Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-
Forschung Baden-Württemberg

Solar- und Windstrom als Grundpfeiler der Energiewende - und Wasserstoff ?

Dr.-Ing. Jann Binder

Balingen, 20. November 2023



Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)

- Gemeinnützige Stiftung bürgerlichen Rechts
- rund 300 Mitarbeiter*innen in Stuttgart und Ulm, sowie zwei Testfelder
- > 30 Jahre Erfahrung in Technologie-transfer zur Photovoltaik, Batterien, Brennstoffzellen & Power-to-Gas
- Systemforschung, Vorhersage von Erzeugung aus PV und Windkraft, Integration Erneuerbarer Energien in die Netze
- Angewandte Forschung, Dienstleistung und Technologietransfer



➢ZSW-Gebäude in Stuttgart-Vaihingen (STEP) mit PV Fassade

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

- Erneuerbare Energien gehören zu den wichtigsten Stromquellen in Deutschland und ihr Ausbau ist eine zentrale Säule der Energiewende.
  Unsere Energieversorgung soll klimaverträglicher werden und uns gleichzeitig unabhängiger vom Import fossiler Brenn-, Kraft- und Heizstoffe machen.

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz



11/2019 am ZSW (Foto: ZSW)

- Wind- und Sonnenenergie sind die wichtigsten erneuerbaren Energieträger.
- „Freiheitsenergie“→ eine neue Erkenntnis? Nein!
  → schon die Ölkrise 1973 wurde durch den Konflikt Israel gegen Ägypten & Syrien ausgelöst

→EEG 2023 (Dez. 2022) - Ziele für 2030:

→80% der Stromerzeugung (d.h. 640 TWh von 800 TWh) sind aus Erneuerbaren Energien

→die installierte PV Leistung steigt von heute 67 GWp auf 215 GWp; bis 2045 auf rund 450 GWp

→Das PV Strategiepapier des BMWK vom 10.03.2023* addressiert flankierende Maßnahmen

*https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/photovoltaik-stategie-2023.pdf?__blob=publicationFile&v=6

Solar- und Windstrom als Grundpfeiler der Energiewende - und Wasserstoff ?

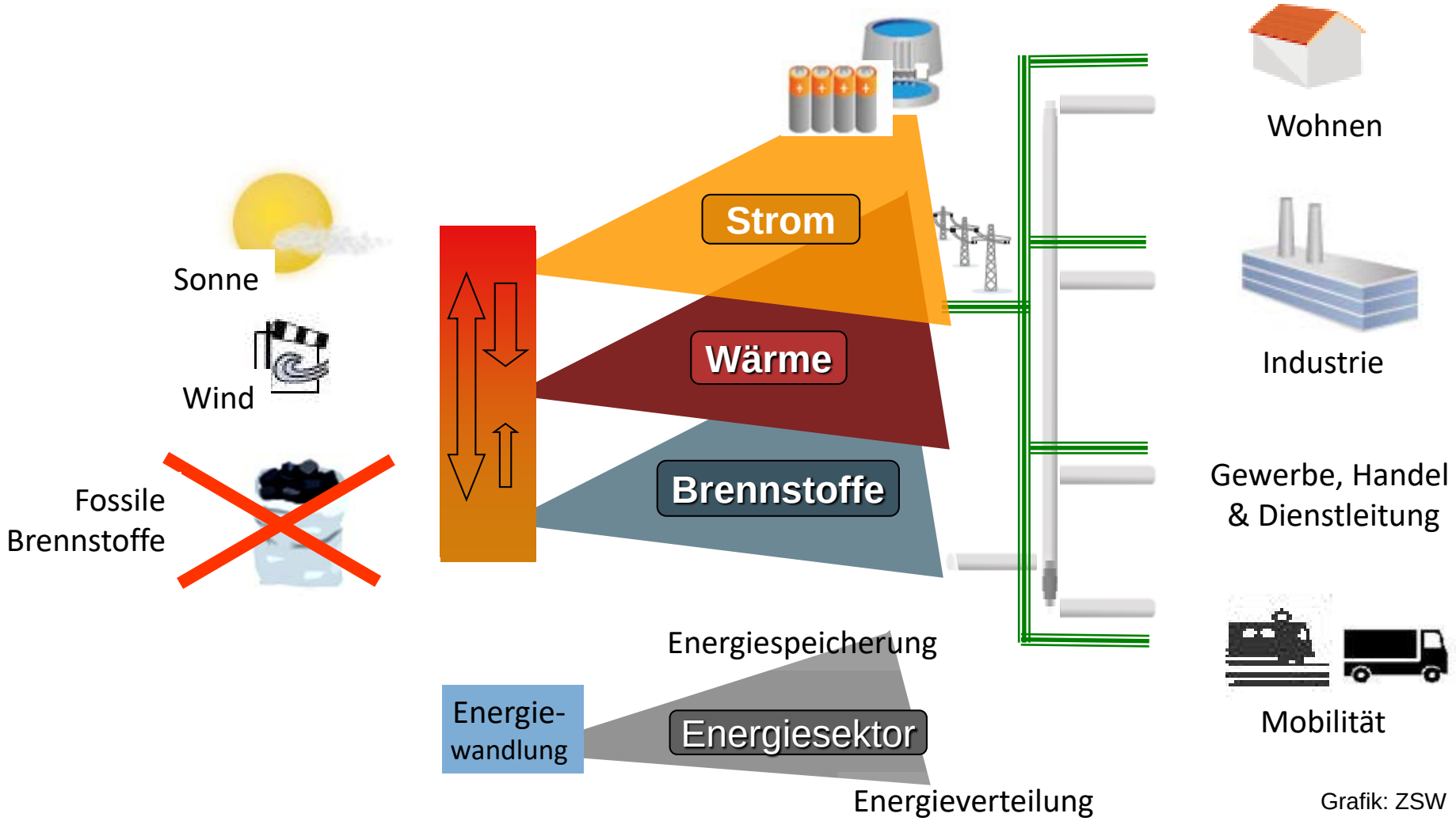
I. Sonne und Wind liefern grünen Strom, Wärme und Kraftstoffe

II. Reduktion des Primärenergiebedarfs durch Elektrifizierung von Transport und Gebäudeheizung

III. Stromverbrauch verdoppelt – jedoch Sonne und Wind ergänzen sich

Sonne und Wind liefern grünen Strom, Wärme und Kraftstoffe

Abstimmung zwischen Erzeugung und Last durch **Sektorkopplung**, Lastmanagement und Speicherung



Grafik: ZSW

Solar- und Windstrom als Grundpfeiler der Energiewende - und Wasserstoff ?

I. Sonne und Wind liefern grünen Strom, Wärme und Kraftstoffe

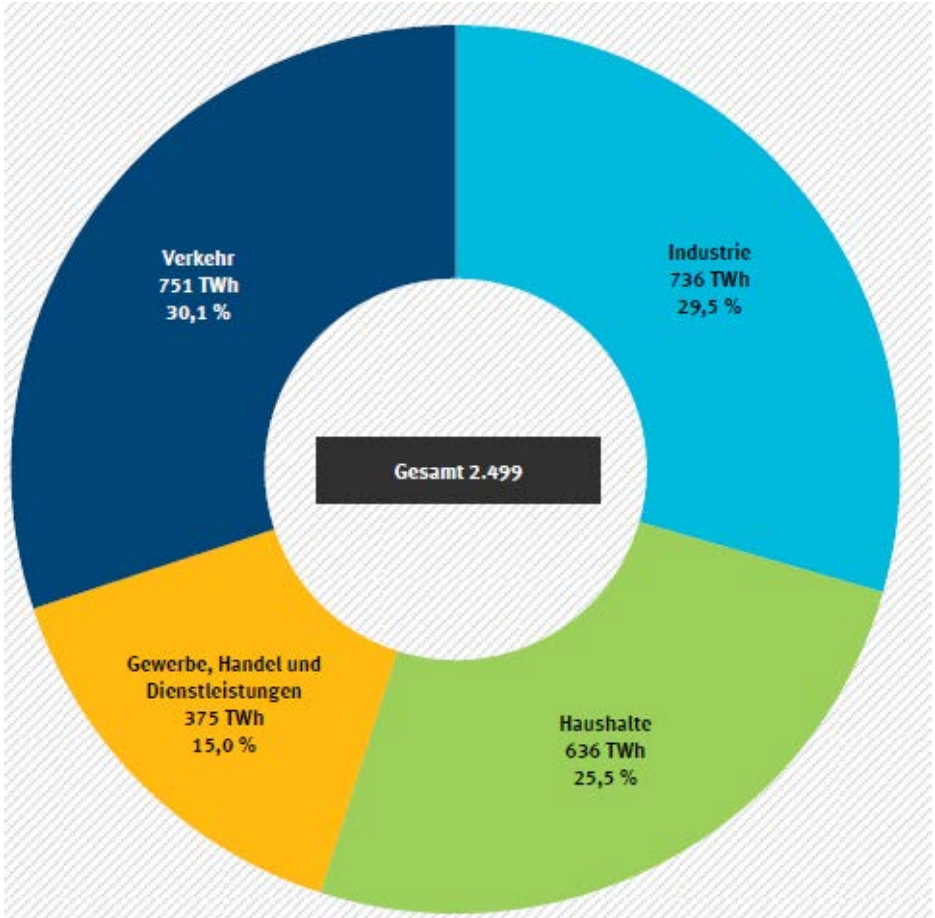
II. Reduktion des Primärenergiebedarfs durch Elektrifizierung von Transport und Gebäudeheizung

