

VORTEILE VON ENSEMBLE-ANALYSEN FÜR ZUKÜNTIGE ENERGIESYSTEME

Ulrich FREY¹, Thomas BREUER², Jan BUSCHMANN³, Karl-Kien CAO³, Shima SASANPOUR³

Abstrakt

Die Analyse von Energieszenarien mit Optimierungsmodellen umfasst meist nur wenige Szenarien und berücksichtigt Unsicherheiten sowie Annahmen nur begrenzt. Wir präsentieren einen Ansatz zur multikriteriellen Bewertung von über 11.000 Szenarien auf einem Höchstleistungsrechner am Beispiel des deutschen Stromsystems, der plausible Zielsysteme unter realen Marktbedingungen liefert. Dabei variieren wir zahlreiche Eingabeparameter und methodische Entscheidungen und bewerten die Szenarien anhand von Indikatoren zur Bezahlbarkeit, Versorgungssicherheit und Nachhaltigkeit. Die größten Effekte entstehen durch die Nutzung mehrerer Wetterjahre. Die Studie betont den hohen Einfluss oft unkritisch getroffener methodischer Entscheidungen.

Einleitung und Stand der Forschung

Szenarioanalysen sind für die Planung zukünftiger Energiesysteme unerlässlich, doch etablierte Modelle sind mit vielen Unsicherheiten behaftet. Diese entstehen durch Annahmen zu Modell-Inputs und methodische Entscheidungen wie die Wahl des Modellierungsansatzes. Aufgrund des hohen Rechenaufwands werden in Studien selten mehrere Unsicherheitsfaktoren gleichzeitig bewertet, sodass deren Bedeutung im Einzelnen und die Zuverlässigkeit der Ergebnisse unklar bleiben.

Dieser Beitrag adressiert diese Herausforderungen durch die Analyse einer großen Anzahl von Szenarien mit variierenden Eingabeparametern auf einem Höchstleistungsrechner. Wir vergleichen die Auswirkungen von fünf methodischen Entscheidungen auf und ermitteln, wie viele Modellläufe für robuste Ergebnisse nötig sind. Dabei koppeln wir ein Energiesystem-Optimierungsmodell (ESOM) mit einem agentenbasierten Modell (ABM) für eine multikriterielle Bewertung von sieben Indikatoren, darunter Systemkosten, Treibhausgasemissionen, mittlere Strompreise, Landnutzung, Wasserverdunstung, benötigte Mineralien- und Metalle und die maximale ungedeckte elektrische Last (s. Abb. 2). Wir zeigen, wie unterschiedliche Modell- und Parameterentscheidungen die Szenarioergebnisse beeinflussen.

Methoden

Wir entwickeln einen vollautomatisierten Open-Source High Performance Computing Workflow (siehe Abbildung 1), bei dem ein ESOM (REMIX) [1] mit einer agentenbasierten Simulation (AMIRIS) [2] gekoppelt wird, um die Auswirkungen methodischer Entscheidungen auf die Ergebnisse statistisch zu bewerten (Python-Skripte). Die Parameterauswahl erfolgt im ersten Schritt, dem Szenariogenerator.

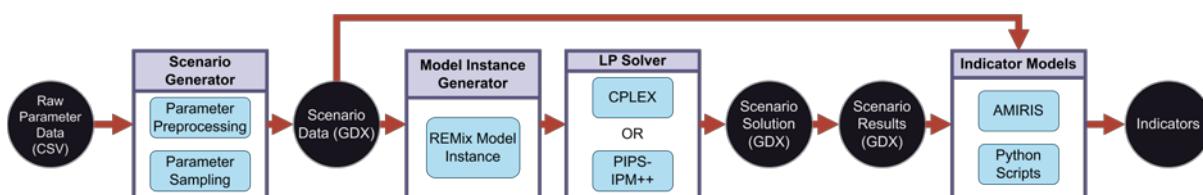


Abb. 1: Arbeitsablauf gekoppelter Modelle auf einem Hochleistungsrechner

¹ Institut für Umweltsystemwissenschaften, Universität Graz, Merangasse 18, 8010 Graz, ulrich.frey@uni-graz.at, <https://ess.uni-graz.at/de/>

² Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich Supercomputing Centre, Wilhelm-Johnen-Straße 52428 Jülich, Deutschland, t.breuer@fz-juelich.de, <https://www.fz-juelich.de/de>

³ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für vernetzte Energiesysteme, Curiestraße 4, 70563 Stuttgart, Deutschland, Karl-Kien.Cao@dlr.de, Shima.Sasanpour@dlr.de, jan.buschmann@dlr.de, <https://www.dlr.de/de/ve>

Resultate

Wir bewerten die Auswirkungen von fünf methodischen Entscheidungen auf den Szenarioräum: (I.) Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion für die Stichprobenentnahme von Eingabeparametern (abgeschnittene Normalverteilung vs. Gleichverteilung). (II.) Räumliche Auflösung von Stromnetzen (kleine, mittlere, große und sehr große Systeme). (III.) Ansatz zur Kraftwerksausbauplanung (Brownfield vs. Greenfield). (IV.) Anzahl der berücksichtigten historischen Wetterjahre (1 vs. 24). (V.) Anfälligkeit in Bezug auf die dauerhafte Nichtverfügbarkeit von Netzwerknoten (mit und ohne).

Das *erste Ergebnis* ist ein großer Einfluss der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Parameter auf die Technologien-Kapazitäten. Bei einer Normalverteilung werden deutlich weniger Kapazitäten ausgebaut.

Das *zweite Ergebnis* (Abbildung 2) ist der Einfluss der fünf verschiedenen methodischen Ansätze auf die sieben Indikatoren in zukünftigen Energiesysteme. Vor allem eine größere Anzahl von Wetterjahren ergibt statistisch signifikante Unterschiede (t-tests, hier nicht gezeigt) zwischen den Szenarien.

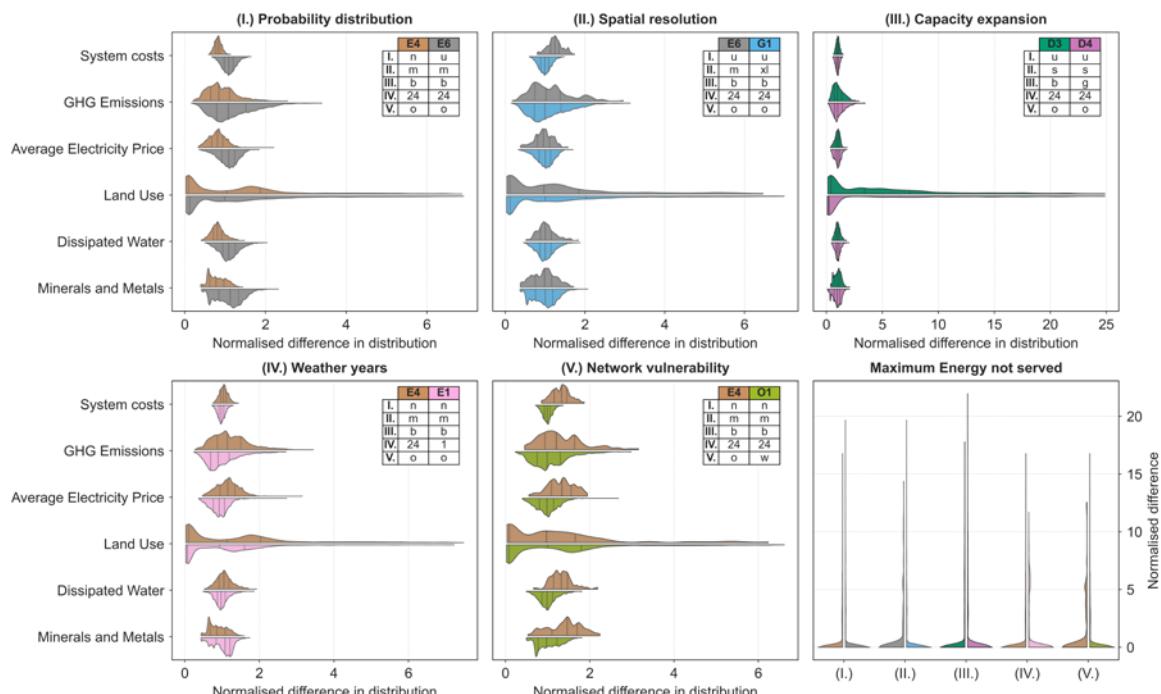


Abb. 2. Vergleich der Methodenwahl anhand der sieben Schlüsselindikatoren. Je ein Sub-Plot pro Methode. Sub-Plot unten rechts zeigt die maximale ungedeckten elektrische Last über alle fünf Methoden.

Ergebnis 3:

Die Szenarien-Ergebnisse zeigen Systeme, die in bis zu vier der sieben Indikatoren „sehr gute“ Werte zeigen. Dies bestätigt bisherige Ergebnisse – es gibt kostenminimale Systeme mit wenig Emissionen, die auch z. B. in der Ressourcennutzung sehr gut abschneiden.

Diskussion und Fazit

Die Ergebnisse zeigen, wie wichtig es ist, große Ensembles von Energieszenarien zu analysieren. So beobachten wir große Abweichungen beim Indikator der maximal ungedeckten elektrischen Last von bis zu 30 % bei kleinen Szenario-Ensembles im Vergleich zu großen. Generell gilt: bereits vermeintlich unkritische Methodenentscheidungen können hier großen Einfluss auf Szenario-Ergebnisse haben.

Referenzen

- [1] Wetzel, M. et al. REMix: A GAMS-based framework for optimizing energy system models. *JOSS* **9**, 6330. 10.21105/joss.06330 (2024).
- [2] Schimeczek, C. et al. AMIRIS: Agent-based Market model for the Investigation of Renewable and Integrated energy Systems. *JOSS* **8**, 5041. 10.21105/joss.05041 (2023).