



# Niedersachsen in die Sonne: Die Solarenergie in der Energiewende

Prof. Dr.-Ing. Rolf Brendel<sup>1,2</sup>  
Dr. R. Niepelt<sup>1</sup>, Dr. D. Bredemeier<sup>2</sup>, P. Pärisch<sup>1</sup>

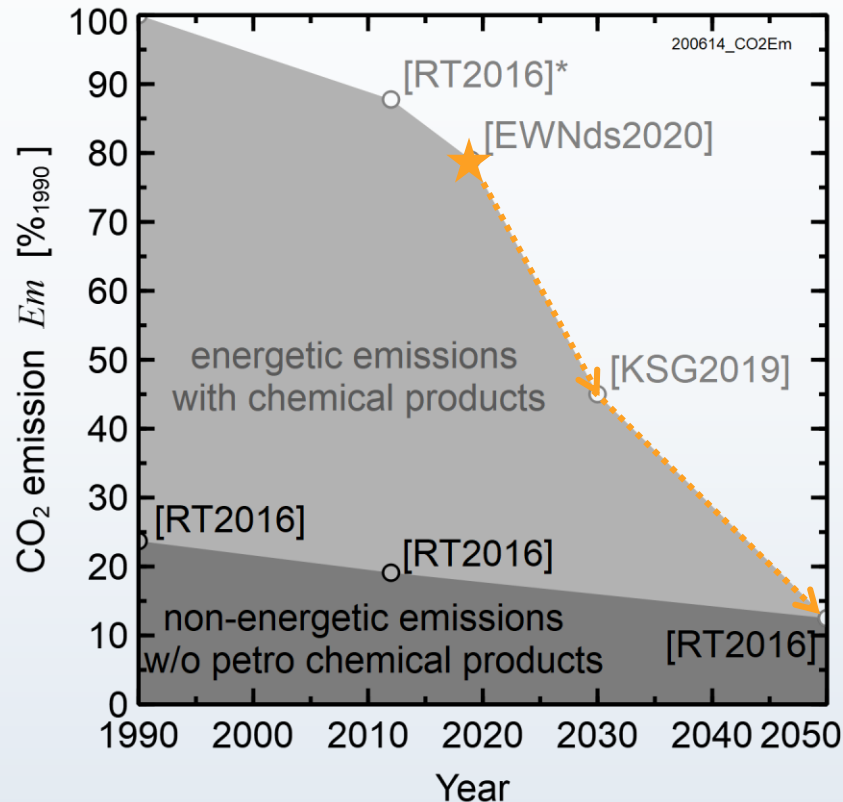
<sup>1</sup>Institut für Solarenergieforschung Hameln

<sup>2</sup>Institut für Festkörperphysik, Leibniz Universität Hannover

[r.brendel@isfh.de](mailto:r.brendel@isfh.de)  
[www.isfh.de](http://www.isfh.de)

# Dürreschäden in unseren Wäldern \\ Weserbergland





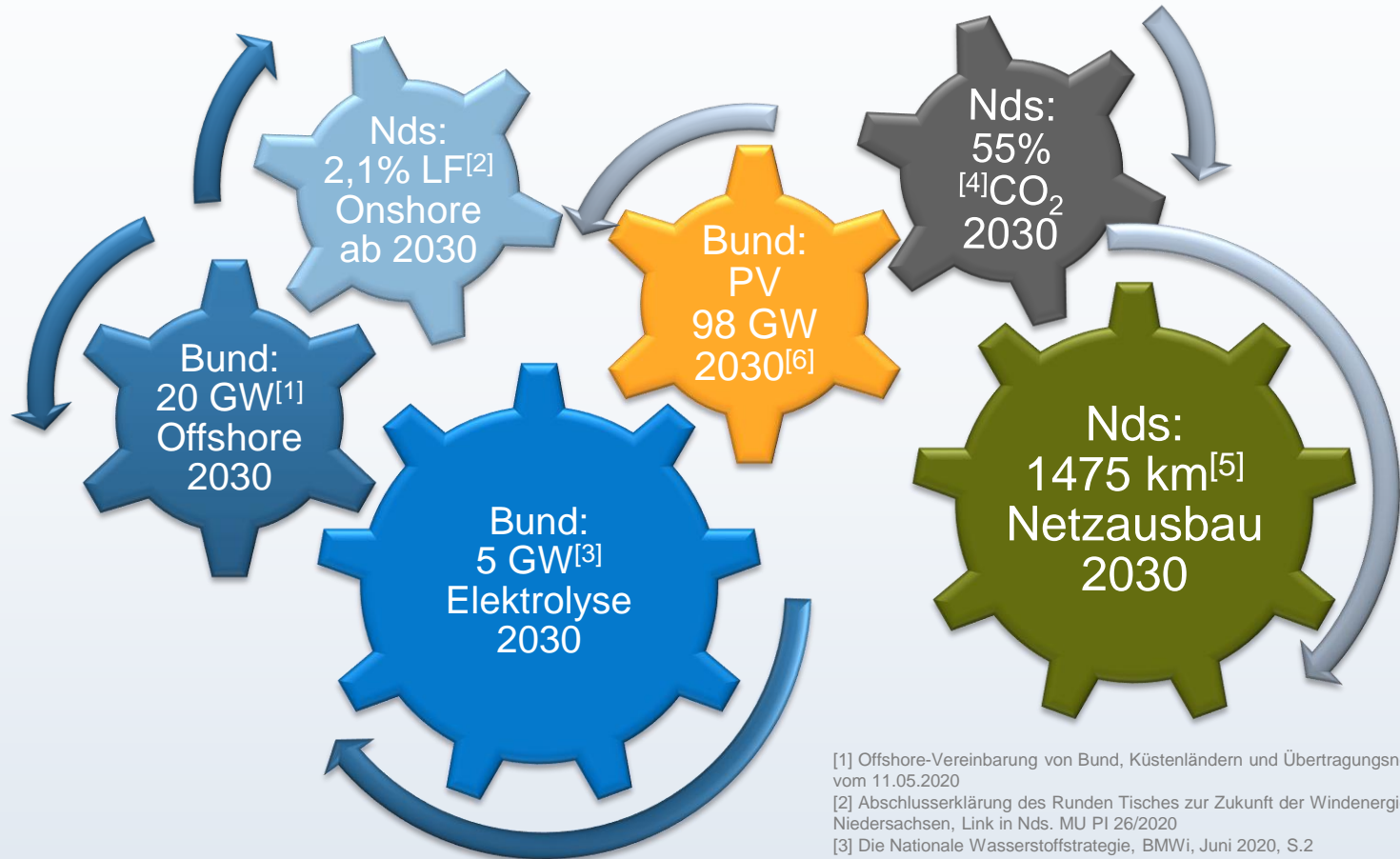
- Emissionen Energiesystem
- Nichtenergetische Emissionen
- Ziele 2050 [RT2016]  
12.5% nichtenerg. Emissionen  
0% Energiesystem

[RT2016] M. Faulstich et al., Szenarien zur Energieversorgung in Niedersachsen im Jahr 2050 - Gutachten -. (Nds. Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz, Hannover, 2016). \* Korrigiert auf Referenzwert von 101 Mt CO<sub>2</sub>-Emissionen in 1990.

[KSG2019] Klimaschutzgesetz der Bundesregierung

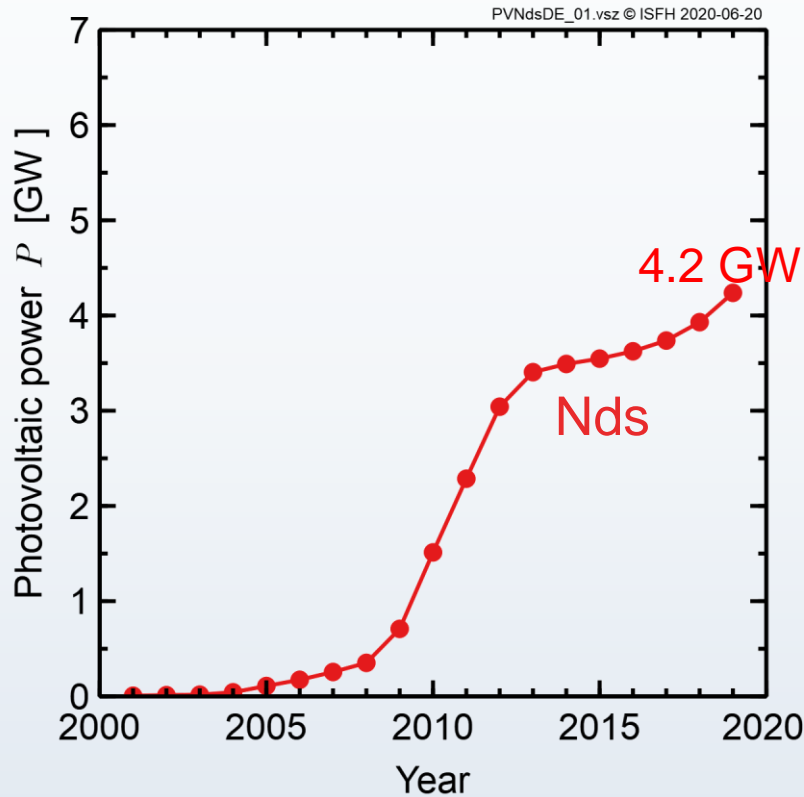
[EWNds2020] Energiewendebericht 2019, (Nds. Ministerium für Umwelt, Energie, und Klimaschutz, Hannover, 2019)