III. Stromverbrauch verdoppelt – jedoch Sonne und Wind ergänzen sich

Energie- und Strombedarf nach Sektoren

In 2018 verbrauchten Haushalte 129 TWh = 28% des Stroms

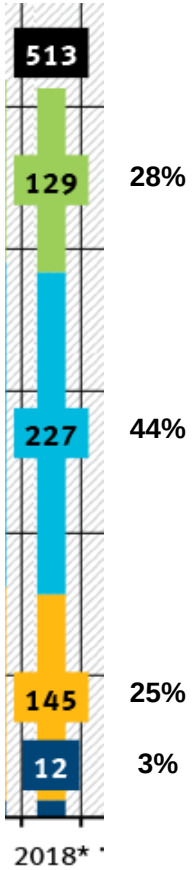
Endenergiebedarf



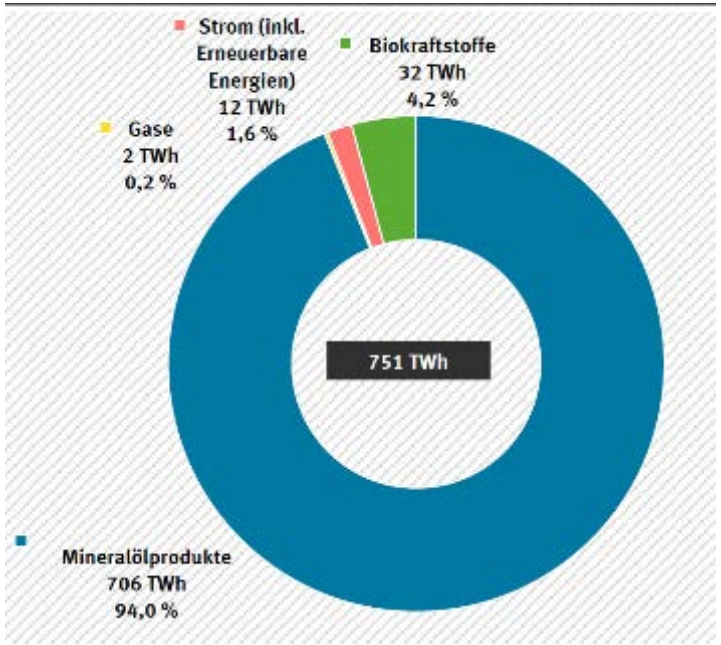
Endenergieverbrauch 2018 nach Sektoren und Energieträgern

Quelle: Umweltbundesamt auf Basis Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen

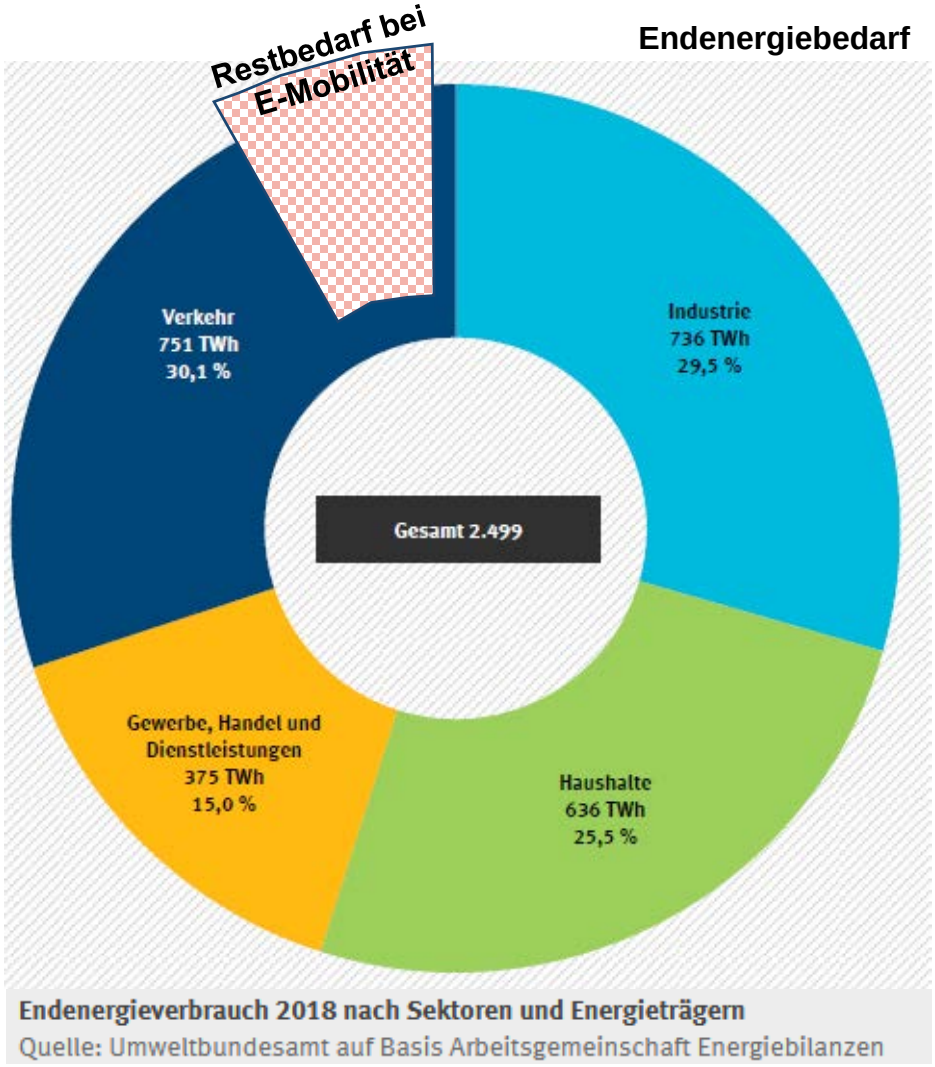
nur Strom in TWh



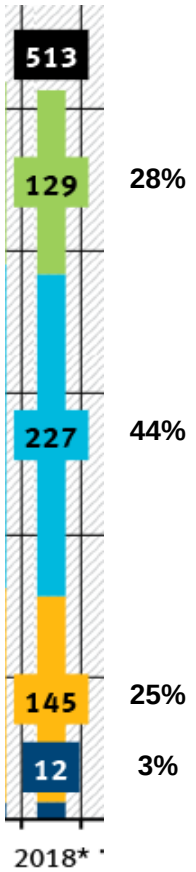
nur Verkehr



Reduktion des Energiebedarfs durch Elektrifizierung der Mobilität



Endenergieverbrauch 2018 nach Sektoren und Energieträgern
Quelle: Umweltbundesamt auf Basis Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen



durch E-Mobilität kann

- 706 TWh Benzinbedarf auf
- 220 TWh Strombedarf sinken
- und dieser Strom kann EE-Strom sein

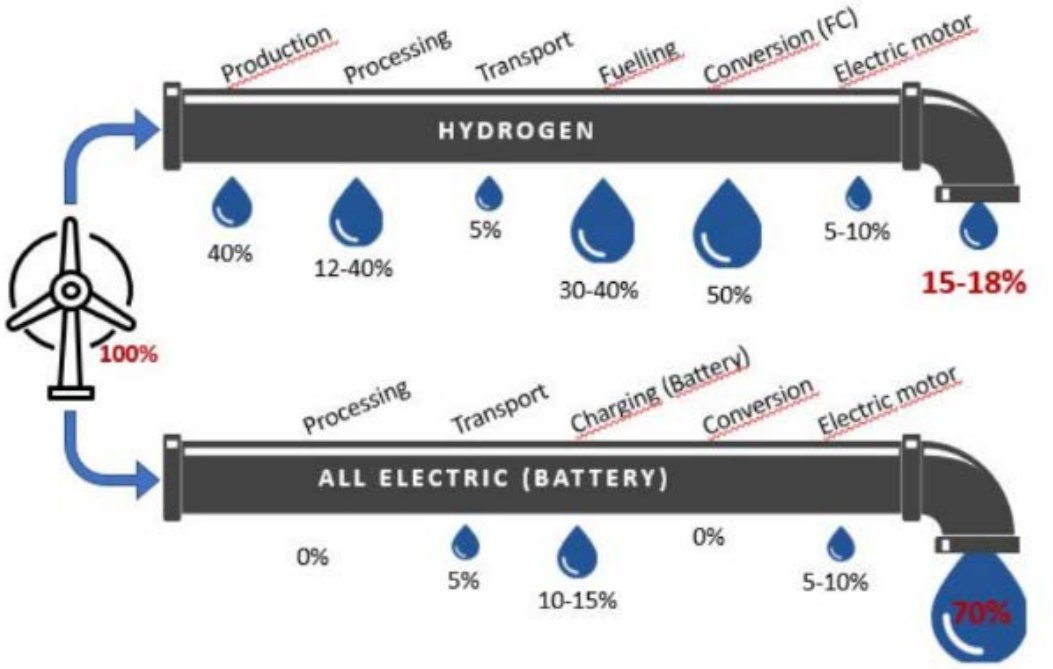
(gerechnet mit 20% Wirkungsgrad beim Verbrennungsmotor und 64% Wirkungsgrad bei Elektromobilität)

