



ISFH-Lab in Hameln/Emmerthal  
Contact: [www.isfh.de](http://www.isfh.de) and [niepelt@isfh.de](mailto:niepelt@isfh.de)

# Die Rolle der Solarenergie in einem gekoppeltem Energiesystem

Raphael Niepelt

Institut für Solarenergieforschung Hameln

# Solarenergie – eine neue Kraft im Wettbewerb...



## Solar Power Will Kill Coal Faster Than You Think

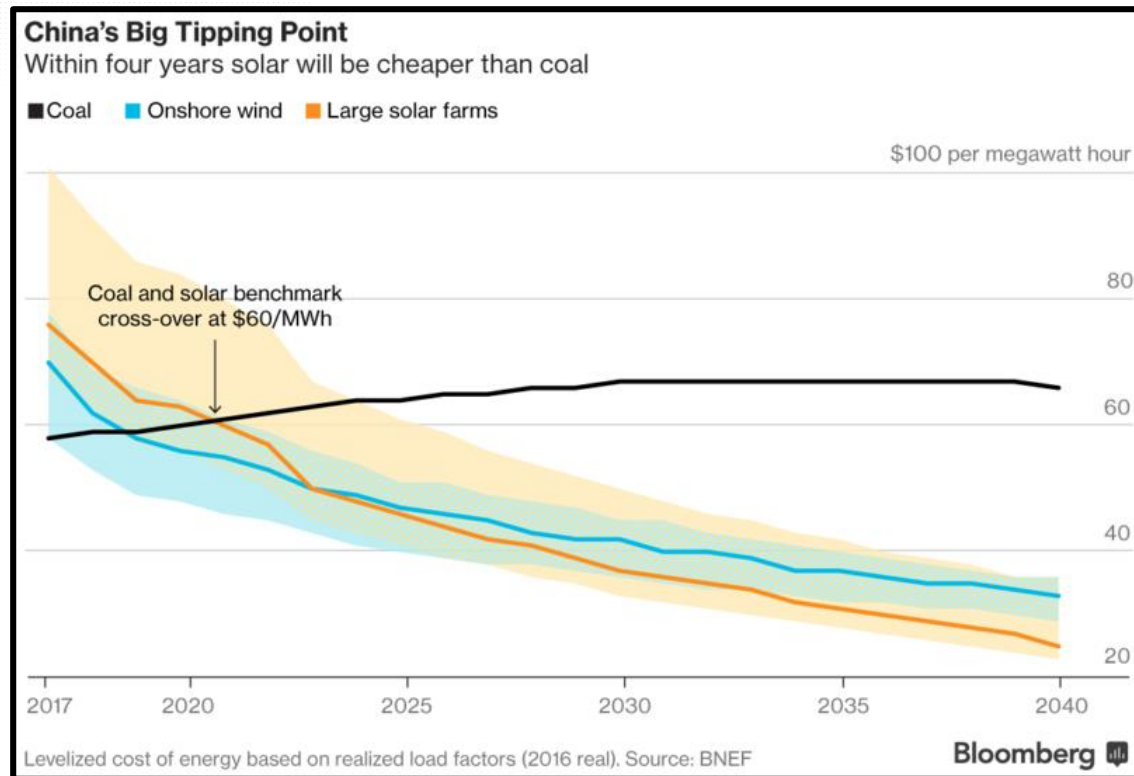
Bloomberg New Energy Finance's outlook shows renewables will be cheaper almost everywhere in just a few years.

By **Jess Shinkleman** and **Hayley Warren**

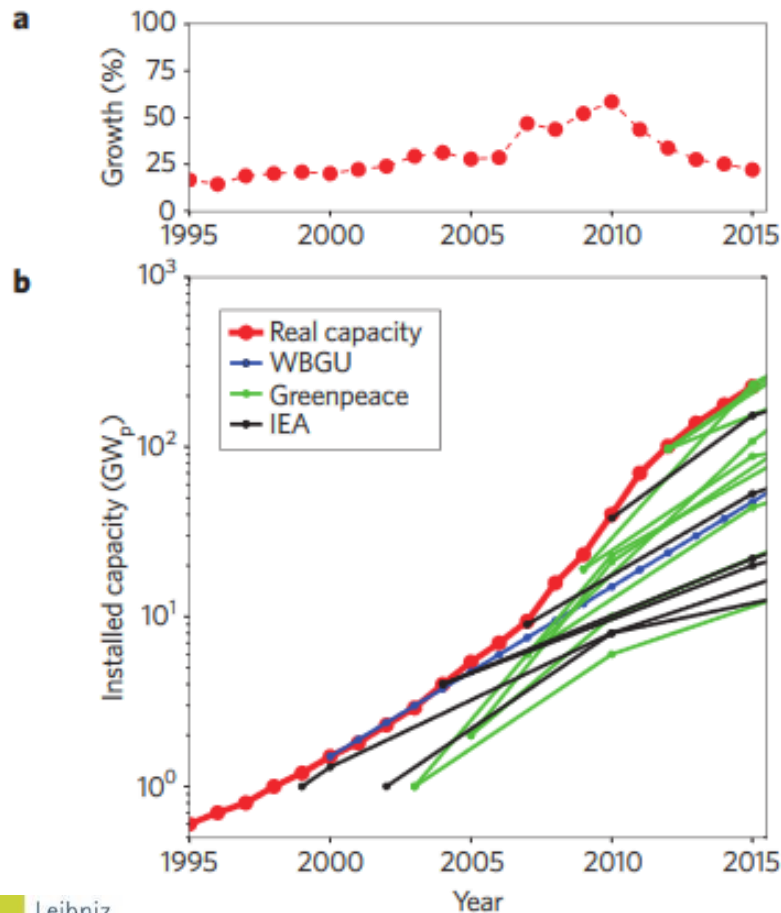
15. Juni 2017, 13:15 MESZ Updated on 15. Juni 2017, 19:08 MESZ

From **Climate Changed**

<https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-06-15/solar-power-will-kill-coal-sooner-than-you-think>



# ...die bisher immer unterschätzt wurde



- Jährliche Zuwachsraten um die 25 % für mittlerweile über 20 Jahre
- Einzige Konstante: Bisher wurde noch jede Wachstumsprognose übertroffen
- Weltmarktvolumen aktuell bei 100 Mrd. USD (gleiche Größenordnung wie Verbrennungsmotoren)

*Creutzig et al., Nature Energy 2, 17140 (2017)*

# Solarenergie ist konkurrenzlos günstig in anderen Ländern...

## Abu Dhabi: Three world record bids entered for Sweihan solar project

20. SEPTEMBER 2016 | [TOP NEWS, MARKETS & TRENDS](#), [GLOBAL PV MARKETS, APPLICATIONS & INSTALLATIONS](#) | BY: SAM POTHECARY



- 2016: 2,42 \$cent/kWh in Abu Dhabi
- 2017: 1,78 \$cent/kWh in Saudi-Arabien

Managing Member	Consortium Member		IRR (%)	LEC (in fils/kWh)	Weighted LEC (in fils/kWh)	Ranking based on Weighted LEC
Marubeni	Jinko Solar		7.00%	10.796 (USD 2.940c)	8.888 (USD 2.420c)	1
Masdar	EDF	PAL	7.00%	11.311 (USD 3.080c)	9.404 (USD 2.533c)	2
Tenaga	Phelan Energy		7.15%	11.512 (USD 3.135c)	9.543 (USD 2.598c)	3
RWE	8-Electric		7.00%	13.038 (USD 3.550c)	10.720 (USD 2.919c)	4
JGC	First Solar	Sojitz	8.46%	13.840 (USD 3.769c)	11.339 (USD 3.088c)	5
Keppco	Q Cells	GSE	7.00%	15.980 (USD 4.351c)	13.349 (USD 3.635c)	6

Source: Middle East Solar Industry Association (MESIA)

[http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/abu-dhabi--three-world-record-bids-entered-for-sweihan-solar-project\\_100026191/#axzz4KsebzUjm](http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/abu-dhabi--three-world-record-bids-entered-for-sweihan-solar-project_100026191/#axzz4KsebzUjm),  
abgerufen am 21.09.2016

<https://www.pv-magazine.com/2017/10/04/saudi-arabias-300-mw-solar-tender-may-conclude-with-lowest-bid-ever/>  
abgerufen am 05.11.2017



# ...und wird auch immer wettbewerbsfähiger bei uns!

## Germany's auction for large-scale solar concludes at €0.0429 per kWh

The average price for bids submitted in Germany's auction for large-scale solar has fallen below the mark of €0.050/kWh for the first time. A total of 20 projects with a combined capacity of 222 MW were awarded by the Federal Network Agency.

OCTOBER 16, 2017 SANDRA ENKHARDT

UTILITY-SCALE PV GERMANY

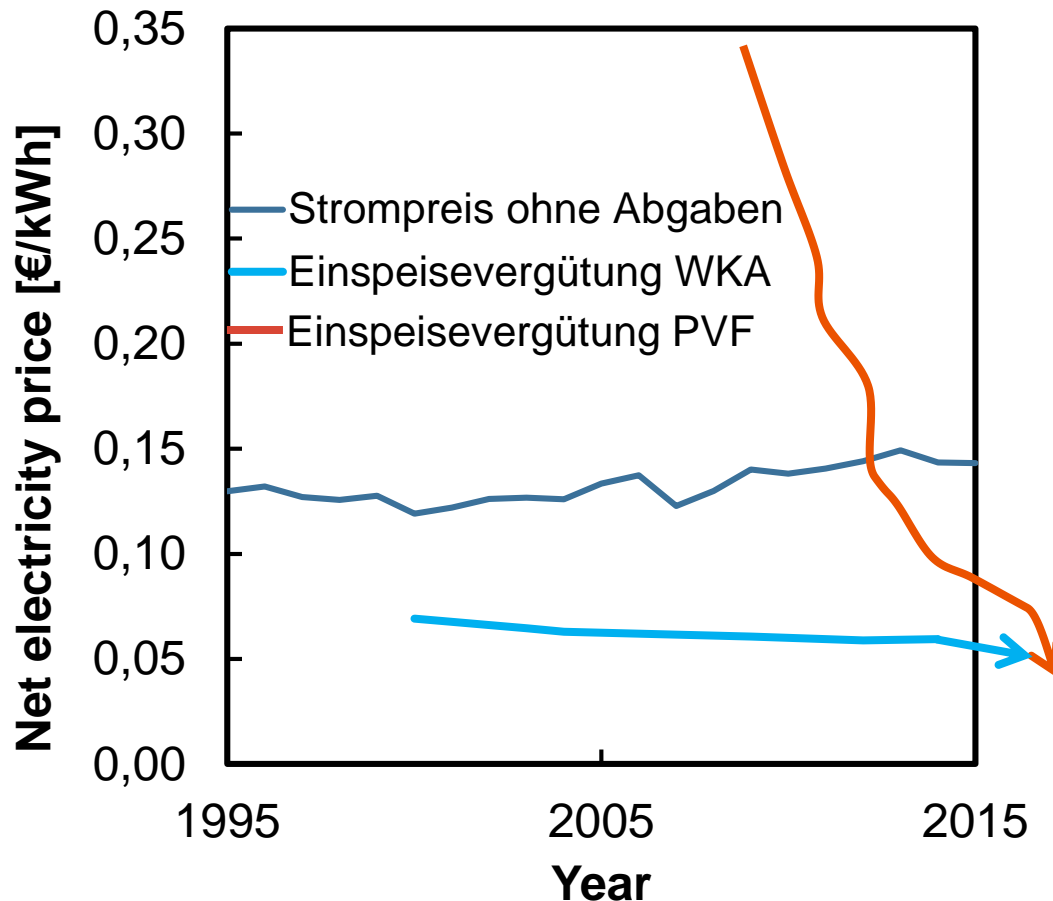


Picture: Trianel

- Oktober 2017: 4,29 €cent/kWh in Deutschland
- 12 von 20 Anlagen der Ausschreibungsrunde in Bayern, eine im Norden (Mecklenburg-Vorpommern)

<https://www.pv-magazine.com/2017/10/16/germanys-auction-for-large-scale-solar-concludes-at-e4-29-per-kwh/>  
abgerufen am 05.11.2017

