

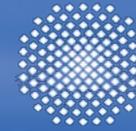
# Modellierung von Energiespeichern und Power-to-X-Technologien mit dem europäischen Energiesystemmodell TIMES PanEU

Julia Welsch, Ulrich Fahl, Markus Blesl, Kai Hufendiek

14. Symposium Energieinnovation Graz

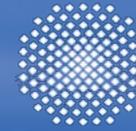
Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung  
Universität Stuttgart

11. Februar 2016



## Gliederung

- › Motivation und Zielsetzung
- › Das europäische Energiesystemmodell TIMES PanEU
- › Herausforderungen bei der Modellierung von Speichern in Energiesystemmodellen
- › Erhöhung der zeitlichen Auflösung in TIMES PanEU
- › Speichermodellierung in TIMES PanEU
- › Ergebnis der Szenarioanalyse und Ausblick



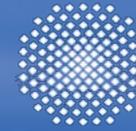
## Motivation und Zielsetzung

### Motivation:

- › Politisch induzierter Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien
- › Infolge dessen zunehmend fluktuierende Einspeisung von Strom aus Wind- und PV-Anlagen
- ➔ Verstärktes Auftreten negativer und stark schwankender Residuallasten
- ➔ Notwendigkeit der Integration von Flexibilisierungsoptionen in das Energiesystem zum zeitlichen und räumlichen Ausgleich von Angebot und Nachfrage

### Zielsetzung:

- › Methodische Erweiterungen des Energiesystemmodells TIMES PanEU in Bezug auf die zeitliche Auflösung zur Modellierung von Speichertechnologien
- › Ermittlung der optimalen Konfiguration von Energiespeichern und Power-to-X-Technologien unter Minimierung der Gesamtsystemkosten
- › Analyse der Wechselwirkungen zwischen der Energiebereitstellung und -nachfrage durch den Einsatz von Power-to-X
- › Erste exemplarische Analysen eines Energiewendeszenarios sollen die Funktionstüchtigkeit des Modells aufzeigen



## Gliederung

- › Motivation und Zielsetzung
- › Das europäische Energiesystemmodell TIMES PanEU
- › Herausforderungen bei der Modellierung von Speichern in Energiesystemmodellen
- › Erhöhung der zeitlichen Auflösung in TIMES PanEU
- › Speichermodellierung in TIMES PanEU
- › Ergebnis der Szenarioanalyse und Ausblick

## Umsetzung

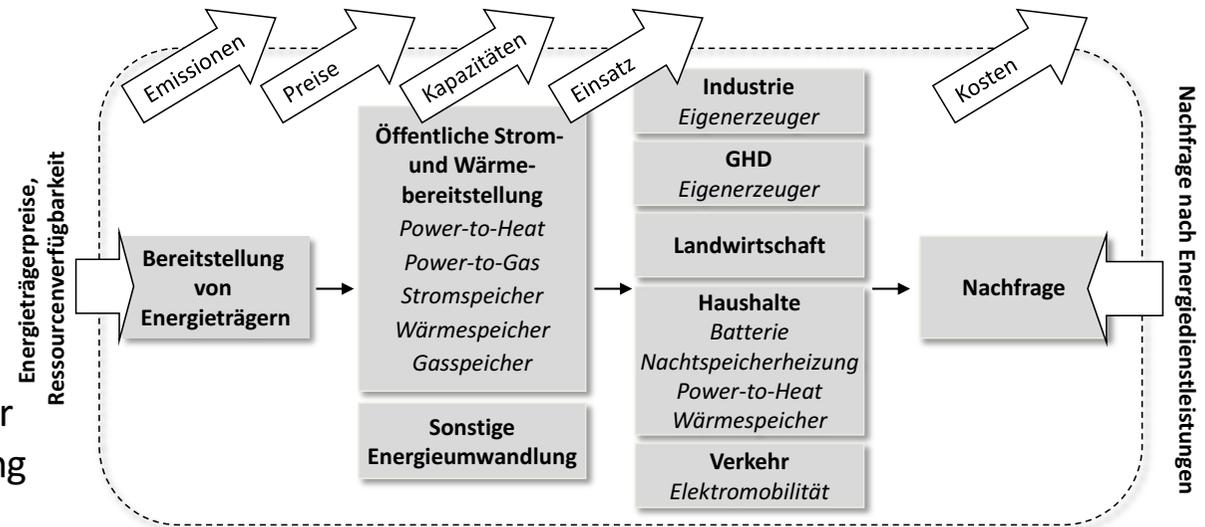
### › Ausgangspunkt ist das Energiesystemmodell TIMES PanEU:

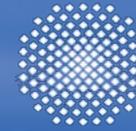
- › Lineares Optimierungsmodell
- › 30 Regionen (EU-28, NO, CH)
- › Zeithorizont: 2010 bis 2050
- › Gesamtes Energiesystem, von der Energiegewinnung/-bereitstellung bis zur Energiedienstleistung

### › Modellerweiterung:

- › Schaffung der methodischen Voraussetzungen zur Modellierung und Bewertung von Speichern
- › Erhöhung der zeitlichen Auflösung für die Modellregion Deutschland (repräsentative, zusammenhängende, aufeinanderfolgende Zeitsegmente)
- › Modellierung von Energiespeichern und Power-to-X-Technologien

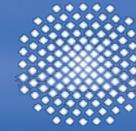
➔ **Forschungsschwerpunkt ist die integrierte Betrachtung der Optionen in den Bereichen Strom, Wärme und Mobilität über den gesamten Optimierungszeitraum bei Berücksichtigung der sektorübergreifenden Wechselwirkungen durch den Einsatz von Power-to-Heat, Power-to-Gas und Elektromobilität**





## Gliederung

- › Motivation und Zielsetzung
- › Das europäische Energiesystemmodell TIMES PanEU
- › Herausforderungen bei der Modellierung von Speichern in Energiesystemmodellen
- › Erhöhung der zeitlichen Auflösung in TIMES PanEU
- › Speichermodellierung in TIMES PanEU
- › Ergebnis der Szenarioanalyse und Ausblick



## Herausforderungen bei der Modellierung von Speichern in Energiesystemmodellen

### Zeitliche Struktur

- › Eine hohe zeitliche Auflösung, z. B. eine stündliche Auflösung, ermöglicht die Abbildung großer Schwankungen in den Einspeiseganglinien sowie die Darstellung von Lastspitzen und Lasttälern
- › Speicher: Zeitliche Auflösung basierend auf repräsentativen, aufeinanderfolgenden Zeitsegmenten
- › Mit wachsender Anzahl an Zeitsegmenten und Modellregionen die Rechenzeit an

### Räumliche Struktur

- › Bei einer hohen räumlichen Auflösung können darüber hinaus Stromnetze und regional differenzierte Wärme- bzw. Fernwärmeforderungen detailliert abgebildet werden
- › Betrachtung aller EU-Staaten in TIMES PanEU, keine regionale Auflösung innerhalb eines Staates

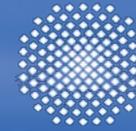
### Komplexität der Topologie einer Region

- › Die Betrachtung aller Bereiche ermöglicht die integrierte Analyse der sektorübergreifenden Wechselwirkungen
- › Speicherausbau und Speichereinsatz können durch die Wechselwirkungen beeinflusst werden

### Dimensionierung der Anlagen

- › Verhältnis von Speicherkapazität und Ein- bzw. Ausspeicherleistung
- › TIMES PanEU: Variables, modellendogenes Verhältnis von Speicherkapazität und Speicherleistung

**Erhöhung der zeitlichen Auflösung notwendig, die räumliche Struktur wird beibehalten**



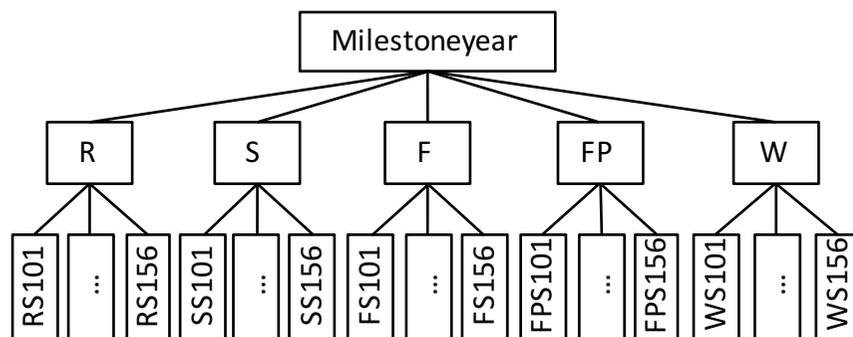
## Gliederung

- › Motivation und Zielsetzung
- › Das europäische Energiesystemmodell TIMES PanEU
- › Herausforderungen bei der Modellierung von Speichern in Energiesystemmodellen
- › Erhöhung der zeitlichen Auflösung in TIMES PanEU
- › Speichermodellierung in TIMES PanEU
- › Ergebnis der Szenarioanalyse und Ausblick

# Erhöhung der zeitlichen Auflösung für Deutschland

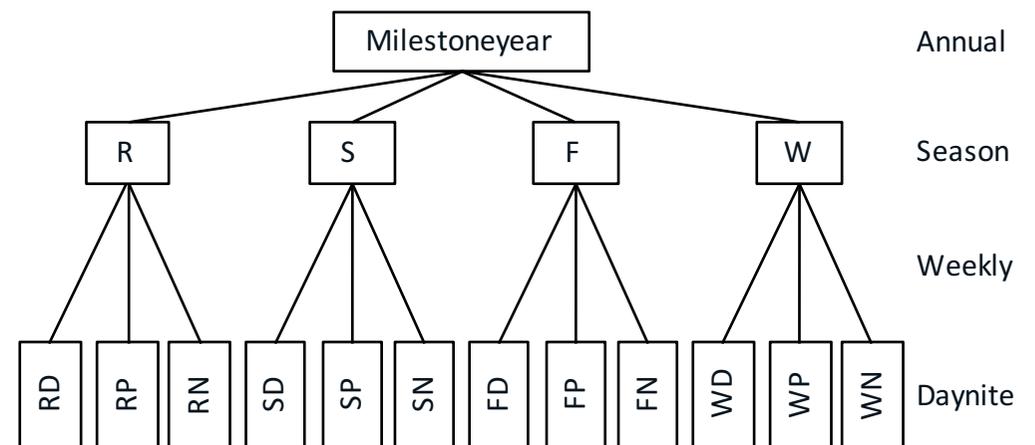
## Deutschland

- › 280 Zeitsegmente:
  - › Eine Typwoche pro Jahreszeit mit dreistündlicher Auflösung (224 Zeitsegmente)
  - › Eine zusätzliche Herbst-Peak-Woche zur Abbildung hoher Einspeisung fluktuierender erneuerbarer Energien (56 Zeitsegmente)
- › Repräsentative zusammenhängende Zeitsegmente



## Resteuropa

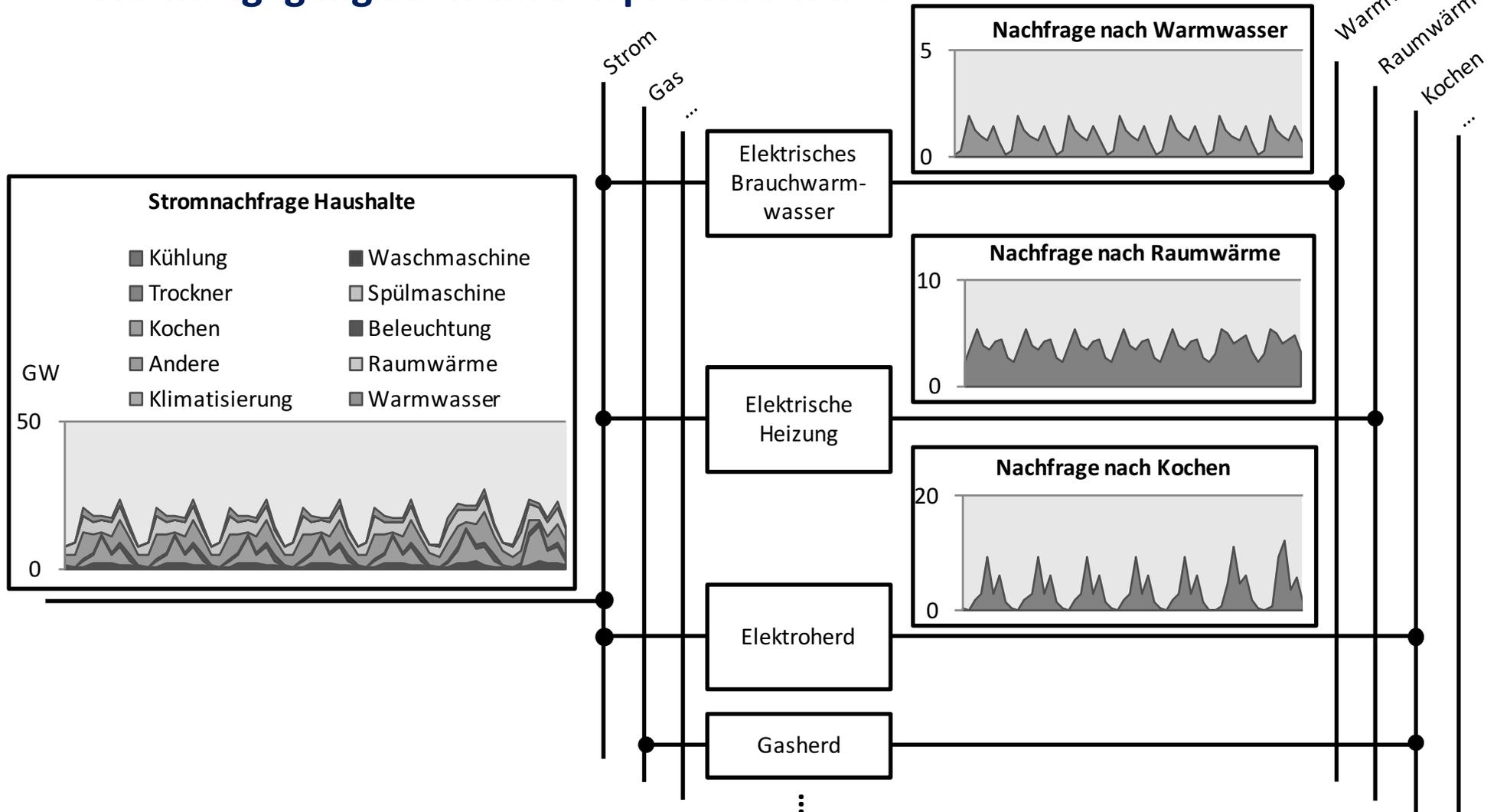
- › 12 Zeitsegmente pro Jahr (ein Typtag pro Jahreszeit mit je drei Zeitschritten)
- › Keine zusammenhängende zeitliche Auflösung



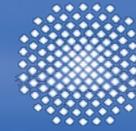
- ➔ Kopplung der unterschiedlichen Timeslice Trees zur Modellierung von Handelsprozessen
- ➔ Integrale Optimierung über alle Länder und Modellperioden



## Nachfrageganglinien am Beispiel Haushalte



➔ Stromnachfrage und Stromlastgang verändern sich in Abhängigkeit der genutzten Stromanwendungen



## Gliederung

- › Motivation und Zielsetzung
- › Das europäische Energiesystemmodell TIMES PanEU
- › Herausforderungen bei der Modellierung von Speichern in Energiesystemmodellen
- › Erhöhung der zeitlichen Auflösung in TIMES PanEU
- › Speichermodellierung in TIMES PanEU
- › Ergebnis der Szenarioanalyse und Ausblick



## Speichermodellierung in TIMES PanEU

	Einspeicherprozess	Speicherprozess	Ausspeicherprozess
$PRC_{\downarrow}ACTUNT$	$PJ$	$PJ$	$PJ$
$PRC_{\downarrow}CAPUNT$	$GW$	$PJ$	$GW$
$PRC_{\downarrow}CAPACT$	$\frac{8760 \text{ GWh}}{GW}$ $= \frac{8760 \text{ h} \cdot 3600 \frac{s}{h} \cdot 10^{-6} \frac{PW}{GW} \cdot GW}{GW}$ $= 31,536 \frac{PJ}{GW}$	$1 \frac{PJ}{PJ}$	$31,536 \frac{PJ}{GW}$

$PRC_{ACTUNT}$ : Aktivität des Prozesses

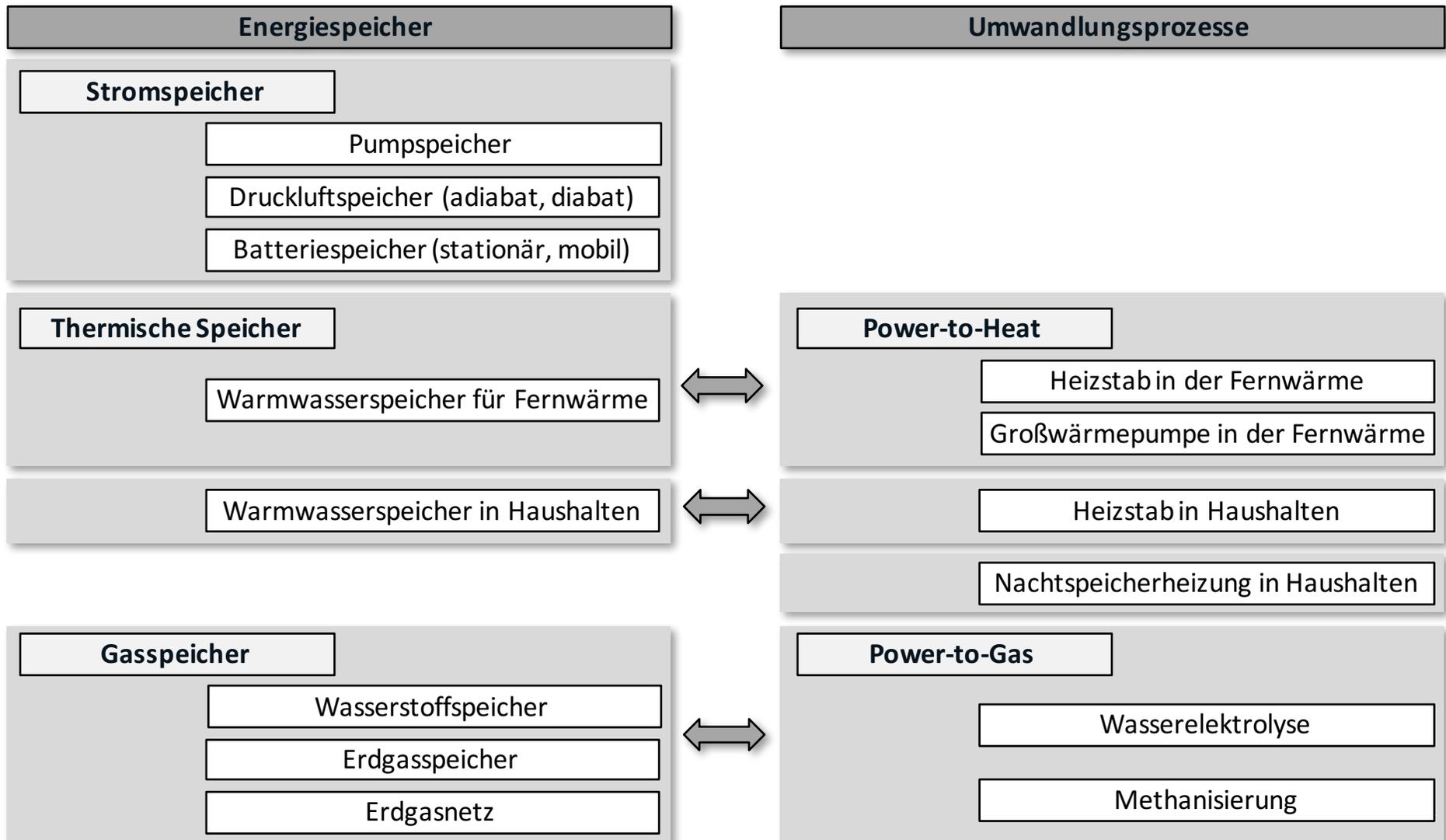
$PRC_{CAPUNT}$ : Kapazität des Prozesses

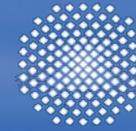
$PRC_{CAPACT}$ : Quotient aus Aktivität und Kapazität

➔ Speicherkapazität und Speicherleistung sind modellendogenes Optimierungsergebnis



## Speichermodellierung in TIMES PanEU





## Pumpspeicher und Druckluftspeicher

### Pumpspeicher

Netzstrom  
Übertragungsnetz

Pumpspeicher

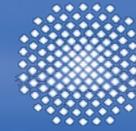
### Druckluftspeicher adiabat und diabat

Netzstrom  
Übertragungsnetz

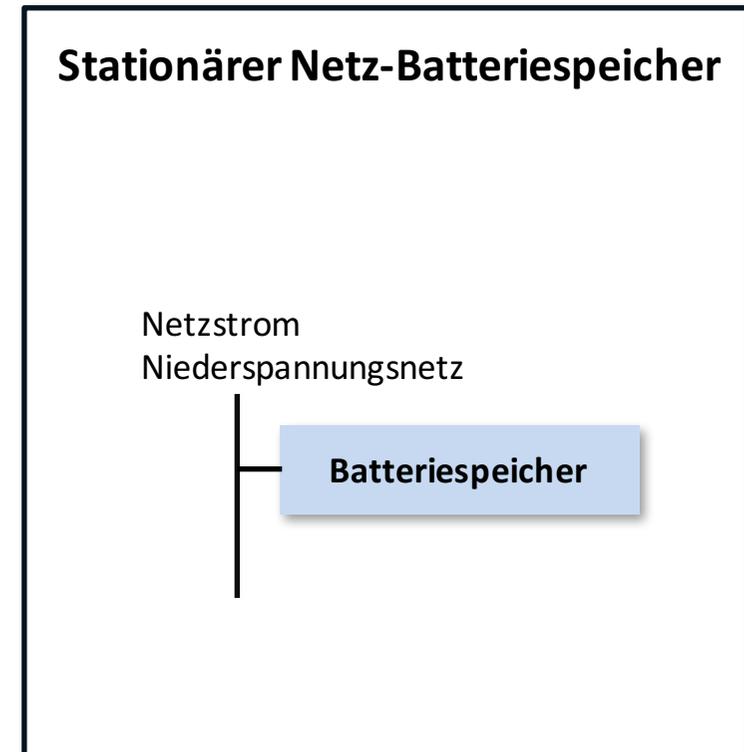
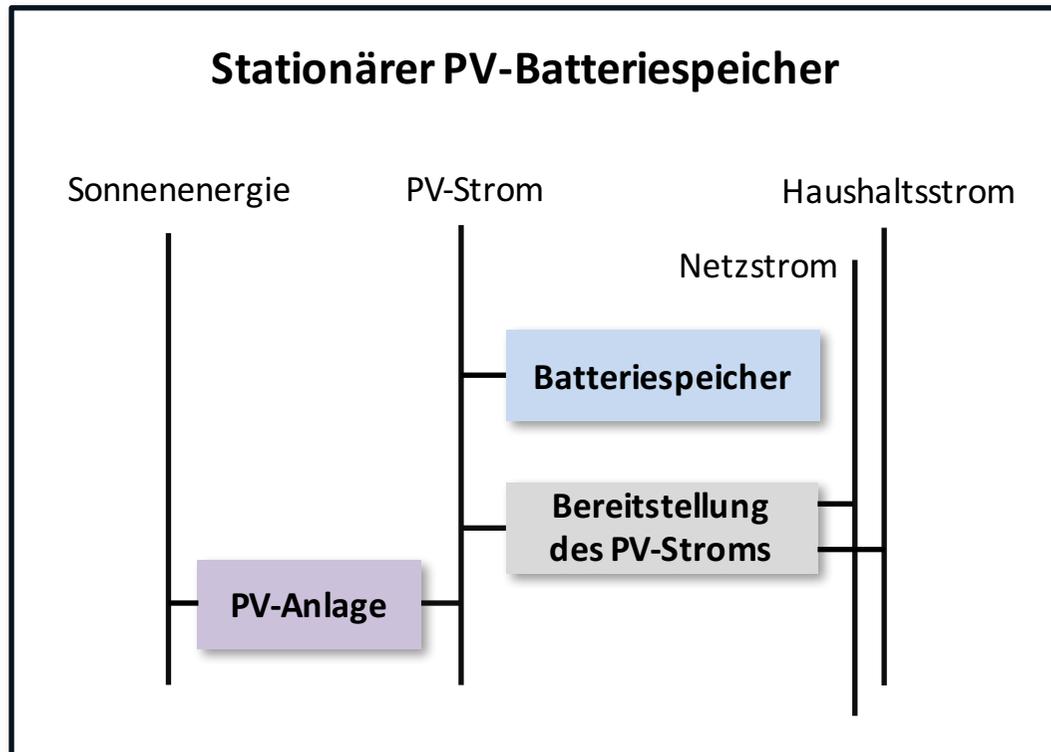
Erdgas  
(bei diabatem  
Speicher)

Druckluftspeicher

- ➔ Zentral im Übertragungsnetz
- ➔ Adiabate Druckluftspeicher: Speicherung in Salzkaverne, Speicherung in oberirdischem Tank
- ➔ Diabate Druckluftspeicher: Speicherung in Salzkaverne
- ➔ Für Deutschland und Resteuropa
- ➔ Berücksichtigung der länderspezifischen Potentiale von Salzkavernen

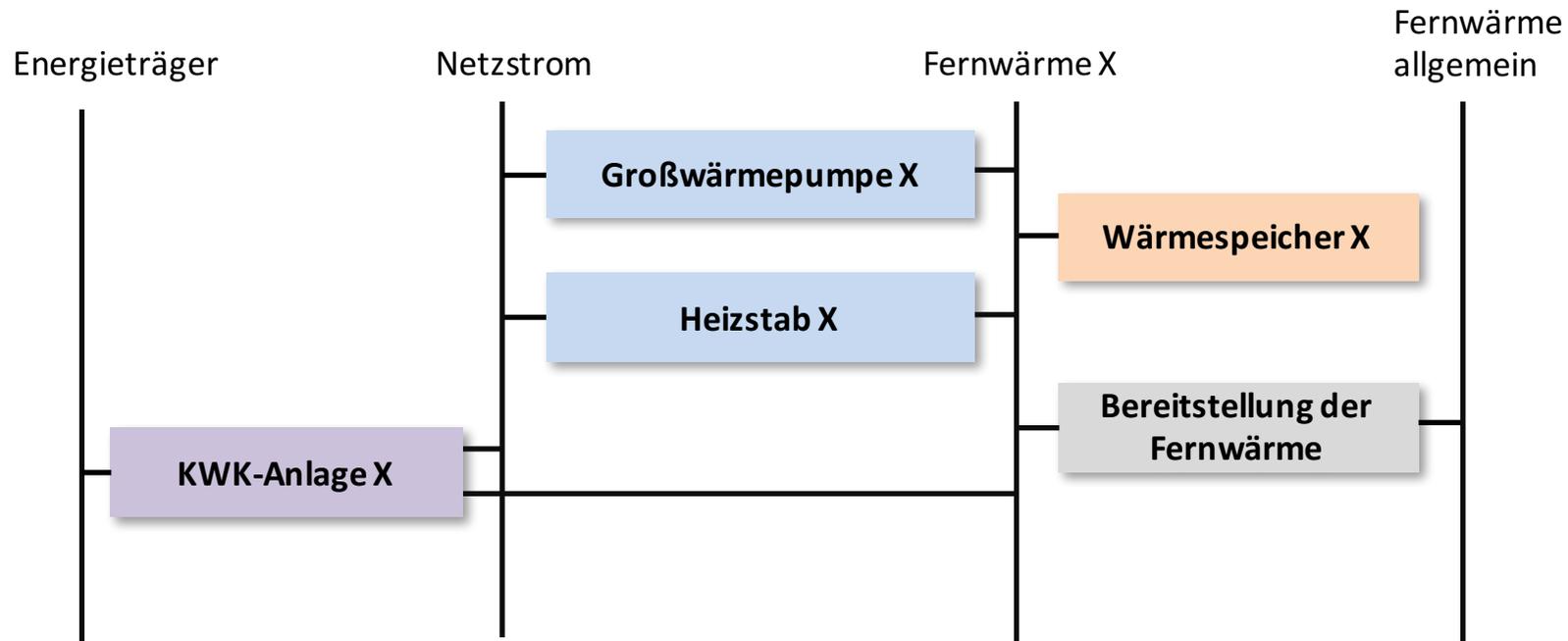


## Stationäre Batteriespeicher

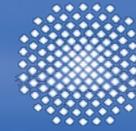


- ➔ Berücksichtigung des Eigenverbrauchs des PV-Stroms durch die Haushalte
- ➔ PV-Batteriespeichertechnologien: Lithium-Ionen, Bleisäure
- ➔ Netz-Batteriespeichertechnologien: Lithium-Ionen, Bleisäure, Vanadium-Redox-Flow
- ➔ Für Deutschland und Resteuropa

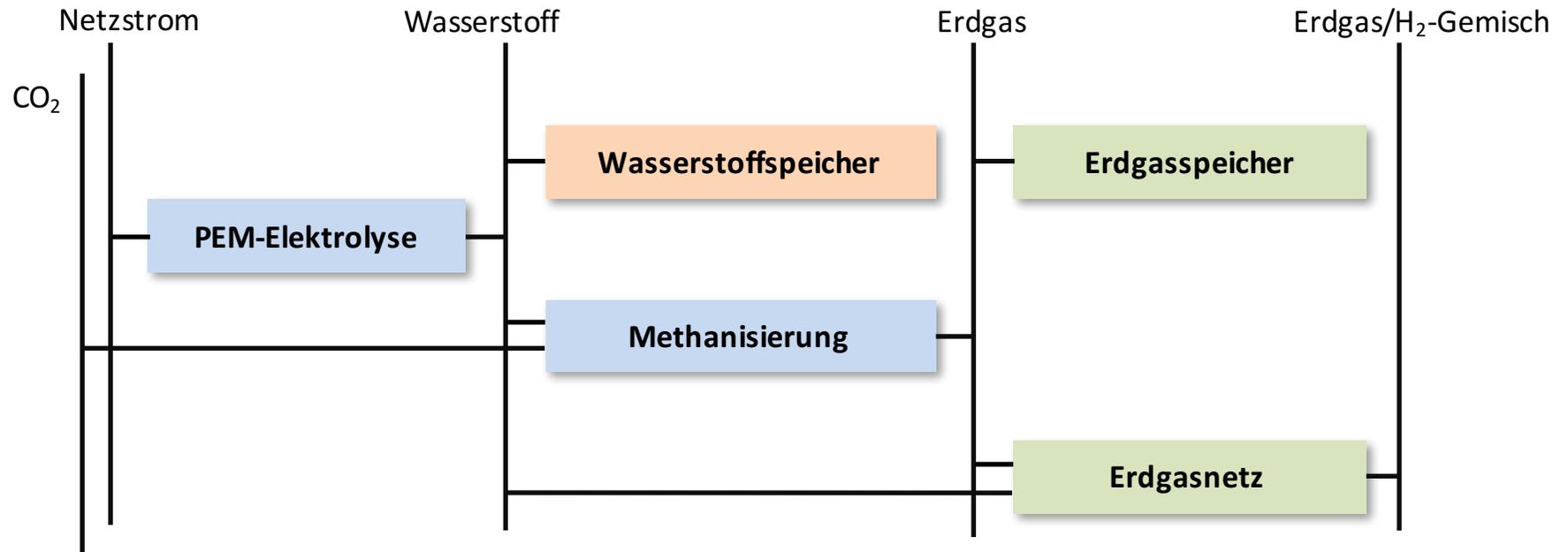
## Power-to-Heat mit Wärmespeichern in der Fernwärme



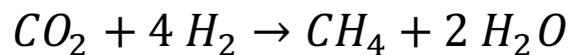
- ➔ Jeder Staat als Punktmodell, keine differenzierte regionale Auflösung: Bündelung von Bereitstellung und Nachfrage
- ➔ Für jede Technologie (KWK-Anlagen und solare Fernwärme) eigene Investitionsoption für Warmwasserspeicher, Heizstab und Großwärmepumpe
- ➔ Wärmespeichertechnologie: Warmwassertank
- ➔ Für Deutschland und Resteuropa



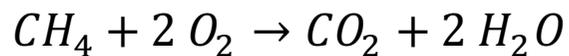
## Power-to-Gas mit Gasspeichern



Methanisierung:

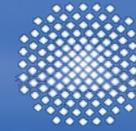


Erdgasverbrennung:

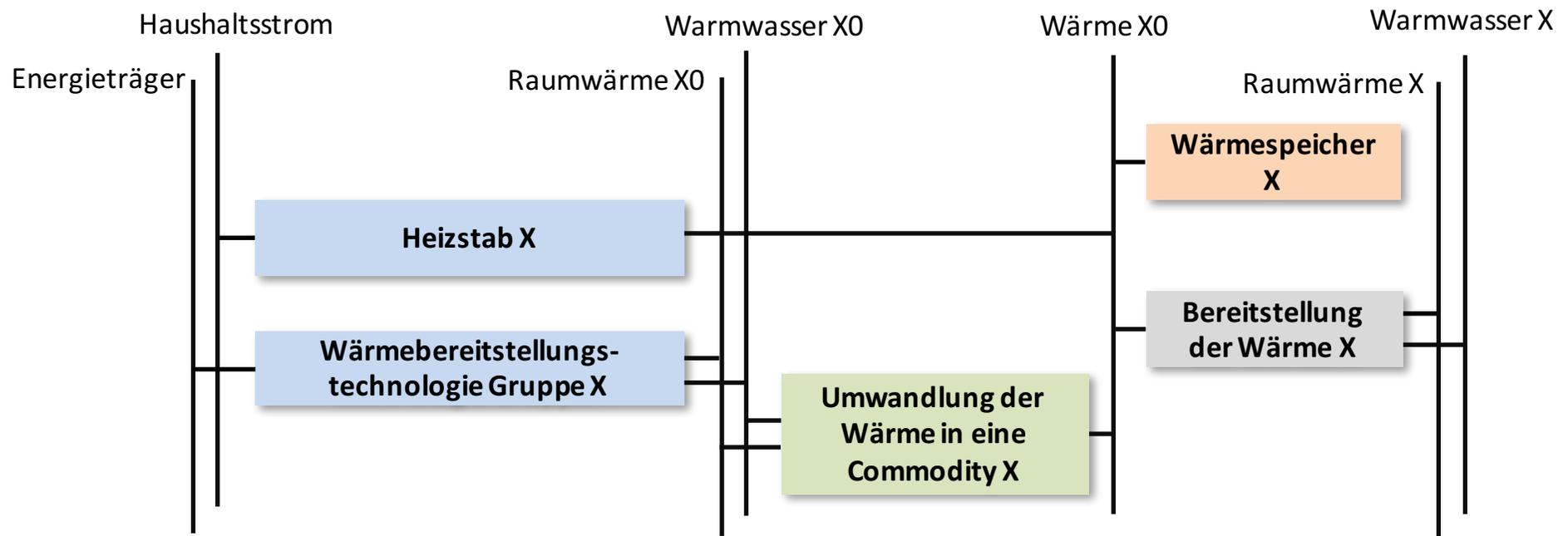


→ Methanisierung CO<sub>2</sub>-neutral

- Wasserstoffspeicher: Salzkaverne, Reservoir
- Erdgasspeicher: Salzkaverne, Reservoir
- Für Deutschland und Resteuropa
- Berücksichtigung der länderspezifischen Potentiale von Salzkavernen und Reservoirs

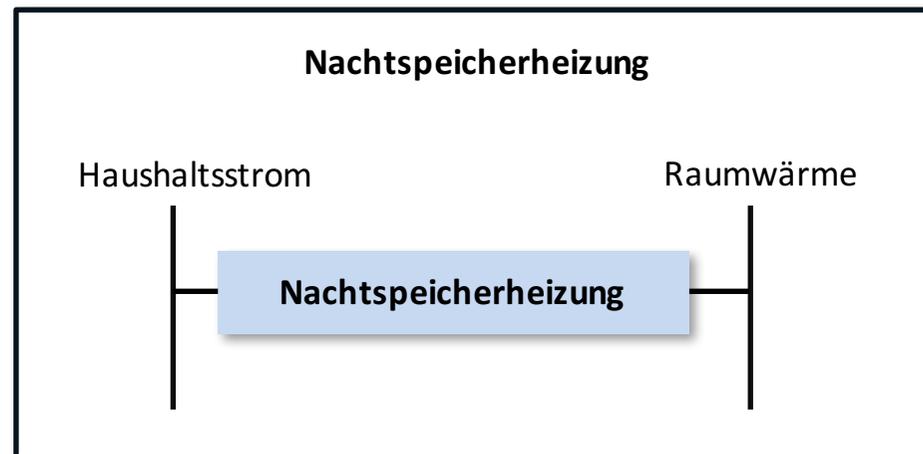


## Power-to-Heat mit Wärmespeicher dezentral in Haushalten



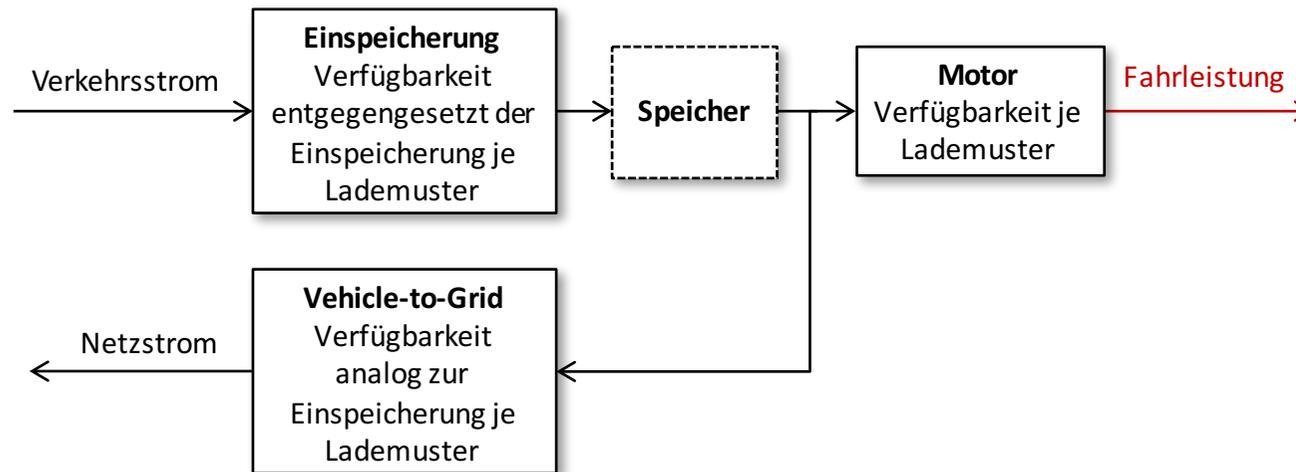
- ➔ Wärmespeichertechnologie: Warmwassertank
- ➔ Modellierung nur für Deutschland
- ➔ Noch nicht in Szenariorechnungen enthalten

## Nachtspeicherheizungen in Haushalten

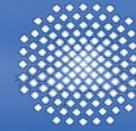


- ➔ Einspeicherung in vorgegebenen Zeitsegmenten, Ausspeicherung gemäß Nutzerprofil
- ➔ Modellierung nur für Deutschland
- ➔ Noch nicht in Szenariorechnungen enthalten

## Mobile Batteriespeicher mit Vehicle-to-Grid



- ➔ Modellierung nur für Deutschland
- ➔ Unterscheidung zwischen verschiedenen Personengruppen mit individuellen Lademustern
- ➔ Speichertechnologie: Lithium-Ionen-Batterie
- ➔ Noch nicht in Szenariorechnungen enthalten



## Speichermodellierung in TIMES PanEU

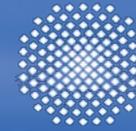
- › **Modellierung aller Energiespeicher als Tagesspeicher (auf der Ebene WEEKLY):**
  - › Speicherung erfolgt zwischen den Zeitsegmenten, die im Timeslice Tree unter einem gemeinsamen Knoten liegen (Speicherbetrieb innerhalb einer Typwoche)
  - › Der Speicherfüllstand  $VAR_{\downarrow}ACT$  in Zeitsegment  $ts$  ergibt sich dabei ohne Berücksichtigung von Speicherverlusten aus dem Speicherfüllstand im vorherigen Zeitsegment zuzüglich Input  $VAR_{SIN}$  abzüglich Output  $VAR_{SOUT}$  :

$$VAR_{\downarrow}ACT(ts) = VAR_{\downarrow}ACT(ts - 1) + VAR_{SIN}(ts - 1) - VAR_{SOUT}(ts - 1)$$

- › Für den Tagesspeicher gilt als Kapazitätsrestriktion, dass der Speicherfüllstand in allen Zeitsegmenten jedes Typwochentages kleiner sein muss als der maximale Energieinhalt:

$$\frac{VAR_{\downarrow}ACT(ts)}{\text{Anzahl der Wiederholungen eines Zeitsegmentes pro Jahr}} \leq \text{Kapazität}$$

- › **Modellierung von Pumpspeicher, Erdgasspeicher und Wasserstoffspeicher zusätzlich als saisonale Wochenspeicher (auf der Ebene SEASON):**
  - › Berücksichtigung saisonaler Langfristspeicherung
  - › Einspeicherung in einer Jahreszeit, Ausspeicherung in einer anderen Jahreszeit
  - › Ein- bzw. Ausspeicherung erfolgen innerhalb einer Jahreszeit mit konstanter Leistung



## Gliederung

- › Motivation und Zielsetzung
- › Das europäische Energiesystemmodell TIMES PanEU
- › Herausforderungen bei der Modellierung von Speichern in Energiesystemmodellen
- › Erhöhung der zeitlichen Auflösung in TIMES PanEU
- › Speichermodellierung in TIMES PanEU
- › Ergebnis der Szenarioanalyse und Ausblick



## Szenariendefinition eines exemplarischen Energiewendeszenarios

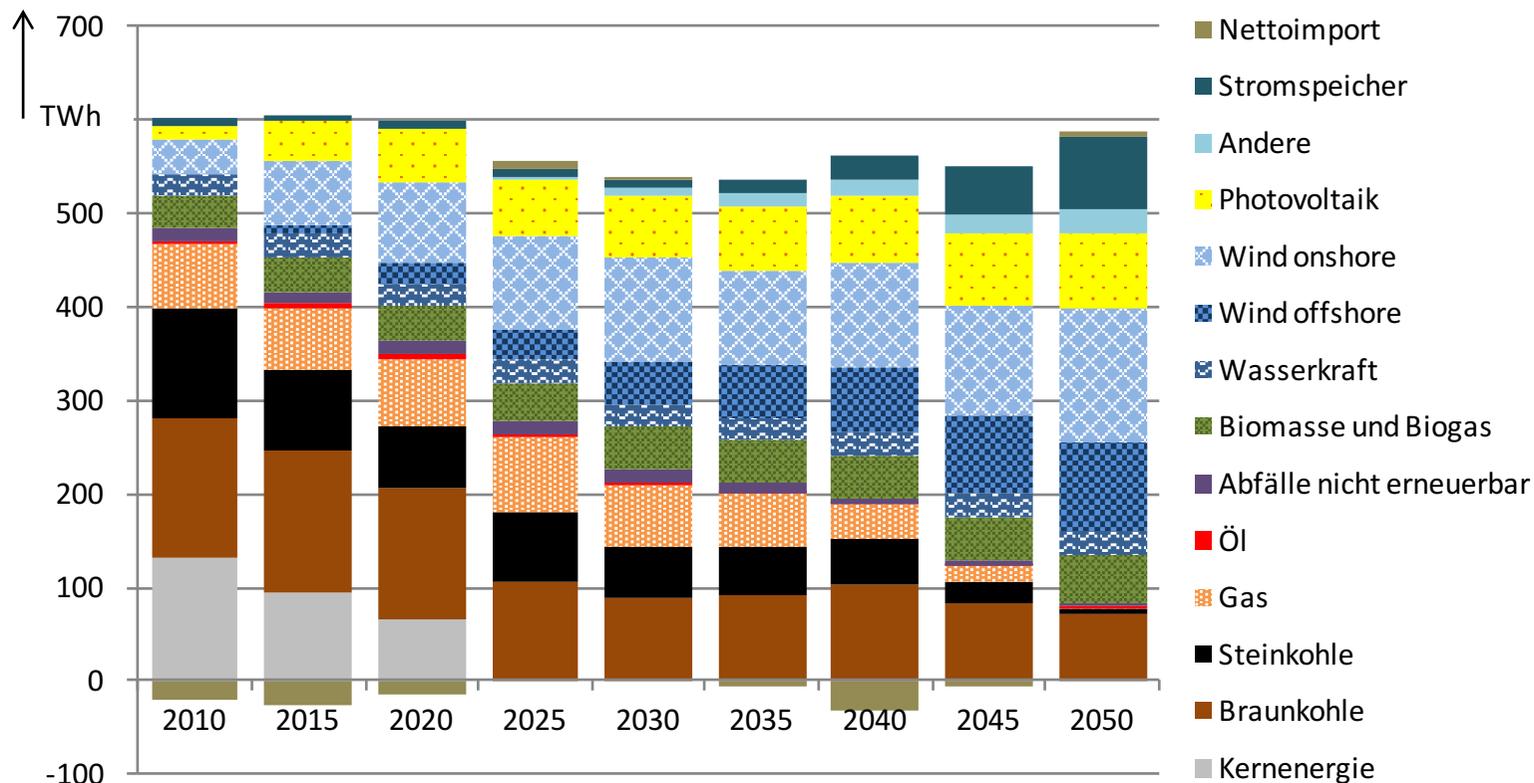
2050				
Klimaschutzziel (THG-Reduktion gegenüber dem Jahr 1990)	Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostrom- verbrauch	Anteil erneuerbarer Energien am Bruttoendenergie- verbrauch	Kapazitäten erneuerbarer Energien in Deutschland	Zugelassene Flexibilisierungsoptionen für Deutschland
EU-28: 75 %	EU-28: 60 % DE: 80 %	EU-28: 70 % DE: 60 %	PV: 70 GW Wind-On: 70 GW Wind-Off: 30 GW	Pumpspeicher Adiabater und diabater Druckluftspeicher (Kaverne) Stationärer Lithium-Ionen- Batteriespeicher (PV und Netz) Power-to-Heat mit Wärmespeicher für Fernwärme Power-to-Gas (Kaverne)

- ➔ Die verbleibenden, oben beschriebenen Speicheroptionen werden in zukünftigen Szenarien und Sensitivitätsanalysen untersucht

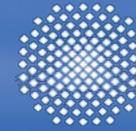


## Strombereitstellung nach Energieträgern in Deutschland

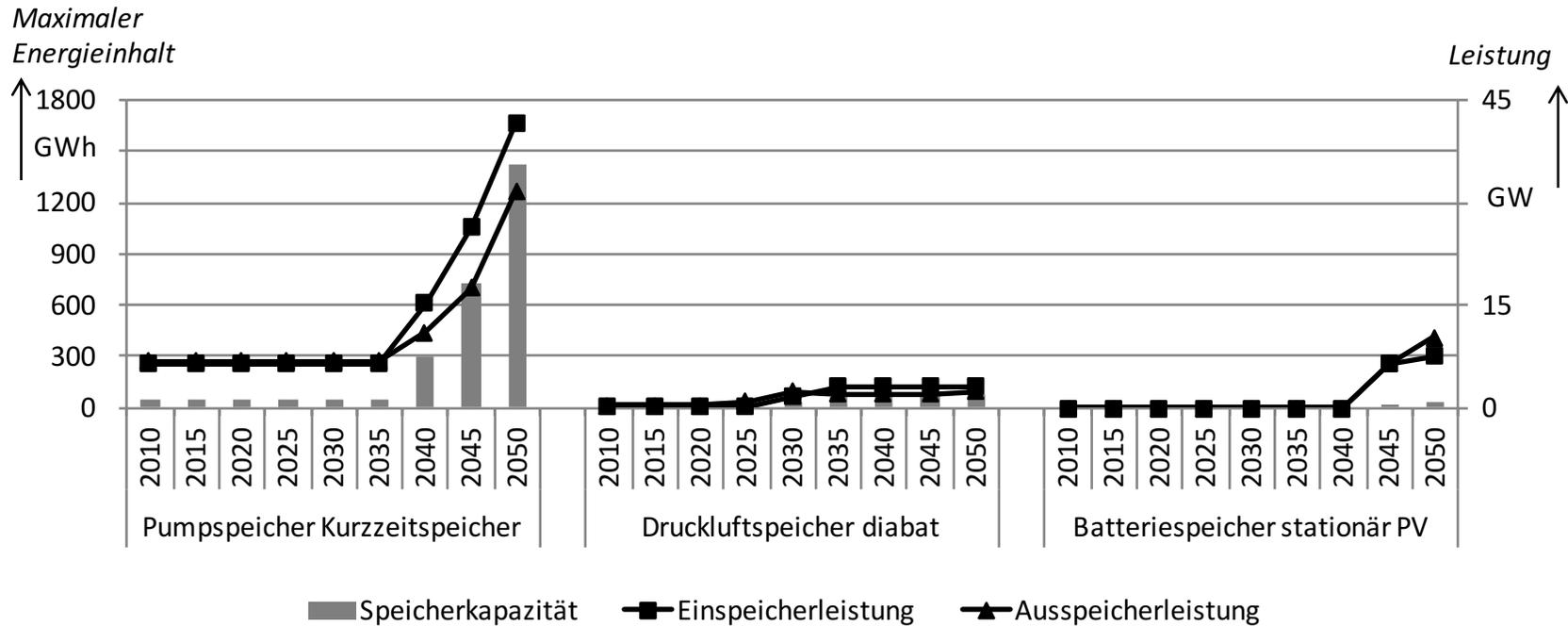
Nettoelektrizitätsbereitstellung



- ➔ Rückgang der Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern
- ➔ Anstieg der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, damit Anstieg des Stromspeichereinsatzes

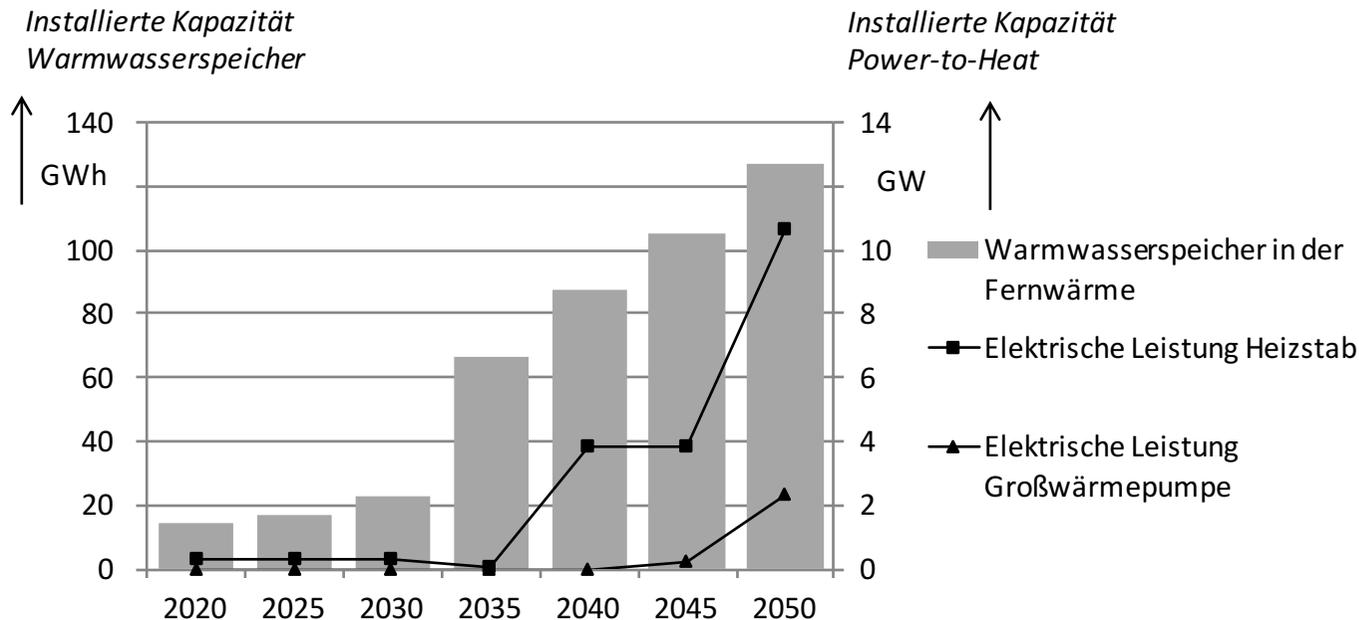


## Installierte Kapazitäten von Stromspeichern in Deutschland



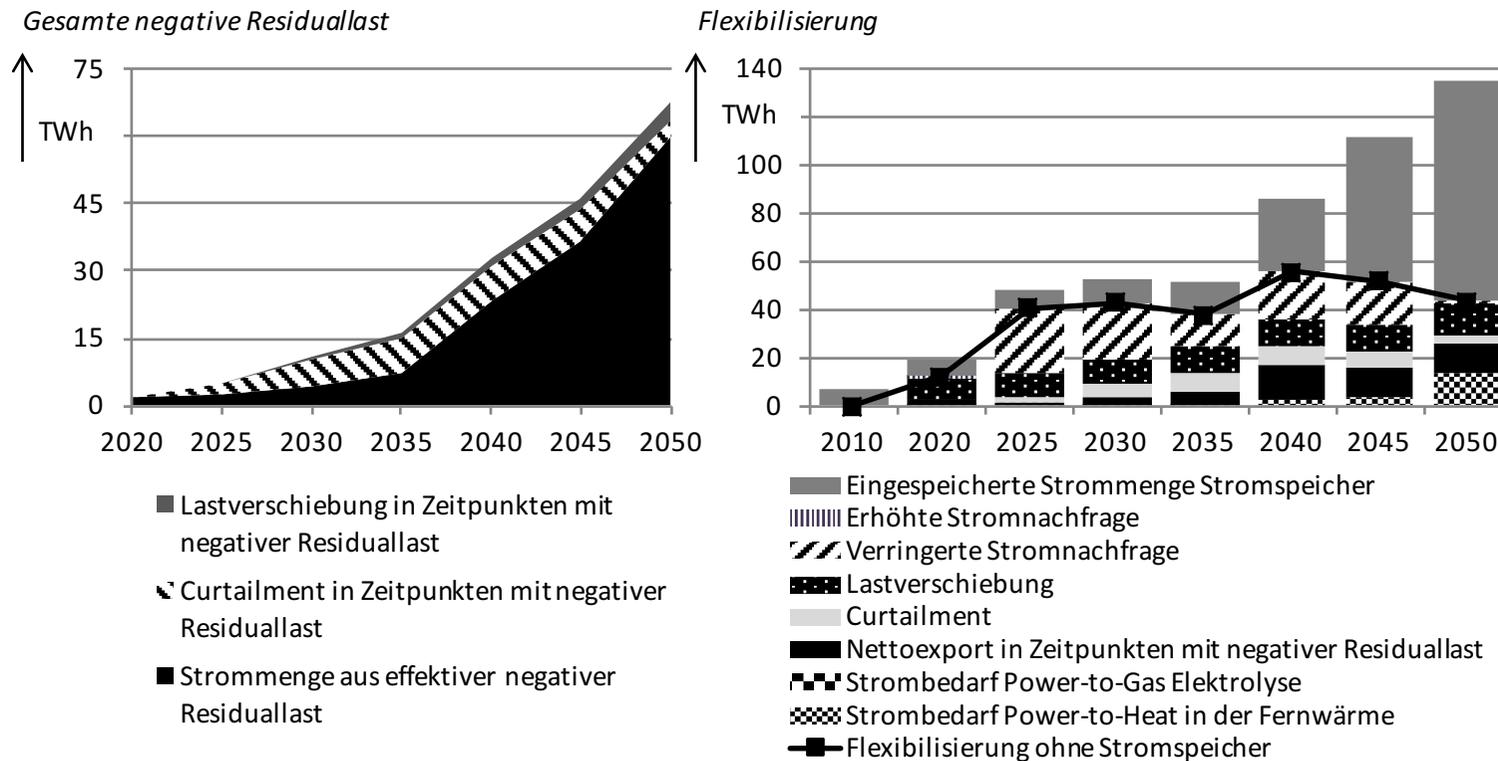
- ➔ Im Jahr 2050 werden rund 75 TWh Strom aus Stromspeichern bereitgestellt: 65 TWh in Pumpspeichern, 8 TWh in PV-Batteriespeichern, 2 TWh in diabaten Druckluftspeichern
- ➔ Verhältnis von Speicherkapazität und Ein- bzw. Ausspeicherleistung ist bei den Pumpspeichern gegenüber den Batteriespeichern vergleichsweise hoch, dies liegt an den geringeren arbeitsspezifischen Investitionen bei gleichzeitig höheren leistungsspezifischen Investitionen der Pumpspeicher

## Installierte Kapazitäten von Power-to-Heat und Wärmespeichern in der Fernwärme in Deutschland

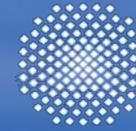


- ➔ Im Jahr 2050 werden 13 TWh Wärme in Warmwasserspeichern gespeichert und 13 TWh Strom in elektrischen Heizstäben und Großwärmepumpen genutzt
- ➔ Wärmepumpen werden aufgrund der höheren Bezugsenergieeffizienz sowohl zur Grundlastreduktion als auch zur Flexibilisierung der negativen Residuallast eingesetzt
- ➔ Heizstäbe werden überwiegend zur Spitzenlastdeckung in der Fernwärme und zur nahezu verlustfreien Verschiebung der Elektroenergie zur Fernwärme eingesetzt

## Flexibilisierung in Deutschland



- ➔ Bis zum Jahr 2035: Curtailment, veränderte Stromnachfrage, Lastverschiebung und Stromaustausch
- ➔ Ab dem Jahr 2035: Zubau von großen Stromspeicherkapazitäten notwendig, um die stark zunehmende Strommenge aus effektiver negativer Residuallast auszugleichen
- ➔ Einsatz von Power-to-Heat steigt bei gleichzeitiger Abnahme des Curtailment



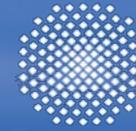
## Zusammenfassung und Ausblick

### Zusammenfassung:

- › Erste exemplarische Analysen eines Energiewendeszenarios zeigen, dass die zunehmende fluktuierende Einspeisung von Strom aus Wind- und PV-Anlagen unter der Annahme der Fortschreibung des EEG bis zu einem Anteil von rund 55 % erneuerbarer Energien am Stromverbrauch durch verschiedene Flexibilisierungsoptionen erfolgen kann:
  - › Curtailment
  - › Veränderte Stromnachfrage
  - › Lastverschiebung
  - › Stromaustausch
- › Bei höheren Anteilen erneuerbarer Energien ist zusätzlich ein Zubau von großen Stromspeicherkapazitäten und Power-to-Heat ökonomisch sinnvoll
- › Einsatz von Power-to-Gas unter den betrachteten Szenarioannahmen nicht wirtschaftlich

### Ausblick:

- › Szenarioanalysen mit dezentralen Flexibilisierungsoptionen
- › Sensitivitätsanalysen (z. B. Einspeiseganglinien, durch die Betrachtung Deutschlands auf Basis verschiedener Typwochen ist zu berücksichtigen, dass die Einspeiseganglinien, die für eine typische Woche herangezogen werden, den Stromspeicherbedarf und das gesamte Ergebnis elementar beeinflussen)
- › Weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Generierung der Nachfrage- und Einspeiseganglinien (Wind und Solar) in tyntag- bzw. typwochenbasierten Energiesystemmodellen, da die Wahl der Ganglinien erheblichen Einfluss auf die Residuallast und damit den Speicher- und Flexibilisierungsbedarf hat



Universität Stuttgart

**IER** Institut für Energiewirtschaft und  
Rationelle Energieanwendung

[www.ier.uni-stuttgart.de](http://www.ier.uni-stuttgart.de)

# Vielen Dank!

Kontakt: [julia.welsch@ier.uni-stuttgart.de](mailto:julia.welsch@ier.uni-stuttgart.de)