ein Auto mit 13.000 km/a Fahrleistung benötigt

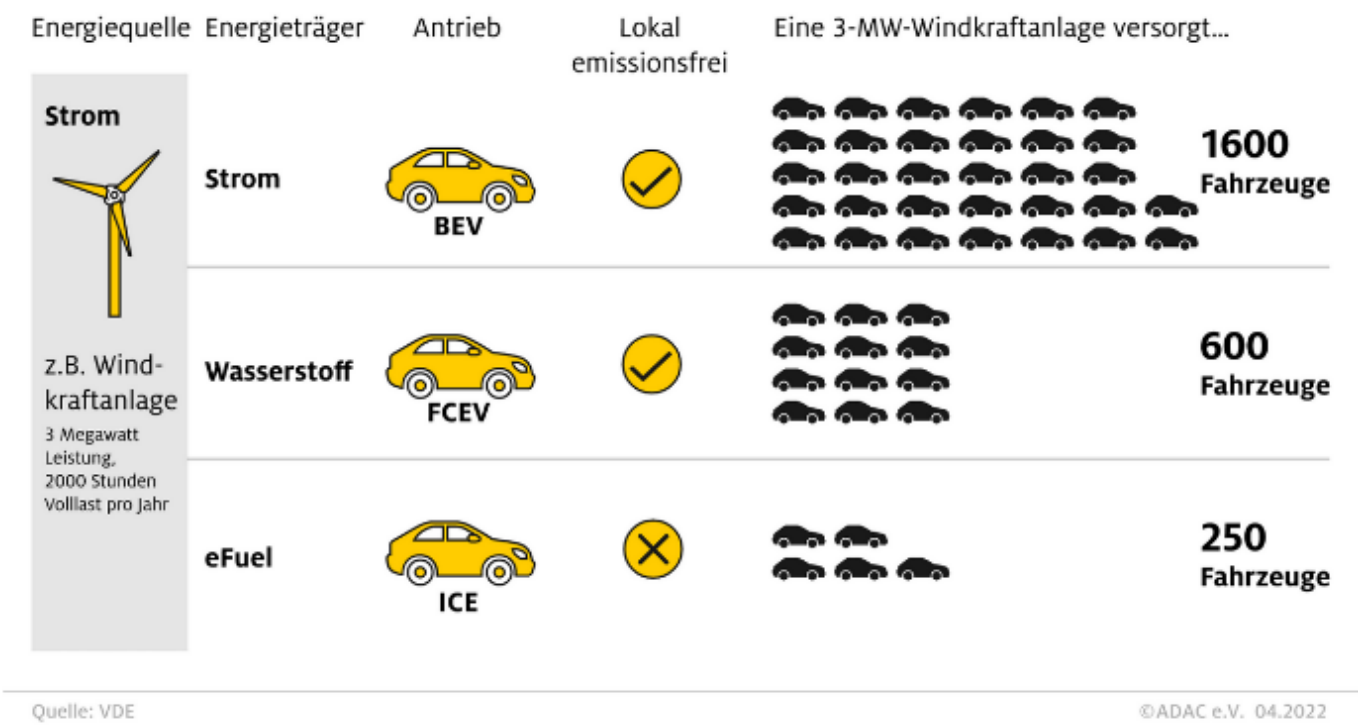
- 11 m² PV für den benötigten Strom bei Elektromobilität
- 30 m² PV zur Herstellung von H2 für ein Brennstoffzellenfahrzeug
- 70 m² PV zur Herstellung von E-Fuels für ein konventionelle Fahrzeug

Vergleich der Wirkungsgrade von BEV und FCEV

(BEV = Battery Electric Vehicle; FCEV = Fuel Cell Electric Vehicle)



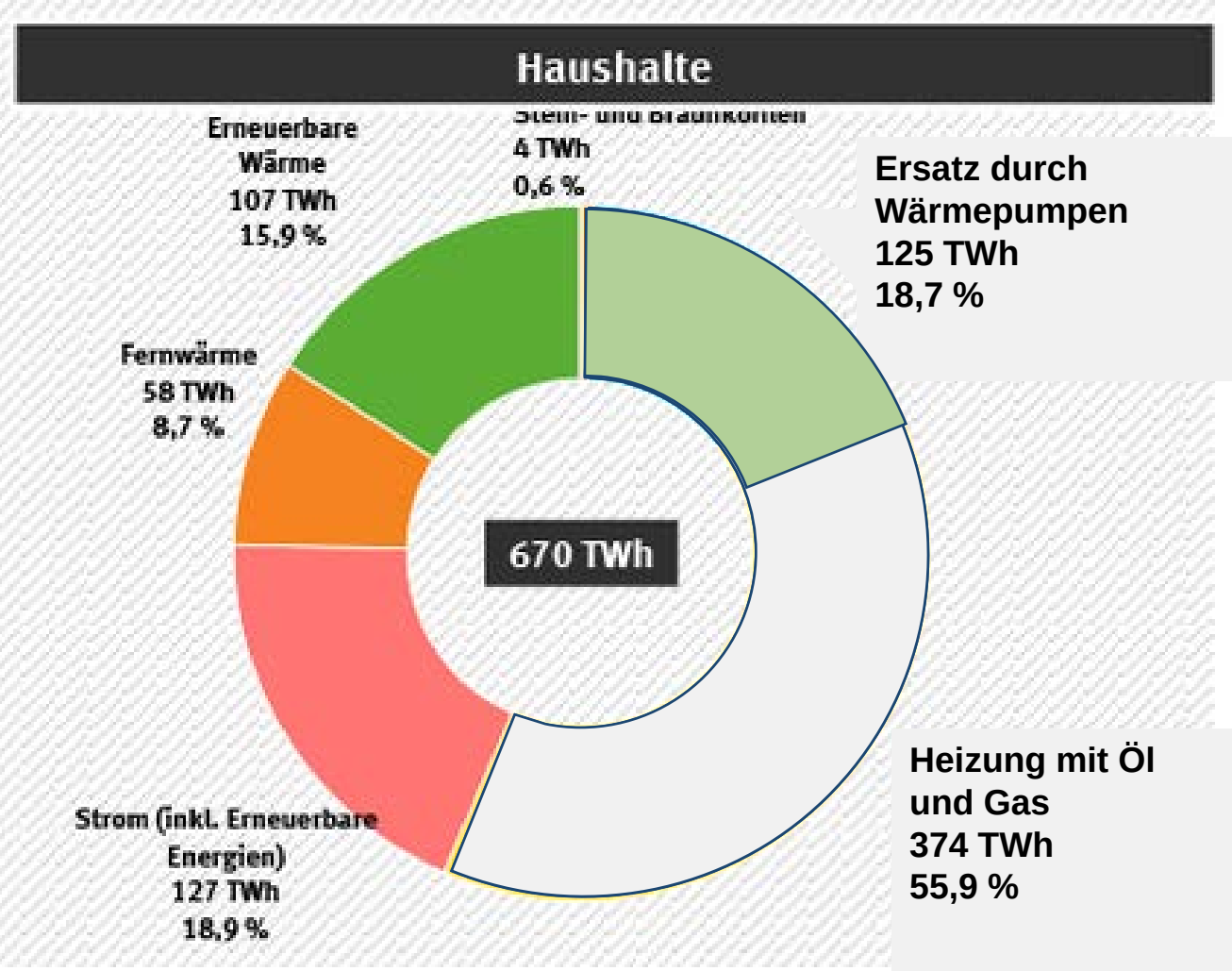
Quelle: https://edison.media/von-fakten-und-traeumen-stromer-vs-wasserstoff/25216883/



!!! 1% des Kraftstoffbedarfs für Mobilität in D würden 2.300 Offshore Windräder benötigen* !!!

* Quelle: P. Kasten, Öko-Institut in der ZEIT; derzeit 1.539 Anlagen in D

Reduktion des Energiebedarfs durch Elektrifizierung der Wärmeerzeugung – und als Alternative Wasserstoff?



- Ersatz von Gas und Öl-Heizung durch Wärmepumpen (Strom) reduziert den Energiebedarf auf 40%

- 1 kWh thermische Wärme benötigt
  - über Stromdirektheizung → 1 kWh Strom
  - über H_2-Elektrolyse → 1,2 kWh Strom
  - über Wärmepumpe → 0,4 kWh Strom

- Vorteil der Nutzung von Wasserstoff
  - Nutzung modifizierter Gasinfrastruktur statt zusätzlicher Stromleitung
    - Jedoch wenn 70% auf Wärmepumpe umgestellt ist, muss die Gasinfrastruktur von 30% der Nutzer bezahlt werden....
  - Speicherbarkeit

Solar- und Windstrom als Grundpfeiler der Energiewende - und Wasserstoff ?