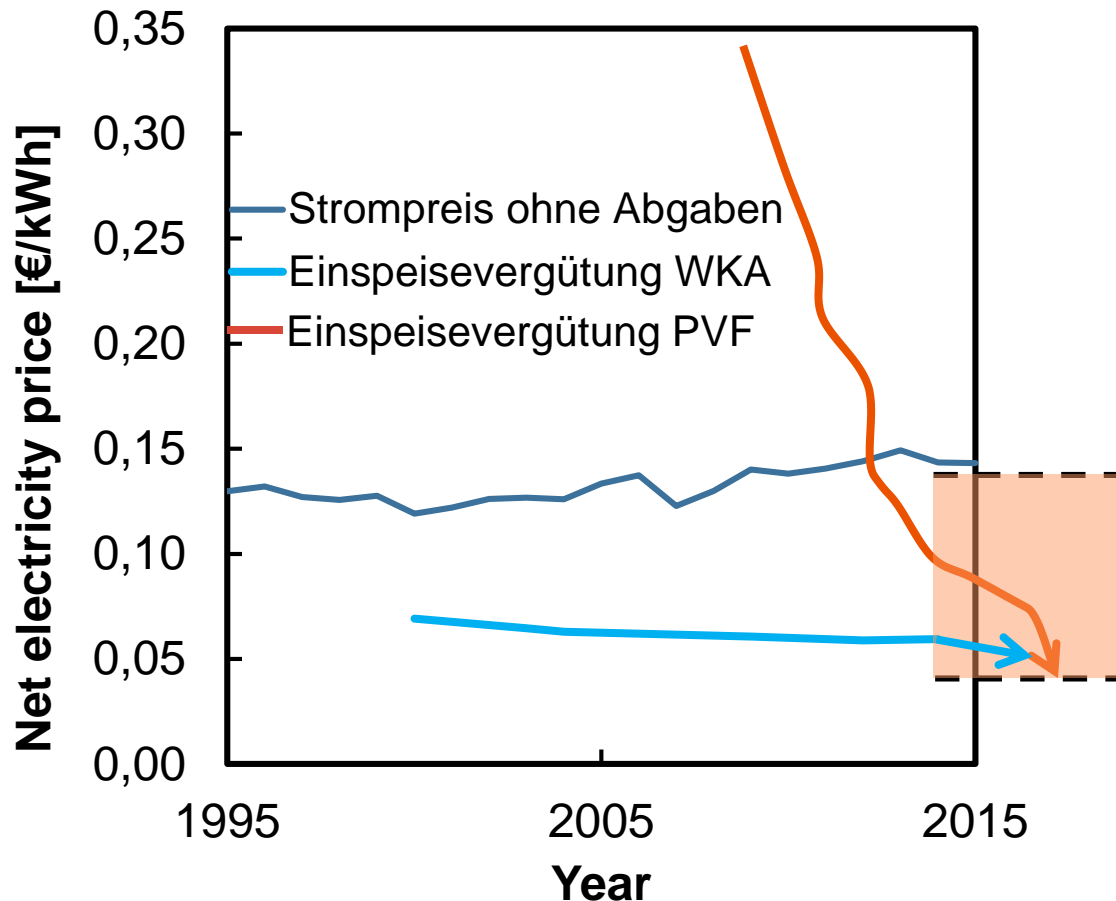
# Konkurrenzfähige solare Stromgestehungskosten



- Kosten für PV und Windkraft nähern sich immer weiter an
- Beide haben Netzparität erreicht

Datenquelle: EUROSTAT, EEG 2014, EEG 2017, Bundesnetzagentur

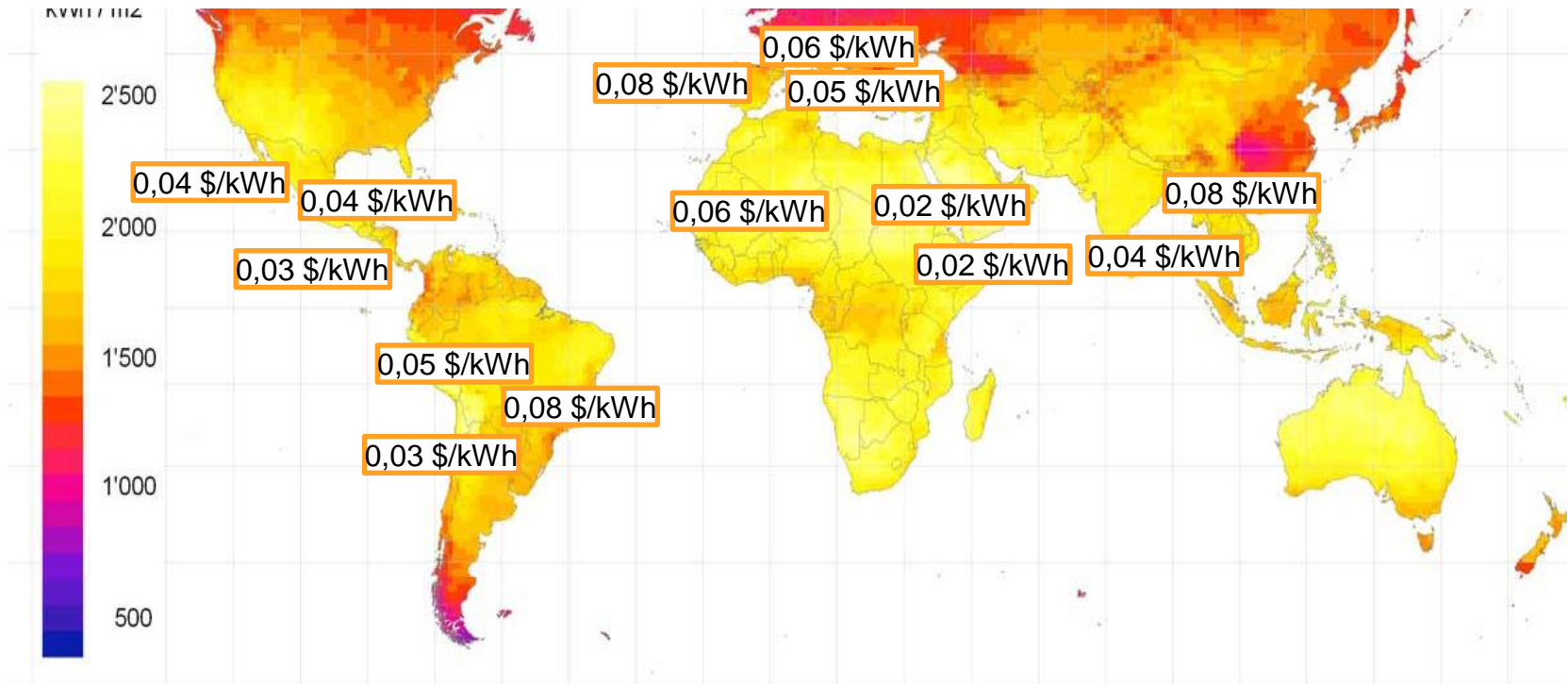
# Konkurrenzfähige solare Stromgestehungskosten



- Kosten für PV und Windkraft nähern sich immer weiter an
- Beide haben Netzparität erreicht
- Eigennutzung von PV-Strom wird immer lohnender

Datenquelle: EUROSTAT, EEG 2014, EEG 2017, Bundesnetzagentur

# Rekordpreise bei Ausschreibungen für Solarstrom (Stand Oktober 2017)



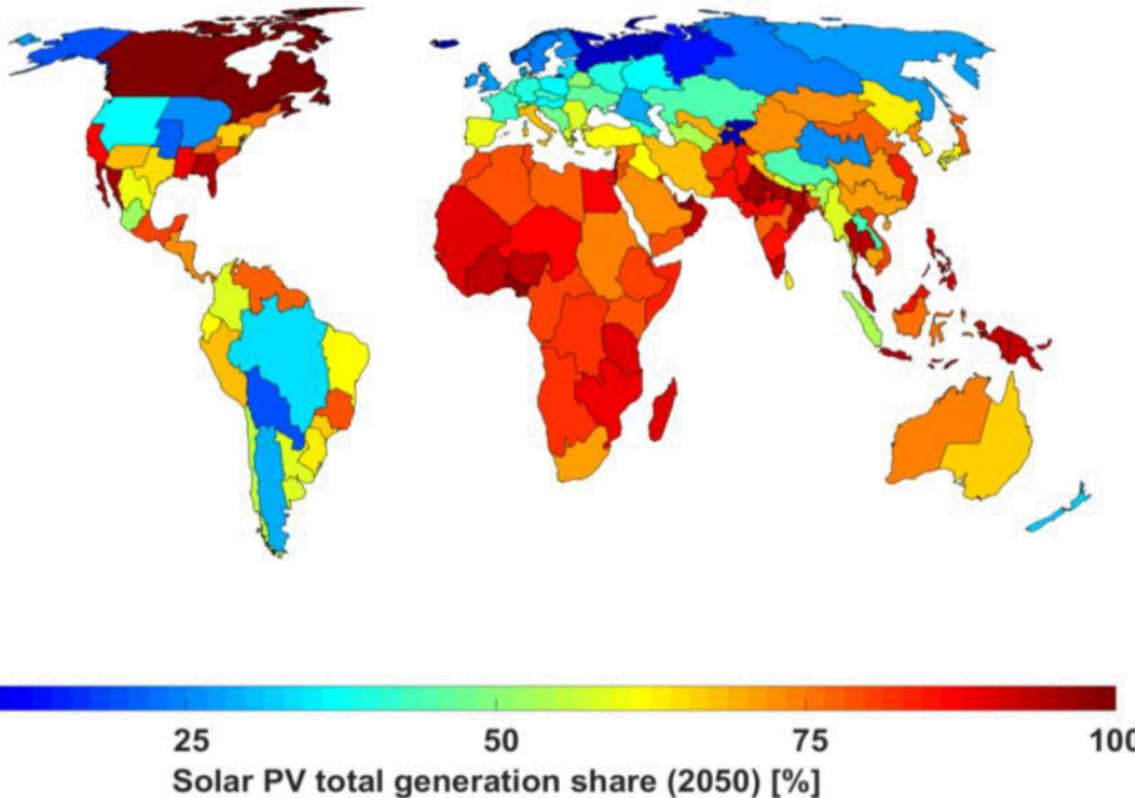
Meteonorm 6.0 (www.meteonorm.com); uncertainty 10%  
1981 - 2000; grid cell size: 1°

- <http://www.livemint.com/Industry/MK17QvOhpRoBAtw3d4PM5K/South-African-firm-bid-takes-solar-power-tariffs-to-new-low.html>
- <https://cleantechnica.com/2016/08/18/new-low-solar-price-record-set-chile-2-91%C2%A2-per-kwh/>
- <https://renewablesnow.com/news/solar-pv-gets-lowest-strike-prices-in-uks-cfd-auction-465462/>
- <https://www.pv-magazine.com/2017/10/16/germanys-auction-for-large-scale-solar-concludes-at-e4-29-per-kwh/>
- <https://renewablesnow.com/news/chinese-pv-tender-of-1-gw-yields-record-low-bids-report-541264/>
- <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/acwa-power-and-saudi-rivalss-6-bids-lowest-for-170mw-morocco-project>
- <https://www.pv-magazine.com/2017/02/06/mexico-signs-lowest-price-solar-contracts-in-the-world-to-date/>
- <https://www.solarplaza.com/channels/top-10s/11647/global-pv-prices-show-continuous-decline/>



# 100% EE bedeutet viel Solarenergie

average for region: 70.3%



- 70 % der weltweiten Elektrizitätsversorgung im Jahr 2050 durch Solarenergie
  - Kostenoptimiertes Szenario für 100 % EE
  - Etwas weniger Solarenergieanteil in guten Windkraftregionen
- ➔ Wind & Solar in Europa

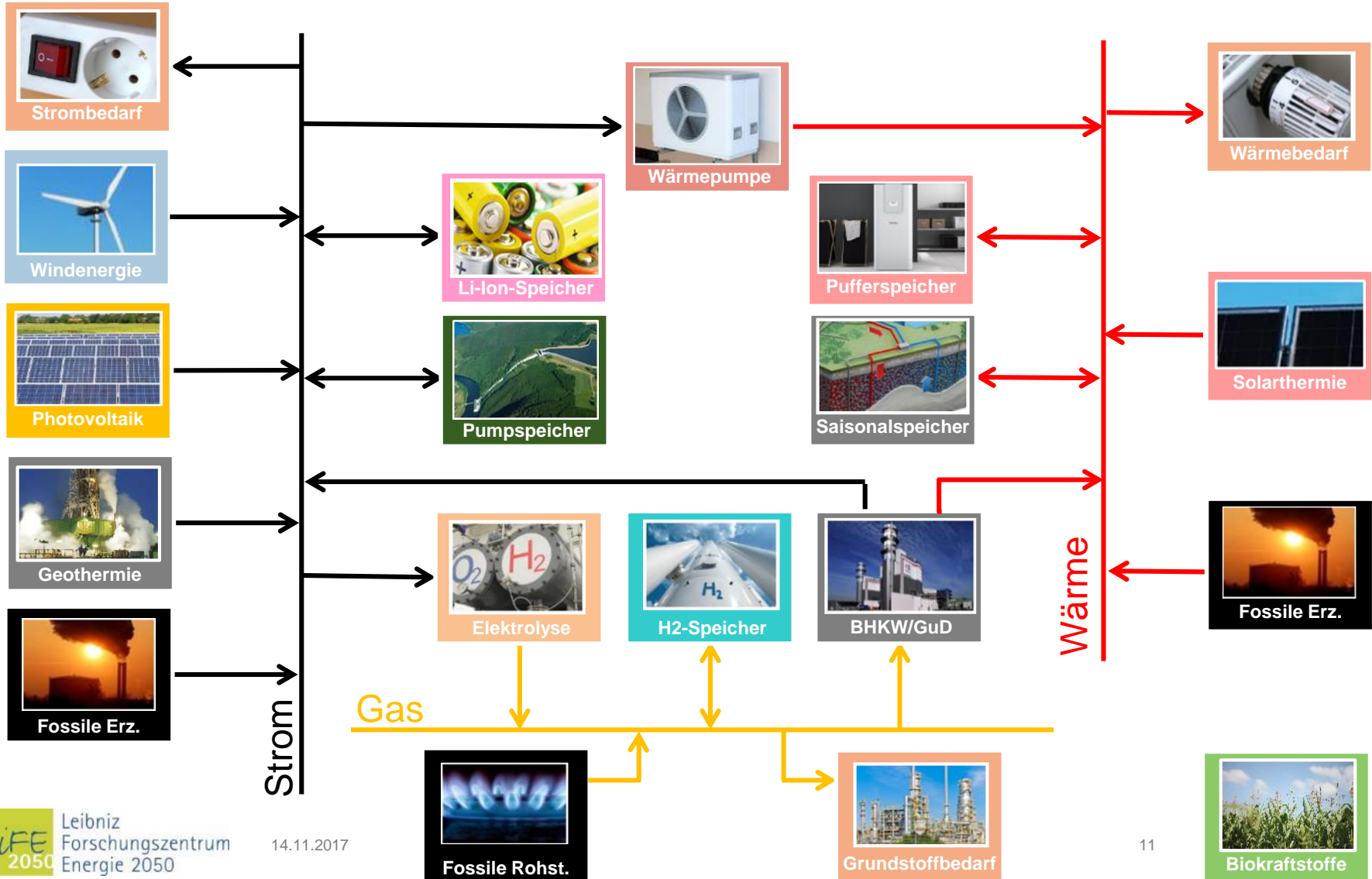
C. Breyer, PV Manufacturing in Europe Conference,  
European Technology & Innovation Platform – Photovoltaic,  
Brüssel, 19. Mai 2017

# Das ist wichtig für das Energiesystem 2050 – These 1:

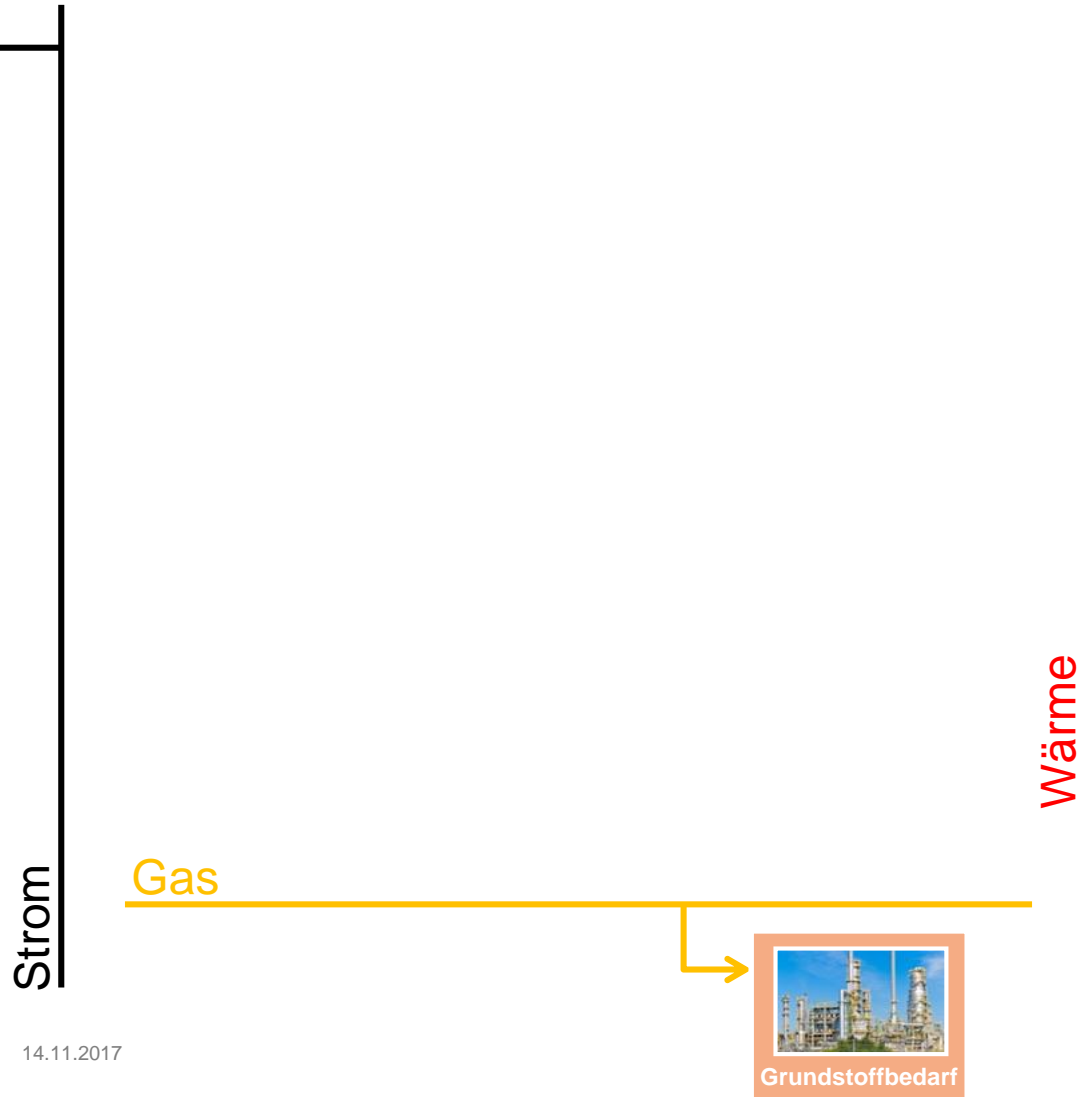


- Zukünftige Energiesysteme werden weltweit aus ökonomischen und ökologischen Gründen auf Solarenergietechnik basieren. Für die Innovationskraft und Wettbewerbsfähigkeit heimischer Unternehmen ist es wichtig, die Solarenergieerzeugung und -forschung in Deutschland langfristig zu fördern.