# Pläne für das Energiesystem in 2030

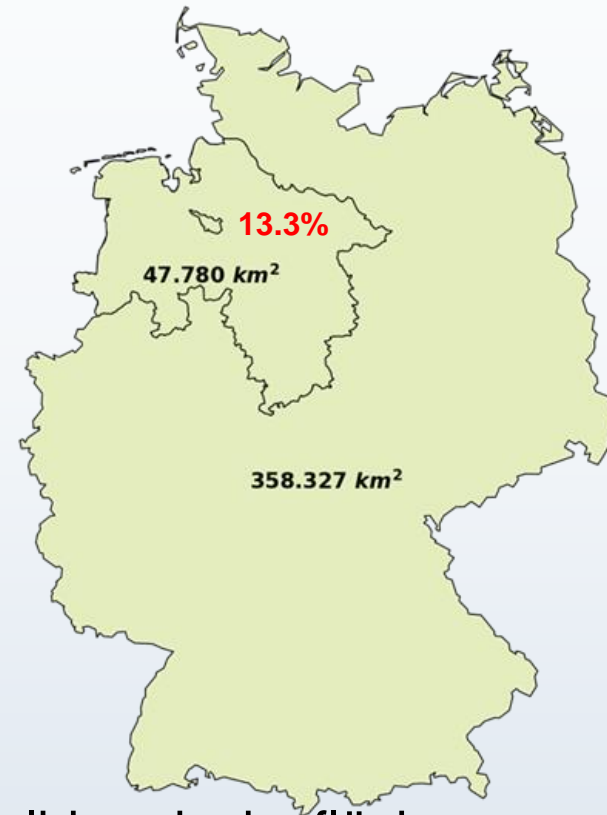


- [1] Offshore-Vereinbarung von Bund, Küstenländern und Übertragungsnetzbetreiber vom 11.05.2020  
[2] Abschlusserklärung des Runden Tisches zur Zukunft der Windenergie in Niedersachsen, Link in Nds. MU PI 26/2020  
[3] Die Nationale Wasserstoffstrategie, BMWi, Juni 2020, S.2  
[4] Dts. Treibhausgasminderungsziele im Klimaschutzgesetz, Dez.2019  
[5] Ergebnisse des Treffens am 24. Mai 2019 in Hannover von Bundesminister Altmaier mit den Länderminister/innen, dem Präsidenten der Bundesnetzagentur sowie den Geschäftsführern der Übertragungsnetzbetreiber zum vorausschauenden Controlling des Netzausbaus  
[6] Klimaschutzprogramm 2030 zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050 vom 8.10.2019, S. 39

# Photovoltaik im Flächenland Niedersachsen

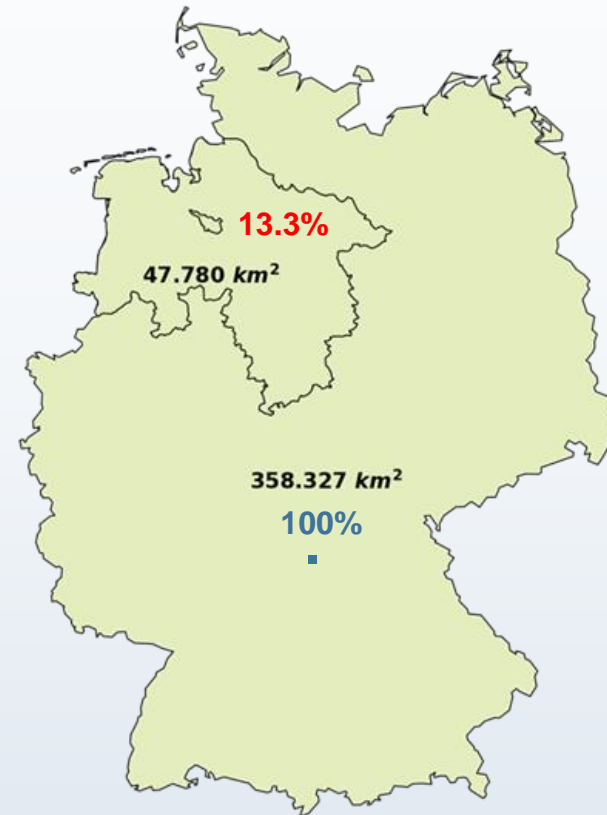
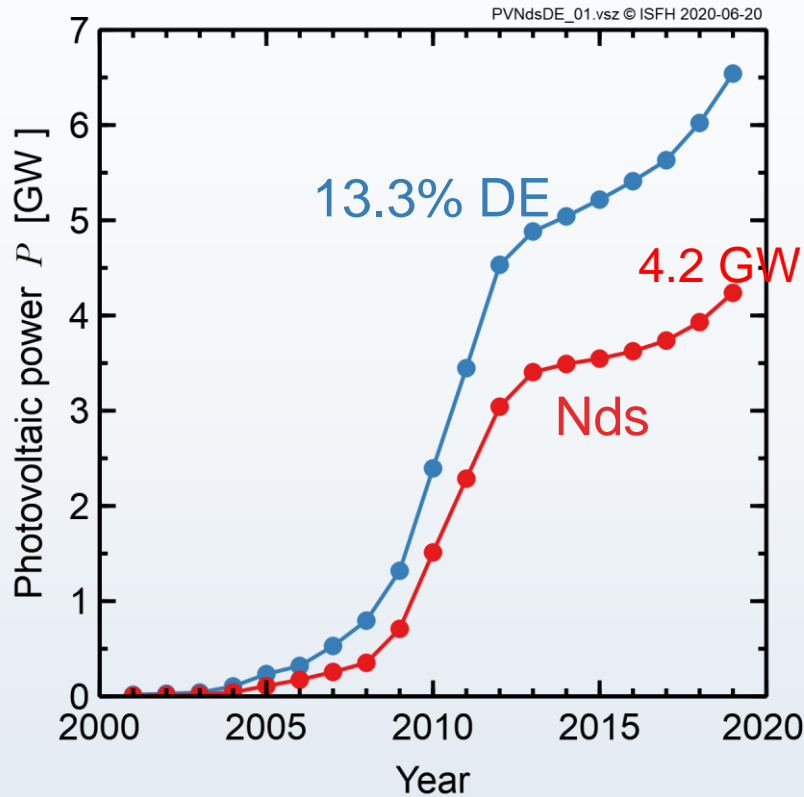


PV Ausbau in Nds.  
betrug 2019 0,3 GW  
oder 7%



Solidarprinzip: flächenproportionale  
Bedarfsdeckung in DE

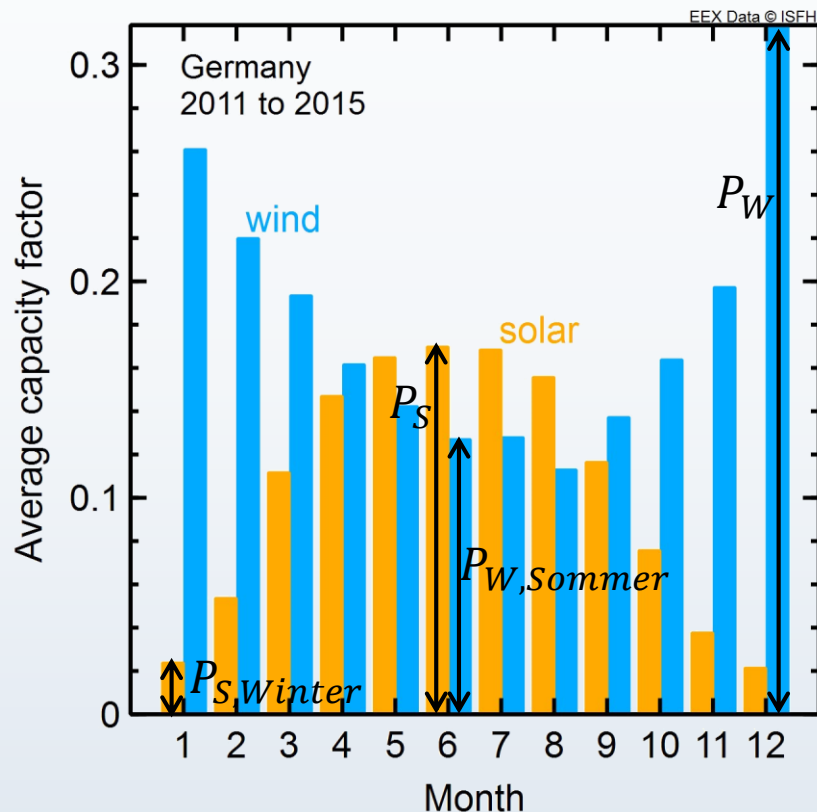
# Photovoltaik im Flächenland Niedersachsen



2019: PV Ausbau stieg um **8%** Solidarprinzip: flächenproportionale  
Bedarfsdeckung in DE

