

# Was kann Sektorenkopplung leisten?

Eine modellgestützte Analyse von Technologien und ihrer Potenziale

DPG-Frühjahrstagung, Münster, 28.März 2017

Hans Christian Gils



Wissen für Morgen

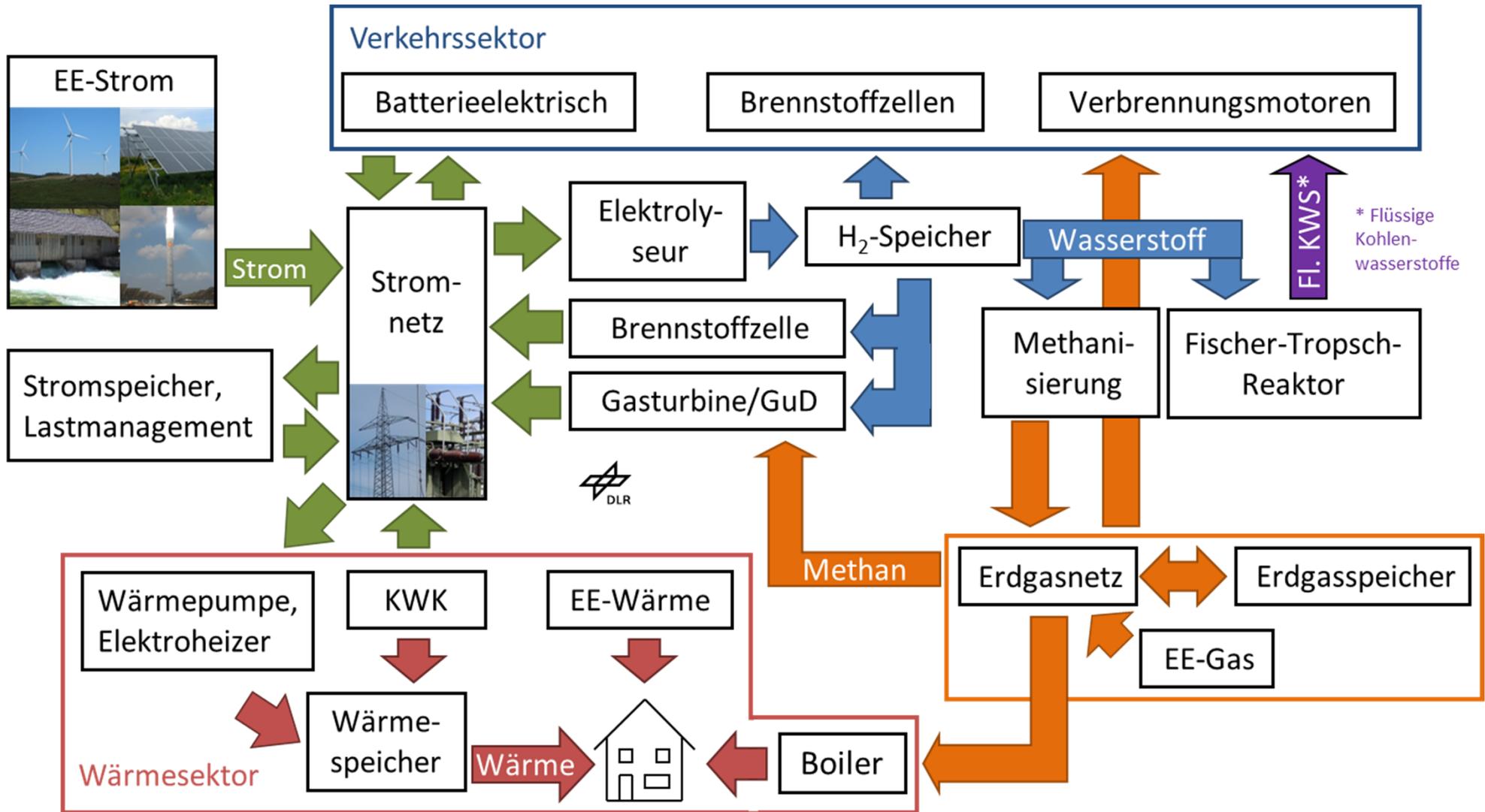


# Übersicht

- Einführung: Prinzipien und Einsatzmöglichkeiten von Sektorenkopplung
- Analyse der Sektorenkopplung mit dem Energiesystemmodell REMix
- Wirkung verschiedener Sektorenkopplungsoptionen
- Fallstudie zur Flexibilisierung der KWK in Europa
- Diskussion und Schlussfolgerungen



# Was ist Sektorenkopplung?

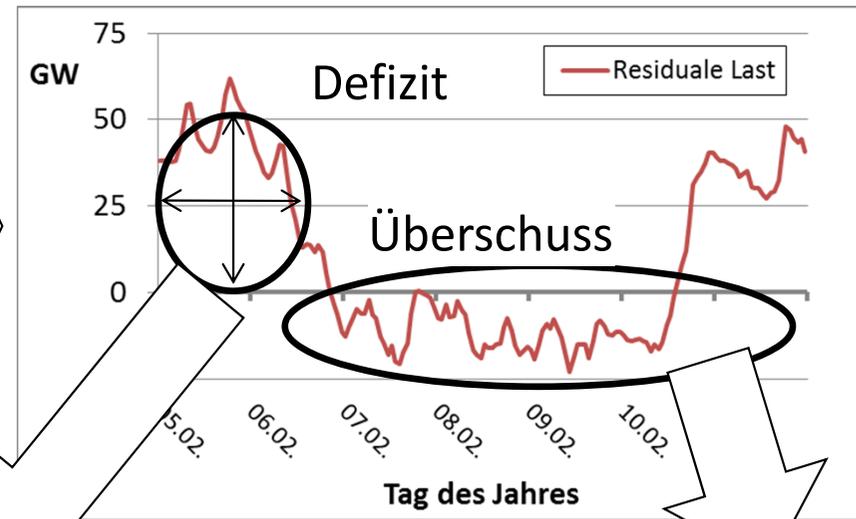
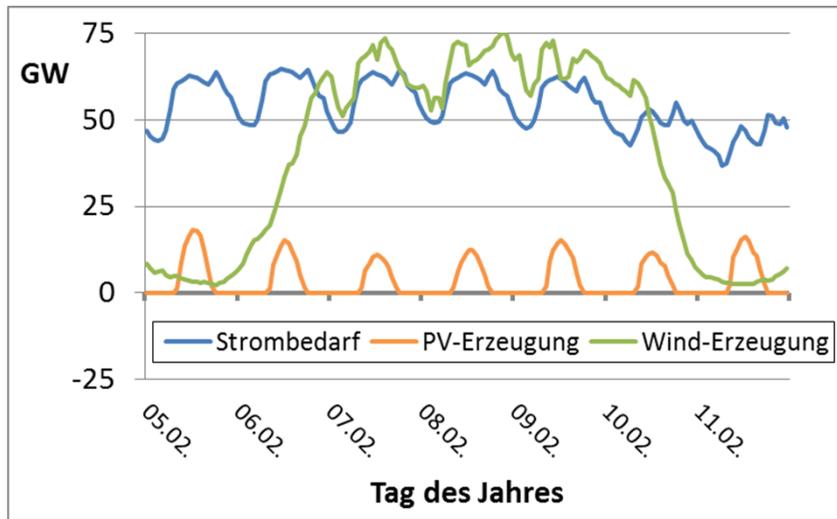