# ReLoS: Unser (vereinfachtes) Energiesystem 2050

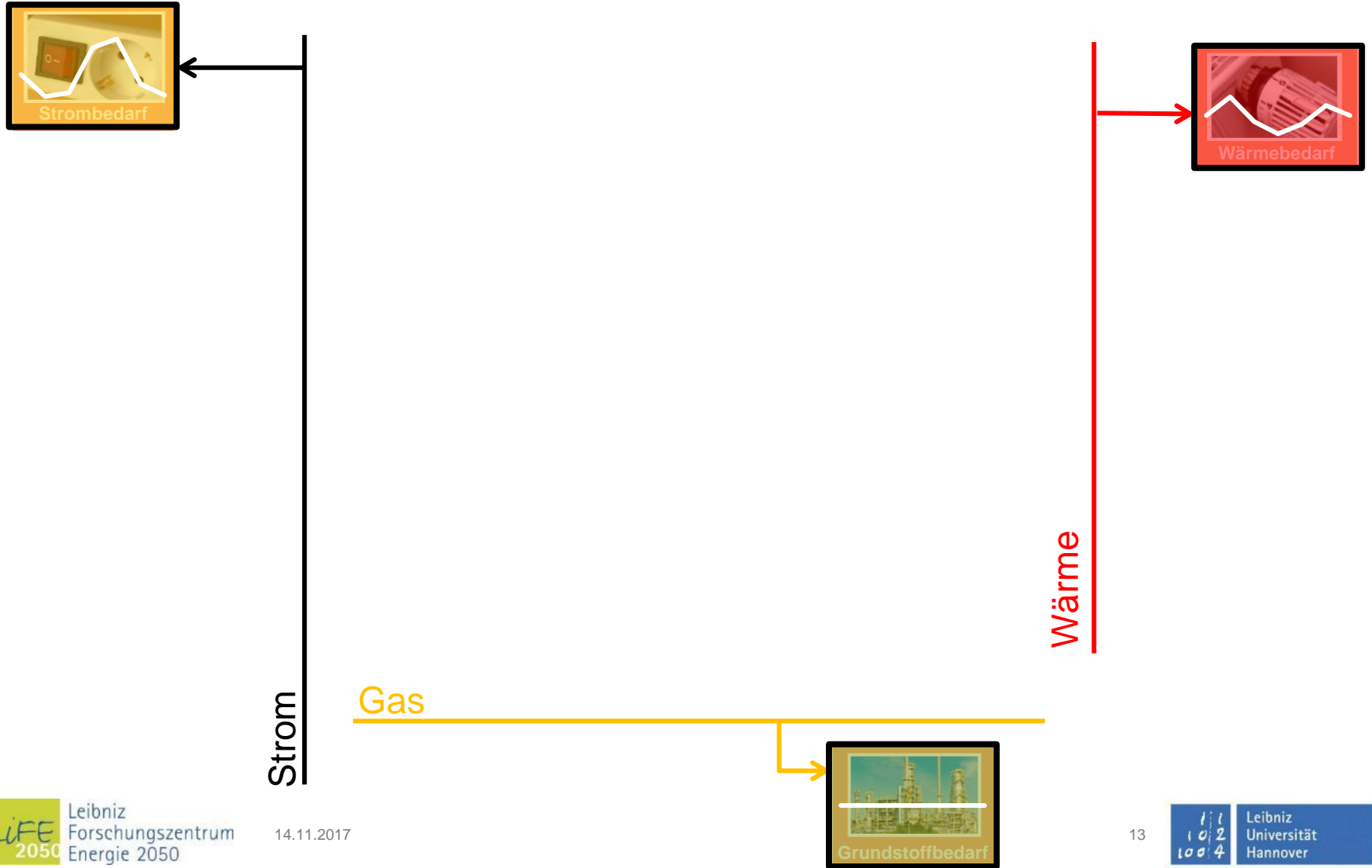


# ReLoS: Unser (vereinfachtes) Energiesystem 2050

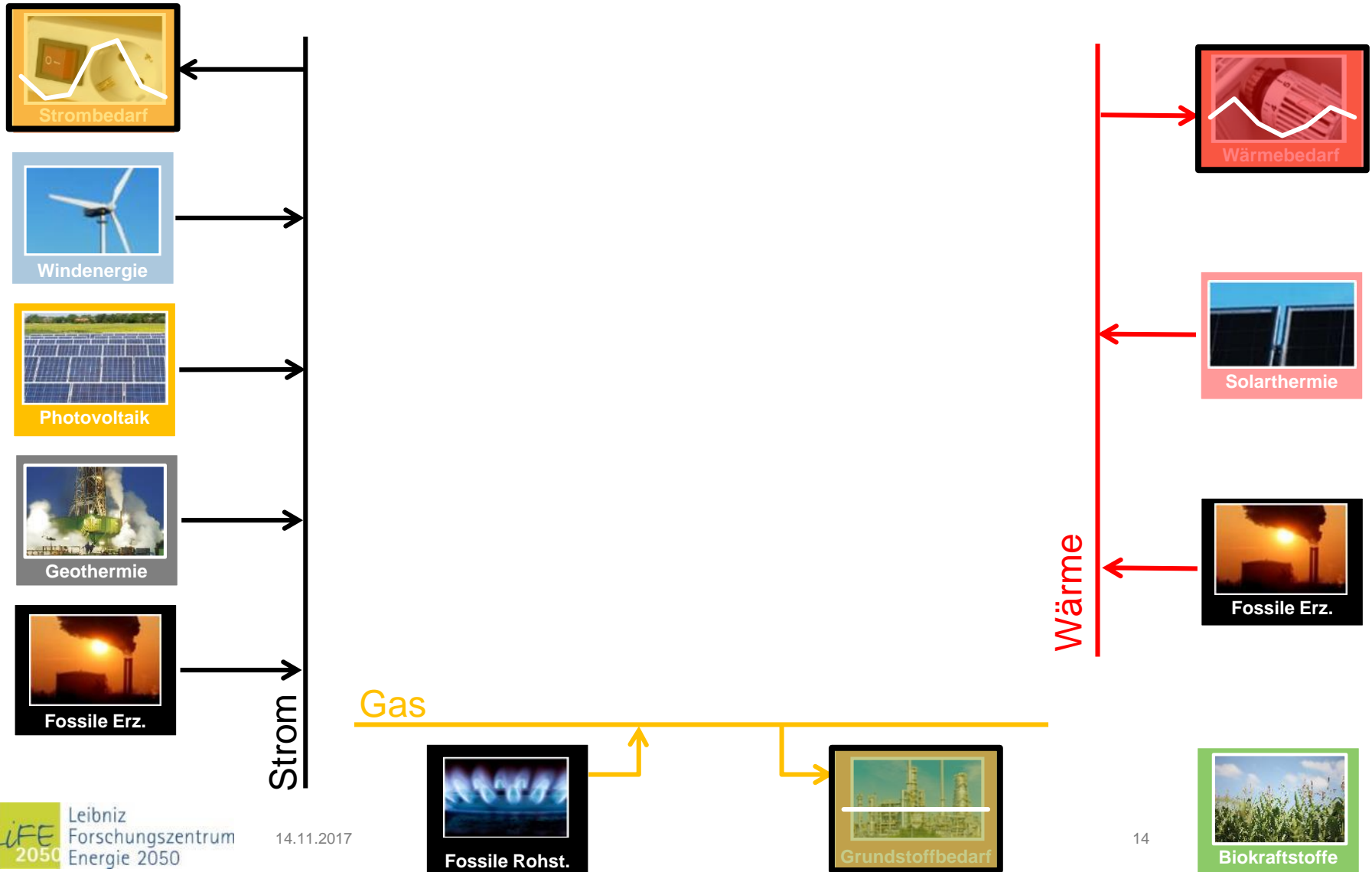




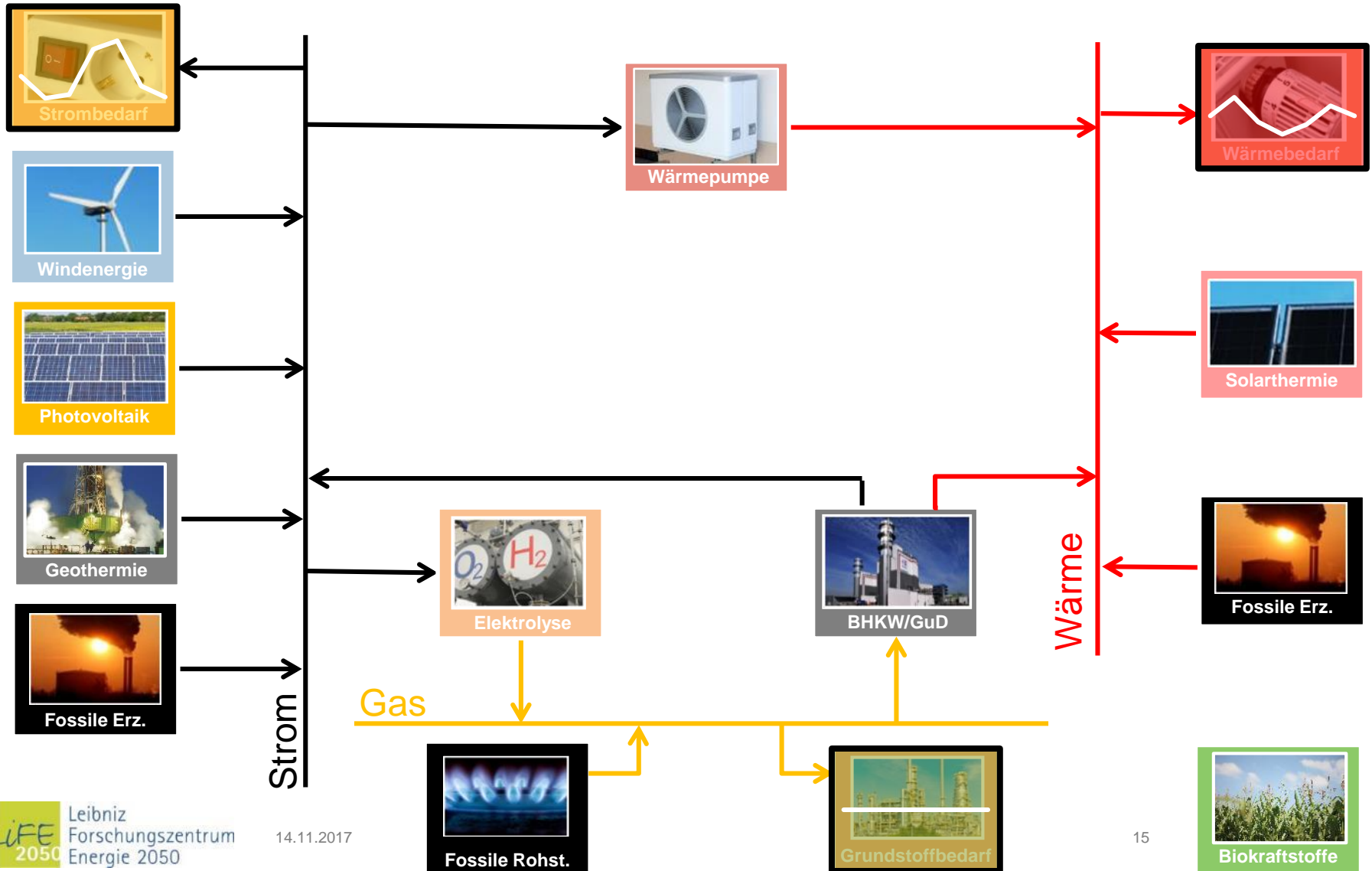
# ReLoS: Unser (vereinfachtes) Energiesystem 2050



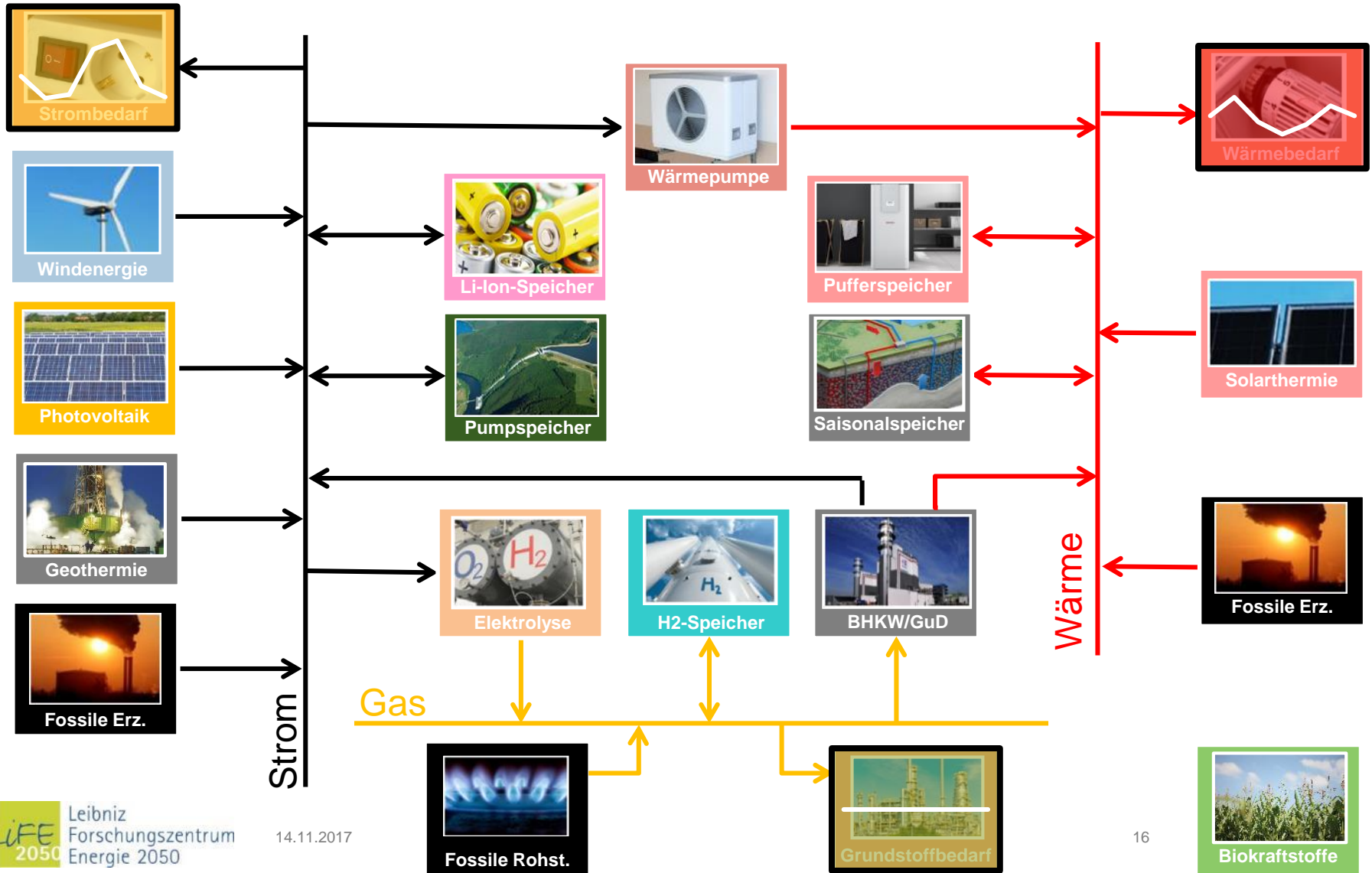
# ReLoS: Unser (vereinfachtes) Energiesystem 2050