# Sonne und Wind

## \ Ein harmonisches Paar



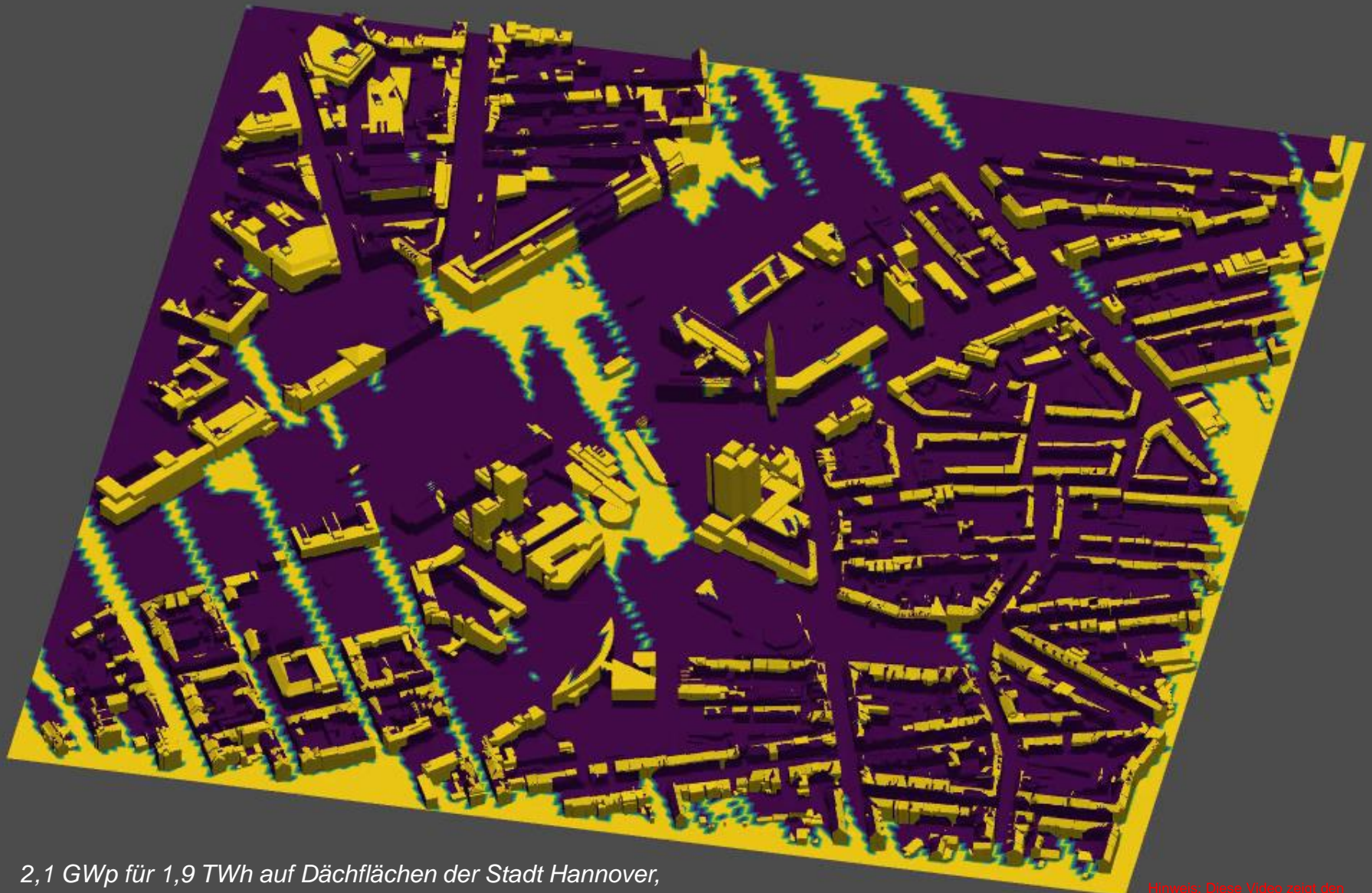
Berechnet aus historischen Einspeisedaten der Leipziger Strombörse EEX

- Solar  $P_{S,Winter} = 0,13 P_S$
- Wind  $P_{W,Sommer} = 0,4 P_W$
- Sei die Summe der Leistungen im Sommer und im Winter gleich
  - $\Rightarrow P_W + 0,13 P_S = P_S + 0,4 P_W$
  - $\Rightarrow \frac{P_S}{P_W} = 0,69$
  - $\Rightarrow \frac{W_S}{W_W + W_S} = \frac{P_S \times 1000h}{P_S \times 1000h + P_W \times 2500h} = 0,22$
- Saisonaler Speicherbedarf minimal für **20% Solarenergie**  
Heute deckt PV 1,1% in Nds.
- Faktor  $18 \times 4,2 \text{ GW} \rightarrow 75 \text{ GW}$

# Solarstrompotenzial

Hier im Fokus: Die Dächer in Niedersachsen





2,1 GWp für 1,9 TWh auf Dächflächen der Stadt Hannover,  
wenn 70% der besten Dächer zu 70% belegt würden

Hinweis: Diese Video zeigt den  
Schattengang im Bereich Bahnhofs  
Hannover an einem Herbsttag.  
Das Video läuft im pdf-File leider nicht



Leibniz  
Universität  
Hannover



# Dächer: 64 GW\* Potenzial in Nds. // Einfamilienhaus in Hameln

\* M. Faulstich et. al., Szenarien zur Energieversorgung in Niedersachsen im Jahr 2050. (Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz, Hannover, 2016), Anhang A, S. 11-15.



# Freifläche: Potenzial in Nds. 1144 GW\* \\ Anlage in Fischbeck

\* M. Faulstich et. al., Szenarien zur Energieversorgung in Niedersachsen im Jahr 2050. (Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz, Hannover, 2016), S. 11-15.



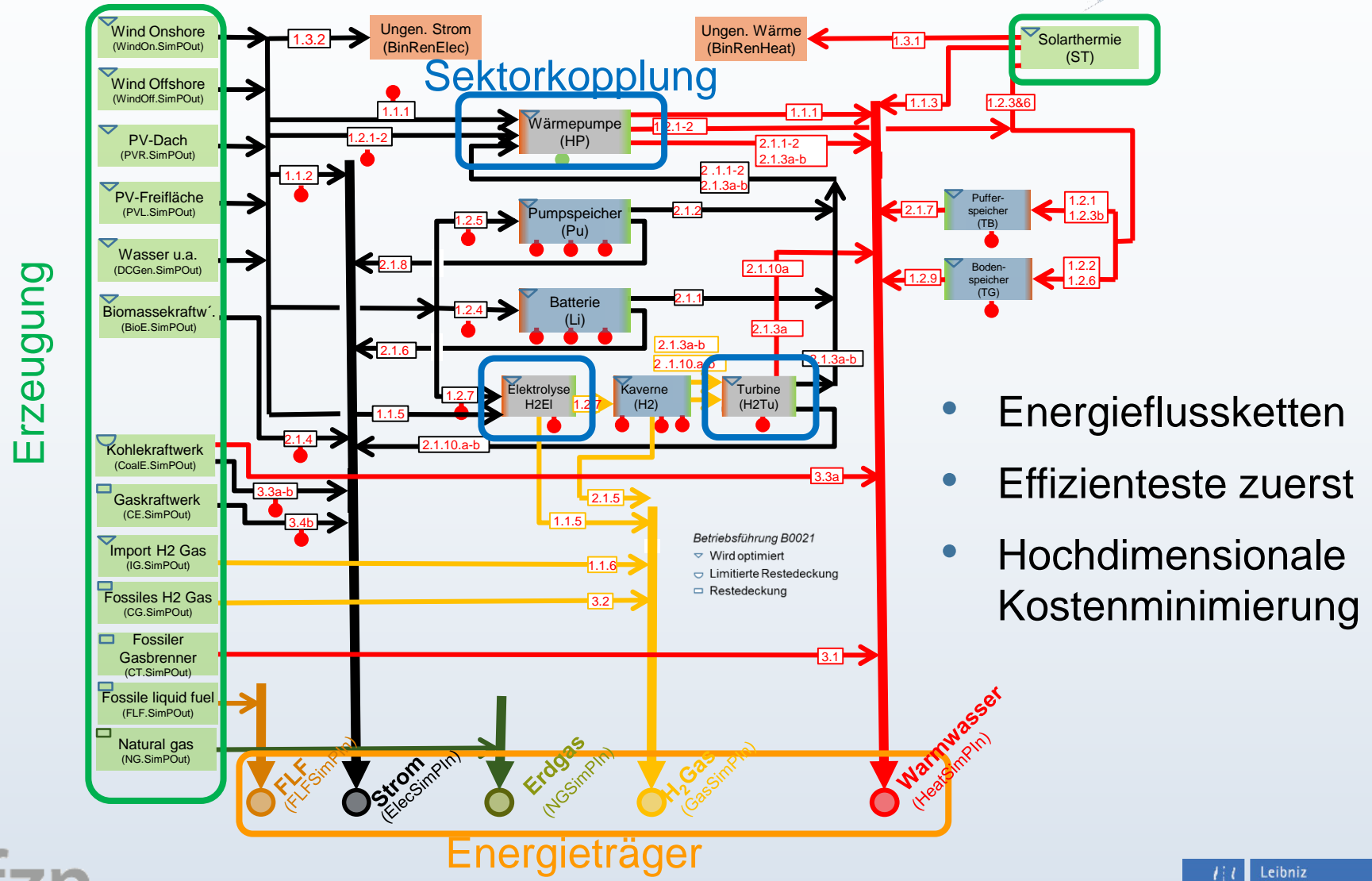
# Und wieviel vom Potenzial sollen wir nutzen?

