



Institut für  
Hochspannungs-  
technik

**RWTH**AACHEN  
UNIVERSITY

# Multimodale Marktsimulation zur ganzheitlichen Analyse des europäischen Energiesystems

*Präsentation, 14. Symposium Energieinnovation 2016, Graz*

*Christoph Müller, M.Sc.*

*RWTH Aachen, Institut für Hochspannungstechnik (IFHT)*

*10. Februar 2016*

### ► Einleitung und Motivation

Konzept der Energiezellen

European Multimodal Market Simulation (EMMS)

Exemplarische Ergebnisse

Zusammenfassung und Ausblick

### Ausgangssituation

- Zunehmende volatile Einspeisung EE stellt erhöhte **Flexibilitätsanforderungen** an das System
- EU & DE: Große Anstrengungen zur EE-Integration in den **Stromsektor**

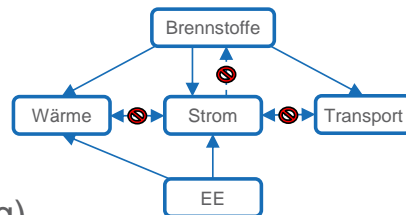
➤ Ziel: Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Bereich der Stromversorgung

- **Wärmesektor** macht allerdings mehr als 50% des Endenergiebedarfs aus

➤ Aktuell: Versorgung größtenteils über fossile Brennstoffe (in DE)

➤ Erhöhung des EE-Anteils zur CO<sub>2</sub>-Reduktion auch im Wärmesektor anzustreben

- **Energiesektoren** werden größtenteils unabhängig voneinander betrachtet (unidirektionale Beziehung)



### Lösungsansätze

- Nutzung von **Flexibilitätsoptionen** zum Ausgleich der volatilen EE-Einspeisung:

- Internationaler Stromhandel
- Speicher (elektrisch, thermisch)
- Power2X (z.B. Power2Heat, Power2Gas)
- Elektromobilität etc.

- **Multimodalität**: Gekoppelte Betrachtung mehrerer Energiesektoren / Energiemärkte (Strom, Wärme, Transport etc.).

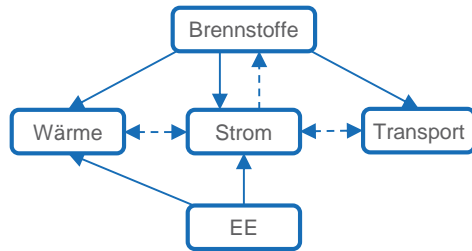
- Integrierte Berücksichtigung **zentraler und dezentraler Technologien** zur Energiewandlung und Speicherung

➤ Bereitstellung zusätzlicher Flexibilitätspotentiale für das Gesamtsystem

➤ Ganzheitliche Betrachtung stellt einen vielversprechenden Ansatz dar

### Multimodalität

- Gekoppelte Energiesektoren: Strom, Wärme/Kälte, Transport, Brennstoffe, EE



### Flexibilitätsoptionen

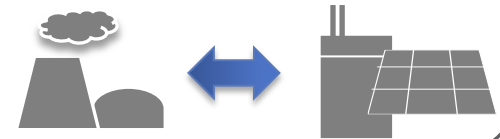
- Internationaler Stromhandel
- Speicher (elektrisch, thermisch)
- Power2X (z.B. Power2Heat, Power2Gas)
- Elektromobilität
- etc.



- **Integrierte Betrachtung aller Alternativen**

### Zentrale & dezentrale Technologien

- Integrierte Berücksichtigung **zentraler und dezentraler Technologien** zur Energiewandlung und Speicherung
- Integration über **Energiezellen**



### Modell zur ganzheitlichen Simulation des Energiesystems unter Berücksichtigung:

- Einer Vielzahl an Flexibilitätsoptionen
- Einer energieträgerübergreifenden Modellierung (Multimodalität)
- Zentraler und dezentraler Technologien
- Ermöglicht die Untersuchung und Gestaltung effizienter, kostengünstiger und umweltfreundlicher Energieversorgungssysteme bei einer hohen Durchdringung Erneuerbarer Energien

Einleitung und Motivation

► **Konzept der Energiezellen**

European Multimodal Market Simulation (EMMS)

Exemplarische Ergebnisse

Zusammenfassung und Ausblick

### Hintergrund

- Steigende Systemeinwirkung dezentraler Erzeugungsanlagen und Speicher aufgrund zunehmender Durchdringung
- Systemverhalten dezentraler Erzeugungsanlagen und Speicher muss bei der Untersuchung eines integrierten Energiesystems berücksichtigt werden
- Hohe resultierende mathematische Komplexität durch große Anzahl dezentraler Anlagen
- Bedarf an neuen und effizienten Modellierungstechniken und Instrumenten zur ganzheitlichen Analyse multimodaler Energiesysteme

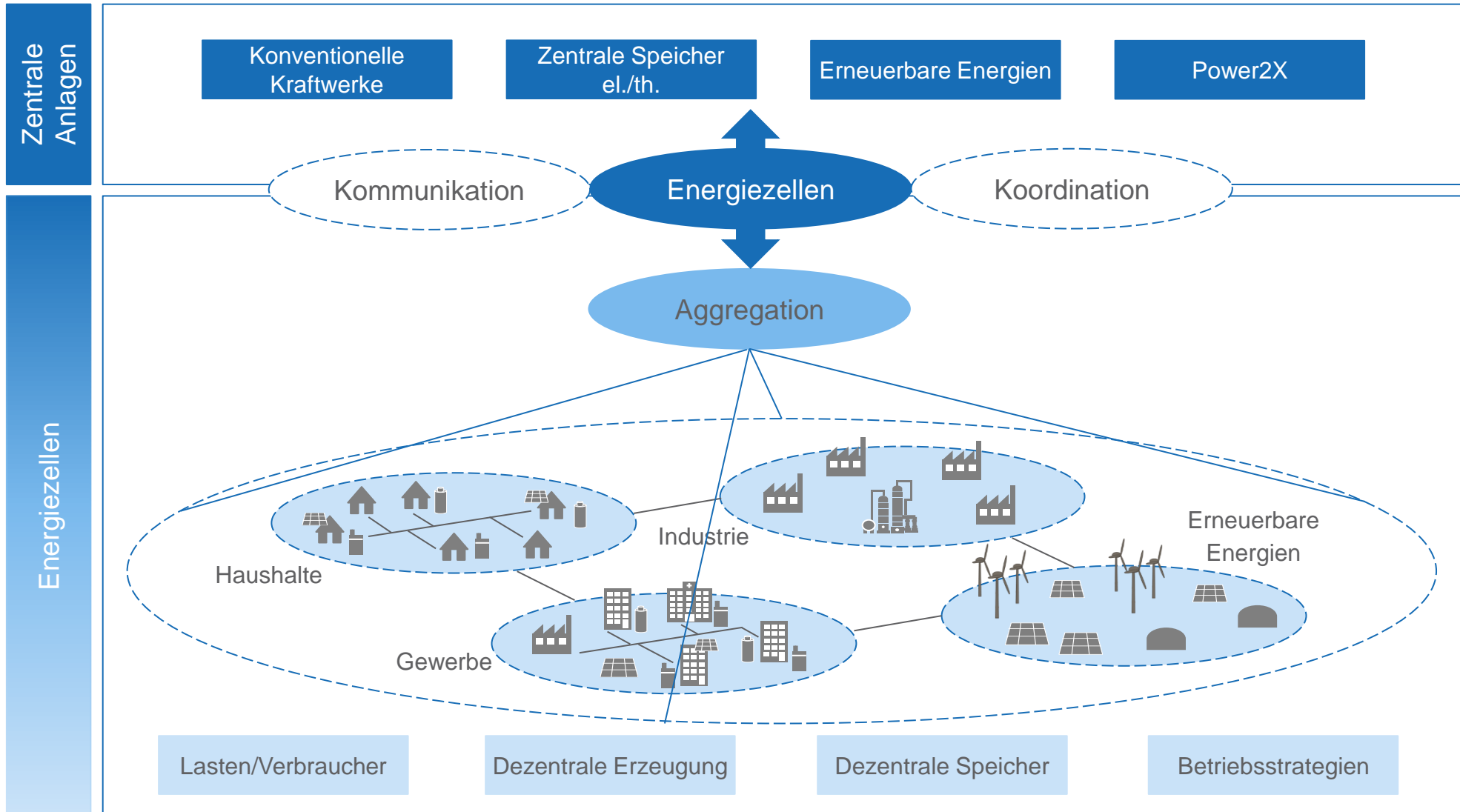


### Konzept regional aufgelöster **Energiezellen**:

- Handhabung von potentiell Millionen von verteilten Energiesystemen im Gesamtsystem
- Energiezellen repräsentieren in jeweils aggregierter Form das Versorgungsgebiet eines HöS/HS-Umspannwerks (380/110 kV bzw. 220/110 kV)

