

An aerial photograph of a vast wind farm. The landscape is hilly and covered in dense green forests. Numerous white wind turbines are scattered across the terrain, extending into the distance. The sky is a pale, hazy blue. The overall scene depicts a large-scale renewable energy installation in a natural, wooded environment.

Anmerkungen zur Windenergie

Prof. Dr. Eduard Heindl
Hochschule Furtwangen

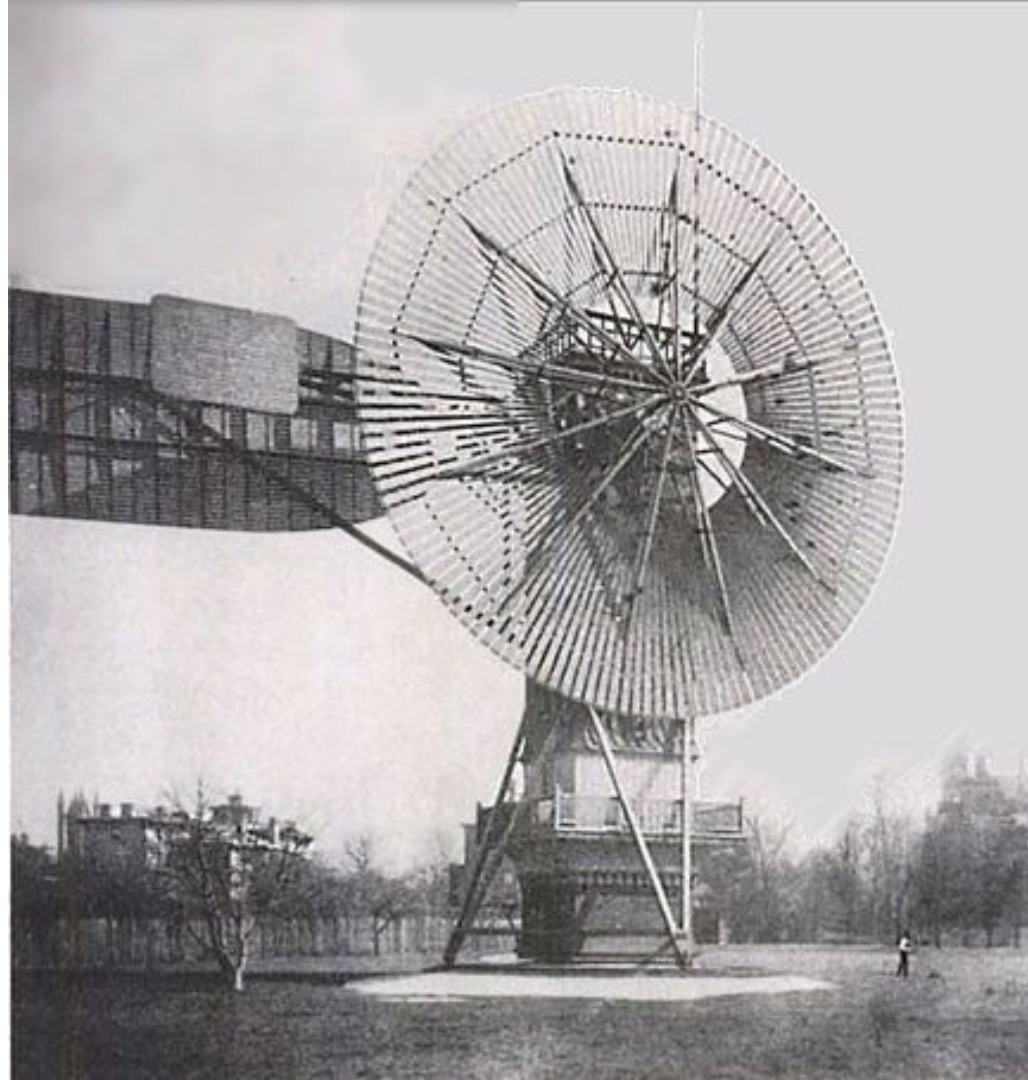
Hintergrundbild: Taunus



Ägyptisches Segelschiff 1420 vor Chr.

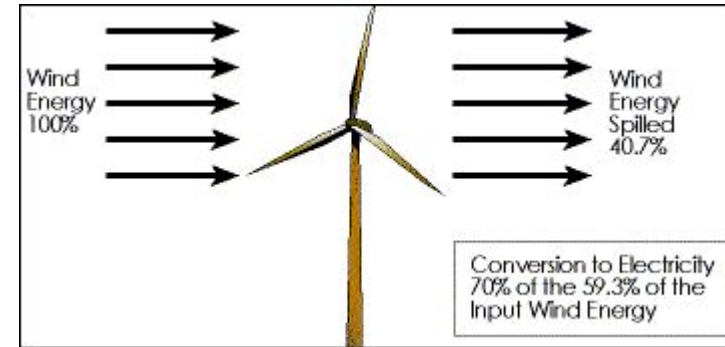
1888

Erste Windmühle für die
Stromerzeugung
in den USA



Wirkungsgrad von Windkraftwerken

- Ein Windkraftwerk entnimmt Energie durch Reduktion der Windgeschwindigkeit
- Die Energie hängt stark von der Windgeschwindigkeit ab
 - $P = \frac{1}{2} A \rho v^3$
 - A: Rotorfläche
 - ρ : Luftdichte
 - v: Windgeschwindigkeit
- Theoretisch 59 % Wirkungsgrad (Betz-Limit)
- Praktisch **40 %** Wirkungsgrad



Was bedeutet $P = \frac{1}{2} A \rho v^3$

Doppelte Windgeschwindigkeit ergibt achtfache Energiemenge!

Wenn der Wind um **25 % schneller** weht, erzeugt ein Windkraftwerk bereits die **doppelte Energiemenge** (in gleicher Zeit)