# ReLoS: Unser (vereinfachtes) Energiesystem 2050

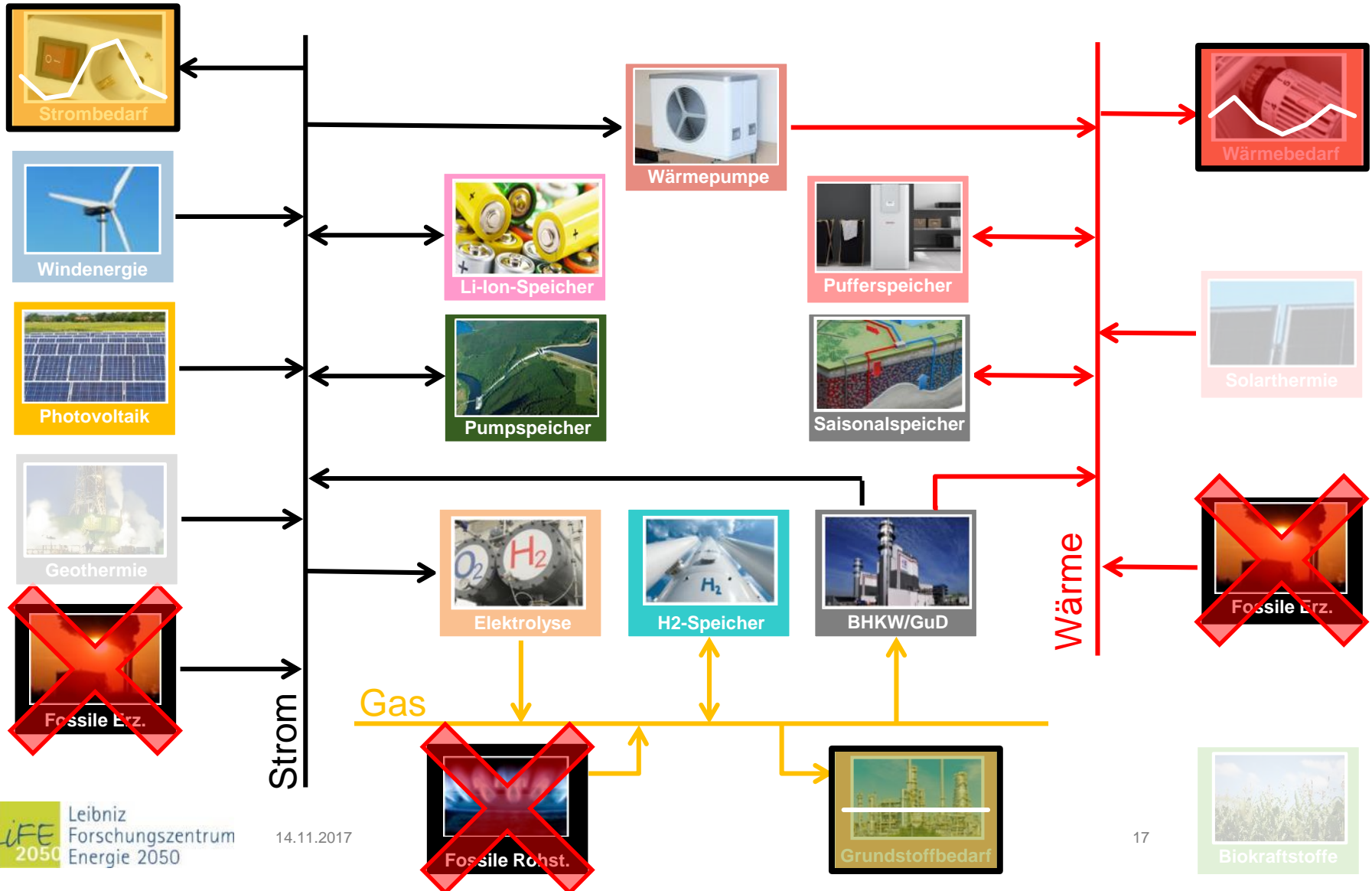


# ReLoS: Unser (vereinfachtes) Energiesystem 2050

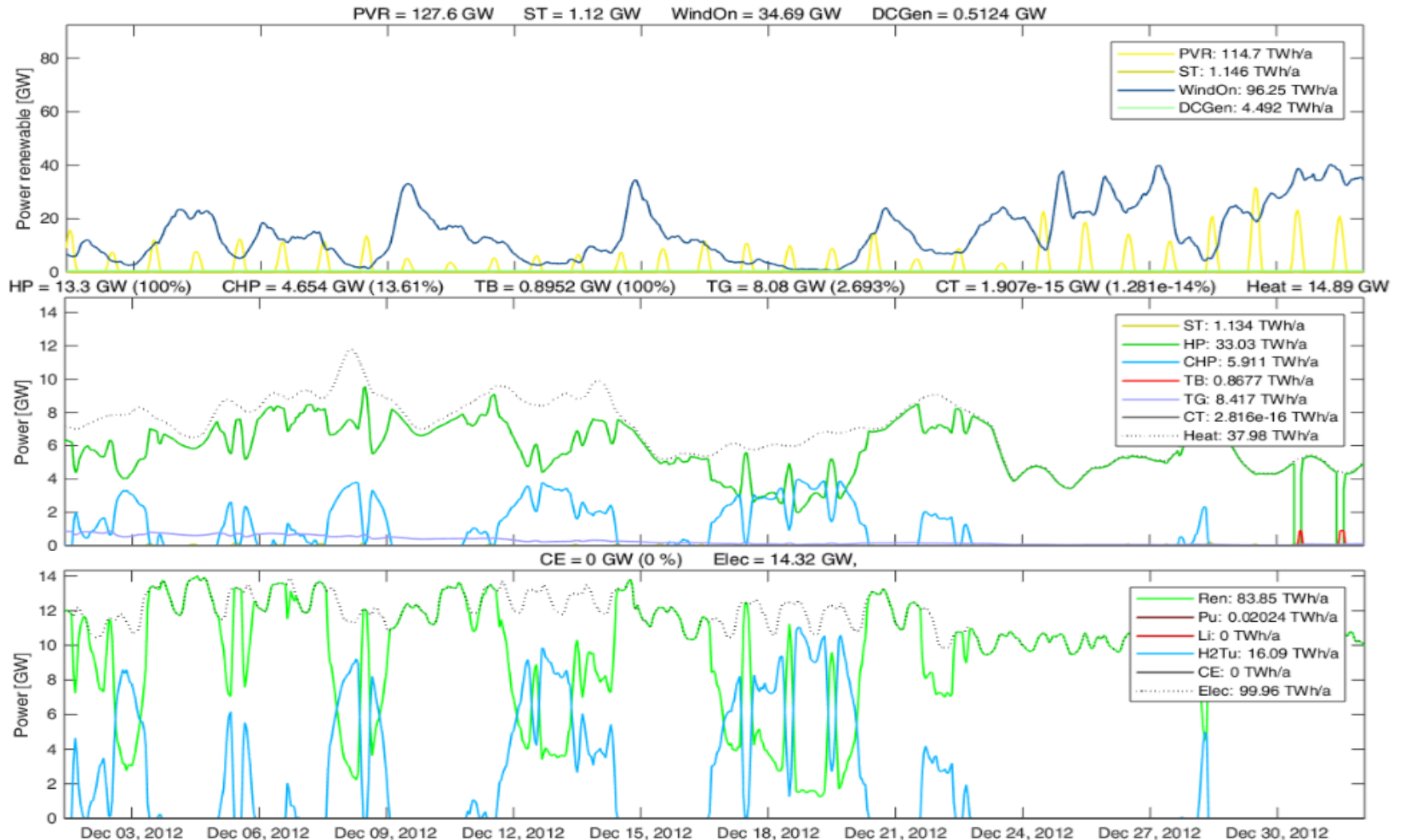




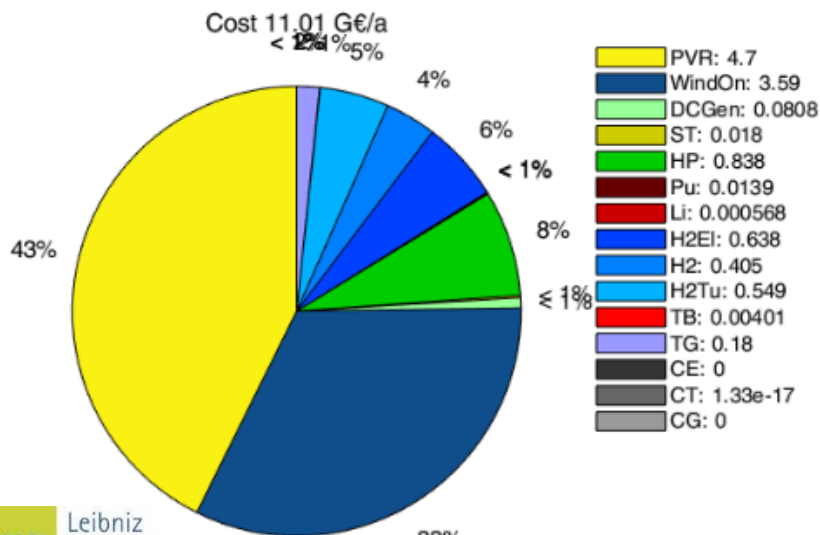
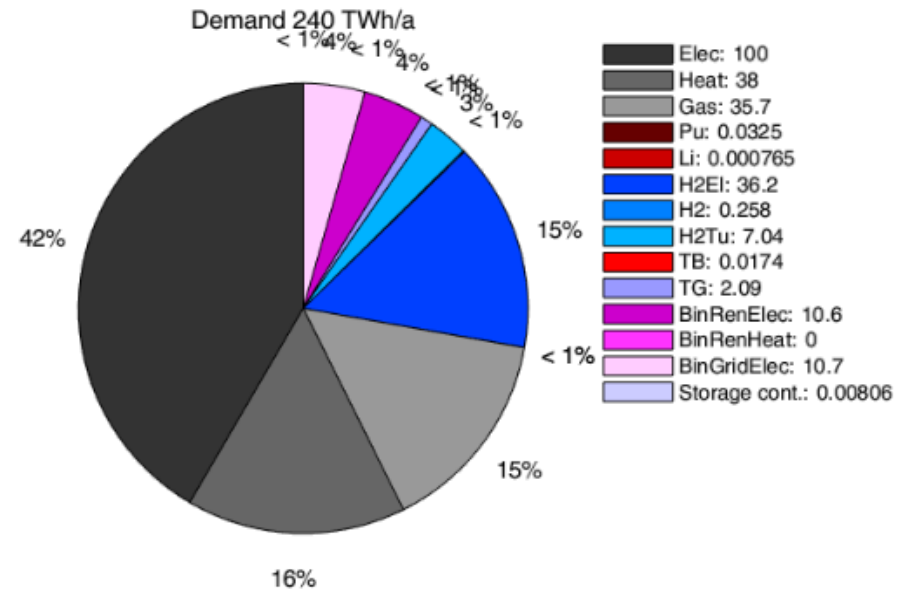
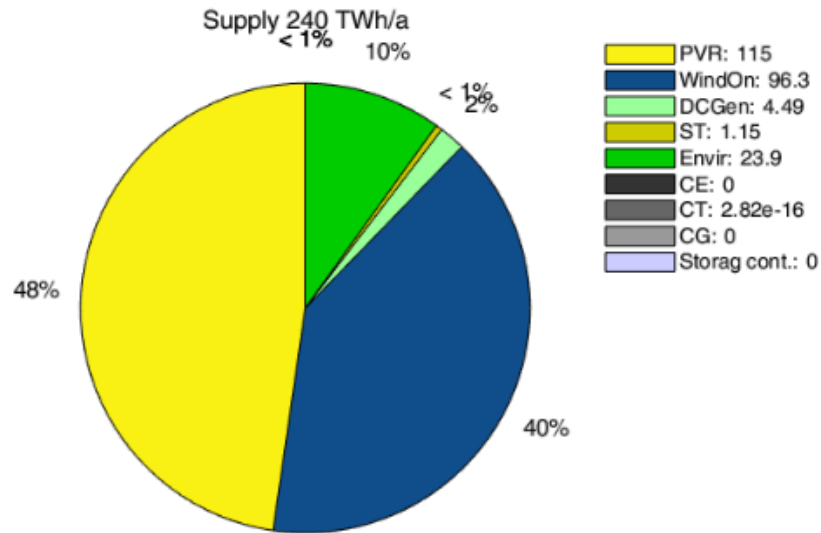
# ReLoS: Unser (vereinfachtes) Energiesystem 2050



# 100% Bedarfsdeckung durch Erneuerbare Energien

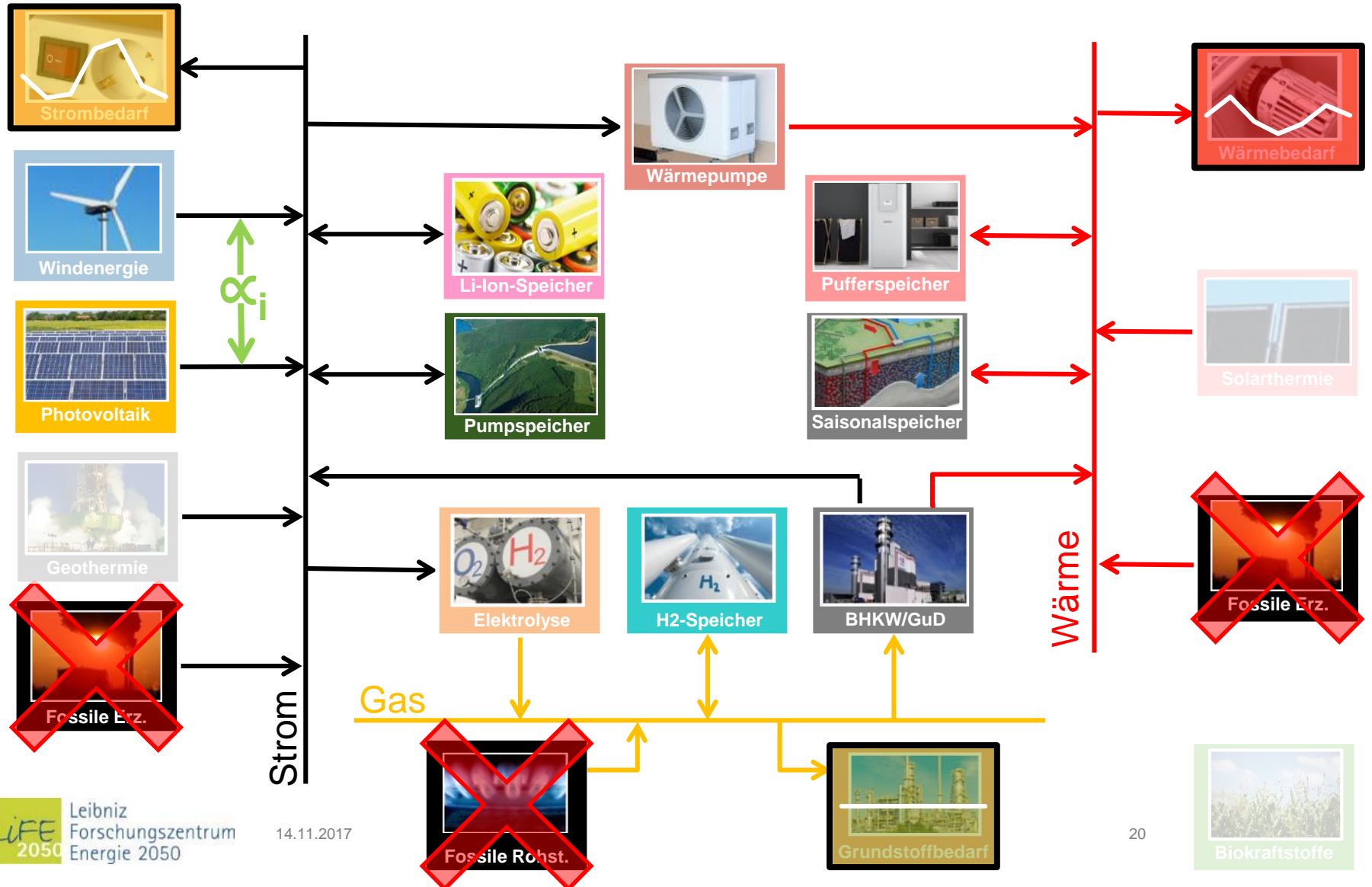


# Kapazitäten und Kostenstruktur



- 100% EE-System basiert zum Großteil auf Wind- und Sonnenenergie
- Investitionen in Windkraft und Photovoltaik vergleichbar, der Rest ist Systemtechnik (Speicher, Wandler, Solarthermie)
- Speicher-/Wandlungsverluste etwa 30 % der Erzeugung aus fluktuierenden EE

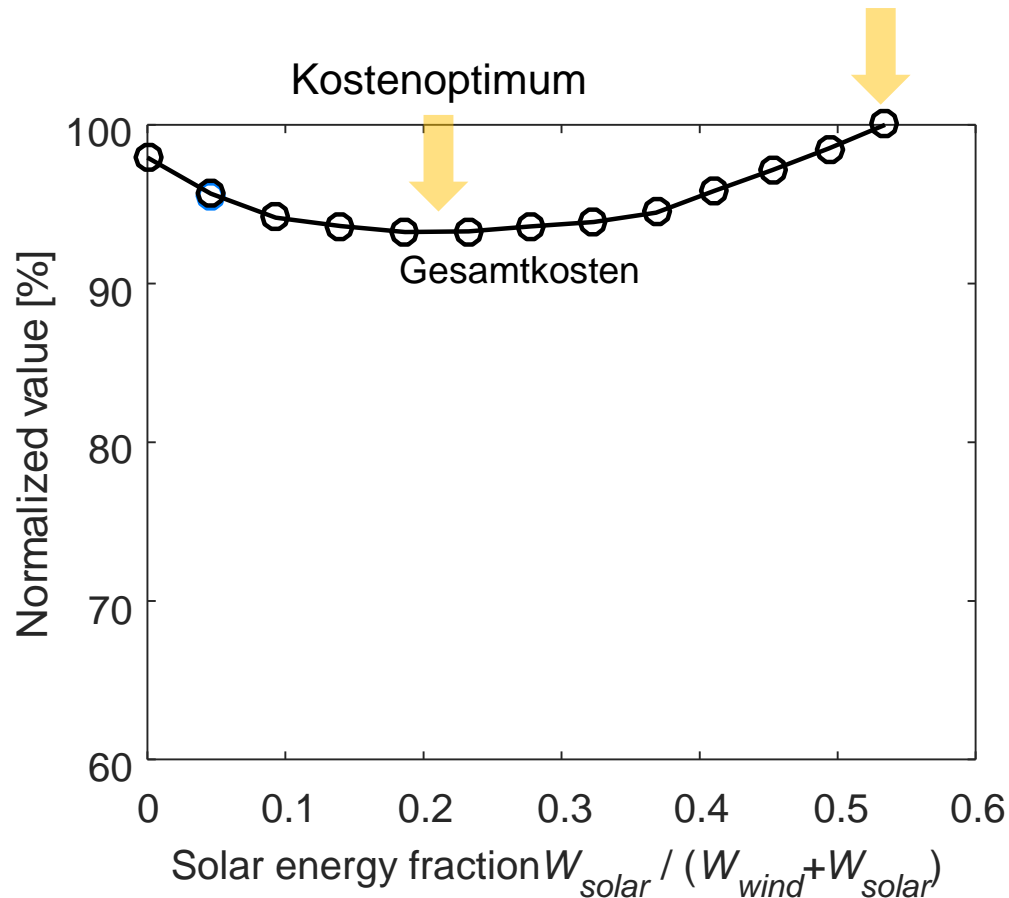
# ReLoS: Festes Verhältnis vorgeben für PV zu WKA





# Flaches Kostenoptimum bei Betrachtung von PV-WKA-Verhältnis

Szenario Runder Tisch Energiewende

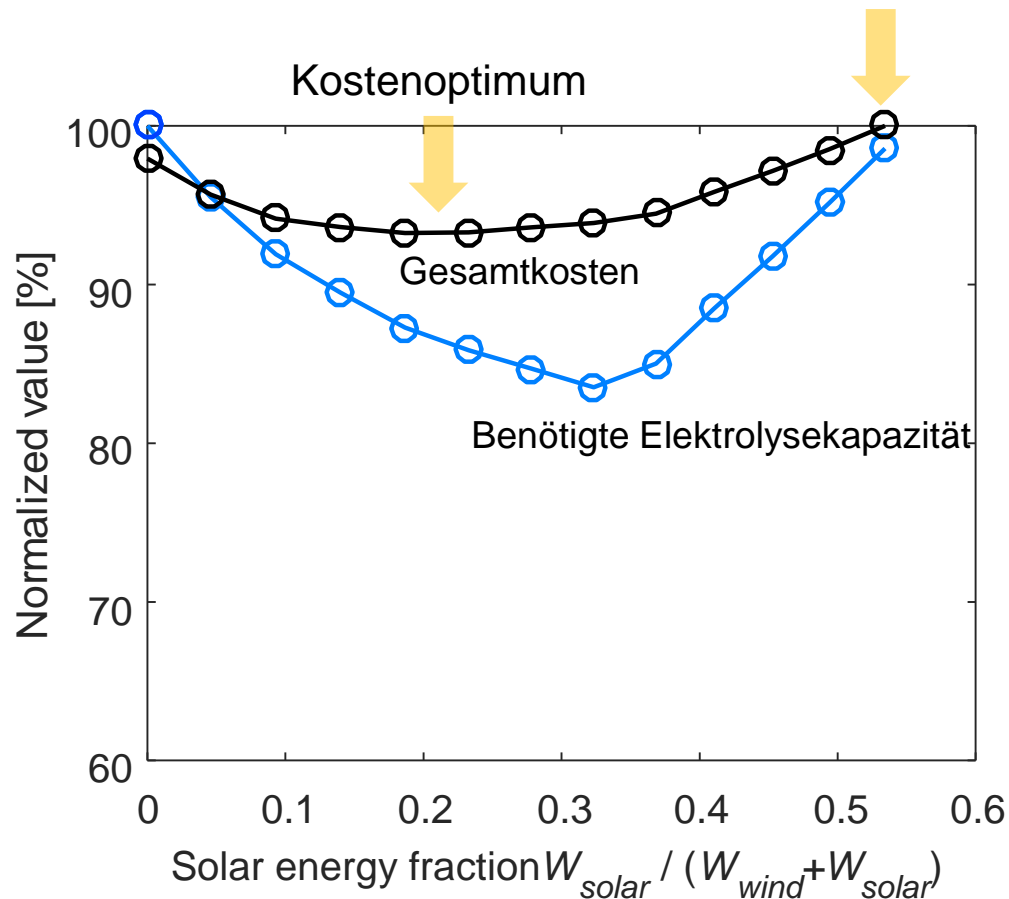


- 2050-Szenario mit H<sub>2</sub>-Langzeitspeicher und Rückverstromung
- Geringste Gesamtkosten bei 22 % Strom durch PV, den Rest durch WKA
- 50 % PV (und weniger Wind) führt zu 7 % Mehrkosten und viel mehr Akzeptanz
- Unsicherheiten bei den Kosten beachten!

Data based on [M. Faulstich et al. - Szenarien zur Energieversorgung in Niedersachsen im Jahr 2050](#), [Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz, 2016](#) and ISFH data for solar

# Flaches Kostenoptimum bei Betrachtung von PV-WKA-Verhältnis

Szenario Runder Tisch Energiewende

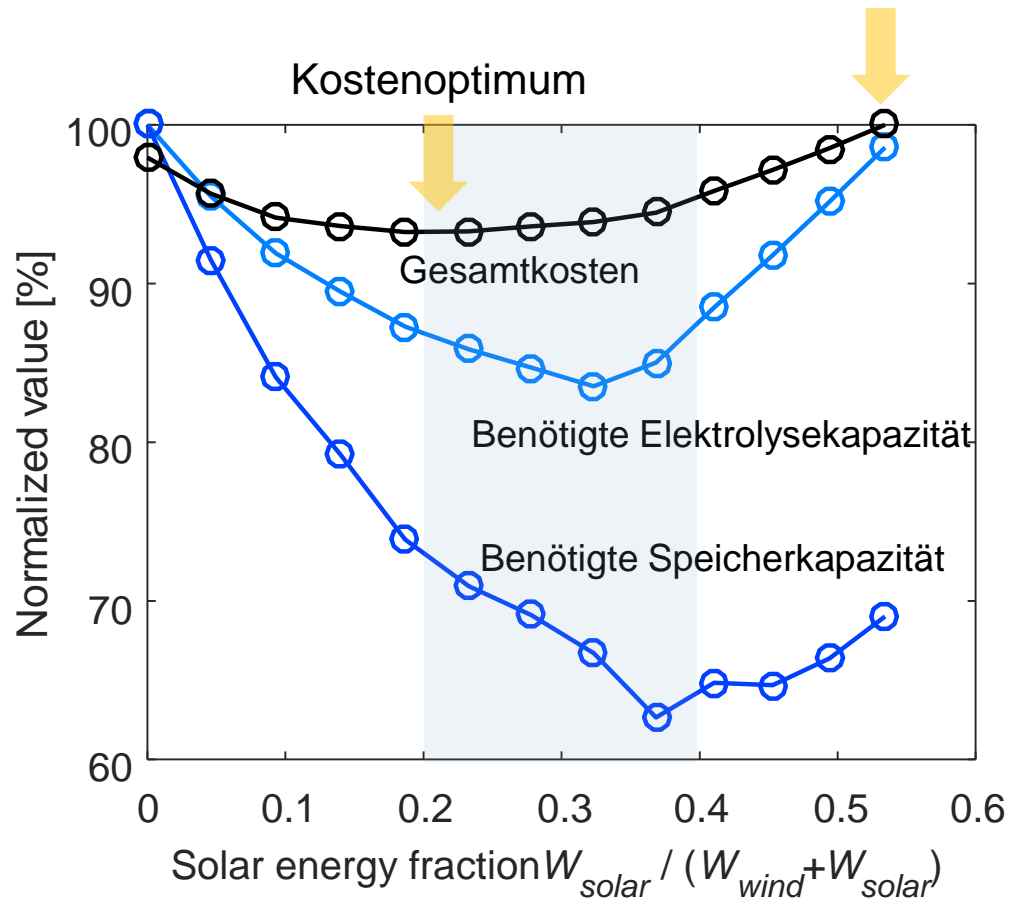


- 2050-Szenario mit H<sub>2</sub>-Langzeitspeicher und Rückverstromung
- Geringste Gesamtkosten bei 22 % Strom durch PV, den Rest durch WKA
- 50 % PV (und weniger Wind) führt zu 7 % Mehrkosten und viel mehr Akzeptanz
- Unsicherheiten bei den Kosten beachten!

Data based on [M. Faulstich et al. - Szenarien zur Energieversorgung in Niedersachsen im Jahr 2050](#), [Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz, 2016](#) and ISFH data for solar

# Flaches Kostenoptimum bei Betrachtung von PV-WKA-Verhältnis

Szenario Runder Tisch Energiewende



- 2050-Szenario mit H<sub>2</sub>-Langzeitspeicher und Rückverstromung
- Geringste Gesamtkosten bei 22 % Strom durch PV, den Rest durch WKA
- 50 % PV (und weniger Wind) führt zu 7 % Mehrkosten und viel mehr Akzeptanz
- Unsicherheiten bei den Kosten beachten!

Data based on [M. Faulstich et al. - Szenarien zur Energieversorgung in Niedersachsen im Jahr 2050](#), [Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz, 2016](#) and ISFH data for solar

# 50% der Energieversorgung durch die Sonne – Was bedeutet das?

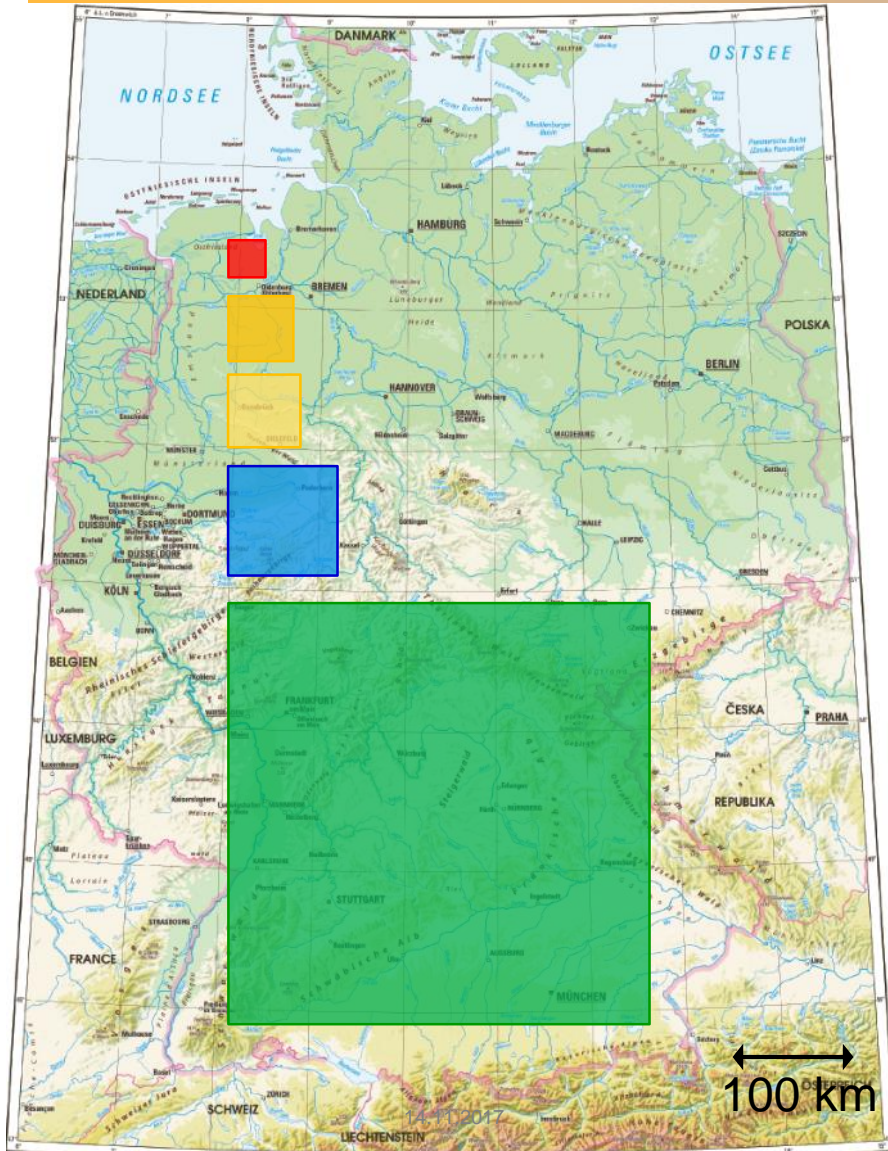


Das geht auch im Norden(!), z.B. im Runder-Tisch-Szenario mit

- 127,6 GW installierter PV-Leistung in Niedersachsen
  - Davon 56,9 GW auf Dächern
    - Jedes Dach, auf dem die Stromgewinnung sinnvoll und erlaubt ist, wird genutzt
  - Davon 70,7 GW auf Freiflächen
    - 4% der Agrarflächen werden für Photovoltaik genutzt
    - Davon 0 GW an Fassaden, Verkehrswegen etc.
      - Potential schwer bezifferbar, vermutlich < Dachflächen
- 1,12 GW installierter „ST-Leistung“ in Niedersachsen
  - Unveränderter Stand zu heute, auf weiteren Ausbau im Szenario 2050 zunächst aus Redundanzgründen verzichtet



# Ernteflächen Erneuerbarer Energien



Für die Produktion von 515 TWh/a (20 % Endenergieverbrauch 2014) benötigt man

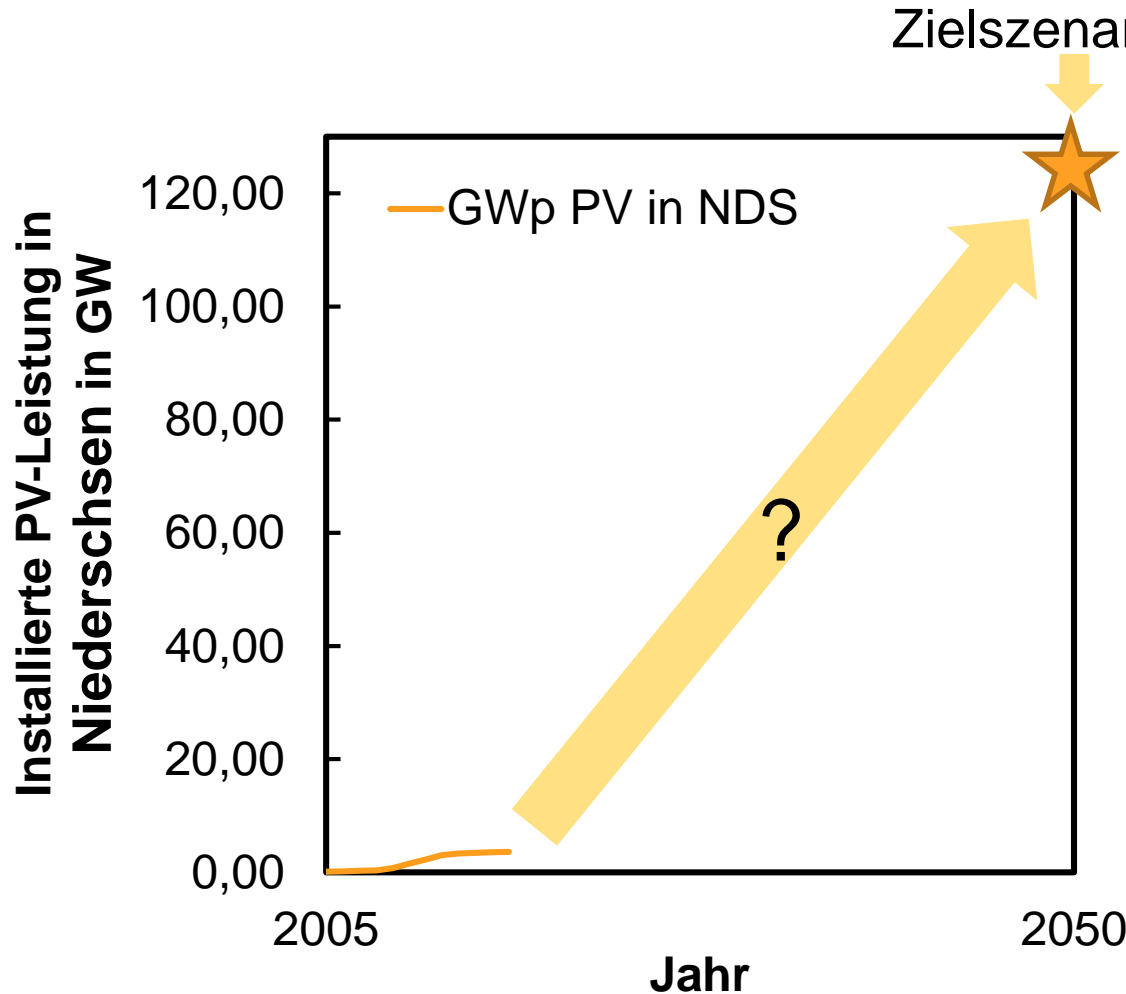
- 936 km<sup>2</sup> **Solarkollektoren** oder
- 2864 km<sup>2</sup> **Dachflächen-PV** oder
- 3575 km<sup>2</sup> **Freiflächen-PV** oder
- 8167 km<sup>2</sup> **Windparks** oder
- 121462 km<sup>2</sup> **Biomasseanbau**

➔ Wir brauchen Wind und Sonne!

