

# **Entwicklung der Residuallast mit zunehmendem EE- Ausbau: Charakteristische Verläufe und Bewertung**

## **„Passt unser Energieverbrauch noch zur Energieerzeugung?“**

**Prof. Dr.-Ing. Simon Schramm**  
Hochschule München

**15.11.2021**

Lehre:



[www.hm.edu](http://www.hm.edu), FK04 (Elektrotechnik- und Informationstechnik)

Forschung:

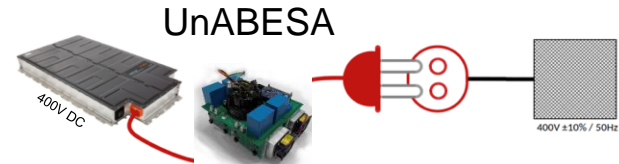
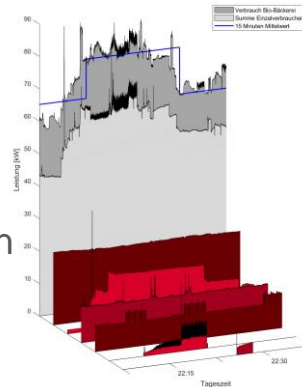


[www.ises.hm.edu](http://www.ises.hm.edu), Institut für Nachhaltige Energiesysteme

Das Institut für Nachhaltige Energiesysteme leistet durch eigene Forschungs- & Entwicklungs-, Beratungs- und Lehrtätigkeiten einen wesentlich Beitrag zu einer nachhaltigen Energieversorgung und ressourcenschonenden Energienutzung.



Energieverbrauch – verstehen



(2nd Life) Batteriespeicher nutzen



# UnkEL

Unterstützungsverein zur nachhaltigen, klimaneutralen Entwicklung und Lehre  
der Hochschule München

BE A PART OF A BETTER FUTURE  
JOIN US FOR FOUNDING ON

19.11.2021

17.30



INFO



EVENT

# Agenda

Methodik

Definition

Residuallast-Analyse

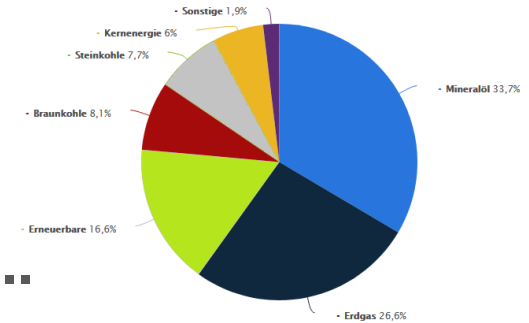
- 2012-2020 – Erzeugung, Last, Residuallast
- 2030
- 2050

Zusammenfassung

# Methodik und Annahmen

## Motivation

- **Klimakatastrophe – uns fehlt die Zeit ...**
- **Aktuell ~15% EE am Primärenergiebedarf in D**



[Statista: Struktur des Primärenergieverbrauchs<sup>1</sup> in Deutschland nach Energieträger im Jahr 2020]

## Methodik

- **Historische Zeitreihenanalyse und Kennzahlenbewertung**
- **Vorliegende Daten: Agorameter 2012-2020 mit  $T_S = 1h$ .**

## Annahmen

- **Regionale Begrenzung auf Deutschland**
- **Stromsektor, Kupferplatte**

# Definition Residuallast

Residuallast (Leistung!) – was bleibt übrig?

$$P_{RES} = P_{LAST} - P_{EE}$$

mit  $P_{LAST} = P_{Strom} (+P_{el,Wärme} + P_{el,Verkehr})$

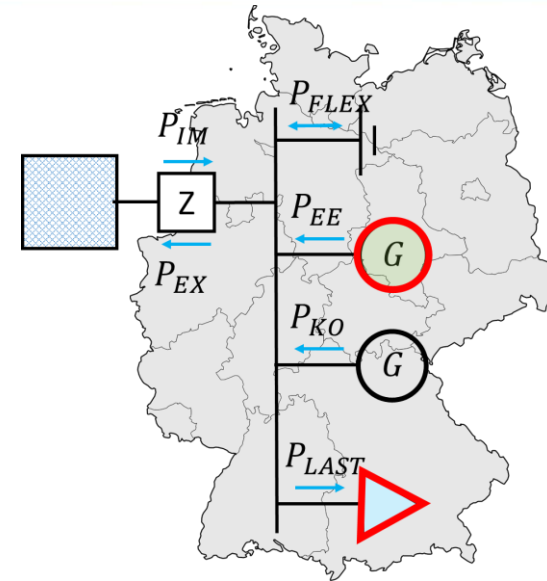
mit  $P_{EE} = P_{PV} + P_{WIND} + P_{WASSER} + P_{KWK}(\text{wärmegef.})$

„Die Residuallast ist definiert als die **verbleibende**

**Stromlast** nach Abzug der aktuellen Leistung der **nicht**

**regelbaren erneuerbaren Energien** (Sonne, Wind,

Wasser) von der aktuellen Gesamtlast [1]



Legende ( $P$  – Wirkleistung)

$P_{Last}$  = Bruttostromverbrauch

$P_{EE}$  = nicht „planbare“ (erneuerbare)

Erzeugung

$P_{IM}$  = Importleistung

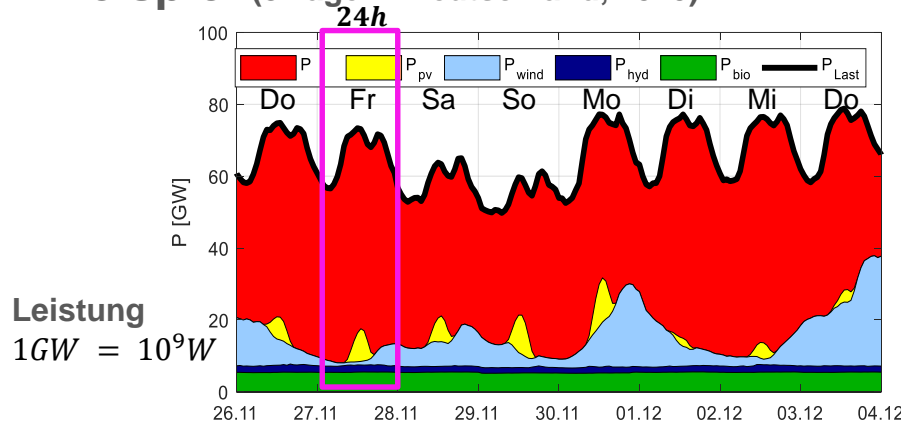
$P_{EX}$  = Exportleistung

$P_{KO}$  = „planbare“ (konventionelle) Erzeugung

$P_{FLEX}$  = Flexibilisierungsleistung (u.a. Speicher)

# Passt der Verbrauch zur Erzeugung?

Beispiel (8 Tage in Deutschland, 2020):

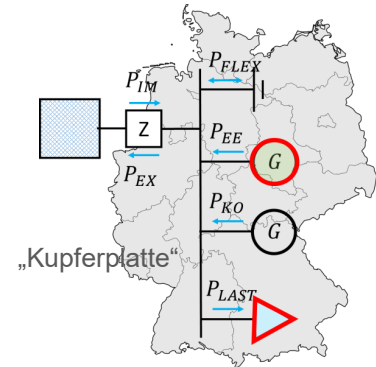


Last (Stromverbrauch)

**Residuallast**

- was bleibt übrig?

Erneuerbare Erzeugung



1GW = „10 Mio. Fahrradfahrer mit 100W“ (C.Holler)

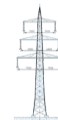
Wochenenergiebedarf: ~ 65GW · 7 · 24h = 10.9TWh ~650 Mio. Fahrradfahrer, 24/7!

Grundsätze: das elektrische Energiesystem kann keine nennenswerten Energiemengen speichern

Lastfolgebetrieb: die Erzeugung „folgt“ der Last, es wird soviel „erzeugt“, wie verbraucht wird

Leistung: definiert Infrastruktur (Übertragungs- und Verteilsysteme und Betriebsmittel)

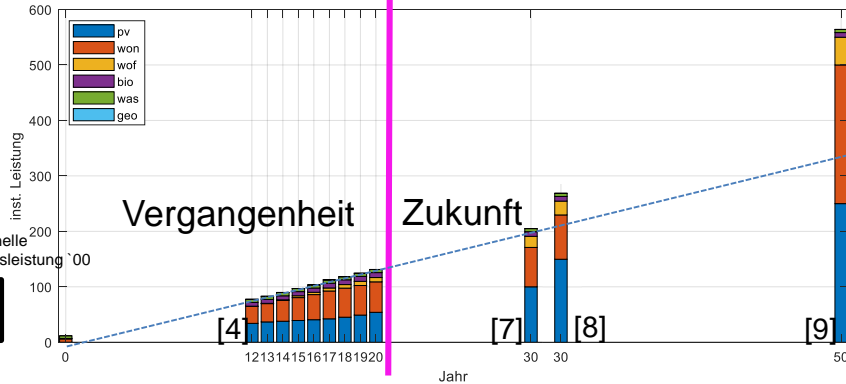
z.B. 220kV 2-fach Al/St 265/35 Freileitung, Strombelastbarkeit 1360A,  $S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I = 520 \text{ MVA} = 0.52 \text{ GVA}$



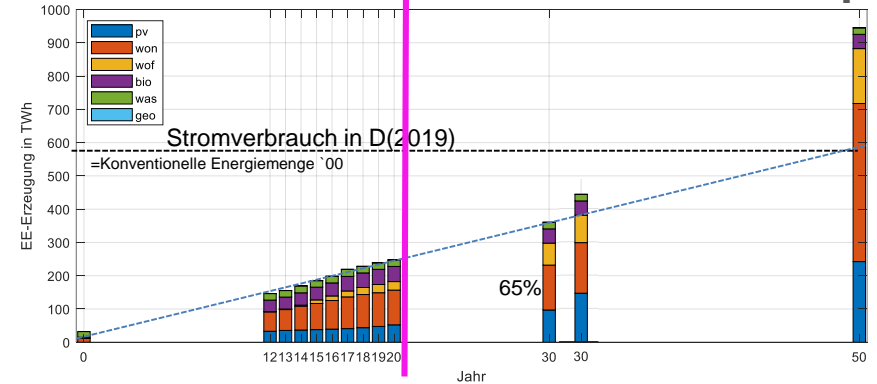
# Definition Ausbauziele - Szenarien

$E_{prim,20} \sim 3600TWh$  → Wir brauchen zu viel Energie!

Leistung in GW JETZT



Energie in TWh (Stromsektor) ?



Szenarien

Leistung in GW

	Jahr	pv	won	wof	bio	was	geo
[4]	2020	54	55	7.7	8.9	5.6	0.048
[7]	2030	100	71	20	8.4	5.6	0.048
[9]	2050	250	250	50	8.4	5.6	0.048
[c]	2050	668	467	167	84	25	0.048

[C] – 3255TWh  
~ 3000TWh Strom

Annahme für die weitere Betrachtung:  
gleichbleibender Lastverlauf  $P_{LAST}$

Zukünftig **wesentlich** steigender Strombedarf  
zu erwarten – weiter so reicht nicht!!

[4], Agora Energiewende; [7], EEG2021 (65% am Stromverbrauch bis 2030), §4 – Ausbaupfad; [8], Agora Energiewende „Deutschland 2050 Klimaneutral“; [9], selbst, [c], C.Holler, et al., „Erneuerbare Energien, ohne Heiße Luft“

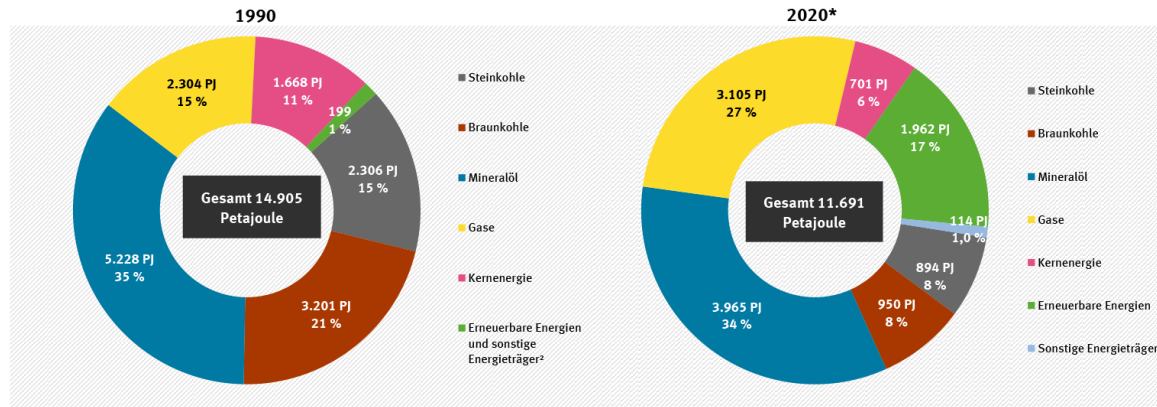


# Weiter so reicht nicht?

+30 Jahre

+30 Jahre

Primärenergieverbrauch<sup>1</sup> nach Energieträgern



<sup>1</sup> Berechnungen auf der Basis des Wirkungsgradansatzes.  
<sup>2</sup> bis 1999 Erneuerbare Energien mit sonstigen Energieträgern, ab 2000 getrennte Erfassung, Sonstige Energieträger sind: Nichterneuerbare Abfälle, Abwärme und Außenhandelssaldo von Fernwärme und Strom  
 \* vorläufige Angaben

Quelle: für 1990-Umweltbundesamt auf Basis AG Energiebilanzen, Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2019, Stand 09/2020; für 2020-Umweltbundesamt auf Basis AG Energiebilanzen, Primärenergieverbrauch, Stand 12/2020

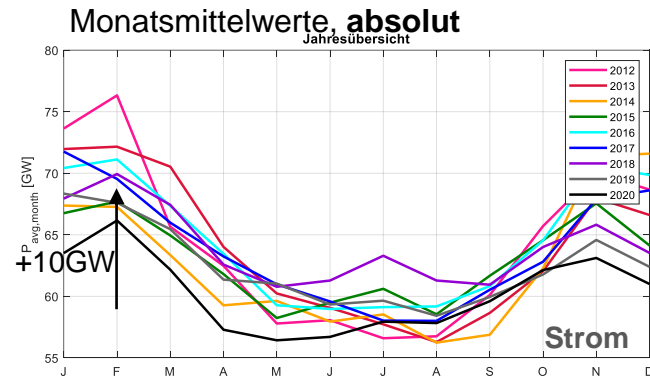
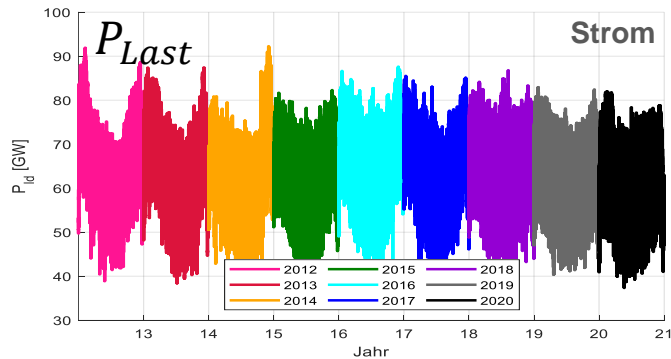
Klimaneutral durch weiter so?



# (Strom)Last: 2012-2020

betrachtete Zeitreihen – 1-h-Werte

...**unser** Stromverbrauch...



...

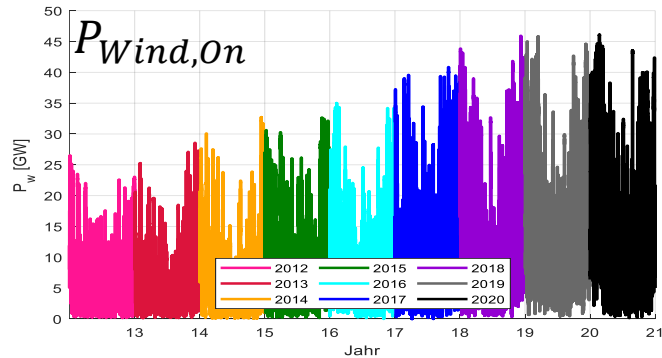
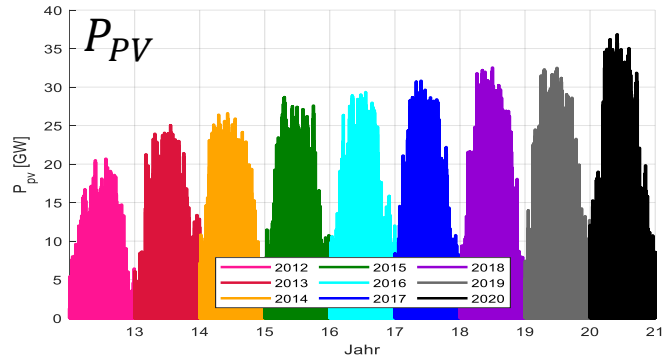
Strombedarf im Winter größer als im Sommer (Wärmebedarf sowieso)

Jahresstromverbrauch seit Jahren vergleichsweise konstant (trotz steigender „Wirtschaftsleistung“)

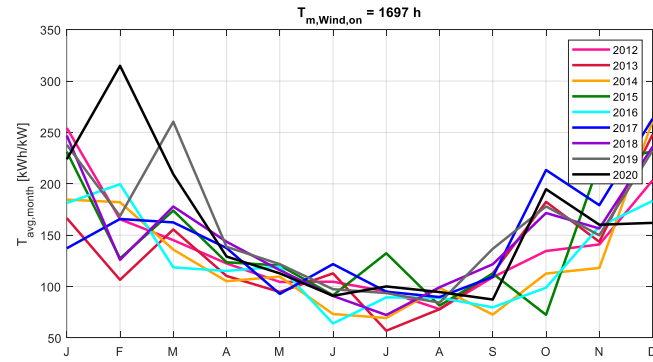
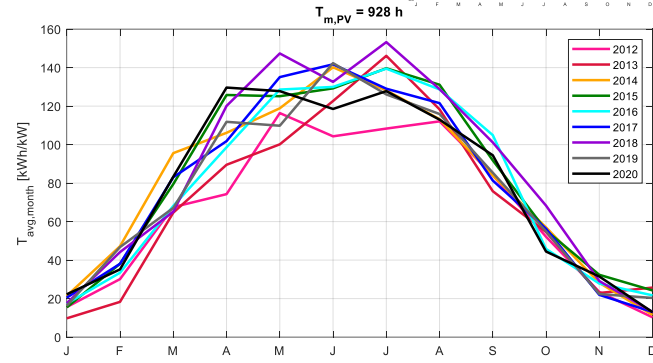
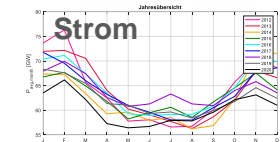
...

# EE: 2012-2020

betrachtete Zeitreihen – 1-h-Werte



...Ausbau EE erkennbar...  
 ...„volatile Erzeugung“...

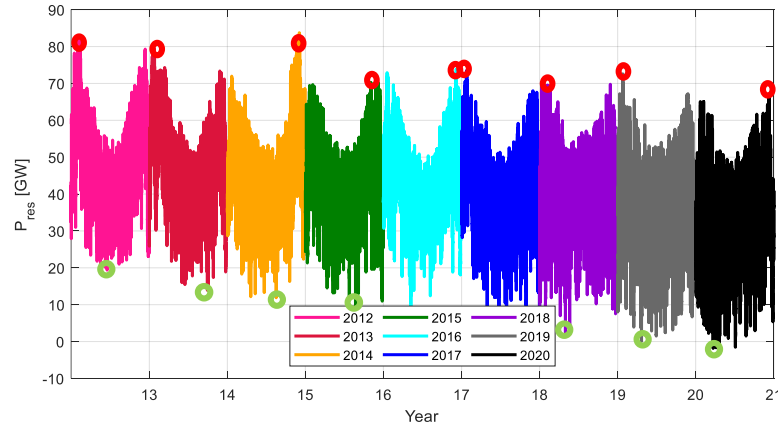


..ein ausgewogener Erzeugungsmix scheint sinnvoll, um die Saisonalität direkt auszunutzen... (z.B.  $P_{PV} \sim P_{Wind,on}$ )

Energieeinspeisung über das Jahr, **bezogen** auf die installierte Leistung

# Residuallast: 2012-2020

betrachtete Zeitreihen – 1-h-Werte



$$P_{RES} = P_{LAST} - P_{EE}$$

was bleibt übrig?

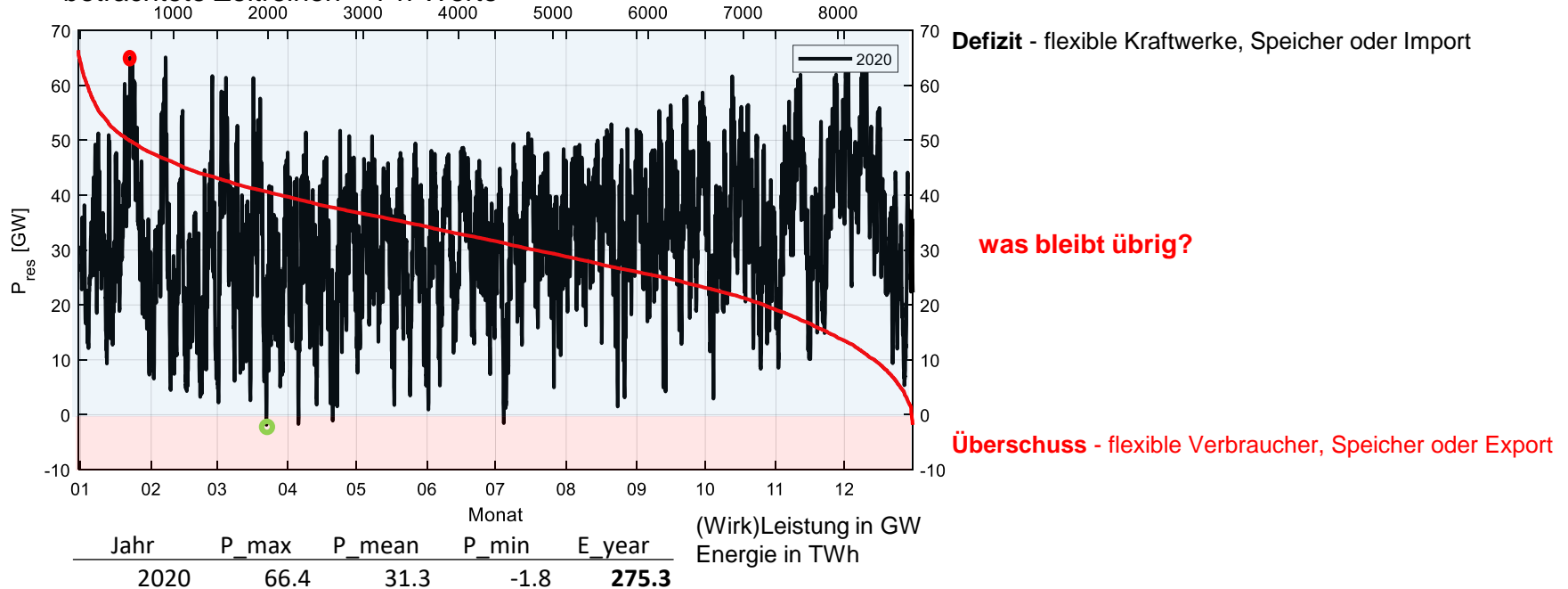
...es muss soviele „bereitgestellt“ werden, wie verbraucht wird...

Jahr	$P_{max}$	$P_{mean}$	$P_{min}$	$E_{year}$	(Wirk)Leistung in GW Energie in TWh
2012	81.7	48.2	19.4	423.2	
...	79.4	46.6	13.9	408.6	
2019	72.6	34.5	0.1	302.1	
2020	66.4	31.3	-1.8	<b>275.3</b>	~52%

↓  
 Max. und min. verbleibender **Leistungsbedarf** → Flexible Erzeuger und Verbraucher notwendig  
 Nicht regenerativ gedeckte **Energiemenge** → konventionelle Erzeugung oder Energieimport

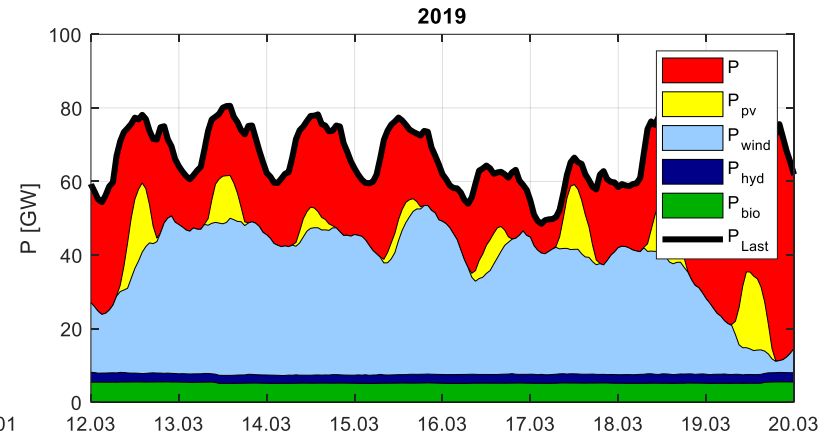
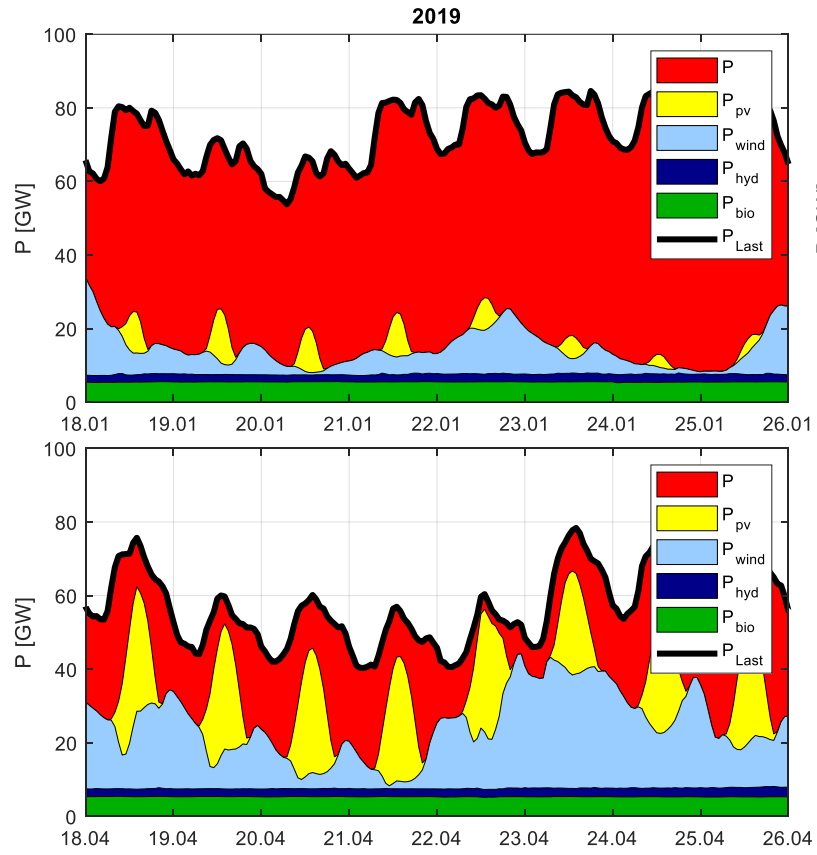
# Residuallast: 2020

betrachtete Zeitreihen – 1-h-Werte



Max. und min. verbleibender Leistungsbedarf → **Flexible Erzeuger** und Verbraucher notwendig

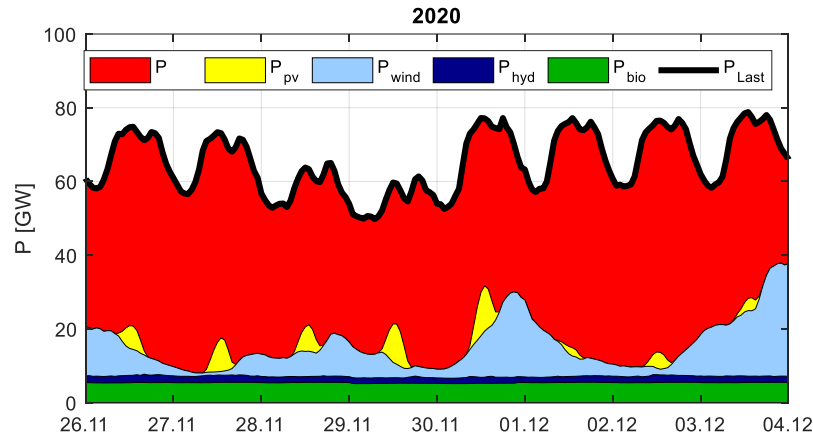
# 3 Wochen in 2019...



...volatile Erzeugung, und Verbrauch...

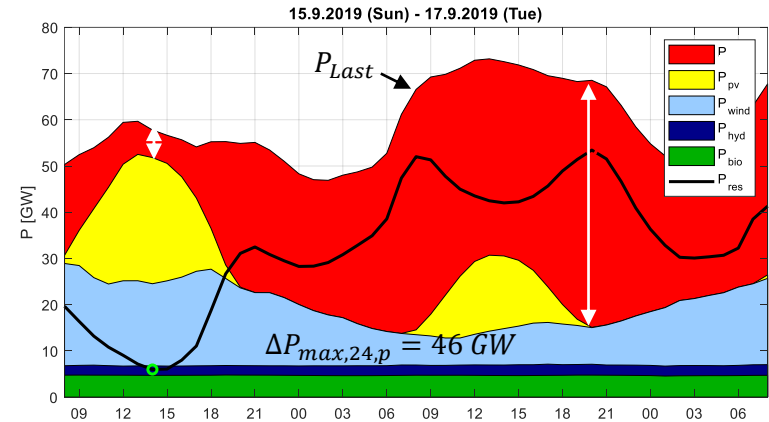
# Herausforderungen – „heute“

## Dunkelflaute



Zeitraum (mehrere) Wochen mit geringem Anteil EE an der Erzeugung, (meist Winter)..  
 Beispiel: 14 Tage, mit etwa 20 TWh aus konv. Erzeugung, Import und Flexibilität  
 (20 TWh = 100kWh \* 200Mio), Pumpspeicher in D~37GWh / 7GW

## Residuallast-Dynamik



...es **muss** soviel „bereitgestellt“ werden, wie verbraucht wird... **zu jedem Zeitpunkt**  
 Indikator: Frequenz ~ 50 Hz.