Wind Weltweit

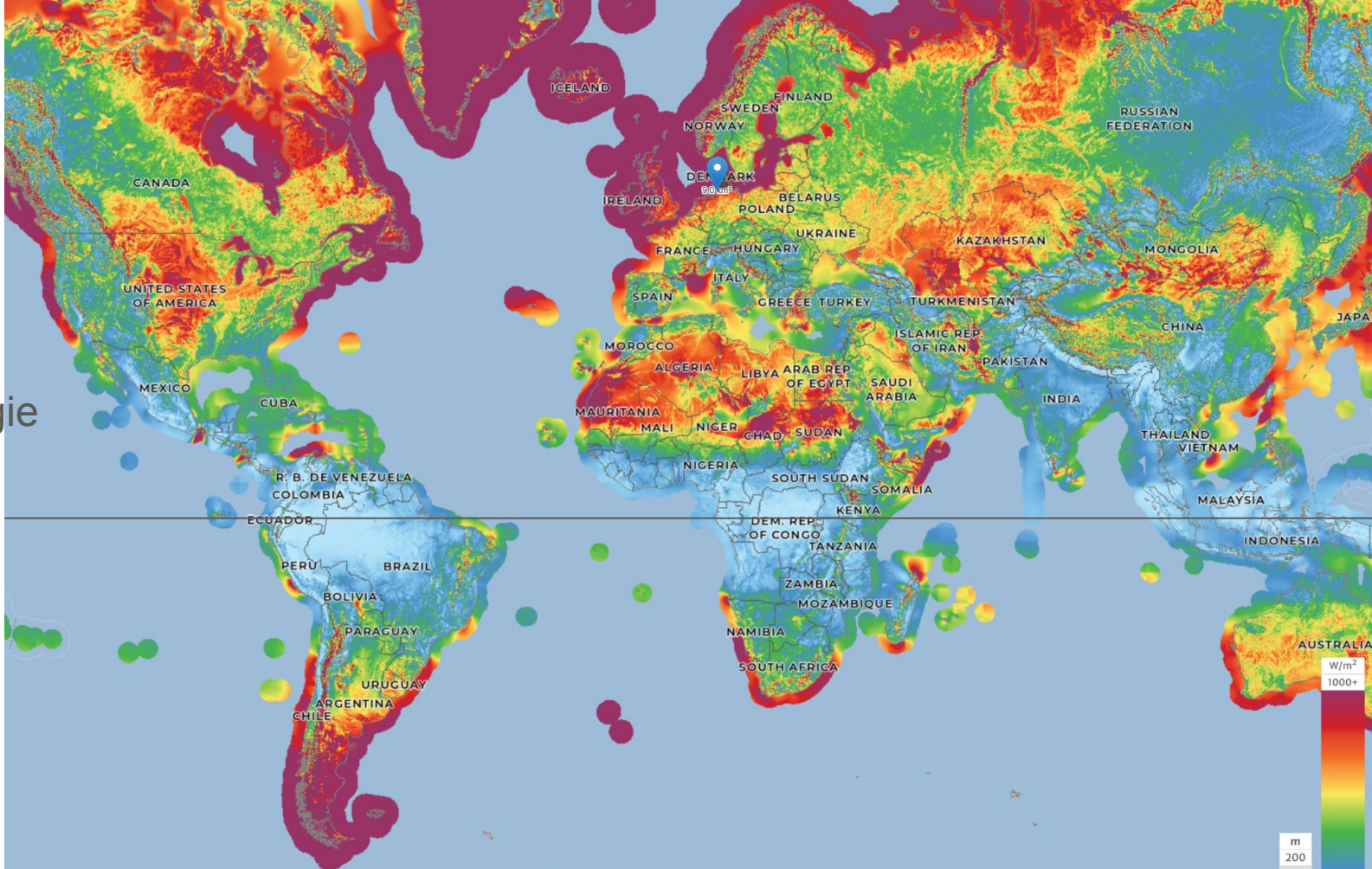
Energieskala

Viel Windenergie
im Meer

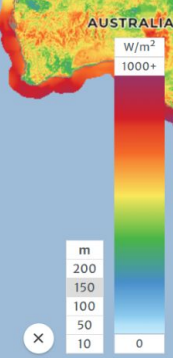
an der Küste

große Ebenen

Süden von
Südamerika



Quelle: <https://globalwindatlas.info/en>



Onshore

Windgeneratoren in der Mongolei

- **Keine Anwohner**
- **Kein Wald**
- **Sehr viel Wind**

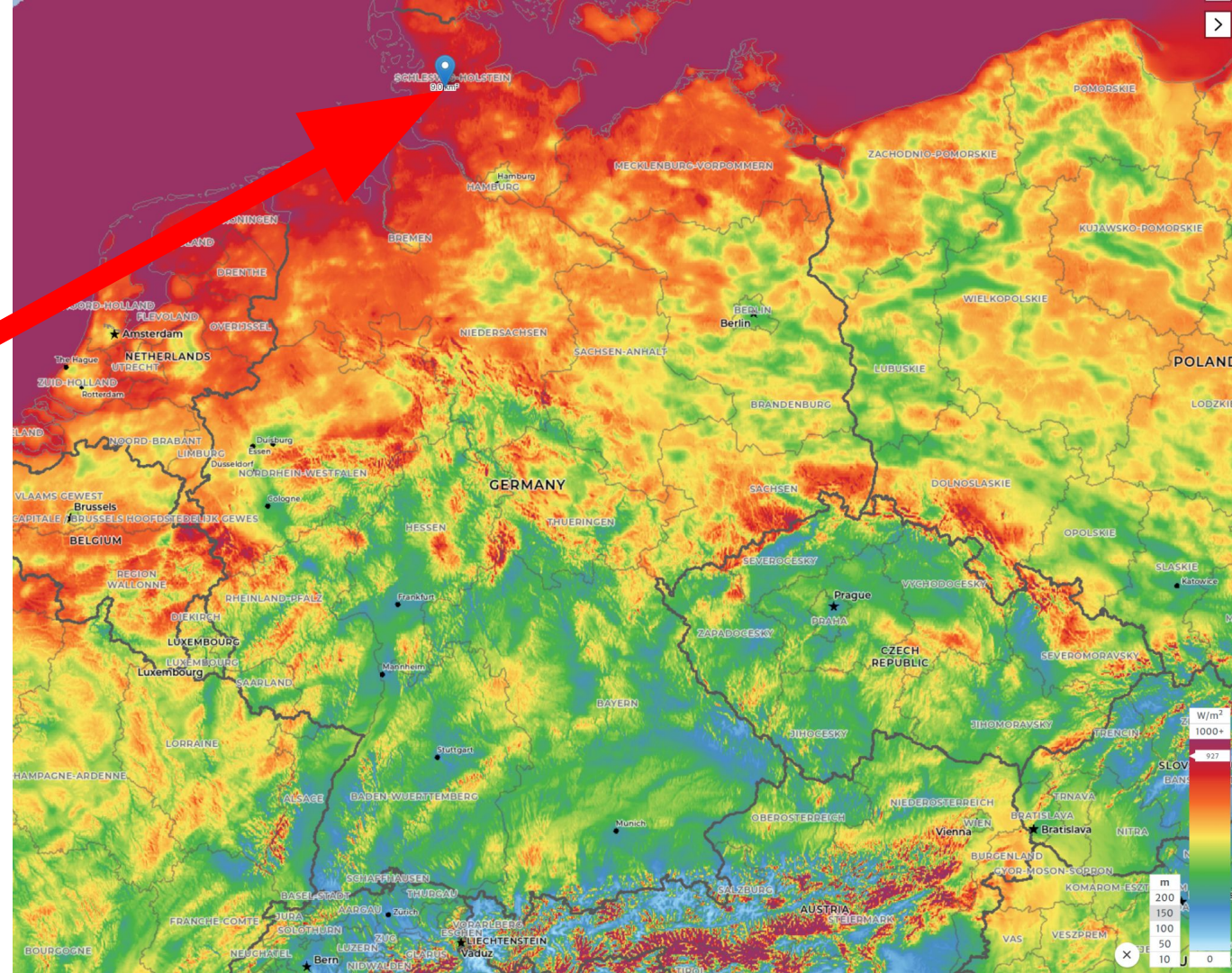


Windenergie

Energie in

150 m Höhe

Mittelwert **927** W/m²



Quelle: <https://globalwindatlas.info/en>

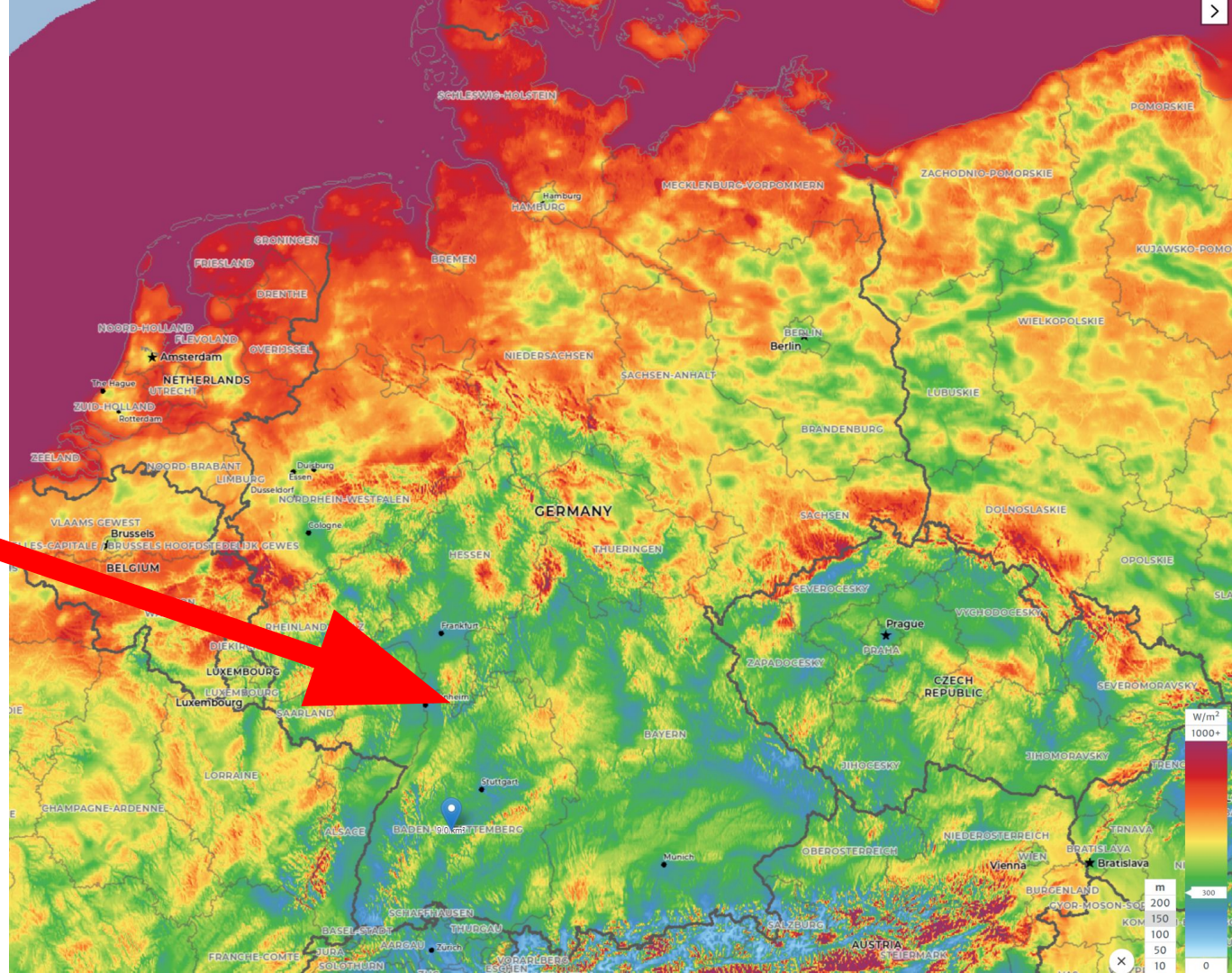
Windenergie

Energie in

150 m Höhe

Mittelwert **459** W/m²

Weißer Stein



Aufstellen einer Windkraftanlage im Schwarzwald

Riesige Kräne

Große Fläche im
Wald gerodet

Dauerhaft
geschottert für
Wartungsarbeiten

Breite
Zufahrtsstraße



Auto könnte bequem in
der Raupe parken!

Erkenntnis

- Die gleiche Anlage (Höhe 150 m) gewinnt in Schleswig-Holstein fast dreimal so viel Energie
- Folge, es müssen in Baden-Württemberg am vorgesehenen Standort dreimal so viele Rohstoffe, Stahl, Beton, Kunststoffe, Kupfer usw. verbraucht werden, um die gleiche Energiemenge im Jahr zu gewinnen
- Es wird damit dreimal so viel CO₂ emittiert, wie wenn ein guter Standort gewählt würde
- Wer will das?

Leben im Robert Habeckland (Schleswig-Holstein)



Der Lärm: Neue Simulationen (90 m Turmhöhe)

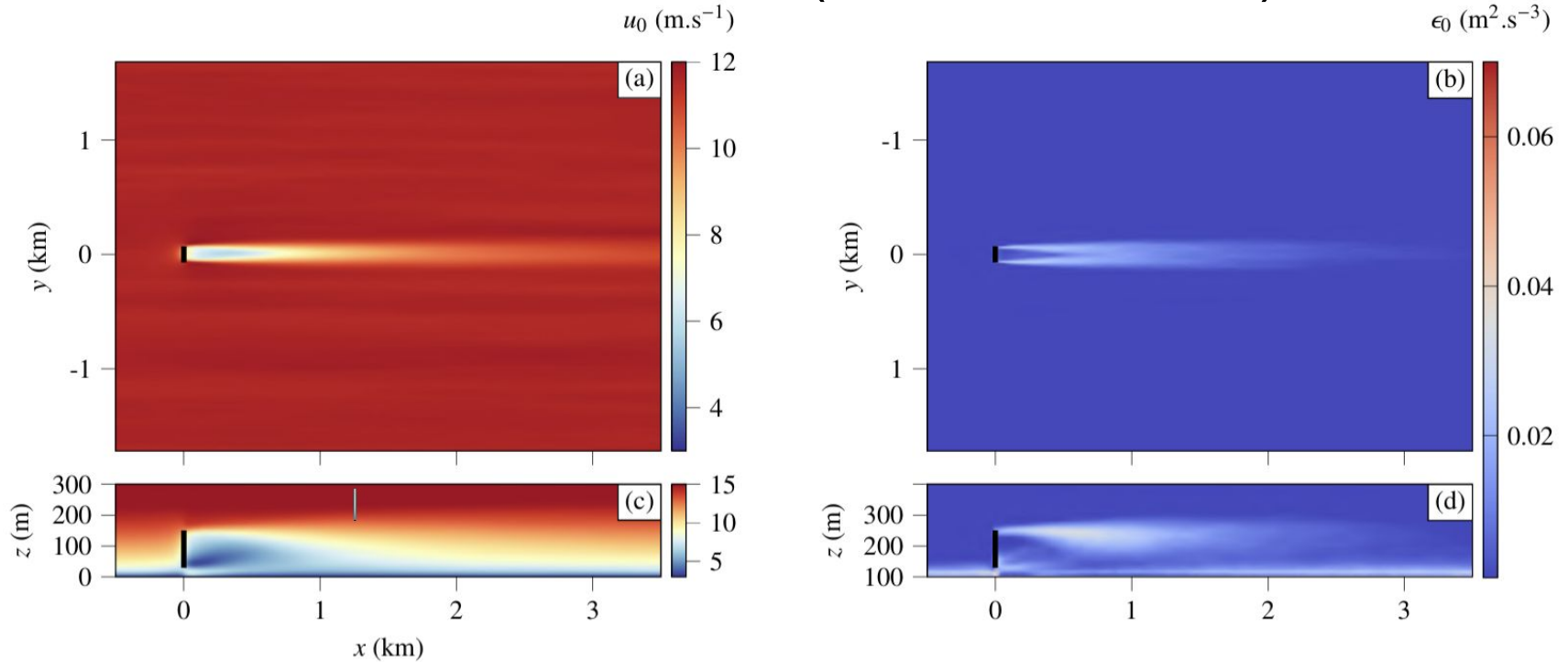


Figure 2: Flow fields for the single turbine layout. (a) and (c) streamwise wind speed u_0 , (b) and (d) turbulence dissipation rate ϵ_0 for planes at (a) and (b) $z = 90$ m (hub height) and at (c) and (d) $y = 0$. The rotor position is shown with black lines.

Windturbine als Linse

Der Schall breitet sich nicht einfach aus, er wird durch Strömungseffekte gebündelt.

Oft viele Kilometer hinter dem Windrad große Lautstärke!

Beispiel: 90 m hoher Turm, Fokus nach 4 km, dort maximale Lautstärke am Boden

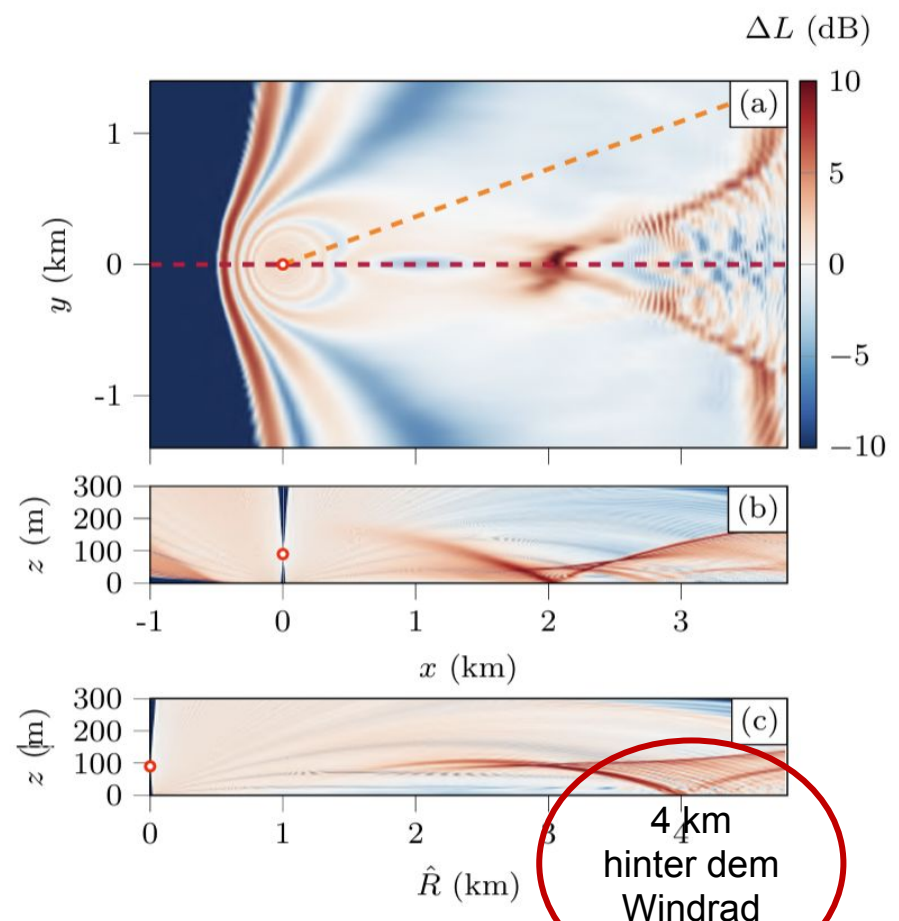
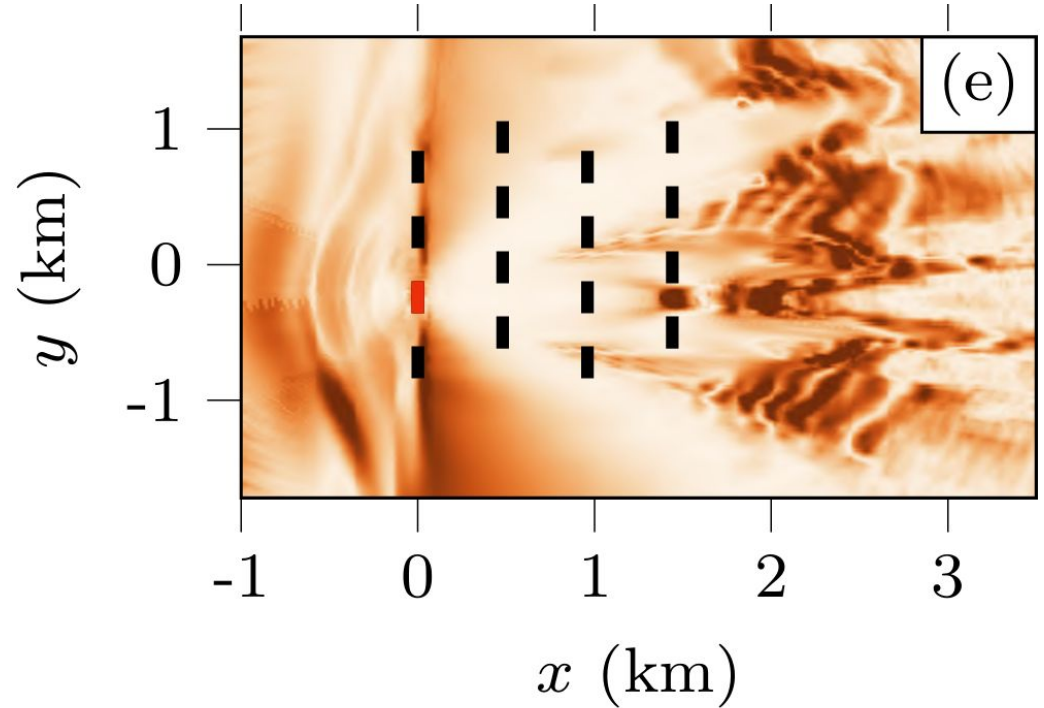


Figure 7: ΔL at $f_c = 1$ kHz for a source located at hub height of the wind turbine (red dot) for an isolated turbine in the plane (a) $z = 2$ m, (b) $y = 0$ m (dashed purple line), and (c) $\tau = 20^\circ$ (dashed orange line). \hat{R} is the radial distance from the turbine.

Bei mehreren Turbinen kann sich das Aufschaukeln

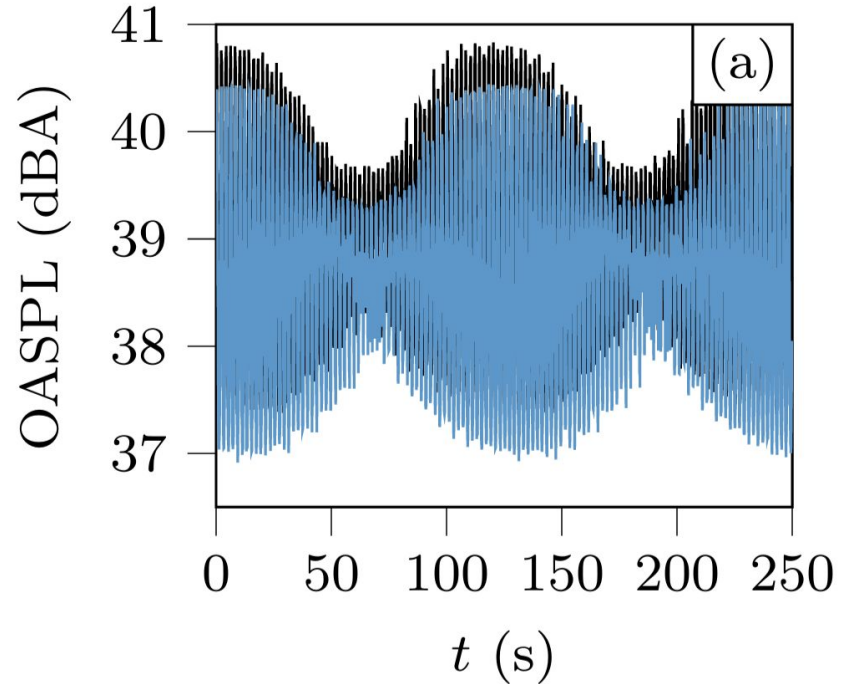
Je nach Windrichtung
entstehen komplexe Muster
mit starkem Schall.

Hier wurden noch keine Berge
oder Windböen berücksichtigt.



Es ist nicht nur lauter, es wummert auch.

Die Lautstärke verändert sich im Abstand von Minuten, was als sehr unangenehm empfunden wird.



Folgerung zum Lärm

- Die Geräusche hinter Windkraftanlagen sind komplex
- Auch in großen Entfernungen kann es sehr laut werden
- Die Geräusche werden moduliert und es wummert.
- **All das ist bisher nicht berücksichtigt worden!**



Neckarwestheim 2023 stillgelegt



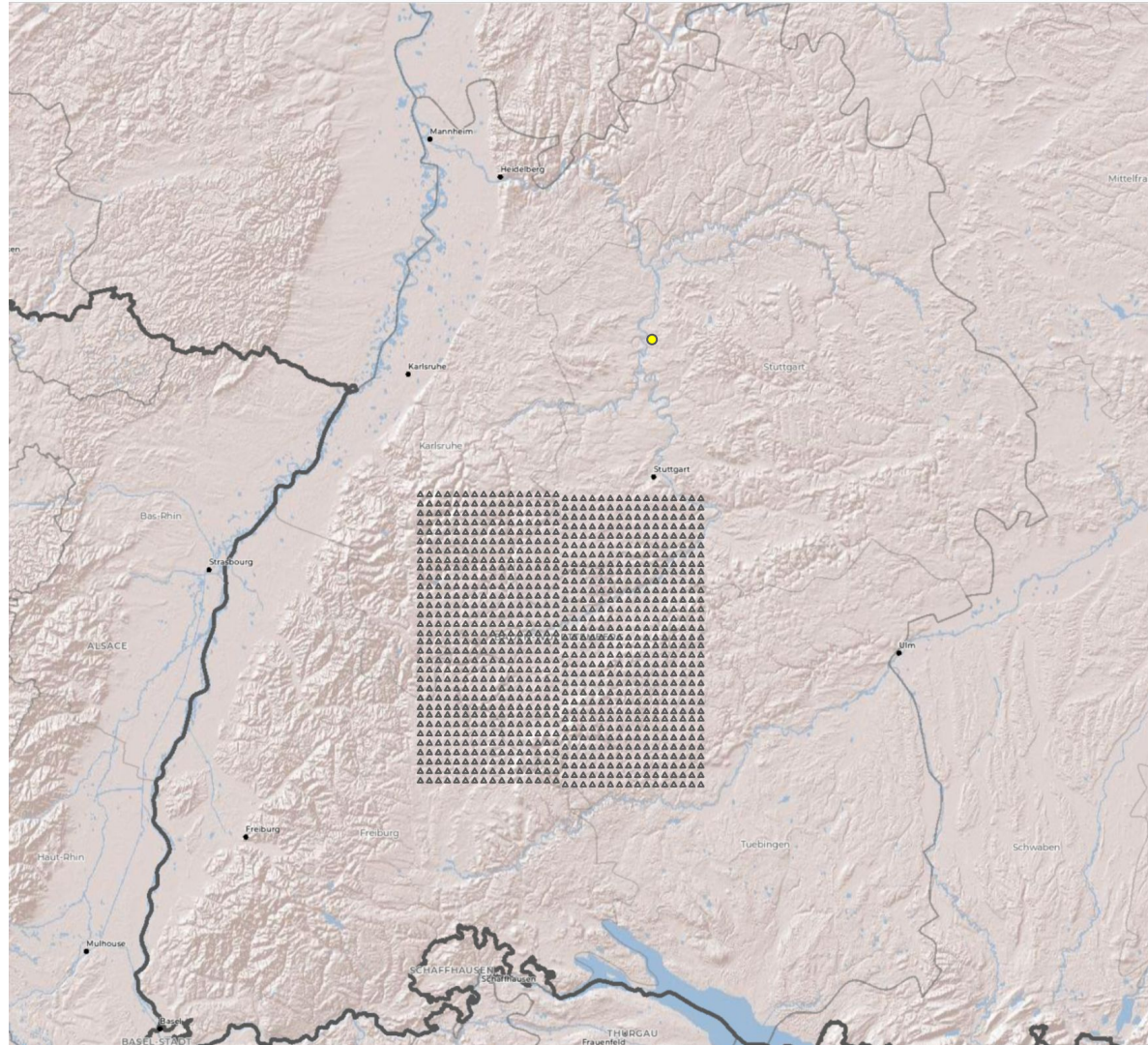
Visualisierung

Etwa 1.200 Windkraftanlagen
alle 2 km aufgestellt, um das
Kernkraftwerk Neckarwestheim
zu ersetzen

Nicht berücksichtigt:
Speicherverluste.

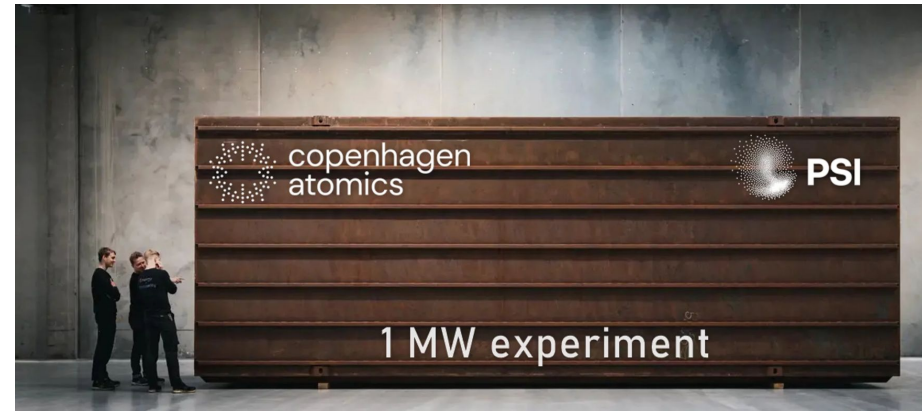
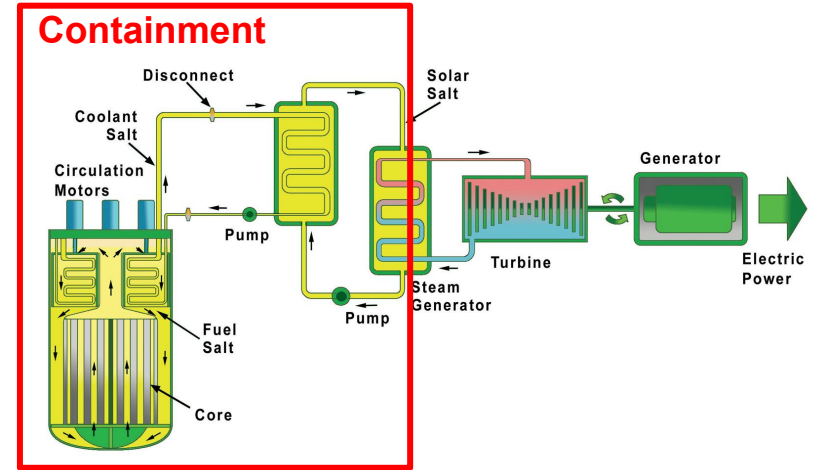
Fläche: $60 \times 80 \text{ km}^2$

Hat Ihnen das keiner gesagt?

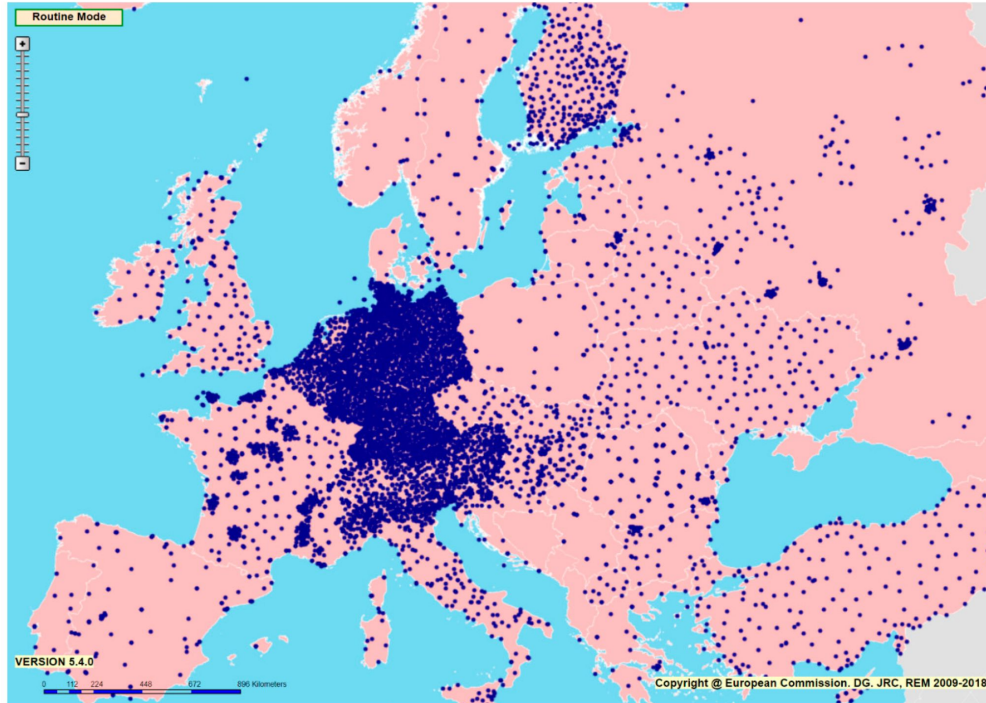


SMR mit geschmolzenem Thoriumsalz

- **Keine Kernschmelze** bei Molten-Salt-Reaktoren (4. Generation) da Abschaltung durch Wärmeausdehnung zusätzlich Schmelzsicherung
- **Keine Feuergefahr**, da Salz nicht brennt
- **Keine Explosion** möglich, da kein Druck
- **Keinen langlebigen Abfall**, Molten-Salt-Reaktoren nutzen das Thorium vollständig und erzeugen kein Plutonium (verbrennt Plutonium!)
- Experiment am PSI in der Schweiz



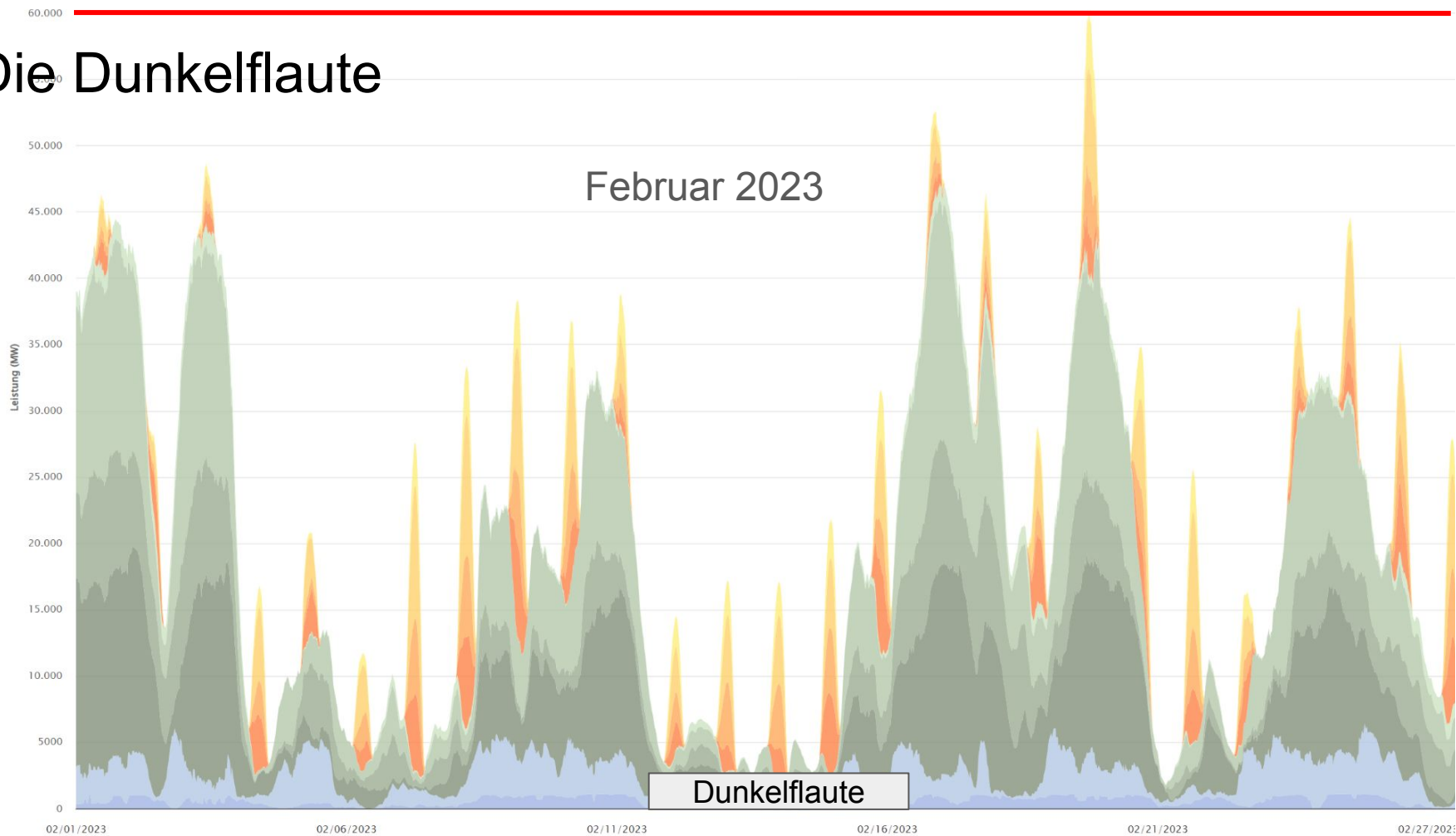
German Angst



EURDEP map of European radioactivity monitoring stations.
Source: <http://eurdepweb.jrc.ec.europa.eu/EurdepMap/Default.aspx>

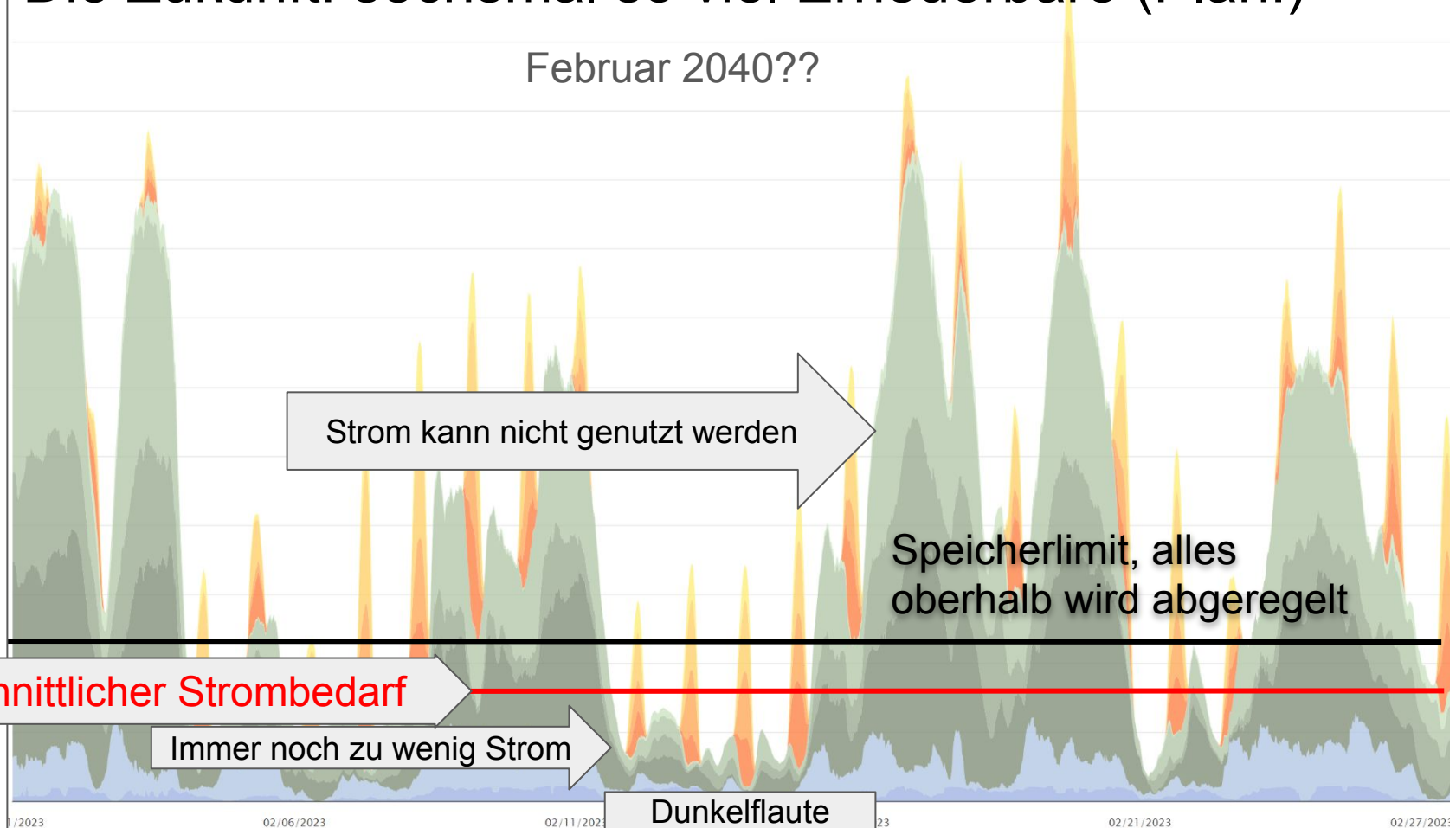
durchschnittlicher Strombedarf

Die Dunkelflaute



Die Zukunft: sechsmal so viel Erneuerbare (Plan!)

Februar 2040??



Strom kann nicht genutzt werden

Speicherlimit, alles oberhalb wird abgeregelt

durchschnittlicher Strombedarf

Immer noch zu wenig Strom

Dunkelflaute

1/2023

02/06/2023

02/11/2023

23

02/21/2023

02/27/2023

Häufigkeit von Dunkelflauten

Zeitraum: 2016–2021
Ausbau wie für 2045 geplant
Längste Flaute: 268 Stunden
über 100 Mal mehr als 24 h

Quelle: Markus J. Löffler, Energiewende und Versorgungssicherheit, vgb energy journal 9 2024

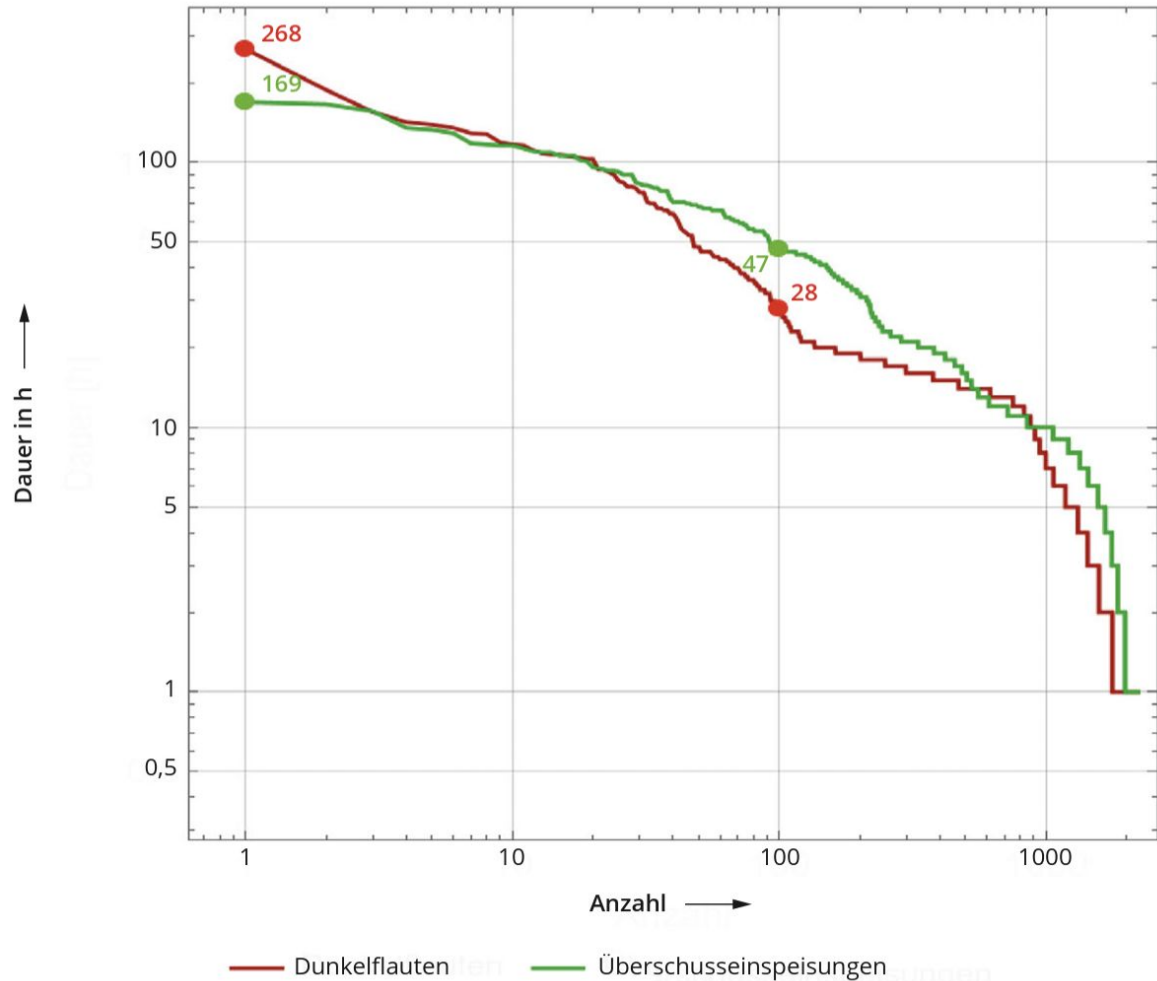


Bild 7. Für die fiktiven Jahre 2016 bis 2021 angefallene Dauern von Dunkelflauten und von Überschusseinspeisungen.

Was bedeutet das für Windkraft?

Wenn kein Wind weht:

Strom ist teuer, da er aus Speichern kommt.

Kaum Einnahmen für Windkraftwerke

Wenn Wind weht:

Nur ein kleiner Teil kann genutzt werden und der Strompreis liegt nahe bei Null

Keine Einnahmen für Windkraftwerke

Folgerung: Enorme Subventionen ohne sinnvolle Wirkung für das Stromnetz

Die Nebenkosten!

Komponenten der Windenergie-Integration



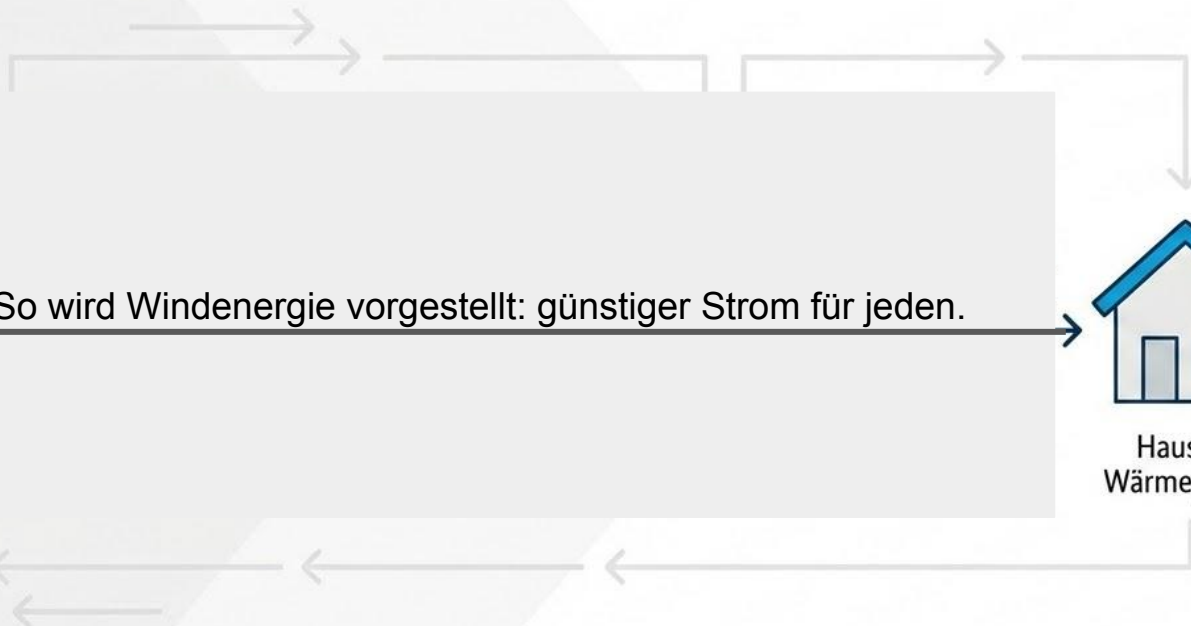
Windkraftwerk

12 ct/kWh
(in Süddeutschland)

So wird Windenergie vorgestellt: günstiger Strom für jeden.

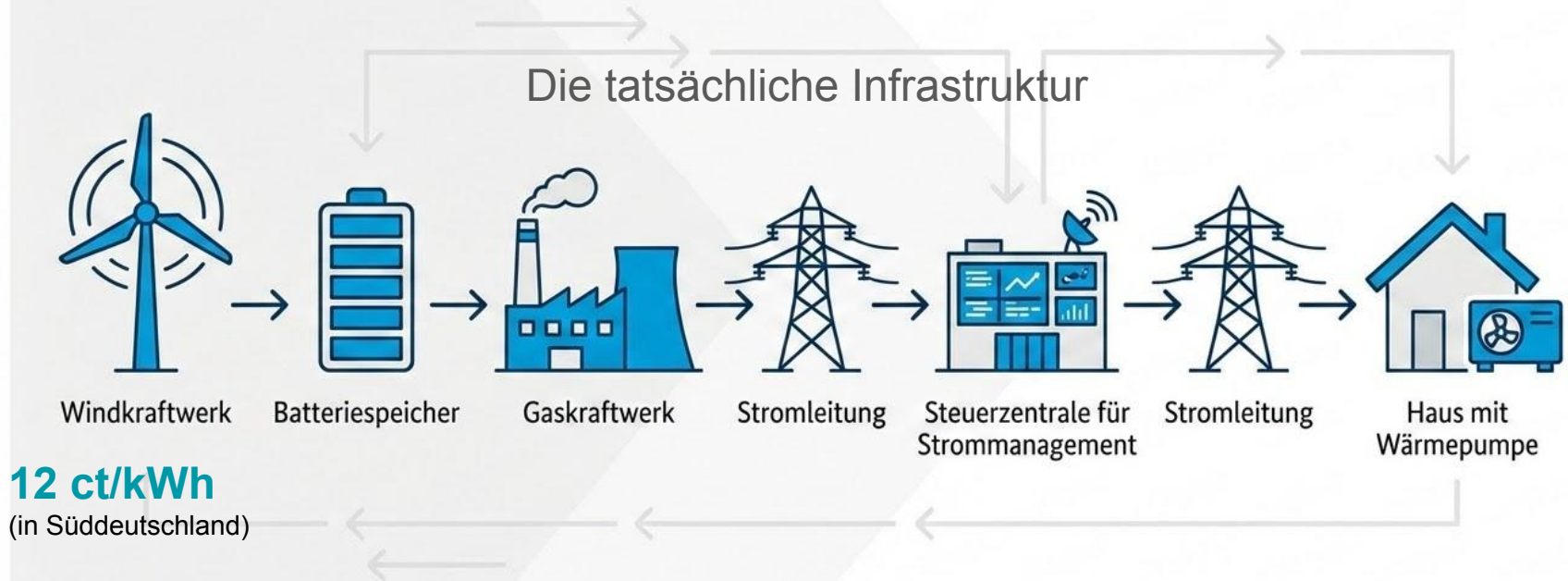


Haus mit
Wärmepumpe



Die Nebenkosten!

Komponenten der Windenergie-Integration



Die Nebenkosten!

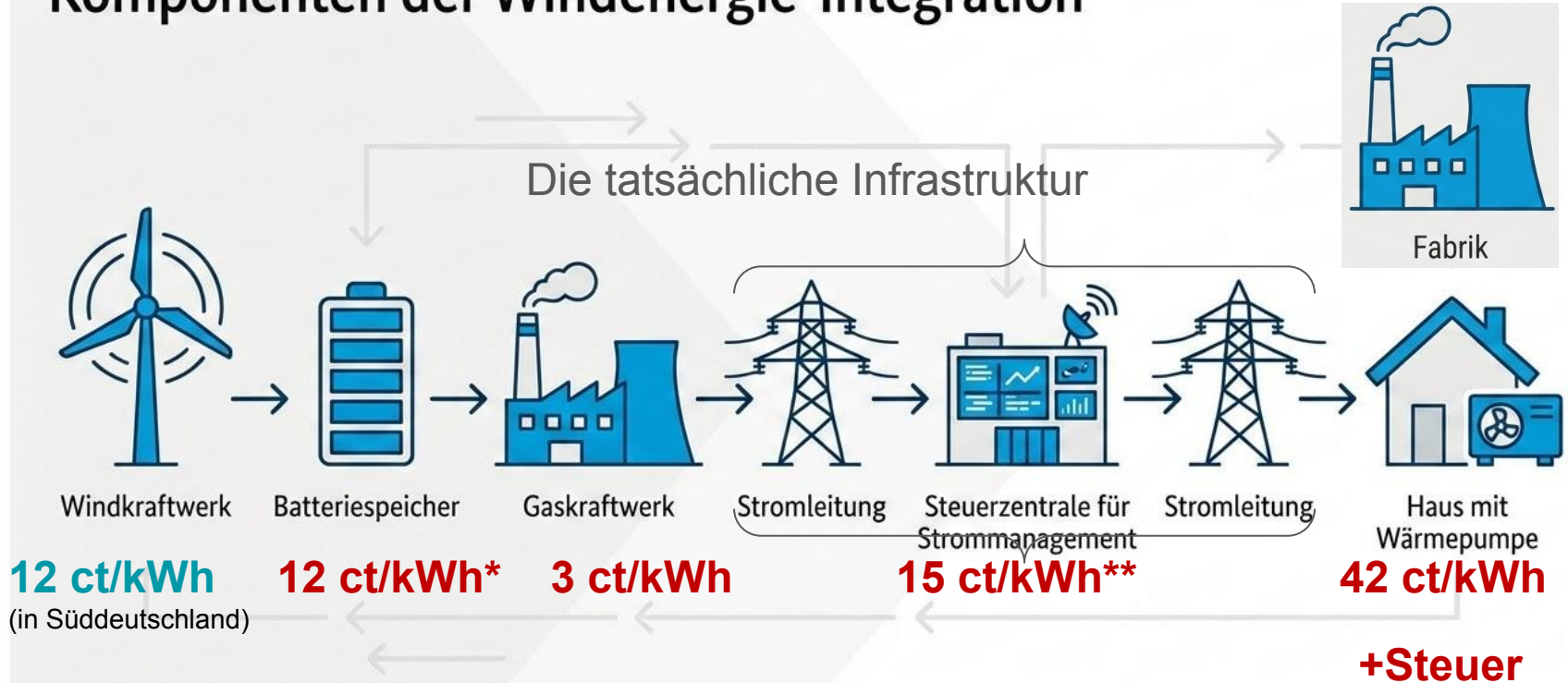
Komponenten der Windenergie-Integration



Die Nebenkosten!

Nicht vergessen:
Stromkosten für
die Industrie

Komponenten der Windenergie-Integration



Quellen: Prof. Dr. Manuel Frondel RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung, Ruhr-Universität Bochum (RUB),

*Annahme 200€/kWh, **Netzentwicklungsplan (NEP 2037/2045)

Die wahre Kosten von Energiequellen

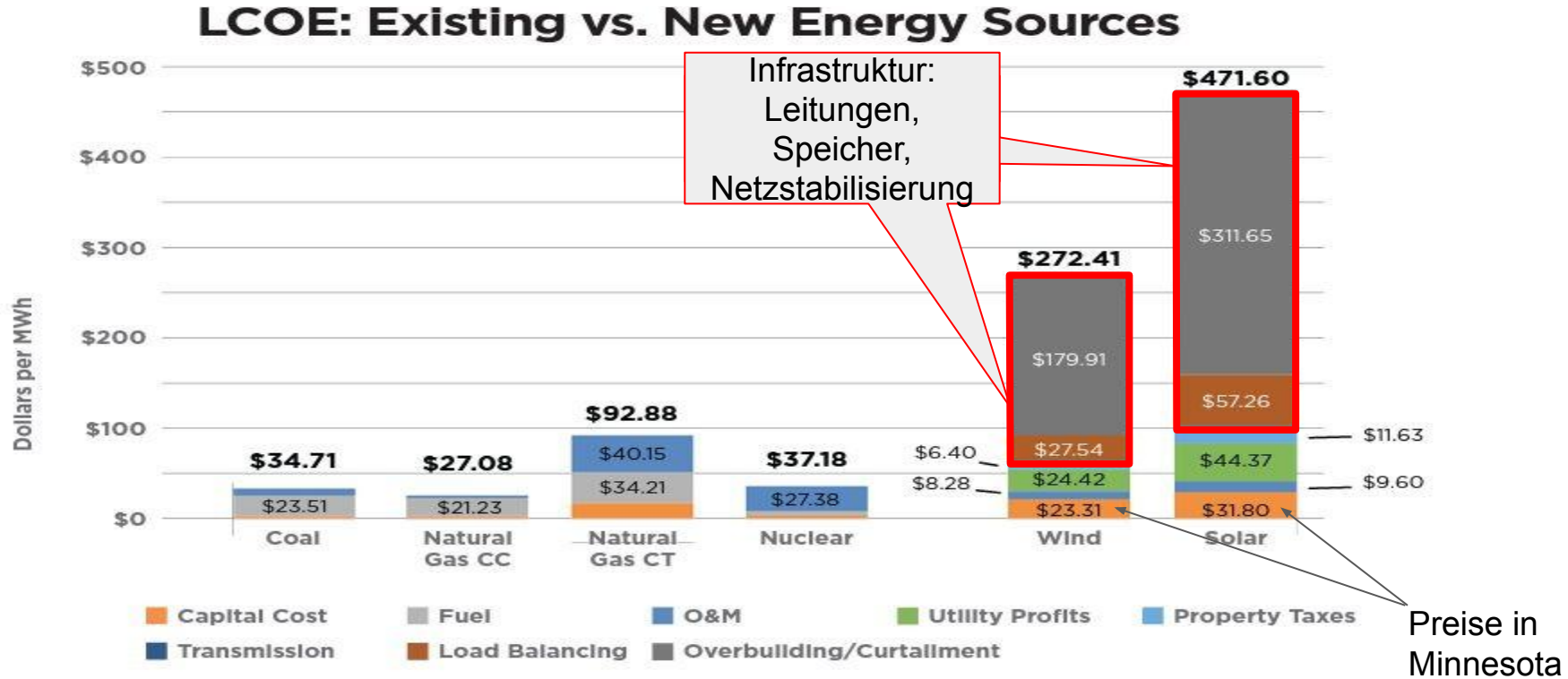


Figure 16. New solar facilities are the most expensive form of new electricity generation built under the Walz Proposal. Once costs such as property taxes, transmission, utility returns, battery storage, and overbuilding are included, the High Cost of 100 new wind costs \$272 per MWh, and new solar costs \$472 per MWh.

Quelle: Isaac Orr, Mitch Rolling, John Phelan, The High Cost of 100 Percent Carbon-Free Electricity by 2040, AmericanExperiment.org

Mit einfachen Worten:

Wenn bei uns Strom teuer ist, wird billiger Strom aus französischen Kernkraftwerken gekauft!

Aktuell laufen ca. 2 KKW kontinuierlich für Deutschland.

Persönliche Erfahrung

Ich hatte mich 1992 mit 30.000 DM an einem Windkraftwerk in optimaler Lage in der Eifel beteiligt.