# Konzept der Energiezellen

## Konzeptionierung

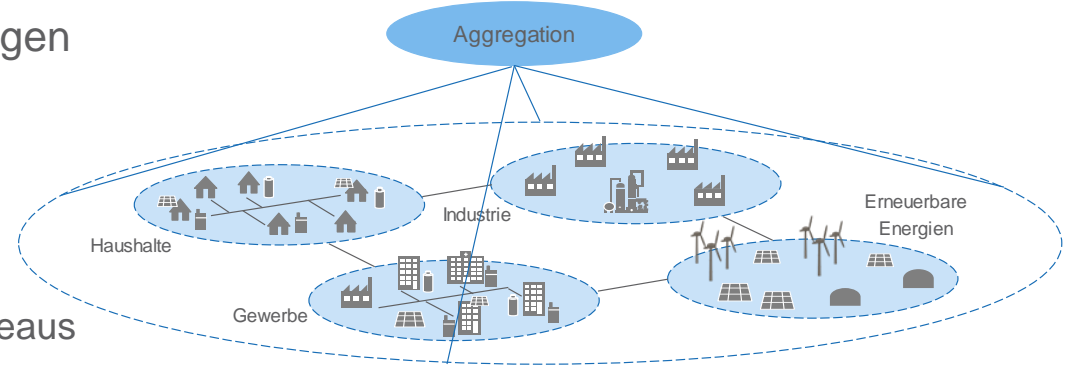


- Modellierung basiert auf regional hochaufgelösten georeferenzierten Daten und erfolgt Bottom-Up
- Erstellung sektorspezifischer Register (Haushalte, GHD, Industrie)
  - Zuordnung hochaufgelöster Strom- und Wärmelastprofile zu jedem Gebäude bzw. jedem Betrieb
  - Unterscheidung u.a. nach Bewohner-/Mitarbeiterzahl, Sanierungsstand und den Kategorien EZFH & MFH
  - Zuordnung eines Portfolios an Erzeugungsanlagen und Speichern zur Deckung der Strom- und Wärmenachfrage anhand spezieller Branchenschlüssel (Verteilungsschlüssel)
  - Wärmeprofile und Versorgungstechnologien werden differenziert nach verschiedenen Temperaturniveaus (<100°C, 100-150°C, 150-500°C, 500-1000°C, >1000°C) betrachtet

Haushalts Register	GHD Register	Industrie Register
<ul style="list-style-type: none"><li>■ Georeferenzierung</li><li>■ Gebäudeinformationen (EZFH/MFH, Bewohner etc.)</li><li>■ Strom- und Wärmebedarfsprofile (Raumwärme und Warmwasser)</li><li>■ Portfolio an Erzeugungsanlagen und Speichern</li></ul> <p>➤ ~ 20 Mio. Gebäude</p>	<ul style="list-style-type: none"><li>■ Georeferenzierung</li><li>■ Betriebsinformationen (Branche, Mitarbeiter etc.)</li><li>■ Strom- und Wärmebedarfsprofile (Raum-/Prozesswärme und Warmwasser)</li><li>■ Portfolio an Erzeugungsanlagen und Speichern</li></ul> <p>➤ ~ 2 Mio. Betriebe</p>	<ul style="list-style-type: none"><li>■ Georeferenzierung</li><li>■ Betriebsinformationen (Branche, Mitarbeiter etc.)</li><li>■ Strom- und Wärmebedarfsprofile (Prozesswärme nach Temperaturniveau)</li><li>■ Portfolio an Erzeugungsanlagen und Speichern</li></ul> <p>➤ ~ 60.000 Betriebe</p>



- Aggregation von Lasten, Erzeugungsanlagen sowie Speichern zu Subzellen
  - Spezifisch je Sektor und Technologie bzw. Technologiekombination (KWK-Anlagen, Wärmepumpen, Heizstäbe, Speicher)
  - Beachtung unterschiedlicher Temperaturniveaus



- Kompromiss bzgl. der Anforderungen an ein Modell zur Simulation zukünftiger dezentral geprägter Strommärkte
    - Sehr große Anzahl an dezentralen Energiewandlungseinheiten
  - vs.**
  - Abbildung des umgebenden Energiesystems inkl. der europäischen Nachbarstaaten und des internationalen Stromhandels
- Energiezellen bündeln diese Anforderungen in einem Aggregationskonzept
  - Beibehaltung der detaillierten Abbildung der vielfältigen Möglichkeiten der Energiewandlung zwischen unterschiedlichen Energieformen

- Möglichkeit zur flexiblen Einstellung der Betriebsmodi
- Betriebsmodi ermöglichen die Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Akteurs-verhaltensweisen im Gesamtsystem

<b>Lokaler Betriebsmodus</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Zellen werden nach lokalen Zielen betrieben, z.B.<ul style="list-style-type: none"><li>– wärmegeführter Betrieb von Blockheizkraftwerken</li><li>– Eigenverbrauchsmaximierung von PV-Batteriespeicher-Systemen, etc.</li></ul></li></ul>
<b>Marktgeführter Betriebsmodus</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Die Flexibilität der Zellen steht dem Gesamtsystem zur Verfügung</li><li>▪ Anlagen werden in Abhängigkeit des Strom-Spotmarktpreises als Teil eines virtuellen Kraftwerks betrieben</li></ul>
<b>Zell-Autarkie-Maximierung</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Ziel ist die Maximierung der Selbstversorgung der Zellen bzw. Minimierung des externen Strombezugs jeder Zelle</li></ul>
<b>Verteilungsnetzfreundlicher Betrieb</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Ziel ist ein Peak-Shaving durch dezentrale Energiesysteme zur Entlastung des Verteilungsnetzes</li></ul>

Einleitung und Motivation

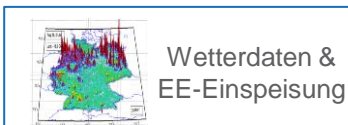
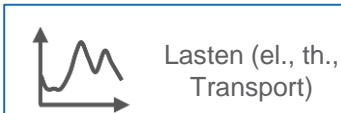
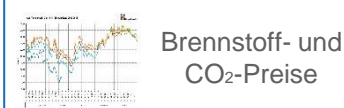
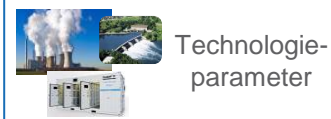
Konzept der Energiezellen

► European Multimodal Market Simulation (EMMS)

Exemplarische Ergebnisse

Zusammenfassung und Ausblick

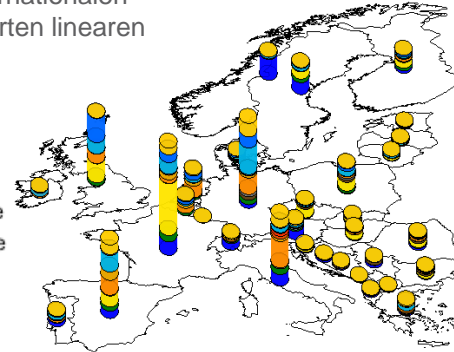
### Eingangsdaten



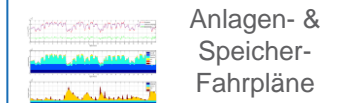
### Optimierungsmodell

#### European Multimodal Market Simulation (EMMS)

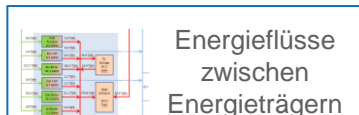
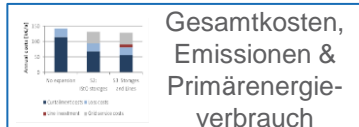
- Die European Multimodal Market Simulation (EMMS) ist ein multiregionales und multimodales lineares Optimierungsmodell
- Räumlich hochaufgelöste sowie ganzheitliche Einsatzplanung des Anlagenparks (Konv. Kraftwerke, zentrale Speicher, dezentrale Anlagen, etc.)
- Berechnung der kostenminimalen Einsatzfahrpläne von zentralen sowie dezentralen Erzeugungsanlagen und Speichern in Europa
- Integration dezentraler Erzeugungsanlagen und Speicher über den Ansatz der Energiezellen
- Berücksichtigung des stündlichen internationalen Stromhandels auf Basis eines integrierten linearen Transportmodells (NTC-Ansatz)



### Ergebnisse



- Zentrale & dezentrale Erzeugungsanlagen und Speicher



- Modellierung zentraler sowie dezentraler Energiewandlungs- und Speichertechnologien
  - Ermöglicht die Untersuchung einer Vielzahl an Flexibilitäten im Gesamtsystem
  - Ermöglicht die integrierte Betrachtung mehrerer Energieformen

Zentral	Dezentral			Transportsektor
	Haushalte	GHD	Industrie	
Kraftwerke (>10MW)	Konventioneller Kessel (Öl, Erdgas, Biomasse)			Elektromobilität
Heizwerke (Öl, Erdgas, Kohle)	BHKW (Erdgas, Biomasse)			
Pumpspeicher	(Hochtemperatur-)Wärmepumpe			
Druckluftspeicher	Solarthermie			
Power2Heat	Thermischer Speicher			
Power2Gas	Elektrischer Speicher			
Thermischer Speicher	Kohleofen		HT-Ofen (Kohle, Gas, Elektro)	
Windenergie, Wasserkraft, Biomasse	Heizstab / Elektrokessel			
Photovoltaik				

### Zielfunktion

- Zielfunktion: Minimierung der variablen Kosten von Kraftwerken und dezentralen Erzeugungsanlagen

$$z = \min \sum_t \sum_i \left( \sum_{pp} P_{pp,i,t}^{PP} \cdot c_{pp,i} - \sum_{p2g} P_{p2g,i,t}^{P2G} \cdot Eff_{p2g,i} \cdot p_{gas,i} + \sum_c \sum_{sc} \sum_{gen} \dot{Q}_{gen,sc,c,i,t}^{GEN} \cdot c_{gen,sc,c,i} \right) \quad (1)$$