I. Sonne und Wind liefern grünen Strom, Wärme und Kraftstoffe

II. Reduktion des Primärenergiebedarfs durch Elektrifizierung von Transport und Gebäudeheizung

III. Stromverbrauch verdoppelt – jedoch Sonne und Wind ergänzen sich

Verdopplung des Stromverbrauchs bis 2045 und Ausbau EE

Ausbau PV und Wind für erhöhten Stromverbrauch und Elektrolyse

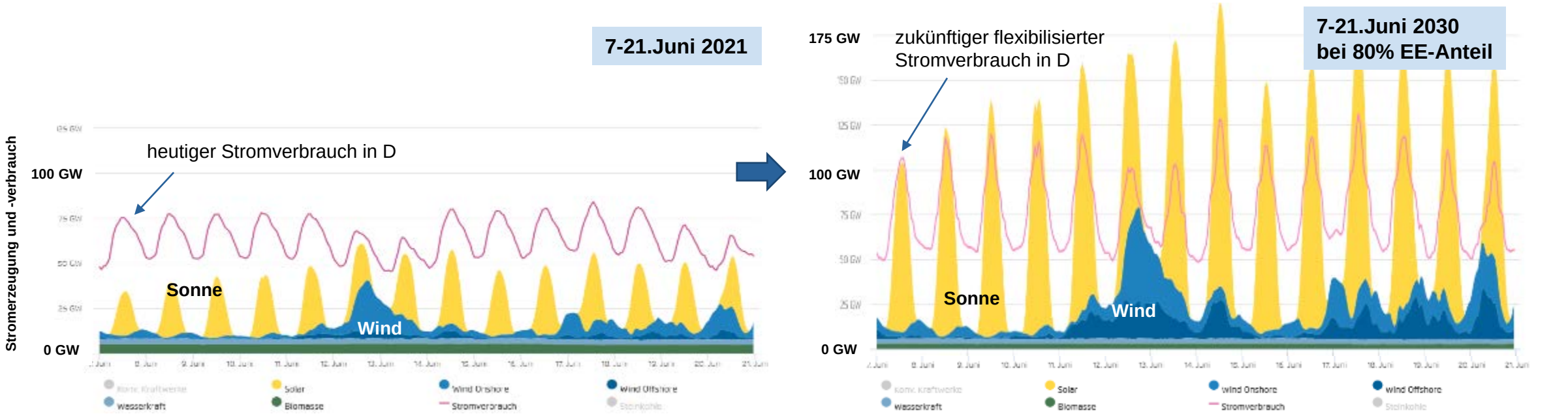
Jahr	PV	Wind an Land	Wind auf See	Strom aus Erneuer-baren Energien (Netto)	Strom-verbrauch Elektro-lyse***	Brutto-strom-verbrauch beim Kunden	Erhöhung Strom-verbrauch für Verkehr und Wärme
2022*	68 GW	58 GW	8 GW	250 TWh	0 TWh	550 TWh	0%
2030**	216 GW	115 GW	30 GW	600 TWh	31 TWh	750 TWh	36%
2045***	450 GW	200 GW	66 GW	1400 TWh	300 TWh	1100 TWh	100%

- Der Strombedarf beim Kunden steigt aufgrund von Wärmepumpen und Elektromobilität – und ersetzt die sonst notwendigen Brennstoffe (Gas, Öl, Benzin, …)

* Zahlen zu Erneuerbare Erzeugung für 2022 aus den energy-charts.de
** Zahlen für 2030 entsprechen dem Ausbauplan der Bundesregierung
https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/energiewende-beschleunigen-2040310
*** Zahlen für 2045 und der Strombedarf für Elektrolyse ist aus den energy-charts.de entnommen; Referenz-Szenario

Herausforderungen „Energiebereitstellung“ und „Netzintegration“

was bedeutet das Ziel der Bundesregierung von 80% EE-Anteil im Strom in 2030



https://www.agora-energiewende.de/service/agorameter
(Abruf 27.02.2022 – dort Jahr 2035 mit 78% EE ausgewählt)

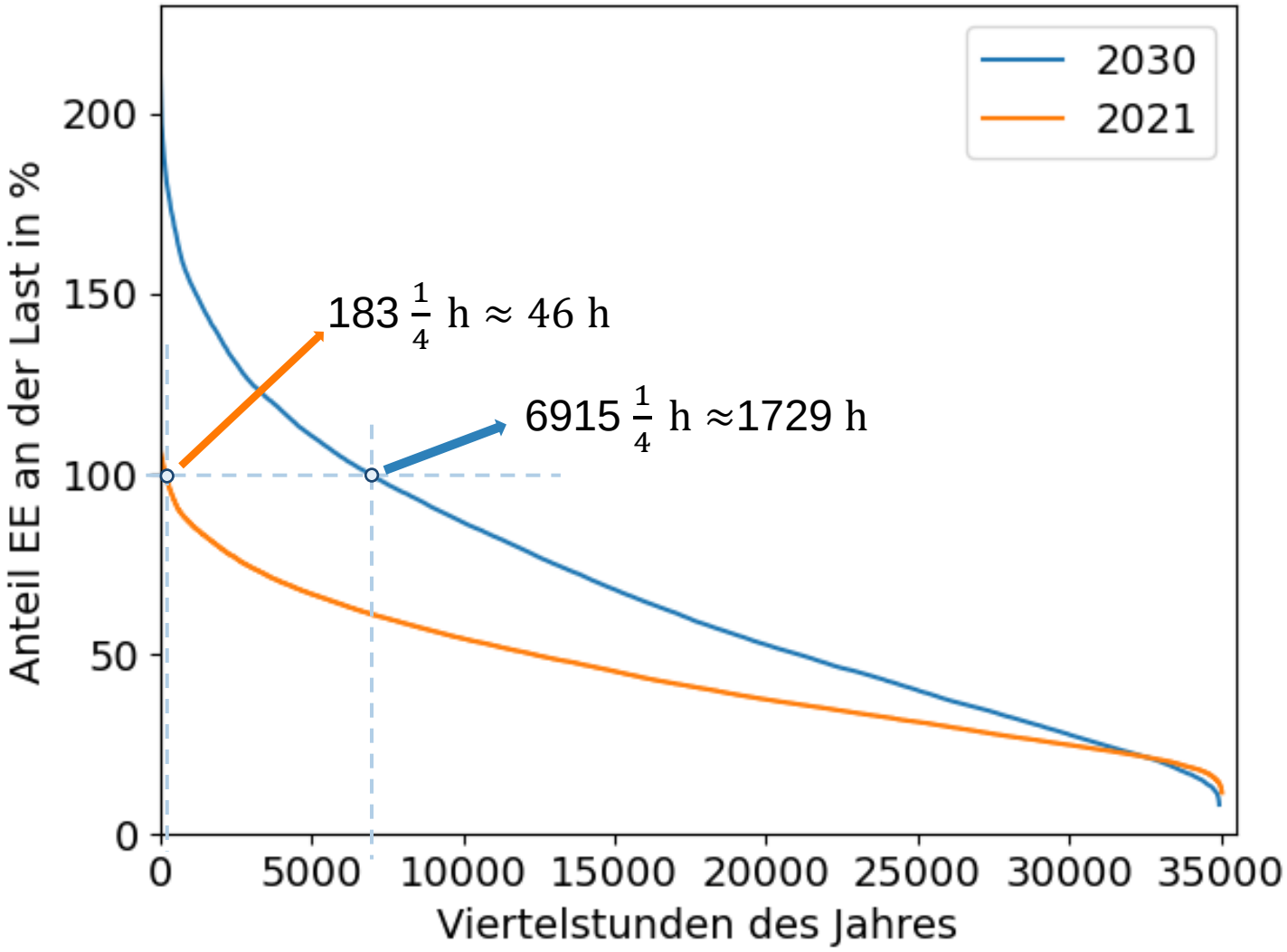
Heute

- nur selten deckt oder übertrifft die Stromerzeugung aus Erneuerbarer Energien den Stromverbrauch
- ein hoher Anteil an Erneuerbaren Energien senkt den Strompreis deutlich

In 2030

- die Stromerzeugung aus EE übertrifft den Stromverbrauch über einen Zeitraum von mehr als 1700 Stunden pro Jahr (20% der Jahresstunden)
- durch Flexiblisierung des Verbrauchs, kann mehr Strom genutzt werden, ohne Bedarf für Speicherung

Anteil EE an der Last: 2021 vs. 2030



Bisher:

Nur sehr geringe Überschüsse an EE-Strom im System

in 2030:

zu 20% der Zeit (1729 h von 8.760 h/a) reichen PV und Windstrom um den Bedarf zu decken.

in 2045:

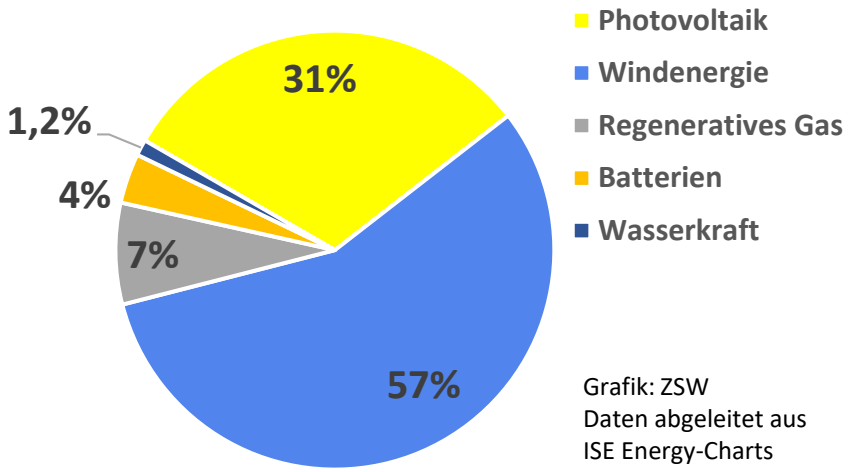
zu 88% der Zeit reichen PV und Windstrom um den Bedarf zu decken.