“Rendite” über alle Jahre: 1700 DM

Grund:

- Die Windgeschwindigkeiten wurden zu optimistisch gerechnet
- Die Einnahmen für Windenergie sind pro kWh sind nie gewachsen

Lehrgeld: 28.300 DM

Die Anlage ist inzwischen abgerissen und wurde nicht “repowered”

Reicht der Wind?

Wind ist nicht unendlich!

Baden-Württemberg hat eine Fläche von 35.751 Quadratkilometern

Annahme: eine Luftschicht von 1 km Dicke wird genutzt. Die Schicht bewegt sich mit 6 m/s
1 m³ Luft wiegt 1,2 kg (10 °C).

Die Energie der Luft = $\frac{1}{2} m \times v^2 = \frac{1}{2} \times 1,2 \text{ kg/m}^3 \times 35.751.000.000 \text{ m}^2 \times 1.000 \text{ m} \times (6 \text{ m/s})$

Energie = 215 GWh

Länge 190 km, wird bei der Windgeschwindigkeit in 9 Stunden zurückgelegt.

Damit hat die Energie über BW nur ein Leistungspotenzial von 24 GW. Wirkungsgrad der Windkraft 40 %:

theoretisches Limit: 10 GW Windenergie in BW

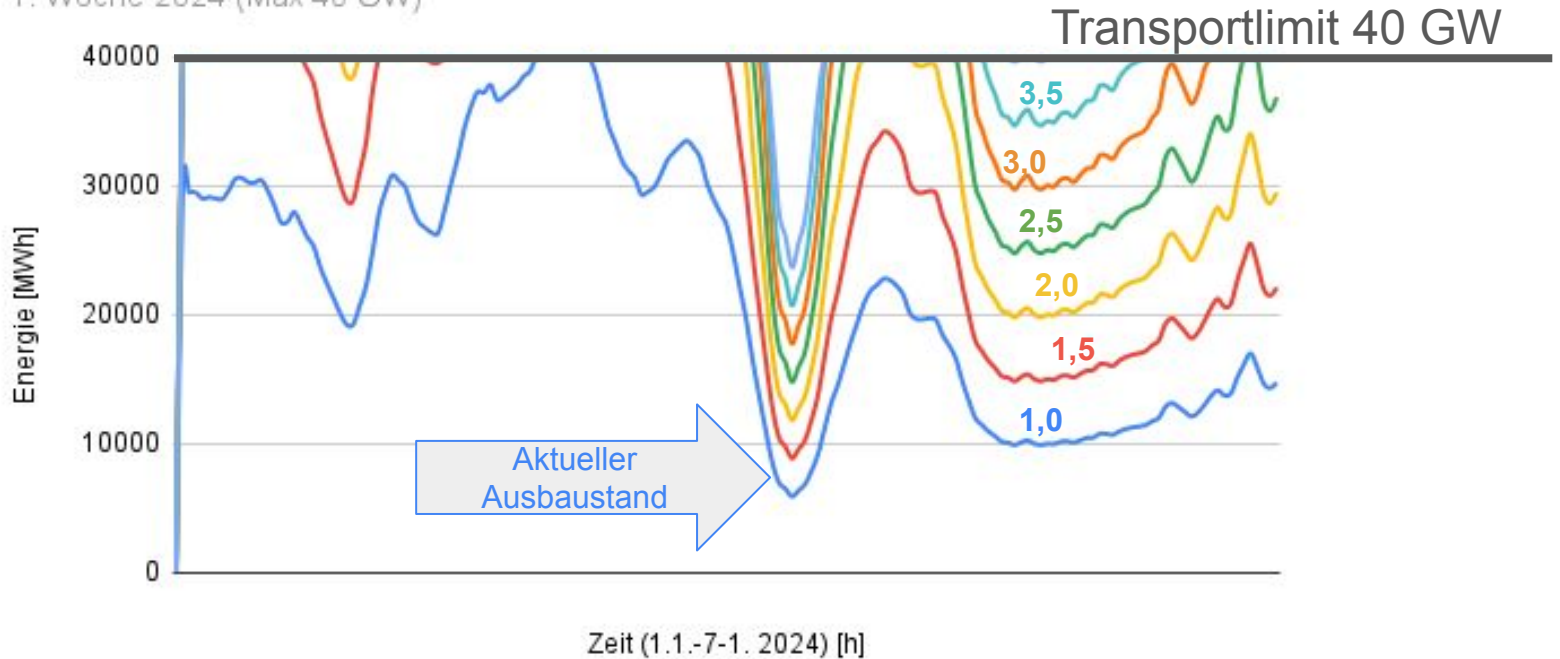
Aktuell verbraucht Baden-Württemberg

praktischer Bedarf: 42 GW Primärenergie (Industrie, Heizen, Auto etc.)

Ausbau Wind an Land

Windenergie Onshore

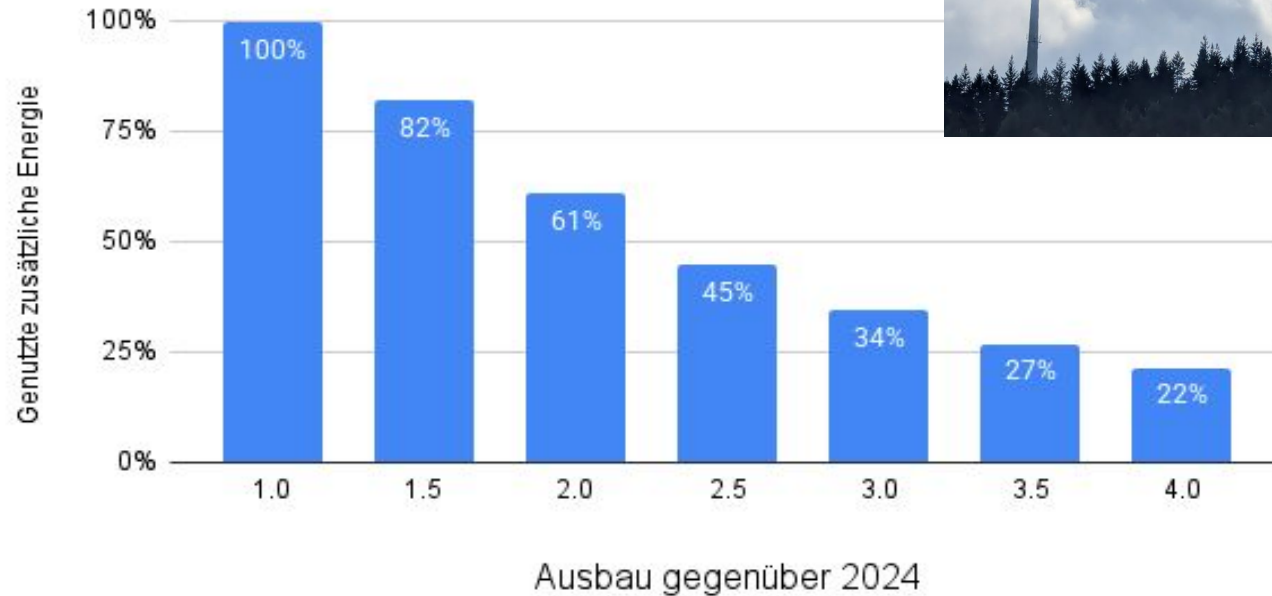
1. Woche 2024 (Max 40 GW)



Zusätzlich nutzbare Energie sinkt stark.

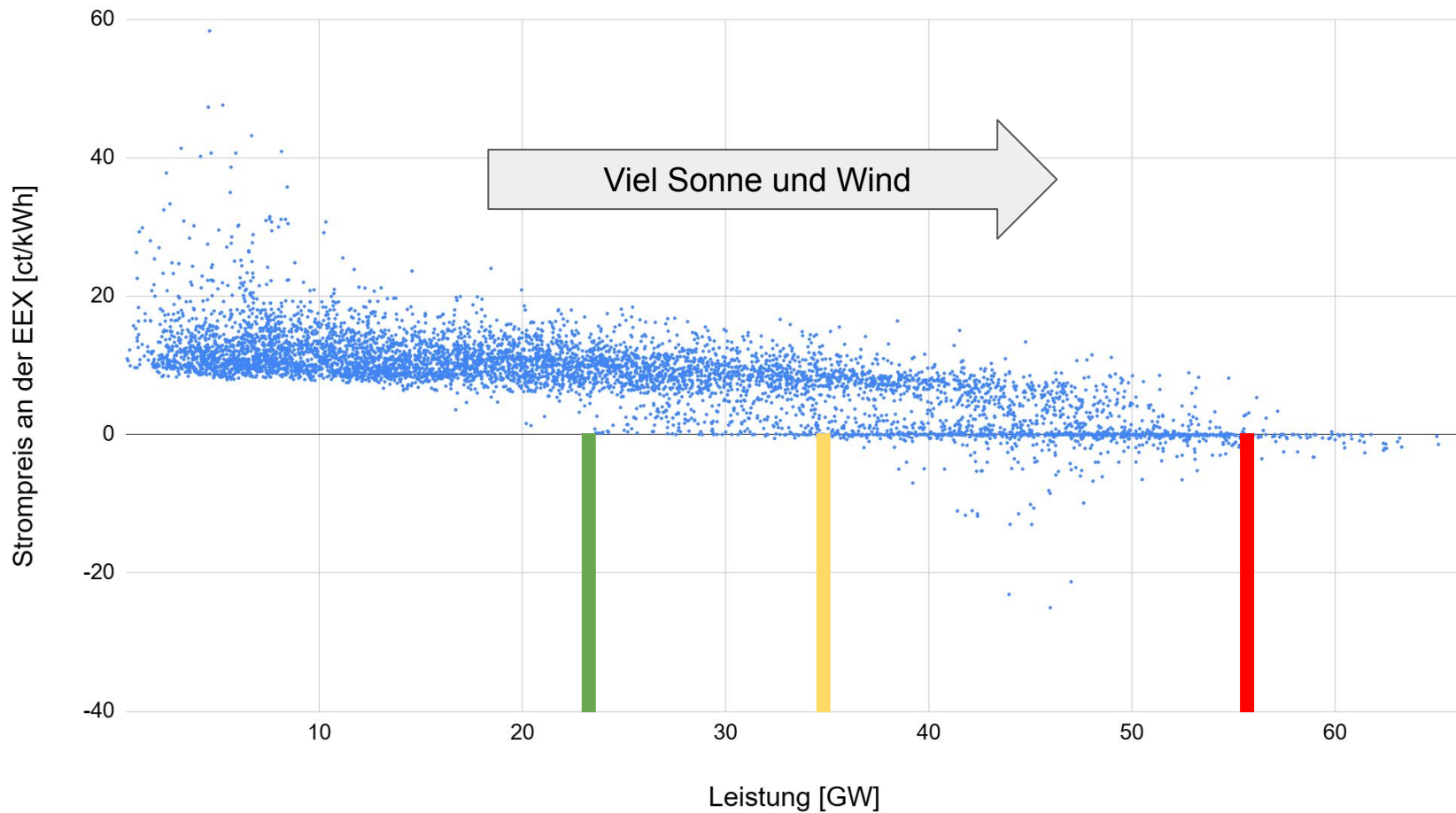
Zubau onshore Wind

Nutzbare zusätzliche Energie (max. 40 GW)



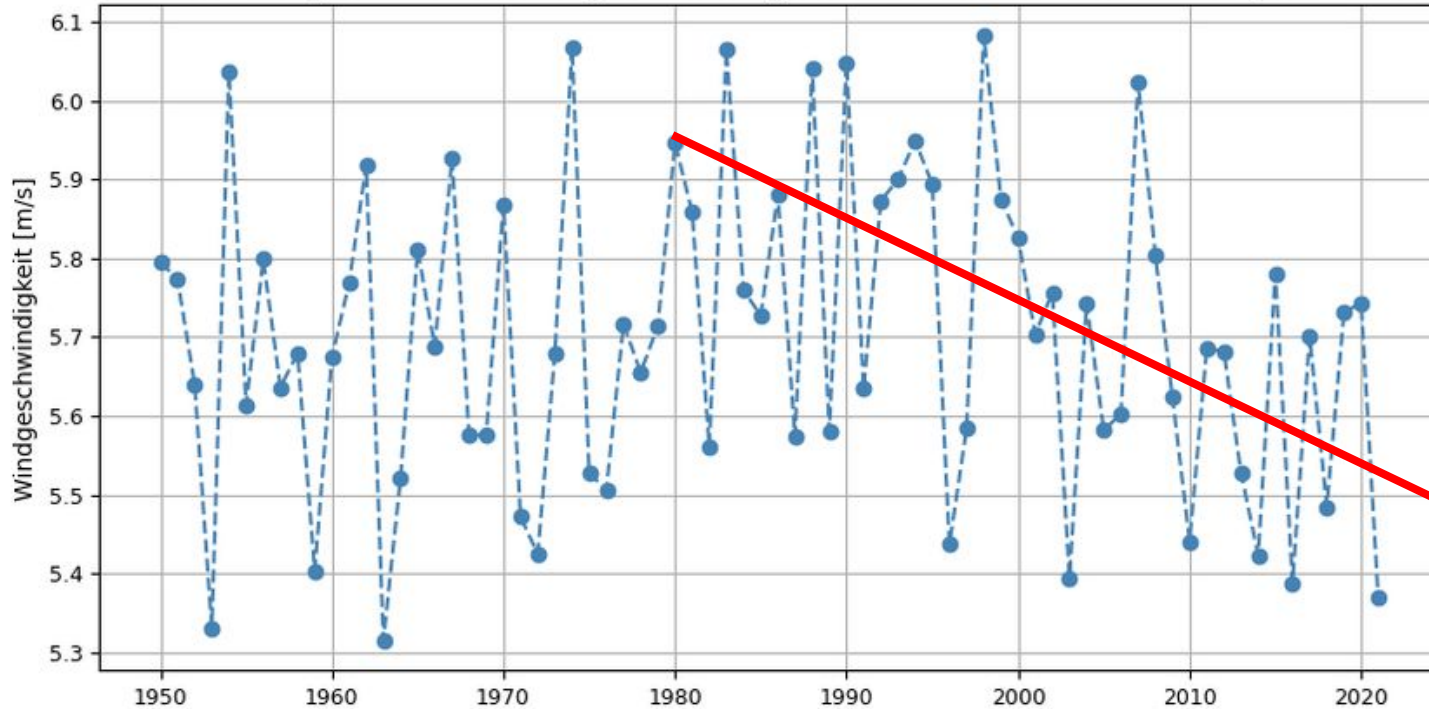
Strompreise abhängig von der Produktion Erneuerbarer (Wind, Sonne)

