

Abschlussworkshop eGoⁿ: Übertragungsnetzplanung

Clara Büttner, Katharina Esterl, Carlos Epia, Hendrik-Pieter Tetens

HSFL, EUF, DLR

02.06.2023



- 1 Einleitung
- 2 Modellkonzept des sektorengekoppelten Übertragungsnetzes
- 3 Funktionalitäten des Tools *eTraGo*
- 4 How to use *eTraGo*
- 5 Ergebnisse der Optimierung des Übertragungsnetzes
- 6 Ausblick



Katharina Esterl
Europa-Universität
Flensburg



Clara Büttner
Europa-Universität &
Hochschule Flensburg

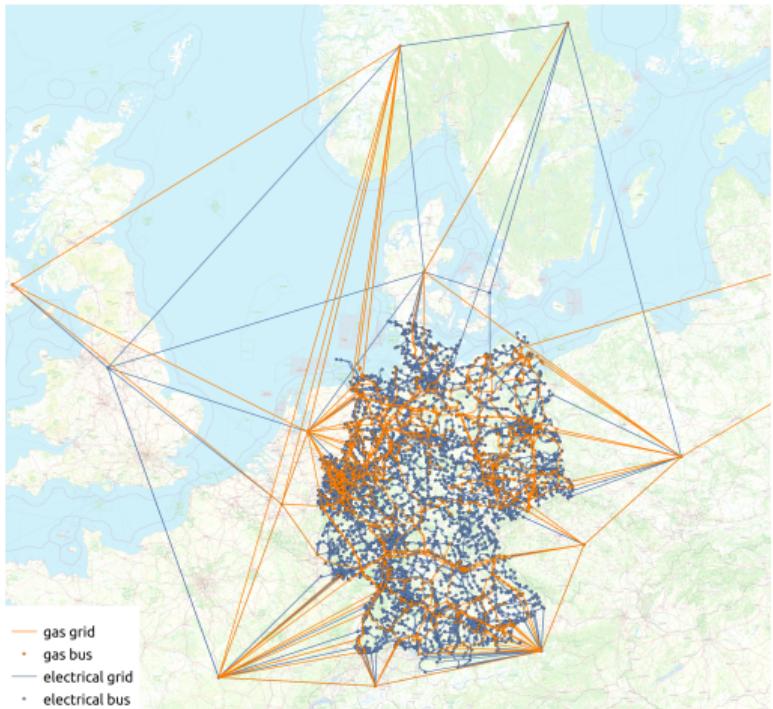


Carlos Epia
Hochschule Flensburg



Hendrik-Pieter Tetens
DLR Institut für
Vernetzte Energiesysteme

Zielsetzung



- Optimierung des Hoch- und Höchstspannungsnetzes
- Berücksichtigung von Bedarfen und Flexibilitäten im Zuge der Sektorenkopplung
- Offenes Tool und reproduzierbare Ergebnisse

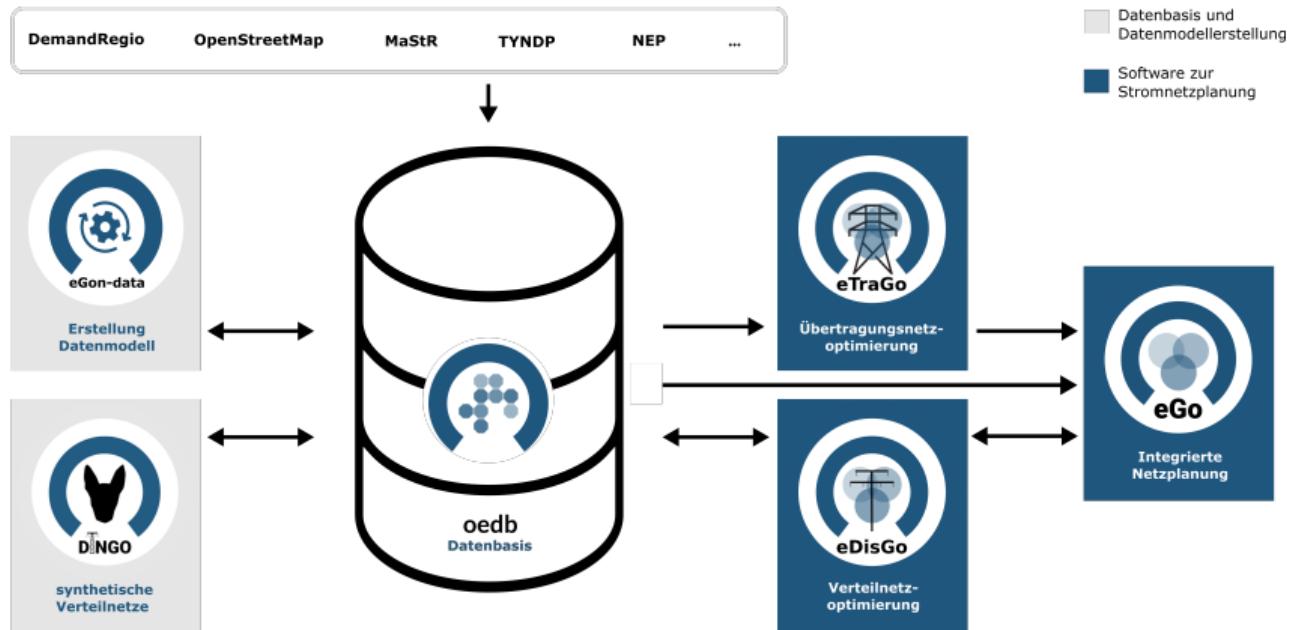
- Welche Netzausbau- und Flexibilisierungsdarfe bestehen in einem sektorgekoppelten Energiesystem?
- Wo werden Flexibilitäten im Übertragungsnetz optimal eingesetzt und ausgebaut?
- Welches Potenzial zur Kostenreduktion von Netz- und Speicherausbau kann mit verschiedenen Durchdringungen von Flexibilitäten gehoben werden?
- Inwieweit können zusätzliche Flexibilitäten zur Vermeidung von EE-Abschaltungen führen?



- Python3-Tool
- Basierend auf PyPSA [1]
- Initial entwickelt im Projekt *open_eGo*
- Erweiterungen in eGoⁿ: Sektorenkopplung sowie zusätzliche Funktionalitäten
- Veröffentlicht auf GitHub:
<https://github.com/openego/eTraGo>



Einordnung in die Tool-Landschaft



Input-Daten



- Erstellung des Datenmodells innerhalb des Tools *eGon-data*:
<https://github.com/openego/eGon-data>
- Veröffentlichung des Datenmodells auf der *Open Energy Platform* (OEP): <https://openenergy-platform.org/>

pgAdmin 4

Servers (4) local_oedb egon grid

Databases (3) egon

Query Editor

```
1 SELECT * FROM grid.egon_etrago_line
2 ORDER BY scn_name DESC, line_id DESC LIMIT 100
3
```