Anteile von Solar- und Windenergie in 2045

88% direkt verfügbar, 12% benötigen Zwischenspeicherung



- 88 % des Strombedarfs aus PV und Wind ohne Zwischenspeicherung
- 4% über Zwischenspeicherung in Batterien
- 7% über Regeneratives Gas aus PV und Windüberschuss (~ 30% Wirkungsgrad)
- 1 % aus Wasserkraft



Grafik: ZSW
Daten abgeleitet aus
ISE Energy-Charts
Referenz-Szenario 2045

Bedarf an Elektrolysekapazität zur Wasserstoffherstellung

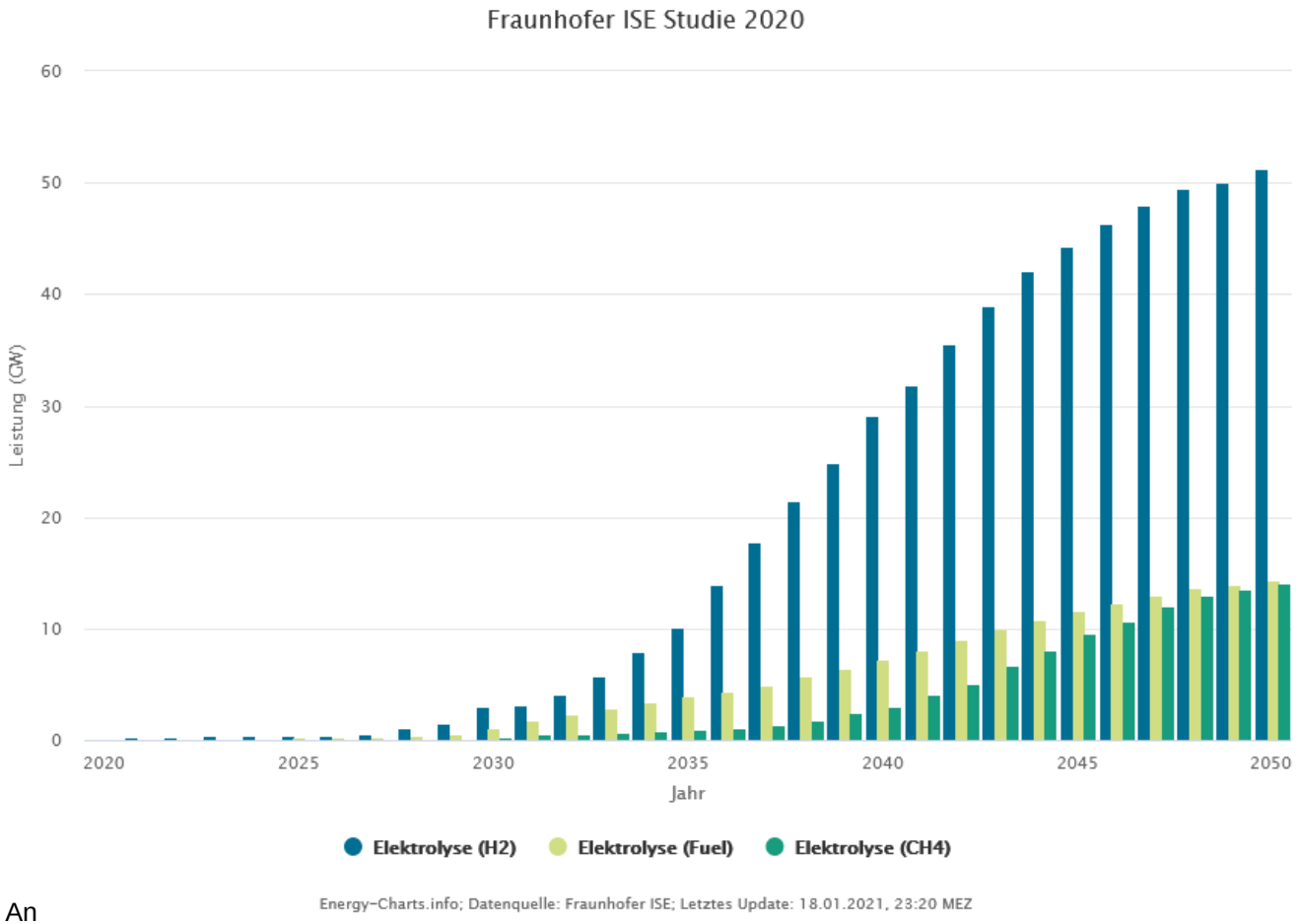
für das 100% EE-Szenario in 2050

Elektrolyse (H2)

- ab 2026 in steigendem Maß notwendig
- frühzeitig in diese Technologie einsteigen → Arbeitsplätze

Elektrolyse (H2 und weiter zu CH4 und Fuel)

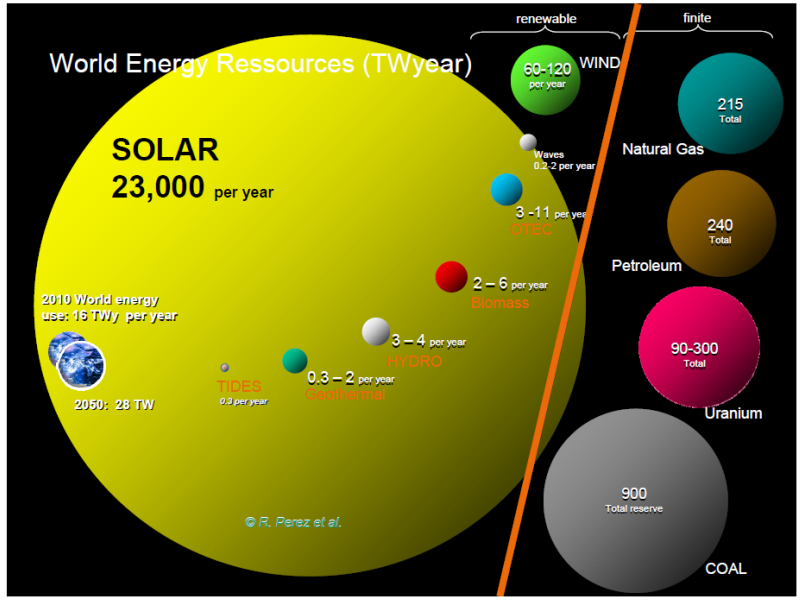
- für Schwerlastverkehr, Schiffsverkehr, Flugverkehr
- für Hochtemperaturprozesse in der Industrie, Stahlherstellung, Chemie
- H2* und E-Fuels** nicht für Gebäudewärme und Individualverkehr, da ineffizient bzw. weltweite Verfügbarkeit zu gering



https://energy-charts.info/charts/remod_installed_power
(Referenz 100 – Szenarion)

** Quelle: Rosenow, Jan (2022): Is heating homes with hydrogen all but a pipe dream? An evidence review. In: Joule 6 (10), S. 2225–2228. DOI: 10.1016/j.joule.2022.08.015.
* https://www.tagesschau.de/wirtschaft/technologie/verbrenner-aus-e-fuels-101.html

Energiewende durch Elektrifizierung - Wasserstoff bleibt ein knappes Gut



- Sonne und Wind liefern grünen Strom, Wärme und Kraftstoffe
- Elektrifizierung von Verkehr und Wärmeversorgung verdoppeln den Stromverbrauch
  - Elektrifizierung ermöglicht den Umstieg auf nachhaltige Quellen
  - senkt den Energieverbrauch gegenüber fossilen Quellen um je 70%
- Den erhöhte Stromverbrauch können PV und Windkraft decken
  - 0,6% der Fläche von D für PV notwendig
  - 2% der Fläche von D für Windkraft auszuweisen - 1,2 % der Fläche benötigt (1,2% ergibt sich aus angenommenen 16,5 ha Flächenbedarf pro Anlage) https://www.energiezukunft.eu/erneuerbare-energien/wind/windenergie-was-zwei-prozent-der-landesflaeche-bedeuten/
  - Zum Vergleich: derzeit sind 14% der Fläche von D Siedlungsfläche und 4% der Fläche Biomais
- Wasserstoff bleibt ein knappes Gut - notwendig für
  - Dunkelflaute
  - Hochtemperaturprozesse in der Industrie
  - Schwerlastverkehr > 500 km ohne Ruhepause (2 Fahrer)