Zeitraum: 1.1.–30.9. 2025



Wind in der Zukunft

Zeitreihe der gemittelten Windgeschwindigkeit in 100m in Deutschland (1950-2021)

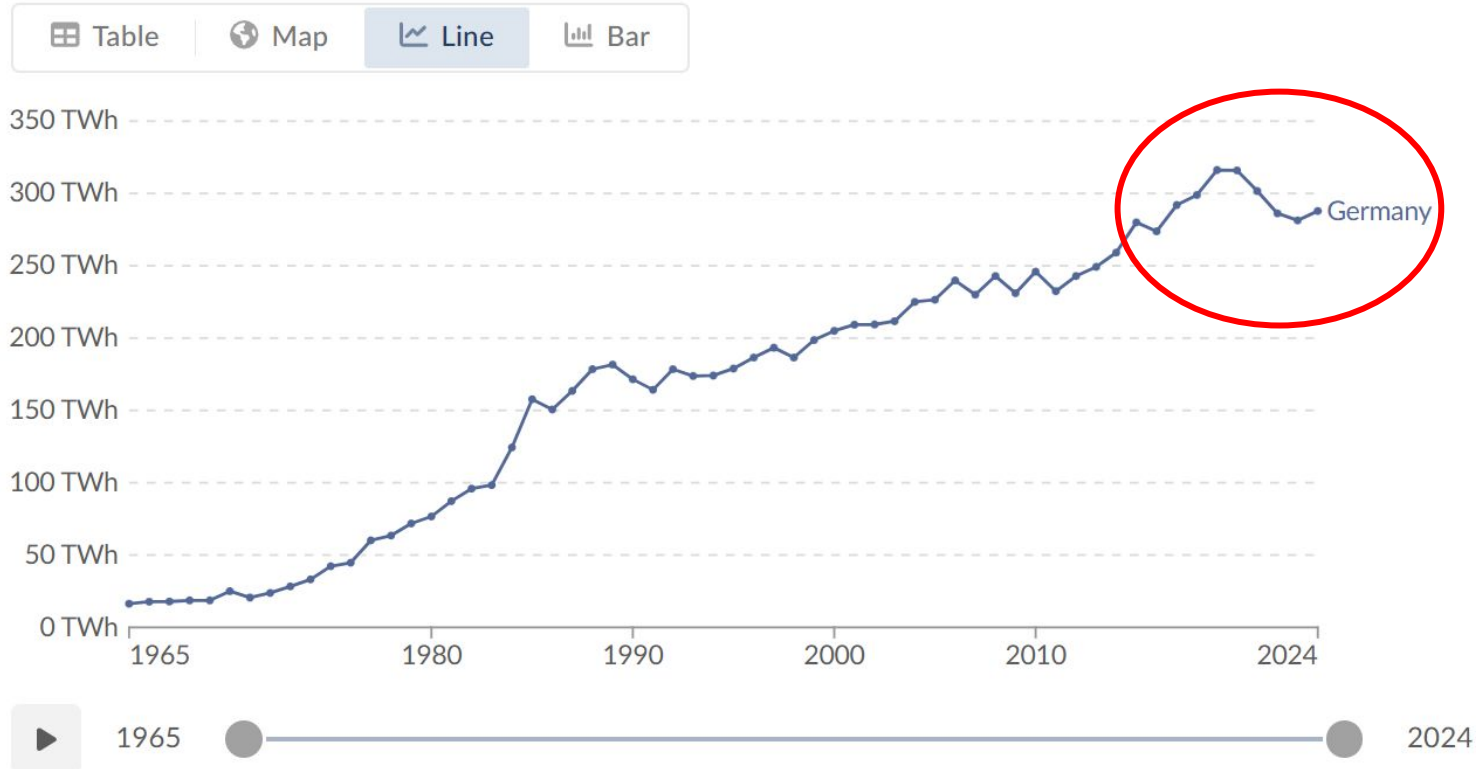


40 Jahre Trend:
Weniger Wind

Zeitreihe der gemittelten Windgeschwindigkeit in 100 Meter Höhe in Deutschland in m/s im Zeitraum von 1950 bis 2021. (Auswertung des Deutschen Wetterdienstes auf Basis der globalen Reanalysen ERA5 und ERA5-BE des Copernicus Klimawandeldienstes (C3S), Hersbach et al., 2020; Ball et al., 2021).

Electricity generation from low-carbon sources

Deutschland hatte in den vergangenen Jahren fast keinen Zuwachs der CO₂-freien Stromerzeugung.



Data source: Ember (2026); Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2025) - [Learn](#)

Lösungsvorschlag



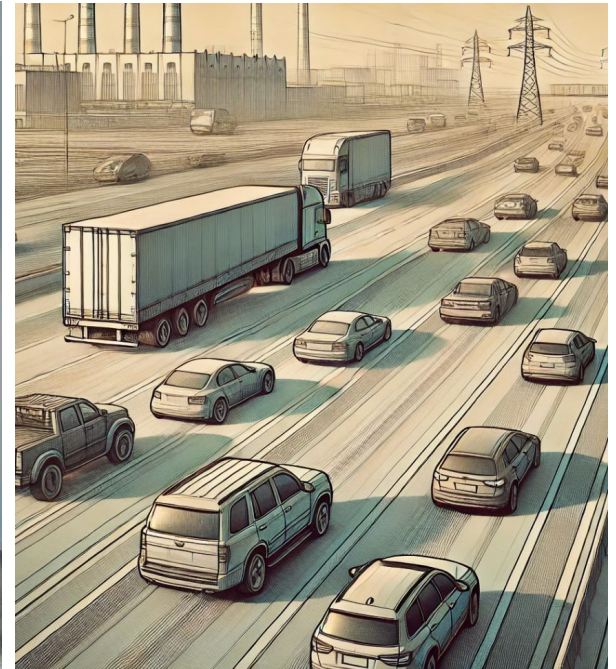
Die Welt 2019 basiert auf fossile Rohstoffe



Kohlekraftwerk

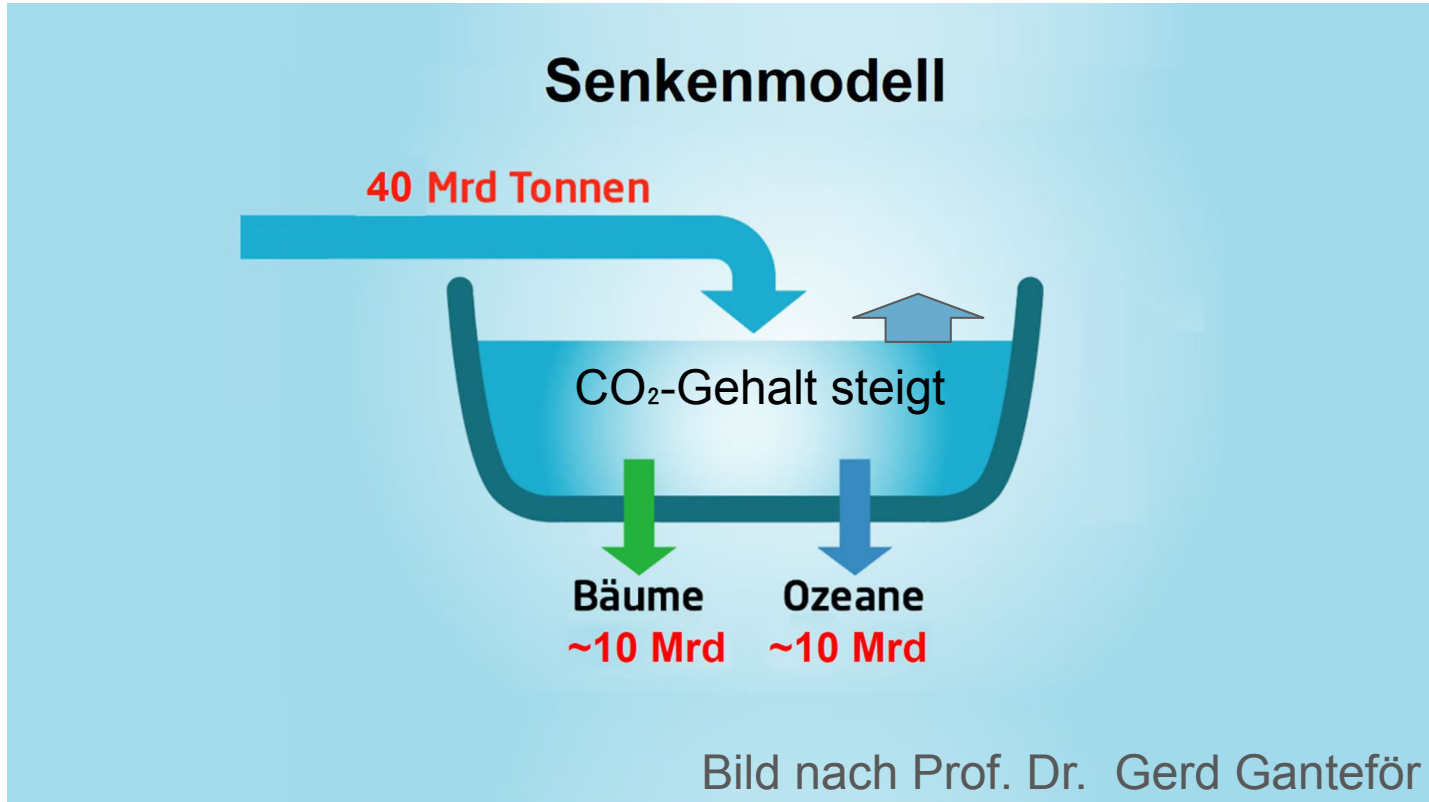


Gaskraftwerk

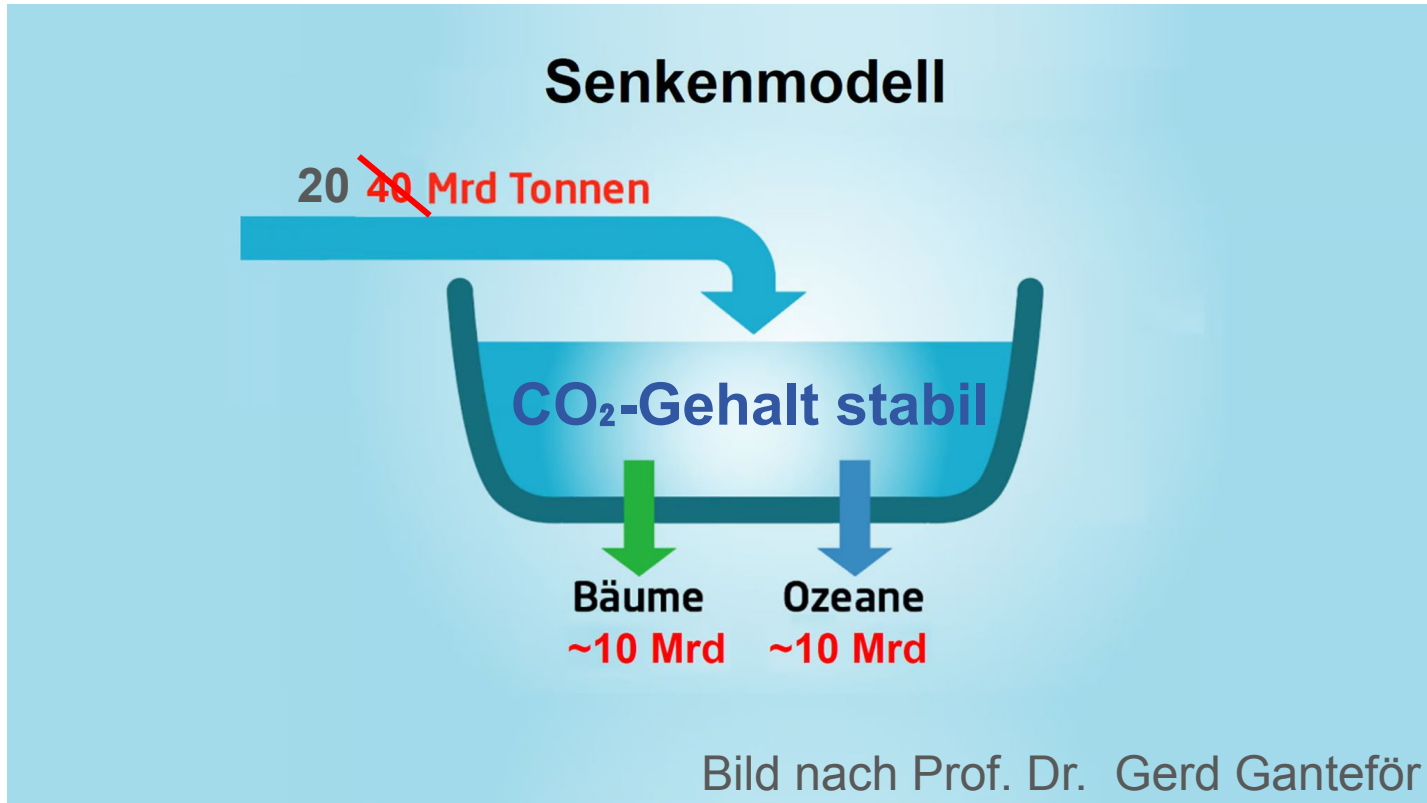


Öl für Transport

Wo landet das CO₂?



CO₂-Emissionen halbieren!



Die Energiewelt im Jahr 2019

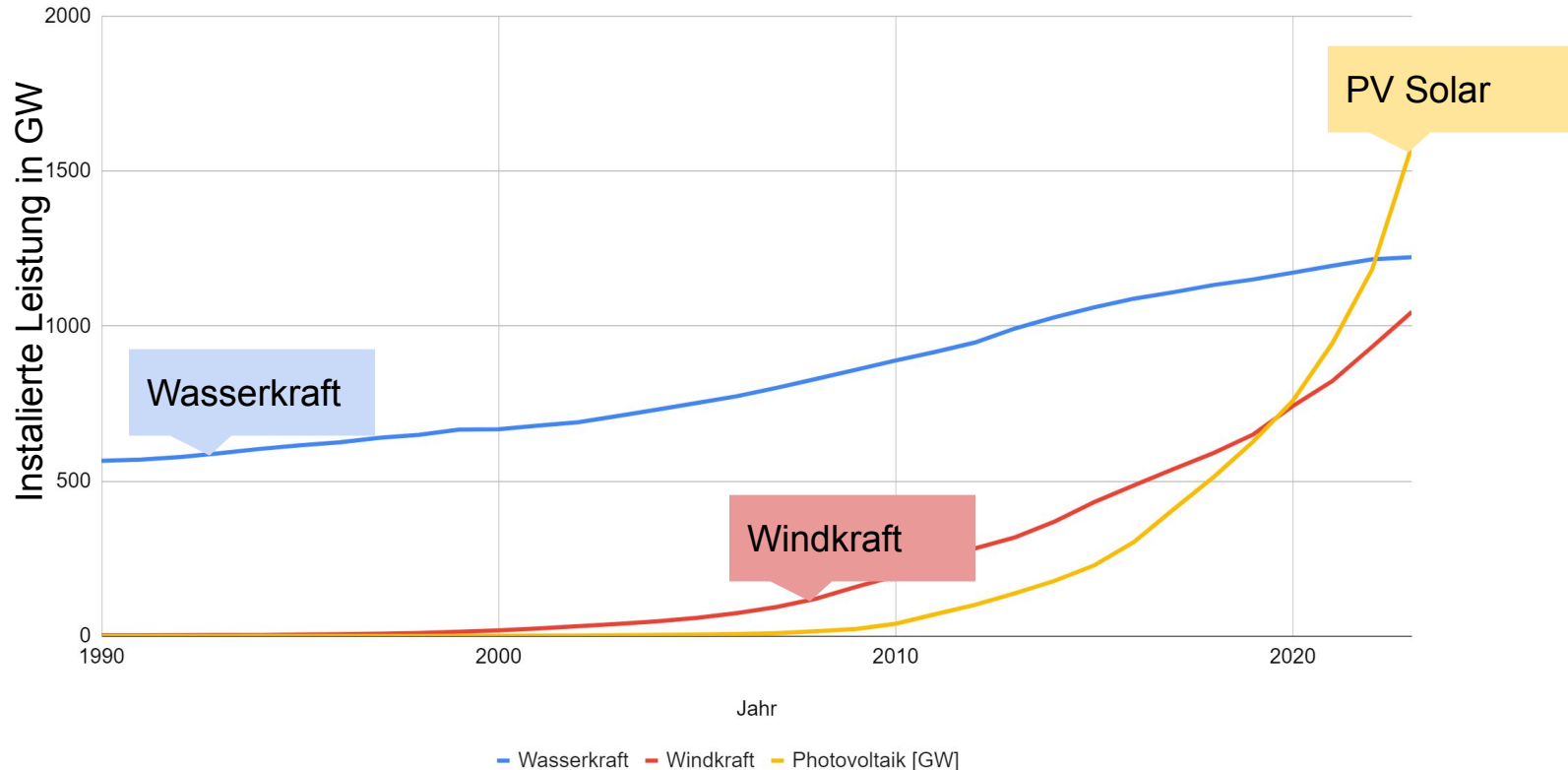
Energiequelle	Energiemenge [TWh/a]	CO₂ - Emission [Gt/a]
Kohle (th)	48.384	16
Öl (th)	55.008	15
Gas (th)	41.184	8,3
Solar (el)	699	0
Summe (el)	~50.000	39,3

Ziel 2050

Energiequelle	Energiemenge [TWh/a]	CO ₂ Emission [Gt/a]
Kohle (th)	24.000	8
Öl (th)	22.500	8
Gas (th)	20.000	4
Solar (el)	24.000	0
Zielwerte (el):	50.000	39,3 20

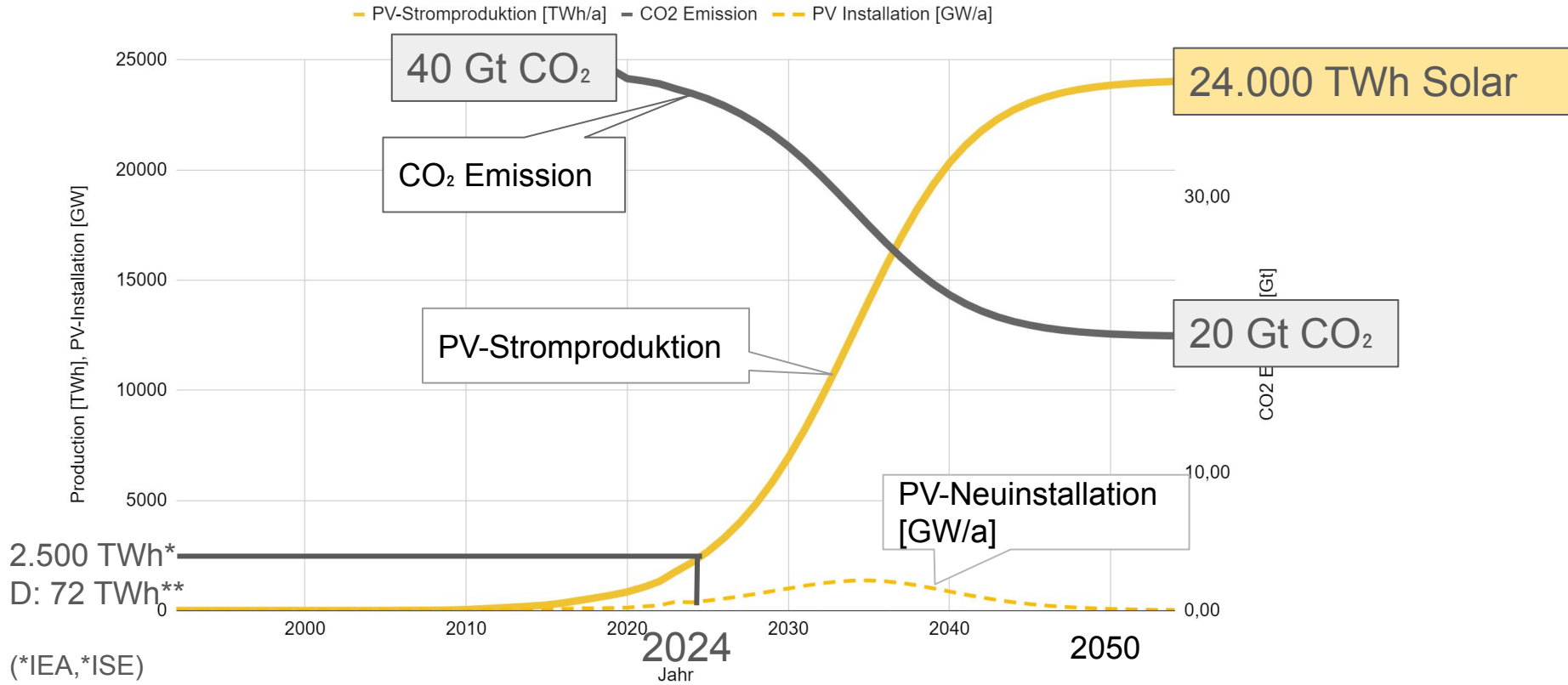
Ausgangslage: Wachstum der Erneuerbaren

Wasserkraft, Windkraft und Photovoltaik



Wachstum der Solarenergie, Rückgang von CO₂, Welt

PV-Produktion [TWh] und Emission CO₂ [Gt] und Jahr



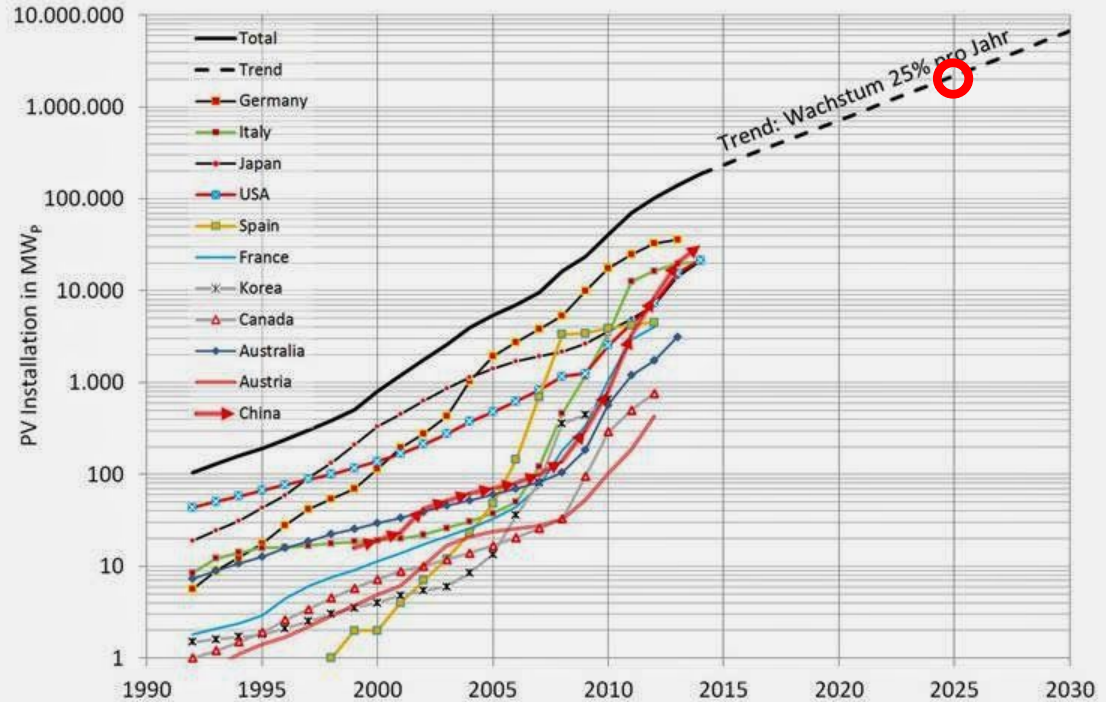
Zweifel?

Meine Vorhersage aus dem Jahr **2014**.

2025 werden 2 TW PV installiert sein.

Genau das ist eingetroffen, wir haben es mit einem gut vorhersagbaren exponentiellen Wachstum zu tun.

Trend der Solarenergie



Resultat

Weltweiter Ausbau der Solarenergie durch Preisvorteil

Nutzung als Fuelsaver = Brennstoffeinsparung

50 % Reduktion bei den CO₂-Emissionen bis ~ 2050

Stabilisierung des CO₂-Gehalts der Atmosphäre bei ~ 500 ppm

Temperaturanstieg ca. 2 °C

Pfad verursacht keine Kosten, da ökonomisch optimal

Deutschland spielt dabei keine (große) Rolle.

Wie geht es weiter?



Besuchen Sie meine Energiegespräche mit Top-Wissenschaftlern auf YouTube

[YouTube.com/EduardHeindl](https://www.youtube.com/EduardHeindl)

Lassen Sie sich nicht von der Energiewende entmutigen!

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit

Fragen?

Folgerung zum Lärm

- Die Geräusche hinter Windkraftanlagen sind komplex
- Auch in großen Entfernungen kann es sehr laut werden
- Die Geräusche werden moduliert und es wummert.
- **All das ist bisher nicht berücksichtigt worden!**