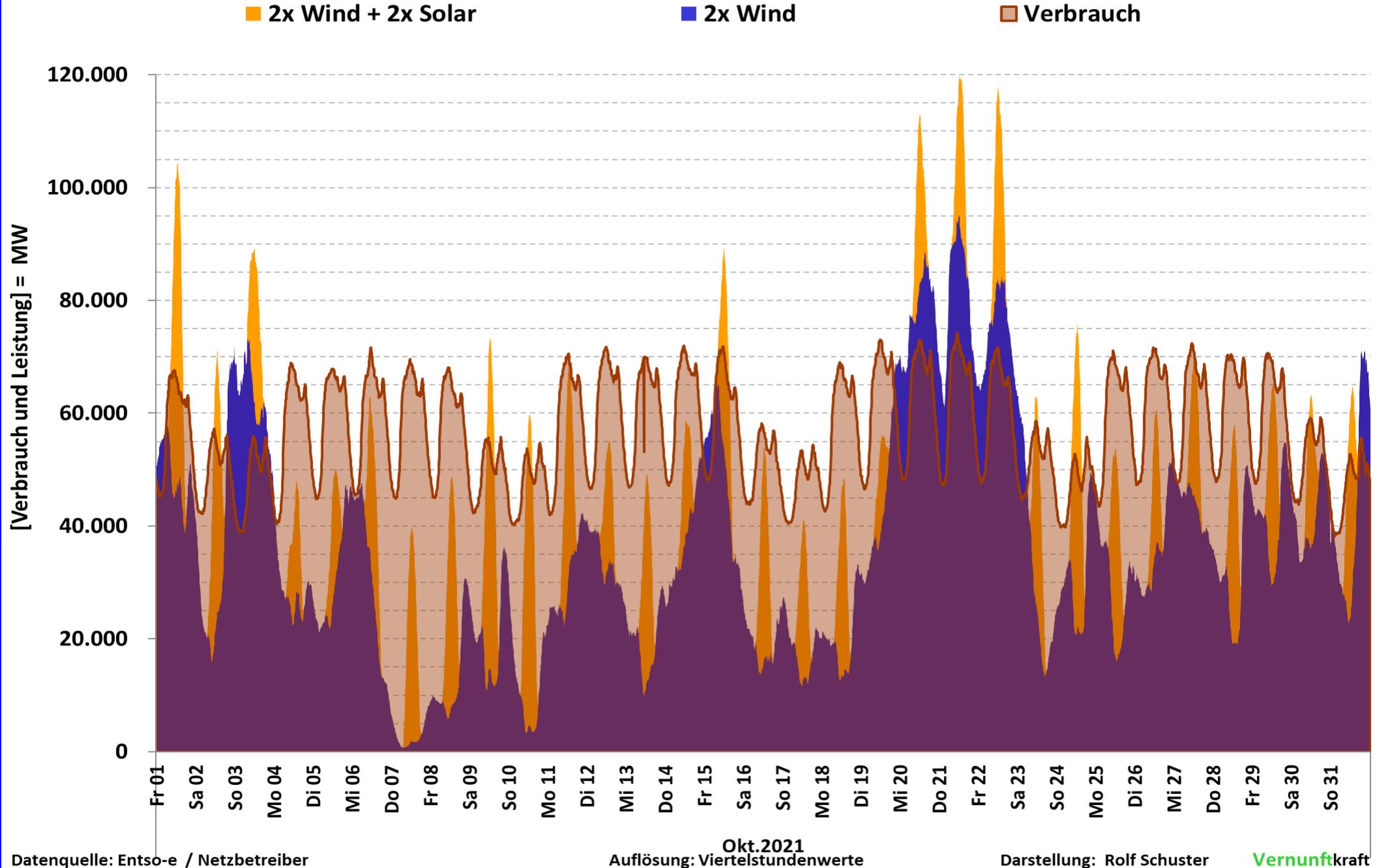


Datenquelle: Entso-e / Netzbetreiber

Auflösung: Viertelstundenwerte

Darstellung: Rolf Schuster Vernunftkraft

Ziel 2030: Verdopplung von Wind und PV



Stromspeicherung ?

Energieformen:

- (1) Elektrische Energie (einschl. Energie der elektromagnetischen Strahlung)
- (2) Mechanische Energie (potenzielle, kinetische)

- (3) Chemische Energie
- (4) Thermische Energie

- (5) Kernenergie (Spaltung, Fusion, Elementarteilchen, ...)

(3) Speicherung dauerhaft möglich

(3) und (5) stehen auch in gespeicherter Form zur Verfügung

(4) Speicherung bedingt möglich (Wärmeisolation)

(2) Speicherung möglich (PSW, Schwungradspeicher)

(1) ??? → **Das Netz ist kein Speicher**

Ausweg: Umwandlung von elektrischer Energie

in speicherfähige Energieform, anschließend Rückverstromung⁹

A) Energiespeicherung ohne Umwandlung in thermische Energie bei der Rückverstromung

Elektrisch → mechanisch → elektrisch

Mechanische Zwischenspeicherung über:

(1) **PSW** (alternativ: Beton am Kran, Meer-Ei, Druckluftspeicher ...)

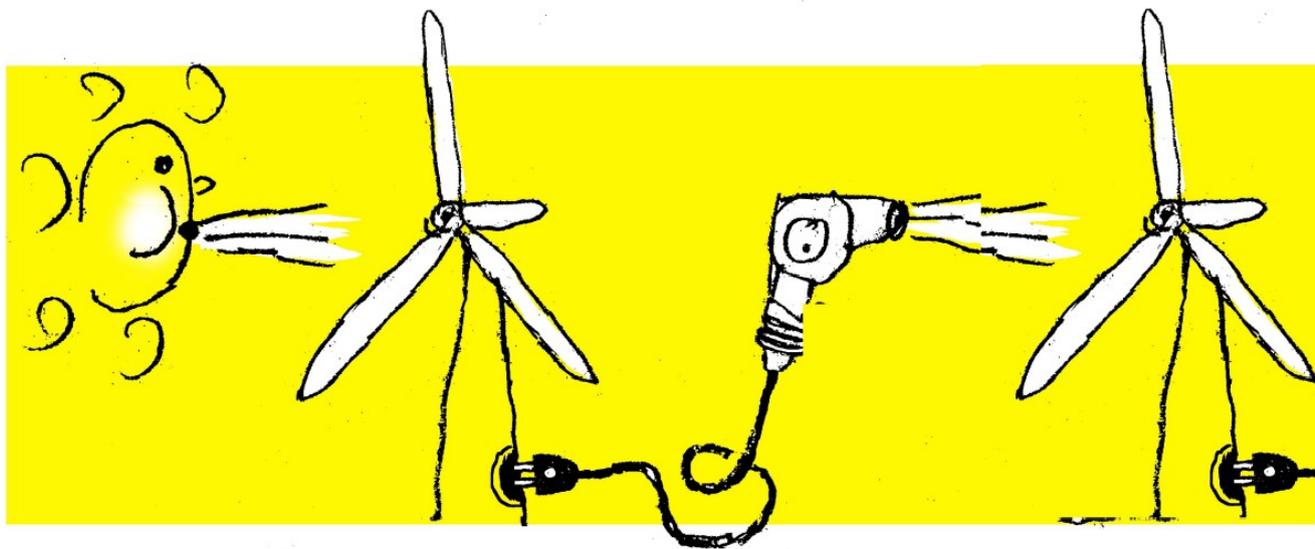
Wieviel Energie kann pro Volumen gespeichert werden?

→ **Energiedichte**

Bsp: PSW Niederwartha

$$E/V = m g h/V = 1000 \times 9,81 \times 149 \text{ Ws/m}^3 = 0,4 \text{ kWh/m}^3$$

(2) Schwungradspeicher -> **2....8 kWh/m³**



Erneuerbare Energie?

mechanisch → elektrisch → mechanisch → ... (ohne größere Verluste möglich)

Alternativ:

Elektrische Energie → elektrochemische Energie → elektrische Energie

Elektrochemische Zwischenspeicherung über Akku

Energiedichte

Bsp: Bleiakku 12 V („Mein Kraftwerk“)

$$E/V = (1,3 / 0,013) \text{ kWh/m}^3 = 100 \text{ kWh/m}^3$$

Tesla-Akku (500 kg), $E/V = 300 \text{ kWh/m}^3$ (geschätzt)

Smartphone-Akku (10 Wh) = 600 kWh/m^3

Bedarf an Speicherkapazität für PV-Freiflächenanlage:

Beispiel: 100 ha = 1000 m x 1000 m

**Installierte Leistung ($100 \text{ W}_{\text{peak}}/\text{qm}$) \rightarrow 100 000 000 W_{peak} \rightarrow
100 MW_{peak}**

**Mittlere Leistung: 10 MW (Schwankungsbreite 0 ... 100 MW)
Im Mittel werden pro Tag erzeugt: 240 MWh**

Annahme:

Speicherbedarf zur Überbrückung eines Tages: 100 MWh

**Zum Vergleich: BigBattery Lausitz (zur Stabilisierung der
Netzfrequenz, nicht als Energiespeicher konzipiert):**

Verfügbare Speicherkapazität 53 MWh

Kosten: 25 Millionen €

Zwischenergebnis 1:

Energiespeicherung

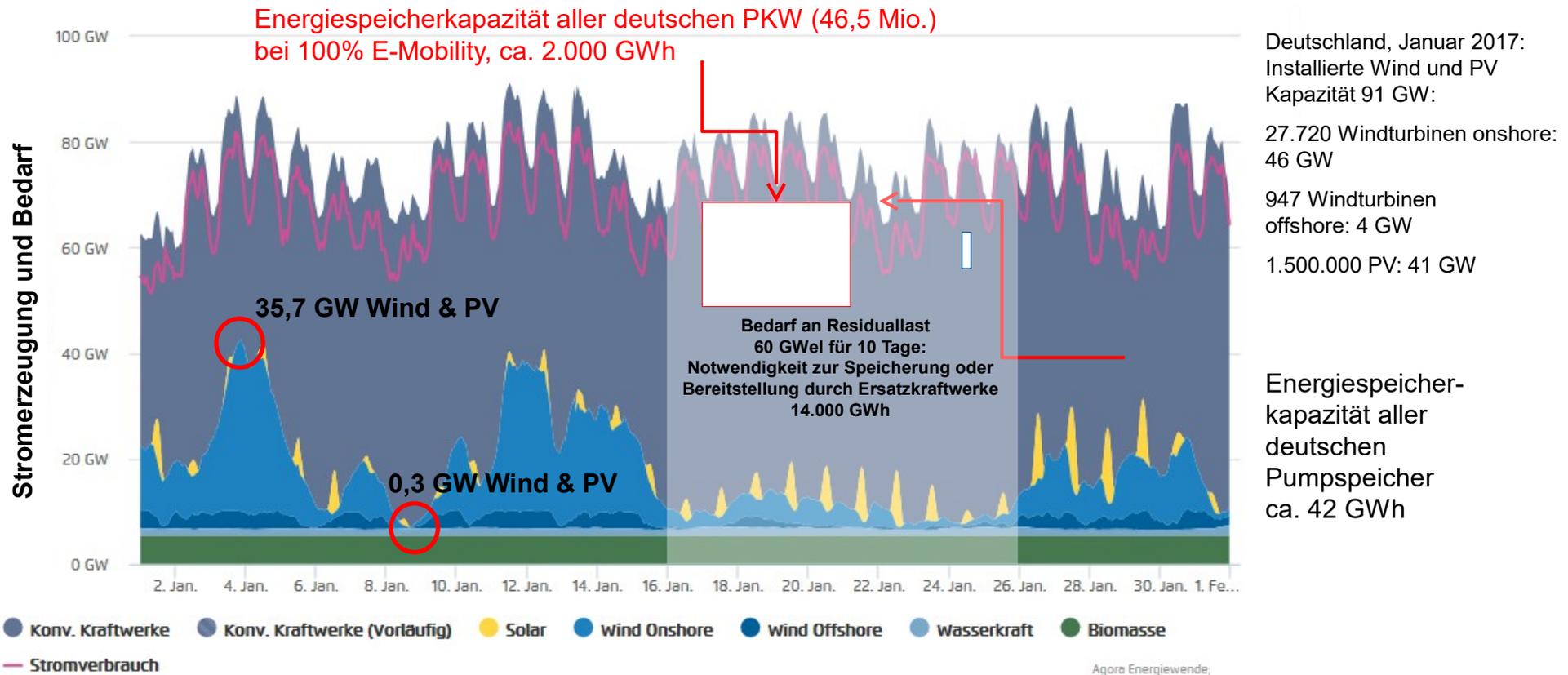
mit vertretbaren Energieverlusten bei den Umwandlungsprozessen und Rückverstromung ohne Umweg über thermische Energie

ist für großtechnische Anwendungen bisher nur möglich mit

- Pumpspeicherwerken (PSW)
- elektrochemischer Speicherung (Akku)

... aber reicht bei weitem nicht aus !!!

Herausforderungen für Netzstabilität und Versorgungssicherheit

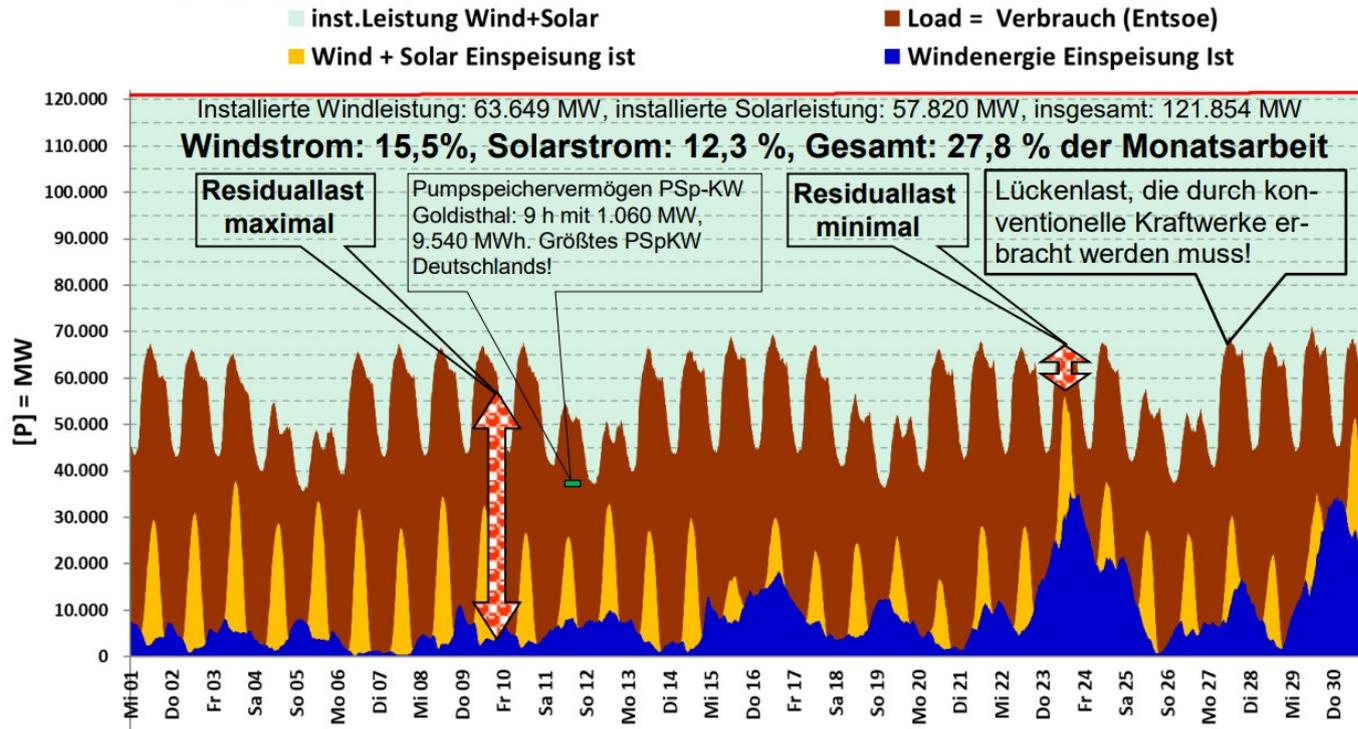


- Konventionelle Kraftwerke werden noch für Jahrzehnte benötigt, bevor ausreichende Energiespeicherkapazität vorhanden ist.
- CCU kann helfen, CO2 Emissionen zu senken und Energie über lange Zeiträume zu speichern.

Dank an K. STAHL, RWE Essen

1. bis zum 30. September 2021 aufgetragen.

September 2021	Load D	Wind	Solar	Wind + Solar	Prozent zu $P_{inst.}$
inst. Nennleistung		63.649 MW	57.820 MW	121.469 MW	
Maximumwert	71.276 MW	35.483 MW	32.397 MW	55.977 MW	46,08 %
Mittelwert	54.426 MW	8.448 MW	6.671 MW	15.118 MW	12,45 %
Minimumwert	35.511 MW	251 MW	0 MW	738 MW	0,61 %
Summe Monatsarbeit	39.187 GWh	6.082 GWh	4.803 GWh	10.885 GWh	



Bedarf an Speicherkapazität zur Überbrückung einer Dunkelflaute in der 45. Kalenderwoche 2019

7 100 000 MWh

Zum Vergleich:

45 Mio. E-Autos (Akkus)

1 100 000 MWh

PSW in Deutschland

42 000 MWh

Vanadium-Redox-Flow-Batterie (China, 2021)

800 MWh

BigBattery Lausitz

53 MWh

B) Energiespeicherung mit Umwandlung in thermische Energie bei der Rückverstromung

Elektrische Energie → chemische Energie

Chemische Energie hat Vorteile

hohe Energiedichte (E/V)

gut speicherfähig über lange Zeiten

größtechnischer Einsatz ist etabliert

(thermische Kraftwerke, Verkehr, ...)

Bsp. für Energiedichte chemischer Speicher:

Braunkohle 2800 kWh/m³

Diesel 5100 kWh/m³

Wasserstoff 700 bar

1300 kWh/m³

Zucker 7500 kWh/m³

Nachteil: Rückverstromung über thermische Energie

(Verbrennung):

elektrische Energie $E_a \rightarrow$ chemische Energie

\rightarrow thermische Energie hoher Temperatur T_o

\rightarrow mechanische Energie + thermische Energie niedriger Temperatur T_u (Abwärme = „Verlust“ im Gesamtprozess)

nur mechanische Energie \rightarrow elektrische Energie $E_e < E_a$

Das Dilemma: Der Zweite Hauptsatz !!!

Der Wirkungsgrad des Gesamtprozesses E_e / E_a ist kleiner als der CARNOTSche: $(T_o - T_u) / T_o$

Bsp.: $T_o = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ (1073 K)

$T_u = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ (373 K)

E_e / E_a ist kleiner als 65 %

Zwischenergebnis 2:

„Power to Gas“ ist im Prinzip technisch möglich

Vorteil: hohe Energiedichten, Langzeitspeicherung

Nachteile: Wirkungsgrad ist **physikalisch** begrenzt,
daher viel mehr Primärenergie nötig

Bem.: Erst wenn Elektroenergie aus nicht-fossilen
Quellen ausreichend verfügbar ist,
wird „Power to Heat“ eine Option
(Kritik am DREWAG-Tauchsieder)

Pers. Meinung: „Sektorkopplung“ überdenken!!!

**Der Schweizer Ingenieur Aurel Stodola warnt 1910:
„Es darf daher die dringliche Mahnung an die Erfinder gerichtet
werden, von ihrem zwecklosen Kampfe abzulassen und keine Mittel an die
Durchführung von Ideen zu wagen, die mit dem zweiten Hauptsatze im Widerspruche
stehen.“**

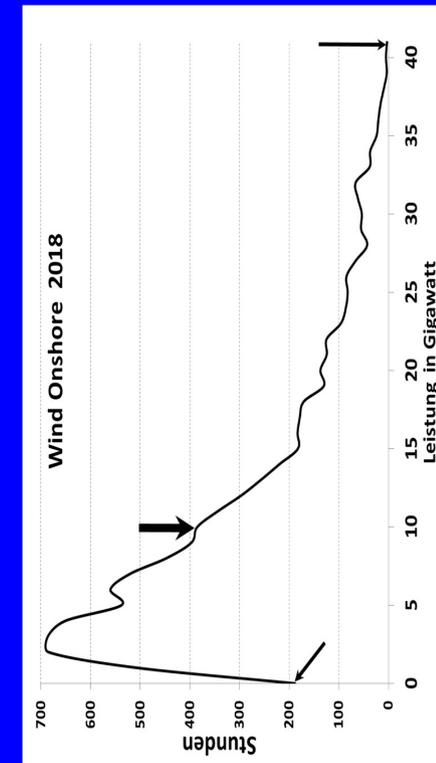
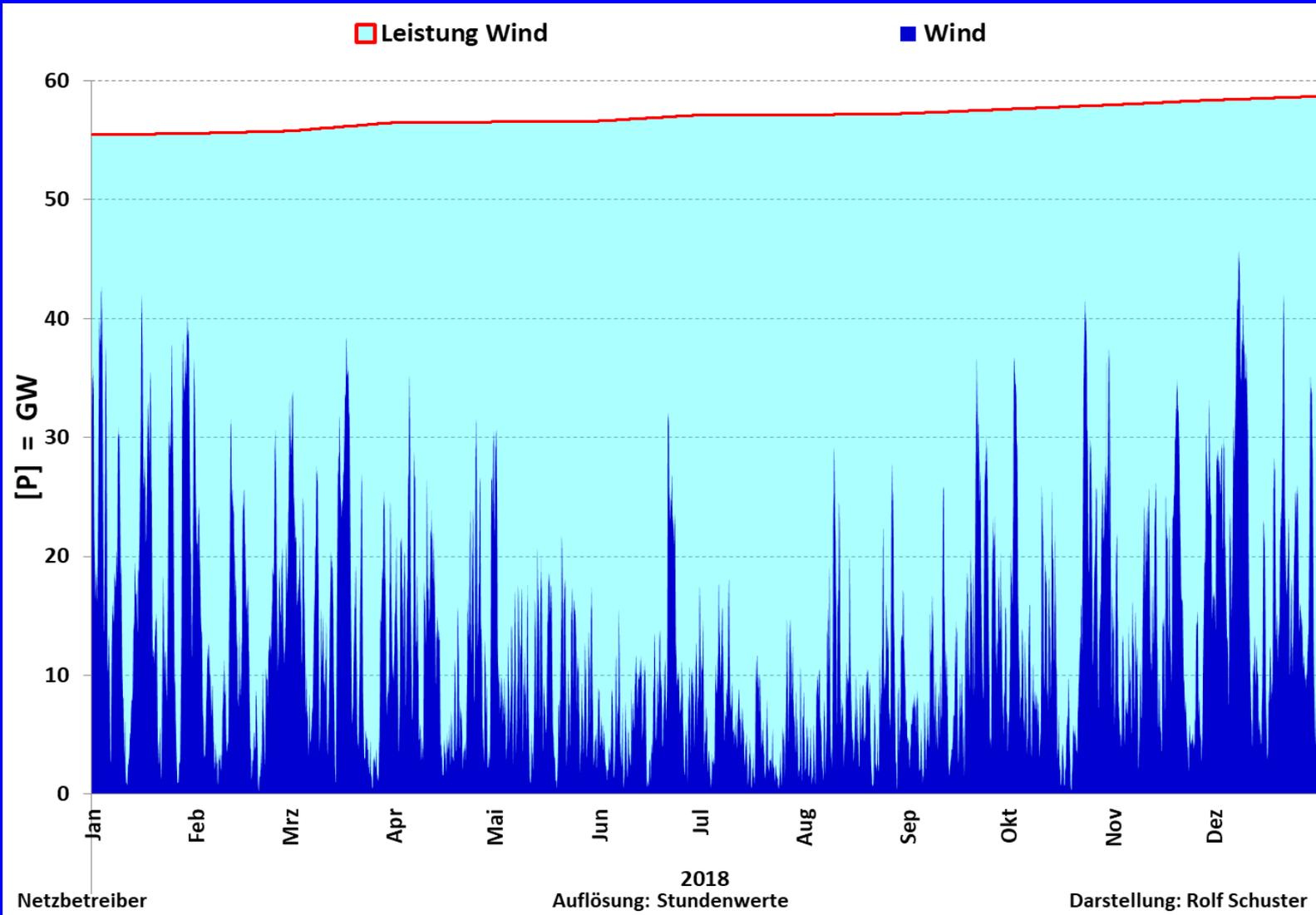
Spinnerei?!

Keineswegs!



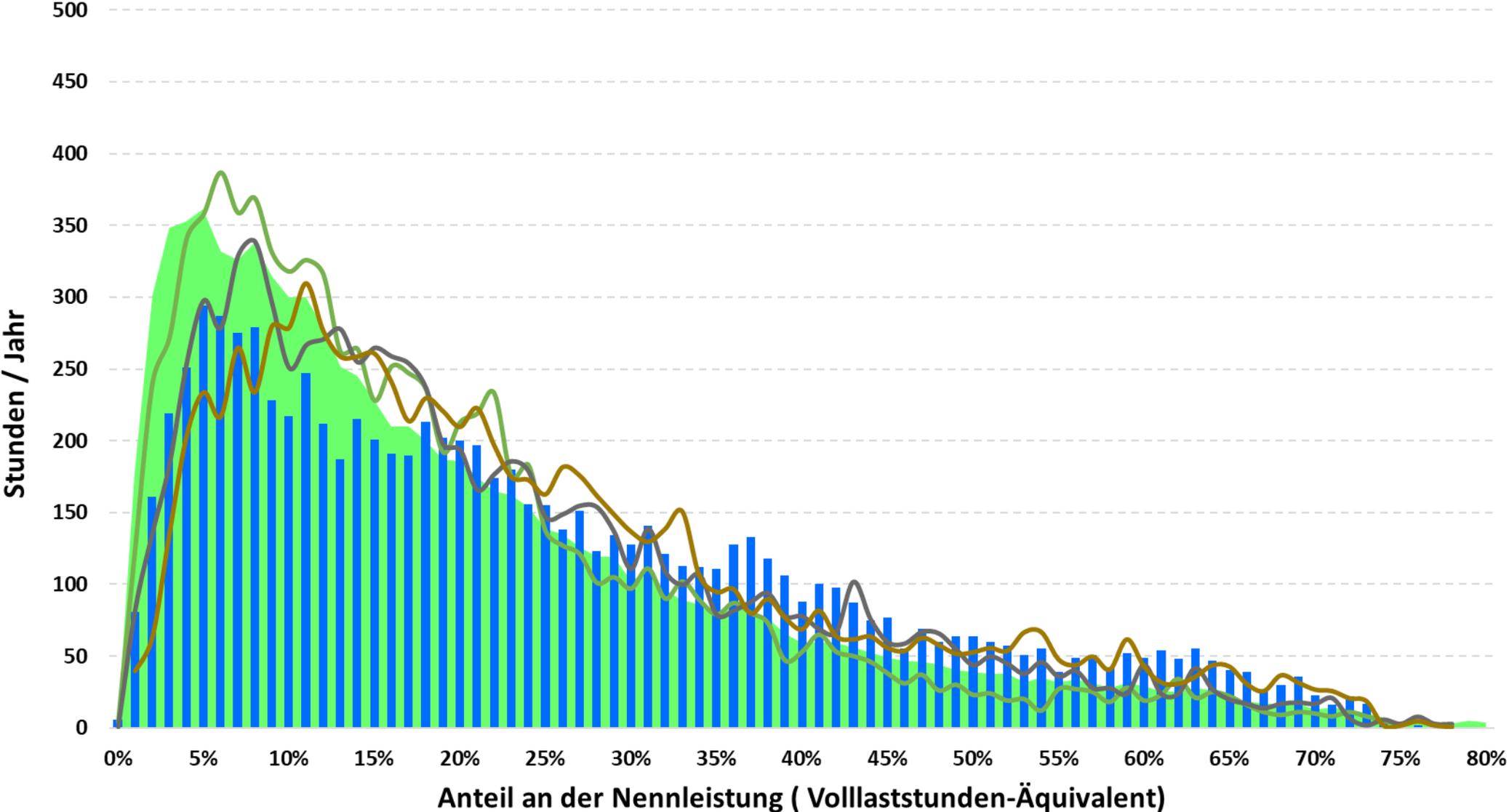
Power To Heat Lokomotive der Schweizer Bundesbahn, vierziger Jahre

Analyse: An wieviel Stunden des Jahres wird welche Leistung in GW eingespeist?



Onshore + Offshore Deutschland

Mittelwert 2015 bis 2020 2020 2016 2018 2019

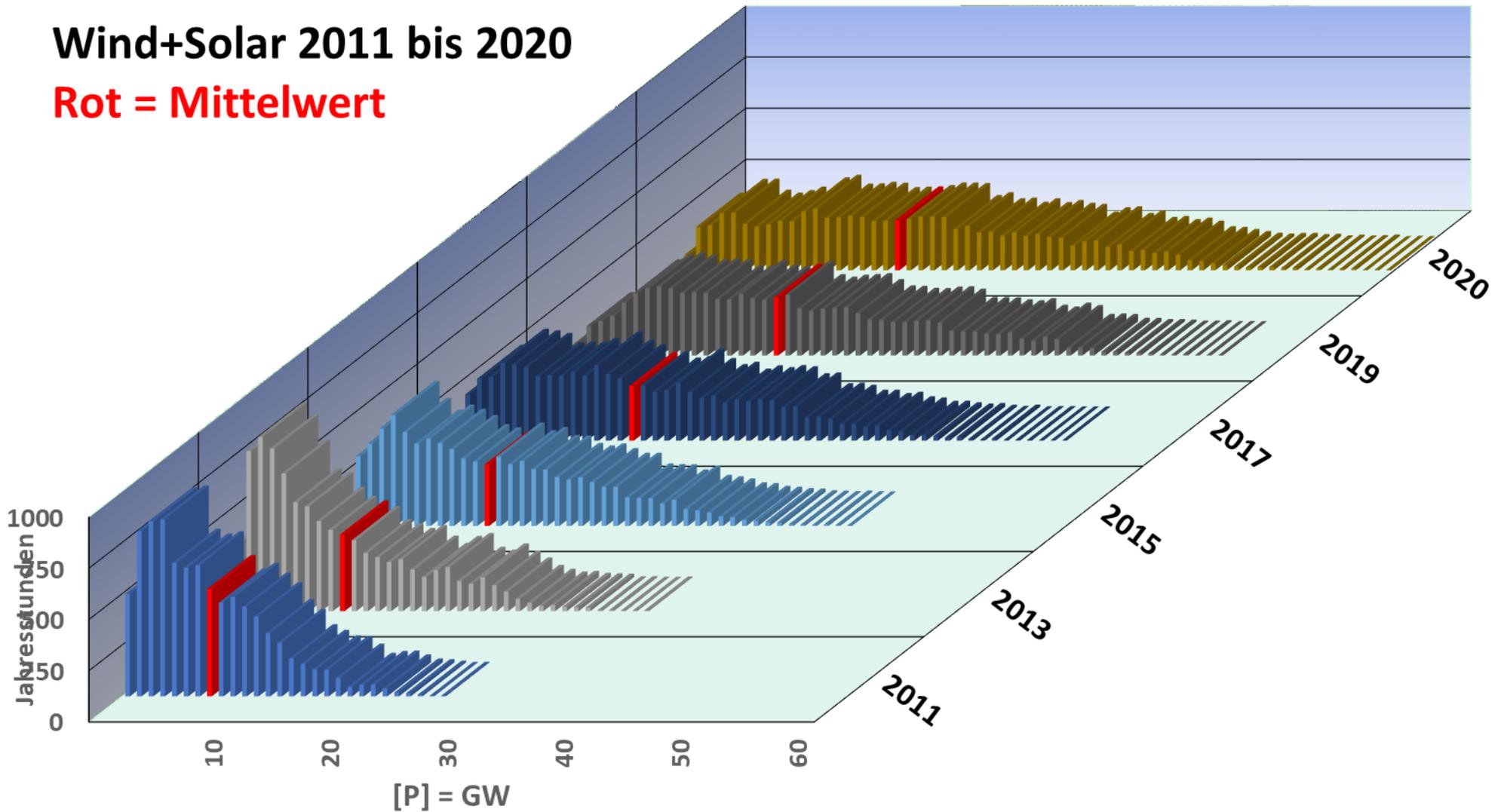


Datenquelle: Netzbetreiber

Darstellung: Rolf Schuster Vernunftkraft

Wind+Solar 2011 bis 2020

Rot = Mittelwert



Datenquelle: Netzbetreiber

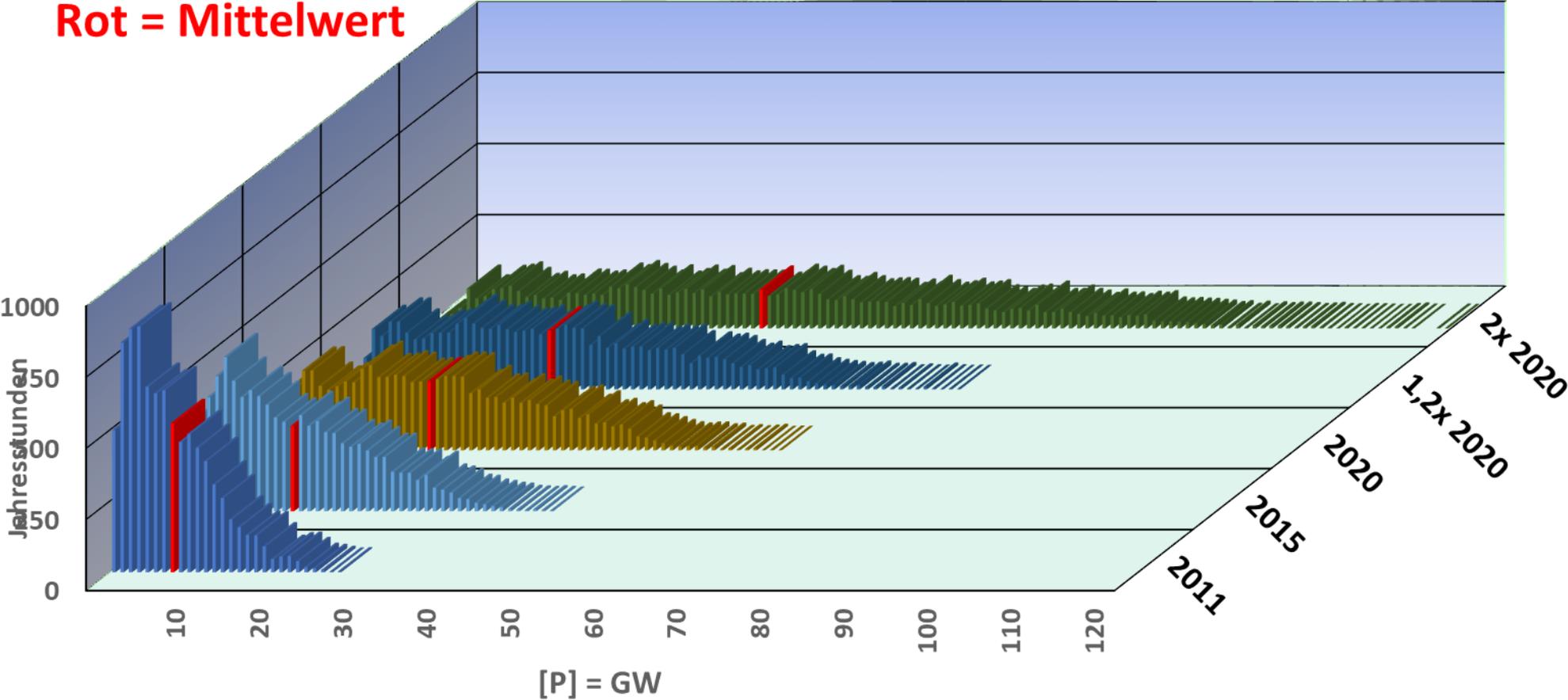
Darstellung: Rolf Schuster **Vernunftkraft**

Die Schwankungsbreite der Verteilung wächst mit dem Mittelwert der Einspeisung!

+ Prognose für 2024 und 2030 bei weiterem Zubau

Wind+Solar 2011 bis 2020

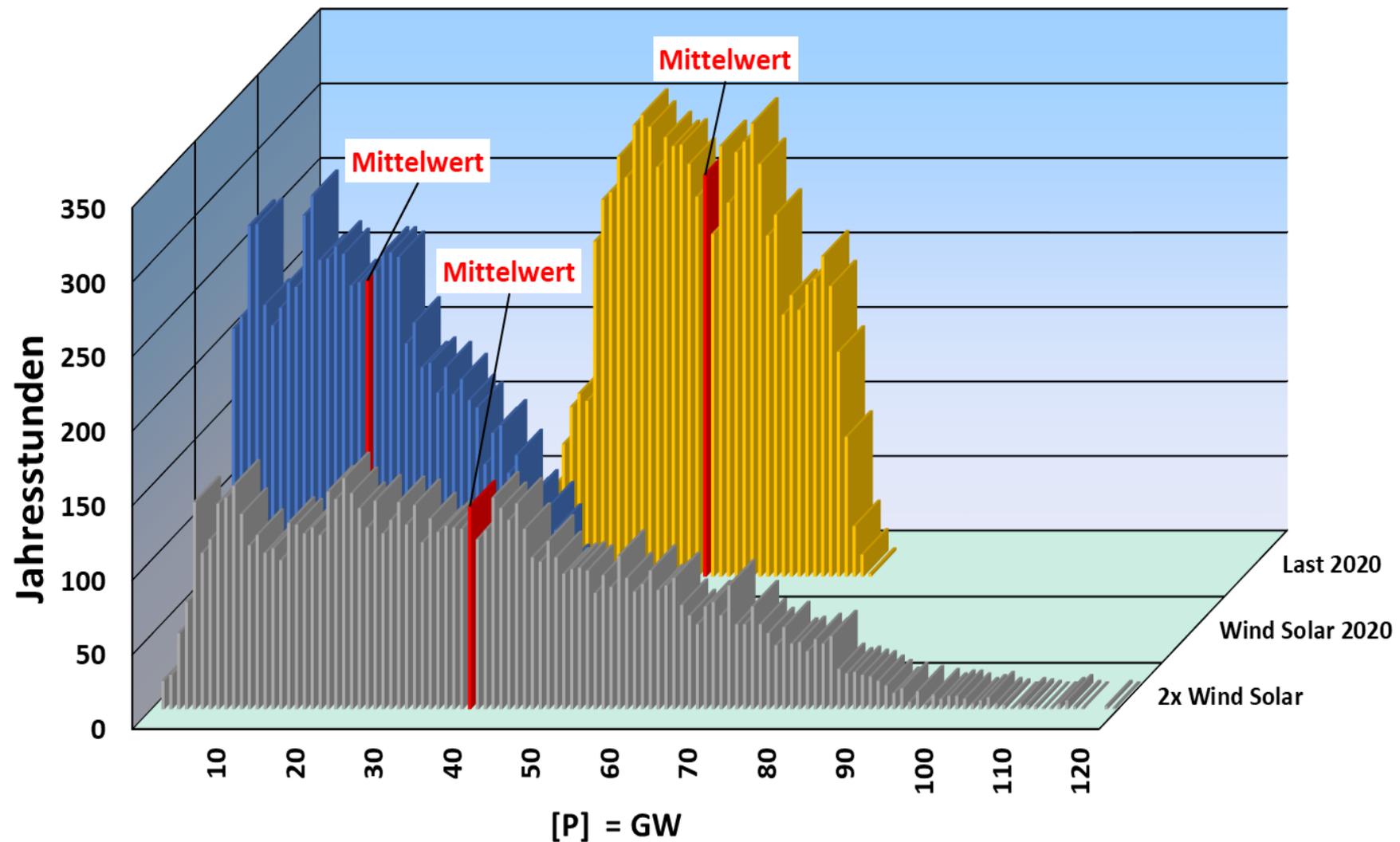
Rot = Mittelwert



Datenquelle: Netzbetreiber

Darstellung: Rolf Schuster Vernunftkraft

Wind+ Solar 2020 und 2x Wind+Solar sowie Last 2020

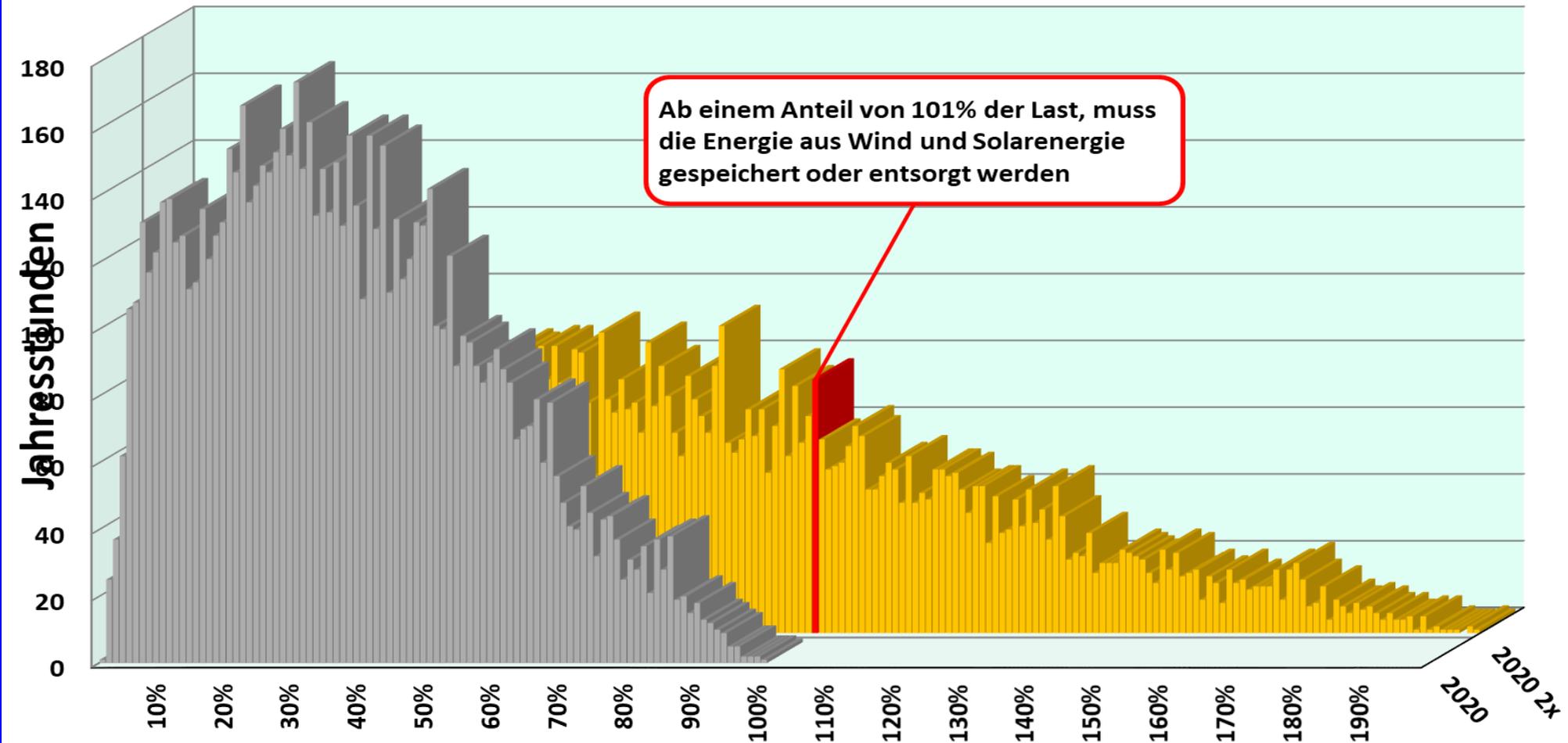


Datenquelle: Netzbetreiber

Darstellung: Rolf Schuster Vernunftkraft

Bei Verdopplung der installierten Leistung von Wind und Solar (Ziel 2030, vorn) decken diese im Jahresmittel (rot, vorn) einen großen Teil des mittleren Verbrauchs (rot, hinten).
Aber

Anteil von Wind und Solarenergie am Verbrauch (Last)



Ab einem Anteil von 101% der Last, muss die Energie aus Wind und Solarenergie gespeichert oder entsorgt werden

Datenquelle: Netzbetreiber

Darstellung: Rolf Schuster Vernunftkraft

Bei einer Verdopplung der volatilen Einspeisung (Ziel 2030) müsste fast zu der Hälfte der Stunden eines Jahres Überschussstrom gespeichert werden, der dann zu anderen Zeiten des Jahres zum Ausgleich der Unterdeckung verwendet werden kann. Der Speicherbedarf pro Stunde (!) schwankt zwischen 1 GWh und ca. 60 GWh (Abschätzung für den jährlichen Speicherbedarf: 30 GWh x 2000 = 60 000 GWh)

Hoher Speicherbedarf bei weiterem „massiven Zubau“ von Windenergie- und PV-Anlagen

Wichtige Kenngröße:

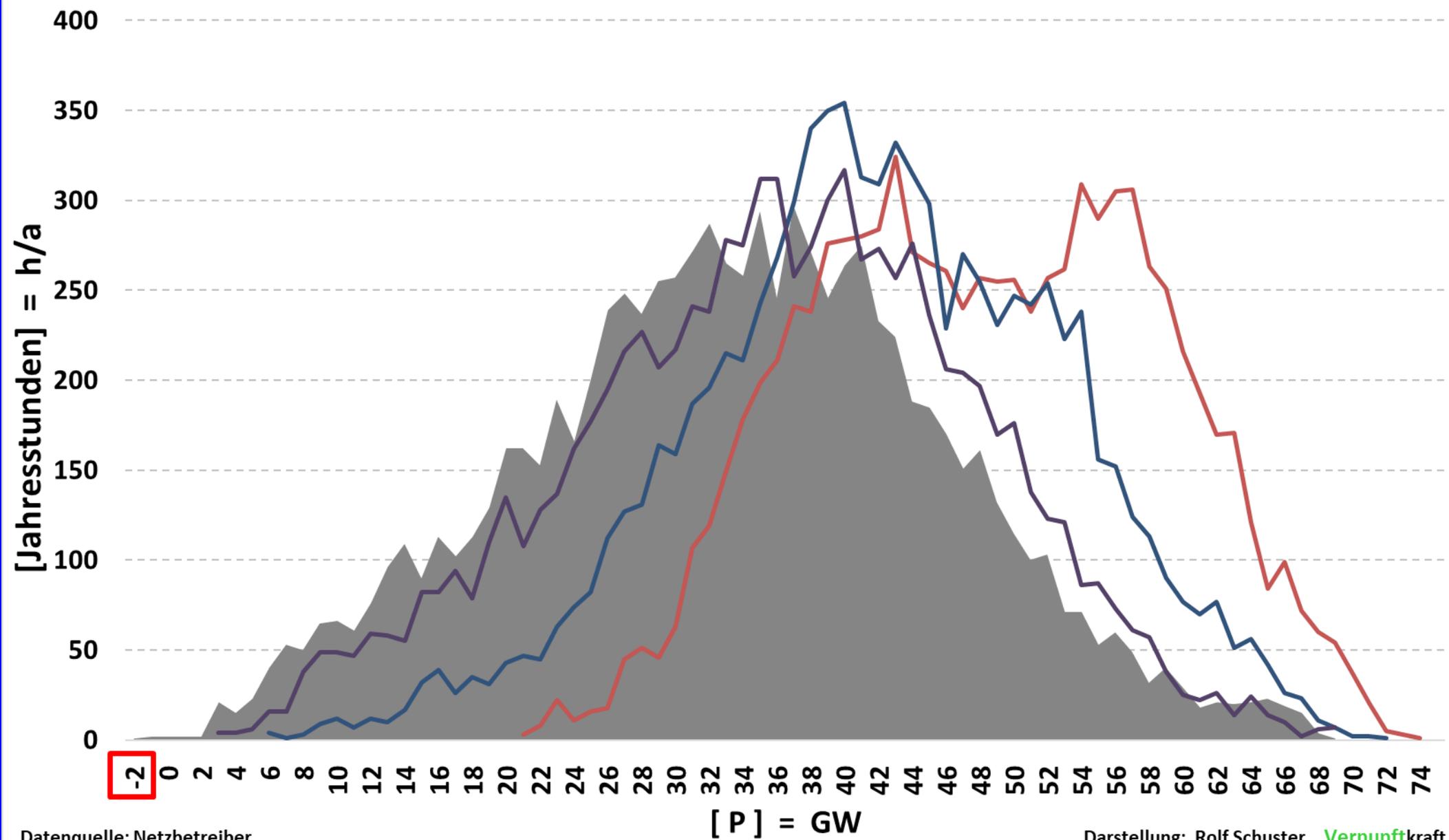
Residuallast = Verbrauch - (Wind + PV)

(Leistung, die zusätzlich aus
konventionellen Quellen benötigt wird,
wenn Strom aus Wind und Sonne
eingespeist ist)

Residuallast muss möglichst klein sein

Residuallast = Last - Wind - Solar

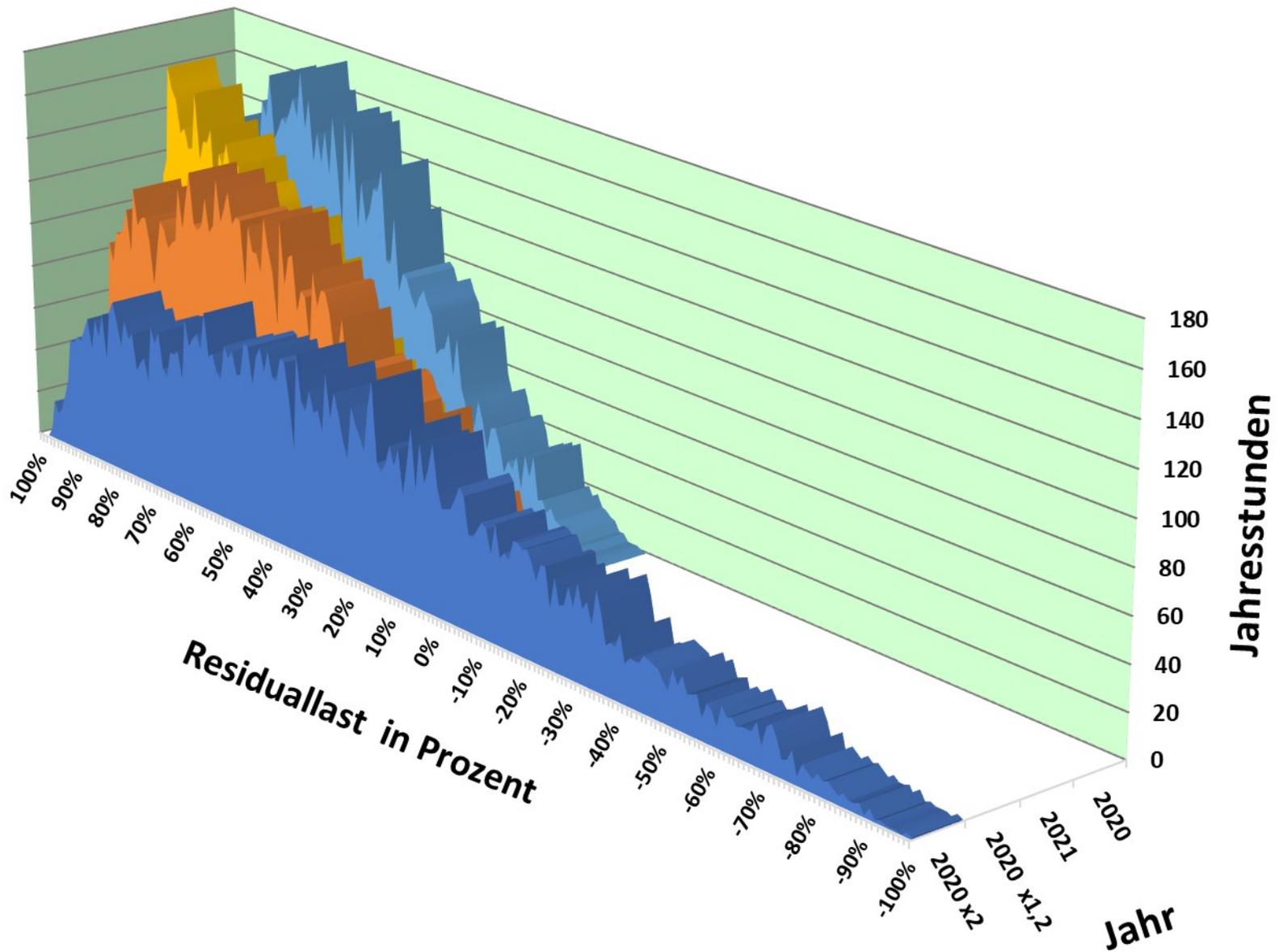
■ 2020 — 2011 — 2016 — 2019



-2

Datenquelle: Netzbetreiber

Darstellung: Rolf Schuster Vernunftkraft



**Ab ca. 2022 nimmt die Anzahl der Stunden mit negativer Residuallast zu
 → Speicherbedarf wächst**

Zusammenfassung

Sekundengenaue Balance zwischen Erzeugung und Verbrauch ist notwendig für stabile Versorgung mit elektrischer Energie.

Bisher wurde der zeitweilige Mangel bei Unterproduktion von volatilen erneuerbaren Energiequellen (EE: Wind, Sonne) bei „Dunkelflauten“ vorwiegend durch konventionelle Erzeuger ausgeglichen.

Ein weiteren Zubau (ab 2022) führt zu zeitweiliger Überproduktion und macht zunehmend die Verfügbarkeit von Energiespeichern erforderlich.

A) Energiespeicherung ohne Umwandlung in thermische Energie bei der Rückverstromung reichen nicht aus (PSW: 40 GWh, Akku: ?)
Nachteil: geringe Energiedichte

B) Energiespeicherung über chemische Speicher („grüner Wasserstoff“) mit Umwandlung in thermische Energie bei der Rückverstromung.

Vorteil: höhere Energiedichte; Nachteil: Wirkungsgrad ist physikalisch begrenzt; Problem: Elektrolyse mit Strom **direkt** aus WEA und PVA.

Für einen weiterer Zubau von Wind- und Photovoltaikanlagen in Deutschland werden Energiespeicher mit der Möglichkeit der Rückverstromung benötigt.

Überschreitet der Anteil der erneuerbaren Energien am Strommix im jährlichen Mittel den Grenzwert von ca. 50 Prozent und fehlen Speicher, so wird ein Moratorium für den weiteren Zubau von Windenergie- und PV-Freiflächenanlagen nötig.

**Für den weitere Zubau von PV-Dachanlagen etc. ist angepasste lokale Speicherkapazität vorzuhalten:
Kein Überschussstrom in das öffentliche Netz !**

Schlüsselgröße für Energiepeicherung:

Energiedichte E/V!

Kernenergie: > 1 000 000 000 kWh/m³

Chem. Energie: > 1 000 kWh/m³

Akku: > 100 kWh/m³

Mech. Energie: > 1 kWh/m³

**Kein Ausschluss
technologischer Entwicklungen
bei der Kernenergieforschung !**

Herzlichen Dank an:

Herrn Rolf SCHUSTER für Mitarbeit und Grafiken

S. Kobe, R. Schuster:

**Zusammenhang zwischen Residuallast und Börsenpreis
beim Zubau volatiler erneuerbarer Energiequellen**

Energiewirtschaftliche Tagesfragen 68 [2018] Heft 7/8, S. 76-77

sowie an Ronald KOBÉ (Cartoon)

Weitere Quellen:

<https://energy-charts.info/>

<https://entsoe.eu>