

Entwicklung einer Methode zur Simulation und Quantifizierung der Resilienz von sektorengesetzten Energiesystemen

EnInnov2024

18. Symposium Energieinnovation 2024

Paul-Hendrik Homberg
Graz, 15.02.2024

Gefördert durch

DFG Deutsche
Forschungsgemeinschaft

Agenda

- Motivation: Sektorenkopplung und Resilienz
- Simulationsumgebung
- Resilienzbewertung
- Anwendungsbeispiel
- Fazit und Ausblick

Motivation

Motivation

Sektorenkopplung und Resilienz

Klimaneutralität

- Deutschland: 2045
- Österreich: 2040

Sektorenkopplung

- Dekarbonisierung
- Energieeffizienz
- Resilienzsteigerung

Endenergieverbrauch Deutschland 2022 nach Sektoren ^[1]

Endenergieverbrauch
Wärme und Kälte
(ohne Strom)
1.155 Mrd. kWh



Bruttostromverbrauch
550 Mrd. kWh



Endenergieverbrauch
Verkehr (ohne Strom)
585 Mrd. kWh

Motivation

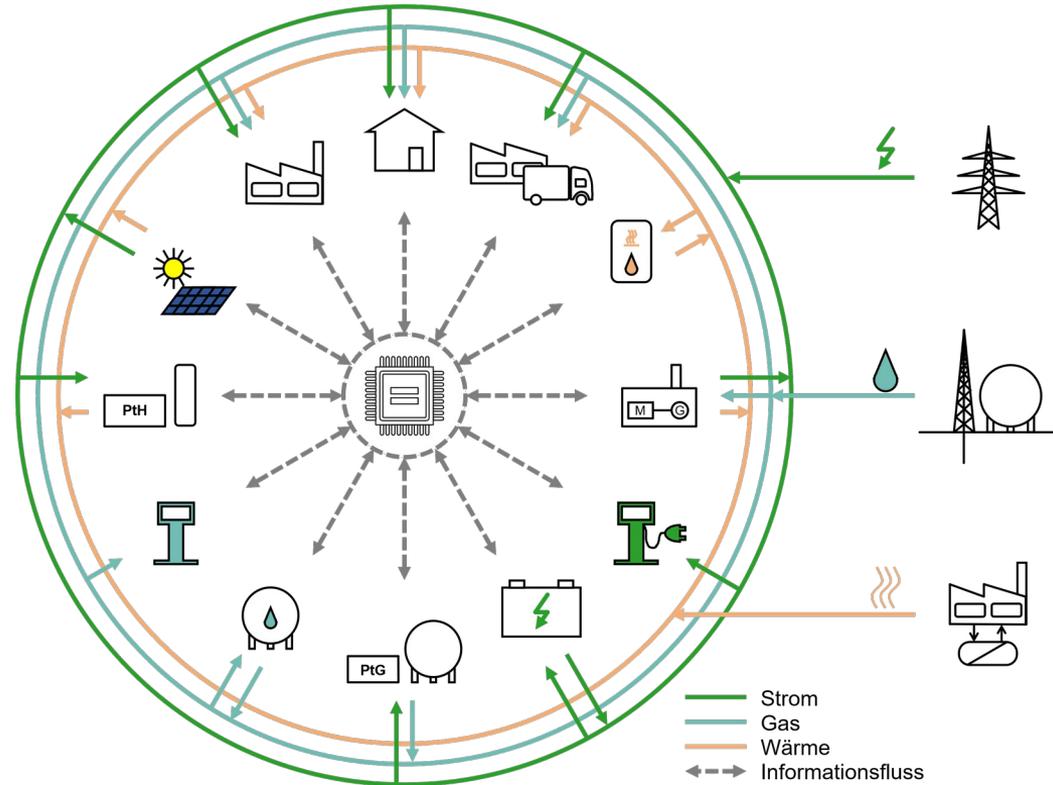
Sektorenkopplung und Resilienz

Herausforderungen

- Steigende Komplexität
- Globale Krisen
- Erhöhung der Risiken

Chancen

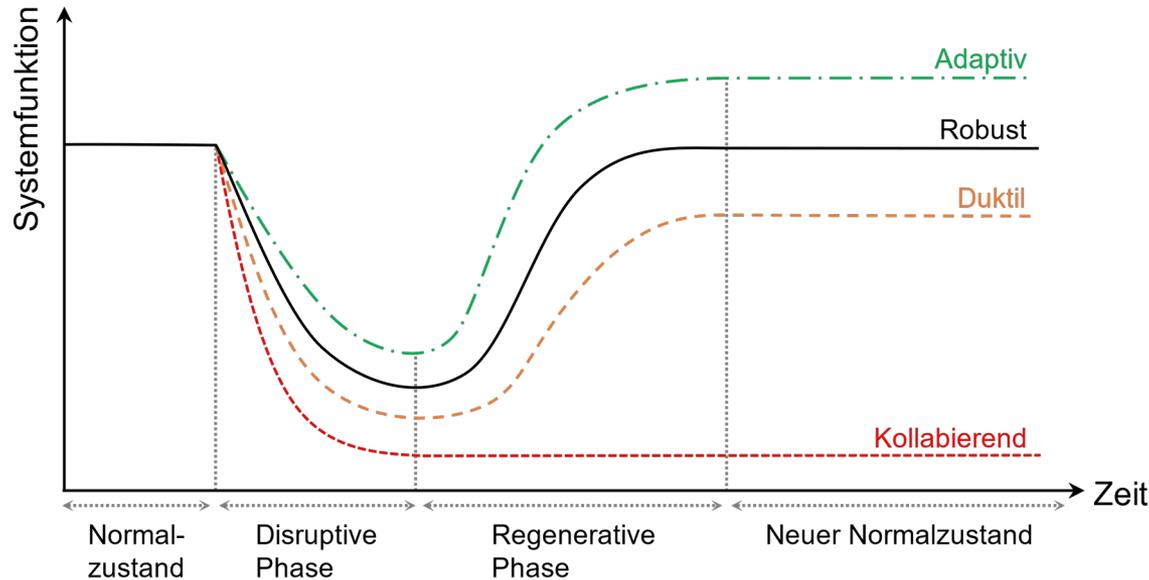
- Flexibilitäten
- Dezentral & autark
- Erhöhung der Resilienz



Motivation

Resilienz

Die Fähigkeit des Energiesystems, seine Funktion trotz Störung aufrechtzuerhalten sowie Dauer und Auswirkungen der Störung zu begrenzen, was die Fähigkeit einschließt, solche Ereignisse zu antizipieren, zu absorbieren, sich anzupassen und sich schnell davon zu erholen.



Simulationsumgebung

Simulationsumgebung

Vergleich bestehender Software

Tool	Art	OS	Strom	Gas	Wärme	Kopplung	Det.	OPF	Bib.
SINCAL	NB		✓	✓	✓		✓		
STANET	NB		✓	✓	✓		✓		
pandapower	NB	✓	✓				✓		✓
pandapipes	NB	✓		✓	✓		✓	✓	✓
oemof	ESMO	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
SAInt	MENB		✓	✓		✓	✓		
TransiEnt	MENB	(✓)	✓	✓	✓	✓	✓		
HEIGa	MENB		✓	✓	✓	✓	✓		
pandapipes multi-energy	MENB	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Anlehnung an [2]: NB Netzberechnung, ESMO Energiesystem Modellierung und Optimierung, MENB Multi-Energie Netzberechnung, OS Open-Source, Det. detaillierte Netzmodelle, OPF optimaler Leistungsfluss, Bib. Einbindung externer

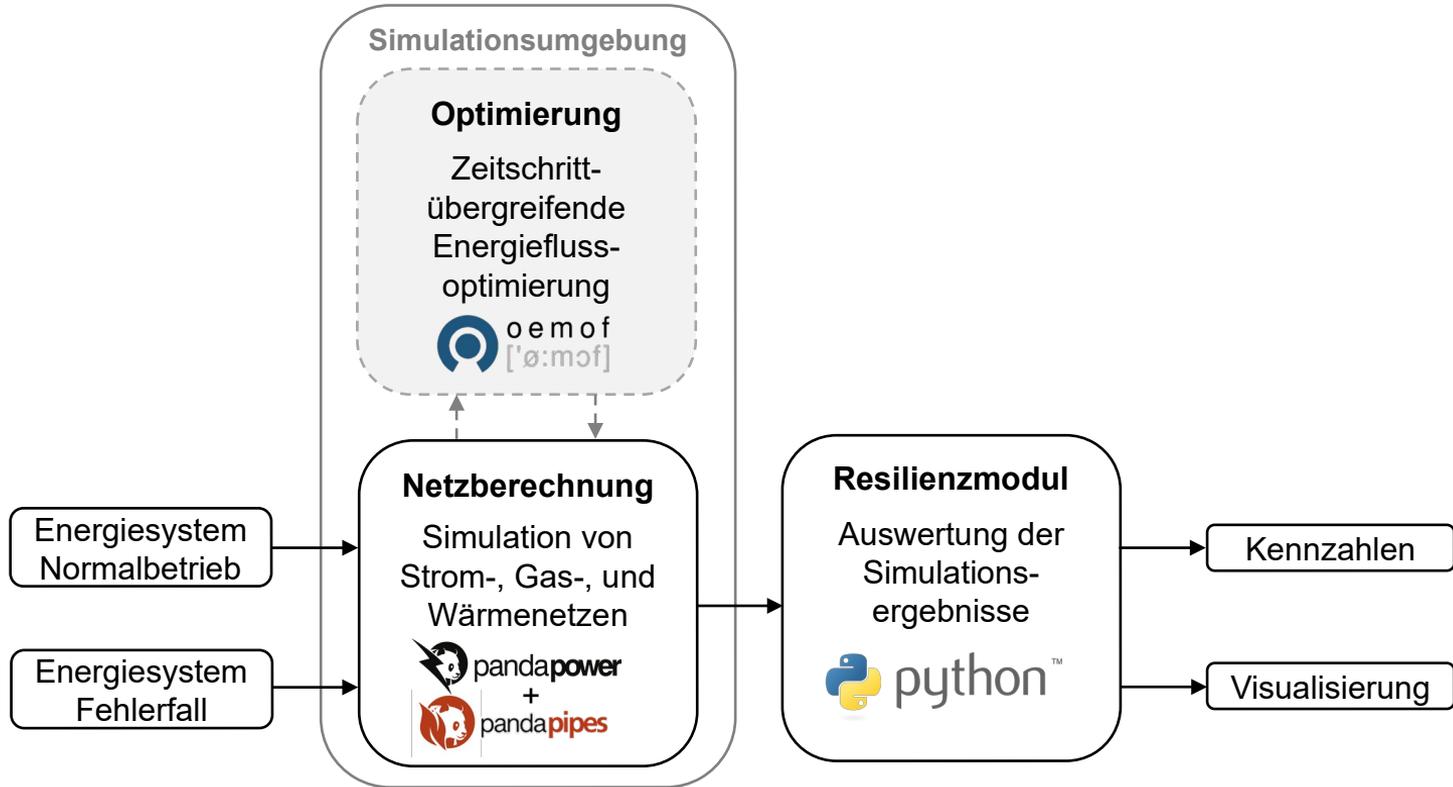
Bibliotheken

Entwicklung einer Methode zur Simulation und Quantifizierung der Resilienz von sektorengekoppelten Energiesystemen

EnInnov2024 | Paul-Hendrik Homberg | S. 8

Simulationsumgebung

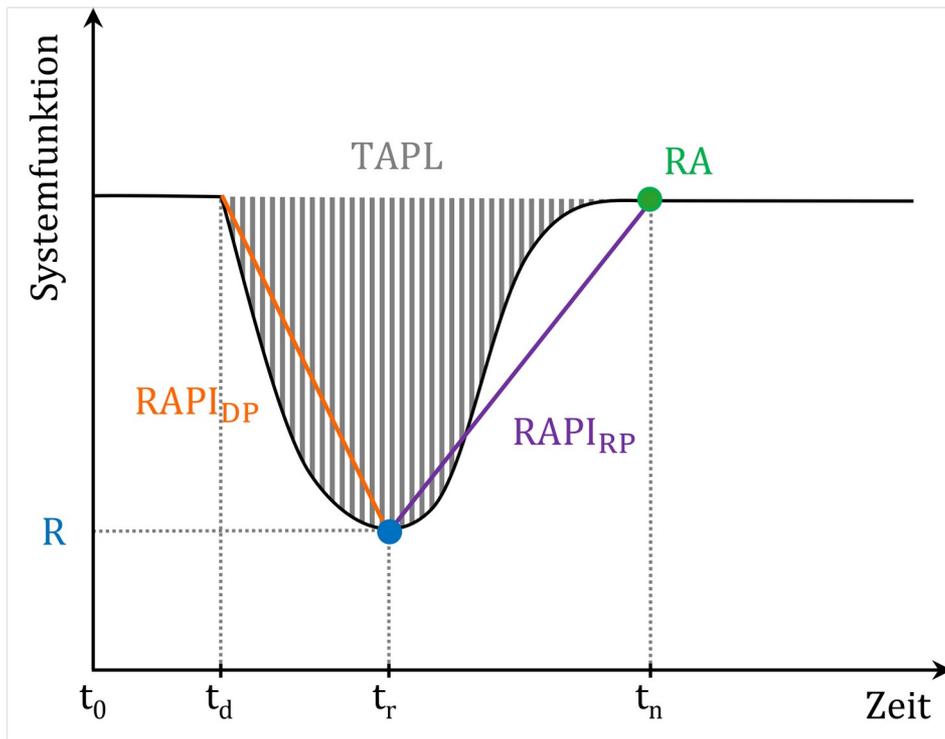
Auswahl und Erweiterung



Resilienzbewertung

Resilienzbewertung

Bewertungsmethodik



$$R = \min(MOP) \quad RA = MOP(t_n)$$

$$RAPI_{DP} = \frac{MOP(t_r) - MOP(t_d)}{t_r - t_d}$$

$$RAPI_{RP} = \frac{MOP(t_n) - MOP(t_r)}{t_n - t_r}$$

$$TAPL = \frac{\int_{t_d}^{t_n} MOP(t_0) - MOP(t) dt}{t_n - t_d}$$

$$GR = R \cdot \left| \frac{RAPI_{RP}}{RAPI_{DP}} \right| \cdot TAPL^{-1} \cdot RA$$

Resilienzbewertung

Systemfunktion

Mögliche Kenngrößen der Systemfunktion:

- Anzahl versorgbarer Verbraucher
- Fluss- und Potentialgrößen
- Auslastung der Betriebsmittel
- Netzkapazität

➔
$$\text{MOP}(\text{Systemkosten}(t)) = \frac{\text{Systemkosten Normalfall}(t)}{\text{Systemkosten Fehlerfall}(t)}$$

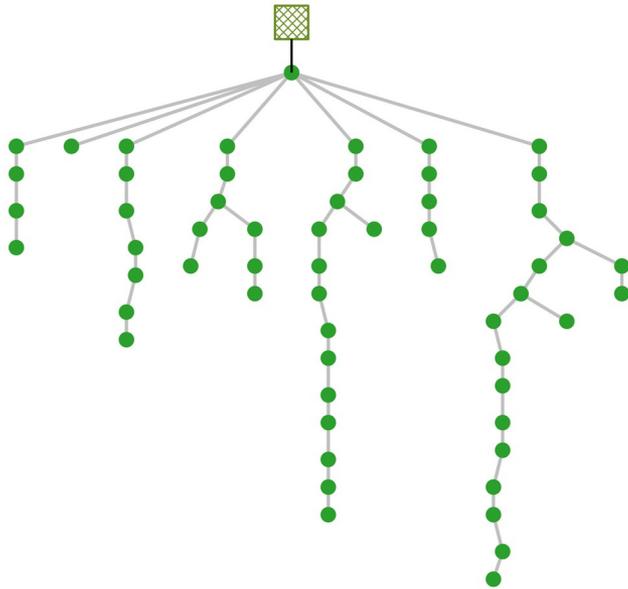
Anwendungsbeispiel

Anwendungsbeispiel

Systemübersicht

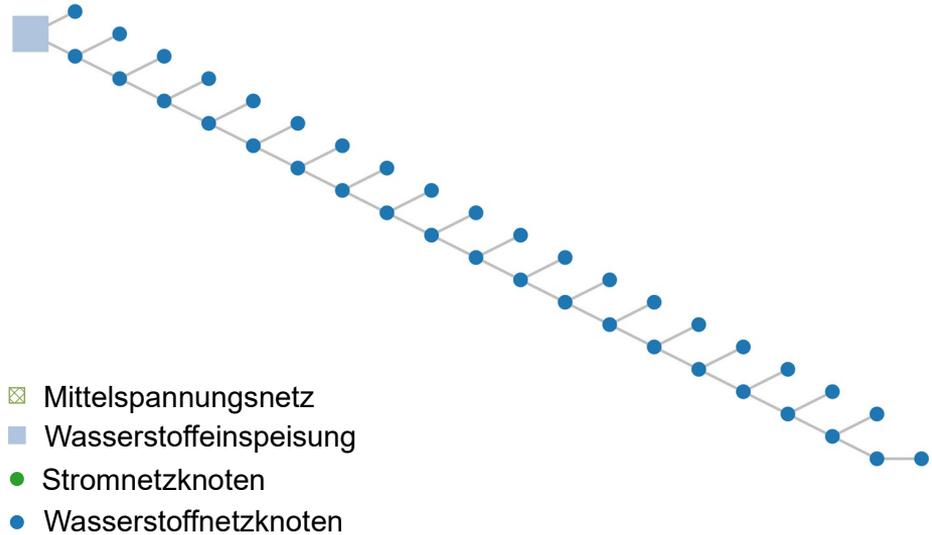
Niederspannungsnetz

SimBench '1-LV-urban6--2-sw' [3]



Wasserstoffnetz

Anlehnung an [4]



- ⊠ Mittelspannungsnetz
- Wasserstoffeinspeisung
- Stromnetzknotten
- Wasserstoffnetzknotten

Anwendungsbeispiel

Fehlerszenarien

Szenario 1 – Ausfall der Photovoltaik
keine Einspeisung der Photovoltaikanlagen

Szenario 2 – Defekt der Regeldruckanlage
Versorgungsunterbrechung aller Wasserstoffverbraucher

Szenario 3 – Ausfall der Regeldruckanlage mit Unterstützung durch PtG
Aufrechterhaltung der Wasserstoffversorgung teilweise möglich

Anwendungsbeispiel

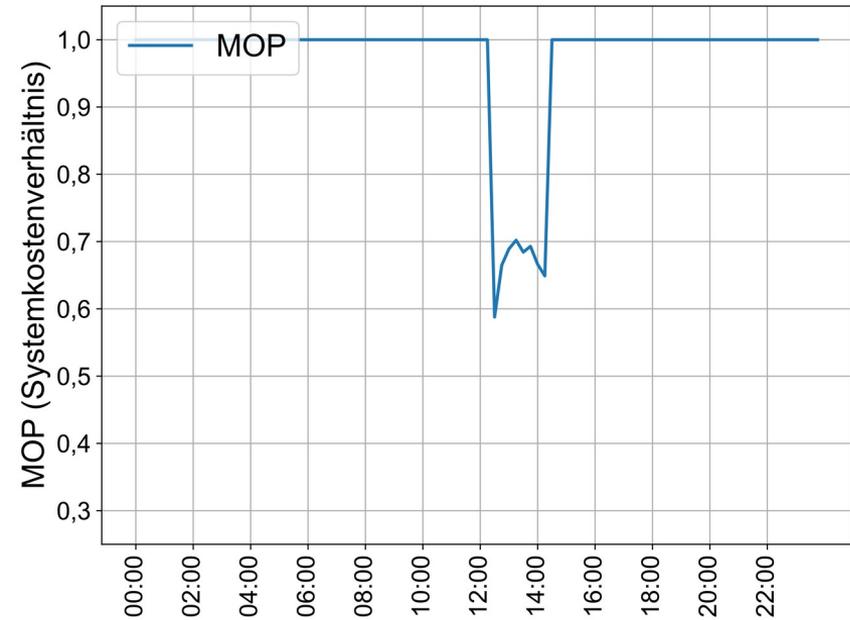
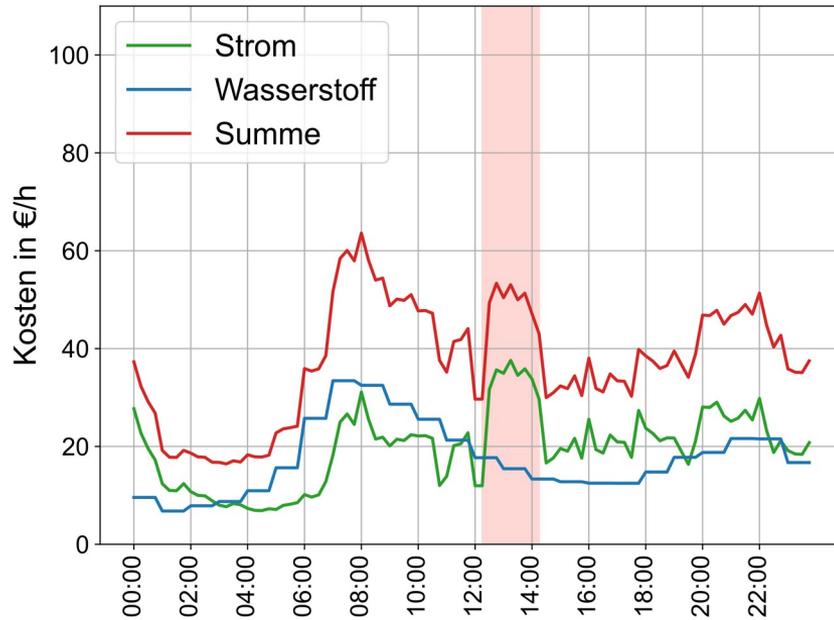
Systemkosten

Systemkosten	Kosten in ct/kWh	Kostenart	Quelle
Strom aus Netz	42,29	Endkundenkosten	[5]
Strom aus PV-Anlage	4,50	Stromgestehungskosten	[6]
Strom aus PV-Anlage + Batteriespeicher	7,00	Stromgestehungskosten	[6]
Strom Strafkosten bei Versorgungsunterbrechung	2405,00	VoLL	[7]
Wasserstoff aus Netz	12,26	Endkundenkosten	[5]
Wasserstoff aus PtG	52,86	Stromkosten/Wirkungsgrad	[8]
Wasserstoff Strafkosten bei Versorgungsunterbrechung	60,00	VoLL	[9]

Anwendungsbeispiel

Kostenverläufe und Resilienzlinien

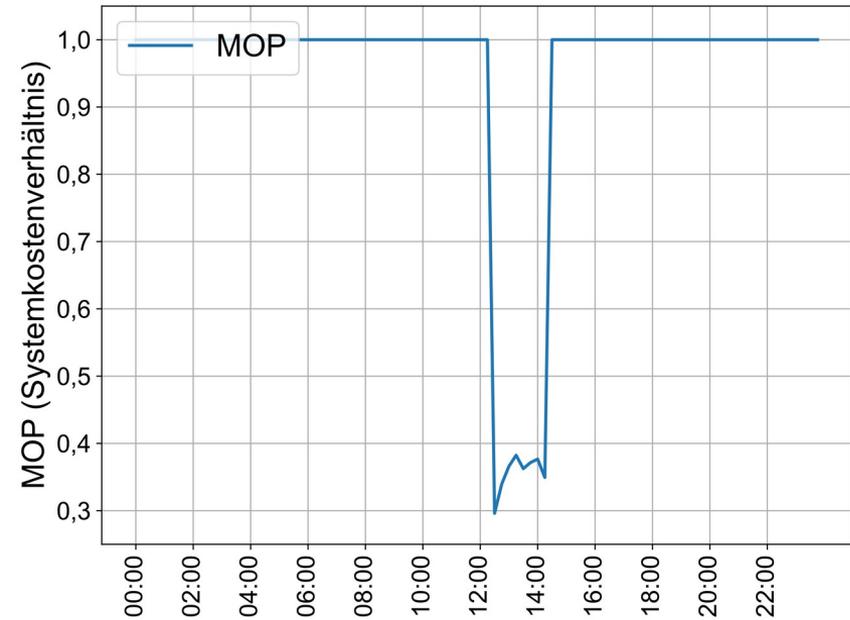
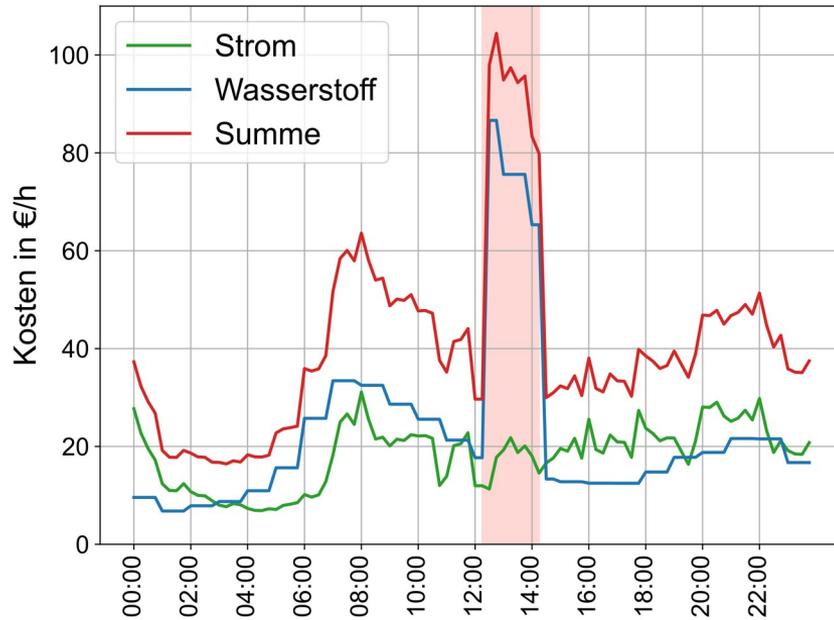
Szenario 1 – Ausfall der Photovoltaik



Anwendungsbeispiel

Kostenverläufe und Resilienzlinien

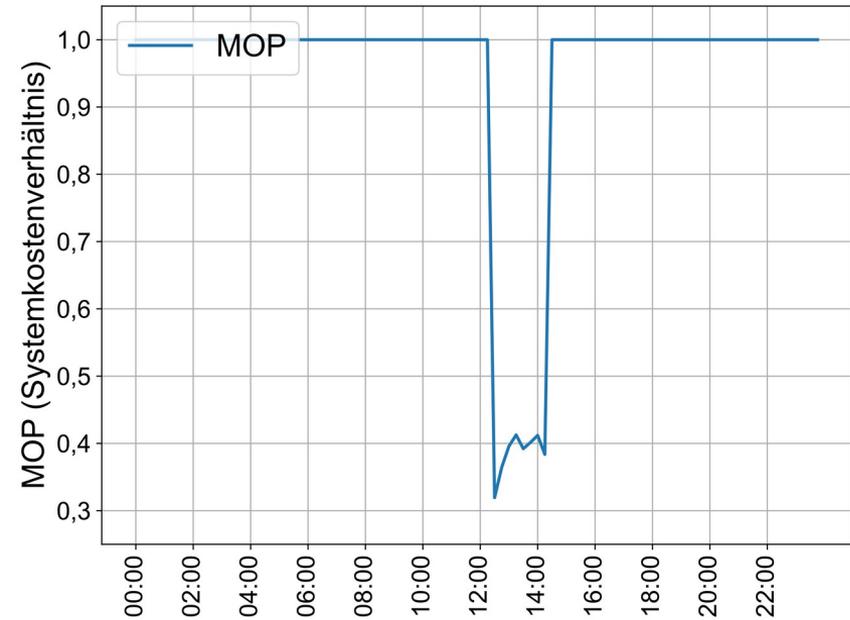
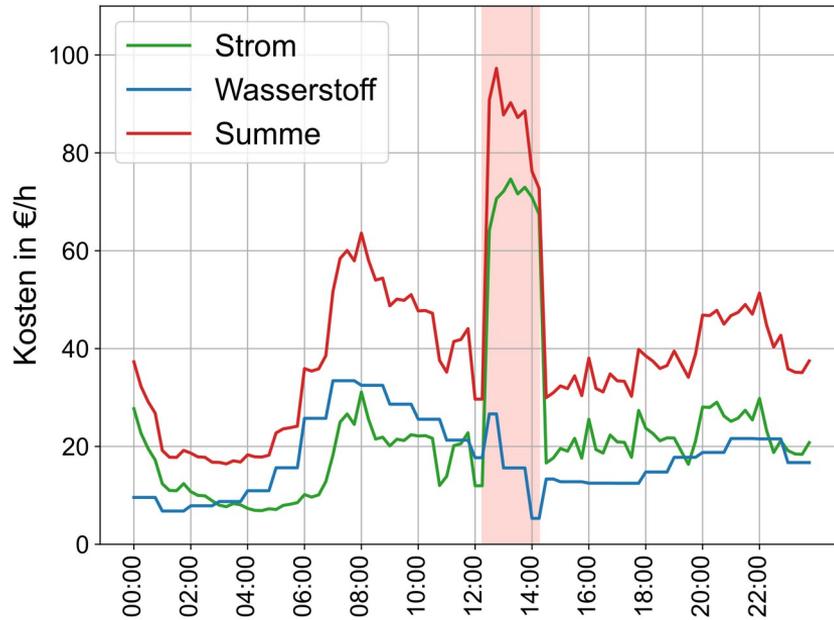
Szenario 2 – Defekt der Regeldruckanlage



Anwendungsbeispiel

Kostenverläufe und Resilienzlinien

Szenario 3 – Ausfall der Regeldruckanlage mit Unterstützung durch PtG



Anwendungsbeispiel

Ergebnisse

Faktoren der Resilienzbewertung	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
	0,5878	0,2961	0,3194
	0,1250	0,1250	0,1250
	3,3788	1,7457	1,82986
	1,0000	1,0000	1,0000
	0,2483	0,0646	0,0731

R: Robustheit RA: Erholungsfähigkeit

RAP_{RP}: Rapidität der regenerativen Phase

RAP_{DP}: Rapidität der disruptiven Phase

TAPL: durchschnittliche Abweichung vom Normalzustand

GR: generelle Resilienz

Fazit und Ausblick

Fazit und Ausblick

Heutige Ergebnisse:

- Sektorengekoppelte Systeme simulierbar
- Resilienz quantifizierbar
 - Fehlerfälle im gleichen System vergleichbar
 - Systeme untereinander vergleichbar

Zukünftige Forschungspunkte:

- Energieflussoptimierung
- Kosten-Nutzen-Verhältnis
- Anwendung auf Energiezellen

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL

➤ Kontakt

Paul-Hendrik Homberg, M. Sc.
Forschungsgruppe Betriebskonzepte und Sektorenkopplung

📍 Bergische Universität Wuppertal
Rainer-Gruenter-Str. 21, 42119 Wuppertal
Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgungstechnik

✉ homberg@uni-
wuppertal.de
☎ +49 202 439 1386



Referenzen

- [1] Umweltbundesamt, „Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren“
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energetraegern-sektoren#entwicklung-des-endenergieverbrauchs-nach-sektoren-und-energetragern> (Stand 01.04.2023)
- [2] D. Lohmeier et al., "Pandapipes: An Open-Source Piping Grid Calculation Package for Multi-Energy Grid Simulations", Sustainability, Band 12, Nr. 23, 2020, DOI: 10.3390/su12239899
- [3] S. Meinecke et al., "SimBench-Dokumentation", 2019,
https://simbench.de/wp-content/uploads/2019/08/simbench_documentation_de.pdf (Aufgerufen 18.10.2023)
- [4] J. Kisse et al., "A GIS-Based planning approach for urban power and natural gas distribution grids with different heat pump scenarios", Energies, Band 13, Nr. 16, 2020, DOI: 10.3390/en13164052
- [5] Statistisches Bundesamt, "Erdgas- und Stromdurchschnittspreise",
https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Preise/Erdgas-Strom-Durchschnittspreise/_inhalt.html (Aufgerufen 18.10.2023)
- [6] C. Kost et al., "Stromgestehungskosten erneuerbare energien", 2021,
<https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/studie-stromgestehungskosten-erneuerbare-energien.html>
(Aufgerufen 18.10.2023)
- [7] Bundesnetzagentur, "Bericht zur Bestimmung des Qualitätselements 2022", Bonn
- [8] G. Gahleitner, "Hydrogen from renewable electricity: An international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications", International Journal of Hydrogen Energy, Band 38, Nr. 5, 2013, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.12.010
- [9] European Network of Transmission System Operators for Gas, "2nd ENTSOG methodology for cost-benefit analysis of gas infrastructure", https://www.entsog.eu/sites/default/files/2019-03/1.%20ADAPTED_2nd%20CBA%20Methodology_Main%20document_EC%20APPROVED.pdf (Aufgerufen 18.10.2023)



BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL