

Der vorliegende Beitrag wurde beim Deutschen Studienpreis 2022 mit dem 1. Preis in der Sektion Sozialwissenschaften ausgezeichnet. Er beruht auf der 2021 an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen eingereichten Dissertation „Die Versorgungssicherheit mit Elektrizität im Kontext von Liberalisierung und Energiewende“ von Dr. Lars Nolting.

## **Der Strom kommt aus der Steckdose, oder? Einführung von KI-basierter Metamodellierung zur Bewertung der Versorgungssicherheit mit Elektrizität**

Moderne Gesellschaftsstrukturen bauen in fundamentaler Weise auf der ständigen Verfügbarkeit von Elektrizität auf. Aktuelle Ereignisse im internationalen Kontext zeigen eindrucksvoll, welche immensen und zuweilen katastrophalen Auswirkungen die Unterbrechung der Elektrizitätsversorgung für moderne Gesellschaften haben kann: So hat die mehrere Tage währende Unterbrechung der Stromversorgung von mehr als 4,5 Millionen Haushalten in Texas im Februar 2021 und die damit verbundene dauerhafte Unterbrechung der Wärme- und Wasserversorgung zahlreiche Todesopfer gefordert. Die rollierenden Lastabwürfe im Elektrizitätsnetz in Kalifornien im August 2020 mit insgesamt mehr als 32 Millionen Betroffenen verursachten enorme wirtschaftliche Schäden. Infolge von Stromversorgungsunterbrechungen in London und weiteren Teilen Großbritanniens kam im August 2019 der Bahnverkehr großflächig zum Erliegen und das Reisen wurde unmöglich.

Gleichzeitig weisen aktuelle Ereignisse im europäischen Verbundnetz, wie etwa das Auseinanderfallen des europäischen Synchronnetzgebietes am 8. Januar 2021 in zwei separate Nord- und Südnetzgebiete (sogenannter *System Split*) darauf hin, dass sich aktuelle Umbrüche in Energiesystemen bereits auf die Versorgungssicherheit mit Elektrizität auch in Zentraleuropa auswirken können. Dabei haben zwei wesentliche Umbrüche das Energiesystem in Deutschland in den vergangenen Jahren maßgeblich geprägt: zum einen die **Liberalisierung der Strommärkte** und die damit einhergehende Trennung von Erzeugung, Übertragung, Verteilung und Vermarktung von elektrischer Energie (sog. *Unbundling*). Zum anderen die **Energiewende** als noch andauernder Prozess der Abkehr von der Erzeugung elektrischer Energie mittels konventioneller, thermischer Energiewandlungsanlagen hin zur vermehrten Einbindung erneuerbarer Energiequellen in das Energiesystem. Die Liberalisierung des Stromsystems hatte anfangs aufgrund bestehender Überkapazitäten von frei disponierbaren Kraftwerken nur geringe Auswirkungen auf die Versorgungssicherheit. Durch die Überlagerung mit der Energiewende und den damit verbundenen

Reduktionen konventioneller Kraftwerkskapazitäten vermehrt sich allerdings der Druck auf das Versorgungssystem und fundierte Analysen gewinnen zunehmend an Bedeutung.

Verlässliche Aussagen zur zukünftigen Entwicklung des Versorgungssicherheitsniveaus haben dabei eine immense Bedeutung für die **Definition eines angemessenen regulatorischen Rahmens** zur Begleitung der Energiewende. Die Definition von Maßnahmen wie dem Aufbau von sog. Kapazitätsreserven, d.h. nichtmarktlichen Kraftwerkskapazitäten, die zur Deckung von Spitzenlasten vorgehalten werden, erfolgt basierend auf den Ergebnissen von Studien zur erwarteten Entwicklung der Verlässlichkeit des Elektrizitätsversorgungssystems. Da zum Aufbau solcher Reserveleistungen Kraftwerksbetreiber für das Vorhalten von Kraftwerksblöcken unabhängig von ihrem Einsatz vergütet werden, ist die Bestimmung einer angemessenen Menge an vorzuhaltenden Erzeugungskapazitäten von enormer wirtschaftlicher Relevanz: Während eine Überdimensionierung der Reserven mit potenziellen Kosten für Stromverbraucher und Steuerzahler in Milliardenhöhe verbunden ist, birgt die Unterdimensionierung solcher Maßnahmen die Gefahr, dass das Niveau der Versorgungssicherheit absinkt. Neben der Definition regulatorischer Markteingriffe ist eine adäquate Bewertung der Versorgungssicherheit mit Elektrizität auch für die **Gestaltung von marktlichen Anreizen zur Sicherstellung der Stromversorgung** von hoher Relevanz. Fundierte Untersuchungen zur Auswirkung der Gestaltung einer Engpassbepreisung zu Zeiten höchster Nachfrage, zur Schaffung von Anreizen für flexibles Lastverhalten oder zur Einbindung von Stromspeichern sowie einer wasserstoffbasierten Elektrizitätswirtschaft in das Energiesystem werden erst durch die angemessene Bewertung der zukünftigen Entwicklung der Versorgungssicherheit ermöglicht.

Angesichts dieses gesellschaftlich relevanten Bedarfs nach umfassenden Untersuchungen bin ich im Rahmen meiner Promotionsarbeit der folgenden zentralen Forschungsfrage nachgegangen:

*Wie kann die Versorgungssicherheit mit Elektrizität im Kontext von Liberalisierung und Energiewende adäquat modelliert werden?*

Zur Beantwortung dieser Fragestellung wird in der Arbeit zunächst ein Überblick zu den relevantesten technischen und organisatorischen Aspekten der Versorgungssicherheit mit Elektrizität gegeben. Daraufhin wird die Komplexität des Energiesystems aus systemtheoretischer Sicht untersucht. Dabei wird gezeigt, dass Liberalisierung und Energiewende nicht nur den Bedarf nach adäquaten Modellen zur Bewertung der Versorgungssicherheit mit Elektrizität erhöhen, sondern auch die Vielfalt, Konnektivität und Dynamik im Energiesystem steigern. Mithin erhöht sich der Grad

an systemischer Komplexität, wodurch eine ebenfalls zunehmende Modellkomplexität bei gleichbleibendem Detaillierungsgrad der Abbildung in Energiesystemmodellen folgt.

### **Das Komplexitätsdilemma**

Mittels eines umfassenden Vergleichs von (1) wenig komplexen, tabellenbasierten Methoden (sog. deterministischen Kapazitätsbilanzen) sowie (2) hochkomplexen probabilistischen Simulationsmodellen zur Bewertung der Versorgungssicherheit mit Elektrizität führe ich anschließend den Begriff des **Komplexitätsdilemmas** ein: Die Abbildung des zunehmend komplexen Energiesystems zur Beantwortung gesellschaftlich relevanter Fragestellungen im Zusammenhang der Versorgungssicherheit mit Elektrizität erfordert ihrerseits zunehmend komplexe Modelle. Die Genauigkeit dieser komplexen Modelle hängt jedoch wiederum stark von der Qualität der Eingangsdaten ab. Unsicherheiten innerhalb der erforderlichen Datenbasis für komplexe Modelle sind erheblich, insbesondere im Hinblick auf Zukunftsszenarien. Zudem basieren statistische Prognosen künftiger Systemzustände immer auf historischen Daten und sind daher insbesondere in Zeiten rascher Transformationen mit großen Unsicherheiten behaftet. Die Beantwortung relevanter Fragestellungen, die sich auf zukünftige Entwicklungen beziehen, ist daher nur bedingt möglich und es müssen hohe Unsicherheitsbänder bezüglich der Modellergebnisse berücksichtigt werden. Gleichzeitig schränken komplexe Modelle die Anzahl der zu betrachtenden Szenarien und Parametervariationen erheblich ein, sodass umfassende Untersuchungen hinsichtlich des vorliegenden Unsicherheitsbands der Ergebnisse bisher nur begrenzt möglich sind – ein Dilemma.

### **Mittel- und Langfristprognosen für die Versorgungssicherheit in Deutschland**

Zur Validierung dieser Ergebnisse im Rahmen eines konkreten Anwendungsfalls sowie zur Bewertung der zu erwartenden Auswirkungen von Liberalisierung und Energiewende auf die Versorgungssicherheit mit Elektrizität habe ich umfassende Modellierungen der Versorgungssicherheit in Deutschland durchgeführt. Unter Verwendung des **Hochleistungsrechenclusters CLAIR** der RWTH Aachen werte ich Szenarien im *Status quo*, für Mittelfristprognosen in den Untersuchungsjahren 2022, 2023 und 2025 sowie für Langfristprognosen im Untersuchungsjahr 2030 aus.

Die Ergebnisse der Modellierung haben dabei zwei wesentliche Implikationen: Zum einen erweist sich der wenig komplexe, tabellenbasierte Modellierungsansatz

in den Mittelfristprognosen im Vergleich zu den komplexen, stündlich aufgelösten probabilistischen Simulationsmodellen als **potenziell irreführend**. Während die Kapazitätsbilanzen einen Leistungsüberschuss zum Zeitpunkt der Spitzenlaststunde anzeigen, weisen die Ergebnisse der probabilistischen Simulationen darauf hin, dass Lastunterbrechungen in anderen Stunden des Jahres mit erhöhter Wahrscheinlichkeit auftreten. Zum anderen indizieren insbesondere die Ergebnisse aus den Langfristprognosen, dass der Ausstieg aus der Kernenergie- und Kohleverstromung in Deutschland gemeinsam mit den Nachwirkungen der Liberalisierung im aktuellen Marktdesign eine **Abkehr vom historisch gleichsam absoluten Niveau der Versorgungssicherheit** bewirken könnte.

In den Analysen wird zudem ein besonderer Fokus auf die Auswirkungen einer potenziell unsicheren Datenbasis auf die jeweiligen Modellergebnisse gesetzt. Es werden ausführliche **Sensitivitätsanalysen** unter Variation von unsicheren Parametern hinsichtlich der Entwicklung der elektrischen Last, des Flexibilitätspotentials sowie der nationalen und europäischen Kapazitätsentwicklungen vorgestellt. Dabei werden große Unsicherheitsbänder der Modellergebnisse insbesondere im Hinblick auf Langfristprognosen für das Untersuchungsjahr 2030 aufgezeigt: Während in optimistischen Parameterkonstellationen die zu erwartende Lastunterbrechungsdauer für dieses Untersuchungsjahr bei ca. 1 h/a liegt, kann sie auf bis zu 250 h/a ansteigen, wenn die Kombination aus den für die Versorgungssicherheit ungünstigsten, im Rahmen meiner Arbeit berücksichtigten, Entwicklungen betrachtet wird.

### **Metamodellierung als potenzieller Ausweg aus dem Komplexitätsdilemma**

Um eine adäquate Modellierung der Versorgungssicherheit mit Elektrizität unter Berücksichtigung des Komplexitätsdilemmas zu ermöglichen, übertrage ich schließlich das Konzept der **Metamodellierung** unter Verwendung einer effizienten statistischen Versuchsplanung, dem *Design of Experiments*. Der Begriff des Metamodells wird unter Verwendung des Präfixes „meta“ aus dem Griechischen abgeleitet. Diese Vorsilbe hat die Bedeutung von „über“ oder „neben“. Somit dienen Metamodelle einer übergeordneten Abstraktion. Ziel der Versuchsplanung wiederum ist es, mit einer begrenzten Anzahl an Versuchsdurchläufen ein Maximum an Informationen über das abgebildete System zu generieren.

Im Rahmen einer Pilotstudie zeige ich, dass Metamodellierung im Sinne einer direkten Abbildung des Zusammenhangs zwischen Modelleingangs- und Modellausgabegrößen unter Verwendung geeignet gewählter Approximationsmethoden (unter anderem künstliche neuronale Netze) in Verbindung mit einer statistischen

Versuchsplanung die Möglichkeit bietet, detaillierte Modelle zur Bewertung der Versorgungssicherheit mit Elektrizität effizient anzunähern und **Laufzeiten zu reduzieren**. Die ursprünglichen Laufzeiten von rund 8,5 h pro Szenariodurchlauf unter Verwendung eines parallelisierten Programmcodes auf dem Hochleistungsrechencluster wurden auf nur etwa 3 min reduziert. Dabei zeigten sowohl lineare Regressionsmodelle (sog. explizite Metamodellierung) als auch künstliche neuronale Netze (sog. implizite Metamodellierung) eine **sehr hohe Prognosegüte** mit einem maximalen absoluten Fehler von 1,4 % in der Vorhersage der Lastüberhangwahrscheinlichkeit.

Die substanzielle Reduktion der Laufzeiten ermöglicht die Untersuchung zahlreicher Parameter- und Szenariovariationen für Mittel- bis Langfristprognosen und somit die **Abdeckung eines deutlich breiteren Prognosespektrums**. Zudem erlaubt die rasche Auswertbarkeit einmal trainierter Metamodelle die kurzfristige **Anpassung der Modellierung an sich dynamisch ändernde Rahmenbedingungen**. Folglich stellt die Metamodellierung komplexer Modelle ein geeignetes Verfahren dar, um gleichzeitig (1) den im Zuge von Liberalisierung und Energiewende gestiegenen Anforderungen an die Modellkomplexität für die Bewertung der Versorgungssicherheit mit Elektrizität sowie (2) den zu berücksichtigenden Unsicherheitsbändern hinsichtlich der Eingangsdaten Rechnung zu tragen.

### **Fazit und Resonanz**

Das Fazit der Arbeit hinsichtlich der Beantwortung der übergeordneten Forschungsfrage lautet demnach wie folgt: Der in Europa generell zu beobachtende und auch regulatorisch geforderte Trend hin zu komplexeren, probabilistischen Modellierungsansätzen für die Bewertung der Versorgungssicherheit stellt sich als prinzipiell angebracht dar und trägt der zunehmenden Komplexität des Energiesystems Rechnung. Allerdings sollten Anwender von detaillierten Modellierungsansätzen nicht dem **Eindruck der Scheingenaugigkeit** erliegen: Die durch die steigende Komplexität des Energiesystems zunehmenden Unsicherheiten und Risiken hinsichtlich der Modelleingangsdaten gehen auch mit substanziellen Unsicherheitsbändern bezüglich der Modellergebnisse einher. Zur adäquaten Modellierung der Versorgungssicherheit mit Elektrizität können daher Metamodelle einen erheblichen Beitrag leisten. Demnach ist eine Abkehr vom reinen Fokus auf einen immer weiter gesteigerten Detailgrad der Abbildung in den verwendeten Modellen hin zu einer angemessenen **Berücksichtigung und Kommunikation von Unsicherheiten und Risiken** notwendig.

Die **besondere Relevanz der Forschungsergebnisse** als Grundlage einer Definition von regulatorischen Maßnahmen zur Wahrung der Sicherheit der

Elektrizitätsversorgung zeigt sich sowohl in der äußerst positiven Resonanz im wissenschaftlichen Kontext als auch im Interesse von Industriepartnern an den Ergebnissen der Arbeit: So wurden Vorarbeiten der Dissertation auf internationalen Fachkonferenzen mit dem *Best Application Paper Award* der 48<sup>th</sup> *Conference on Computers and Industrial Engineering* sowie dem *Best Scientific Presentation Award* der 13<sup>th</sup> *International Conference on Energy Economics and Technology* ausgezeichnet. Die Promotionsarbeit selbst wurde von einer Fachjury aus dem Bereich der Energiewissenschaften (GEE e.V.) mit dem *Preis des Energieforums Berlin für die beste Dissertation* im Jahr 2021 prämiert. Auch die Auszeichnungen der Arbeit durch Industrieunternehmen und -stiftungen wie der *European Energy Exchange AG* und der *Frank Hirschvogel Stiftung* zeigen ihre gesellschaftliche Relevanz an.

Eine **Übertragung der Ergebnisse in die industrielle Praxis** erfolgt im Rahmen eines aktiven Austausches im Praxisbeirat zum durch das BMWK geförderten Forschungsprojekt „Künstliche Intelligenz zur Bewertung der Versorgungssicherheit mit Elektrizität (KIVI)“ unter der Beteiligung der vier deutschen Übertragungsnetzbetreiber sowie der Bundesnetzagentur. Wir planen, auf diesen Kooperationen auch weiterhin aufzubauen und so die adäquate Bewertung der Versorgungssicherheit mit Elektrizität im europäischen Kontext als wesentliche Grundlage zur Gewährleistung eines hinreichenden Maßes an Sicherheit in der Elektrizität zu etablieren.