$P_{pp,i,t}^{PP}$ : Kraftwerksleistung von Kraftwerk  $pp$  in Marktgebiet  $i$  und Stunde  $t$

$c_{pp,i}$ : Grenzkosten von Kraftwerk  $pp$  in Marktgebiet  $i$

$P_{p2g,i,t}^{P2G}$ : Leistungsbezug von Power2Gas – Anlage  $p2g$  in Marktgebiet  $i$  und Stunde  $t$

$Eff_{p2g,i}$ : Wirkungsgrad von Power2Gas – Anlage  $p2g$  in Marktgebiet  $i$

$p_{gas,i}$ : Gaspreis in Marktgebiet  $i$

$\dot{Q}_{gen,sc,c,i,t}^{GEN}$ : Leistung von Erzeugungsanlage  $gen$  in Subzelle  $sc$ , Zelle  $c$  und Marktgebiet  $i$  in  $t$

$c_{gen,sc,c,i}$ : Grenzkosten von Erzeugungsanlage  $gen$  in Sub – Zelle  $sc$ , Zelle  $c$  und Marktgebiet  $i$

### El. Lastprofile

### Th. Lastprofile

- Restriktionen des Optimierungsproblems:
  - Systemische Nebenbedingungen (elektrische & thermische Lastdeckung, Begrenzung internationaler Stromhandel)
  - Technologiespezifische Nebenbedingungen (Leistungsgradienten, Speicherkontinuitätsgleichung etc.)

### Zielfunktion

- Systemische Nebenbedingung: Elektrische Lastdeckung je Marktgebiet

$$\begin{aligned}
 D_{el}(i, t) = & \sum_{pp} P_{pp,i,t}^{PP} + \sum_s (S_{s,i,t}^{PS,turb} - S_{s,i,t}^{PS,pump}) + \sum_j P_{j,i,t} \\
 & - \sum_{p2g} P_{p2g,i,t}^{P2G} + \sum_c \sum_{sc} \sum_{gen} \sigma_{gen,sc,c,i,t} \cdot \dot{Q}_{gen,sc,c,i,t}^{GEN} + \sum_c \sum_{sc} \sum_s (S_{s,sc,c,i,t}^{el,out} - S_{s,sc,c,i,t}^{el,in}) \\
 & + \sum_c \sum_{sc} \sum_e (S_{s,sc,e,i,t}^{emob,out} - S_{s,sc,e,i,t}^{emob,in}) \forall i, t
 \end{aligned} \quad (2)$$

### El. Lastprofile

$D_{el}(i, t)$ : Elektrische Last in Marktgebiet  $i$  und Stunde  $t$

$S_{s,i,t}^{PS,turb/pump}$ : Leistung der Turbine/Pumpe des Speichers  $s$  in Marktgebiet  $i$  und Stunde  $t$

$P_{j,i,t}$ : Stromhandel zwischen Marktgebiet  $j$  und Marktgebiet  $i$  in Stunde  $t$

$\sigma_{gen,sc,c,i,t}$ : Stromkennzahl von Erzeugungsanlage  $gen$  in Subzelle  $sc$ , Zelle  $c$  und Marktgebiet  $i$

$S_{s,sc,c,i,t}^{el,out/in}$ : Leistung des Speichers  $s$  in Subzelle  $sc$ , Zelle  $c$  und Marktgebiet  $i$  in Stunde  $t$

$S_{s,sc,e,i,t}^{emob,out/in}$ : Leistung des Elektroautos  $s$  in Subzelle  $sc$ , Zelle  $c$  und Marktgebiet  $i$  in Stunde  $t$

### Th. Lastprofile

- Optional: Elektrische Lastdeckung je Energiezelle (Betriebsstrategie: „Zell-Autarkie-Maximierung“)
  - Versorgung der Lasten jeder Zelle möglichst durch Zell-interne Anlagen
  - Minimierung des überregionalen Bezugs von Energie einer Energiezelle

### Zielfunktion

- Systemische Nebenbedingung: Thermische Lastdeckung je Energiezelle, Sektor und Technologiekombination (separiert nach Temperaturniveaus)

$$\begin{aligned}
 D_{th}(d, i, t) = & \sum_{pp} f_{d,pp,i}^{PP,dh} \cdot \dot{Q}_{pp,i,t}^{PP,dh} + \sum_{pp} f_{d,pp,i}^{PP,ph} \cdot \dot{Q}_{pp,i,t}^{PP,ph} \\
 & + \sum_c \sum_{sc} \sum_{dgs} f_{d,gen,sc,c,i}^{GEN} \cdot \dot{Q}_{gen,sc,c,i,t}^{GEN} + \sum_c \sum_{sc} \sum_s f_{d,s,sc,c,i}^{S^{th}} \cdot (E_{s,sc,c,i,t}^{th} - E_{s,sc,c,i,t+1}^{th}) \\
 & + \sum_c \sum_{sc} \sum_s f_{d,s,sc,c,i}^{S^{HTS}} \cdot (S_{s,sc,c,i,t}^{HTS,out} - S_{s,sc,c,i,t}^{HTS,in}) \quad \forall d, i, t
 \end{aligned} \tag{3}$$

### El. Lastprofile

$D_{th}(d, i, t)$ : Thermische Last  $d$  in Marktgebiet  $i$  und Stunde  $t$

$f_d$ : Indikatorfunktion  $\{0,1\}$ , "1" falls Anlage mit Profil verknüpft, "0" sonst

$\dot{Q}_{pp,i,t}^{PP,dh}$ : Fernwärmebereitstellung (engl. district heating, dh) durch Kraftwerk  $pp$  in Marktgebiet  $i$  in Stunde  $t$

$\dot{Q}_{pp,i,t}^{PP,ph}$ : Prozesswärmebereitstellung (engl. process heating, ph) durch Kraftwerk  $pp$  in Marktgebiet  $i$  in Stunde  $t$

$E_{s,sc,c,i,t}^{th}$ : Füllstand des th. Speichers  $s$  in Subzelle  $sc$ , Zelle  $c$  und Marktgebiet  $i$  in Stunde  $t$

$S_{s,sc,c,i,t}^{HTS,out/in}$ : Leistung des HT. Speichers  $s$  in Subzelle  $sc$ , Zelle  $c$  und Marktgebiet  $i$  in Stunde  $t$

### Th. Lastprofile

- Versorgung durch dezentrale Erzeugungsanlagen, durch zentrale Kraftwerke (Kraft-Wärme-Kopplung) und Power2Heat-Anlagen sowie thermische Speicher



Einleitung und Motivation

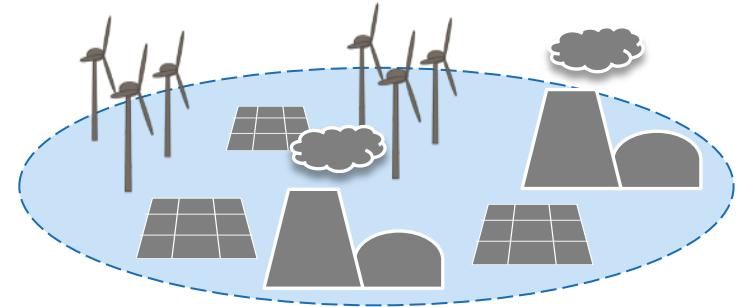
Konzept der Energiezellen

European Multimodal Market Simulation (EMMS)

► **Exemplarische Ergebnisse**

Zusammenfassung und Ausblick

- Definition des Szenarios:
  - konventionelle und erneuerbare Erzeugungskapazitäten
  - Energiebedarfe (elektrisch und thermisch) in allen Sektoren
  - Brennstoff- und CO<sub>2</sub>-Preise
  - NTC
- Szenario orientiert sich am Zielszenario 2050 der Energiereferenzprognose für das BMWi
  - Energiekonzept der deutschen Bundesregierung zur Erreichung der energie- und klimaschutzpolitischen Ziele
- Erzeugungskapazitäten im europäischen Umland orientieren sich am Projekt e-Highway 2050



Rohöl	Erdgas	Braunkohle	Steinkohle	Biomasse	CO <sub>2</sub> -Zertifikate
EUR/MWh	EUR/MWh	EUR/MWh	EUR/MWh	EUR/MWh	EUR/tCO <sub>2</sub>
75	33	1,5	17	41	76

- Untersuchungsgegenstand:
  - Bedeutung von Deutschland für die Europäische Energiewende
  - Kosten, Emissionen und Primärenergieverbrauch je Sektor in Deutschland in 2050
  - Analyse der Energieflüsse zwischen unterschiedlichen Energieformen und Sektoren in 2050

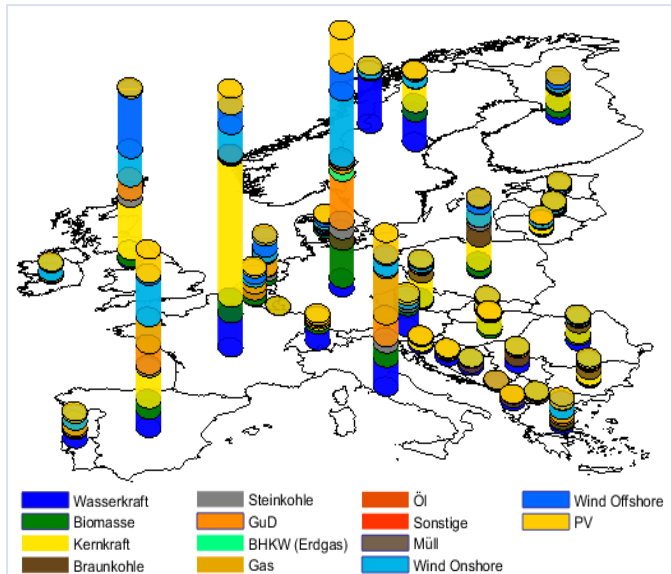


Abb. 1: Jahressumme der Stromerzeugung

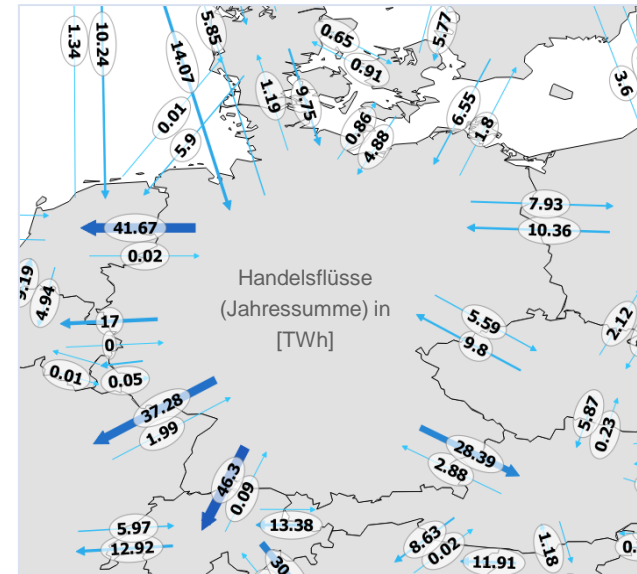


Abb. 2: Internationaler Stromhandel

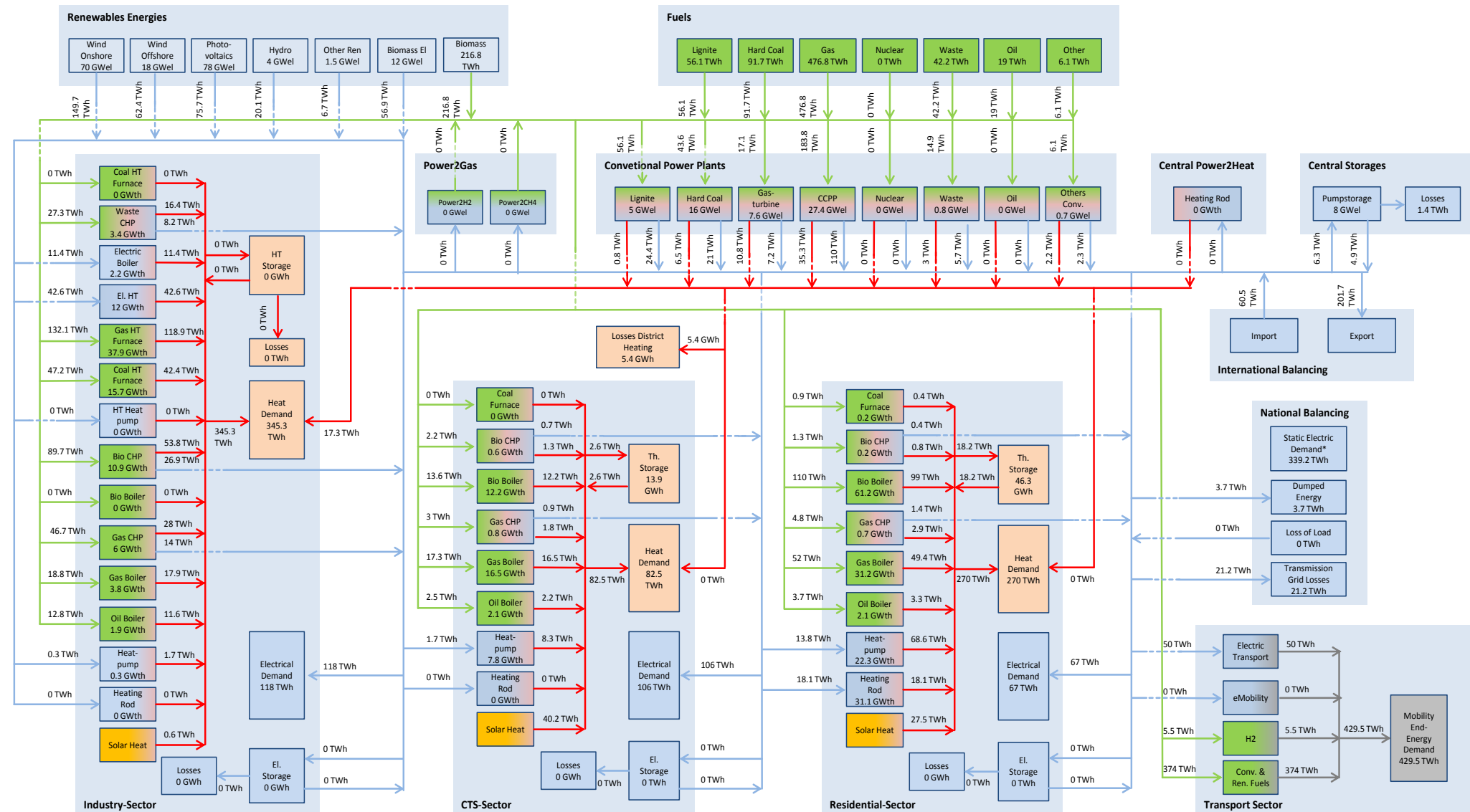
- Skandinavien mit hohen EE-Anteilen und großen EE-Überschussmengen (Export insbesondere nach Deutschland)
- EE-Anteil in DE gemäß den Zielen der Bundesregierung mit ca. 80% ebenfalls sehr hoch
- DE: Erzeugte EE-Strommengen können nicht vollständig national genutzt werden
- Großer Anteil der Handelsflüsse aus Skandinavien zuzüglich des EE-Überschussstroms aus Deutschland fließen weiter in Richtung der großen Lastzentren in Zentral- und Südeuropa
- Bedeutende Rolle von Deutschland für die europäische Energiewende als Export- und Transitland