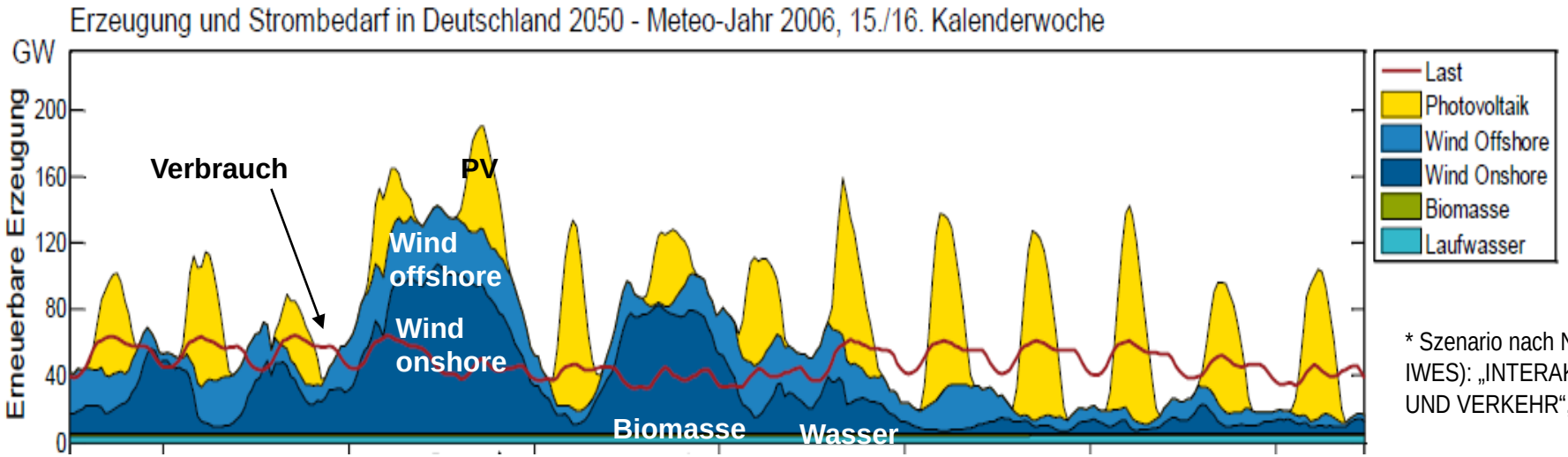
VIELEN DANK

Dr.-Ing. Jann Binder



Profile der Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien

2 Beispielwochen im Jahr 2050*



* Szenario nach Norman Gerhard, (Fraunhofer IWES): „INTERAKTION EE-STROM, WÄRME UND VERKEHR“, Endbericht, Sept. 2015

- Der Überschuss aus Windkraft und solarer Stromerzeugung wird genutzt zur
  - Zwischenspeicherung von elektrischer Energie (für Dunkelflauten)
  - für E-Mobilität (Batteriespeicher) und Raumwärme über Wärmepumpen
  - zur Erzeugung von grünem Wasserstoff und Methan

„Is heating homes with hydrogen all but a pipe dream?“



Joule
Commentary

CellPress

Is heating homes with hydrogen all but a pipe dream? An evidence review

Jan Rosenow[1,2,*]

Dr. Jan Rosenow is a principal and director of European programs at the Regulatory Assistance Project (RAP), a global team of highly skilled energy experts. Jan has several board appointments including the European Council for an Energy Efficient Economy and the Coalition for Energy Savings. Jan also has a passion for energy research. He is an honorary research associate at Oxford University's Environmental Change Institute. In recognition of his work within the field, Jan was named one of the world's top 25 energy influencers and has been appointed special advisor to the House of Commons inquiry into decarbonizing heating.

Introduction

Energy used for purposes of heating and cooling accounts for around 50% of total global final energy consumption. Of this, almost half is consumed for heating buildings, and most of the energy used is fossil fuel based.[1]

It is therefore clear that without fully decarbonizing space and hot water heating, net zero greenhouse gas emission goals are not attainable. Most analyses agree that regardless of the fuels used, one important lever to reduce emissions from buildings is improving the building fabric through energy efficiency measures.[1,2] But there is still a sizable residual energy demand for heating even after energy efficiency improvements,[1] and the question is which technologies can deliver zero- or very-low-carbon heating.

Low-carbon and zero-carbon hydrogen has been promoted by gas and heating industry representatives as a key solution to replace especially fossil gas in the distribution grid.[3,4] It has received significant media attention over the last 2–3 years and featured in some of the many national hydrogen strategies launched recently.[5]

It is important to point out that there are many legitimate current and potential end-uses for green hydrogen from renewable electricity, for example as a feedstock in industry, for high-temperature processes, in shipping, and for long-term energy storage for electricity production.[1,2]

An important question is whether the available evidence supports a case for heating homes with hydrogen. This paper reviews independent analyses on the use of hydrogen for space and hot water heating. "Independent" in this context is defined as "not carried out by or on behalf of a specific industry (e.g. gas, oil, electricity, heat pumps, boiler manufacturers)." The review includes a total of 32 studies carried out at international, regional, national, state, and city level by a wide range of different organizations including universities, research institutes, intergovernmental organizations such as the IPCC[2] and the IEA,[1] and consulting firms. Industry-funded studies have been excluded because such studies are often carried out on behalf of industry groups in order to support a position that suits their vested interests. This is not to say that there are no robust analyses funded by industry, but for the purpose of this review of independent evidence, they have been excluded.

The evidence assessment shows that the widespread use of hydrogen for heating is not supported by any of the 32 studies identified in this review. Instead, existing independent research so far suggests that, compared to other alternatives such as heat pumps, solar thermal, and district heating, hydrogen use for domestic heating is less economic, less efficient, more resource intensive, and associated with larger environmental impacts.

Background

More than 95% of global hydrogen production is currently based on fossil gas and coal with no carbon abatement.[6] Because it is energy intensive to

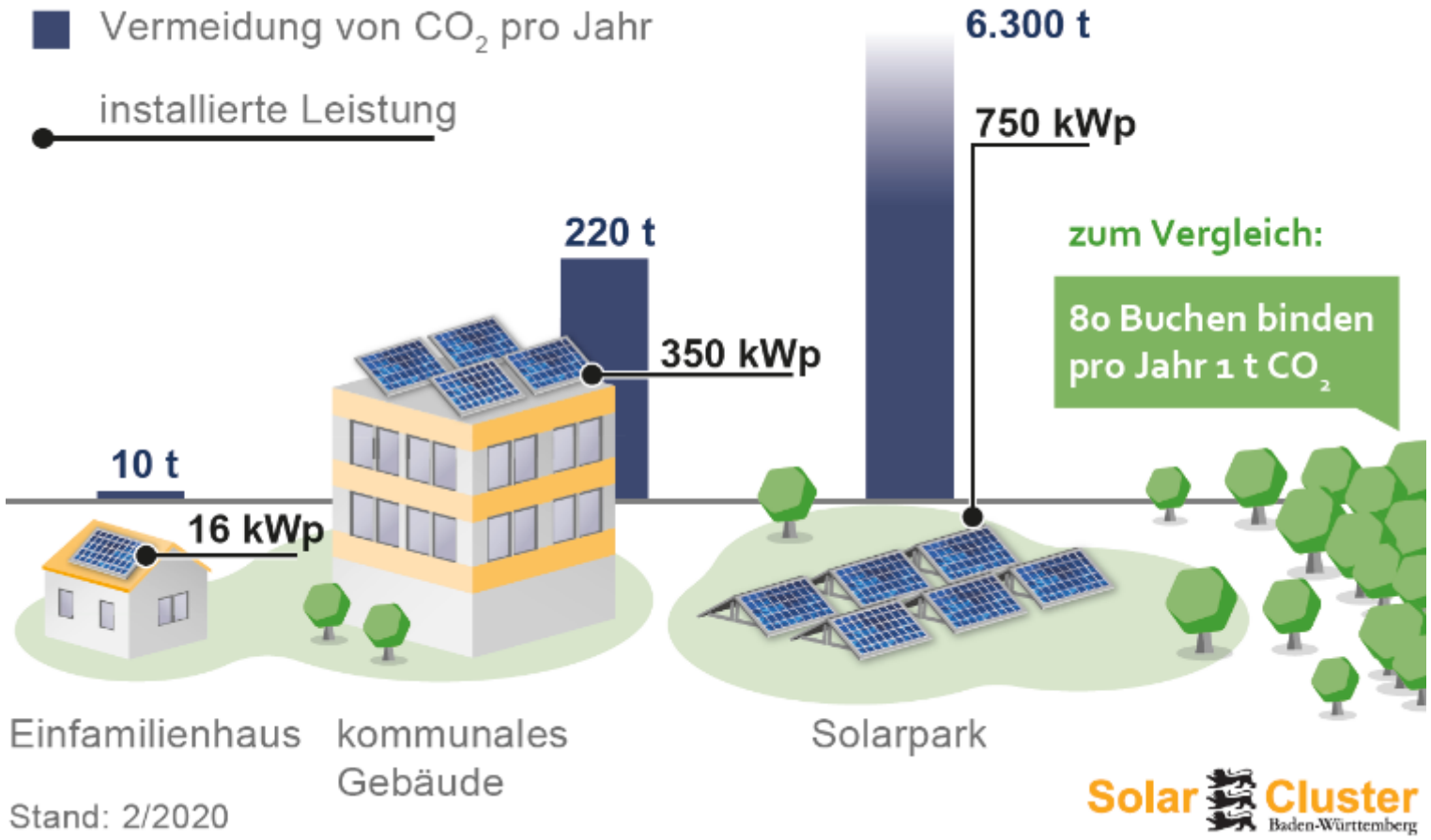
[1]Regulatory Assistance Project, Brussels, Belgium
[2]University of Oxford, Environmental Change Institute, Oxford, UK
*Correspondence: jrosenow@raponline.org
https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.08.015

32 unabhängigen Studien kommen zu selben Schluss:

- Wasserstoff für Heizzwecke ist mit höheren Energiesystemkosten verbunden als alternative Technologien, die eine kohlenstofffreie Raumheizung und Warmwasserbereitung ermöglichen, wie z. B. Wärmepumpen, Fernwärme und Solarthermie. Ein Großteil davon ist auf den höheren Strombedarf für grünen Wasserstoff im Vergleich zur Elektrifizierung über Wärmepumpen zurückzuführen.

Quelle: Rosenow, Jan (2022): Is heating homes with hydrogen all but a pipe dream? An evidence review. In: Joule 6 (10), S. 2225–2228. DOI: 10.1016/j.joule.2022.08.015.

Effizient der Flächennutzung von Photovoltaik und Wind



1 ha Wald speichert ca.
13 Tonnen CO2 pro Jahr

1 ha Photovoltaik
(1 MWp) vermeidet rund
8.400 Tonnen CO2 pro Jahr

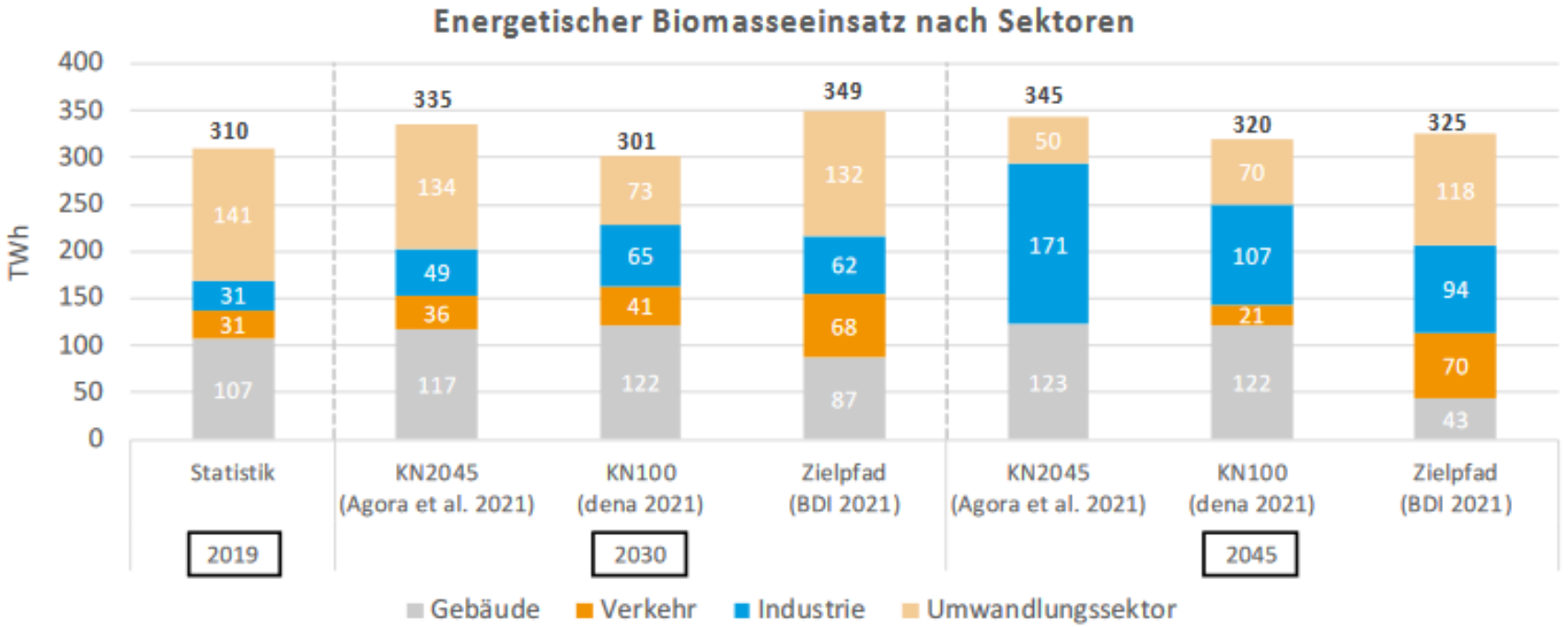
1 Windkraftanlage (5 MWp)
ersetzt 12,5 ha an PV-Anlagen
und vermeidet rund
100.000 Tonnen CO2 pro Jahr

1 ha PV erzeugt 40 mal mehr
Strom als 1 ha Biomais

Quelle: Umweltbundesamt 2019, Solar Cluster BW 2019, AEE 2020, Umweltbundesamt 2022 zu Bioenergie

Nutzung von Biomasse

wenig Spielraum für zusätzliche Nutzung in der Gebäudeheizung oder Verkehr



Hinweis: In KN100 wird der Biomasseeinsatz im Basisjahr im Umwandlungssektor niedriger angegeben als in der Statistik und in anderen Szenarien. Evtl. wird hier also nicht die gesamte Biomassenutzung erfasst, was zu einer Unterschätzung auch für 2030 und 2045 führen könnte.
Hinweis: Es liegen keine vollständigen Daten zur Biomassenutzung für die TN-Szenarien vor.

- bei gleichbleibender Verfügbarkeit von Biomasse (begrenzte Flächen!)
- abnehmende Nutzung für die Stromerzeugung
- zunehmende Nutzung für Hochtemperaturanwendungen in der Industrie
- kein Spielraum für zusätzliche Nutzung von Biomasse in der Gebäudeheizung
- Gesamtbedarf Wärme in D: 1.164 TWh_{th}*

Graphik - Quelle: Rosenow, Jan (2022): Martin Dotzauer et.al., Kurzstudie zur Rolle von Biogas für ein klimaneutrales, 100 % erneuerbares Stromsystem 2035; DBFZ und WIK, 07.07.2022
* https://www.bioenergie.de/themen/waerme (Abruf 17.03.2023)

Flächennutzung in Deutschland

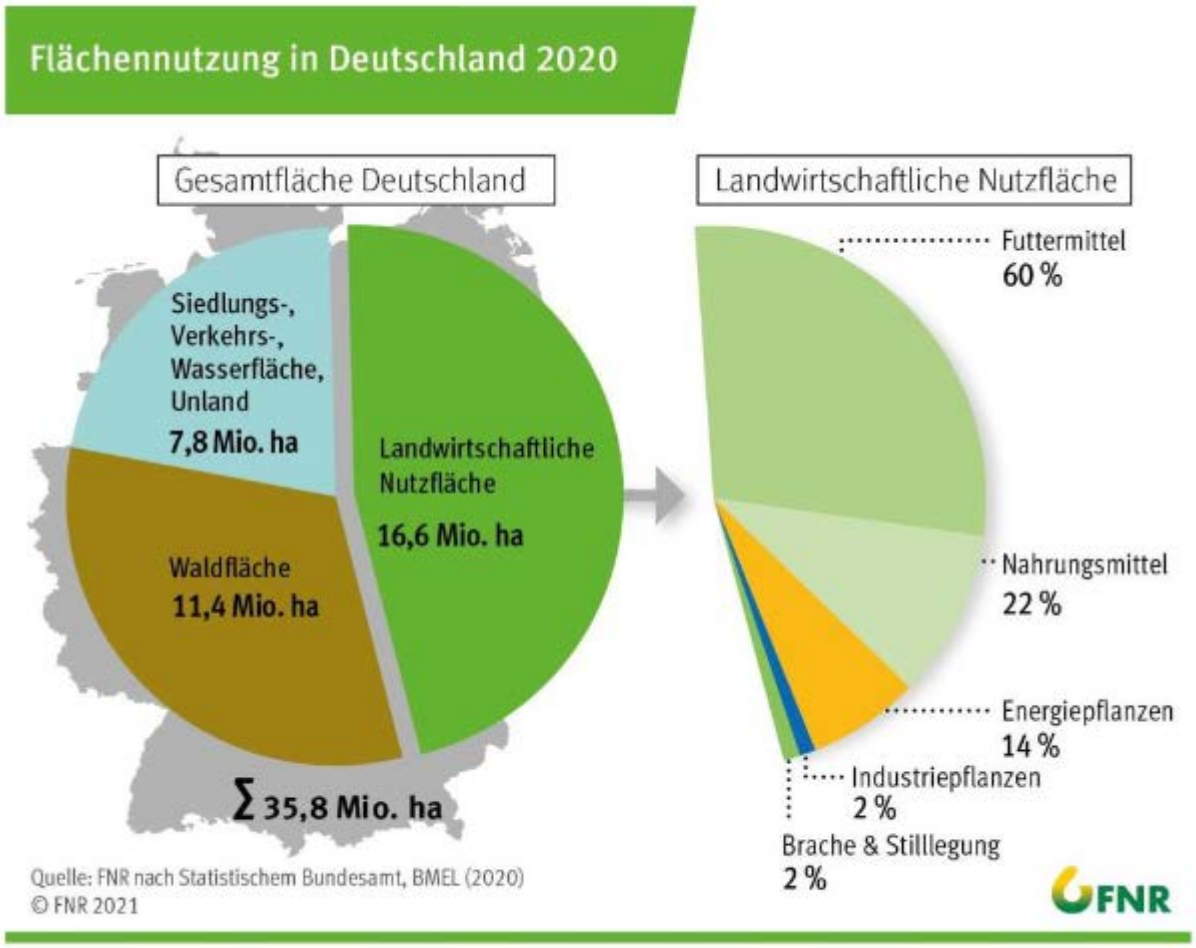


Abbildung 1: Flächennutzung in Deutschland 2020 (FNR, 2021)