Data Output Explain Messages Notifications

scn_name	line_id	bus0	bus1	type	carrier	x	y	g	b
eGon2035_lowflex	29302	578	43959	[null]	AC	60.09342530181425	20.84989670205121	0.0	0.000007045
eGon2035_lowflex	29301	578	43959	[null]	AC	60.09342530181425	20.84989670205121	0.0	0.000007045
eGon2035_lowflex	29300	7297	43785	[null]	AC	34.59159238785122	3.853794061806069	0.0	0.000000523
eGon2035_lowflex	29299	7297	43785	[null]	AC	34.59159238785122	3.853794061806069	0.0	0.000000523
eGon2035_lowflex	29298	23707	43960	[null]	AC	31.308074382064817	9.052165888759783	0.0	0.0000010395
eGon2035_lowflex	29297	1484	43778	[null]	AC	44.7370678719497	4.984088073411291	0.0	0.000024693
eGon2035_lowflex	29296	1484	43778	[null]	AC	44.7370678719497	4.984088073411291	0.0	0.000024693
eGon2035_lowflex	29295	12851	43787	[null]	AC	70.66338982686204	7.8724948224655025	0.0	0.0000000753

eGon2035

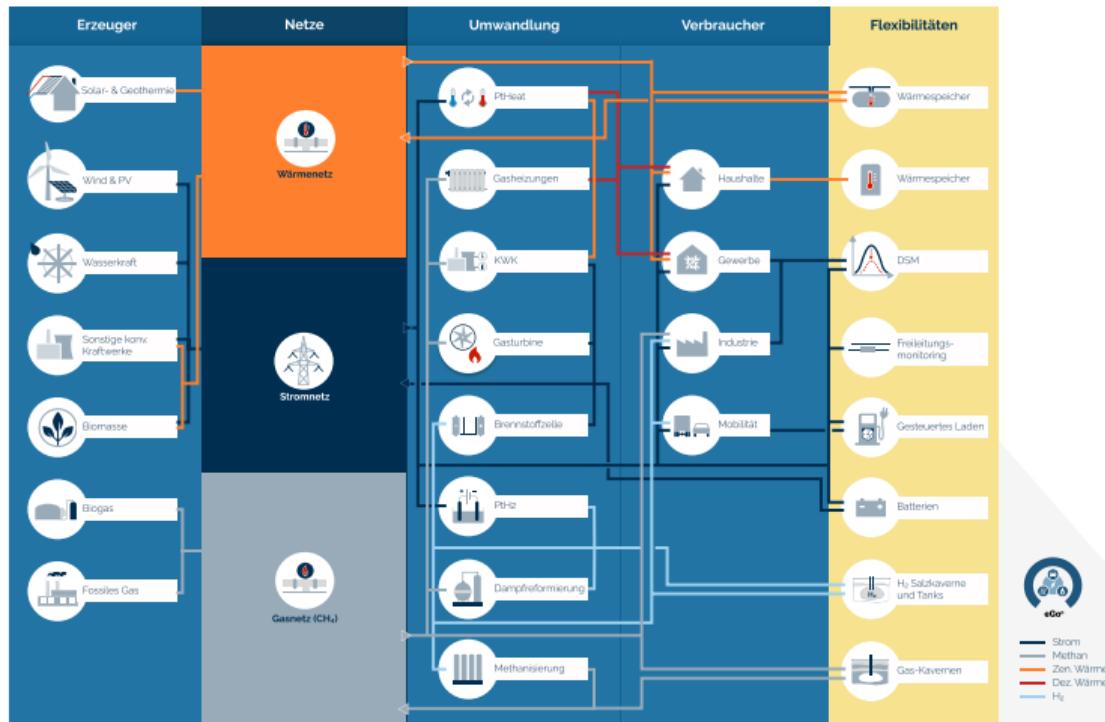
- Zieljahr 2035
- Orientierung am NEP 2021, Szenario C2035
- Alle Bedarfe Strom-, Gas- und Wärmesektor
- Mobilitätssektor: E-PKW und H₂ Schwerlastverkehr Bedarfe
- Netze: Strom (ÜN und VN), Methan (ÜN)

eGon100RE

- 100% erneuerbares Energiesystem
- Vorgelagerte Optimierung des Erzeugungsparks (pypsa-eur)
- Alle Bedarfe Strom-, Gas- und Wärmesektor
- Mobilitätssektor: E-PKW und H₂ Schwerlastverkehr Bedarfe
- Netze: Strom (ÜN und VN), Methan (ÜN), Wasserstoff (ÜN)

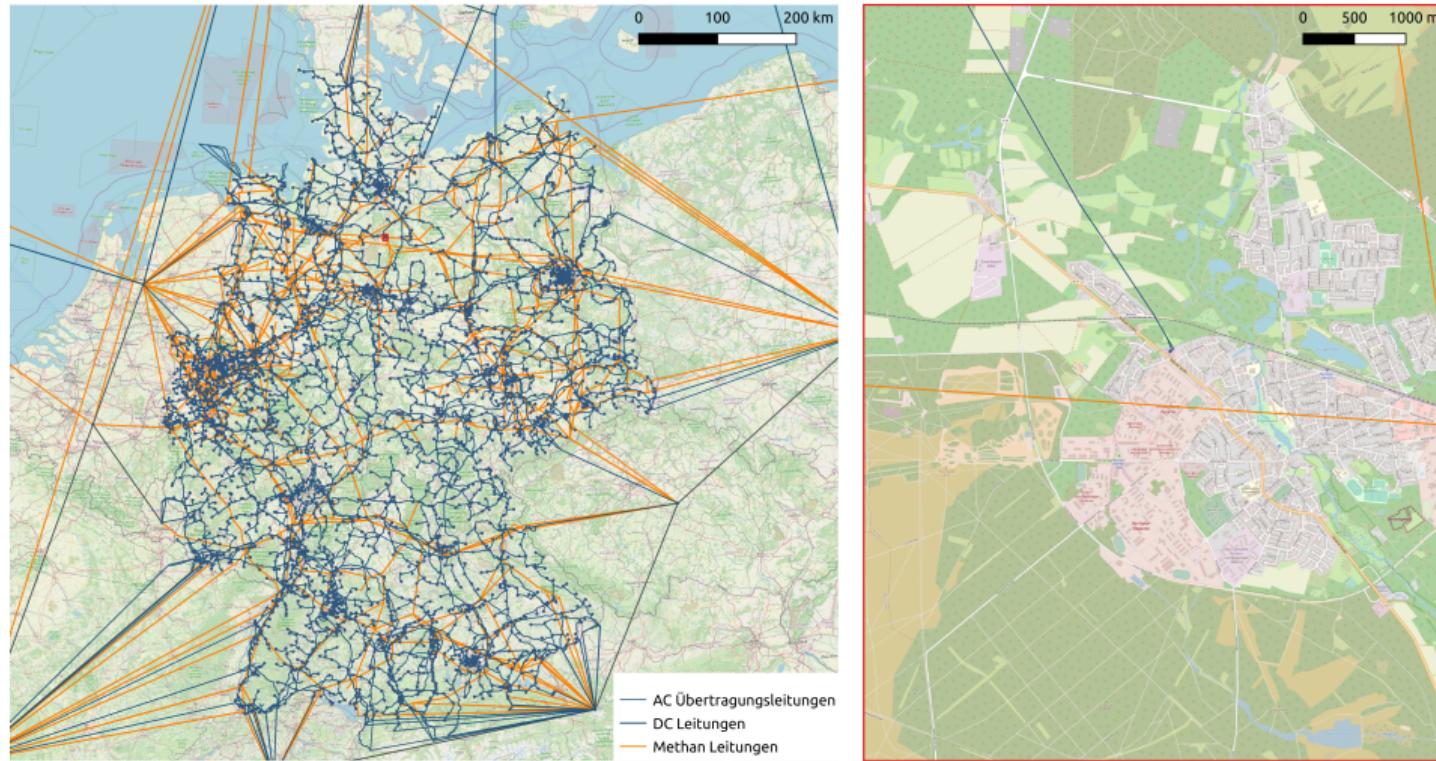
Flexibilität	eGon2035	eGon2035_lowflex
Netzausbau	✓	✓
Ausbau von Batterien	✓	✓
Demand Side Management	✓	
Freileitungsmonitoring	✓	
Flexibles Laden von E-PKW	✓	
Wärmespeicher	✓	
Wasserstofftanks	✓	✓
Wasserstoffsalzkavernen	✓	
Brennstoffzellen	✓	
Methanisierung	✓	

Modellkonzept - Szenario eGon2035



- ① Einleitung
- ② Modellkonzept des sektorengekoppelten Übertragungsnetzes
- ③ Funktionalitäten des Tools *eTraGo*
- ④ How to use *eTraGo*
- ⑤ Ergebnisse der Optimierung des Übertragungsnetzes
- ⑥ Ausblick

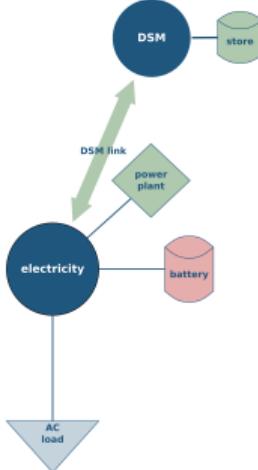
Modellkonzept - Beispiel Szenario eGon2035



Modellkonzept - Szenario eGon2035: Stromsektor



Legend PyPSA components	
bus	store
generator	load
link	
optimization variables	
exogeneously defined	
exogeneous capacity	endogenous dispatch
endogenous capacity	endogenous dispatch

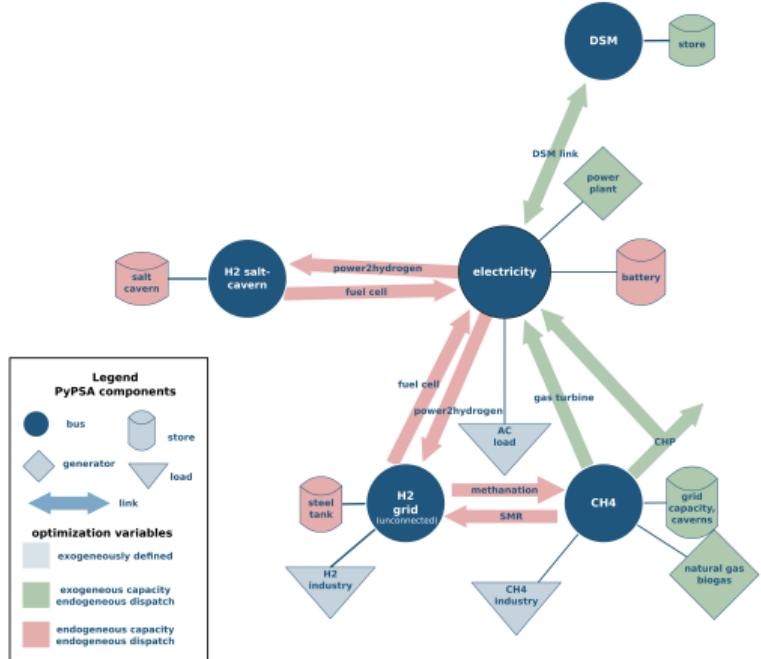


- elektrische Lastzeitreihen

- Kraftwerke
- DSM, Freileitungsmonitoring

- elektrisches Netz
- Batteriespeicher

Modellkonzept - Szenario eGon2035: Gassektor

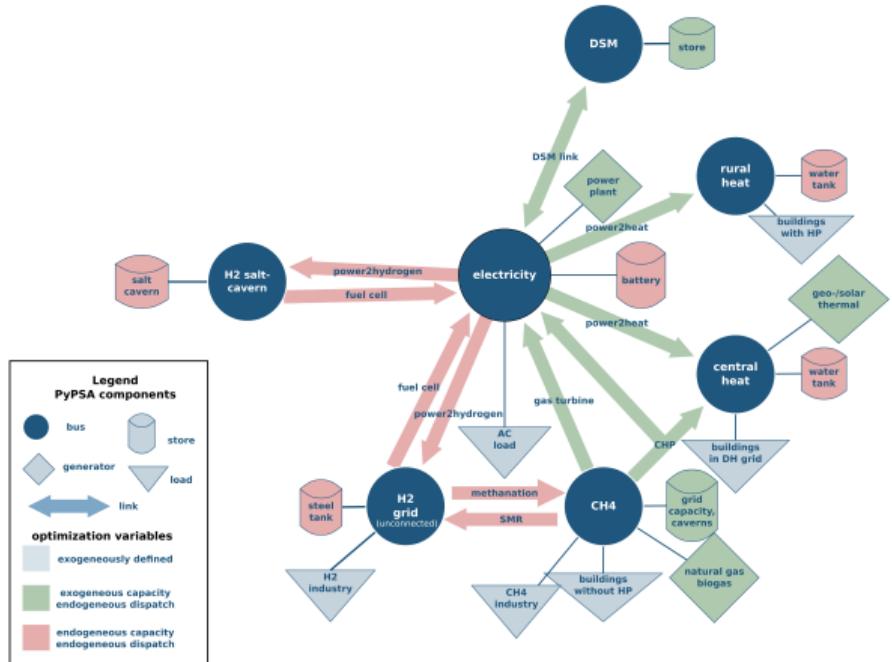


- industrielle Verbräuche

- Methannetz und -speicher
- Gaseinspeisung
- Gasturbinen und KWK

- Wasserstoffspeicher
- Brennstoffzellen, Elektrolyseure
- Dampfreformierung, Methanisierung

Modellkonzept - Szenario eGon2035: Sektor Wärme

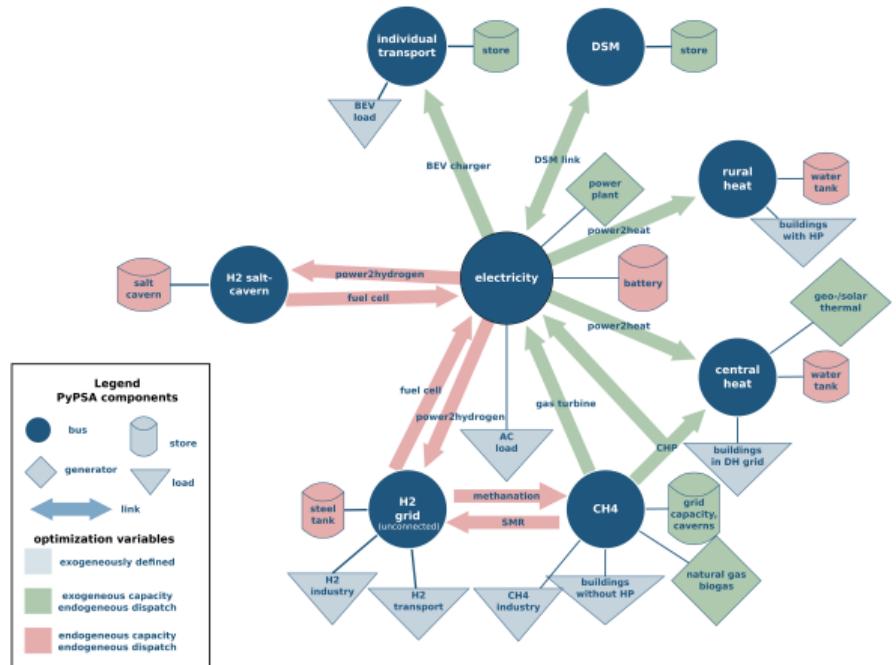


- Wärmebedarfe:
Fernwärme oder individuell

- Geo- und Solarthermie
- Gasheizungen, Wärmepumpen

- Wärmespeicher

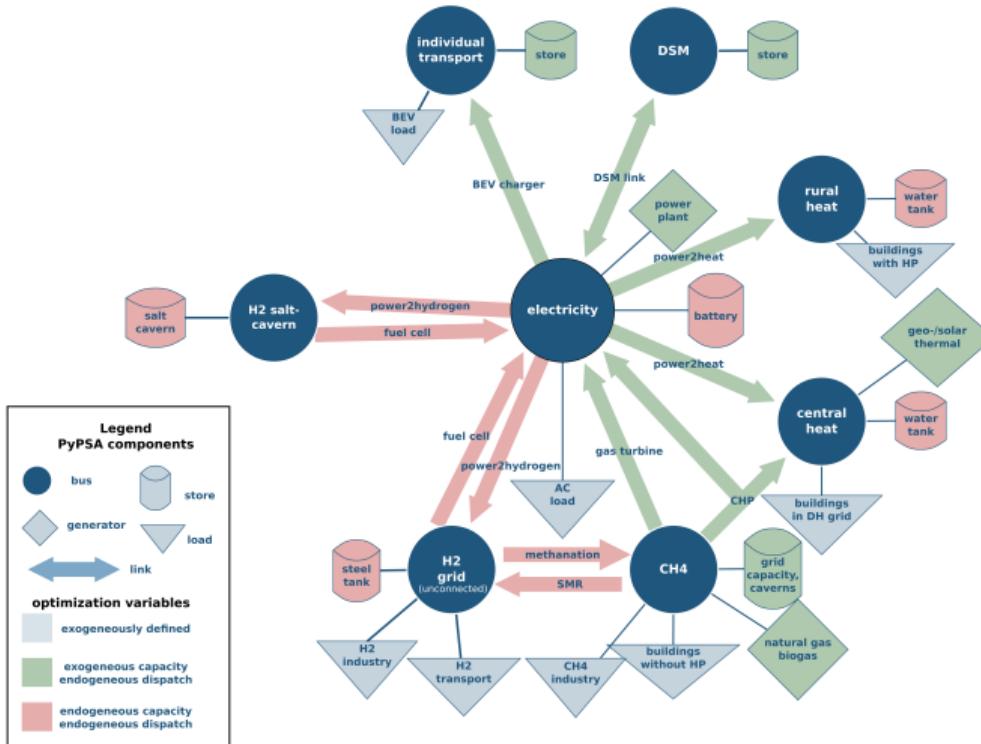
Modellkonzept - Beispiel Szenario eGon2035: Sektor Mobilität



- Bedarfe:
 - E-PKW
 - H2-Schwerlastverkehr

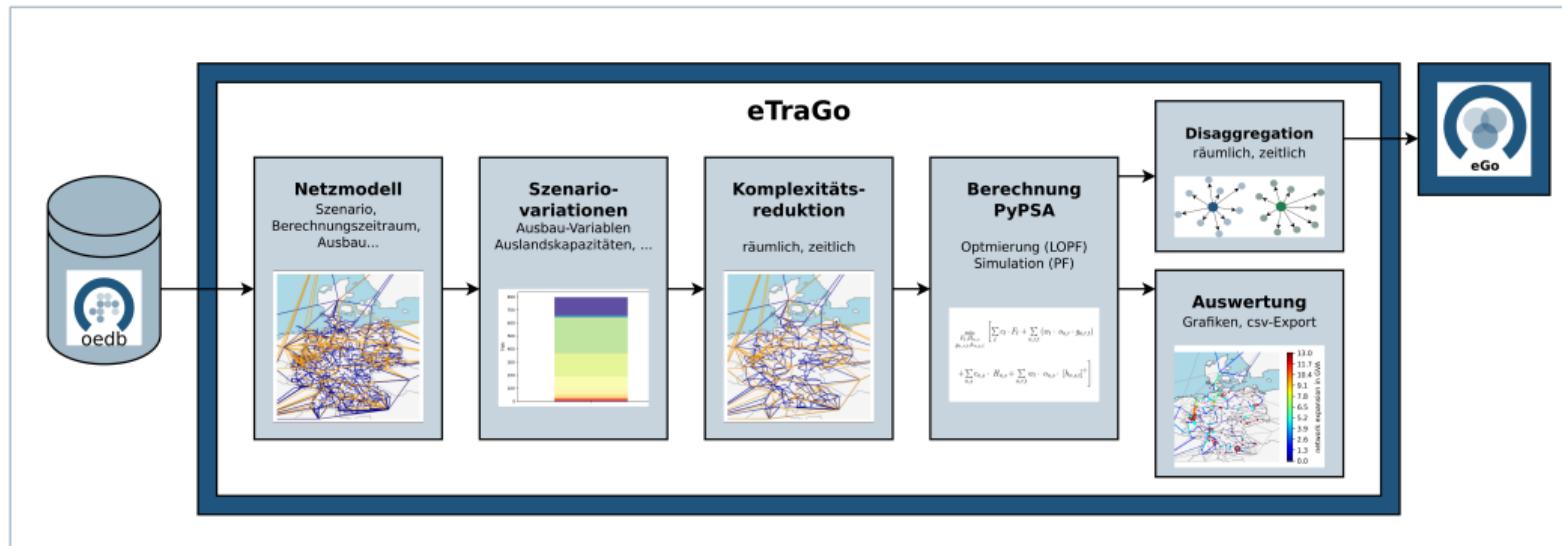
- flexible Ladevorgänge

Modellkonzept - Beispiel Szenario eGon2035



- ① Einleitung
- ② Modellkonzept des sektorengekoppelten Übertragungsnetzes
- ③ Funktionalitäten des Tools *eTraGo*
- ④ How to use *eTraGo*
- ⑤ Ergebnisse der Optimierung des Übertragungsnetzes
- ⑥ Ausblick

Funktionalitäten in eTraGo



Import des Netzmodells



- Auswahl der Datenbank (lokal oder OEP)
- Auswahl eines Berechnungszeitraums
- Auswahl eines Szenarios
 - eGon2035
 - eGon2035_lowflex
 - ...

The screenshot shows the pgAdmin 4 interface. In the top navigation bar, 'File', 'Object', 'Tools', and 'Help' are visible. Below the navigation bar, there's a toolbar with icons for file operations like Open, Save, and Print. The main window has a 'Servers' tree on the left containing 'local_db' and 'eGon'. Under 'eGon', several database objects are listed: 'Cast', 'Catalog', 'Event Triggers', 'Dimensions', 'Foreign Data Wrappers', 'Languages', 'Publications', 'Schemas (13)', 'boundaries', 'grid', 'Cartotools', 'Domains', 'FTS Configuration', 'FTS Dictionaries', 'FTS Mappers', and 'FTS Templates'. A 'Query Editor' tab is active, displaying the following SQL query:

```
1 SELECT * FROM grt_id_egon.etragre_line
2 ORDER BY xcn_name DESC, lne_id DESC LIMIT 100
```

The 'Data Output' tab shows the results of the query, which are 10 rows of data. The columns are: xcn_name, lne_id, head, tail, head1, tail1, type, center_text, numeric, numeric, numeric, numeric, numeric, numeric.

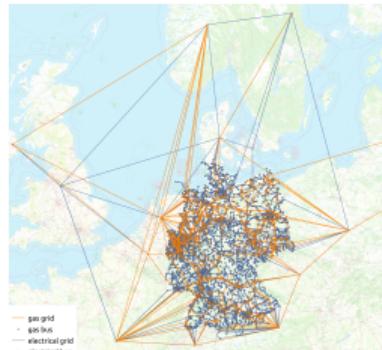
xcn_name	lne_id	head	tail	head1	tail1	type	center_text	numeric	numeric	numeric	numeric	numeric	numeric
eGon2035_lowflex	29862	578	42958	[null]	[null]	AC	68.9942530181425	20.84949670205121	0.0	0.00000760			
eGon2035_lowflex	29361	578	42958	[null]	[null]	AC	68.9942530181425	20.84949670205121	0.0	0.00000760			
eGon2035_lowflex	23500	7257	43765	[null]	[null]	AC	34.919528789122	3.85374919186999	0.0	0.00000922			
eGon2035_lowflex	19299	7257	43765	[null]	[null]	AC	34.919528789122	3.85374919186999	0.0	0.00000922			
eGon2035_lowflex	19358	23707	43968	[null]	[null]	AC	31.30974303204617	9.052158078059703	0.0	0.00000799			
eGon2035_lowflex	29797	1884	43778	[null]	[null]	AC	44.777077171497	4.96408070411291	0.0	0.00000469			
eGon2035_lowflex	29266	1884	43778	[null]	[null]	AC	44.777077171497	4.96408070411291	0.0	0.00000469			
eGon2035_lowflex	29395	12895	43767	[null]	[null]	AC	70.46339826868204	7.87249422465925	0.0	0.0000000152			
eGon2035_lowflex	19394	12895	43767	[null]	[null]	AC	70.46339826868204	7.87249422465925	0.0	0.0000000152			
eGon2035_lowflex	29263	27461	43967	[null]	[null]	AC	108.30424633248613	31.31412444629114	0.0	0.00000262			

Screenshot einer lokalen Datenbank

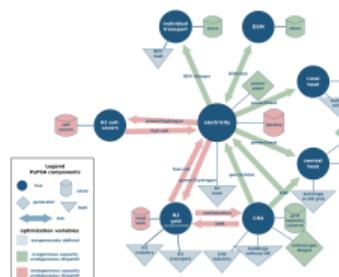


Szenariovariation möglich durch weitere Parametrisierung, z.B.

- Definition der auszubauenden Komponenten
- Begrenzung des Leitungsausbaus
- Abbildung der Auslandsleitungen



Importiertes Strom- und Gasnetz



eGon2035-Modellkonzept (Default)

Verfügbare Methoden:

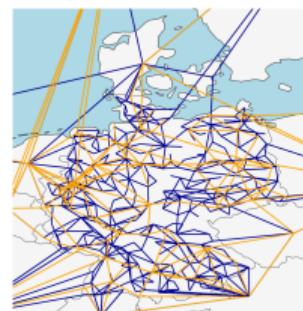
- ehv-Clustering
- k-means Clustering
- k-medoids Dijkstra Clustering
- WIP: Hierarchical Agglomerative Clustering

Sektorenübergreifendes Clustering:

1. Unabhängiges Clustering des elektrischen Netzes sowie Gasnetzes
2. Zuordnung der Knoten aller weiteren Sektoren bzw. Technologien innerhalb der geclusterten Netze



Originalnetz



k-medoids Dijkstra geclustertes Netz

Verfügbare Methoden:

- Skip Snapshots (Downsampling)

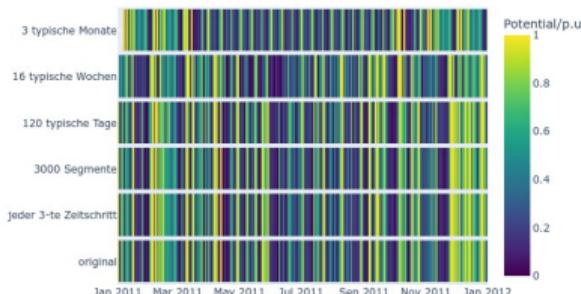
Reduktion der Zeitreihen auf jeden n-ten Zeitschritt

- Clustering auf typische Perioden

Reduktion der Zeitreihen auf typische Perioden, z.B. Tage oder Wochen

- Segmentation

Reduktion der Zeitreihen auf Segmente aufeinanderfolgender Zeitschritte mit unterschiedlicher Länge



Reduktion der maximalen Einspeisezeitreihe durch Windenergie

$$\begin{aligned}
 & \min_{F_\ell, F_I, H_{n,s}, g_{n,r,t}, h_{n,s,t}, f_{n,f,t}} \left[\underbrace{\sum_\ell c_\ell F_\ell}_{\text{Leitungsausbaukosten}} + \underbrace{\sum_I c_I F_I}_{\text{P2X-Ausbaukosten}} + \underbrace{\sum_{n,s} c_{n,s} H_{n,s}}_{\text{Speicherausbaukosten}} \right. \\
 & \quad \left. + \underbrace{\sum_{n,r,t} (w_t \cdot o_{n,r} \cdot g_{n,r,t})}_{\text{Erzeugereinsatzkosten}} + \underbrace{\sum_{n,s,t} (w_t \cdot o_{n,s} \cdot [h_{n,s,t}]^+)}_{\text{Speichereinsatzkosten}} + \underbrace{\sum_{n,I,t} (w_t \cdot o_{n,I} \cdot f_{n,r,I})}_{\text{link-Einsatzkosten}} \right] \tag{1}
 \end{aligned}$$

ℓ : index passive branch (AC-line)

n : index node

r : index generator

s : index store

I : index gas link (electrolysis, fuel cell, SMR, methanation)

t : snapshot

c_ℓ : CAPEX passive branch

F_ℓ : capacity passive branch

w_t : snapshot weighting

$o_{n,r}$: OPEX of generator n, r

$g_{n,r,t}$: dispatch of generator n, r, t

$c_{n,s}$: CAPEX of store n, s

$H_{n,s}$: capacity of store n, s

$o_{n,s}$: OPEX of store n, s

$h_{n,s,t}$: dispatch of store n, s, t

$c_{n,I}$: CAPEX of link n, I

$F_{n,I}$: capacity of link n, I

$o_{n,I}$: OPEX of link n, I

$f_{n,I,t}$: dispatch of link n, I, t

Weitere Berechnungsoptionen durch Berücksichtigung zusätzlicher Nebenbedingungen, z.B.

- Festlegung eines minimalen Anteils erneuerbarer Erzeugung
- Limitierung von Im- und Exporten ins bzw. aus dem Ausland

Zeitliche und räumliche Disaggregation



Zeitliche Disaggregation:

- Einsatzoptimierung unter Verwendung der vollkomplexen Zeitreihen
- optional: Aufteilen in mehrere Zeitabschnitte unter Berücksichtigung von Stützstellen der Speicherfüllstände

Räumliche Disaggregation:

- Daten je HS/MS-USW benötigt
- Verteilung der folgenden Ergebnisse nach installierten Leistungen und Potentialzeitreihen auf die volle räumliche Komplexität
 - Speicherausbau
 - Einsatz von Erzeugern, Speichern und Flexibilitätsoptionen

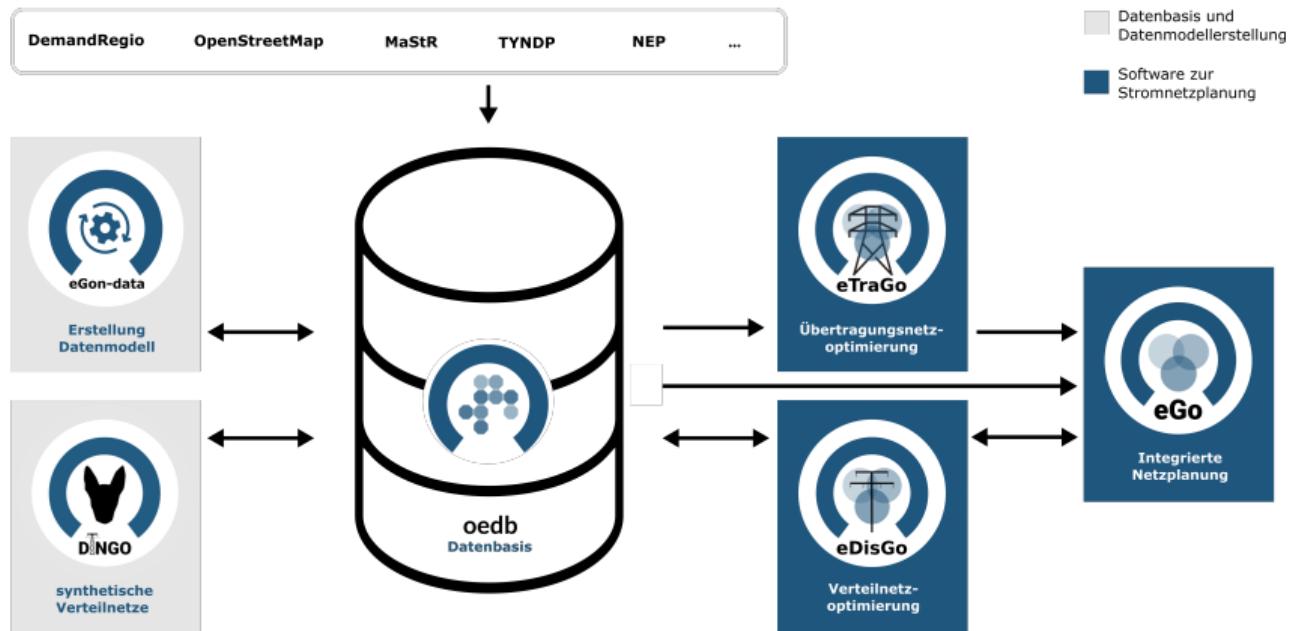


Beispiel: Speicher vor räumlicher Desaggregation



Beispiel: Speicher nach räumlicher Desaggregation

Schnittstelle zu eDisGo



Export und Auswertung der Ergebnisse

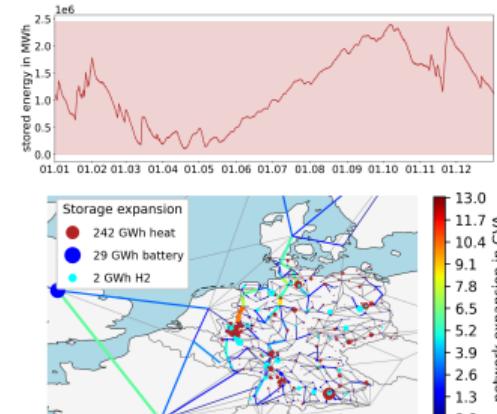


- Export der Ergebnisse als csv-Dateien, die direkt als eTraGo-Objekte wieder einlesbar und analysierbar sind
- Verfügbarkeit einiger Funktionen zur Darstellung von Ergebnissen, z.B.

```
etrago.calc_results()  
etrago.results
```

Out:

	unit	value
annual system costs	EUR/a	108284616690.48645
annual investment costs	EUR/a	4114597570.303047
annual marginal costs	EUR/a	104170019120.183411
annual electrical grid investment costs	EUR/a	1203525016.004688
annual links investment costs	EUR/a	1355925306.694493
annual storage+store investment costs	EUR/a	1555147247.603866
battery storage expansion	MW	4949.001449
store expansion	MW	2473906.47231
heat store expansion	MW	2450433.045374
fuel cell links expansion	MW	0.000375
electrolyzer links expansion	MW	33860.722844
methanisation links expansion	MW	20031.546129
Steam Methane Reformulation links expansion	MW	5559.0961
abs. electrical grid expansion	MW	249471.916622
[...]		





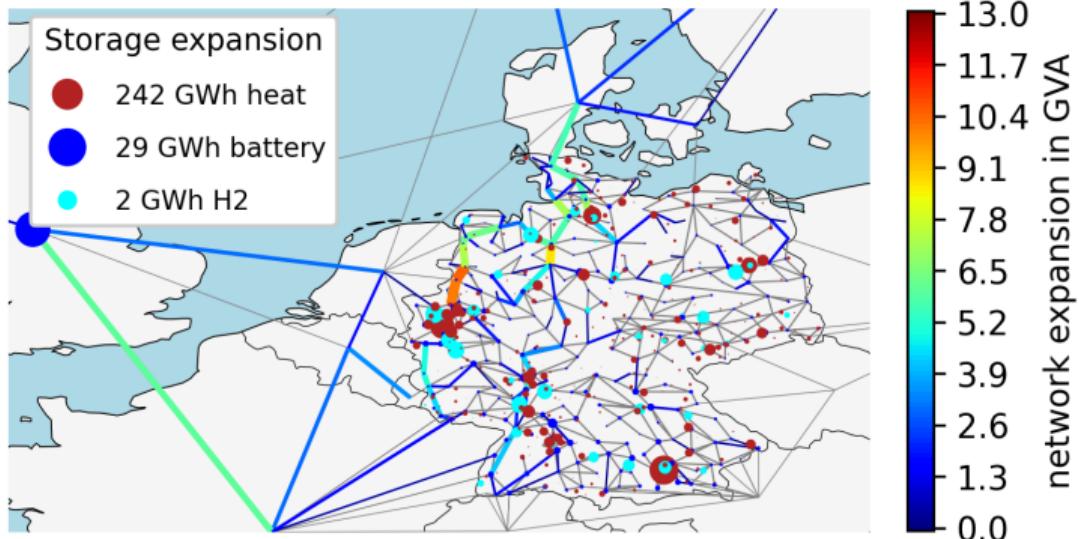
- ① Einleitung
- ② Modellkonzept des sektorengekoppelten Übertragungsnetzes
- ③ Funktionalitäten des Tools *eTraGo*
- ④ How to use *eTraGo*
- ⑤ Ergebnisse der Optimierung des Übertragungsnetzes
- ⑥ Ausblick

- ① Einleitung
- ② Modellkonzept des sektorengekoppelten Übertragungsnetzes
- ③ Funktionalitäten des Tools *eTraGo*
- ④ How to use *eTraGo*
- ⑤ Ergebnisse der Optimierung des Übertragungsnetzes
- ⑥ Ausblick

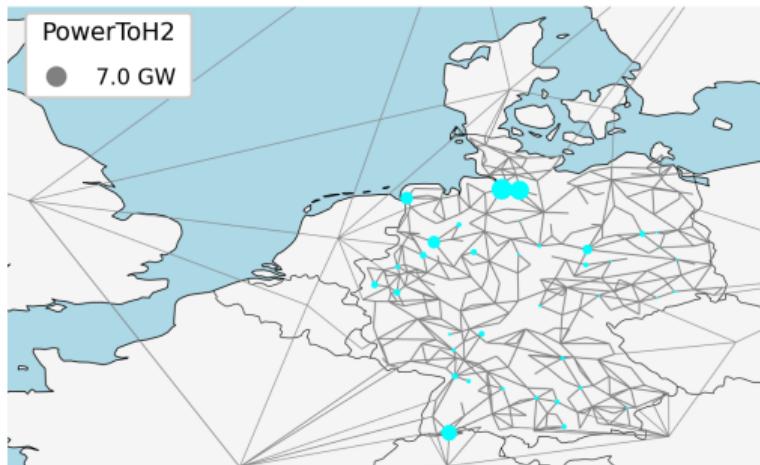
Forschungsfragen:

- Welche Netzausbau- und Flexibilisierungsdarfe bestehen in einem sektorgekoppelten Energiesystem?
- Wo werden Flexibilitäten im Übertragungsnetz optimal eingesetzt und ausgebaut?

eGon2035: Netz- und Speicherausbau



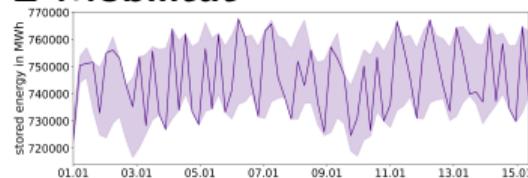
- Viel Netzausbau im Norden
- Wärmespeicher in Fernwärmennetzen
- Kleine Wasserstoffspeicher
- Batterien: Heimspeicher



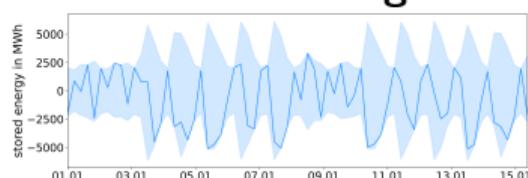
- Elektrolyseure nah an EE-Erzeugung (und H₂-Bedarfen)
- Methanisierung als Wasserstoffverbraucher
- Kein Ausbau von Brennstoffzellen

Einsatz und Potentiale in den ersten beiden Wochen des Jahres:

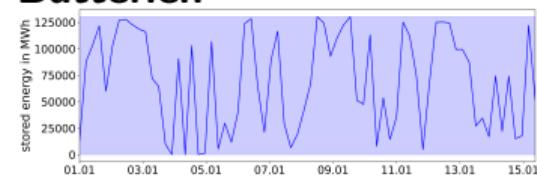
E-Mobilität



Demand Side Management

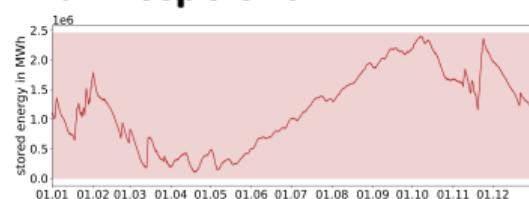


Batterien

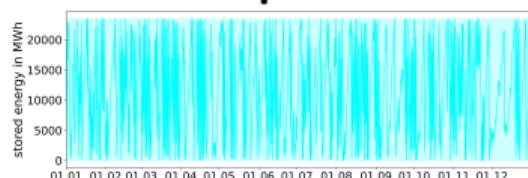


Einsatz und Potentiale über das Jahr:

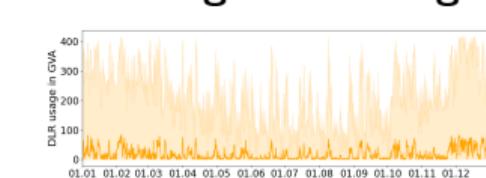
Wärmespeicher



Wasserstoffspeicher



Freileitungsmonitoring

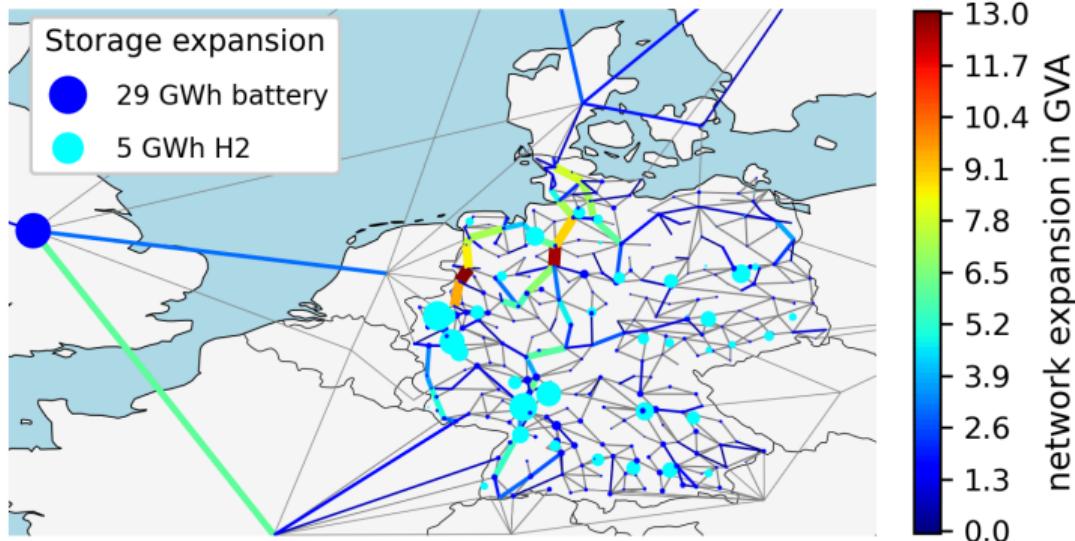


Forschungsfragen:

- Welches Potenzial zur Kostenreduktion von Netz- und Speicherausbau kann mit verschiedenen Durchdringungen von Flexibilitäten gehoben werden?
- Inwieweit können zusätzliche Flexibilitäten zur Vermeidung von EE-Abschaltungen führen?

Flexibilität	eGon2035	eGon2035_lowflex
Netzausbau	✓	✓
Ausbau von Batterien	✓	✓
Demand Side Management	✓	
Freileitungsmonitoring	✓	
Flexibles Laden von E-PKW	✓	
Wärmespeicher	✓	
Wasserstofftanks	✓	
Wasserstoffsalzkavernen	✓	✓
Brennstoffzellen	✓	
Methanisierung	✓	

eGon2035_lowflex: Netz- und Speicherausbau



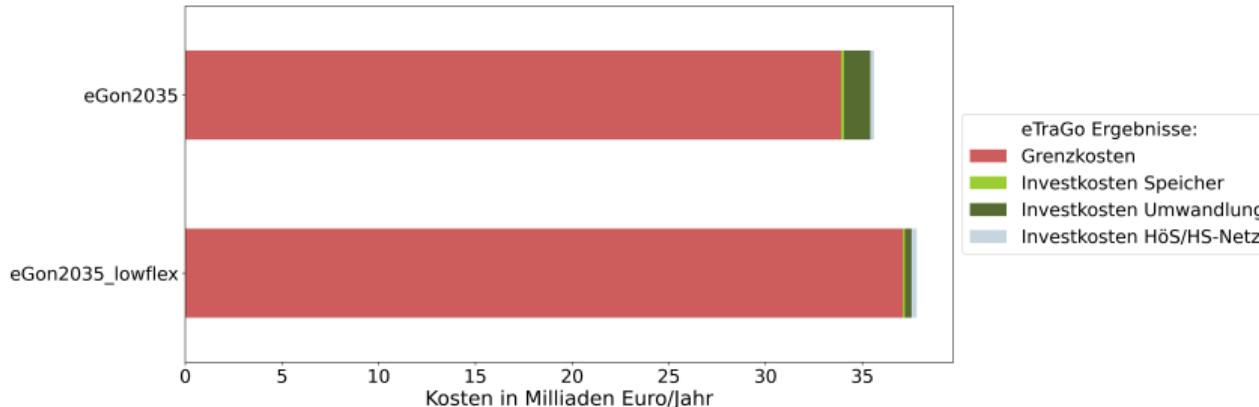
- Höherer Netzausbau in den gleichen Trassen
- Wasserstoffspeicher größer, ersetzen aber keine Wärmespeicher
- Batterien: Heimspeicher

Results: eGon2035_lowflex



- Im Vergleich zu eGon2035 weniger Elektrolyseure
- Methanisierung nicht möglich: weniger H₂ Bedarf
- Kein Ausbau von Brennstoffzellen

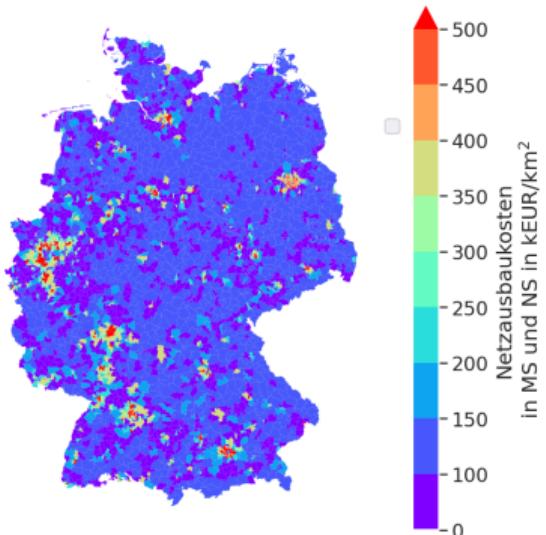
Vergleich von Ergebnisdaten



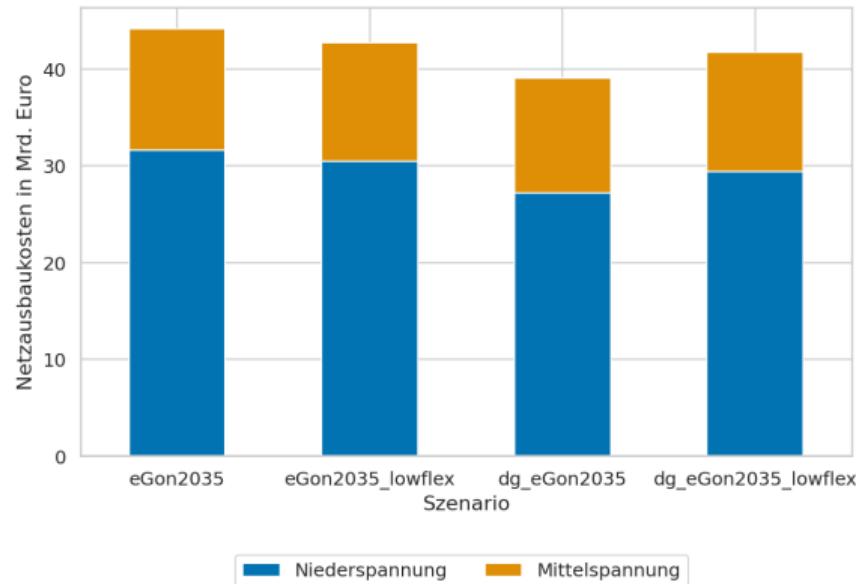
	Einheit	eGon2035	eGon2035_lowflex
EE-Einspeisung	TWh	627.96	553.93
Netzausbau	TW · km	10.20	13.80
CO ₂ Emissionen*	10 ⁶ t	507.54	530.16

*inkl. Nachbarländer

Ergebnisse Verteilnetz

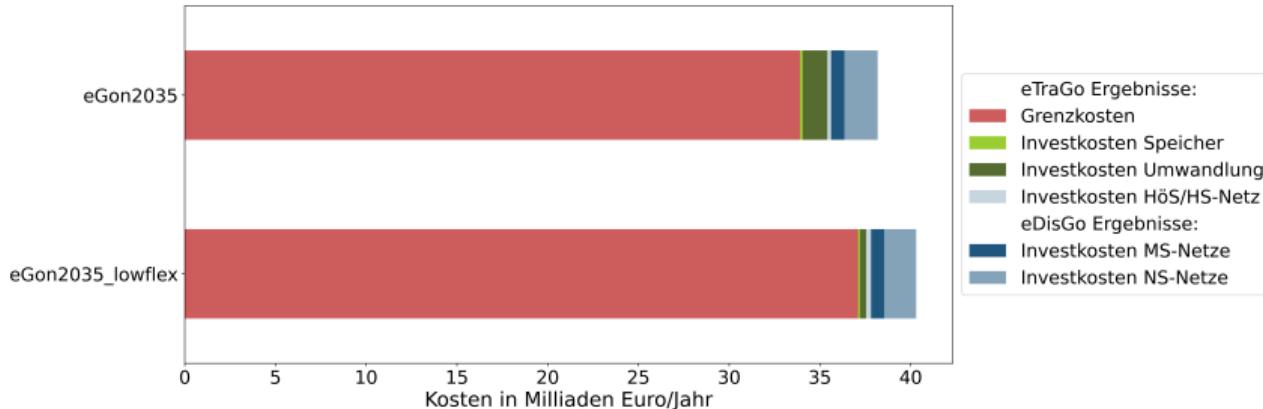


eGon2035: Ausbaukosten je Netz



Ausbaukosten in verschiedenen Szenarien

Ergebnisse über alle Netzebenen

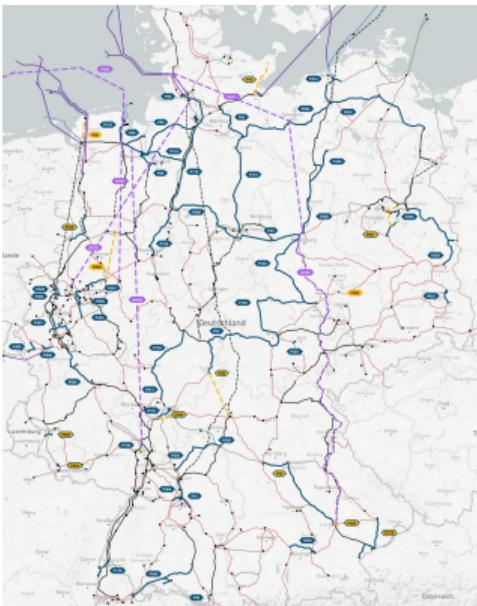


- Flexibilitäten führen zu geringeren Systemkosten
- Verteilnetzausbau höhere Kosten als Übertragungsnetzausbau

Einordnung der Ergebnisse



- Notwendige Annahmen, z.B.
 - Verteilung von Lasten und Erzeugung
 - Kostenparameter
- Methodik: Linearisierte, integrierte Optimierung
 - Kontinuierlicher Ausbau
 - Gleichzeitige Optimierung von Erzeugereinsatz und dem Ausbau von Komponenten
- Vergleich zu anderen Studien
 - Einordnung der Sektorenkopplung und Flexibilitäten ähnlich
 - Weniger Ausbaubedarf in unseren Rechnungen
 - Ähnliche Verortung von Netzausbaubedarf
- Top-Down-Ansatz
 - Übertragungsnetz-Fokus: Verteilnetze eingeschränkt flexibel



Leitungsausbau im NEP 2021,
C2035 [2]

- Die integrierte Planung des Strom-, Wärme-, Gas- und Mobilitätssektors sowie Stromnetzplanung über alle Spannungsebenen ist essenziell um kostengünstige und effiziente Systeme zu erhalten
- Die Notwendigkeit von Flexibilitätsoptionen und Netzausbau hängt stark von den Gegebenheiten und der Position im Netz ab.
- Wärme, insbesondere Wärmenetze, bieten Flexibilisierungspotential das noch unterschätzt wird.
- Mittelfristig stellt der Wasserstoffsektor wenig direkte Flexibilität für den Stromsektor bereit, kann aber zur Dekarbonisierung der Wärme beitragen.
- Flexibilitäten können bereits mittelfristig Systemkosten und Treibhausgasemissionen senken sowie EE-Einspeisung und damit Importunabhängigkeit fördern

- ① Einleitung
- ② Modellkonzept des sektorengekoppelten Übertragungsnetzes
- ③ Funktionalitäten des Tools *eTraGo*
- ④ How to use *eTraGo*
- ⑤ Ergebnisse der Optimierung des Übertragungsnetzes
- ⑥ Ausblick

- Weitere laufende Forschungsprojekte
 - PoWerD
 - HyBit
 - Auftragsforschung
 - Ergebnisse 100% Szenario
 - Umkehr des Top-Down-Ansatzes
 - Ziel: Mehr in die Anwendung kommen
 - Ziel: Nutzerfreundlichkeit erhöhen, Einstiegshürden abbauen
- Folgeprojekt geplant



Clara Büttner

Europa-Universität und
Hochschule Flensburg
clara.buettner@hs-flensburg.de

Katharina Esterl

Europa-Universität Flensburg
katharina.estrl@uni-flensburg.de

Carlos Epia

Hochschule Flensburg
carlos.epia@hs-flensburg.de

Hendrik-Pieter Tetens

DLR Institut für Vernetzte
Energiesysteme
Hendrik-Pieter.Tetens@dlr.de

- [1] T. Brown, J. Hörsch, and D. Schlachtberger. PyPSA: Python for Power System Analysis. Journal of Open Research Software, 6(4), 2018. doi: 10.5334/jors.188. URL <https://doi.org/10.5334/jors.188>.
- [2] Übertragungsnetzbetreiber. Netzentwicklungsplan Strom 2035, Version 2021, 1. Entwurf, 2021.