



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

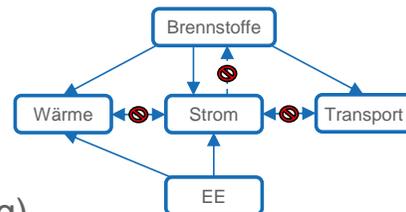
European Multimodal Market Simulation (EMMS)

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 CO₂-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 CO₂-Reduktion auch im Wärmesektor anzustreben
- **Energiesektoren** werden größtenteils unabhängig voneinander betrachtet (unidirektionale Beziehung)

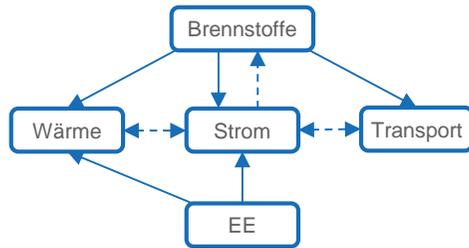


Lösungsansätze

- 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

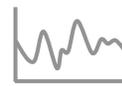
Multimodalität

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



Flexibilitätsoptionen

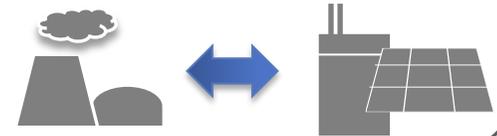
- Internationaler Stromhandel
- Speicher (elektrisch, thermisch)
- Power2X (z.B. Power2Heat, Power2Gas)
- Elektromobilität
- etc.



- **Integrierte Betrachtung aller Alternativen**

Zentrale & dezentrale Technologien

- Integrierte Berücksichtigung **zentraler und dezentraler Technologien** zur Energie-wandlung 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

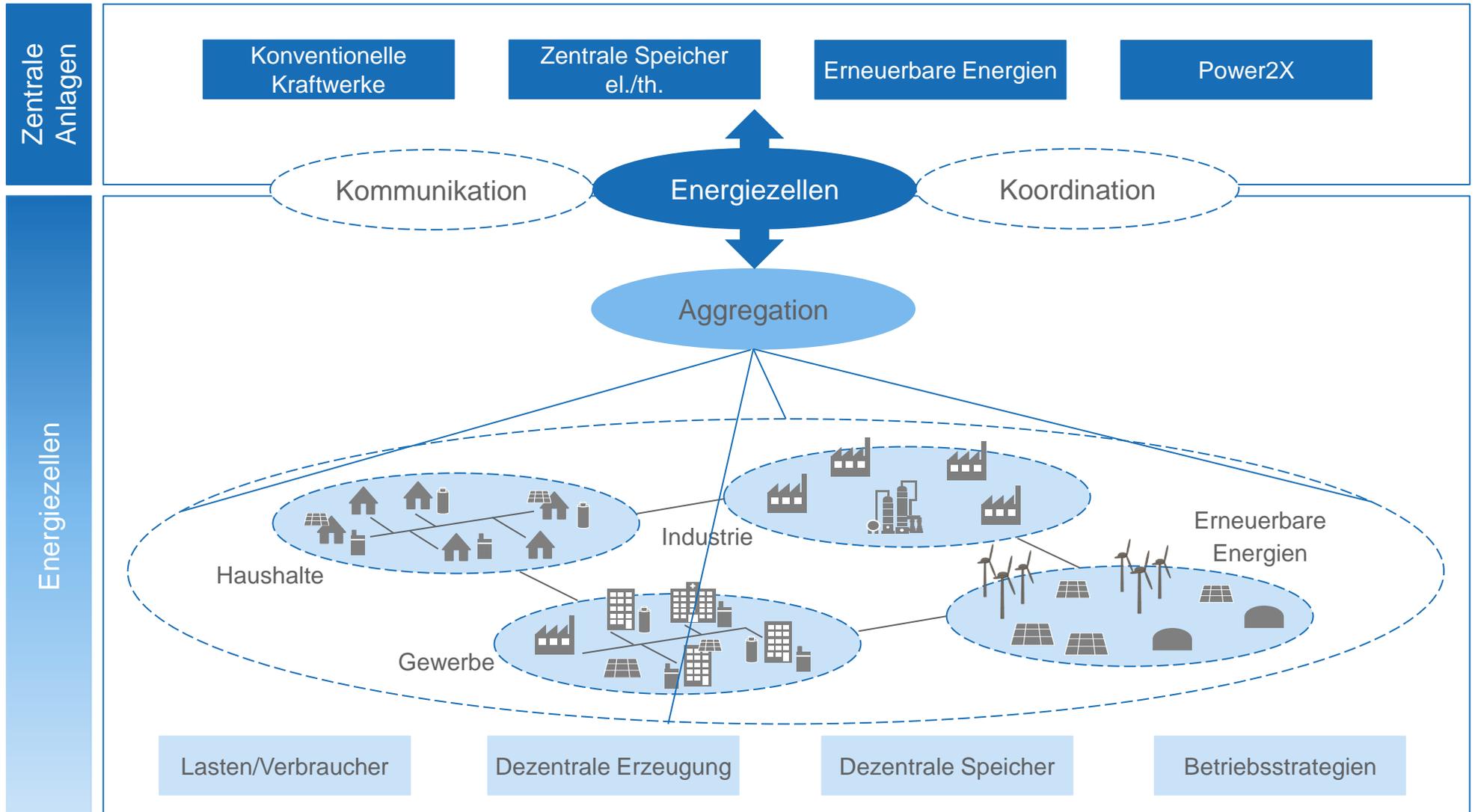


Konzept regional aufgelöster **Energiezellen**:

- 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

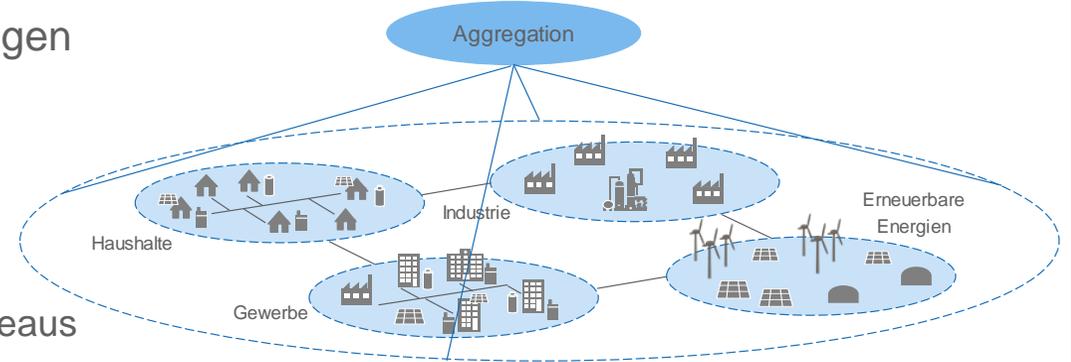
Konzeptionierung



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

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

Einleitung und Motivation

Konzept der Energiezellen

▶ **European Multimodal Market Simulation (EMMS)**

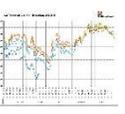
Exemplarische Ergebnisse

Zusammenfassung und Ausblick

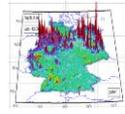
Eingangsdaten

- 

Anlagenpark & NTC's
- 

Technologieparameter
- 

Brennstoff- und CO₂-Preise
- 

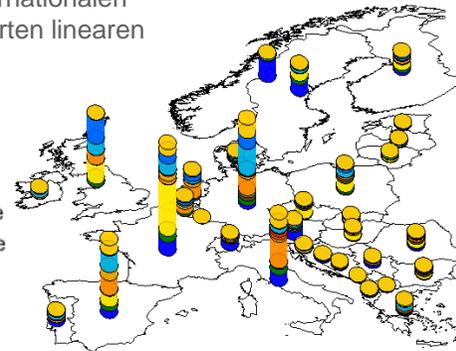
Lasten (el., th., Transport)
- 

Wetterdaten & EE-Einspeisung

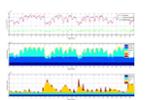
Optimierungsmodell

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)

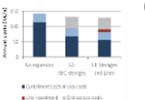


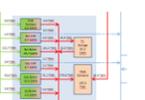
Ergebnisse

- 

Anlagen- & Speicherfahrpläne

 - Zentrale & dezentrale Erzeugungsanlagen und Speicher
- 

Internationaler Stromhandel
- 

Gesamtkosten, Emissionen & Primärenergieverbrauch
- 

Energieflüsse zwischen Energieträgern

- 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

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

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

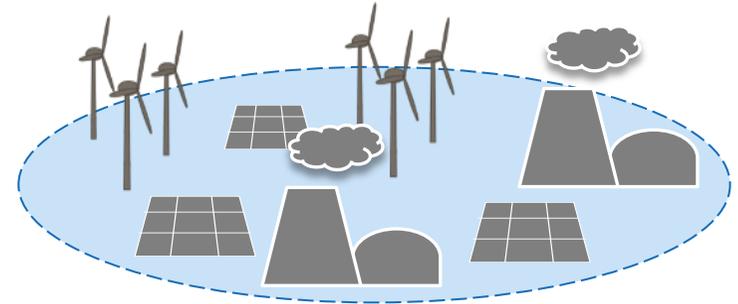
Konzept der Energiezellen

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 CO₂-Preise
 - NTC
- Szenario orientiert sich am Zielszenario 2050 der Energierferenzprognose 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 ₂ -Zertifikate
EUR/MWh	EUR/MWh	EUR/MWh	EUR/MWh	EUR/MWh	EUR/tCO ₂
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

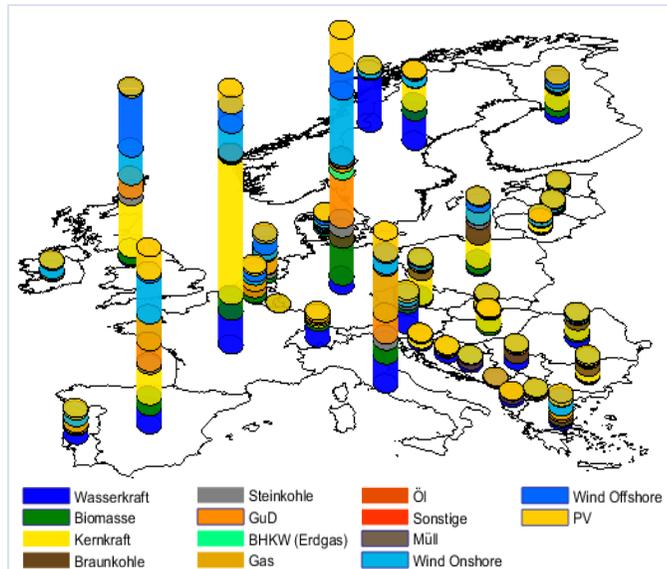


Abb. 1: Jahressumme der Stromerzeugung

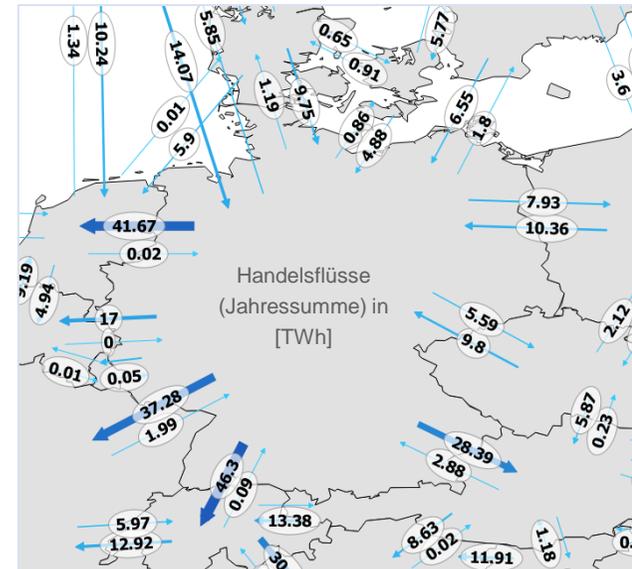


Abb. 2: Internationaler Stromhandel

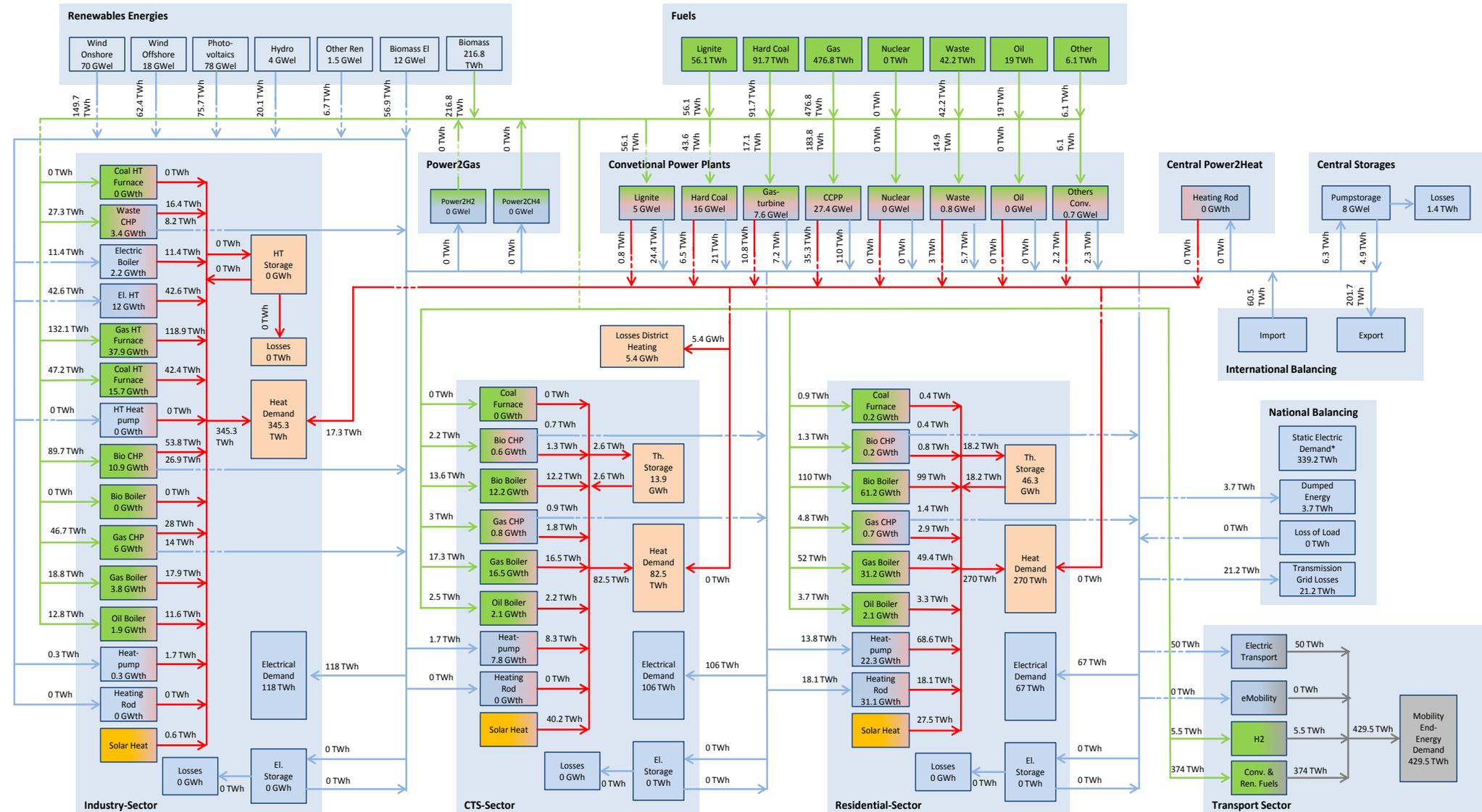
- Skandinavien mit hohen EE-Anteilen und großen EE-Überschussmengen (Export insbesondere nach Deutschland)
- EE-Anteil in DE gemäß den Zielen der Bundesregierung mit ca. 80% ebenfalls sehr hoch
- DE: Erzeugte EE-Strommengen können nicht vollständig national genutzt werden
- Großer Anteil der Handelsflüsse aus Skandinavien zuzüglich des EE-Überschusstroms 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. tCO₂]	Primärenergieverbrauch [TWh]
Haushaltssektor	6729,97	12,68	172,71
GHD-Sektor	1502,10	4,73	38,57
Industrie	11954,91	63,01	374,68
Zentral	6984,76	81,32	322,81
Gesamt	27171,74	161,74	908,77

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