- Aufteilung der entstehenden Kosten, der Emissionen und des Primärenergieverbrauchs auf die einzelnen Sektoren in Deutschland
- Senkung in allen Sektoren u.a. durch die hohen Anteile an Erneuerbarer Energien und Effizienzmaßnahmen im Vergleich zum heutigen Energiesystem
- Industrie wird zu großen Anteilen weiterhin mit fossilen Brennstoffen versorgt, insbesondere mit Gas (ca. 50% des Primärenergieverbrauchs)
- Fossile Brennstoffe werden vor allem im Bereich der Hochtemperaturprozesse benötigt
- Jedoch können auch in der Industrie ca. 32% des Wärmebedarfs durch Erneuerbare Energien gedeckt werden
- Dies wird zu signifikanten Anteilen über Power2Heat-Anlagen durch eine verstärkte Kopplung von Strom- und Wärmesektor erreicht

	Kosten [Mio. EUR]	Emissionen [Mio. tCO <sub>2</sub> ]	Primärenergieverbrauch [TWh]
<b>Haushaltssektor</b>	6729,97	12,68	172,71
<b>GHD-Sektor</b>	1502,10	4,73	38,57
<b>Industrie</b>	11954,91	63,01	374,68
<b>Zentral</b>	6984,76	81,32	322,81
<b>Gesamt</b>	<b>27171,74</b>	<b>161,74</b>	<b>908,77</b>

# Exemplarische Ergebnisse

## Energieflussdiagramm



Einleitung und Motivation

Konzept der Energiezellen

European Multimodal Market Simulation (EMMS)

Exemplarische Ergebnisse

► Zusammenfassung und Ausblick

## Zusammenfassung

- Gekoppelte Betrachtung **dezentraler und zentraler Energiesysteme**
  - Integration dezentraler Systeme über Energiezellen
  - Steuerung über verschiedene Betriebsmodi
- Gleichzeitige Modellierung des **internationalen Stromhandels** zwischen den einzelnen Marktgebieten
- Integrierte Untersuchung zukünftiger **Energiemärkte** (Strom, Wärme, Brennstoffe etc.)
- Multiple Möglichkeiten der Energiewandlung und Speicherung unter Beachtung einer Vielzahl an **Flexibilitäten**

## Ausblick

- Einbindung zusätzlicher technischer Restriktionen (Mindestbetriebs- und Mindeststillstandszeiten => GGLP-Formulierung)
- Anwendung in mehreren Forschungsprojekten:
  - Untersuchungen zur Wirkungsweise verschiedener Zell-Betriebsmodi
  - Flexibilisierung der Wärmebereitstellung auf verschiedenen Ebenen des Energiesystems
- Erweiterung um die Ausbauplanung von Energiewandlungs- und Speichereinheiten in den verschiedenen Sektoren

Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit