

# CHARAKTERISIERUNG DER KORRELATIONSSTRUKTUREN VON STOCHASTISCHEN ZEITREIHEN FÜR PRÄZISERE ENERGIESYSTEMOPTIMIERUNG UNTER UNSICHERHEIT

Klara MAGGAUER<sup>1,2</sup>, Yannick WERNER<sup>2</sup>, Stefan STRÖMER<sup>1,3</sup>, Sonja WOGRIN<sup>2</sup>

## Inhalt

Eine der größten Forschungslücken in der Energiesystemoptimierung unter Unsicherheit, die in mehreren Studien [1][2][3][4] identifiziert wird, besteht darin, dass statistische Abhängigkeiten in unsicheren Input-Zeitreihen, z.B. in Form von Intervariablenkorrelationen, Lag-Strukturen und Autokorrelation, üblicherweise vernachlässigt werden. Dies führt zu einer fehlerhaften Repräsentation von Unsicherheiten in Energiesystemoptimierungsmodellen (ESOMs) und folglich zu ungenauen Optimierungsergebnissen. In dieser Arbeit wird diese Forschungslücke adressiert, indem ein Framework zur Identifizierung, Charakterisierung und Modellierung von Korrelationsstrukturen in stochastischen Zeitreihen, die typischerweise als Input-Daten für ESOMs dienen, präsentiert wird.

## Methode

In der Energiesystemmodellierung und -optimierung sind überwiegend statistisch abhängige Zeitreihendatensätze relevant. Dies ergibt sich aus vielfältigen Faktoren wie steigenden Anteilen variabler erneuerbarer Energieerzeugung, dem Design europäischer Strommärkte, dem Nachfrageverhalten, regulatorischen Einflüssen sowie wetter- und umweltabhängiger Energieerzeugung. Wenn konsistente historische Datensätze in ausreichender zeitlicher Auflösung als direkte Modell-Inputs vorliegen, sind diese Abhängigkeiten intrinsisch in den Daten enthalten. Für Szenariomodellierung, Projektionen unter veränderten Systembedingungen (z.B. zunehmender Erneuerbarenanteil, veränderte regulatorische Rahmenbedingungen) oder bei unvollständigen historischen Datensätzen ist es jedoch entscheidend, diese Zusammenhänge explizit zu analysieren, quantifizieren und modellieren. Um die vielfältigen Abhängigkeitsstrukturen korrekt abzubilden, werden Methoden zur Modellierung multivariater Zeitreihen benötigt, anstatt einzelne Zeitreihen als unabhängige Inputs zu behandeln.

Als ersten Schritt hin zu einem umfassenden Framework für die Modellierung statistischer Abhängigkeiten demonstriert diese Arbeit eine Charakterisierung der statistischen Abhängigkeiten zwischen der Winderzeugung, den Day-Ahead-Strompreisen und der Stromnachfrage in Österreich. Zunächst wird deren Abhängigkeitsstruktur mithilfe von Kreuzkorrelations- und Autokorrelationsfunktionen [5], rangbasierten Korrelationsmaßen (Spearman/Kendall) für monotone und nichtlineare Zusammenhänge [5], sowie Mutual Information zur Erfassung allgemeiner nichtlinearer Abhängigkeiten [6] identifiziert und charakterisiert. Gemeinsam offenbaren diese Methoden sowohl zeitliche als auch intervariable statistische Zusammenhänge, die bei der Generierung von Input-Szenarien für ESOMs kritisch sind.

Auf Basis dieser Charakterisierung wird anschließend die zeitgleiche Abhängigkeitsstruktur mit einem copulabasierten Ansatz modelliert, wobei die Flexibilität von Gauß- und Student-t-Copulas genutzt wird, um lineare, nichtlineare und tail-abhängige Muster abzubilden [7][8]. Um den Einfluss der Abhängigkeiten isoliert zu untersuchen, wird die Copula mit einfachen Randverteilungs-Modellen kombiniert und es werden Szenarien in zwei Varianten erzeugt: (i) statistisch unabhängige Stichproben und (ii) abhängigkeitserhaltende Stichproben. Dies ermöglicht es, direkt zu quantifizieren, wie die Berücksichtigung empirischer Abhängigkeiten Variabilität, Extremereignisdarstellung und gemeinsame Bewegungsmuster verändert, die für ESOM-Inputs relevant sind.

---

<sup>1</sup> AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Giefinggasse 4, 1210 Wien, +43 664 7858 8129,  
[klara.maggauer@ait.ac.at](mailto:klara.maggauer@ait.ac.at), <https://orcid.org/0000-0002-5994-3201>

<sup>2</sup> TU Graz, Institut für Elektrizitätswirtschaft und Energieinnovation, Inffeldgasse 18, 8010 Graz

<sup>3</sup> Delft University of Technology, Mekelweg 5, 2628 CD Delft, The Netherlands

## **Ergebnisse**

Die Ergebnisse illustrieren die Wichtigkeit der Modellierung statistischer Abhängigkeiten, selbst mit einfachen Methoden, und bieten eine skalierbare Grundlage für zukünftige Arbeiten hin zu höherdimensionalen und dynamischen Abhängigkeitsmodellen.

## **Förderhinweis**

Diese Arbeit wurde teilweise im Rahmen des Projekts transpAIrent.energy umgesetzt, das im Rahmen der Ausschreibung 2023 von "AI for Green" des Bundesministeriums für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) durchgeführt wird. Die Abwicklung erfolgt im Auftrag des BMIMI durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG).

## **Referenzen**

- [1] M. Haugen, H. Farahmand, S. Jaehnert, and S.-E. Fleten, "Representation of uncertainty in market models for operational planning and forecasting in renewable power systems: a review," *Energy Syst*, Jul. 2023, doi: 10.1007/s12667-023-00600-4.
- [2] A. R. Jordehi, "How to deal with uncertainties in electric power systems? A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 96, pp. 145–155, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.07.056.
- [3] K. N. Hasan, R. Preece, and J. V. Milanović, "Existing approaches and trends in uncertainty modelling and probabilistic stability analysis of power systems with renewable generation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 101, pp. 168–180, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2018.10.027.
- [4] L. S. Plaga and V. Bertsch, "Methods for assessing climate uncertainty in energy system models — A systematic literature review," *Applied Energy*, vol. 331, p. 120384, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120384.
- [5] A. Shemyakin and A. Kniazev, *Introduction to Bayesian Estimation and Copula Models of Dependence*. John Wiley & Sons, 2017.
- [6] N. Veyrat-Charvillon and F.-X. Standaert, "Mutual Information Analysis: How, When and Why?," in *Cryptographic Hardware and Embedded Systems - CHES 2009*, C. Clavier and K. Gaj, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer, 2009, pp. 429–443. doi: 10.1007/978-3-642-04138-9\_30.
- [7] A. J. Patton, "A review of copula models for economic time series," *Journal of Multivariate Analysis*, vol. 110, pp. 4–18, Sep. 2012, doi: 10.1016/j.jmva.2012.02.021.
- [8] H. Joe, *Dependence Modeling with Copulas*. CRC Press, 2014.