Simulation des Nds. Energiesystems  
Programm ReLoS (Renewable Lower Saxony)

Rechnet 2018 bis 2050 in stündlicher Auflösung  
mit historischen Wetterdaten und fluktuierendem Verbrauch

# ReLoS: Renewable Lower Saxony

## \\ Kostenoptimierte Bereitstellung Energieträger



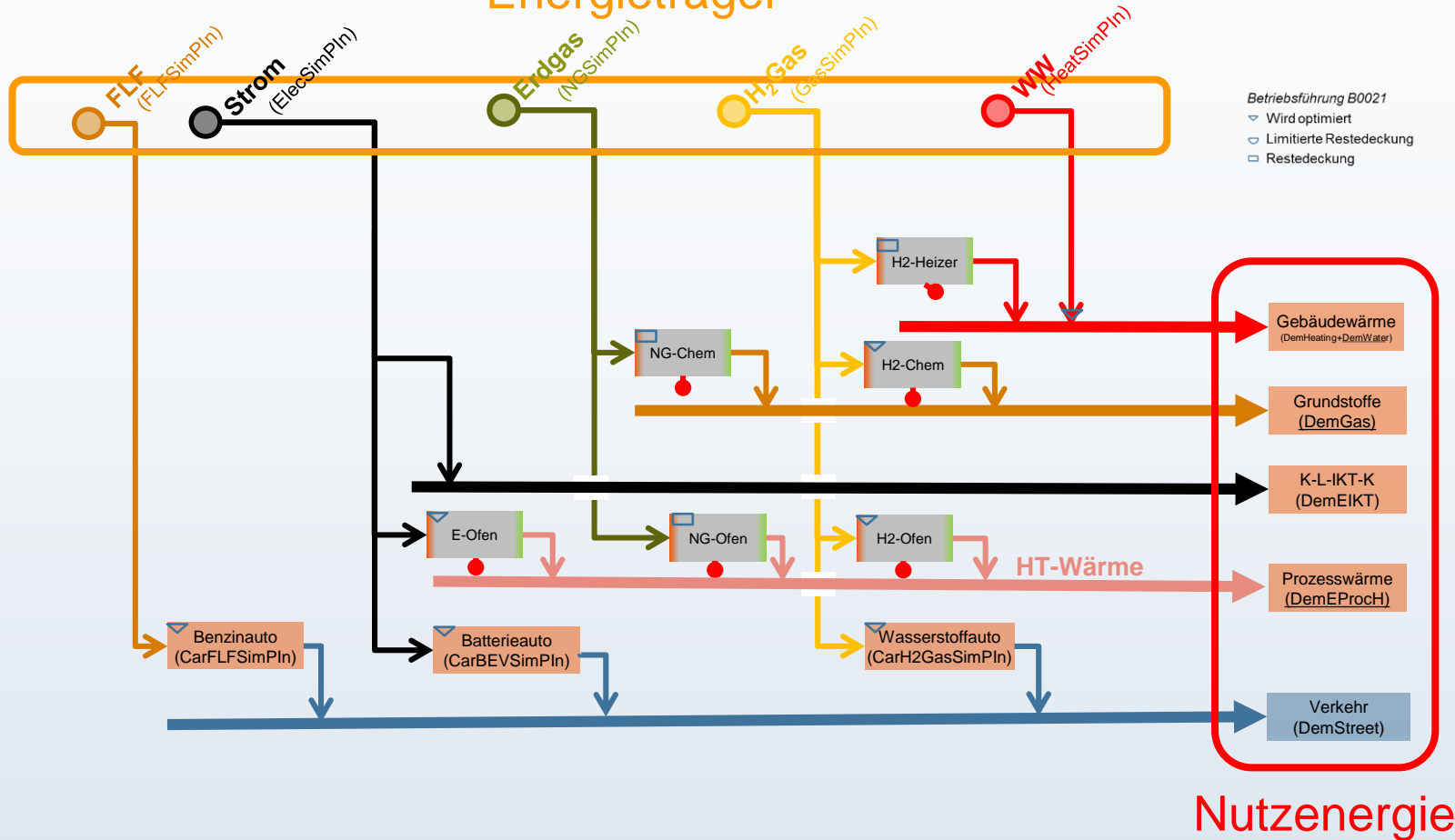
- Energieflusketten
- Effizienteste zuerst
- Hochdimensionale Kostenminimierung

# ReLoS: Renewable Lower Saxony

## \\ Kostenoptimierte Nutzung



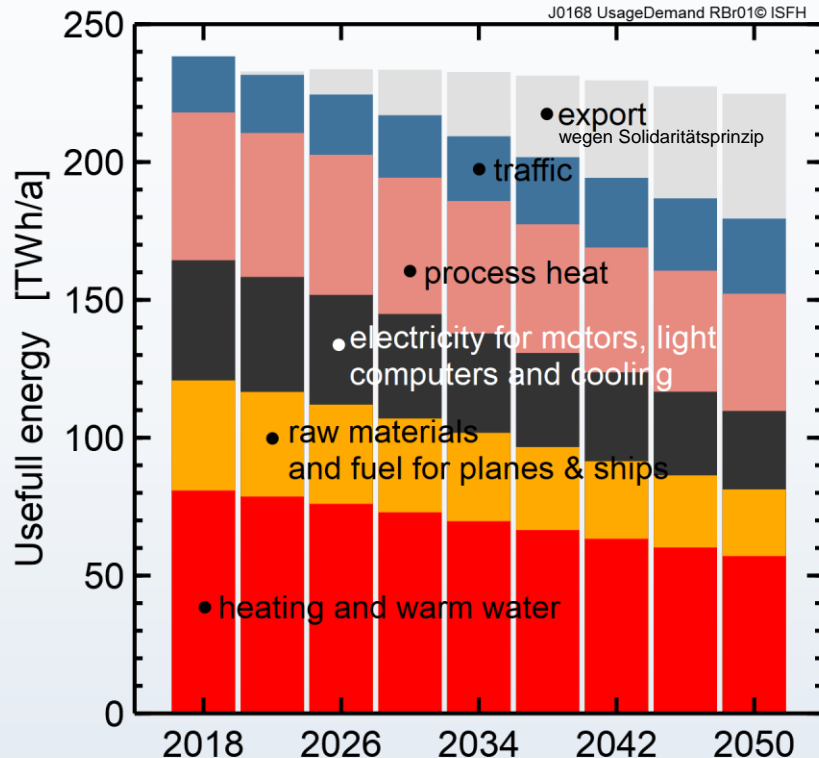
### Energieträger



Betriebsführung B0021  
 ▽ Wird optimiert  
 ◊ Limitierte Restdeckung  
 □ Restdeckung

# Nutzenergie

## \\ Heute und zukünftig



## Viele Einflussgrößen

- Sanierungsrate [1]
- Effizienzgewinne [2]
- Verkehrsentwicklung [3]
- Einwohnerzahl [4]
- Wirtschaftsentwicklung [2]
- Verbrauch 2018 [5]

[1] Steigend von 1%/a auf 2%/a bis 2030, danach 2%

[2] Faulstich et al, Runder Tisch Gutachten 2016

[3] Bundesverkehrswegeplan (BVWP) 2030

[4] Hochrechnung des Stat. Bundesamtes (Mittlere Variante)

[5] AG Energiebilanzen (AGEB) 2018

# Randbedingungen

- Wind Offshore auf 54 GW in 2050
- Wind Onshore max 20 GW in 2030 und max 30 GW in 2050
- PV Freifläche linear auf 15 GW bis 2050.
- Importierter grüner H<sub>2</sub> jederzeit in beliebiger Menge verfügbar



# Kosten des Energiesystems in 2050

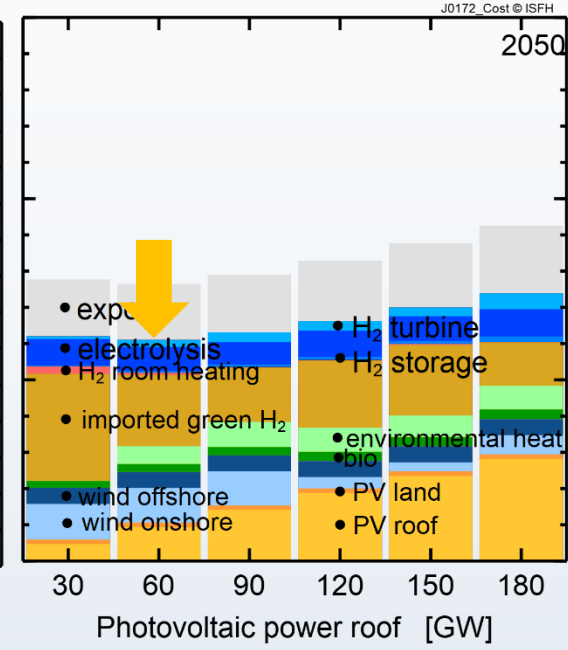
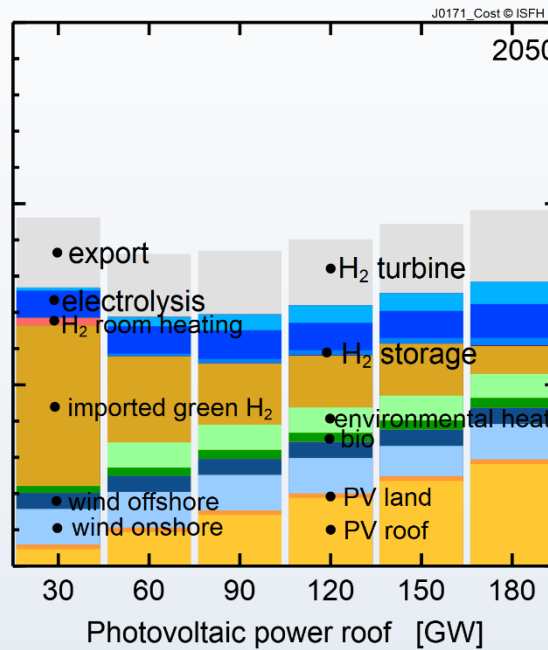
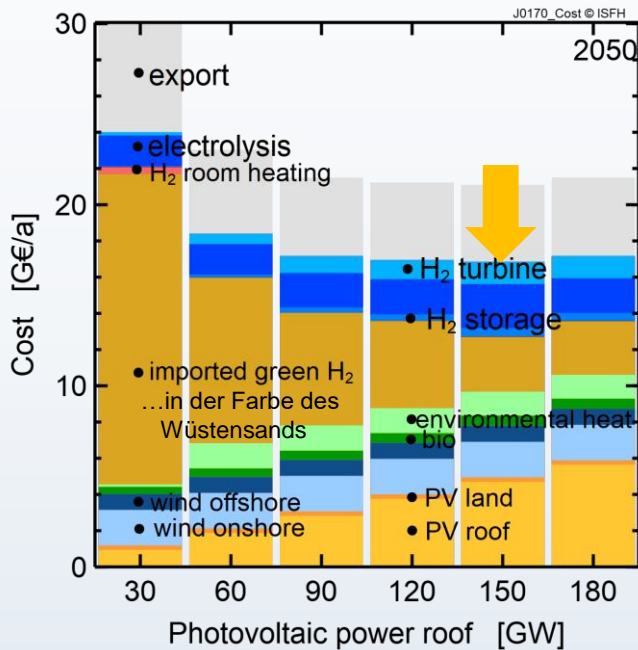
## \\ PV-Leistung variiert \\ grüne Wiese