Weitere Optionen: industrielles Lastmanagement/Hybridisierung, Strom-Wärme-Strom-Systeme, flexibler Einsatz elektrischer Betriebsmittel im Gasnetz



# Warum brauchen wir Sektorenkopplung?

1. Vollständige Dekarbonisierung der Energieversorgung erfordert Elektrifizierung und/oder Nutzung synthetischer Energieträger in Wärme- und Verkehrssektor
2. Nutzung hoher Anteile fluktuierender erneuerbarer Energien (fEE):



## Deckung von Defiziten:

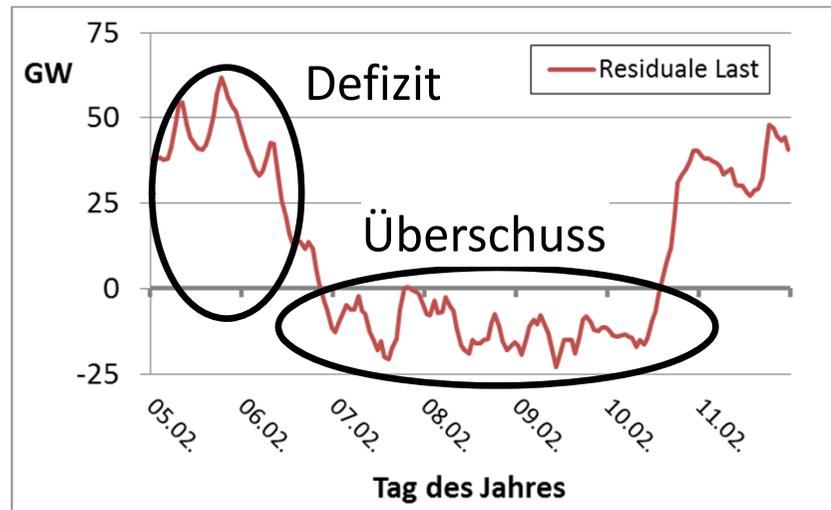
- Speicharentladung
- Senkung des Strombedarfs
- Stromimport
- Einsatz regelbarer Kraftwerke

## Nutzung von Überschüssen:

- Speicherladung
- Erhöhung des Strombedarfs
- Stromexport
- Nutzung in anderen Sektoren



# Einsatzmöglichkeiten von Sektorenkopplungsoptionen



- **Nutzung von Überschüssen**

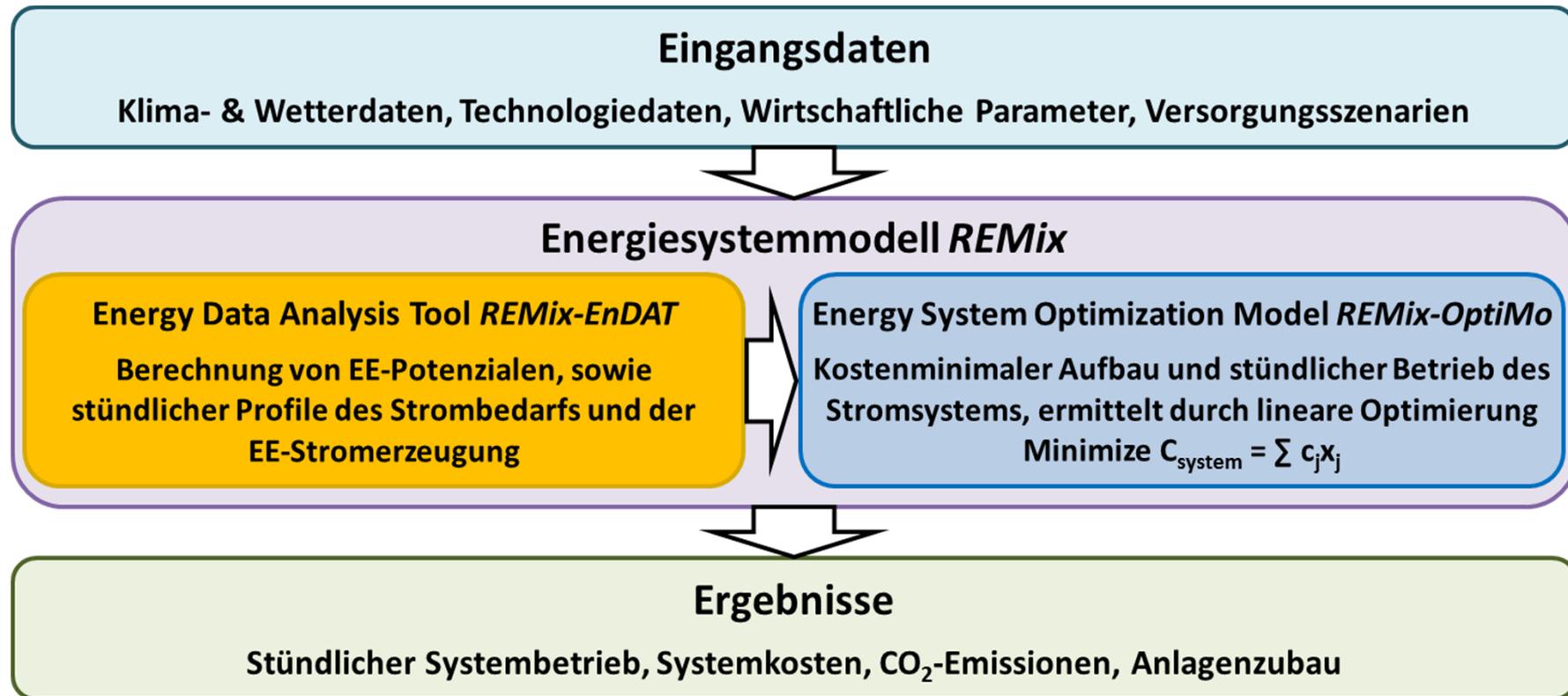
- Gesteuertes Laden von Batteriefahrzeugen
- Stromgeführter Einsatz von Wärmepumpen, ermöglicht durch Wärmespeicher
- Zusätzliche elektrische Wärmeerzeugung in Wärmenetzen/-speicher und Industrie
- Wasserstoffherzeugung für synthetischer Energieträger

- **Deckung von Defiziten**

- Stromgeführter Einsatz von KWK-Anlagen, ermöglicht durch Wärmespeicher
- Absenkung des Strombedarfs (Batteriefahrzeuge, Wärmepumpen, Elektrolyseure)
- Rückverstromung synthetischer Brennstoffe



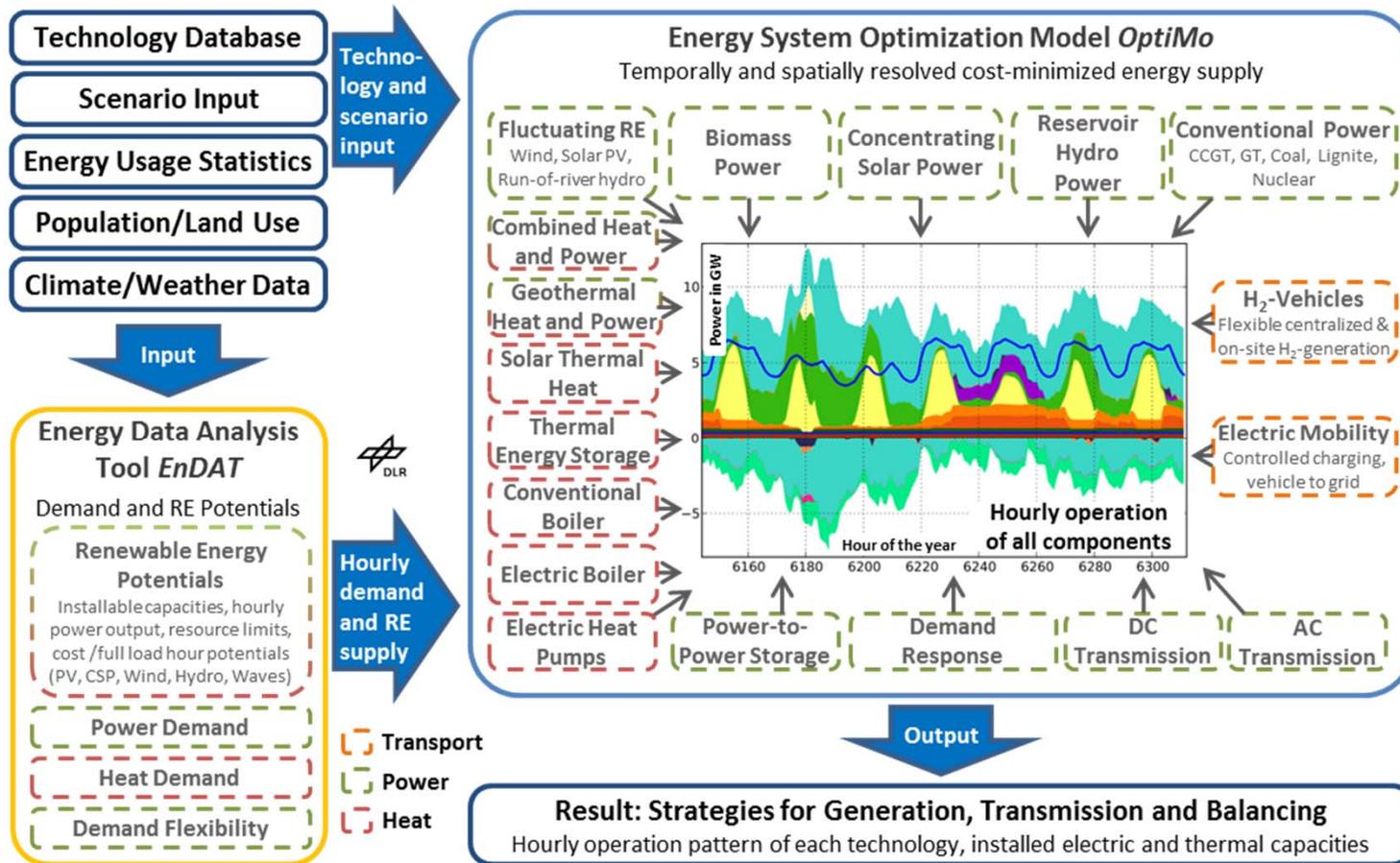
# DLR-Energiesystemmodell REMix – Überblick



- Kostenminimierung, LP-Formulierung in GAMS, Lösung mit CPLEX
- Stündliche Auflösung, typischerweise perfect-foresight für ein Jahr
- Optimierung des Betriebs und Zubaus aller Systemkomponenten
- Zunehmend internationale Anwendung: Kanarische Inseln, Brasilien, USA



# Abbildung der Sektorenkopplung in REMix



- Vollständige Abbildung des Wärmesektors (Industrie/GHD/Haushalte)
- Batteriefahrzeuge mit Ladesteuerung und Vehicle-to-grid
- Brennstoffzellenelektromobilität mit flexibler Elektrolyse und H<sub>2</sub>-Speicher



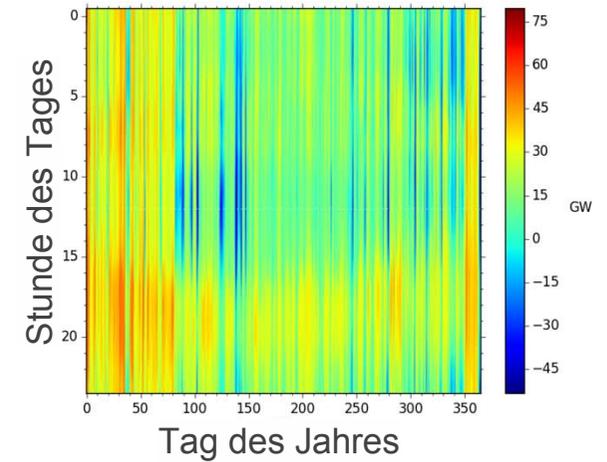
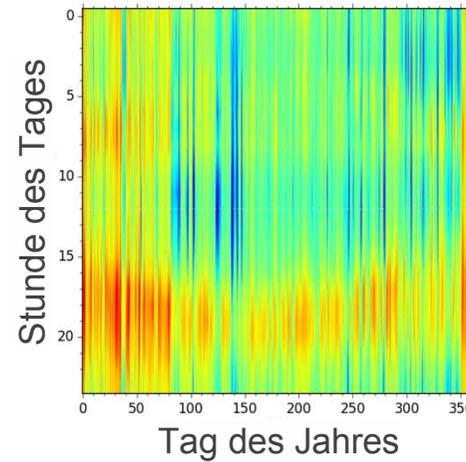
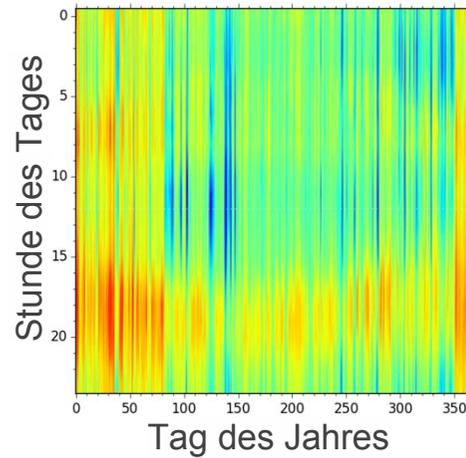
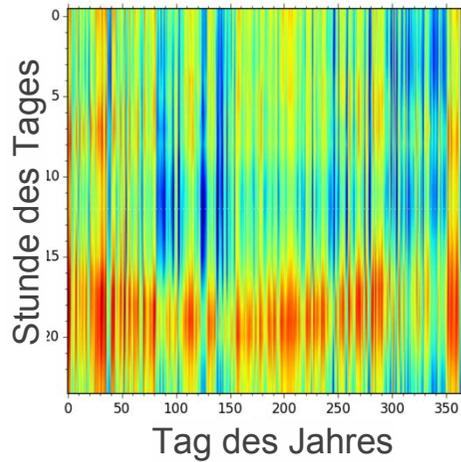
# REMix-Ergebnisse: Ausgleich fluktuierender Erzeugung

