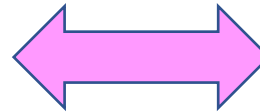


F. Wagner

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching/Greifswald

Ökonomie

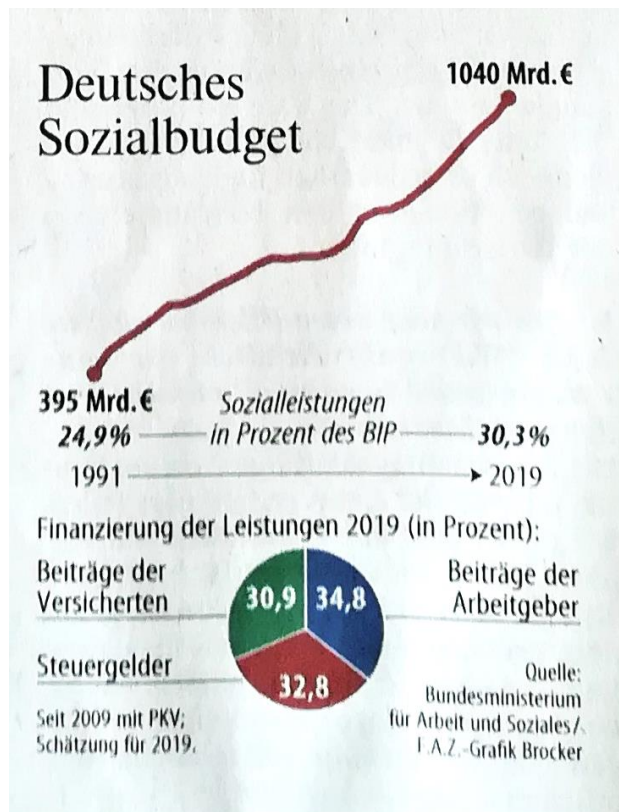


Ökologie

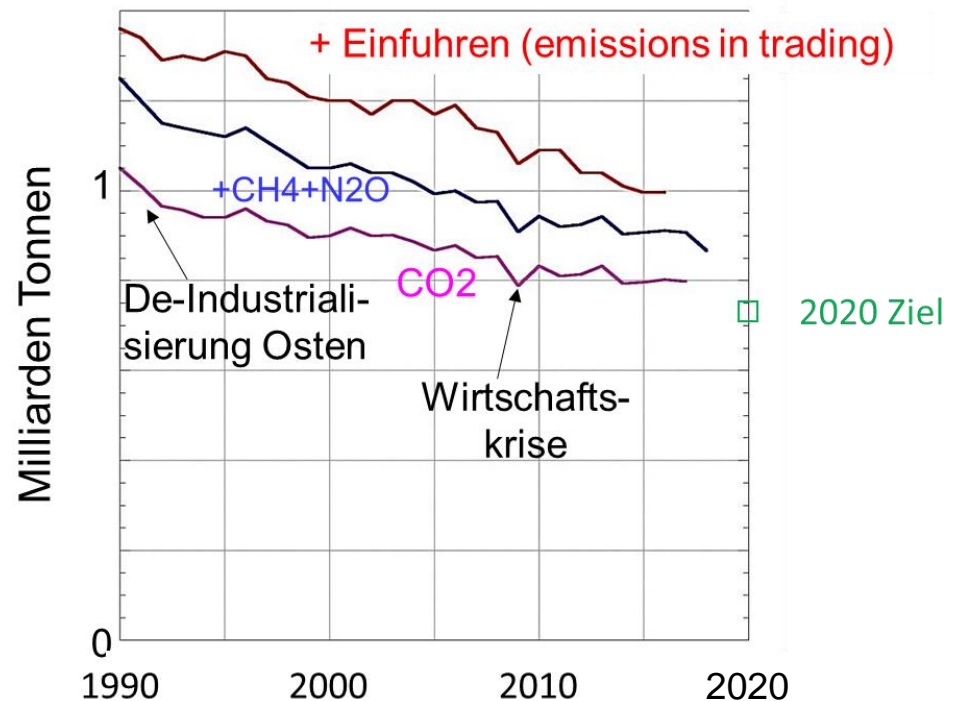
F.A.Z.

## Eine Billion für Soziales

Fast jeder dritte in Deutschland erwirtschaftete Euro fließt 2019 in den Sozialstaat. Jetzt wird es noch mehr.



## Klimagas Emissionen Deutschlands



# Einleitung

Prinzipielle technische Möglichkeiten einer CO<sub>2</sub>-freien Energieversorgung

Fossile Kraftstoffe mit **CCS\***

**Fission\***

Erneuerbare in ihren Varianten

Hydro

Biomasse

Umweltwärme

Wind (on, off)

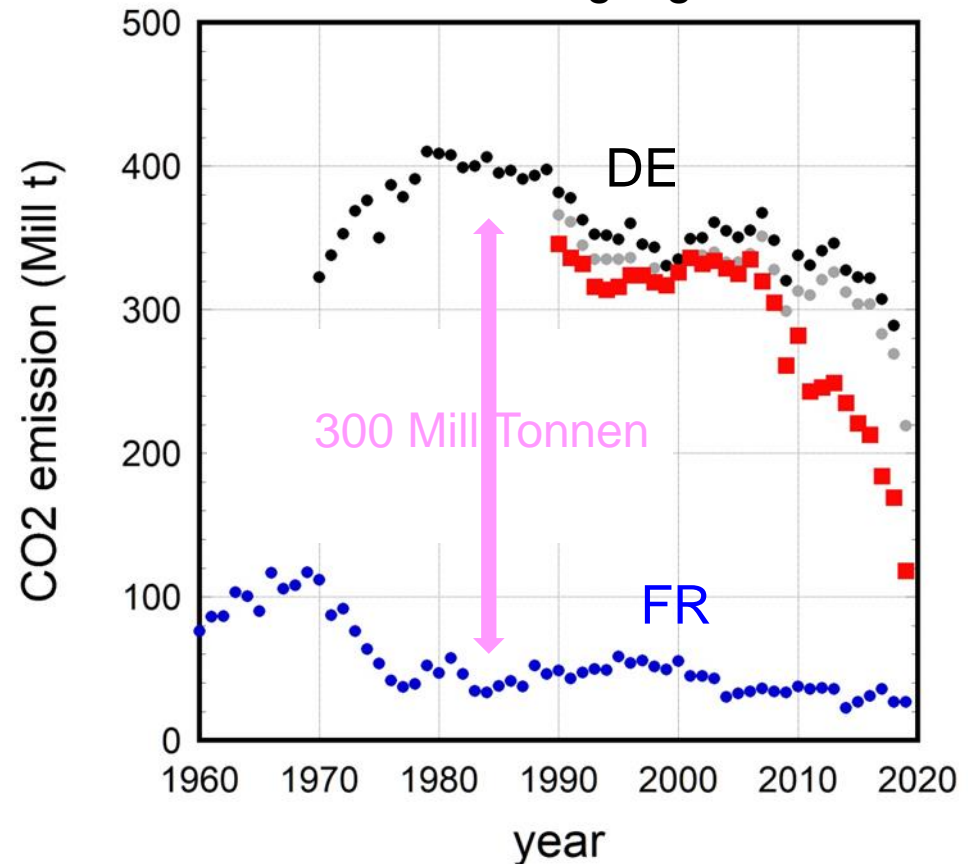
PV, Solarthermie

.....

Fusion

\* **verboten/abgelehnt/beendet**

Vergleich der CO<sub>2</sub>-Emissionen Deutschlands mit denen Frankreichs bei der Stromerzeugung



■ Kohle- statt Kernausstieg

Wir Deutsche sind große Umweltsünder und können dennoch die Welt alleine nicht retten

# Aspekte der EE

In DE spielen eine Rolle: Hydro, Biomasse, **Wind** (on, offshore), **PV**, Solarthermie, Umweltwärme

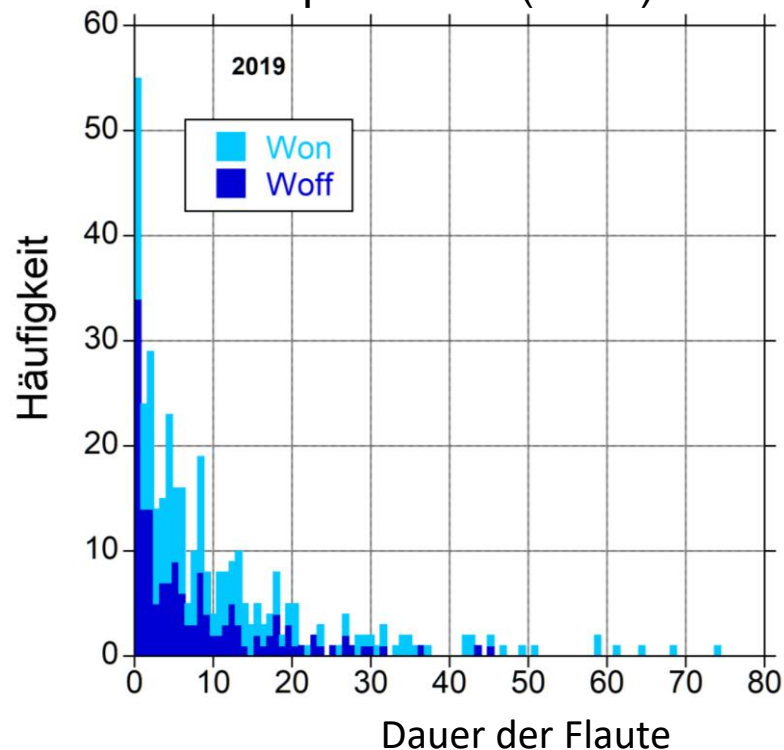
Probleme von Wind und PV:

niedrige Energiedichte => hoher Flächenbedarf => nationale Potenziale

intermittierend => produzieren Leistung => leistungsstarke Netze; backup-, Speicherbedarf

=> man kann nicht Einzeltechnik betrachten (z.B. vom Strompreis), sondern das System

Flaute quantitativ (2019)



P < 10% Pinst		
	Won	Woff
insgesamt h	2510	1216
Häufigkeit		
> 8 h	273	120
> 24 h	53	14
> 48 h	10	0
> 72 h	1	0

2016

P < 10% Pinst		
	Won	Woff
insgesamt h	3618	2107
Häufigkeit		
> 8 h	426	222
> 24 h	106	41
> 48 h	24	9
> 72 h	9	1
> 96 h	5	0
> 120 h	3	0
> 144 h	1	0
> 168 h	0	0

# Aspekte der EE

In DE spielen eine Rolle: Hydro, Biomasse, **Wind** (on, offshore), **PV**, Solarthermie, Umweltwärme

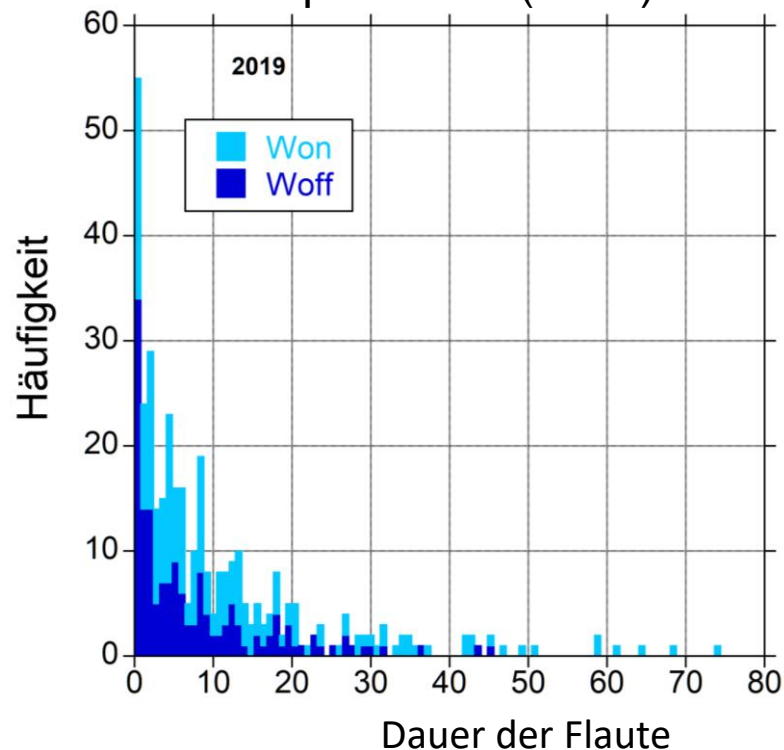
Probleme von Wind und PV:

niedrige Energiedichte => hoher Flächenbedarf => nationale Potenziale

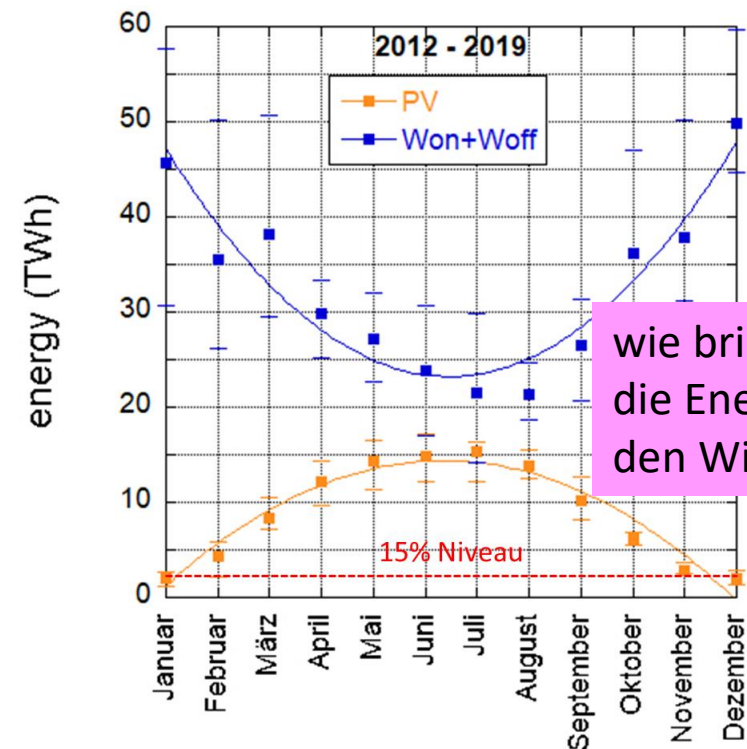
intermittierend => produzieren Leistung => leistungsstarke Netze; backup-, Speicherbedarf

=> man kann nicht Einzeltechnik betrachten (z.B. vom Strompreis), sondern das System

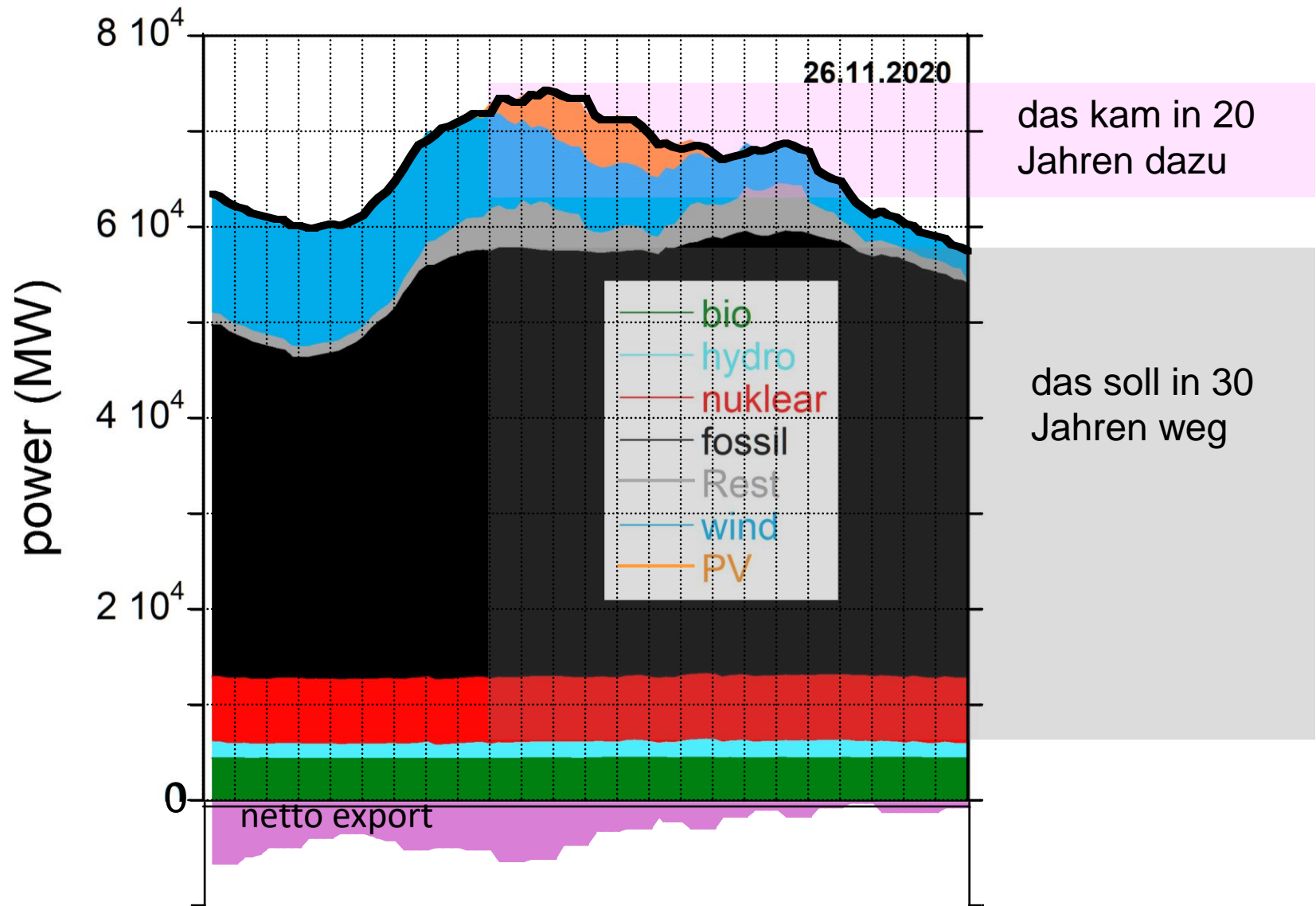
## Flaute quantitativ (2019)



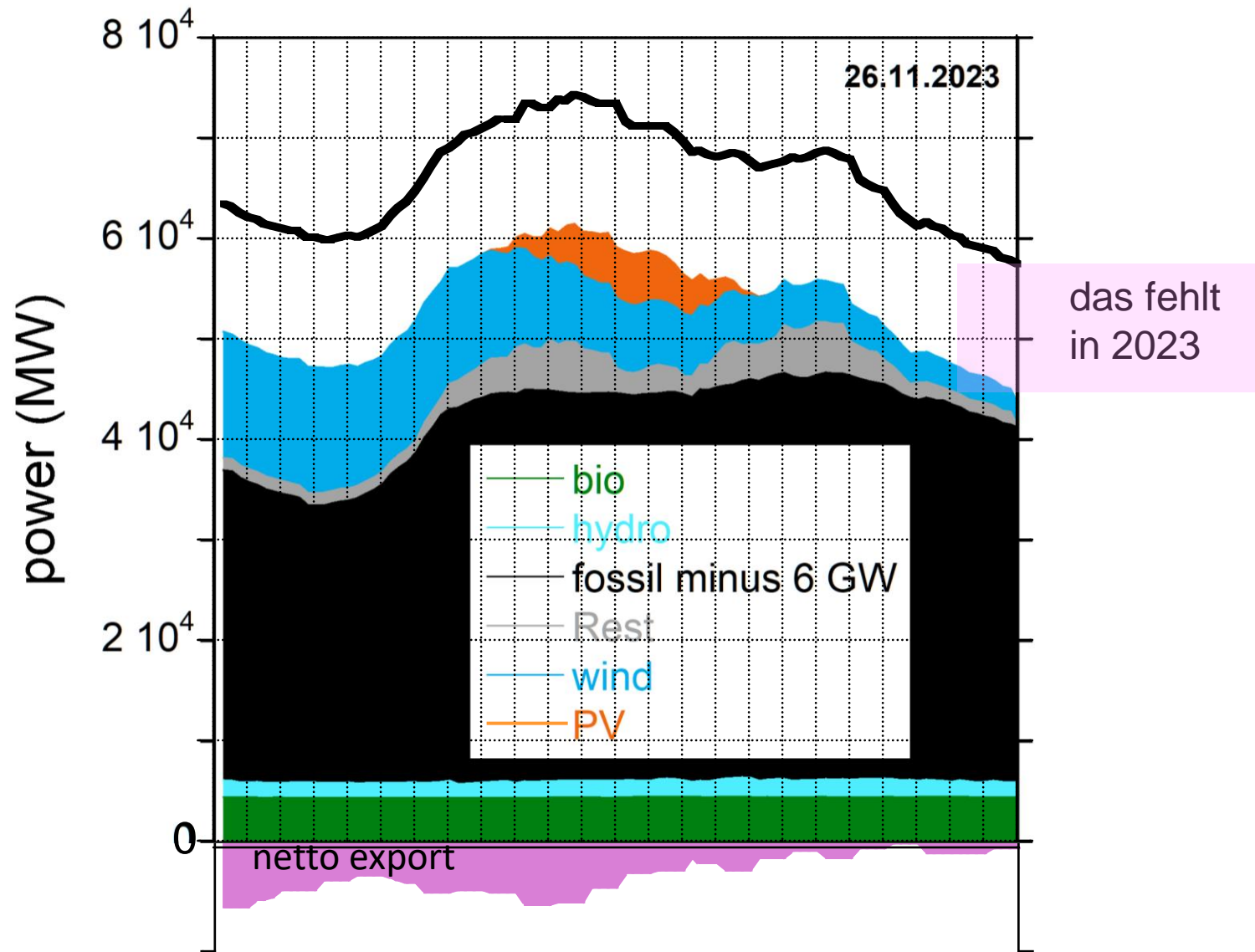
## Saisonale Variation (2019)



# Die Versorgung am 26.11.2020 – vor einer Woche



## Die Versorgung am „26.11.2023“ – in drei Jahren



# Vorsorge in Schleswig-Holstein



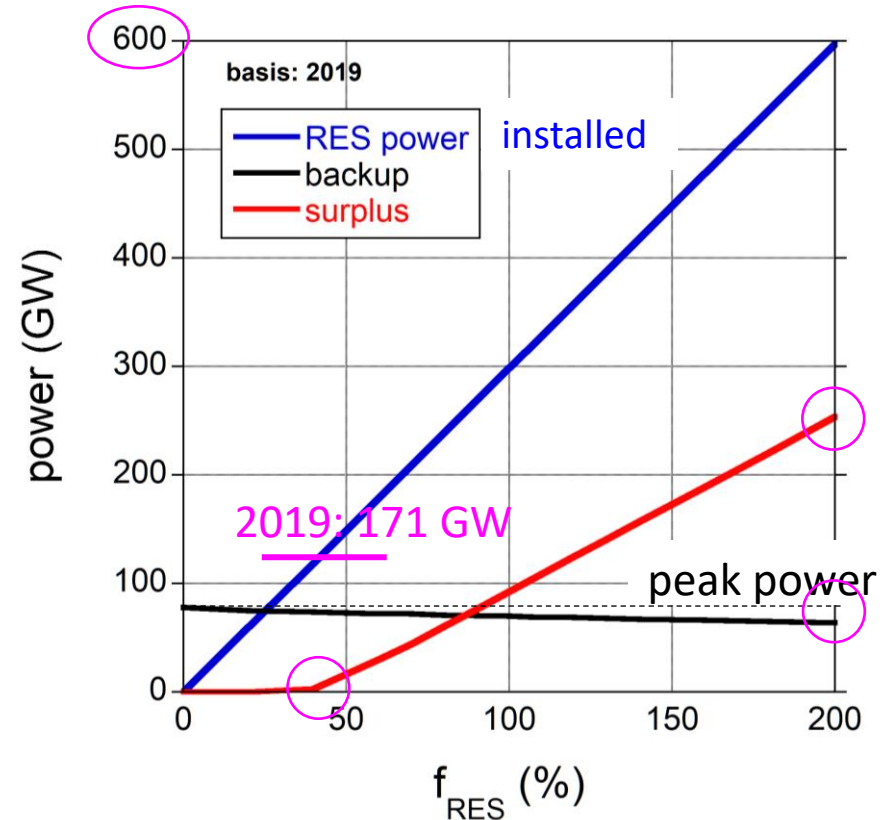
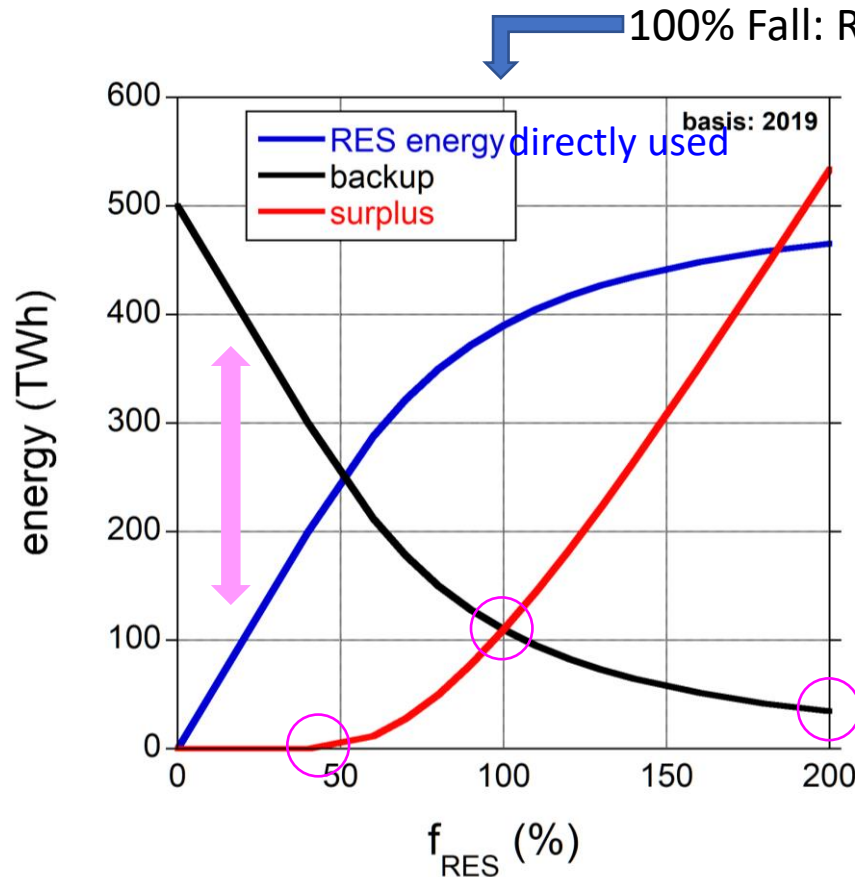
Kiel (dpa/Ino) - Die Kreise und kreisfreien Städte in Schleswig-Holstein erhalten in dieser Woche jeweils zwei leistungsstarke Notstromaggregate. Damit werde für den Fall eines längeren flächendeckenden Stromausfalls Vorsorge getroffen, teilte das Innenministerium am Mittwoch mit. Die Notstromaggregate sind dafür vorgesehen, jeweils zwei Tankstellen am Laufen zu halten, damit diese den Diesel liefern können, den wiederum wichtige Einrichtungen für deren Notstromaggregate brauchen.

So könnten die im Krisen- und Katastrophenfall erforderlichen Behörden und Einrichtungen des Landes durchgehend handlungsfähig gehalten werden, erläuterte Innenministerin Sabine Sütterlin-Waack (CDU). Nicht zuletzt die größeren Stromausfälle der vergangenen Jahre in den Bereichen Flensburg und Lübeck hätten gezeigt, wie zentral die Sicherung der flächendeckenden Versorgung mit Treibstoff für die Arbeit der Einsatzkräfte und die Bereitstellung von Versorgungsgütern aus Sicht des Bevölkerungsschutzes sei.

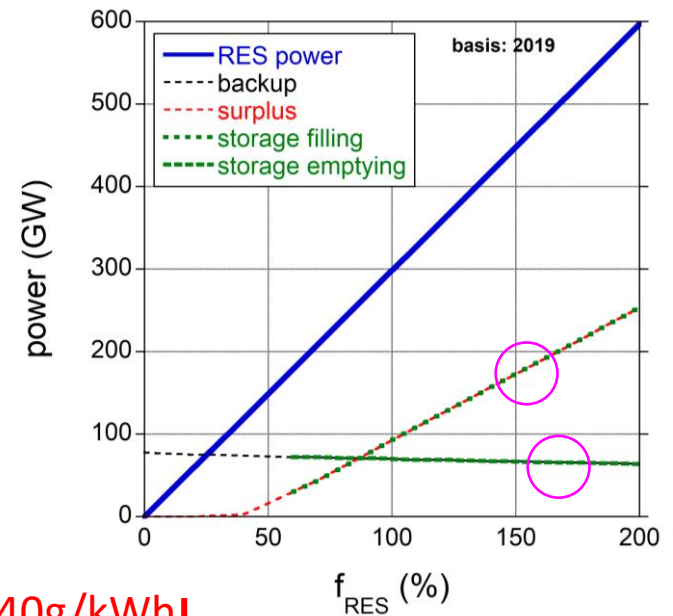
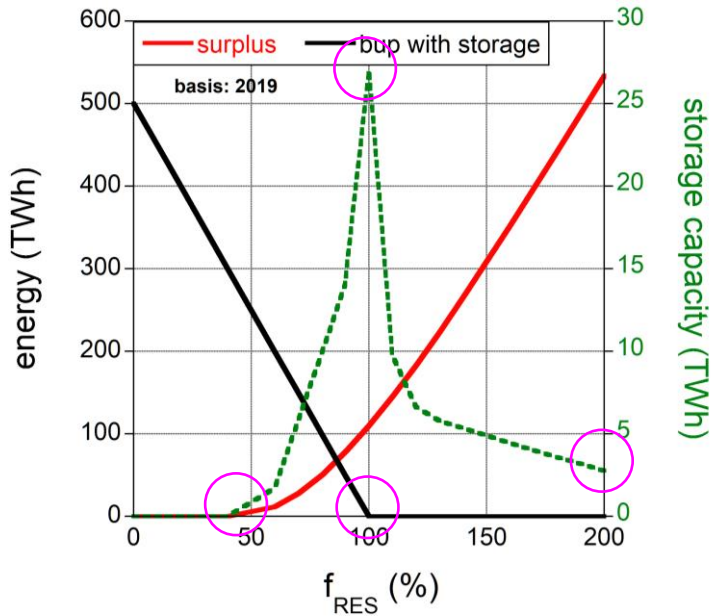
# Rahmen für meine eigenen Rechnungen: optimal mix, 100% case

100% case: Wind und PV erzeugen 500 TWh (+ 20 TWh Hydro, keine Biomasse)

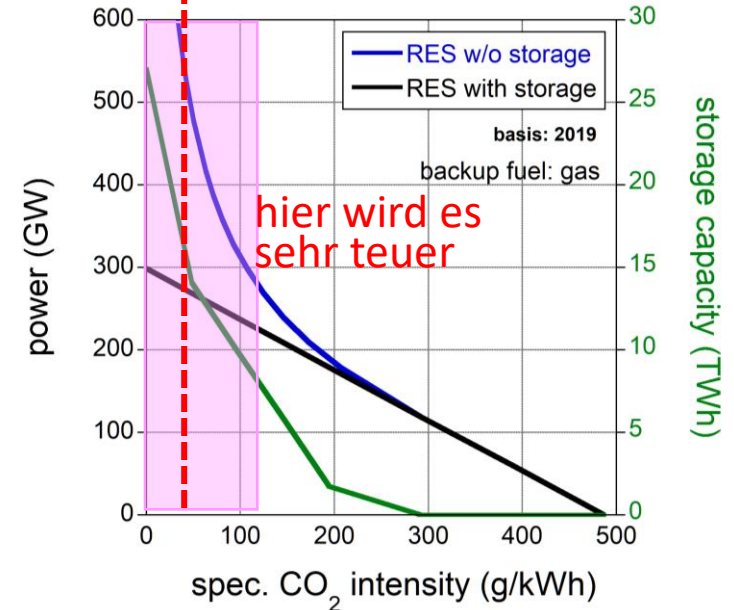
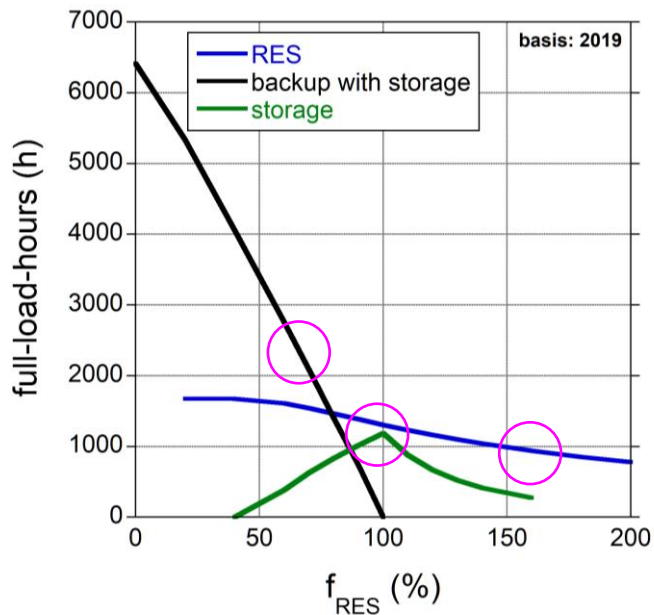
Optimal mix: Verhältnis von Wind zu PV so, dass backup minimal



# Detailergebnisse nur für Strom



ICPP: max 40g/kWh



# Der Schritt zum 1,5°C Ziel

WEGE FÜR DIE ENERGIEWENDE

Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050

KURZFASSUNG



INSTITUT FÜR TECHNO-ÖKONOMISCHE SYSTEMANALYSE (IEP)



November 2017  
Stellungnahme

»Sektorkopplung« – Optionen für die nächste Phase der Energiewende

Kumulative Gesamt-kosten bis 2050

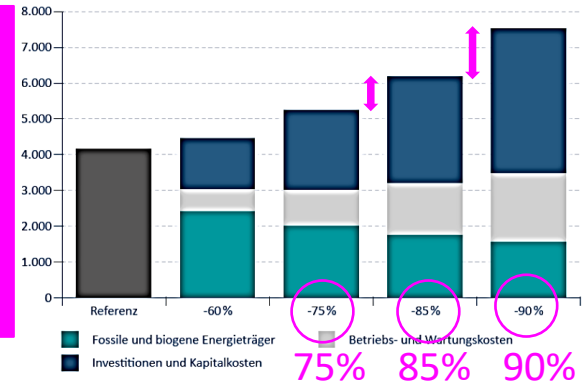


Abbildung 13: Kumulative systemische Gesamtkosten bis zum Jahr 2050 für Systementwicklungen, die sich hinsichtlich der Zielwerte der Reduktion energiebedingter CO<sub>2</sub>-Emissionen unterscheiden.

Die vorliegende Studie zeigt, dass die Potenziale innerhalb Deutschlands zur vollständigen Deckung des Strom-, Wärme- und Mobilitätsbedarfs nicht ausreichen. Es wird daher ein zweites Energiesystemscenario für 2050 betrachtet, in dem die flüssigen Kraftstoffe für Deutschland an besser geeigneten Standorten im Ausland erzeugt wer-

Jahr 2050		80 SZENARIO 80	95 SZENARIO 95
Mehrinvestitionen ggü. heute	Mrd. €/Jahr	102	192
Eingesparte Energiekosten ggü. heute	Mrd. €/Jahr	53	64
Saldierte Kosten	Mrd. €/Jahr	49	128
Anteil der saldierten Kosten am BIP 2050	%	1,1	2,8
Durchschnittliche Vermeidungskosten	€/t CO <sub>2</sub>	83	170
Grenzvermeidungskosten	€/t CO <sub>2</sub>	306	744
<b>Kumulierte Mehrkosten heute-2050</b>	<b>Mrd. €</b>	<b>655</b>	<b>1.850</b>

Jahreskosten

49 128 Mrd€/a

Tabelle 1: Ausgewählte Kosten der jeweiligen Szenarien

<sup>122</sup> Mehrinvestitionen sowie Betriebskosten ohne Energieträgerkosten




Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik

Energiewirtschaftliche Bedeutung der Offshore-Windenergie für die Energiewende

Update 2017

# 3 Studien von ISE für 2050 zur Sektorkopplung

Contents lists available at ScienceDirect



Renewable and Sustainable Energy Reviews  
journal homepage: [www.elsevier.com/locate/rser](http://www.elsevier.com/locate/rser)

A comprehensive model for the German electricity and heat sector in a future energy system with a dominant contribution from renewable energy technologies – Part II: Results

Andreas Palzer\*, Hans-Martin Henning

**2013**

Division Thermal Systems and Buildings, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg, Germany

## WAS KOSTET DIE ENERGIEWENDE?

### WEGE ZUR TRANSFORMATION DES DEUTSCHEN ENERGIESYSTEMS BIS 2050

Die modellbasierte Studie untersucht sektor- und energieträgerübergreifend die System- und Kostenentwicklung einer klimaschutzkompatiblen Transformation des deutschen Energiesystems.

Hans-Martin Henning, Andreas Palzer

**2015**

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg

## WEGE ZU EINEM KLIMANEUTRALEN ENERGIESYSTEM

Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen

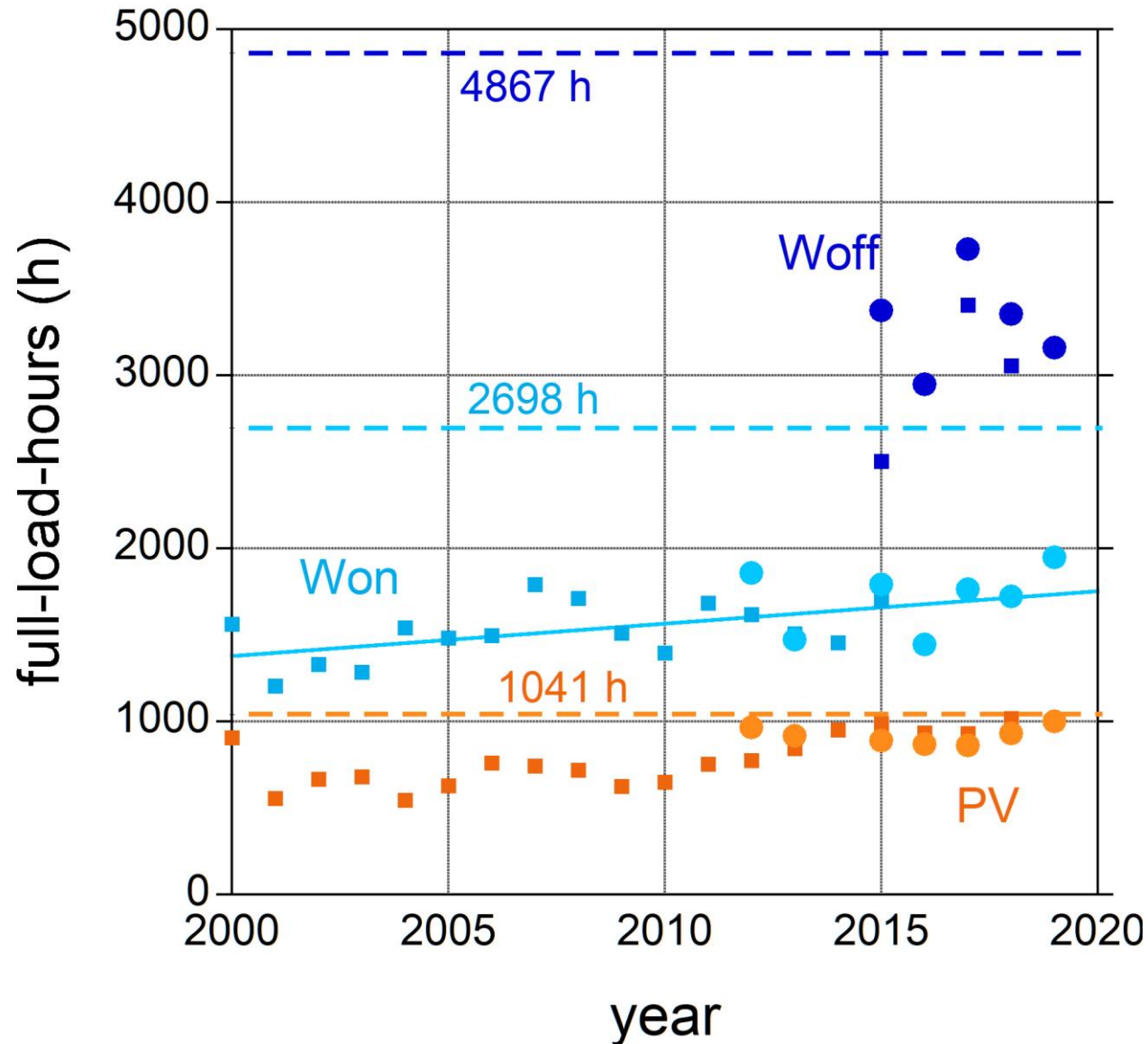
Philip Sterchele, Julian Brandes, Judith Heilig, Daniel Wrede, Christoph Kost, Thomas Schlegl, Andreas Bett, Hans-Martin Henning

**2020**

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg

	heute	2013	2015	2020
CO2 Absenkung um %		81	85	95
Primärenergie TWh	3400	1750	2050	2270
Endenergie TWh	2500	1340	1790	<b>1940</b>
<b>Verbräuche in den Sektoren TWh</b>				
Industrie, Prozesswärme	622	445	416	410
Niedertemp. Verwendungen	829	388	521	604
Verkehr	751	357	490	470
klassischer Stromverbrauch TWh	512	375	360	400
Summe Verbräuche	2714	1565	1787	1884
Gesamtstronerzeugung/nachfrage TV	520	635	795	<b>1447</b>
<b>Potenzialgrenzen GW</b>				
Won		200	189	<b>230</b>
Woff		38	45	<b>80</b>
PV		250	300	<b>530</b>
<b>installierte Leistungen GW</b>				
Won	53,4	120	168	<b>189</b>
Woff	7,5	32	33	<b>75</b>
PV	49,2	147	166	<b>264</b>
<b>Stromerzeugung TWh</b>				
Won	99,2	217	377	510
Woff	24,4	112	127	365
PV	46,4	143	174	430
Summe		472	678	<b>1305</b>
<b>Volllaststunden (Mittelwerte) h</b>				
Won	1718	1808	2244	<b>2698</b>
Woff	3381	3500	3848	<b>4867</b>
PV	888	973	1048	<b>1041</b>
Biomasse TWh	~ 300	335	340	<b>300</b>
Umweltwärme TWh		171	257	259
Importe TWh		714	671	<b>336</b>

# Entwicklung der Volllaststundenwerte, flh



Quadrate:  
aus der Literatur  
Punkte:  
aus den eigenen Studien

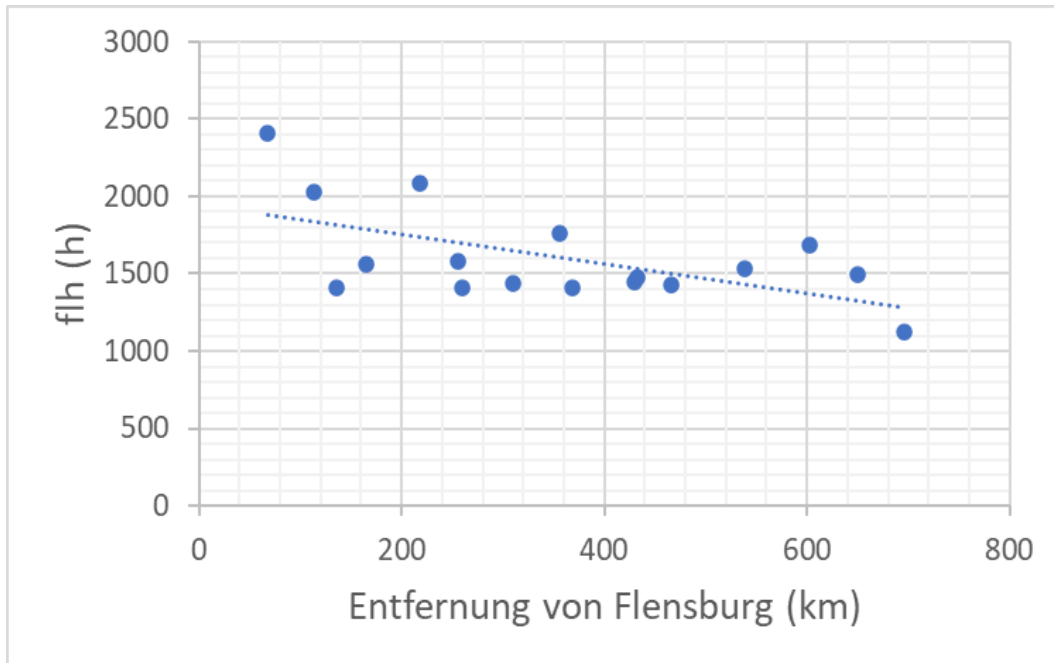
Die ISE Werte sind gestrichelt eingetragen.

# Was es bei der Vorhersage von Volllaststunden ggf. zu bedenken gibt

## 1. Nutzung von Standorten tiefer im Land

### flh der deutschen Bundesländer (2016)

Der Nullpunkt wurde in Flensburg angenommen nahe an der dänischen Grenze.

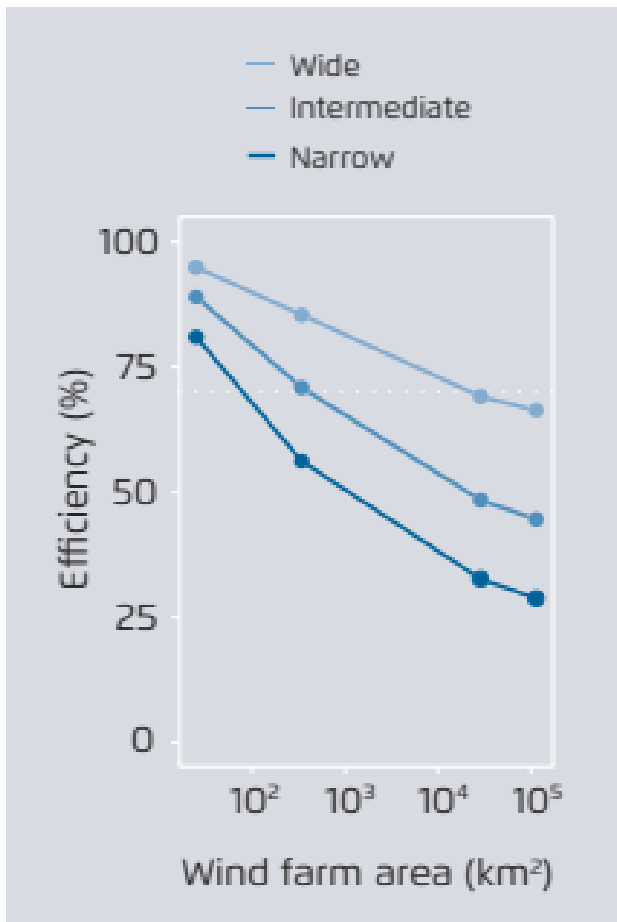


pro 100 km nimmt flh um 94 h ab.

# Was es bei der Vorhersage von Volllaststunden ggf. zu bedenken gibt

## 2. Nutzung von Standorten tiefer im Land

### Abschätzung von Windkraftanlagen



Simulated drop in efficiency, defined as the capacity factor of a wind farm relative to an isolated turbine, with a greater wind farm in an idealised scenario of offshore wind energy in The North Sea.

Agora Energiewende, Agora Verkehrswende, Technical University of Denmark and Max-Planck-Institute for Biogeochemistry (2020):  
Making the Most of Offshore Wind: Re-Evaluating the Potential of Offshore Wind in the German North Sea.

# Was es bei der Vorhersage von Volllaststunden ggf. zu bedenken gibt™

## 3. Nimmt die Windgeschwindigkeit über die Jahre ab?

4 / 2017

Meteorologisches Observatorium Lindenberg – Richard-Aßmann-Observatorium

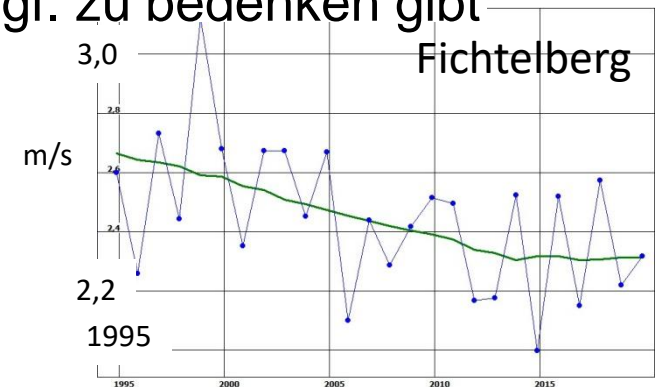


### „Terrestrial Stilling“ in Lindenberg?

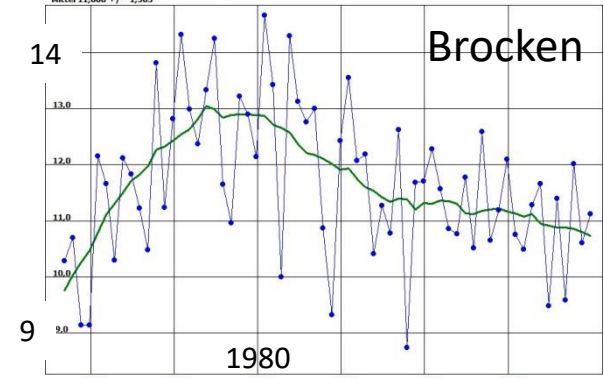
Claudia Becker, Udo Rummel und Frank Beyrich (MOL-RAO) – 14.11.2017

In den letzten Jahren ist in der internationalen Fachliteratur wiederholt der Effekt des sogenannten „Global terrestrial stilling“ diskutiert worden (z. B. [1], [2]). Hierunter wird eine Abnahme der mittleren Windgeschwindigkeit in der Standard-Anemometerhöhe (10 m) über den Landflächen der mittleren Breiten etwa seit den 1980er Jahren verstanden. Dabei wird z. T. eingeräumt, dass sich dieser über etwa 30 Jahre erkennbare Trend während der letzten 5 Jahre nicht mehr in gleichem Maße fortgesetzt habe. Als häufig diskutierte mögliche Ursachen des „stilling“ gelten insbesondere Schwankungen der großräumigen atmosphärischen Zirkulation sowie die Zunahme der Oberflächenrauigkeit in der Umgebungs der Windmessstationen durch Vegetationswachstum oder

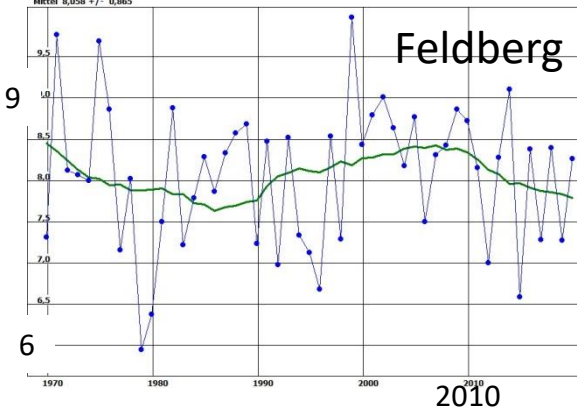
Diagramme jeweils vom Herbst



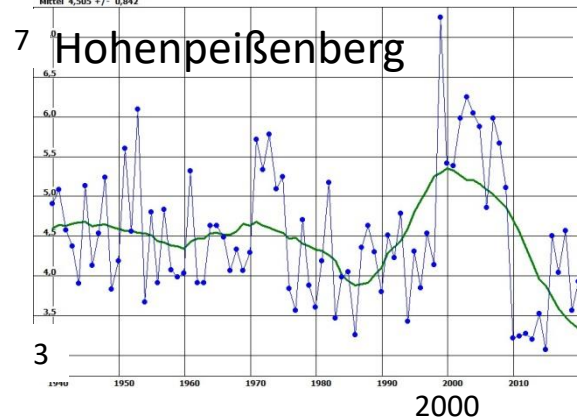
KL 00722;Brocken;Windgeschwindigkeit Tagesmittel: m/s;3-Monate-Mitte;Sep-Nov  
Mittel 11,666 +/- 1,363



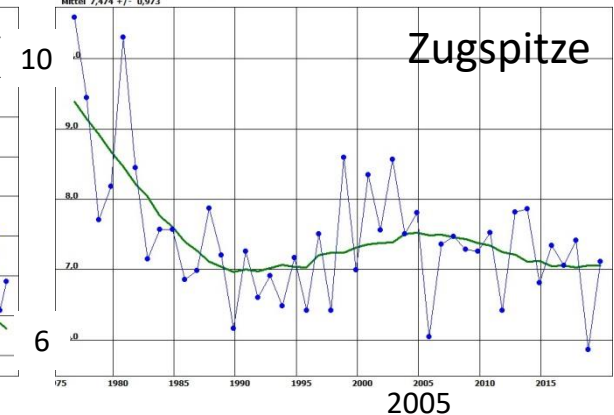
KL 01346;Feldberg/Schwarzwald;Windgeschwindigkeit Tagesmittel: m/s;3-Monate-Mitte;Sep-Nov  
Mittel 8,058 +/- 0,865



KL 02290;Hohenpeißenberg;Windgeschwindigkeit Tagesmittel: m/s;3-Monate-Mitte;Sep-Nov  
Mittel 4,505 +/- 0,842



KL 05792;Zugspitze;Windgeschwindigkeit Tagesmittel: m/s;3-Monate-Mitte;Sep-Nov  
Mittel 7,474 +/- 0,923



# Energiebilanz über ein Jahr

Sektorlast mit 1940 TWh Endenergie

PV: = 264 GW, Won = 189 GW, Woff = 75 GW

Produktion nach 2019 Bedingungen ohne flh-Erhöhung: 851 TWh

Überschuss im Sommer: 8,5 TWh, irrelevant

Fehlbedarf: 1097 TWh

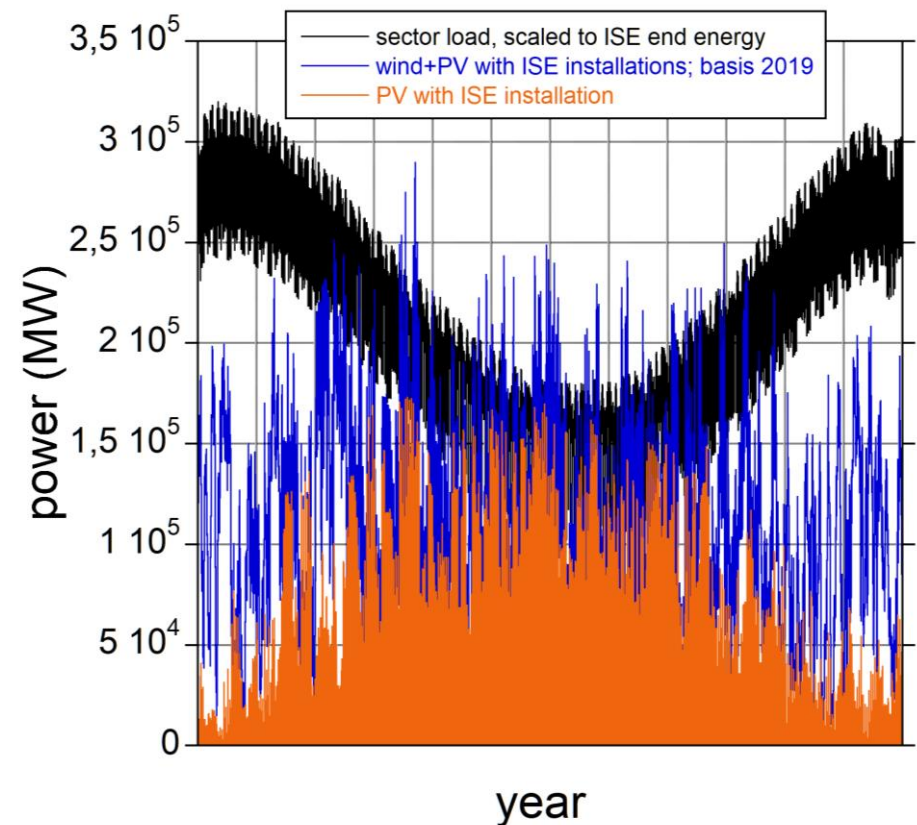
Abzudecken mit (ISE)

Biomasse = 300 TWh

Umweltwärme = 259 TWh

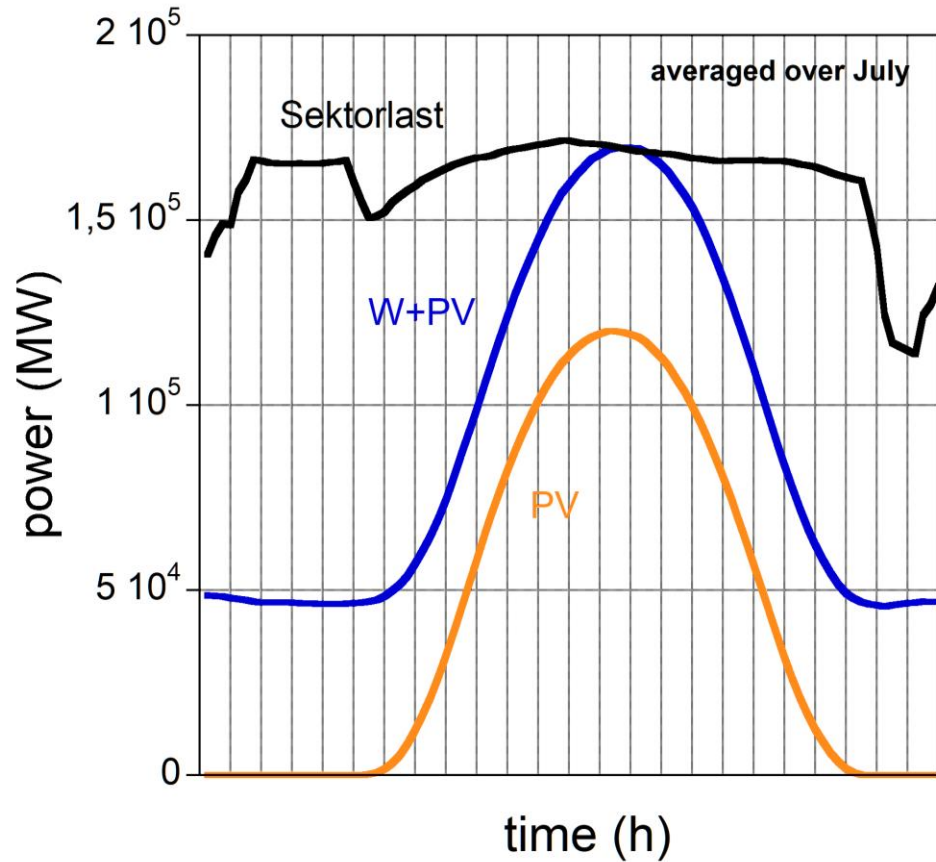
Importe = 336 TWh

Summe = 895 TWh



# Energiebilanz 2

## Tag, gemittelt über Juli



Tagesbedarf: 3,9 TWh

PV Erzeugung: 1 TWh

iRES Erzeugung: 2,2 TWh

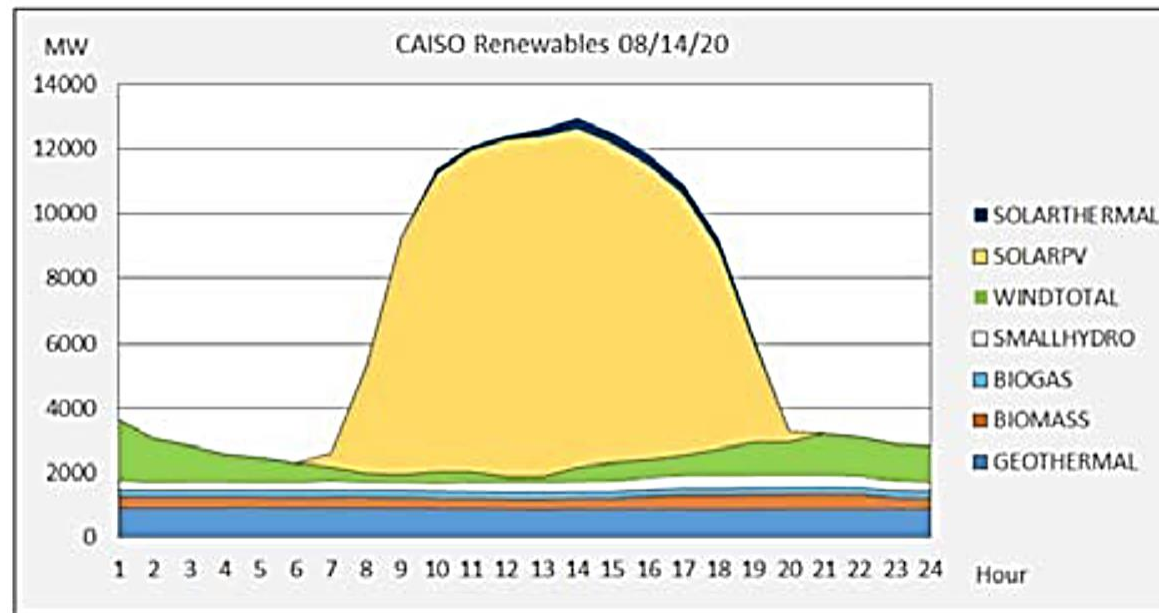
Technische Fähigkeit:

>100 GW ab- und wieder zuschalten.

# Stromabschaltungen in Kalifornien

CAISO, Californian Independent System Operator, mussten am 14. und 15.8.2020 “rolling outages” anordnen lassen:

“Consumers are urged to lower energy use during the most critical time of the day, 3 p.m. to 10 p.m., when temperatures remain high and **solar production is falling due to the sun setting.**”



# Wasserstoff

## Thermodynamische Grunddaten

Unterer Heizwert: 3kWh ergeben 1Nm<sup>3</sup> oder 0,089 kg H<sub>2</sub> mittels Elektrolyse

Reale Bedingungen: 4,3 – 5,5 kWh

10 MW Anlage in Wesseling: 6 kWh H<sub>2</sub> bei 20 bar

Handhabung:

verflüssigen: 0,36 kWh/Nm<sup>3</sup>; aufwärmen: 0,11 kWh/Nm<sup>3</sup>

komprimieren:

auf 150 bar (Kavernenspeicherung): 0,16 kWh/Nm<sup>3</sup>; auf 700 bar(PKW): 0,21 kWh/Nm<sup>3</sup>

## Ein Beispiel: 10 GWel für 24 Stunden aus Wasserstoff-Speicher

(nach M. Wanner, *Transformation von elektrischer Energie in Wasserstoff und dessen Speicherung*, VGB PowerTech 9|2020)

1000 Brennstoffzellen a 10 MW oder 100 BZ a 100 MW

Verbrauch: 1600 Tonnen H<sub>2</sub> oder 1.8 Mill Nm<sup>3</sup> (9% des Industriebedarfs) in 24h. Dafür sind etwa 90 GWh notwendig.

1. Flüssigtransport, LH<sub>2</sub> Lagerung

Verflüssigung: 11 Tage mit dem (geplanten) weltweit größten Verflüssiger; Verbrauch: 16 GWh

Anlieferung: 450 Tankfahrzeuge pro Stunde

2. Speicherung: 150 bar Raumtemperatur. Volumen=160000 m<sup>3</sup> = Tank, Ø=50m, H=50m

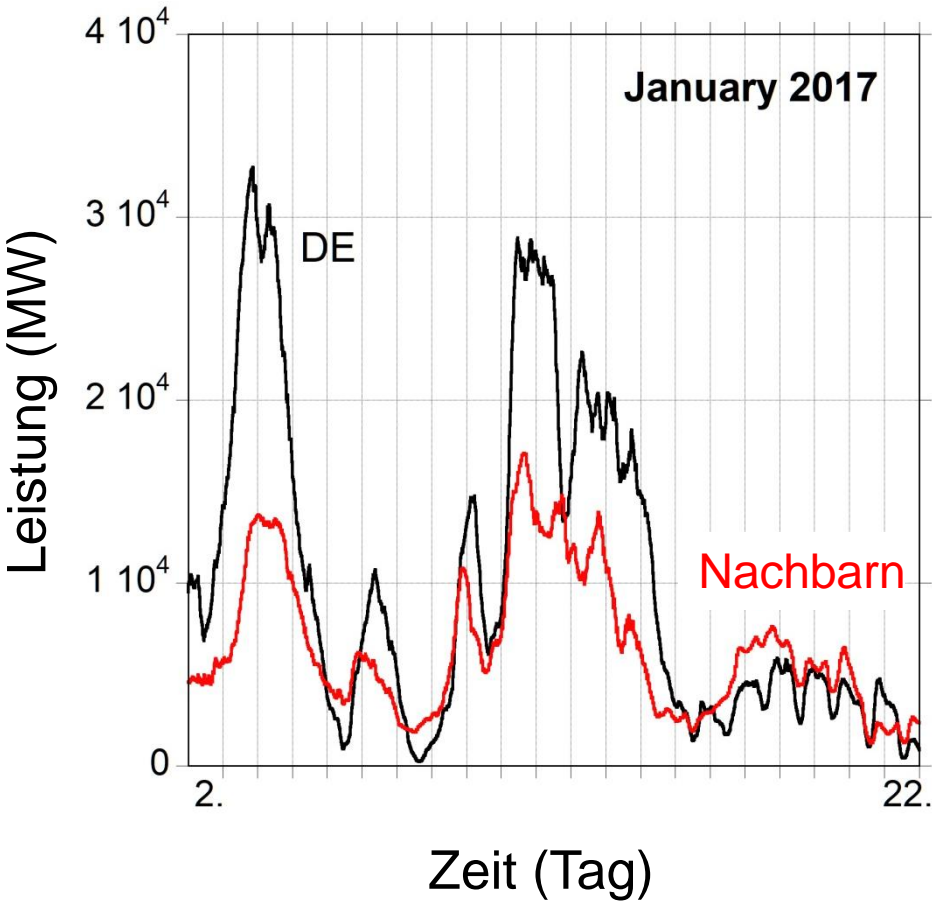
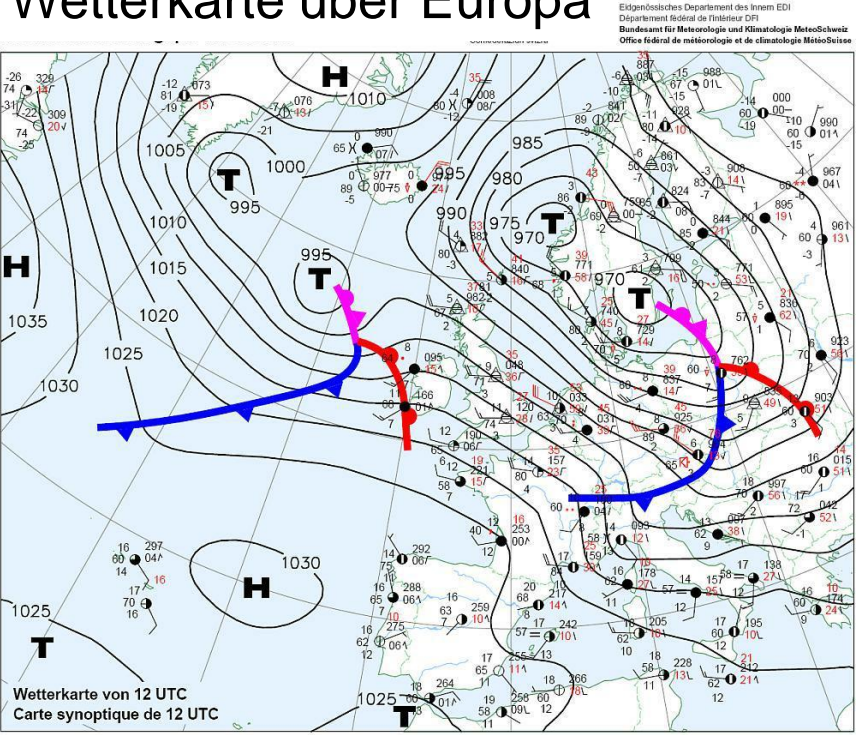
Füllung mit Kolbenverdichtern: 8 Tage/Zahl Verdichter; Verbrauch: 6,6 kWh

**Bilanz:** für 24 GWh el. Energie muss man 97 – 106 GWh aufbrauchen;  $\eta = 24\%$

Offene Fragen: Nutzung der Abwärme; zyklische Belastung des Tanks

# Können die europäischen Nachbarn helfen?

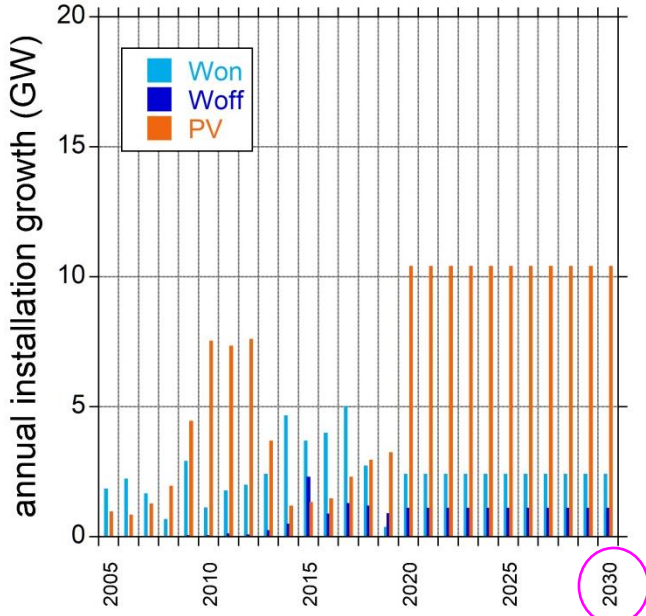
## Wetterkarte über Europa



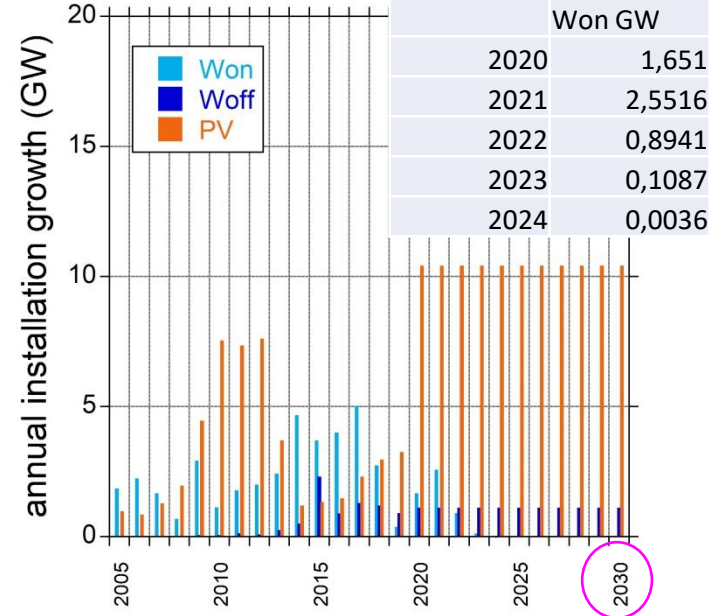
Antwort: Nein

# Jährlicher Ausbau nach 2020

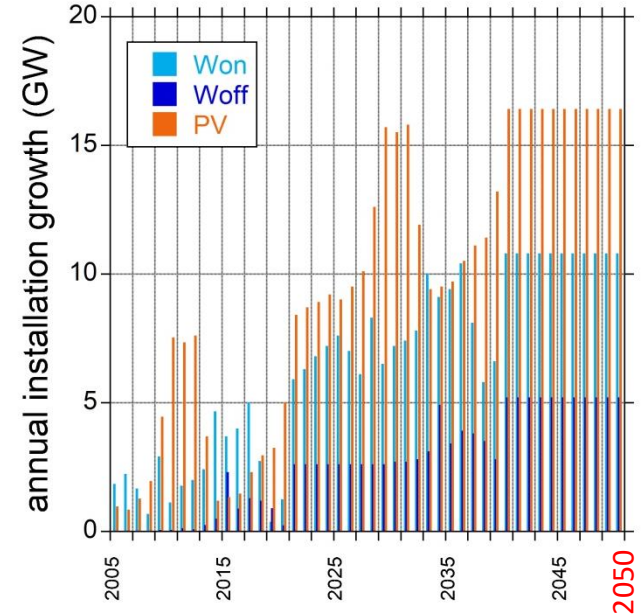
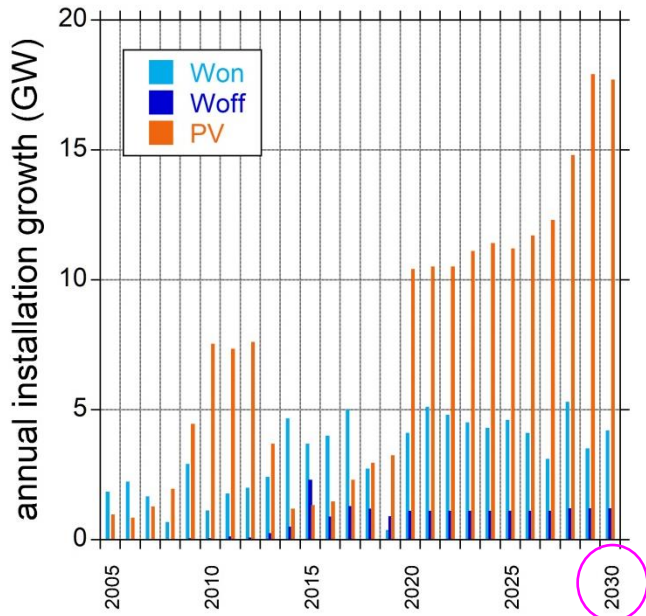
Won development according to present approval



Addition of the GW which lose EEG support



up to 2050 with renewal after 20 y



- Der Technologiewechsel muss so gestaltet werden, dass die Wirtschaftskraft Deutschlands erhalten bleibt.
- Nach meiner Einschätzung lassen sich in Deutschland etwa 900 TWh Strom mit erneuerbaren Techniken gewinnen.
- PV hat vielleicht das größte Flächenpotenzial, liefert aber nichts in der Nacht und wenig im Winter. Ich erwarte, dass die PV Einspeisung durch die hohen Leistungsgradienten beschränkt ist.
- Im Rahmen der Sektorkopplung sehe keine ausreichende Strom-Überschussproduktion für eine nennenswerte nationale Wasserstoff-Wirtschaft.
- Dezidierte saisonale Speicher nur für den Strom lohnen sich nicht.
- Ich sehe nicht, wie die Ausbauziele von Wind und PV von 2050 erreicht werden können
- Den Ausstieg aus der Kernenergie halte ich für unnötig und voreilig. Die preisgünstigste, sauberste und klimaeffizienteste Maßnahme wäre derzeit der Weiterbetrieb der bestehenden KKW's.
- Die Frage nach der Nutzung der Kernenergie kann sich aus Kostengründen Ende der Entwicklung wieder stellen.
- Die starke Importabhängigkeit bleibt bestehen; viele Fragen sind offen:  
woher, welcher Energieträger, Umwelt-Situation beim Erzeuger  
Aufbau der notwendigen Techniken beim Erzeuger ...

# Was wären meine Wünsche – die letzte Frage an die Diskussionsrunde

- Die konsequente CO<sub>2</sub> Bepreisung im europäischen Verbund mit spezifischen Strafzöllen für Importländer, die diese Maßnahmen unterlaufen wollen, flankiert von Technologie-Offenheit für die Gesellschaften, die imstande sind, mit Kernenergie verantwortlich umzugehen.
- Abschaffung des EEG als ein Mechanismus, der das Wohlstandsgefälle in Deutschland verstärkt.
- Offshore Wind im gemeinsamen europäischen Rahmen maximal ausbauen.
- Die 6 restlichen Kernkraftwerke in Deutschland weiterlaufen lassen.
- Die Forschung für die neuen KKW Konzepte (Gen IV) wieder aufnehmen, um für die nachfolgenden Generationen Entscheidungsoptionen zu schaffen.
- potenzielle Lieferländer mit besseren Voraussetzungen für die Nutzung Erneuerbarer Energien technisch und politisch ertüchtigen.
- Strompreise von vielen Abgaben befreien, so dass die vielen „smarten“ Techniken, für Effizienzverbesserung, die Energiewende, die Digitalisierung, Industrie-4.0... zur Marktreife entwickelt werden können.
- Sich bei dieser gesellschaftlich kritischen Entwicklung ehrlich machen. Das gilt für mich auch für die Forschung, deren Ziel nicht sein kann, bei den Lösungen stehen zu bleiben, die die politischen Ziele bestätigen, sondern der Politik reflektierte Optionen anzubieten. Mehr Skeptizismus tut not!
- Von den Geisteswissenschaftlern würde ich mir eine Antwort wünschen auf die Frage nach den Folgen einer großflächigen Umwidmung von Kulturlandschaft in industrielle Nutzung. Hätte Caspar David Friedrich unter diesen Umständen seine Bilder gemalt (s. letzte Seite)?

