

ENTWICKLUNGEN IN DER MODELLIERUNG EUROPÄISCHER ENERGIESYSTEME

Maike GNIRß^{1,2,*}, Thomas SCHÖB¹, Jann WEINAND¹, Detlef STOLTEN²

Inhalt

Mit dem Ziel der Klimaneutralität bis 2050 hat sich die Europäische Union ein ehrgeiziges Vorhaben zur Eindämmung des Klimawandels gesetzt. Mit dem europäischen Klimagesetz [1] wurden weitere Ziele beschlossen, darunter eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 55 % bis 2030 und 90 % bis 2040 sowie die Ausarbeitung sektorspezifischer Transformationsstrategien. Die Entwicklung solcher politischer Zielsetzungen sowie die Ausarbeitung von Reduktionsstrategien werden durch Energiesystemmodelle unterstützt [2]. Für explizit sektorspezifische Emissionsreduktionsstrategien sind insbesondere Modelle relevant, die die verschiedenen Sektoren des Energiesystems integriert statt isoliert betrachten, da eine sektorübergreifende Analyse Kosten um bis zu 28 % senken kann [3].

Dies bedeutet, dass sich verschiedene Modelle unterschiedlich gut für politische und wissenschaftliche Fragestellungen eignen könnten. Ein Überblick mit Fokus auf europäische Energiesystemmodelle ist den Autoren jedoch nicht bekannt. Daher untersuchen wir im Folgenden, welche sektorintegrierten europäischen Energiesystemmodelle publiziert wurden, wie sie sich voneinander unterscheiden, und welche Gemeinsamkeiten bestehen.

Methodik

Unser Vergleich umfasst Energiesystemmodelle, die größtenteils die EU-27 abdecken, mehrere Energieträger berücksichtigen, Nachfragesektoren integrieren und technische Elemente wie Kraftwerke und Speicher modellieren. Dazu recherchierten wir zunächst allgemein nach Energiesystemmodellen und deren Frameworks, die technischen Strukturen, Daten und Solver-Schnittstellen bereitstellen. Dieser Prozess folgte den PRISMA-Richtlinien [4]. Anschließend überprüften wir alle gefundenen Modelle und Frameworks auf Modellinstanzen, die unsere vier Kriterien erfüllen.

Wir vergleichen die Modelle im Kontext ihrer Modellarchitektur (bottom-up, hybrid, oder agentenbasiert) und ihrer Methodik (Optimierung, oder partielles Gleichgewicht). Weitere Vergleichskriterien sind die räumliche Abdeckung und Auflösung, der Zeithorizont, die zeitliche Auflösung, die Voraussicht und die Transparenz. Darüber hinaus betrachten wir den Detailgrad der Modellierung der Sektoren Industrie, Transport, Gebäude und Landwirtschaft sowie den Transport der modellierten Energieträger.

Ergebnisse

Bei der Bewertung setzen wir unseren Fokus auf die Charakteristiken der publizierten Energiesystemmodelle und nicht auf die Funktionalitäten, die das zugehörige Framework generell bieten würde. Nach der oben beschriebenen Methodik haben wir die in Tabelle 1 gelisteten europäischen Energiesystemmodelle identifiziert.

Grundsätzlich finden sich bei allen Modellen ähnliche Entwicklungen. Beispielsweise betrachten fast alle Modelle die EU-27, Großbritannien, Norwegen, die Schweiz und die Westbalkan-Länder. Standard sind auch die nationale Auflösung und ein Transformationspfad bis 2050. Als Energieträger werden Elektrizität, Wasserstoff und teilweise Wärme und Methan modelliert. Lediglich Sector-Coupled Euro-Calliope erreicht eine detailliertere räumliche Auflösung auf Ebene der sozioökonomischen Makroregionen (NUTS-1), sowie eine zweistündliche zeitliche Auflösung. Allerdings wird kein Transformationspfad berechnet und nur ein einzelnes Jahr optimiert.

¹ Forschungszentrum Jülich GmbH, Institute of Climate and Energy Systems – Jülicher Systemanalyse (ICE-2), 52425 Jülich, Deutschland; <https://www.fz-juelich.de/de/ice/ice-2>

² RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Brennstoffzellen, Fakultät für Maschinenwesen, 52062 Aachen, Deutschland

* m.gnirss@fz-juelich.de, +49 160 92252891

Deutliche Unterschiede gibt es bei der zeitlichen Auflösung und der Voraussicht. Während JRC-EU-TIMES und TEMOA-Europe mit zwölf bzw. neun verschiedene Zeitscheiben für ein Jahr und perfekter Voraussicht arbeiten, erreichen PyPSA-Eur und Balmorel eine etwa stündliche Auflösung, allerdings in Kombination mit myopischer Voraussicht. Das hybride, agentenbasierte PRIMES findet eine interessante Balance: Der Energiesektor wird mit 120 statistisch bestimmten Zeitscheiben aufgelöst und es werden gleitende Horizonte als Voraussicht angewandt.

Die Modellierung der Sektoren Industrie, Transport und Gebäude variiert. Sie reicht von vereinfachten, aggregierten Energieträgernachfragen bis hin zur detaillierten Abbildung vieler konkurrierender Produktions- und Dienstleistungstechnologien. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Komplexität des Optimierungsproblems einen Kompromiss zwischen Voraussicht und zeitlicher Auflösung erzwingt. Unser Überblick unterstützt bei der Auswahl geeigneter Modelle zur Beantwortung zukünftiger Fragestellungen zur Energiesystemtransformation.

Modell	Framework	Vollständiger Modellname	Referenzen
PRIMES	PRIMES	Price-Induced Market Equilibrium System	[5]
PyPSA-Eur (v0.6.0)	PyPSA	Python Power System Analysis - Europe	[6, 7]
TEMOA-Europe	TEMOA	Tools for Energy Model Optimization and Analysis	[8]
JRC-EU-TIMES	TIMES	Joint Research Centre-EU-The Integrated MARKAL-EFOM System	[9]
Sector-Coupled Euro-Calliope	Calliope		[10, 11]
Balmorel	Balmorel		[12]

Tabelle 1: Europäische Energiesystemmodelle mit Sektorintegration.

Referenzen

- [1] European Commission, "European Climate Law," [Online]. [Accessed: Sep. 12, 2025].
- [2] D. Süsner et al., "Model-based policymaking or policy-based modelling? How energy models and energy policy interact," *Energy Research & Social Science*, vol. 75, p. 101984, May 2021, doi: 10.1016/j.erss.2021.101984.
- [3] T. Brown, D. Schlachtberger, A. Kies, S. Schramm, and M. Greiner, "Synergies of sector coupling and transmission reinforcement in a cost-optimised, highly renewable European energy system," *Energy*, vol. 160, pp. 720–739, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.06.222.
- [4] M. J. Page, et al., "The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews," **BMJ**, vol. 372, p. n71, 2021, doi: 10.1136/bmj.n71.P.
- [5] P. Capros et al., "Energy-system modelling of the EU strategy towards climate-neutrality," *Energy Policy*, vol. 134, p. 110960, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.enpol.2019.110960.
- [6] F. Neumann, E. Zeyen, M. Victoria, and T. Brown, "The potential role of a hydrogen network in Europe," *Joule*, vol. 7, no. 8, pp. 1793–1817, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.joule.2023.06.016.
- [7] M. Victoria, E. Zeyen, and T. Brown, "Speed of technological transformations required in Europe to achieve different climate goals," *Joule*, vol. 6, no. 5, pp. 1066–1086, May 2022, doi: 10.1016/j.joule.2022.04.016.
- [8] D. Lerede, V. Di Cosmo, and L. Savoldi, "TEMOA-europe: An open-source and open-data energy system optimization model for the analysis of the European energy mix," *Energy*, vol. 308, p. 132850, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.132850.
- [9] R. Béres, W. Nijs, A. Boldrini, and M. van den Broek, "Will hydrogen and synthetic fuels energize our future? Their role in Europe's climate-neutral energy system and power system dynamics," *Applied Energy*, vol. 375, p. 124053, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.124053.
- [10] B. Pickering, F. Lombardi, and S. Pfenninger, "Diversity of options to eliminate fossil fuels and reach carbon neutrality across the entire European energy system," *Joule*, vol. 6, no. 6, pp. 1253–1276, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.joule.2022.05.009.
- [11] S. Pfenninger and B. Pickering, "Calliope: a multi-scale energy systems modelling framework," *J. Open Source Softw.*, vol. 3, no. 29, p. 825, Sep. 2018, doi: 10.21105/joss.00825.
- [12] I. Kountouris, R. Bramstoff, T. Madsen, J. Gea-Bermúdez, M. Münster, and D. Keles, "A unified European hydrogen infrastructure planning to support the rapid scale-up of hydrogen production," *Nat. Commun.*, vol. 15, no. 1, p. 5517, Jun. 2024, doi: 10.1038/s41467-024-49867-w