H<sub>2</sub> für 5,00 €/kg  
12,7 €/ct/kWh

...für 2,50 €/kg  
6,3 €/ct/kWh

...für 1,67 €/kg  
4,2 €/ct/kWh



Jeweils flaches Kostenoptimum

(150±15) bis (60±15) GW Photovoltaik für Nds. kostengünstig

# Energie nach Quellen in 2050

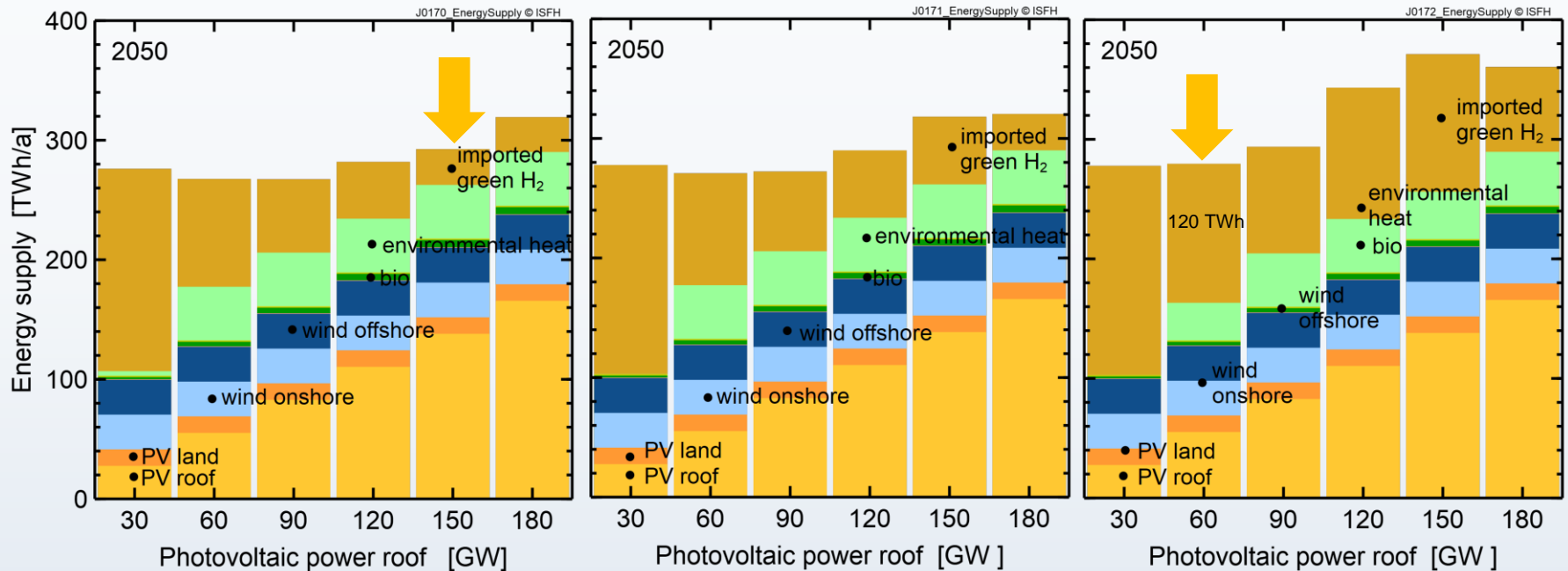
## \\ PV-Leistung variiert \\ grüne Wiese



H<sub>2</sub> für 5,00 €/kg  
12,7 €ct/kWh

...für 2,50 €/kg  
6,3 €ct/kWh

...für 1,67 €/kg  
4,2 €ct/kWh



$\frac{\text{Solar}}{\text{Wind} + \text{Solar}} \gg 22\%$  wegen Beschränkung der Windenergie (Randbedingung)

Potential MA und TN je 200 TWh/a<sup>[1]</sup>

„Nur“ 30 GW PV → H<sub>2</sub>-Heizung statt Wärmepumpe

# Verkehr in 2050

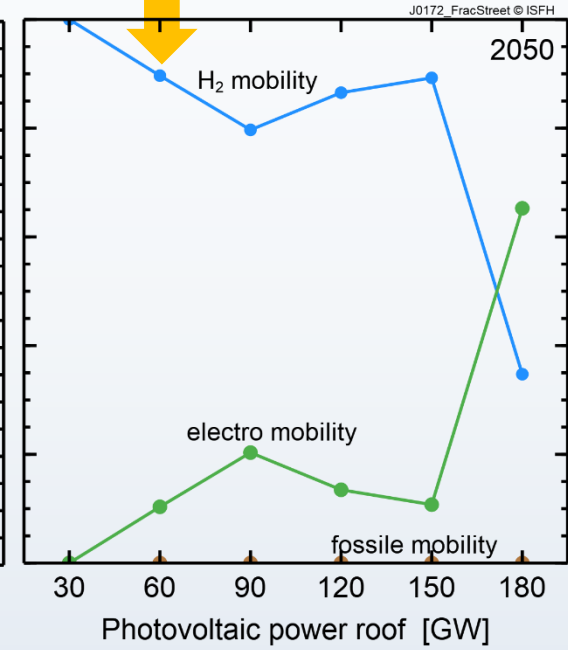
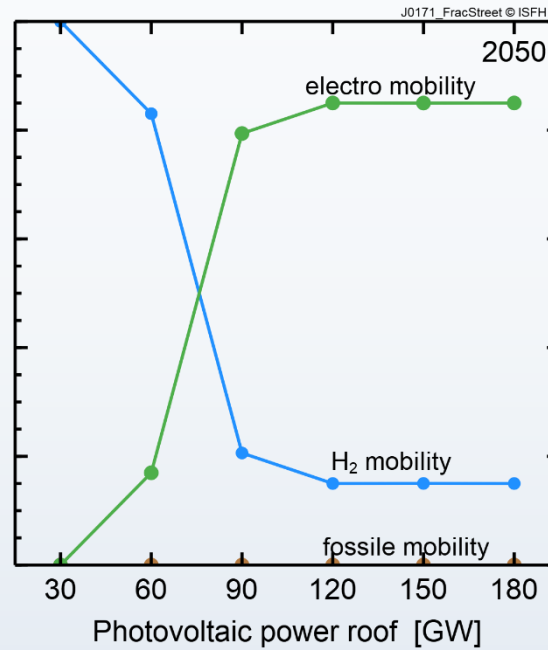
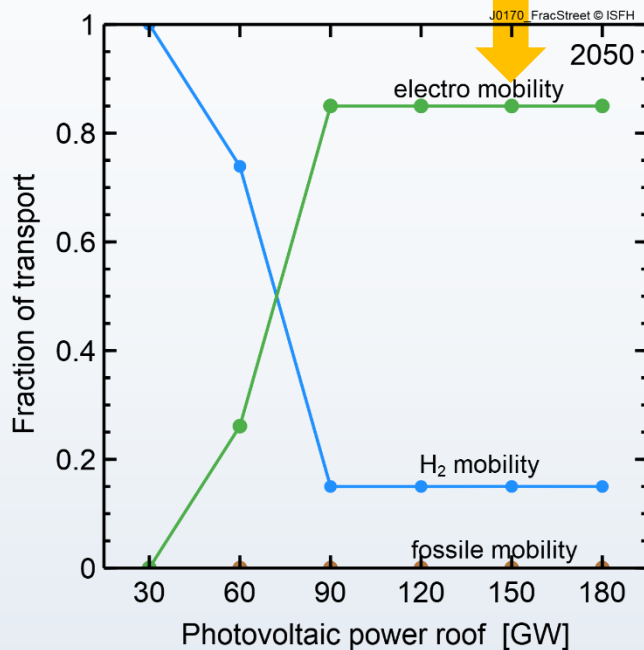
## \\ PV-Leistung variiert \\ grüne Wiese



H<sub>2</sub> für 5,00 €/kg  
12,7 €ct/kWh

...für 2,50 €/kg  
6,3 €ct/kWh

...für 1,67 €/kg  
4,2 €ct/kWh



Mit mehr PV kommt mehr E-Mobilität

H<sub>2</sub>-Importpreis kontrolliert Anteil BEV (10 bis 90%)

# Zukünftiges Energiesystem beginnt nicht auf einer grünen Wiese: Transformationspfad

Nur abgeschriebene Komponenten werden ersetzt

Weitere Randbedingungen: Kohle- und Nuklearausstieg

PV auf der Freifläche für 550 €/kW (2018) → 291 €/kW (2050)

PV auf dem Dach für 900 €/kW (2018) → 546 €/kW (2050)

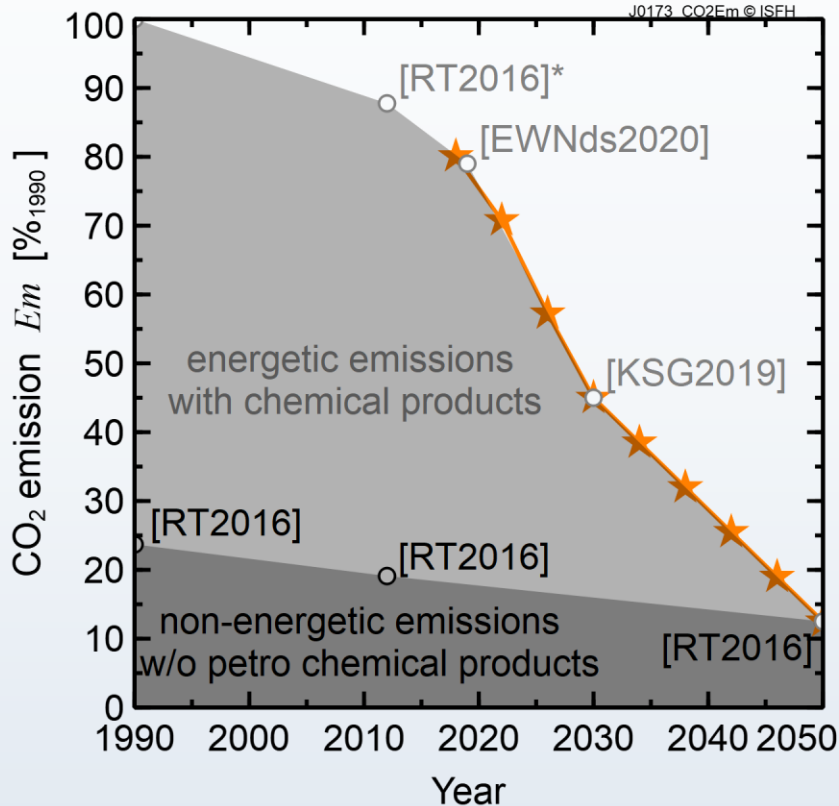
Annahme, dass grüner H<sub>2</sub> *sehr* günstig importiert werden kann:  
für 5 €/kg (2018) → 1,67 €/kg (2050)

# Einfluss Ausbauraten auf Zielerreichung

## \\ Limitierte Ausbauraten (für alle neuen Komponenten)

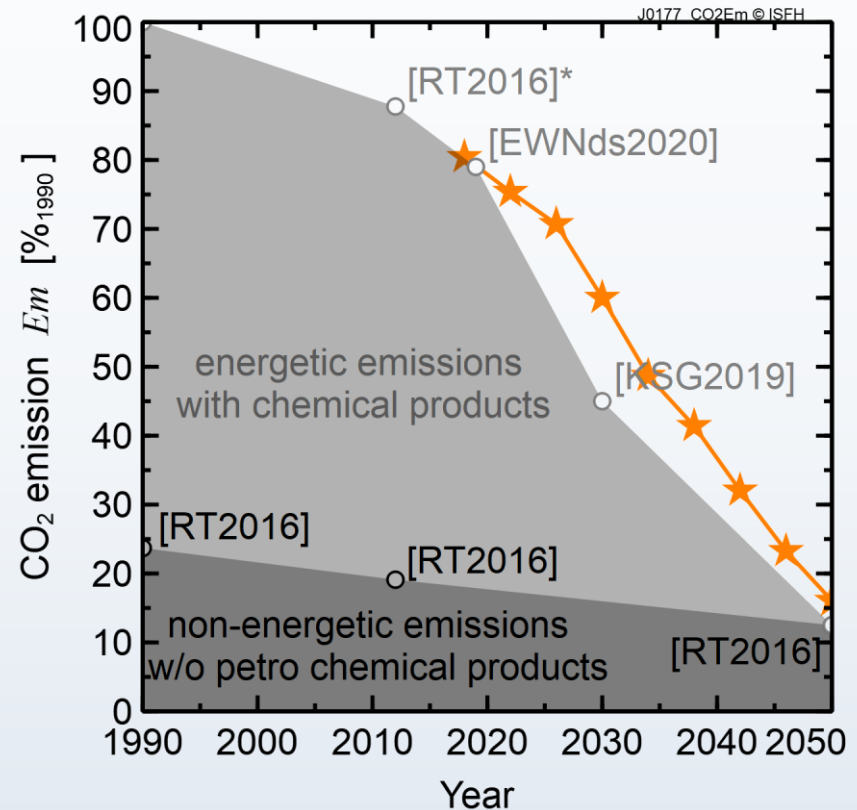


Ausbauraten höchstens 30%/a



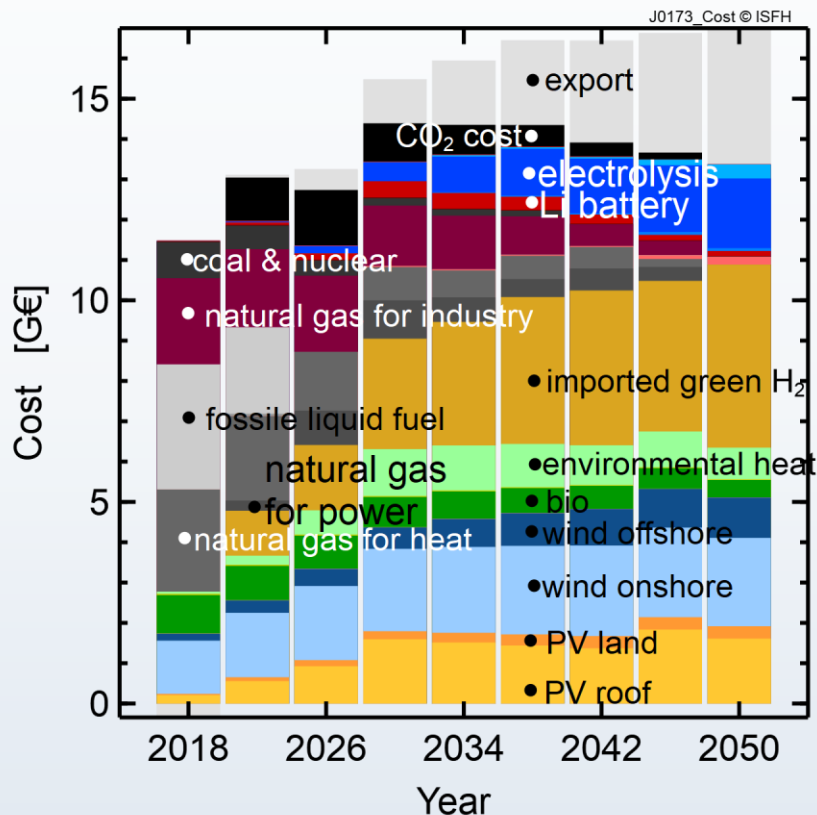
erreicht Klimaziele

Ausbauraten höchstens 10%/a



verfehlt Klimaziele

Ausbauraten höchstens 30%/a



CO<sub>2</sub>-Kosten steigen auf 35€/t in 2025 danach konstant

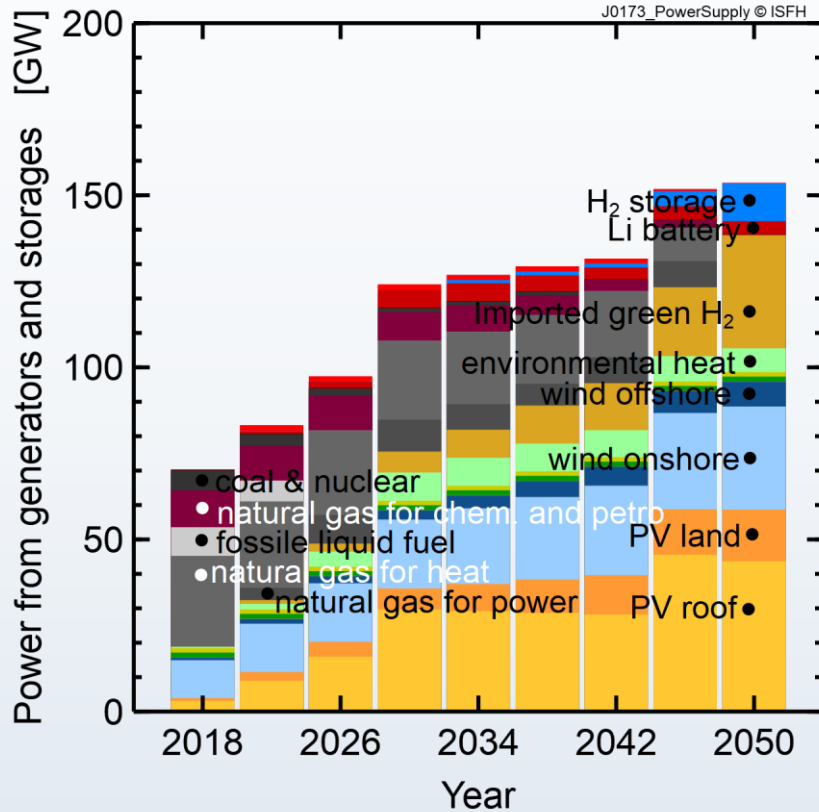
- Annahmen:  
Kosten importiertes H<sub>2</sub> sinken von 5,0 €/kg in 2018 auf 1,67 €/kg in 2050
- H<sub>2</sub> Importkosten dominieren
- 14,4G€ / 226 TWh  
= 6 ct/kWh in 2050  
Energieträgerkosten
- 77 €/t CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten relativ zu 2018

# Blick auf 2030

## \\ 30 GW PV

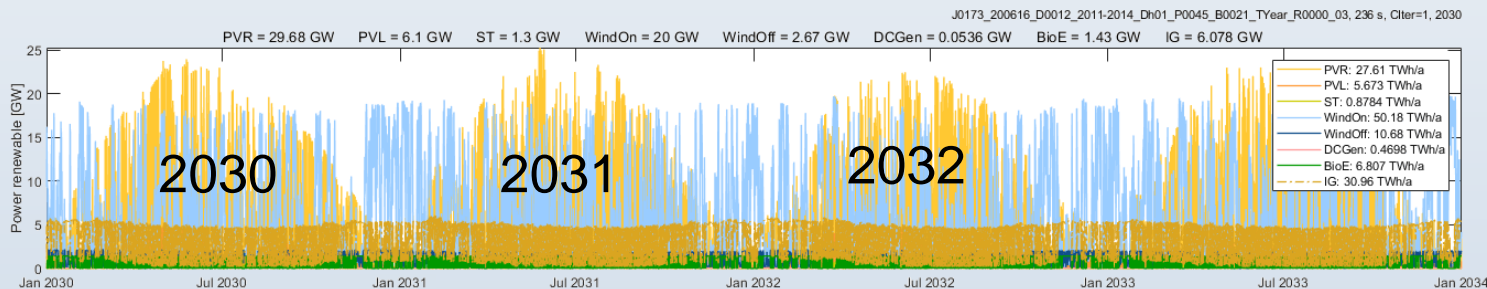


Ausbauraten höchstens 30%/a



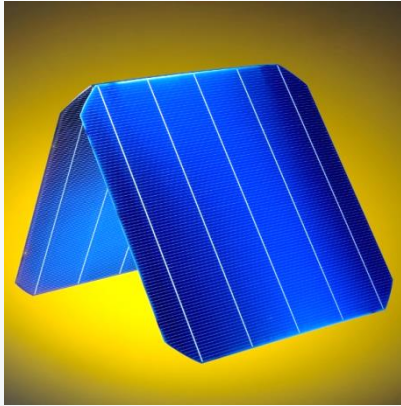
Auch für H<sub>2</sub>-Import-dominiertes Szenario werden in 2030 benötigt:

- 36 GW PV in Nds.  
→ 3,2 GW/a aufbauen  
(viel mehr wenn wenig importiertes H<sub>2</sub> zur Verfügung steht)
- 12 GW<sub>th</sub> Wärmepumpen  
→ 1,1 GW<sub>th</sub>/a aufbauen
- 20 GW Wind Onshore  
(36 GW ohne Randbedingung Wind Onshore ≤ 20GW, dann weniger PV möglich)



# Rasanter Fortschritt der Zelltechnologie

## \\ Wichtige ISFH-Beiträge

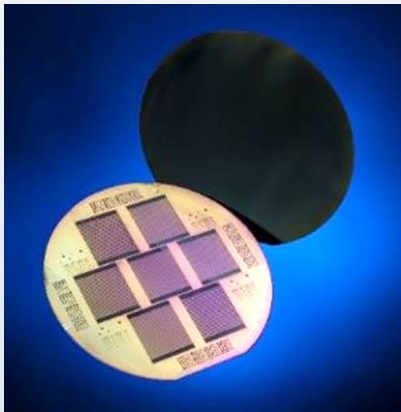


2014: 21,2% Weltrekordzelle mit Industrie-Prozess

- $\text{AlO}_x/\text{SiN}_y$  hinten
- Bifazialer PERC+ Prozess in Kooperation mit Industriepartnern

2018: 26,1% effiziente Weltrekord-Laborzelle

- POLO-Kontakt in Kooperation mit LUH und Industriepartnern



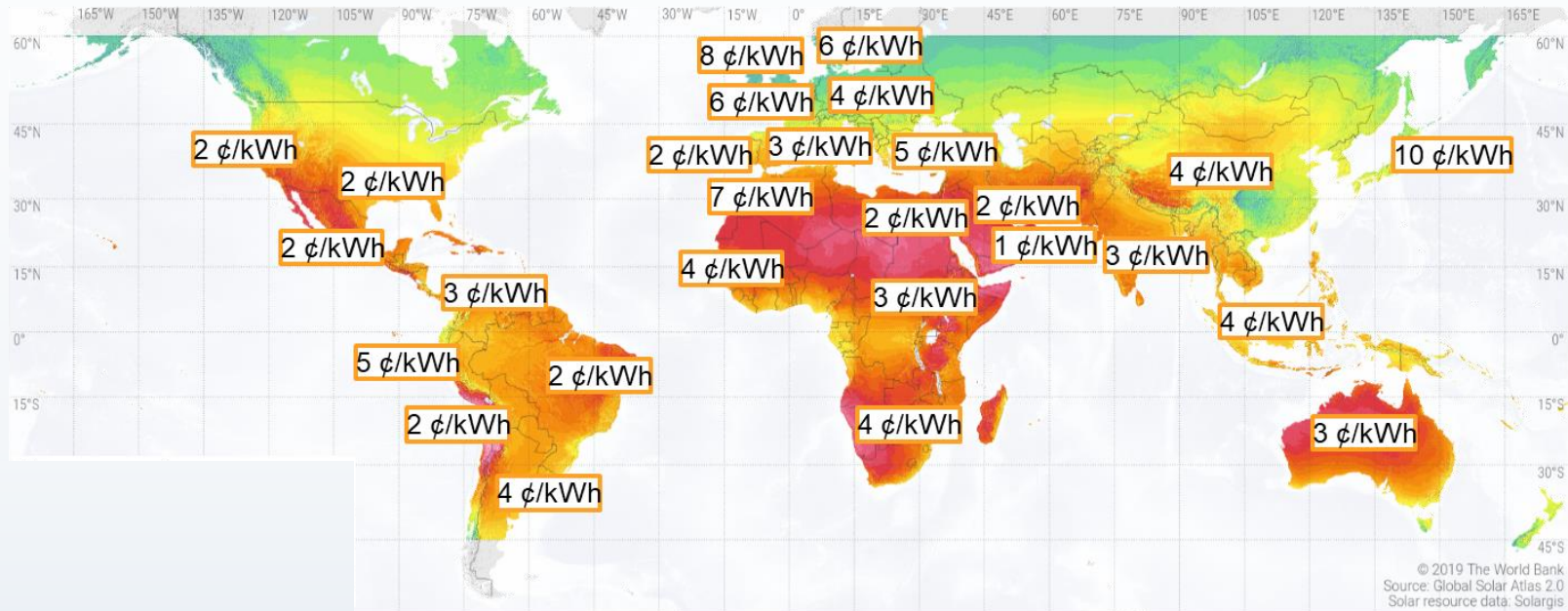
2017: 34,5% effiziente Laborzelle

- Trippelzelle in Kooperation mit NREL/USA

PV-Technologie hat große bisher kaum erforschte Verbesserungspotenziale welche den Platzbedarf deutlich senken werden



# Successful PV bids as of May 2020



Long-term average of global horizontal irradiation (GHI)

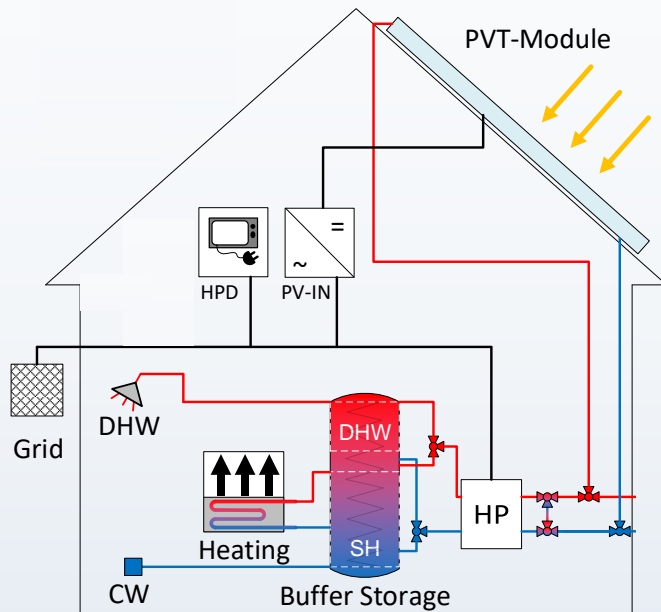


<https://reneweconomy.com.au/chile-solar-auction-sets-new-record-low-for-solar-pv-85114/>  
<https://www.pv-magazine-australia.com/2018/06/12/arizona-delivers-solar-at-half-price-of-existing-coal-generation/>  
<https://cleantechnica.com/2018/06/14/new-us-solar-record-2-155-cents-per-kwh-400-mwh-of-energy-storage/>  
[https://www.greentechmedia.com/articles/read/mexican-solar-record-low-price-latin-america#gs.mBL\\_eMZA](https://www.greentechmedia.com/articles/read/mexican-solar-record-low-price-latin-america#gs.mBL_eMZA)  
<https://www.pv-magazine.com/2019/07/22/solar-at-17-30-mw-in-brazils-auction-is-it-a-world-record/>  
<https://www.bnamericas.com/en/news/electric-power/winners-announced-for-argentinias-renovar-2/>  
<https://renewablesnow.com/news/solar-pv-gets-lowest-strike-prices-in-uks-cfd-auction-465462/>  
<https://www.pv-magazine.com/2020/02/19/german-pv-tender-delivers-record-low-solar-power-price-of-e0-0355-kwh/>  
<https://www.pv-magazine.com/2019/07/12/china-auction-allocates-subsidies-for-22-7-gw-of-solar-with-lowest-bid-of-0-0407-kwh/>  
<https://www.pv-magazine.com/2017/10/04/saudi-arabias-300-mw-solar-tender-may-conclude-with-lowest-bid-ever/>  
<https://www.pv-tech.org/news/abu-dhabi-claims-new-record-low-solar-tariff-of-us0.0135-kwh-for-2gw-al-dha>  
<https://pv-magazine-usa.com/2020/01/24/qatars-800-mw-tender-draws-world-record-solar-power-price-of-0-01567-kwh/>  
<https://www.pv-magazine.com/2020/01/27/japans-fifth-solar-auction-delivers-final-lowest-price-of-0-10-kwh/>  
<https://www.pv-tech.org/news/colombia-awards-2-2gw-of-solar-and-wind-in-historic-first-auction>

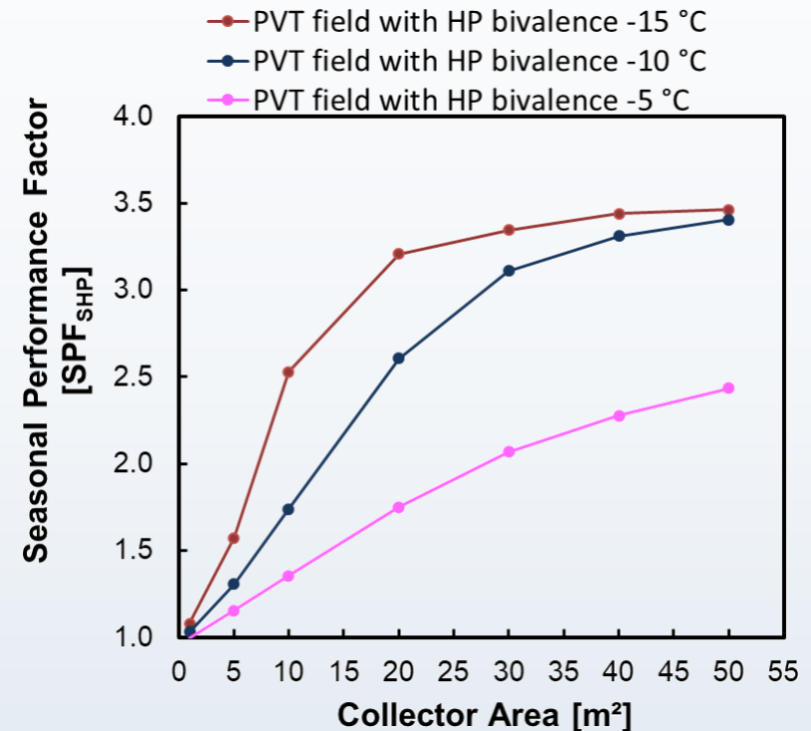
<https://www.pv-tech.org/news/acwa-power-and-saudi-rivalss-6-bids-lowest-for-170mw-morocco-project>  
<https://www.greentechmedia.com/articles/read/explaining-latin-americas-impending-solar-boom1#gs.YuJovxE>  
<https://www.pv-tech.org/guest-blog/unravelling-indias-2-44-rupee-solar-tariff-refined-sensibility-or-a-churlis>  
<https://www.saurenergy.com/solar-energy-news/five-winners-in-nhpcss-2-gw-solar-power-projects-tender>  
<https://www.pv-magazine.com/2020/04/03/greek-wraps-up-pv-tender-with-record-breaking-e0-04911-kwh-tariff/>  
<https://www.pv-magazine.com/2018/04/06/engie-wins-senegals-60-mw-pv-tender-with-bids-under-e0-040-kwh/>  
<https://www.pv-tech.org/news/france-approves-720mw-of-solar-as-price-falls-another-5>  
<https://www.pv-tech.org/news/zambia-solar-tender-sets-sub-saharan-price-record>  
<https://renewablesnow.com/news/portugal-reaches-record-low-price-in-14-gw-solar-tender-663688/>  
<https://www.pv-tech.org/guest-blog/ultra-low-solar-bid-of-0.01997-kwh-in-the-us-not-quite-so-sunny>  
[http://hybridpowersystems.org/wp-content/uploads/sites/13/2019/06/4A\\_2\\_HYB19\\_082\\_presentation\\_Hussinger.pdf](http://hybridpowersystems.org/wp-content/uploads/sites/13/2019/06/4A_2_HYB19_082_presentation_Hussinger.pdf)  
<http://taiyangnews.info/markets/malaysia-announces-winning-bidders-for-iss3/>  
<https://www.pv-magazine.com/2019/09/16/acwa-power-offers-african-record-low-0-02526-kwh-for-ethiopian-projects/>  
<https://www.pv-magazine-australia.com/2020/05/01/lcoe-from-large-scale-pv-fell-to-50-per-megawatt-hour-in-six-months/>

Daten und Grafik: R. Niepelt, ISFH

# Der PV-T Kollektor als alleinige Wärmequelle für die Wärmepumpe



(B. Chugani et al., Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme, Bad Staffelstein 2020)

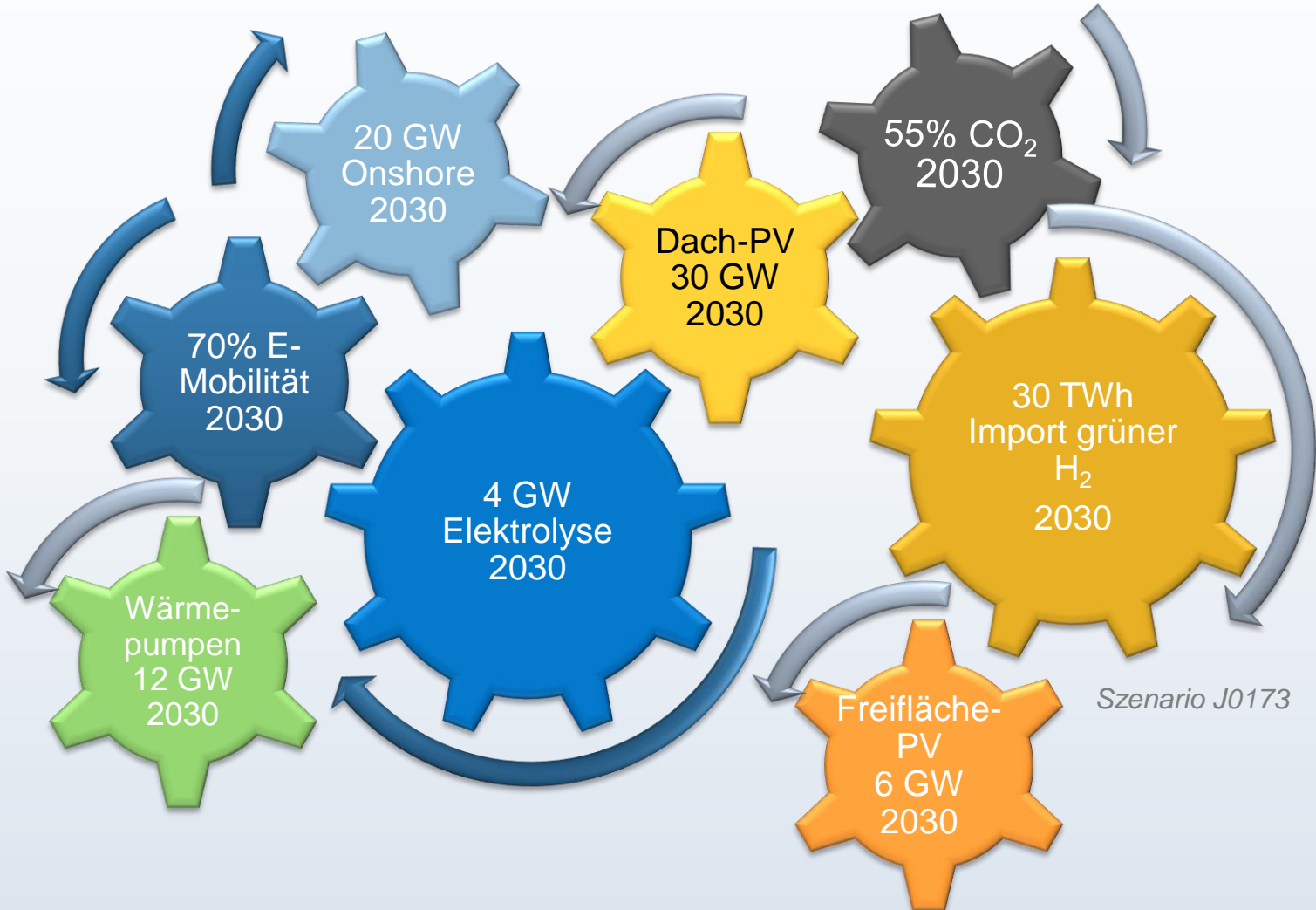


- Keine Ventilatorgeräusche
- Synergetische doppelte Flächennutzung
- Jahresarbeitszahl > 3.2 ab 20 m<sup>2</sup>

- ...heute preiswert in Nds. erzeugt werden:  
→ Freifläche 4 ... 5 €/ct/kWh, Dach 8 ... 12 €/ct/kWh
- ...auf Dächern ohne Flächenkonkurrenz genutzt werden  
→ 60 GW in Nds. in 2050
- ...den erforderlichen Windenergieausbau reduzieren  
→ von 60 auf 30 GW Onshore-Wind in 2050
- ...in Zukunft noch kostengünstiger hergestellt werden  
→ Modulwirkungsgrad steigt von 20 % auf 30 %
- ... Bedarf an importierten Wasserstoff auf erreichbares Maß senken  
→ von 115 auf 30 TWh/a in 2050
- ...die Abhängigkeit von Systemwettbewerbern (RU, CN) reduzieren  
→ Fertigung von PV-Modulen in der EU erforderlich

# Nds. Energiesystem in 2030

## \\ für das hier diskutierte Szenario



# Niedersachsen in die Sonne!

Herzlichen Dank

- MWK für MET-Projektförderung
- M. Schlemminger, F. Peterssen
- R. Hanke-Rauschenbach
- M. Breitner
- C. v. Haaren
- EFZN & KEAN

Kontakt:  
[r.brendel@isfh.de](mailto:r.brendel@isfh.de)  
[www.isfh.de](http://www.isfh.de)