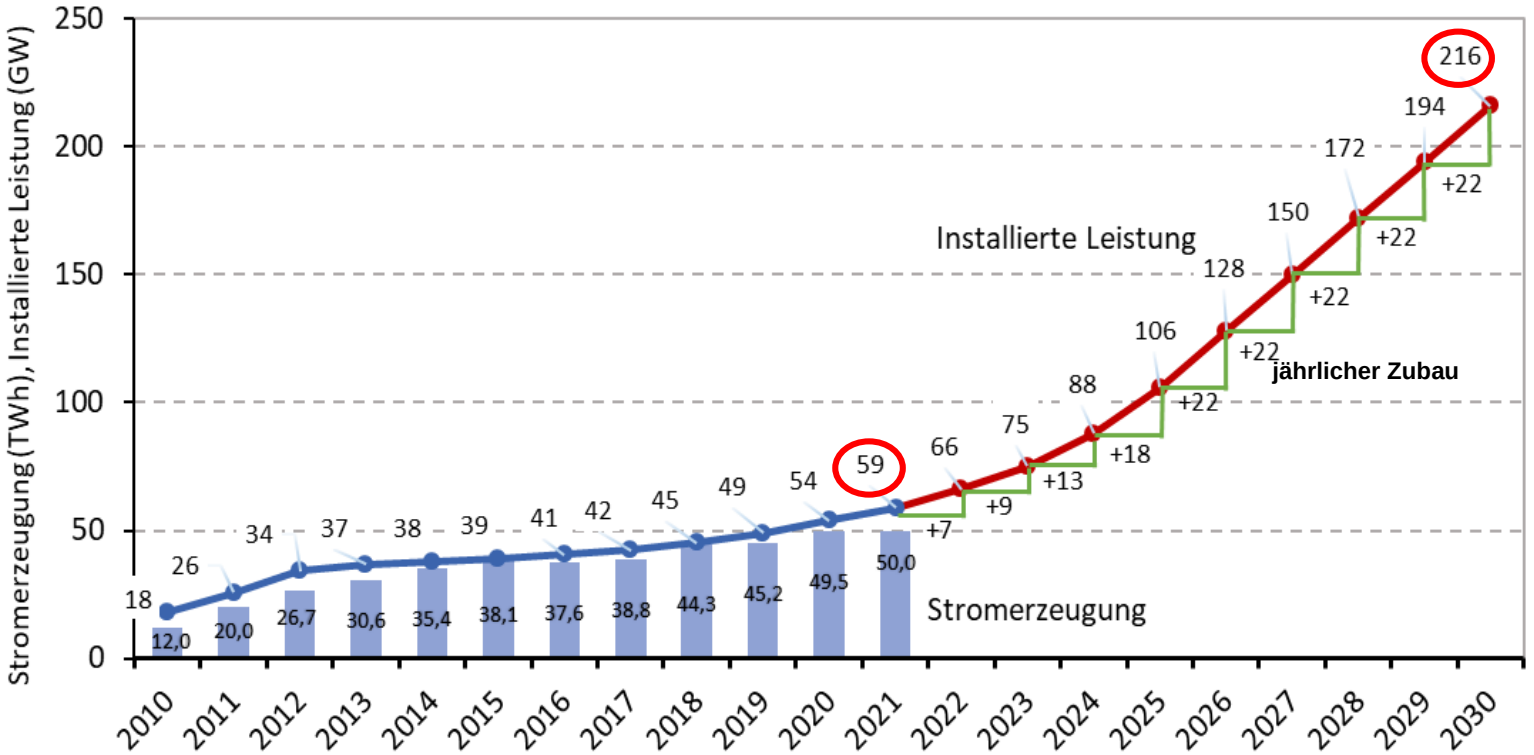
Quelle: Marktmonitoring Bioenergie 2022, dena

- für Siedlung und Verkehr: 14% der Fläche
- für Energiepflanzen: 6,5% der Fläche
  aufgeteilt in
  - 4,2% für Biogas (Mais, Silage)
    erzeugt 4% (23 TWh/a) des aktuellen Strombedarfs (615 TWh/a)
  - 1,3% für Biodiesel (Raps etc.)
  - 0,1% für Holz
  - 0,9% für Bioethanol
- für Photovoltaik (450 GWp in 2045):
  0,6% der Fläche
  - d.h. 30 m² pro Person
  - davon können 50 % auf die Dächer
  - in BaWü wurden in 2018 erst 14% der Dächer genutzt

* FhG ISE; Energy-Charts

PV in Deutschland

Ziel: 80% EE-Strom in 2030 → 200 GWp installiert



Grafik: ZSW

Jährlicher PV-Zubau
(angestrebt im EEG-Osterpaket)

- 2021 5,6 GWp
- 2023 9 GWp
- 2026 22 GWp

Ziel 2030

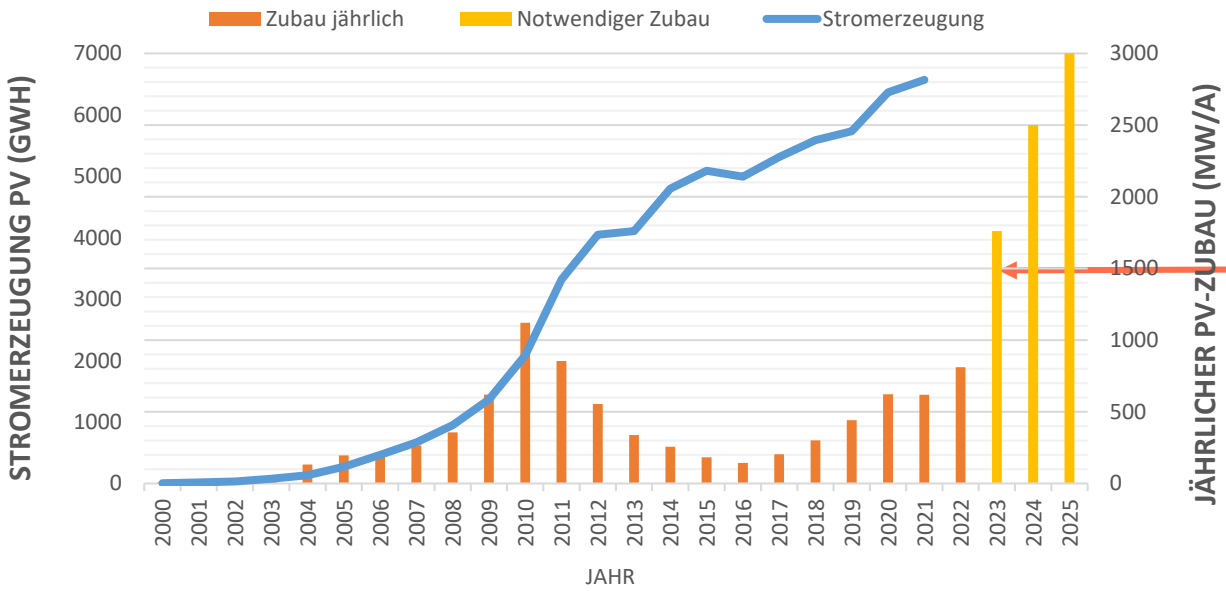
- 80% der Stromversorgung aus Erneuerbaren Energie (Osterpaket)

Ziel 2035

- 30% der Stromversorgung sind aus Photovoltaik (PV Strategie 10.3.2023)

Entwicklung der PV in Baden-Württemberg

Ziel: ab 2026 durchschnittliche ca. 4000 MW/Jahr (Forderung des Solar Cluster BW e.V.)



1-10.2023
Zubau in BW 1505 MW

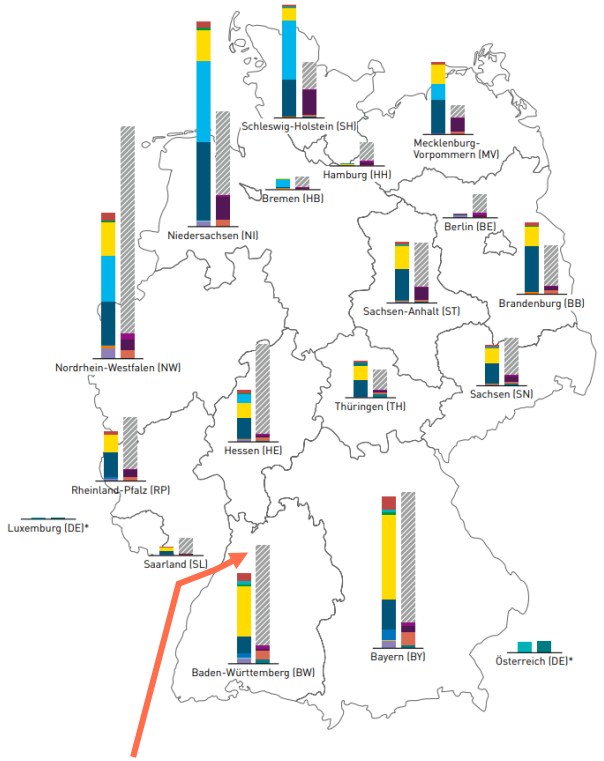
Quellen:
Solar Cluster BW,
Marktstammdatenregister,
UM Baden-Württemberg,
www.solarbranche.de,
Stand: 3.11.2023

Beispielrechnung für 4000 MW/Jahr:

erfordert **pro Tag** die Installation von

- 350 mittleren Dachanlagen (~10 kWp) — 1300 MW
- 10 Anlagen auf Industriedächern oder PV überdachtem Parkplatz (~350 kWp) — 1300 MW
- 1 Freiflächenanlage (~4 MWp) — 1400 MW

Energiebilanz Szenario B 2037
(PV BW von 10 GWp in 2023 auf 45,7 GWp in 2037)



Zum Vergleich -
Netzentwicklungsplan:
bei 2,6 GW/a noch eine Stromlücke von 25 GWh/a in 2037 in BaWü