## Zusammenfassung „heute“

$P_{RES} = P_{LAST} - P_{EE} > 0$  für fast alle betrachteten Stunden

Die Residualleistung ist über das Jahr unterschiedlich verteilt im Sommer geringer wie im Winter, abhängig von EE-Zusammenstellung.

Volatile Erzeugung benötigt bei weiterem Ausbaugrad Flexibilitäten, auch über längere Zeiträume

**...bislang hat alles funktioniert....**

Austausch mit europäischen Nachbarländern konkurriert mit Ausbau lokaler Flexibilitäten (=neuer Lasten)

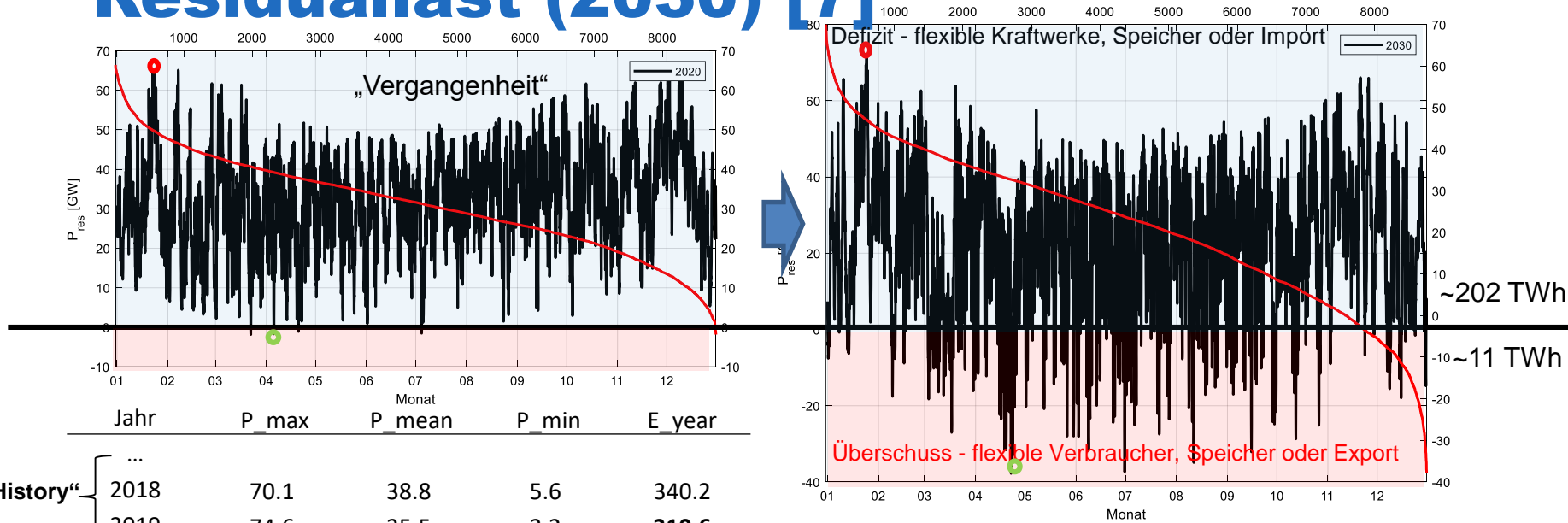
Kosten: Netzengpässe (Redispatch) und EinsMan – ~1,4 Mrd. € in 2020



..auf Basis der Zeitreihen aus 2019

# Residuallast (2030) [7]

„Zukunft“



Jahr	P_max	P_mean	P_min	E_year
------	-------	--------	-------	--------

„History“	...			
2018	70.1	38.8	5.6	340.2
2019	74.6	35.5	3.2	<b>310.6</b>
„Future“	2030	71.5	21.8	<b>191.4</b> = 202 TWh – 11 TWh

Nicht regenerativ gedeckte Energiemenge

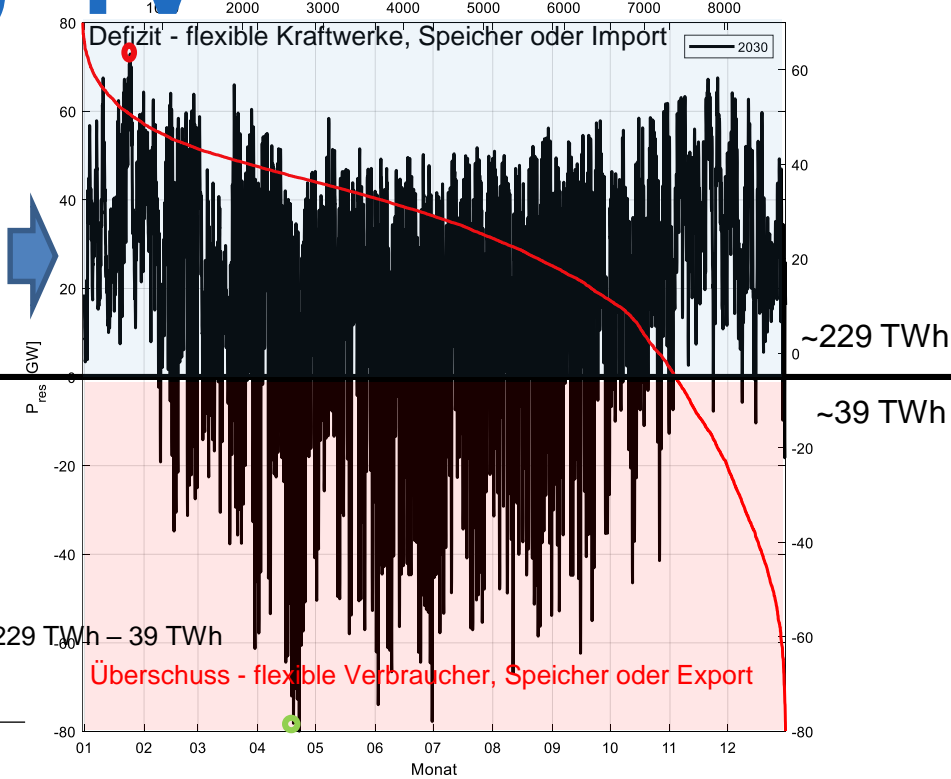
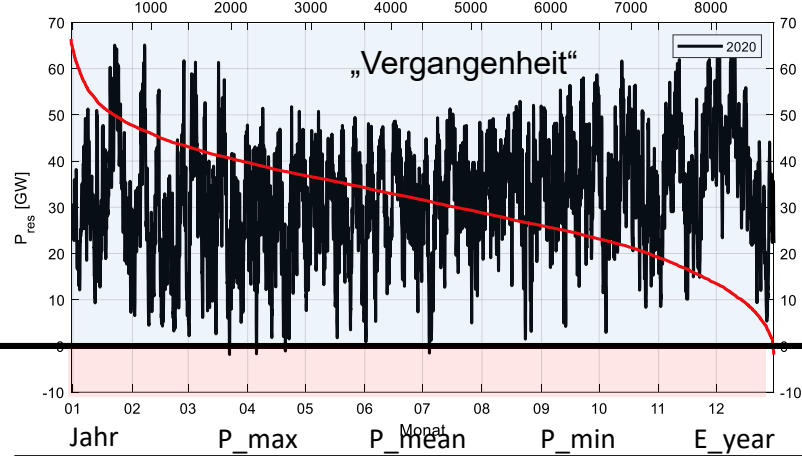
● Min. verbleibender Leistungsbedarf → Flexible Erzeuger und Verbraucher vorteilhaft (Überschuss, P groß, E klein (~11TWh): „groß“, wenige Stunden Betriebszeit?...)

● Max. verbleibender Leistungsbedarf → **Flexible Erzeuger** und Verbraucher notwendig (bleibt)

..auf Basis der Zeitreihen aus 2019

# Residuallast (2030) - PV

„Zukunft“



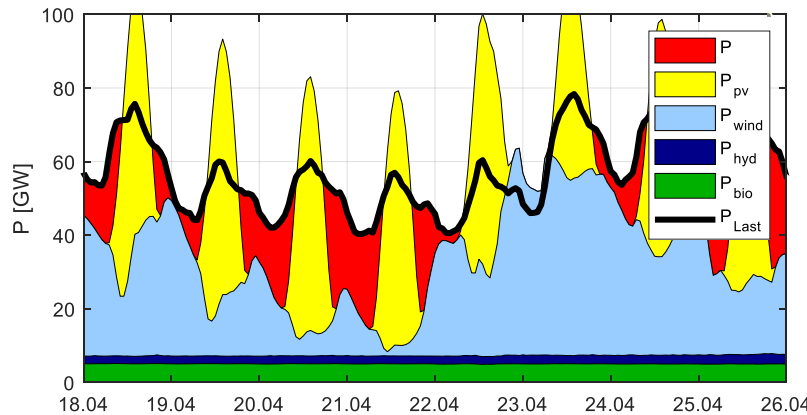
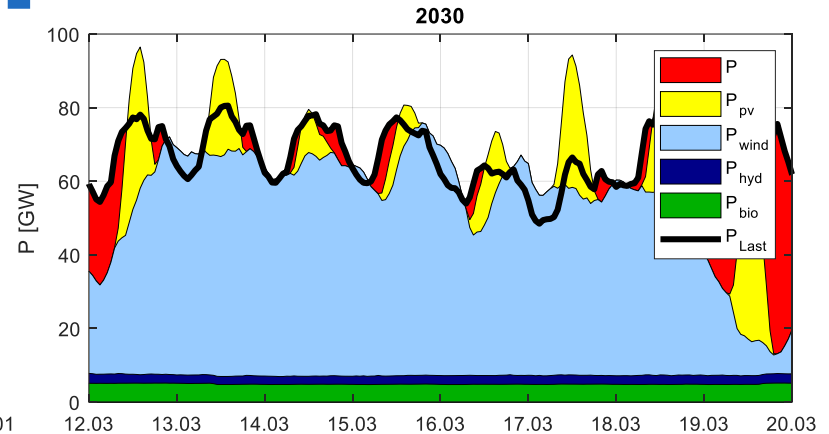
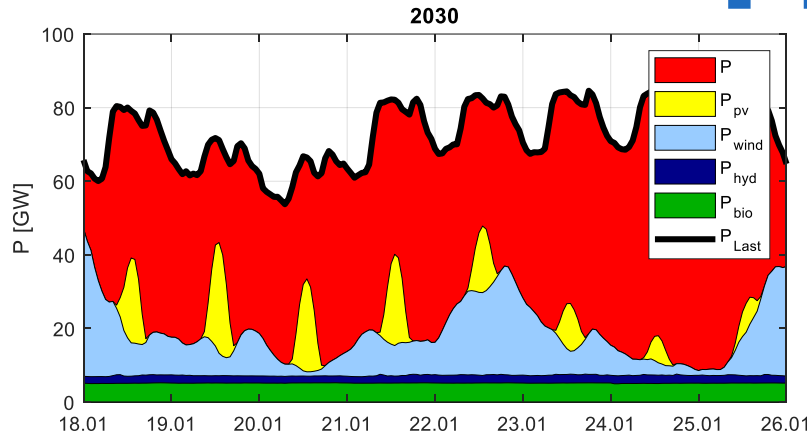
„History“	...				
	2018	70.1	38.8	5.6	340.2
	2019	74.6	35.5	3.2	<b>310.6</b>
„Future2“	2030	71.5	21.8	-79.9	<b>190.2 = 229 TWh - 39 TWh</b>

Jahr	pv	won	wof	bio	was	geo
[7] 2030	100	71	20	8.4	5.6	0.048
2030	179	55	7.7	8.4	5.6	0.048

→ Überschuss, P sehr groß, E „klein“ (~39TWh): sehr große, wenige Stunden Betriebszeit?..)

..auf Basis der Zeitreihen aus 2019

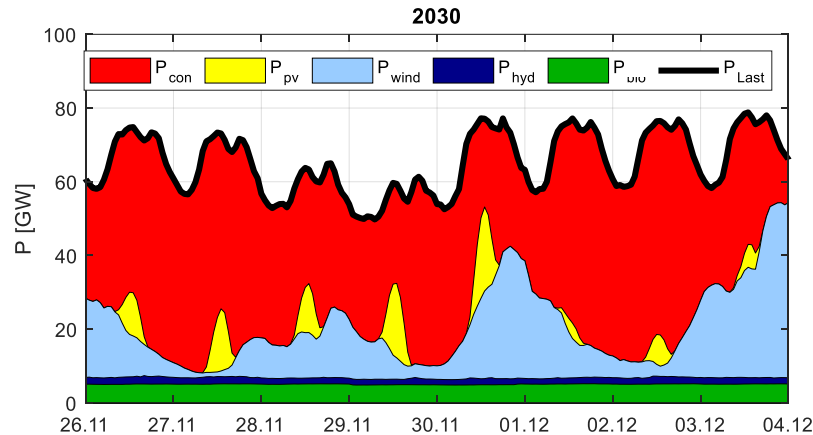
# 3 Wochen in 2030 [7]...



...volatile Erzeugung, und **Verbrauch** wie in 2019!...

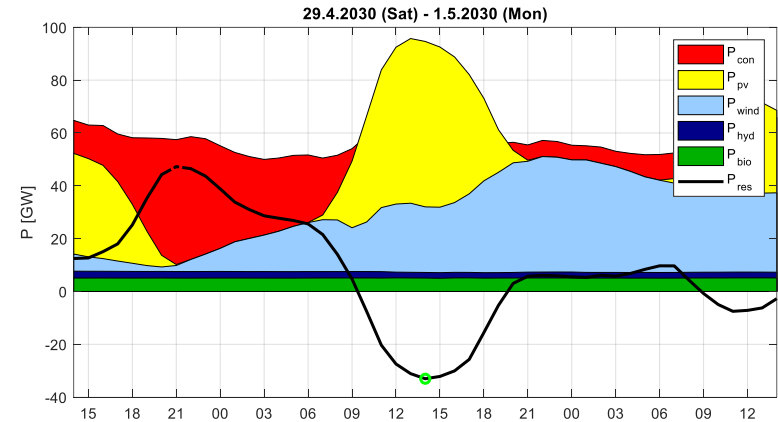
# Residuallast - Dynamik (2030) [7]

## Dunkelflaute



→ Signifikante Reduktion der Dunkelflaute im Vergleich zu 2020  
 Zeitraum (mehrere) Wochen mit geringem Anteil EE an der Erzeugung, (meist Winter)..

## Residuallast-Dynamik



→ Verdopplung der Leistungsänderung!  
 ...es **muss** soviel „bereitgestellt“ werden, wie verbraucht wird... zu jedem Zeitpunkt  
 Indikator: Frequenz ~ 50 Hz.

## Zusammenfassung (2030)

Zeit mit geringer EE-Einspeisung weisen systembedingt weiterhin große Energie-Unterdeckung auf , „geringe“ Überschussmengen, kaum Anreiz für Innovationen

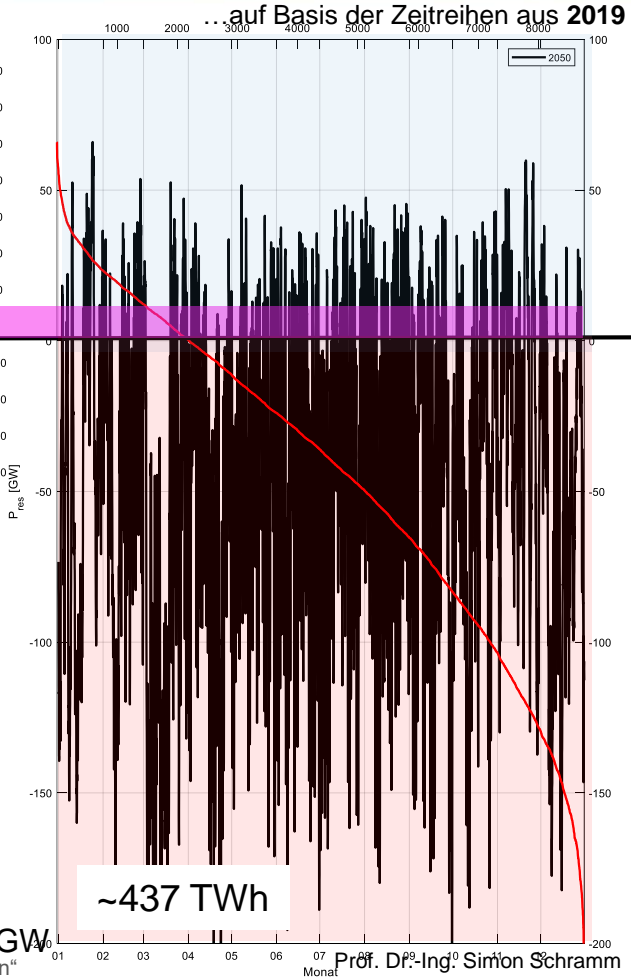
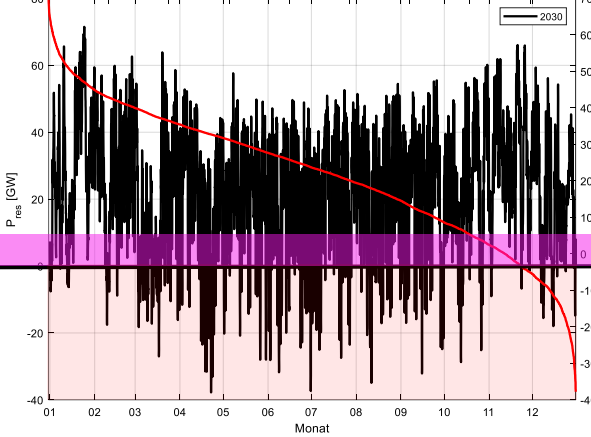
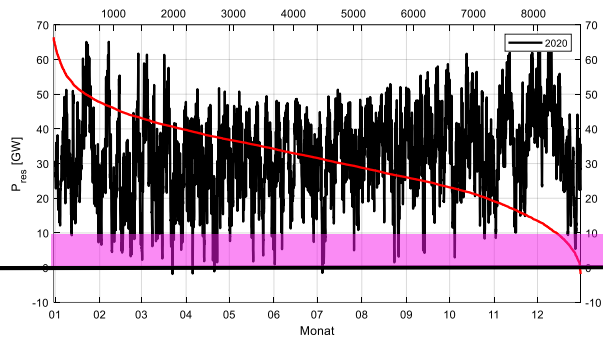
...“Herausforderungen sind zu gering“... zu wenig ambitionierter Zubau...,

Leistungsbedarf durch flexible Kraftwerken bleibt bestehen

Die Leistungsvariationen steigen, hervorgerufen durch Variabilität der EE, Dunkelflauten werden „schwächer“

Verbrauch passt (noch) zur Erzeugung, bzw. Erzeugung noch zu Verbrauch, „neue“ Verbrauch muss intelligent sein.

# Residuallast (2050) [9]



... auf Basis der Zeitreihen aus 2019

Vergleich: 10 GW ↕

~ „100 Mio. Fahrradfahrer mit 100W“ (C. Holler)

~ 5x HVDC Südostlinklink (2GW)

~1/4 der Kapazität der internationalen Netzkupplungen nach/von D

~Pumpspeicherleistung in D (~7GW)

~200.000 Schnellladesäulen mit 50kW gleichzeitig in Betrieb, bzw. ~1 Mio.

e-Fahrzeuge mit 11 kW Ladeleistung

~1/3 der deutschen Gaskraftwerke (Gesamt ~29GW)

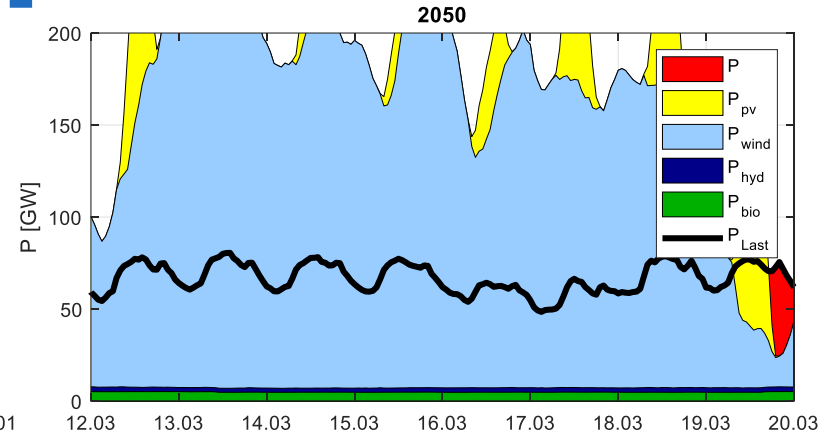
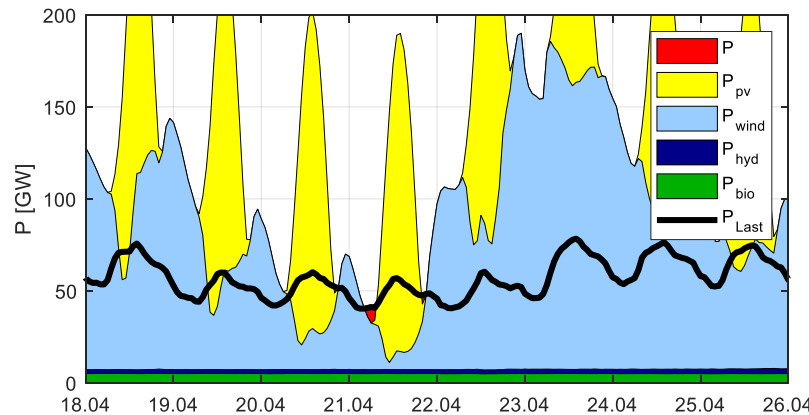
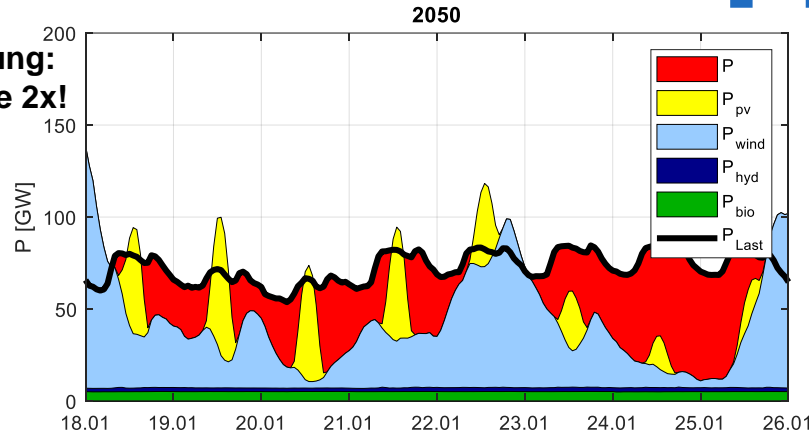
[c]=[9,PV]\*2, [9,won]\*2, [9,wof]\*3, ...

-200GW

„abgeschnitten“

# 3 Wochen in 2050 [9]...

Skalierung:  
Ordinate 2x!

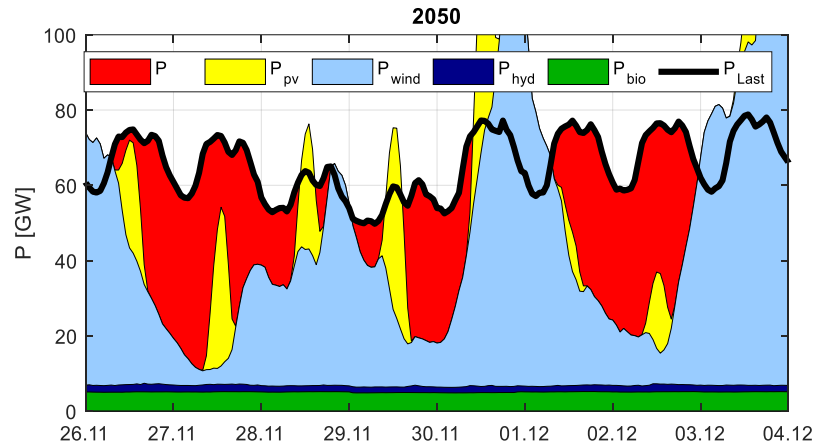


...der ökonomische Wert einer kWh hängt vom Zeitpunkt der Bereitstellung ab... →umdenken!

...volatile Erzeugung, und Verbrauch wie in 2019!...

# Residuallast – Dunkelflaute – 2050 [9]...

## Dunkelflaute



→Die Dunkelflaute wird immer kleiner...

## Residuallast-Dynamik

→sehr starke Leistungsvariationen (bis zu 220GW/d)... müssten lokal und intelligent abgefangen werden!

...es **muss** soviel „bereitgestellt“ werden, wie verbraucht wird... zu jedem Zeitpunkt



# Zusammenfassung

Der Ausbau EE muss (viel) schneller voran gehen, um (auch) die Sektorkopplung zu bedienen → **wir müssen endlich anfangen!**

Bis 2050 sind (dann zweitweise) große Energieüberschussmengen zu erwarten, Zeitweise Abregelung normal

EE-Erzeugungsmix! Lokal!

(technische) Herausforderungen, u.a.:

Sehr große Leistungsvariationen (bis zu 220GW/d) müssen lokal und intelligent abgefangen werden, Bedarf an flexibler Kraftwerksleistung bleibt (70 GW), Betriebszeiten sinken..

Lastfolgebetrieb → Dargebotes-abhängige Nachfrage - neues Verbrauchsverhalten essentiell z.B. e-Mobility, P2G mit G-Übertragungskapazität

# „Passt unser Energieverbrauch noch zur Energieerzeugung?“

Vision: „Der „neue“ Verbrauch passt sich wesentlich stärker dem Angebot an Erzeugungsleistung an, ist wesentlich aktiver und flexibler in seiner Betriebsweise. Die verwendete Energie ist wesentlich nachhaltiger produziert.“

## Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

## Quellen

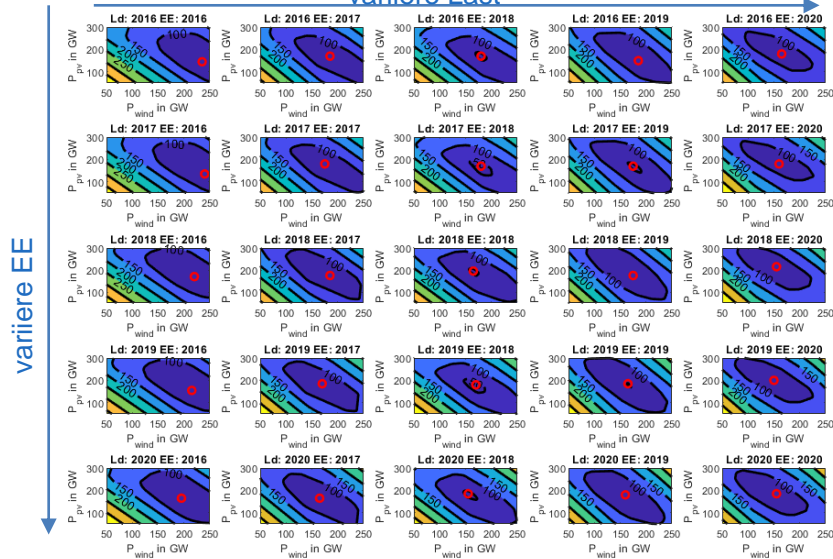
- [1] H-M. Henning, A. Palzer: Energiesystem Deutschland 2050, Fraunhofer ISE, 11/2013
- [2] N. Krzikalla, S. Achner, S. Brühl: Möglichkeiten zum Ausgleich fluktuierender Einspeisungen aus Erneuerbaren Energien, Studie im Auftrag des Bundesverband Erneuerbare Energie e.V.
- [3] T. Zimmermann, H. Tödter, O. Schülting, A. Kather: Auswirkungen verschiedener Sektorenkopplungspfade auf die elektrische Residuallast in Systemen mit hoher fluktuierender Einspeisung , 16. Symposium Energieinnovation, 12.-14.02.2020, Graz/Austria
- [4] F.Hein: Agorameter, 09/2020, 2020-04-28\_Agorameter\_v9.1\_1.xlsx
- [5] European Earth Observation „Copernicus“ Programm - CAMS Radiation Service
- [6] Monitoringbericht des BMWi nach §63 i.V.m § 51 EnWG zur Versorgungssicherheit im Bereich leitungsgebunden Versorgung mit Elektrizität, 2019
- [7] Referentenentwurf zu „Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Erneuerbare-Energien Gesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften“, 09/2020
- [8] Agora Energiewende: Wie kann Deutschland bis 2050 klimaneutral werden? 11/2020

# Optimale Konfiguration - 2020

Minimale saisonale Abweichung – welche Kombi passt am besten? (strombedarf)

Monatswerte

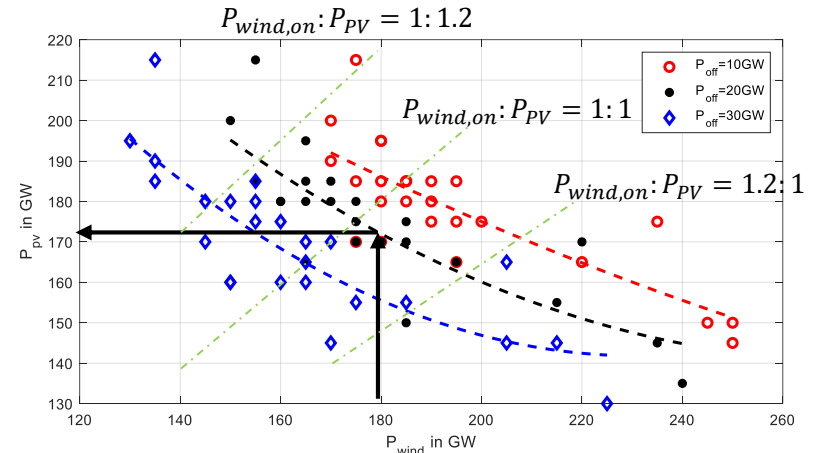
variierere Last



20GW offshore

...keine Kombi, sondern ein Bereich...

$$P_{wind,on} \cong P_{PV} \rightarrow \text{😊}$$



Beispiel (ohne Wertung):

$$P_{wind,on} = 180GW, 320 \text{ TWh}$$

$$P_{PV} = 180GW, 170 \text{ TWh}$$

$$P_{wind,off} = 20GW, 70 \text{ TWh}$$

$$\text{Summe: } 560 \text{ TWh}$$