**Residuale Last bei 90%  
erneuerbarem Strom...**

**...nach Netznutzung**

**...Pumpspeichern**

**...Lastmanagement ...**

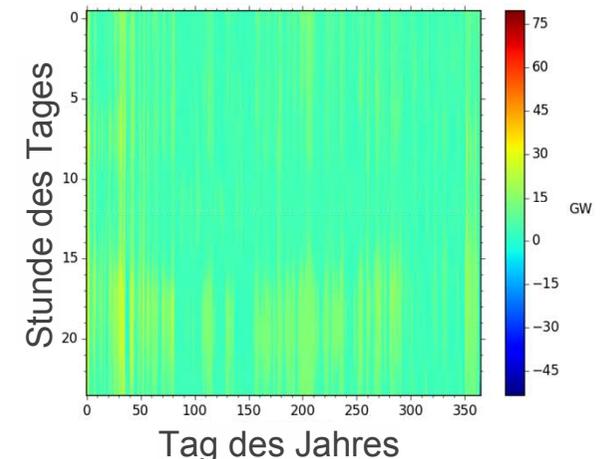
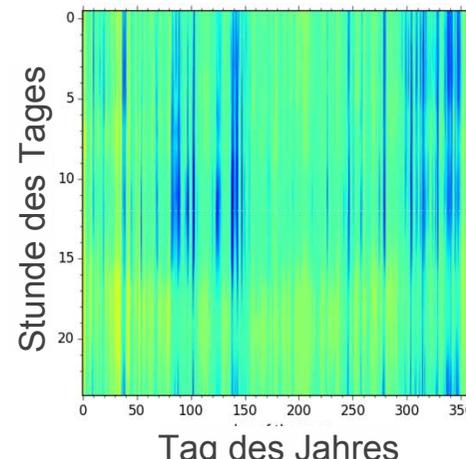
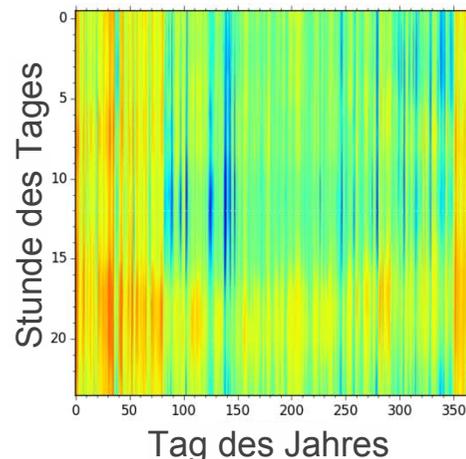
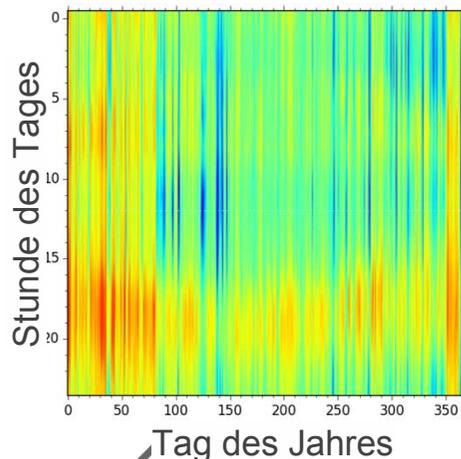


**...Ladesteuerung von  
Elektrofahrzeugen**

**...Power-to-heat**

**...flexibler KWK  
und Wärmepumpen**

**...und Abregelung**

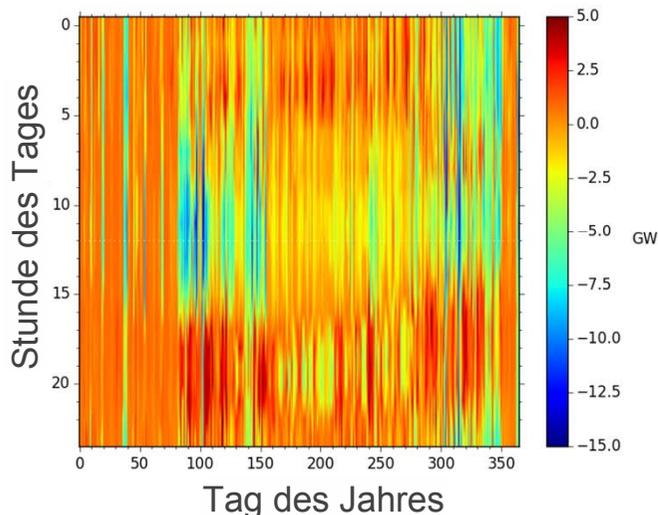


DLR

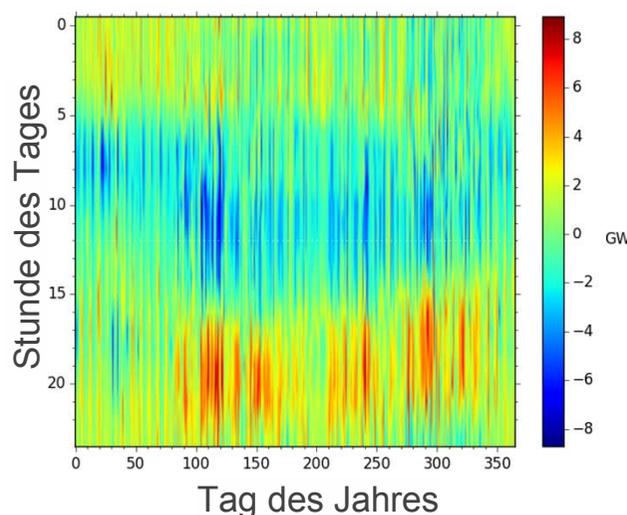
Daten aus [Gils 2015]



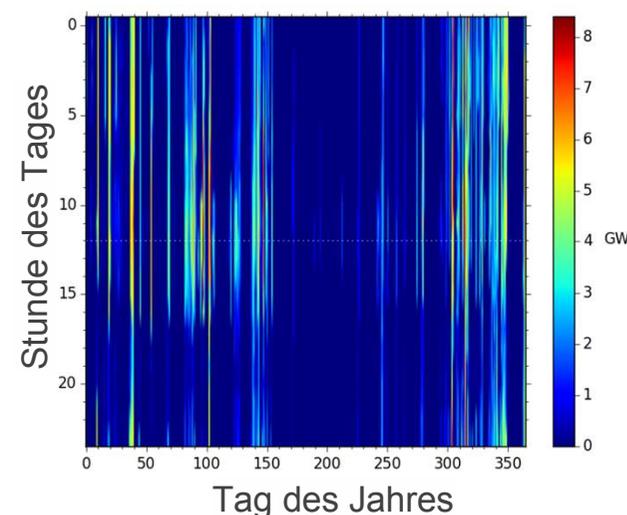
# Flexibilisierung von KWK-Systemen mit Wärmespeichern und Elektrodenkesseln



**KWK-Stromerzeugung:  
Auswirkung der Umstellung  
von Wärme- auf Stromführung**



**Wärmespeicher in KWK-  
Systemen: Einspeicherung (pos.)  
und Ausspeicherung (neg.)**



**Power-to-heat: Direktelektrische  
Wärmeerzeugung in KWK-  
Systemen**

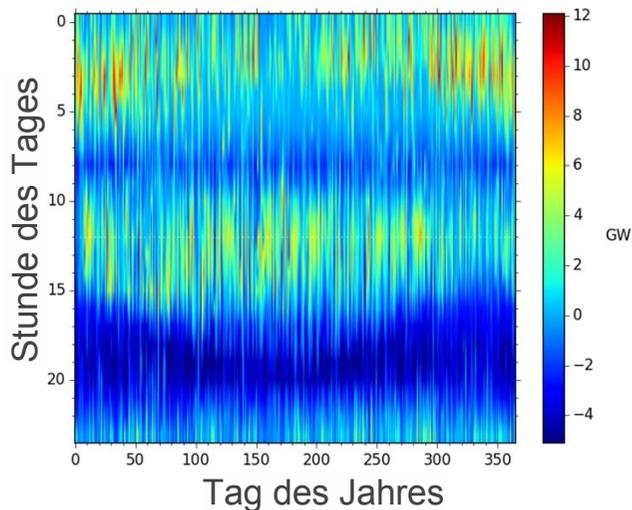
- Verschiebung der KWK-Erzeugung in die Morgen- und Abendstunden
- Große Flexibilitätspotenziale vor allem in der Übergangszeit
- Elektrische Wärmeerzeugung nur in Starkwindphasen



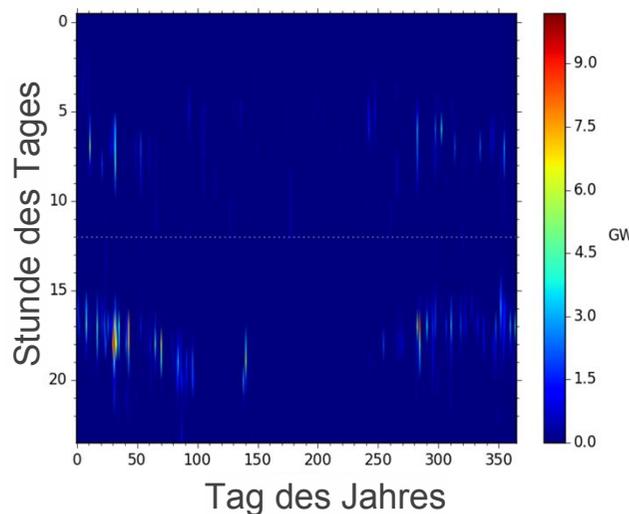
Daten aus [Gils 2015]



# Gesteuertes Laden und Netzurückspeisung von Batterie-Elektromobilen



**Ladeverschiebung: Zunahme (rot) und Abnahme (blau) gegenüber ungesteuertem Fall**



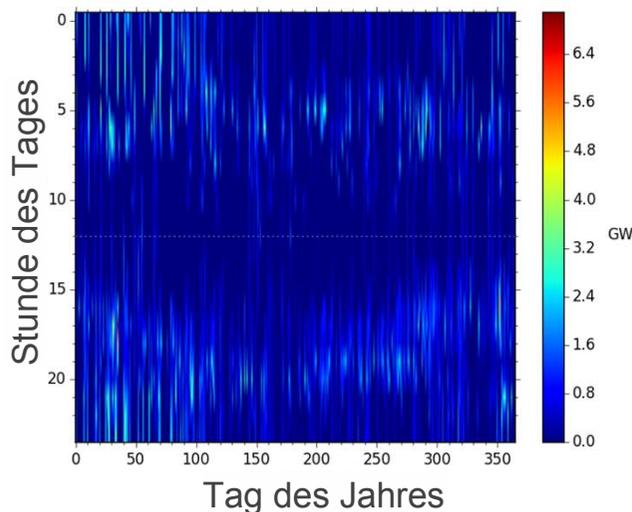
**Rückspeisung aus Elektrofahrzeugen in das Stromnetz**

Szenario für Deutschland in 2030 auf Grundlage von [Luca de Tena 2014] und [Albrecht et al. 2016]

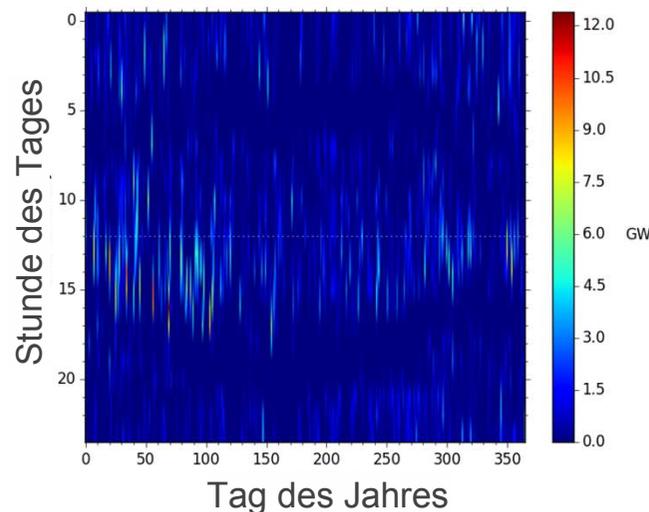
- Minimaler und maximaler Batteriefüllstand und Fahrprofile berücksichtigt
- Regelmäßiges Verzögern des Ladens in die Mittags- und Nachtstunden
- Netzeinspeisung nur in wenigen Stunden zur Deckung residualer Spitzenlasten



# Lastmanagement in Industrie, Gewerbe und Haushalten



**Lastreduktion**



**Lasterhöhung**

- Wirtschaftliche Potenziale vor allem Industrie und Gewerbe
- Einsatz zur Senkung residualer Spitzenlasten in wenigen Stunden des Jahres
- Lastreduktion i.d.R. morgens und abends, Lasterhöhung mittags und nachts
- Einsatz steigt mit PV-Anteil und sinkt durch flexible H<sub>2</sub>-Elektrolyse und CSP



# Fallstudie – Fokus und Ziele

- Fokus: Flexibilisierung von KWK-Versorgung und elektrischen Wärmepumpen
- Analyse der Wirtschaftlichkeit von thermischen Speichern und Elektroheizern
- Bewertung der Wechselwirkung mit alternativen Ausgleichsoptionen
- Quantifizierung der Auswirkung auf Kosten, Abregelung und Back-up-Bedarf



Reine Strom- erzeugung	Öffentliche KWK	Industrie-KWK	Ausgleichs- optionen
Feste Biomasse	Biogas-BHKW	Feste Biomasse	Wechselstromnetz
Geothermie	Erdgas-BHKW	Steinkohle	Gleichstromleitungen
CSP	Feste Biomasse	Braunkohle	Pumpspeicher
Photovoltaik	Entnahme-GuD	Gasturbinen	Wasserstoffspeicher
Offshore Wind	Gegendruck-GuD	Erdgas-BHKW	Flexible Elektrolyse
Onshore Wind	Steinkohle		Lastmanagement
Laufwasser	Braunkohle		Steuerebare E-Mobile
Speicherwasser	Müllverbrennung		Thermische Speicher
Erdgas-GuD	Biogas $\mu$ -BHKW		Elektrokessel
Gasturbine	Erdgas $\mu$ -BHKW		

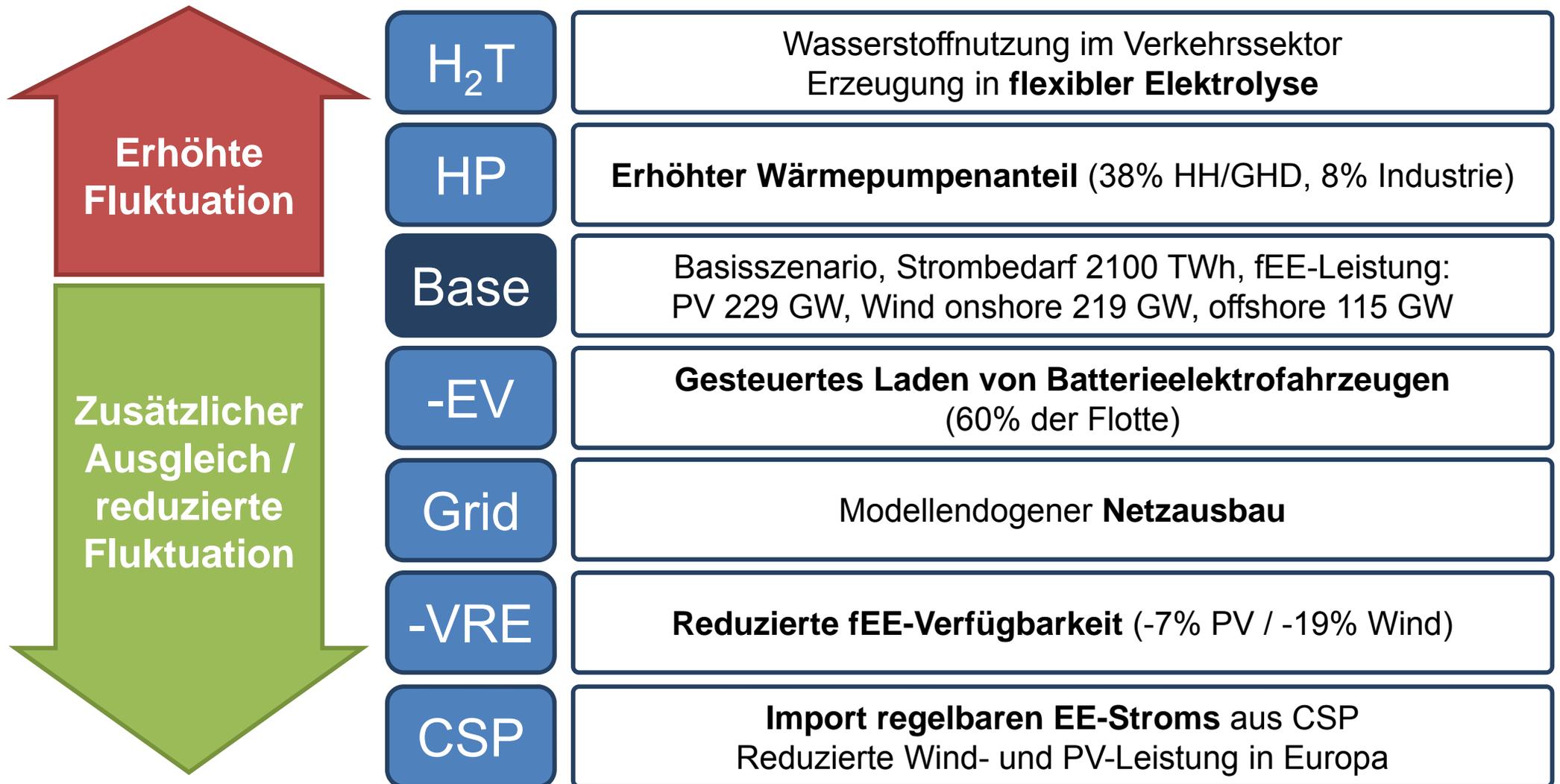


# Fallstudie – Vorgehensweise

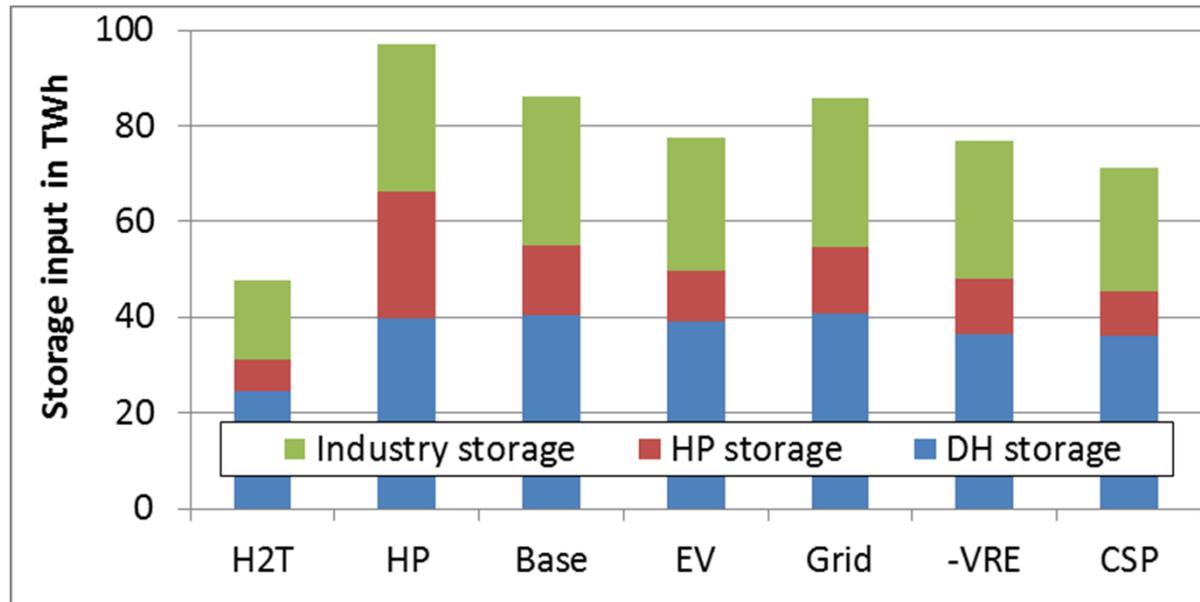
- Szenarioanalyse mit überwiegend vorgegebenem Kraftwerkspark
  - Strom: >80% EE, >60% fEE, ~20% KWK, ~9% Gaskraftwerke
  - Endogener Zubau von Gaskraftwerken als Back-up
- Wärmeversorgung ebenfalls vorgegeben:
  - HH/GHD: 30% Wärmenetze, 5% Objekt-KWK, 21% Wärmepumpen
  - Industrie ( $\vartheta < 500^{\circ}\text{C}$ ): 62% KWK, 4% Wärmepumpen
- Fokus auf dem Ausgleich von EE-Erzeugungsfluktuationen
  - Vergleich von Systemen mit/ohne stromgeführter Wärmeerzeugung
  - Ausbauoptimierung von thermischen Speichern und Elektroheizern



# Fallstudie – Varianten zu alternativen Ausgleichsoptionen



# REMix-Ergebnisse – Wärmespeichernutzung

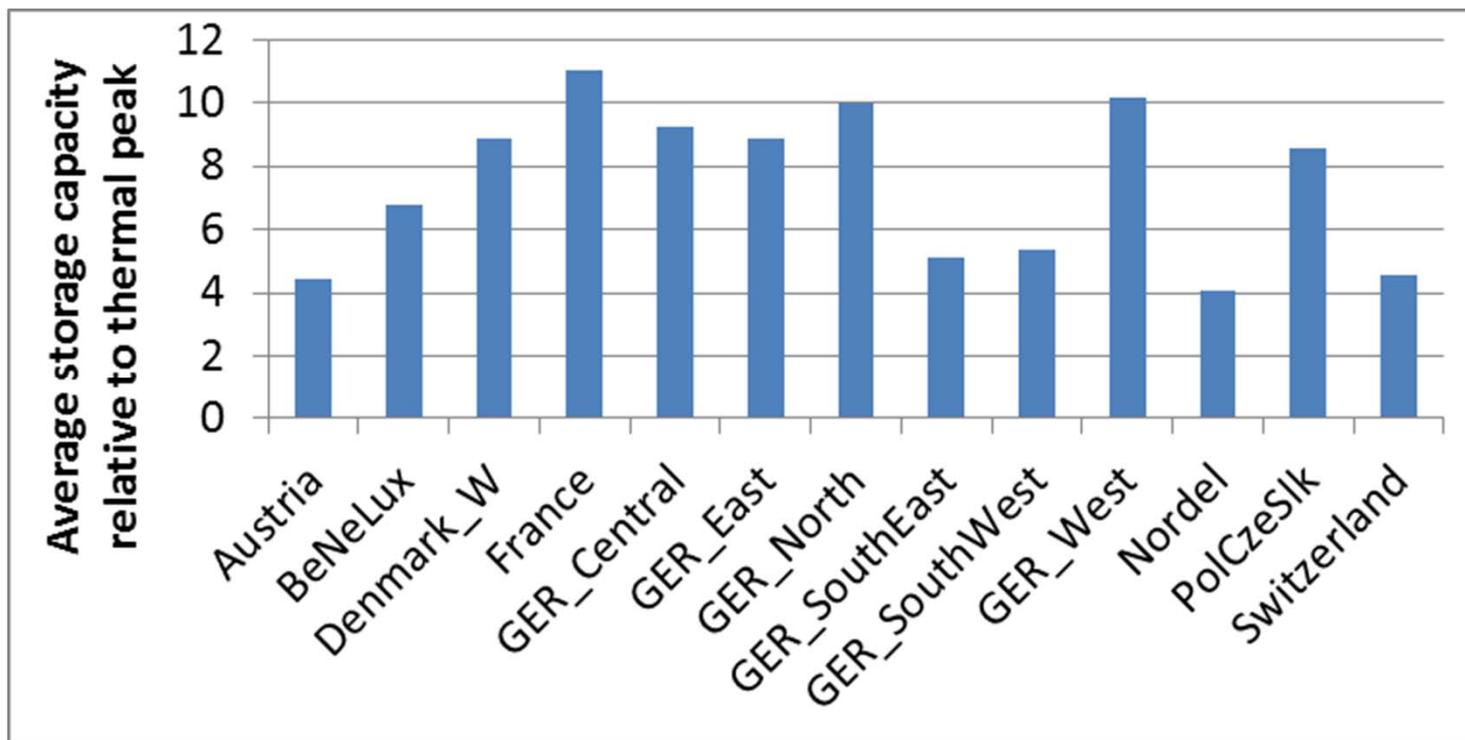


H2T – Flexible Elektrolyseure  
HP – Zusätzliche Wärmepumpen  
Base – Basisszenario  
EV – Ladesteuerung E-Mobilität  
Grid – Netzausbau  
-VRE – Reduzierte fEE-Erzeugung  
CSP – CSP-Import

- Endogenes Investment in Wärmenetzspeicher von 500-600 GWh
- Exogen: weitere 200 GWh in der Industrie, 140 (260) GWh mit Wärmepumpen
- Etwa 10% des jährlichen Wärmenetzbedarfs gehen durch den Speicher
- CSP und Lastmanagement (Elektrolyseure, Batterie-Fzg.) senken Potential
- Zusätzliche Wärmepumpen wirken sich nicht auf Wärmenetzspeicher aus



# REMix-Ergebnisse – Wärmespeicherauslegung

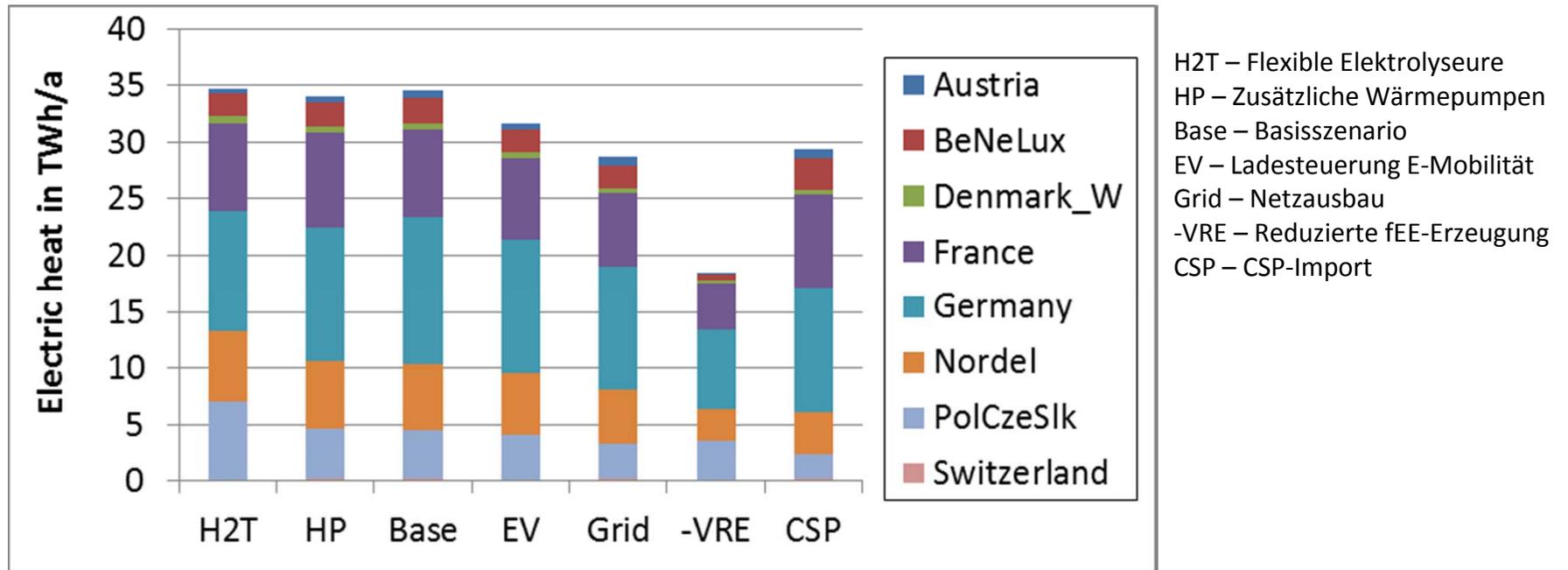


Ergebnisse des Basisszenarios

- Potenzial beeinträchtigt durch Wasserkraft und begünstigt durch Windkraft



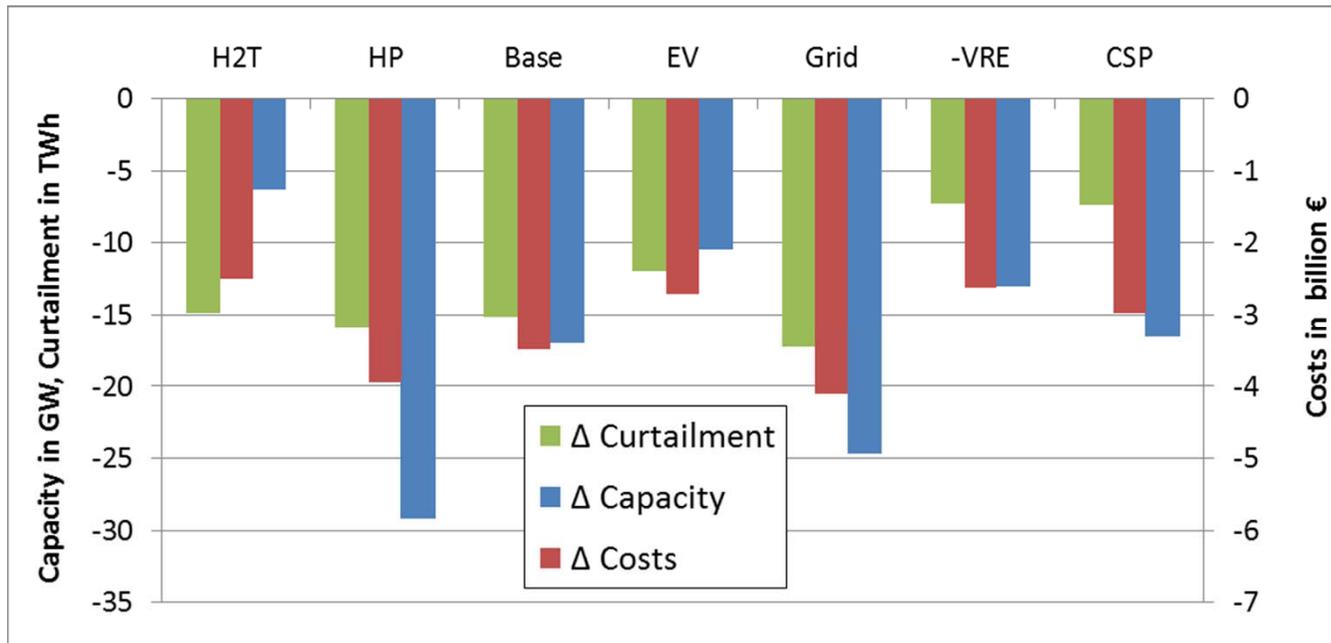
# REMix-Ergebnisse – Elektroheizer in Wärmenetzen



- Endogenes Investment in Elektrokessel von bis zu 43 GW (el)
- Deutliche geringere Werte nur in Szenarien mit weniger fEE (CSP/-VRE)
- Einsatz geringfügig beeinträchtigt durch CSP, Netzausbau und Ladesteuerung
- Elektrolyseure und Wärmepumpen nehmen zusätzliche fEE vollständig auf
- Wahl des Wetterjahres hat wesentlichen Einfluss



# REMix-Ergebnisse – Systemeffekte



H2T – Flexible Elektrolyseure  
 HP – Zusätzliche Wärmepumpen  
 Base – Basisszenario  
 EV – Ladesteuerung E-Mobilität  
 Grid – Netzausbau  
 -VRE – Reduzierte fEE-Erzeugung  
 CSP – CSP-Import

- Referenz: Kosten 86-107 Mrd. €, Abregelung 11-23 TWh, Back-up 96-163 GW
- Maximale Reduktionen
  - Kosten: 4,1 Mrd. € (4,3%) in *Grid*
  - Abregelung: 17 TWh (71%) in *Grid*
  - Back-up: 29 GW (18%) in *HP* (v.a. durch Wärmepumpenflexibilisierung)
  - Emissionen (~2%)



## Fazit und Diskussion

- Stromgeführte Wärme kostensenkend in allen Szenarien
- Kostenoptimale Wärmespeicherauslegung abhängig vom KWK-System
- Wechselwirkung mit Erzeugung und Ausgleich
  - Netzausbau wirkt positiv auf stromgeführte Wärme
  - Ladesteuerung und flexible Elektrolyse verdrängen Wärmespeicher nicht
  - Starker Einfluss des Wetterjahrs
- Sektorenkopplung begünstigt fEE-Integration
  - Wärmespeicherausbau parallel zu fEE-Ausbau vorantreiben
  - Hohes Potential elektrischer Wärmeherzeugung aus EE-Spitzen
- Keine umfassende Betrachtung aller Sektorenkopplungsoptionen
- Einsatz auf kleineren räumlicher oder zeitlichen Skalen nicht bewertet
- Erweiterung auf 100% EE-Szenarien nötig



## Veröffentlichungen

Pregger, T., Luca de Tena, D., O'Sullivan, M., et al. (2012) Perspektiven von Elektro-/Hybridfahrzeugen in einem Versorgungssystem mit hohem Anteil dezentraler und erneuerbarer Energiequellen, Projektbericht für das BMWi.

Luca de Tena, D. (2014), "Large scale renewable power integration with electric vehicles", Dissertation, Universität Stuttgart, <http://dx.doi.org/10.18419/opus-2339>

Scholz, Y., Gils, H.C., Pregger, T., et al. (2014) Möglichkeiten und Grenzen des Lastausgleichs durch Energiespeicher, verschiebbare Lasten und stromgeführte KWK bei hohem Anteil fluktuierender Stromerzeugung, Projektbericht für das BMWi.

Gils, H. C. (2015) Balancing of intermittent renewable power generation by demand response and thermal energy storage (2015), Dissertation, Universität Stuttgart, <http://dx.doi.org/10.18419/opus-6888>

Albrecht, U. et al (2016), „Kommerzialisierung der Wasserstofftechnologie in Baden-Württemberg – Rahmenbedingungen und Perspektiven“, Studie der Ludwig-Bölkow -Systemtechnik GmbH und des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt im Auftrag der e-mobil BW GmbH

Scholz, Y.; Gils, H.C.; Pietzcker, R. (2016) Application of a high-detail energy system model to derive power sector characteristics at high wind and solar shares, Energy Economics, in Press. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2016.06.021>

Gils, H. C. (2016) Economic potential for future demand response in Germany – Modelling approach and case study. Applied Energy, 162: 401-415. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.083>

Gils, H.C. and Simon, S. (2017) Carbon neutral archipelago – 100% renewable energy supply for the Canary Islands, Applied Energy, 188: 342-355. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.023>

Scholz, Y., Gils, H.C., Pietzcker, R. (2017) Application of a high-detail energy system model to derive power sector characteristics at high wind and solar shares, Energy Economics, in Press. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2016.06.021>

Gils, H.C, Scholz, Y., Pregger, T., Luca de Tena, D., Heide, D. (2017) Integrated modelling of variable renewable energy-based power supply in Europe. Energy, 123: 173-188. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.115>

## Kontakt

Dr. Hans Christian Gils, DLR, Institut für Technische Thermodynamik, Systemanalyse und Technikbewertung  
Pfaffenwaldring 38-40 | 70569 Stuttgart | Germany | Telefon +49 711 6862-477 | [hans-christian.gils@dlr.de](mailto:hans-christian.gils@dlr.de) | [www.DLR.de/tt](http://www.DLR.de/tt)

Dieser Vortrag basiert in Teilen auf Ergebnissen der vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Projekte „Perspektiven von Elektro-/Hybridfahrzeugen“ (FKZ 0328005A), „Lastausgleich“ (FKZ 0328009) und „Multi-Sektor-Kopplung“ (FKZ 03ET4038)



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages