

Die Versorgungssicherheit mit Elektrizität im Kontext von Liberalisierung und Energiewende

-Dissertation-

Lars Nolting, RWTH Aachen University (Prof. Aaron Praktiknjo)

✉lnolting@eonerc.rwth-aachen.de ☎+49 175 5963838

Zwei wesentliche Umbrüche haben 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 Erzeugungsanlagen 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. Angesichts dieses Bedarfs nach umfassenden Untersuchungen wird im Rahmen dieser Arbeit der folgenden Forschungsfrage nachgegangen:

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

Zur Beantwortung dieser Forschungsfrage wird 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 und ein mathematisches Modell zur Bestimmung eines optimalen Detailgrads der Abbildung dieses komplexen Systems in Modellen definiert. Ergänzend dazu wird gezeigt, dass Liberalisierung und Energiewende nicht nur den Bedarf nach adäquaten Modellen zur Bewertung der Versorgungssicherheit mit Elektrizität erhöhen, sondern auch die Komplexität im Energiesystem erhöhen und mithin die Anforderungen an Energiesystemmodelle steigern.

Basierend auf einem umfassenden Vergleich von (1) **deterministischen Kapazitätsbilanzen** sowie (2) **probabilistischen Simulationsmodellen** zur Bewertung der Versorgungssicherheit mit Elektrizität wird anschließend der Begriff des **Komplexitätsdilemmas** eingeführt: Die Abbildung des komplexen Energiesystems zur Beantwortung anspruchsvoller Forschungsfragen im Zusammenhang der Versorgungssicherheit mit Elektrizität erfordert 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 komplexer Forschungsfragen, 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.

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 erfolgen umfassende Modellierungen der Versorgungssicherheit in Deutschland. Unter Verwendung des Hochleistungsrechenclusters *CLAIX* der RWTH Aachen werden Szenarien im *Status Quo*, für Mittelfristprognosen in den Untersuchungsjahren 2022, 2023 und 2025 sowie für Langfristprognosen im Untersuchungsjahr 2030 ausgewertet. Nachstehende Abbildung 1 veranschaulicht die Eingangsdaten zur Bildung der Rahmenszenarien sowie die verwendeten Modelle.

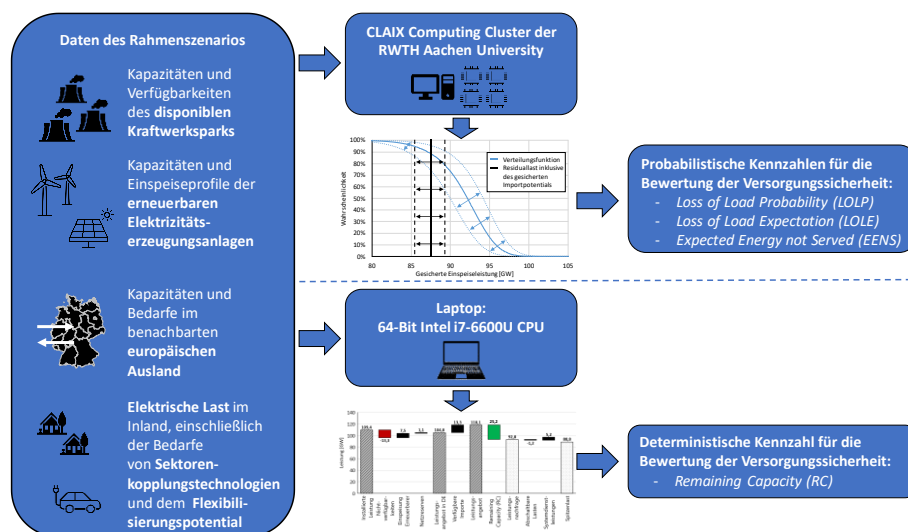


Abbildung 1: Visualisierung der verwendeten Modelle. Oben das probabilistische Simulationsmodell und unten deterministische Kapazitätsbilanzen.

Die Ergebnisse der Modellierung weisen darauf hin, 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. Abbildung 2 fasst wesentliche Modellergebnisse der deterministischen Leistungsbilanzen sowie der probabilistischen Simulationen für die drei Rahmenszenarien des Netzentwicklungsplans (NEP) im Untersuchungsjahr 2030 zusammen. Dabei werden die Kennzahlen *Remaining Capacity* (d.h. die während der Spitzenlaststunde zur Verfügung stehende Überschussleistung bei positivem

Vorzeichen, respektive der während dieser Spitzenlaststunde zu erwartende Leistungsüberhang bei negativem Vorzeichen), *Loss of Load Expectation* (d.h. die zu erwartende Lastunterbrechungsdauer) sowie *Expected Energy not Served* (d.h. die zur erwartende Energiemenge, welche nicht gedeckt werden kann) verwendet und ausgewertet.

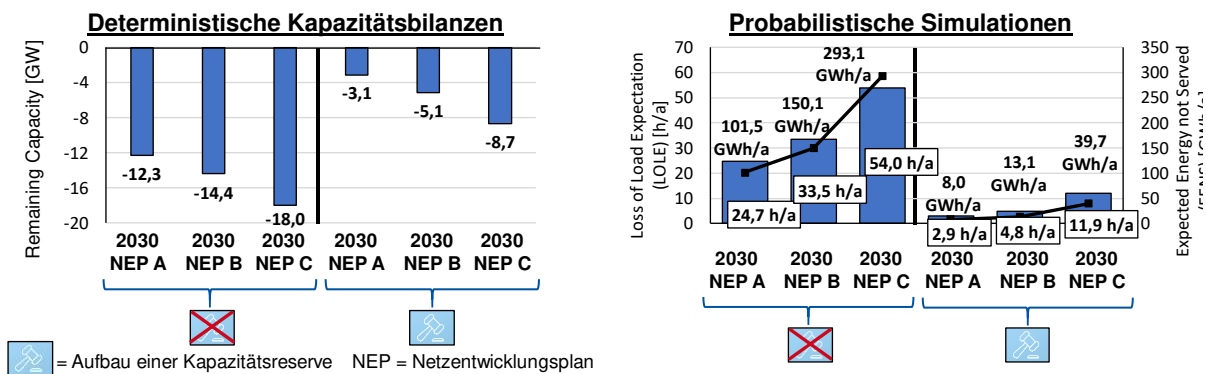
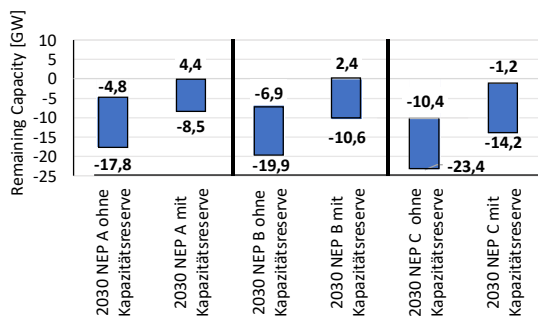


Abbildung 2: Zusammenfassung der Modellergebnisse für das Untersuchungsjahr 2030 basierend auf den in den Rahmenszenarien A,B und C des Netzentwicklungsplans (NEP) hinterlegten Kapazitätsentwicklungen. Dabei werden sowohl die Ergebnisse in Szenarien mit dem Aufbau einer Kapazitätsreserve als auch solche in Szenarien ohne die zusätzliche Schaffung einer nicht-marktlichen Reserve dargestellt.

In den Analysen wird zudem ein besonderer Fokus auf die Auswirkungen einer potentiell 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 durchgeführt. Dabei werden große Unsicherheitsbänder der Modellergebnisse insbesondere im Hinblick auf Langfristprognosen für das Untersuchungsjahr 2030 aufgezeigt: Während in optimistischen Parameterkonstellationen die *Loss of Load Expectation* für dieses Untersuchungsjahr bei ~1 h/a liegt, kann diese auf bis zu ~250 h/a ansteigen, wenn die Kombination aus den für die Versorgungssicherheit ungünstigsten, im Rahmen diese Arbeit berücksichtigten, Entwicklungen betrachtet wird. Hinsichtlich der *Remaining Capacity* ergibt sich ein Vorzeichenwechsel und somit ein Wechsel von einem Systemzustand mit Überschuss an Leistungsangebot während der Spitzenlaststunde hin zu einem Zustand mit einem Leistungsüberhang während dieses Zeitpunktes. Abbildung 3 zeigt die jeweiligen Ergebnisbandbreiten bei einer gemeinsamen Variation der unsicheren Eingangsparameter in *worst case* und *best case* Ausprägungen hinsichtlich der Versorgungssicherheit.

Deterministische Kapazitätsbilanzen



Probabilistische Simulationen

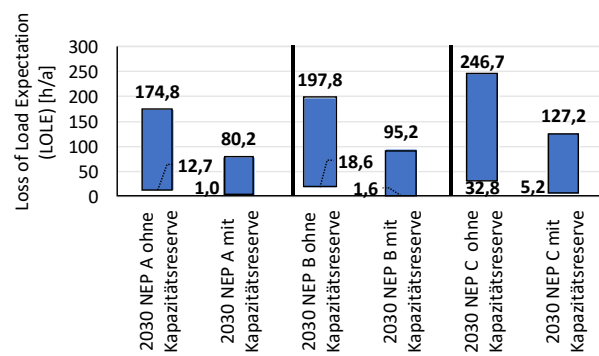


Abbildung 3: Ergebnisbandbreiten der Kreuzsensitivitäten bei einer gemeinsamen Variation aller Parameter zwischen den worst-case und best-case Ausprägungen.

Um eine adäquate Modellierung der Versorgungssicherheit mit Elektrizität unter Berücksichtigung des Komplexitätsdilemmas zu ermöglichen, wird schließlich das Konzept der **Metamodellierung** unter Verwendung einer effizienten statistischen Versuchsplanung, dem *Design of Experiments*, eingeführt. Dabei wird gezeigt, dass Metamodellierung im Sinne einer direkten Abbildung des Zusammenhangs zwischen Modelleingangs- und Modellausgabegrößen unter Verwendung vereinfachter Approximationsmethoden (hier: lineare Regression sowie künstliche neuronale Netze) in Verbindung mit einer geeigneten statistischen Versuchsplanung die Möglichkeit bietet, detaillierte Modelle zur Bewertung der Versorgungssicherheit mit Elektrizität effizient anzunähern und Laufzeiten zu reduzieren. Somit 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.

Das Fazit der Arbeit hinsichtlich der Beantwortung der übergeordneten Forschungsfrage lautet demnach wie folgt: Der in Europa generell zu beobachtende und im Rahmen der *Methodology for the European Resource Adequacy Assessment* (ERAA Methodik) 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 Scheingenauigkeit erliegen: Durch die steigende Komplexität des Energiesystems zunehmende Unsicherheiten und Risiken hinsichtlich der Modelleingangsdaten gehen auch mit substantiellen Unsicherheitsbändern bezüglich der Modellergebnisse einher. Zur adäquaten Modellierung der Versorgungssicherheit mit Elektrizität können daher Metamodelle einen erheblichen Beitrag leisten. Demnach ist für die adäquate Modellierung der Versorgungssicherheit mit Elektrizität 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.