Data based on [M. Faulstich et al. - Szenarien zur Energieversorgung in Niedersachsen im Jahr 2050](#), Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz, 2016 and ISFH data for solar



# Solarenergieausbau in Niedersachsen stagniert



- In den letzten 10 Jahren 3,5 GWp installiert
- In den nächsten 30 Jahren müssen 120 GWp installiert werden
- Wir brauchen mehr Solarenergieausbau – jetzt!

Datenquelle: <https://www.foederal-erneuerbar.de>

# Das ist wichtig für das Energiesystem 2050 – These 2:



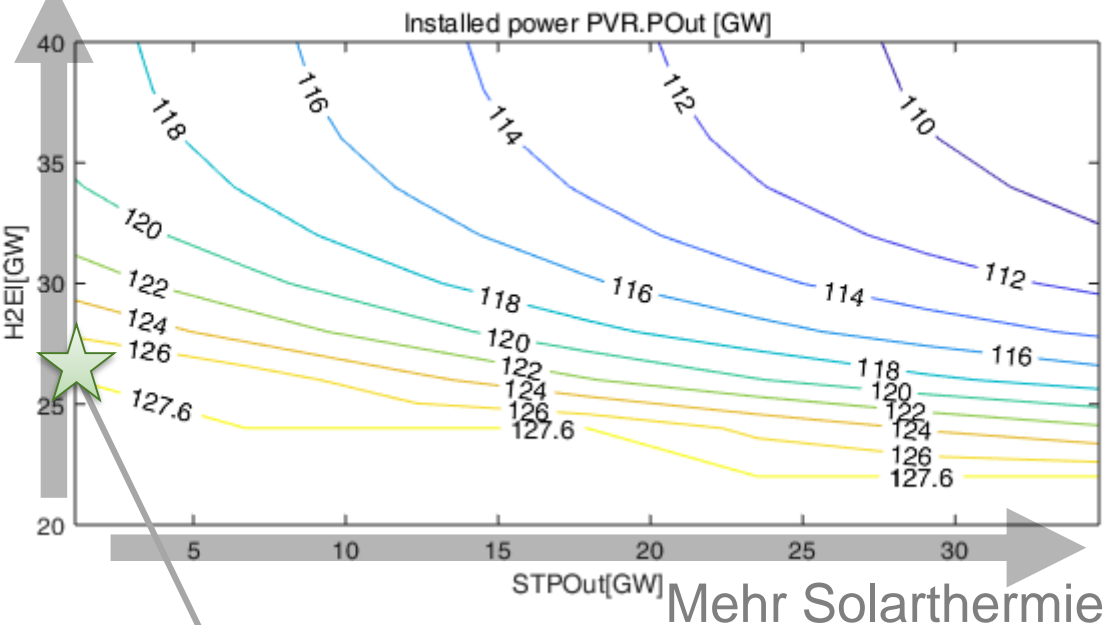
- Für ein zukünftiges Energiesystem brauchen wir viel mehr Solarenergie, auch in Niedersachsen. Der Ausbau der Solarenergie muss dringend beschleunigt werden. Teile der Flächen mit raumordnerischem Vorbehalt für Landwirtschaft sollten kontrolliert für Solarenergie freigegeben werden.

# Solarenergie in Mitteleuropa: Photovoltaik und Solarthermie



# Einfluss von Solarthermie und Elektrolyse auf die PV-Leistung

Mehr Elektrolyse



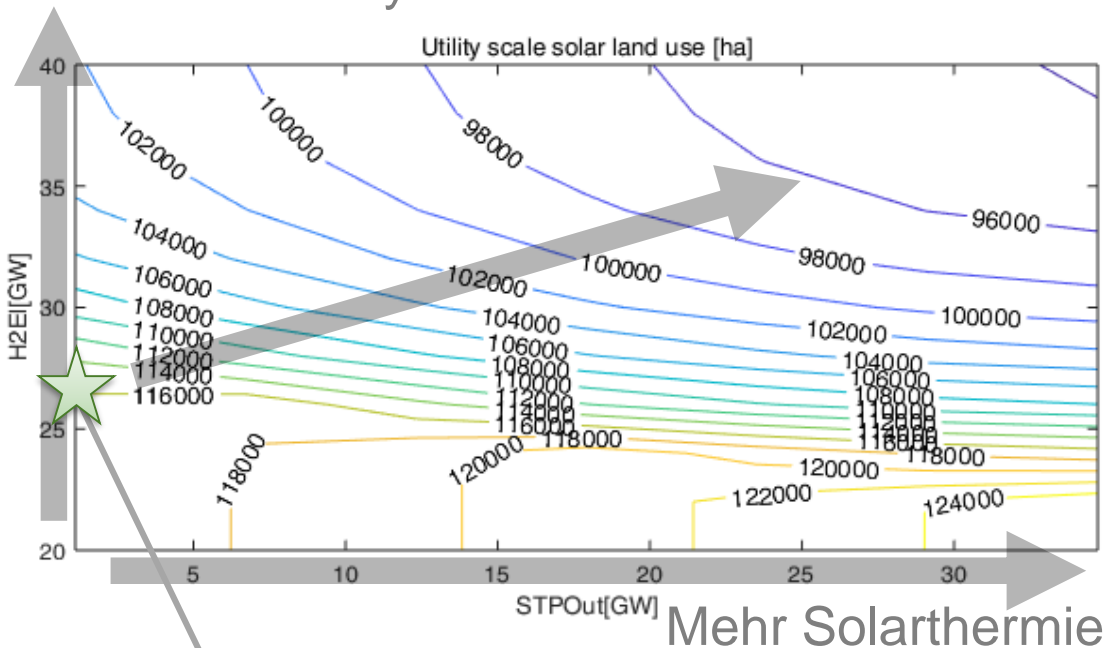
Szenario 2050  
Runder Tisch

- Mehr Elektrolyseleistung führt zu weniger Abregelung und weniger Bedarf an PV-Flächen
- Mehr Solarthermie führt ebenfalls zu weniger PV-Bedarf
- Alle Szenarien sind mit Saisonalspeicher für Wärme gerechnet
- Kostenunterschiede klein ( $\pm 7\%$ )



# Photovoltaik mit Solarthermie: Freiflächenbedarf im Szenario 2050

Mehr Elektrolyse



Szenario 2050  
Runder Tisch

- Größere Flächenausbeute von Solarthermie im Szenario führt zu weniger Flächenbedarf (bis zu 18 % weniger Freiflächen)
- Abhängig von angenommenen Flächenerträgen (hier: 545 MWh/ha/a für F-PV und 2625 MWh/ha/a für F-ST)
- Abhängig von Roundtrip-Speichereffizienzen (38 % für Strom, 70 % für Wärme)



- Solarthermie und Photovoltaik können beide signifikant zur Energieversorgung 2050 beitragen. Solare Nahwärmenetze sollten ausgebaut werden, da der hohe Flächenertrag der Kollektoren und die hohen Wirkungsgrade von saisonalen Wärmespeichern eine besonders flächeneffiziente Energieversorgung ermöglichen.

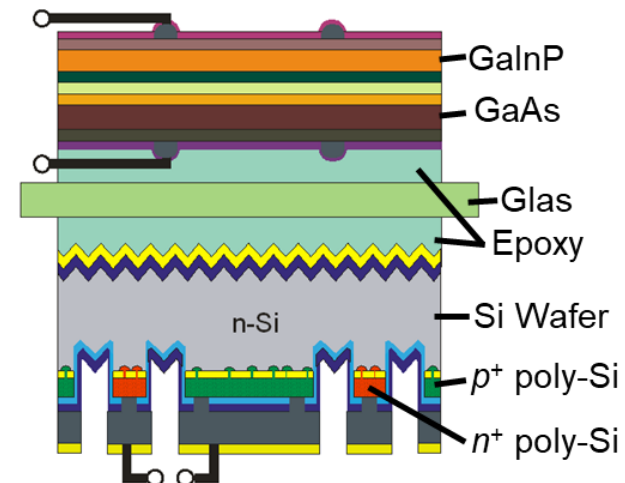
# Forschung und Entwicklung zur Erhöhung der solaren Flächenausbeute



Vorderseite



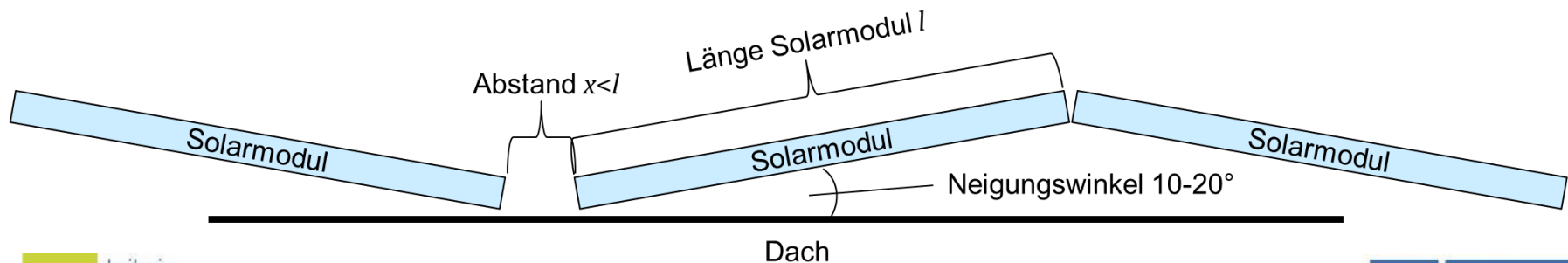
Rückseite



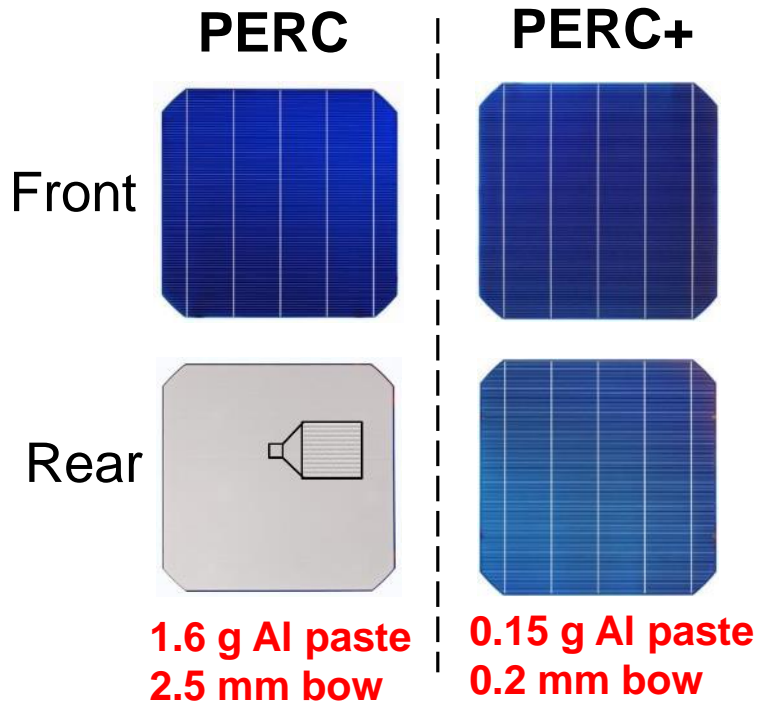
# Flächenoptimierte Ausrichtung von Solaranlagen



- Zusätzlicher Faktor von 2,6 im Ertrag pro Grundfläche möglich
- Der Ertrag pro Modul sinkt gleichzeitig um etwa 15 – 20 %
- Momentan tragen das Modul mit etwa einem Drittel, die Flächenmiete mit etwa 5 % zu den Kosten einer Standard-Solaranlage bei



# Neue bifaziale PERC+ Solarzelle mit Multi-Wire-Verschaltung



- Bifaziale PERC+ Solarzelle mit 22,1 %\*
- Modulwirkungsgrad mit SmartWire-Verschaltung: 19,8 %\*\*
- Industrielle Umsetzung durch SolarWorld,
  - sowie Trina, Longi, NSP, JA Solar,...
- Bis zu 25% Mehrertrag im Feld möglich



\*Interne Messung mit Tester von Pasan, Abschattung durch Drähte nicht berücksichtigt

\*\*unabhängig gemessen von TÜV Rheinland



# Photovoltaisch-thermische Kollektoren



- Kombinierte Gewinnung von Strom (PV) und Wärme (Wärmetauscher)
- Erhöhte Flächenausbeute verglichen mit Standard-PV
- Forschungsthemen: Kollektorentwicklung und Einsatz im System
- Kollektortechnologien mit Kompatibilität zur Standard-PV stehen im Fokus

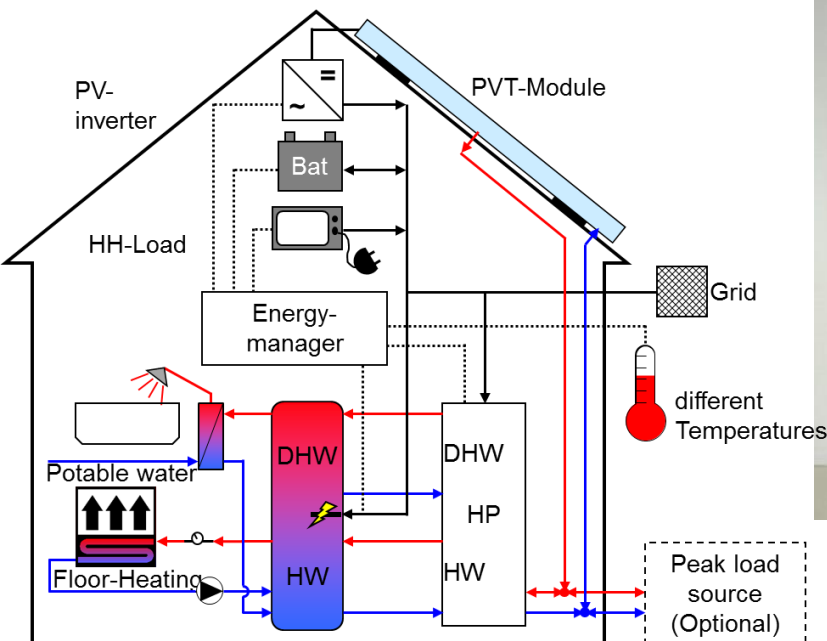
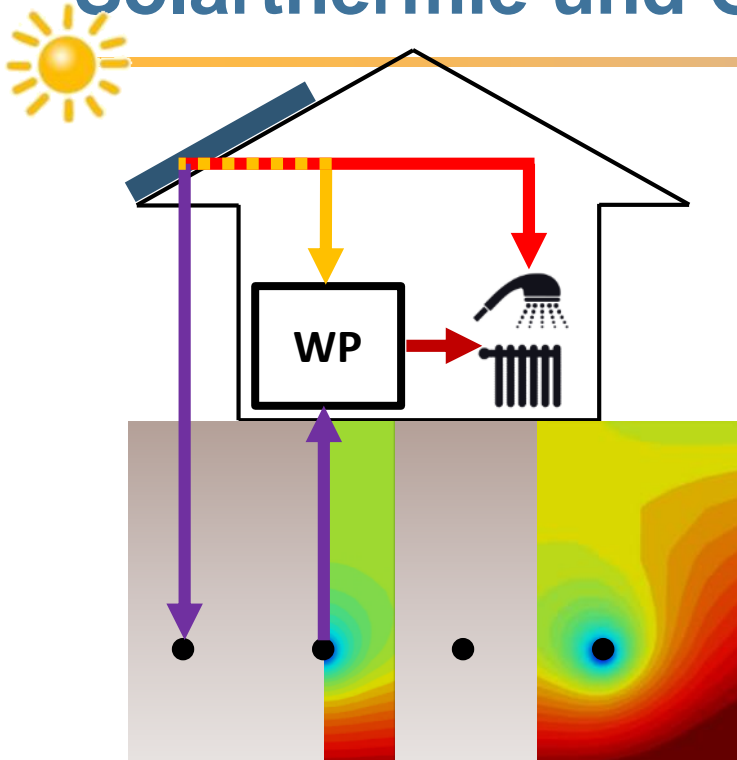


Foto: 1) E. Bertram, Martin Stegmann, K. Kundmüller and C. Rosinski: Unabgedeckte photovoltaisch thermische Kollektoren in Wärmepumpensystemen, OTTI-Symposium Thermische Solarenergie 2011, Bad Staffelstein; 2) Steffen Brötje, ISFH



# Flächeneffiziente Versorgung mit Solarthermie und Geothermie



- Erdkollektor-Wärmepumpenquelle:
  - Effizienter als Luftquelle
  - Kostengünstiger als Erdsonde
- Flächenintensive Quellenart, wenig geeignet für dicht besiedelte Regionen
- Kombination mit Solarthermie reduziert den Flächenbedarf um 50 %



Gefördert durch:



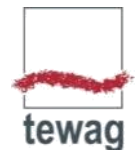
Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

FKZ 03ET1275A

**bwp**

Bundesverband  
Wärmepumpe e.V.



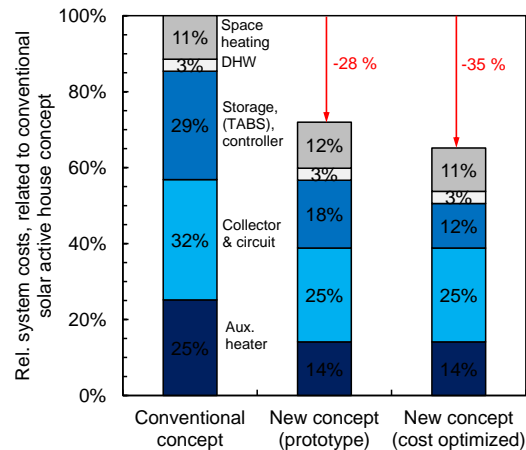
**REHAU**  
Unlimited Polymer Solutions

**FRANK**

# Neues Solarhauskonzept mit Bauteilaktivierung und Wärmepumpe



- Bilanz nach zwei Jahren Betrieb, KFW55:
  - 8 kWh/m<sup>2</sup>a Heizbedarf
- Systemkosten um 30 % reduziert\*
- Wärmetauscherfläche um Faktor 2 reduziert\*
- Solarer Deckungsgrad 50 %



Steinweg J., Rockendorf G. (2016), *Annual Performance of a Solar Active House Prototype – Comparing Measurement and Simulation*, Conference Proceedings EuroSun 2016, Palma de Mallorca

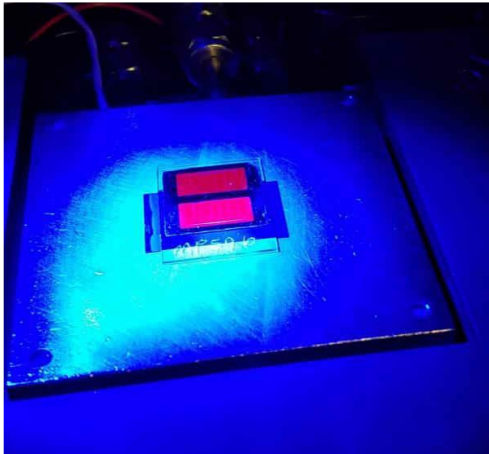
\*Im Vergleich zu „konventionellen“ Sonnenhäusern

Gefördert durch:

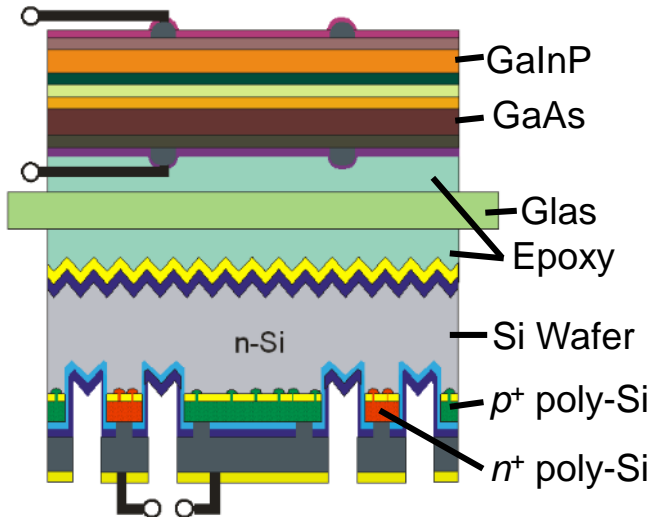


37

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



- Bottom-Zellstruktur: 25,0 % POLO-Junction (ISFH)
- Top-Zellstruktur: 29,9 % GaInP/GaAs (NREL)



- Tandem-Wirkungsgrad 35,4 %\*  
\*4-Terminal-Messung, unabh. Bestätigt durch NREL-Kalibrierlabor
- Tandemtechnologie: Türöffner für ultra-hohe Wirkungsgrade und Flächeneffizienz!

M. Rienäcker et al., 33<sup>rd</sup> EU PVSEC, Amsterdam, Niederlande (2017)

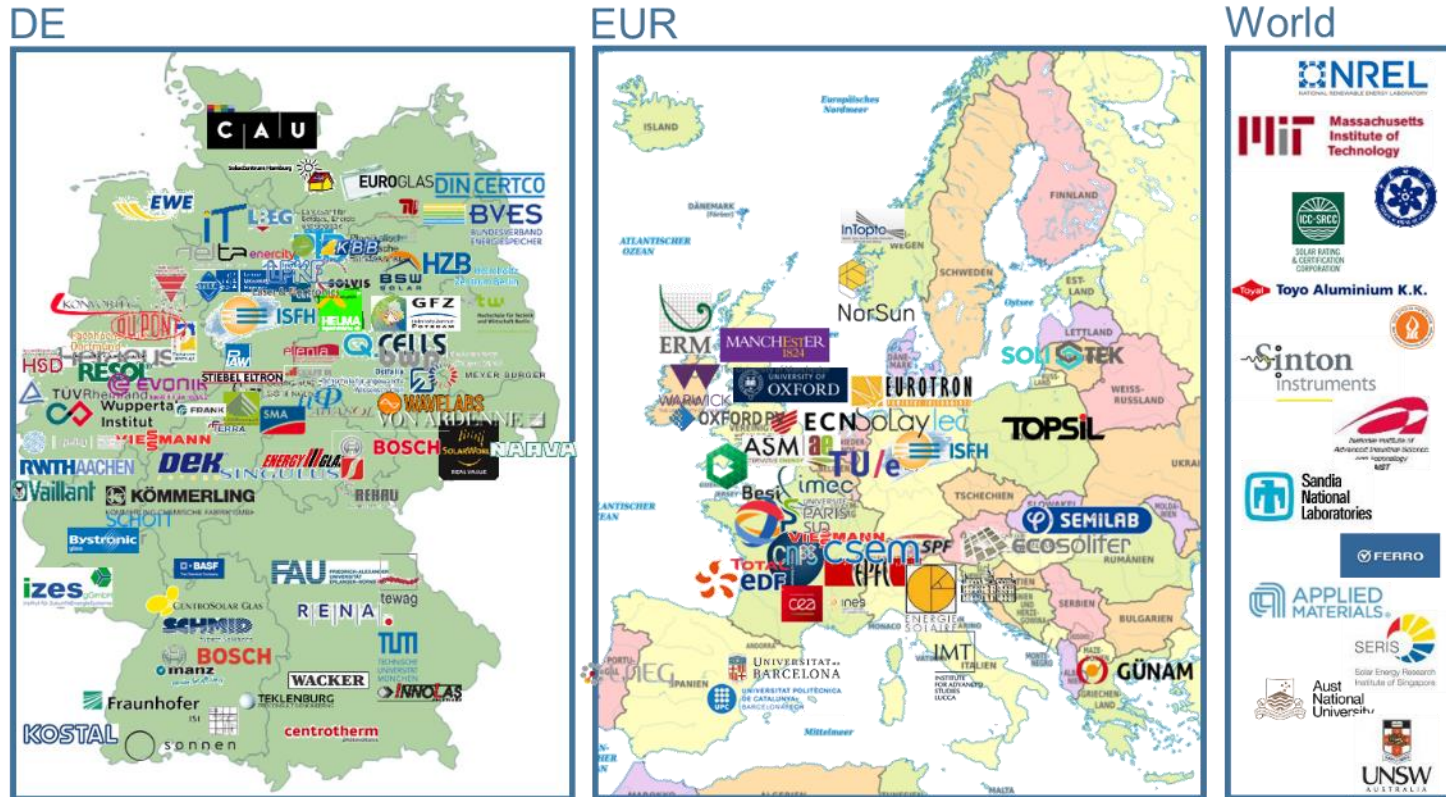
# Auf einen Blick: Drei mögliche Thesen zur Gestaltung des Energiesystems der Zukunft



- Zukünftige Energiesysteme werden weltweit aus ökonomischen und ökologischen Gründen auf Solarenergietechnik basieren. Für die Innovationskraft und Wettbewerbsfähigkeit heimischer Unternehmen ist es wichtig, die Solarenergieerzeugung und -forschung in Deutschland weiter zu fördern.
- Für ein zukünftiges Energiesystem brauchen wir viel mehr Solarenergie, auch in Niedersachsen. Der Ausbau der Solarenergie muss dringend beschleunigt werden. Teile der Flächen mit raumordnerischem Vorbehalt für Landwirtschaft sollten kontrolliert für Solarenergie freigegeben werden.
- Solarthermie und Photovoltaik können beide signifikant zur Energieversorgung 2050 beitragen. Solare Nahwärmenetze sollten ausgebaut werden, da der hohe Flächenertrag der Kollektoren und die hohen Wirkungsgrade von saisonalen Wärmespeichern eine besonders flächeneffiziente Energieversorgung ermöglichen.



# Vielen Dank an unsere Förderer und Forschungspartner und Ihnen für Ihre Aufmerksamkeit!



## Niedersachsen



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Technologie