

Der Strom kommt aus der Steckdose, oder?

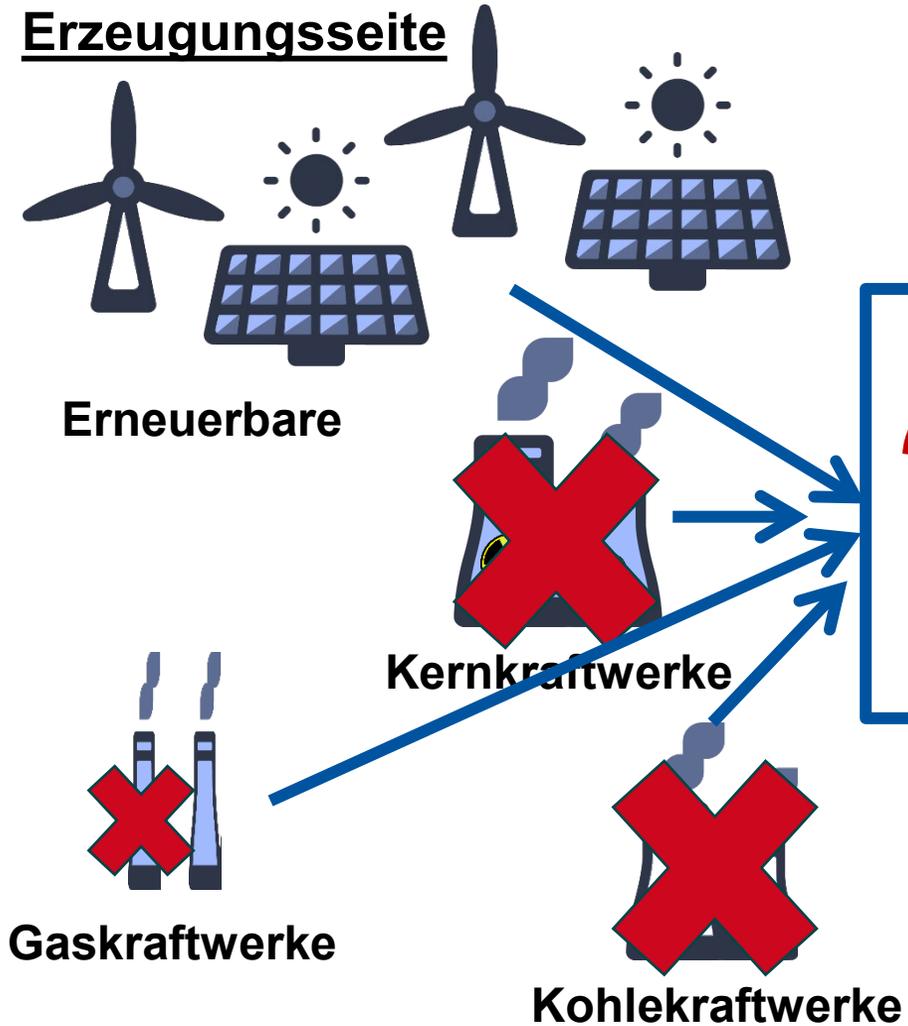
KI-basierte Metamodellierung zur Bewertung der Versorgungssicherheit mit Elektrizität

WiWi-Network
26. Oktober 2022

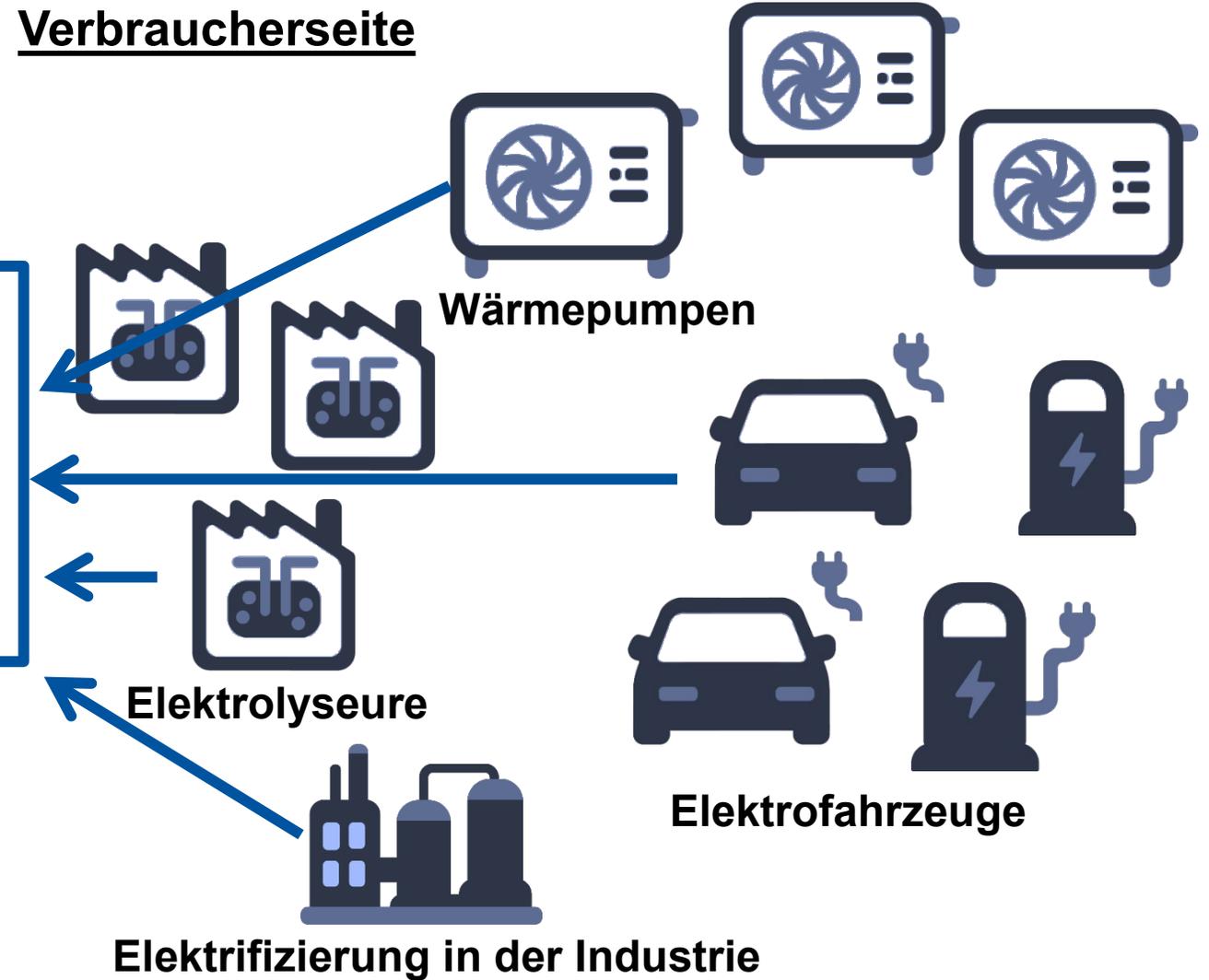
Dr. Lars Nolting

Das Energiesystem in Deutschland befindet sich in einer Transformation

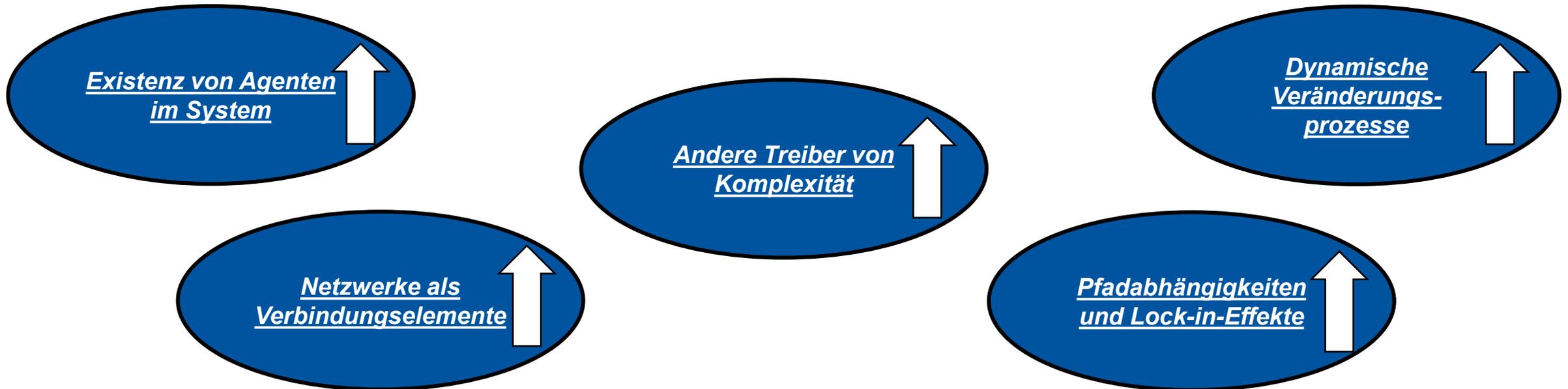
Erzeugungsseite



Verbraucherseite



Gleichzeitig steigt die Komplexität im Energiesystem



Zu den einzelnen Komplexitätstreibern, vgl. Bale *et al.* (2015)

Liberalisierung und Energiewende steigern die **Vielfalt**, **Konnektivität** und **Dynamik** im Energiesystem.

Hinsichtlich der Versorgungssicherheit mit Elektrizität bestehen gesellschaftlich drängende Fragestellungen



Bildquelle: shutterstock.com

Müssen wir die **Kernkraftwerke** in den Streckbetrieb nehmen?

Sollten wir die Laufzeiten der **Kohlekraftwerke** verlängern?

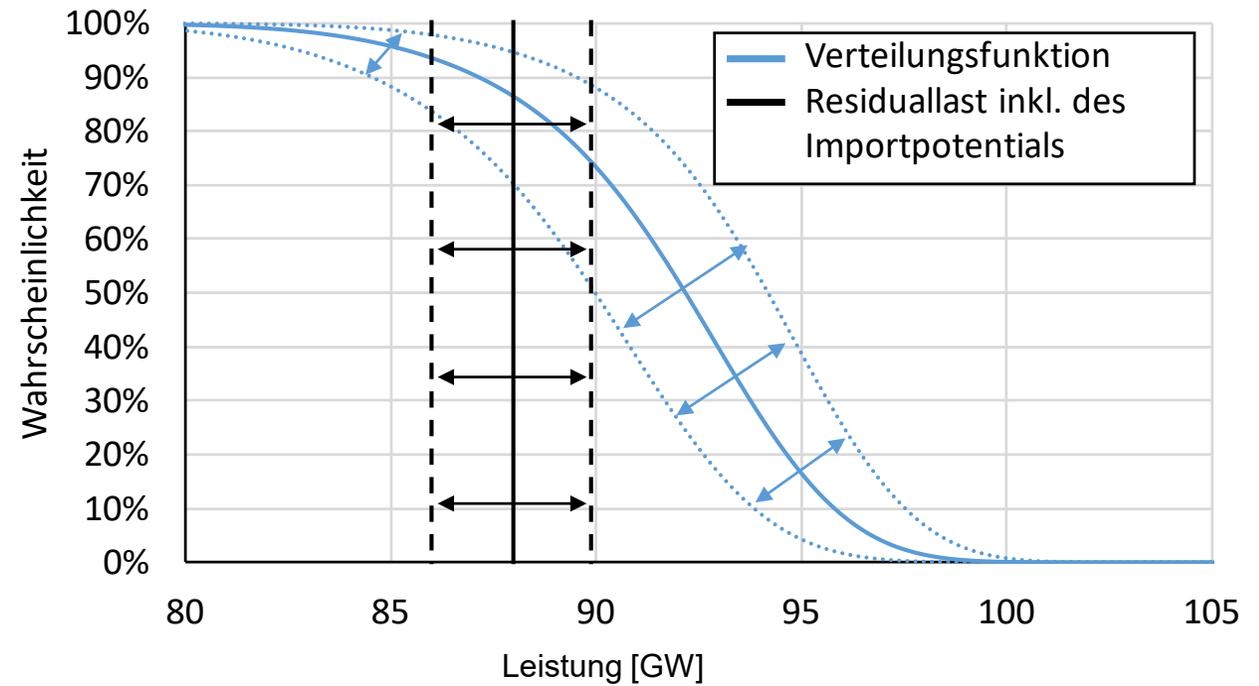
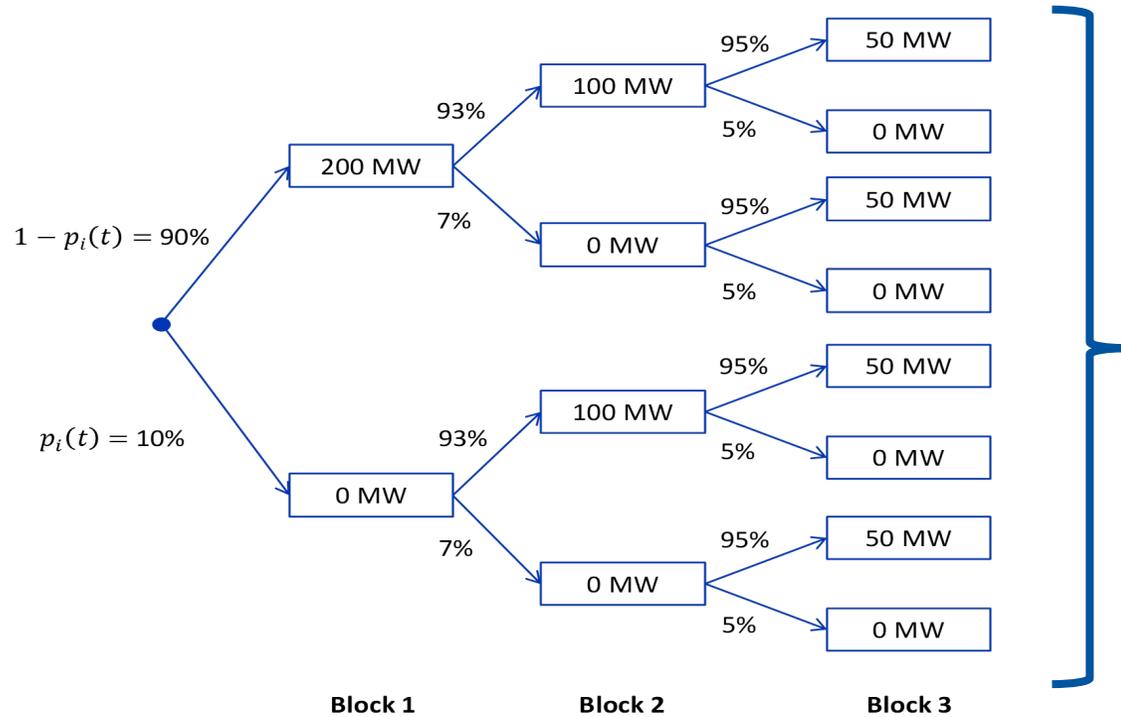
Hilft uns ein langfristig ein **Kapazitätsmarkt**?

Sollten **Strom- und Gaspreise** gedeckelt werden?

(...)

Adäquate Modellierung für seriöse Entscheidungsfindung notwendig

Für die Untersuchung des Energiesystems werden häufig detaillierte probabilistische Simulationsmodelle in stündlicher Auflösung herangezogen



Exponentielles Wachstum der Anzahl möglicher Zustände im System mit Laufzeiten von **einigen Stunden** bis zu **mehreren Wochen** auf **Hochleistungsrechenclustern**

Probabilistische Modelle benötigen eine Vielzahl an Eingangsdaten

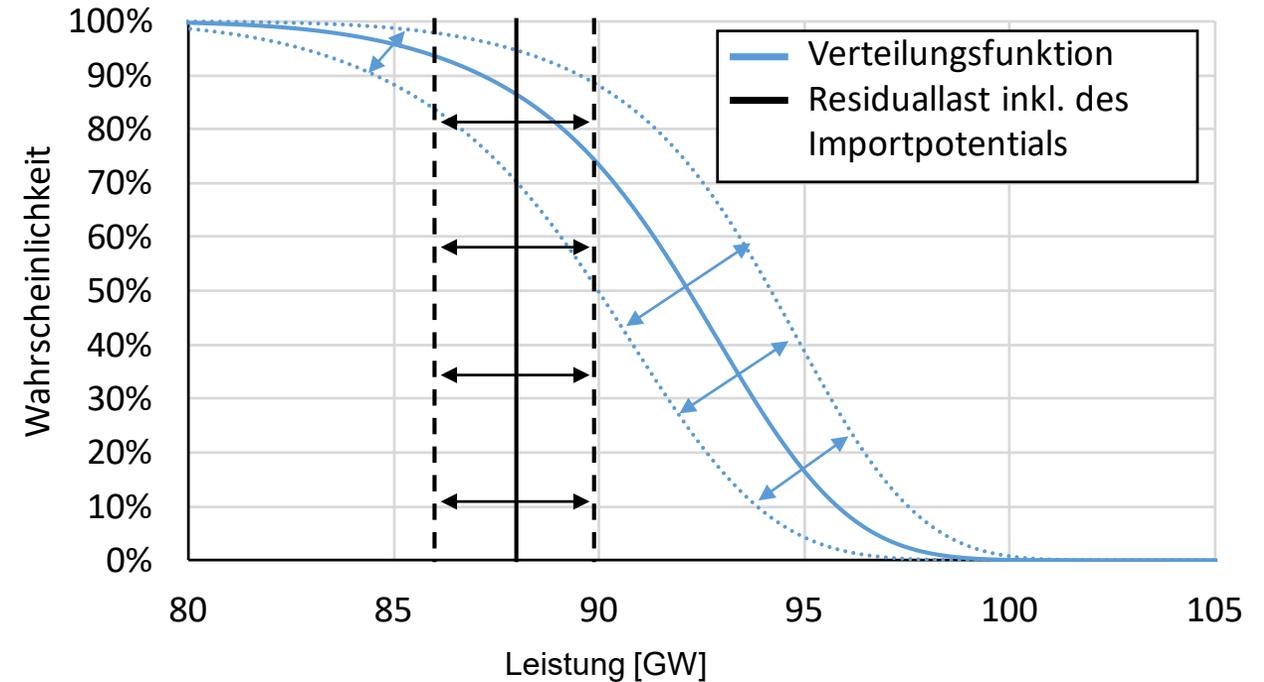
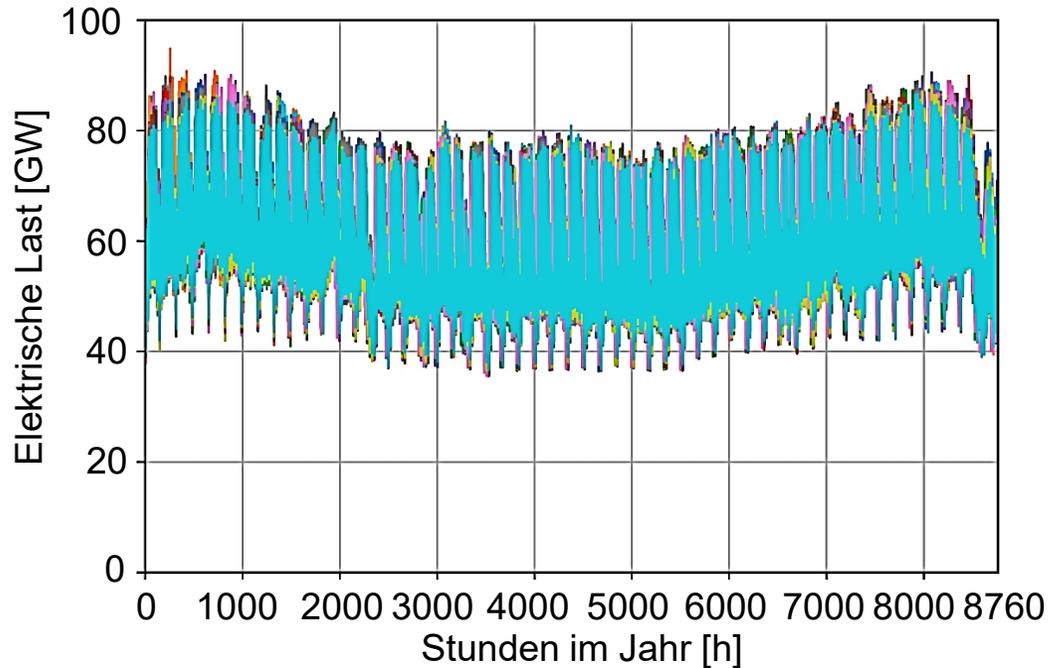
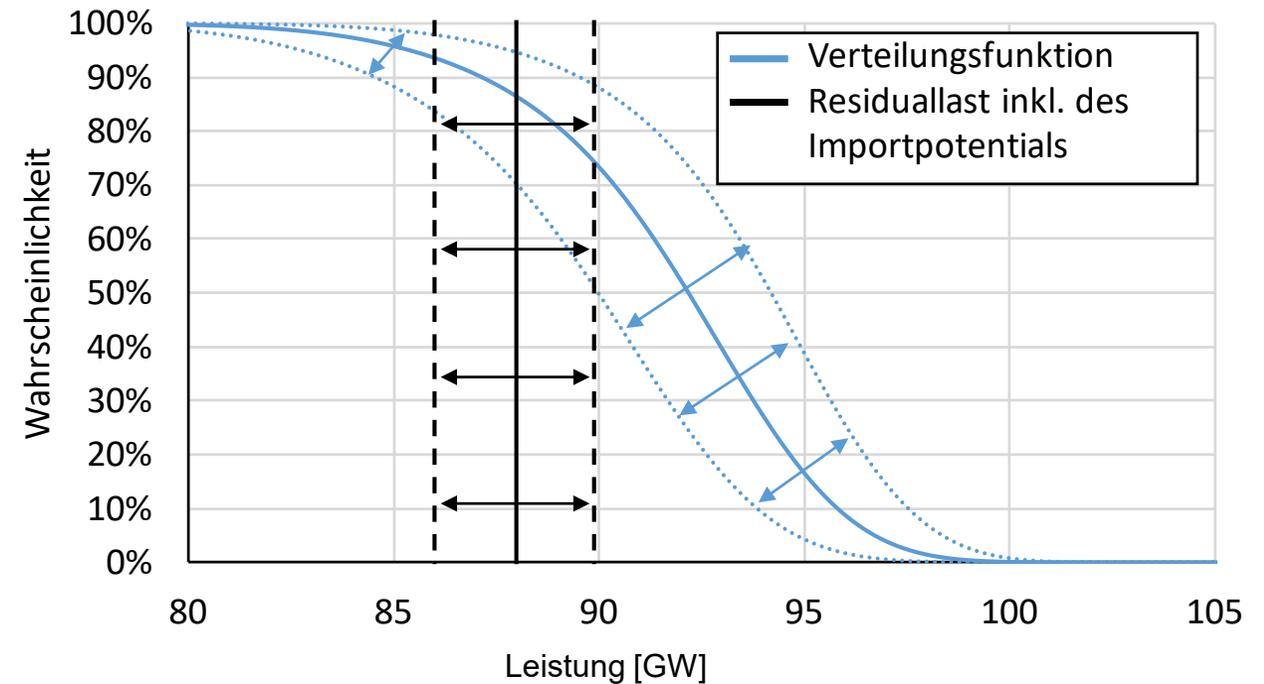
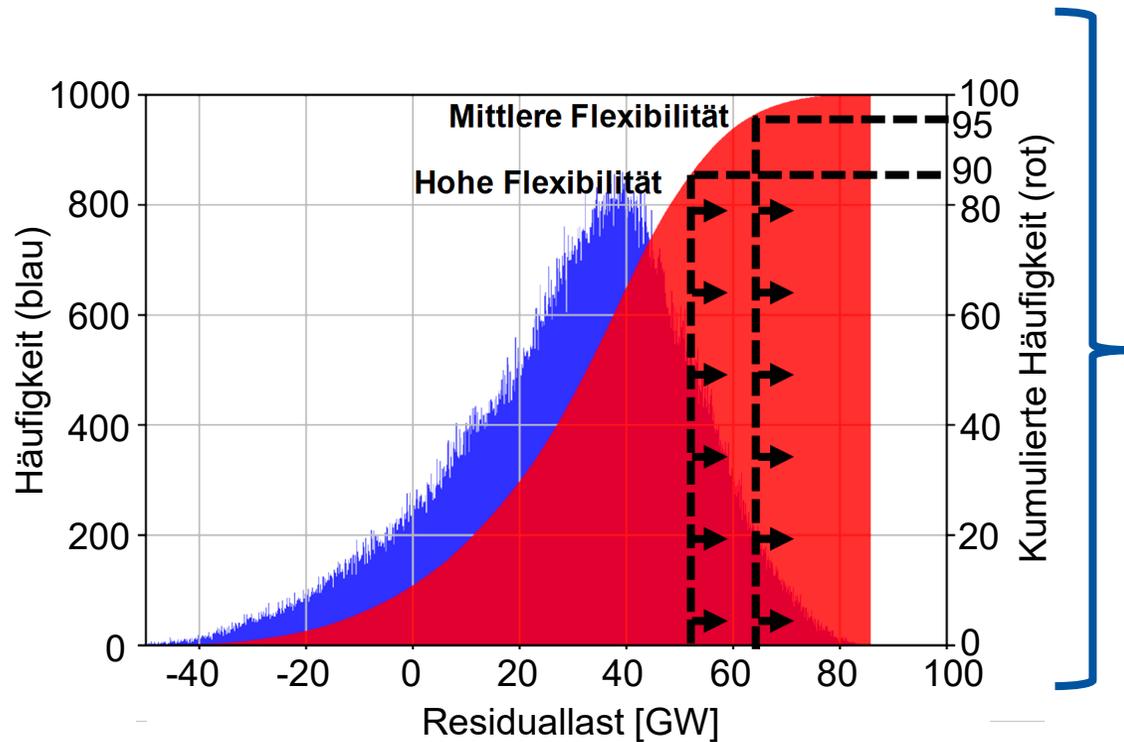


Abbildung der **elektrischen Last** sowie der **Einspeiseleistung der erneuerbaren Erzeugungsanlagen** (Wind, PV und Laufwasser) basierend auf unterschiedlichen **Wetterjahren**

Probabilistische Modelle benötigen eine Vielzahl an Eingangsdaten



Szenariobasierte Abbildung des **Flexibilitätspotentials** von **Sektorenkopplungstechnologien** wie Wärmepumpen und Elektrofahrzeugen

Probabilistische Modelle benötigen eine Vielzahl an Eingangsdaten

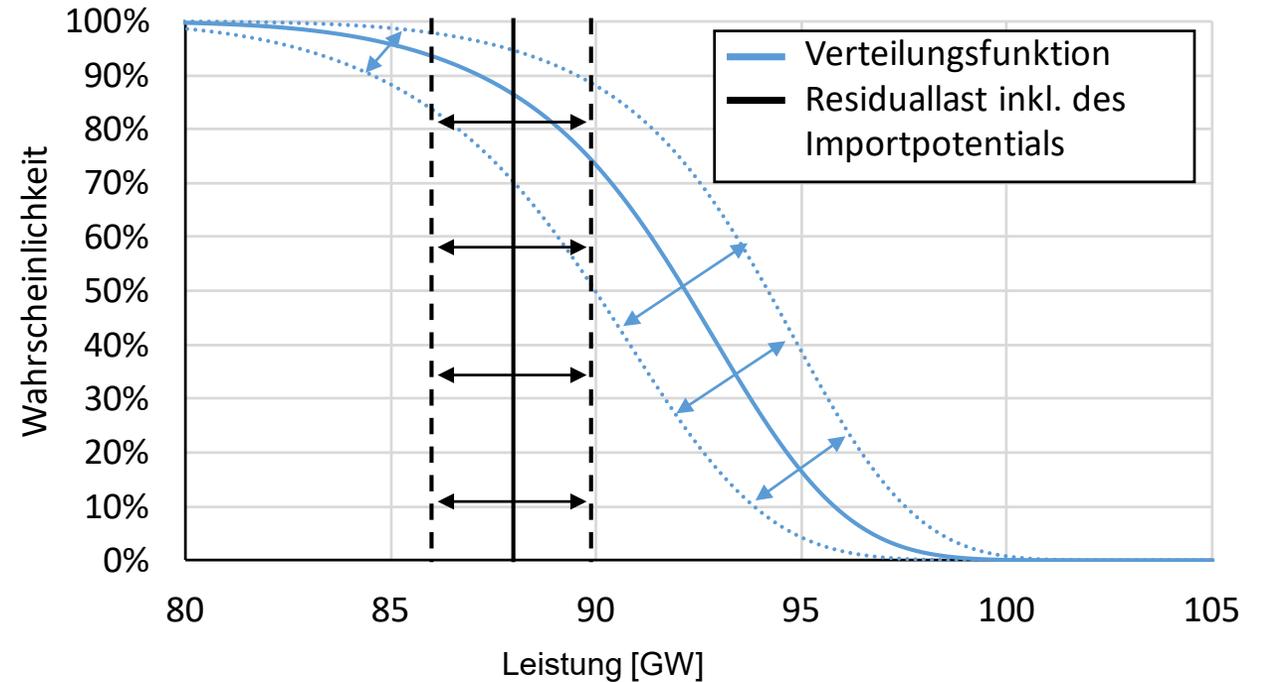
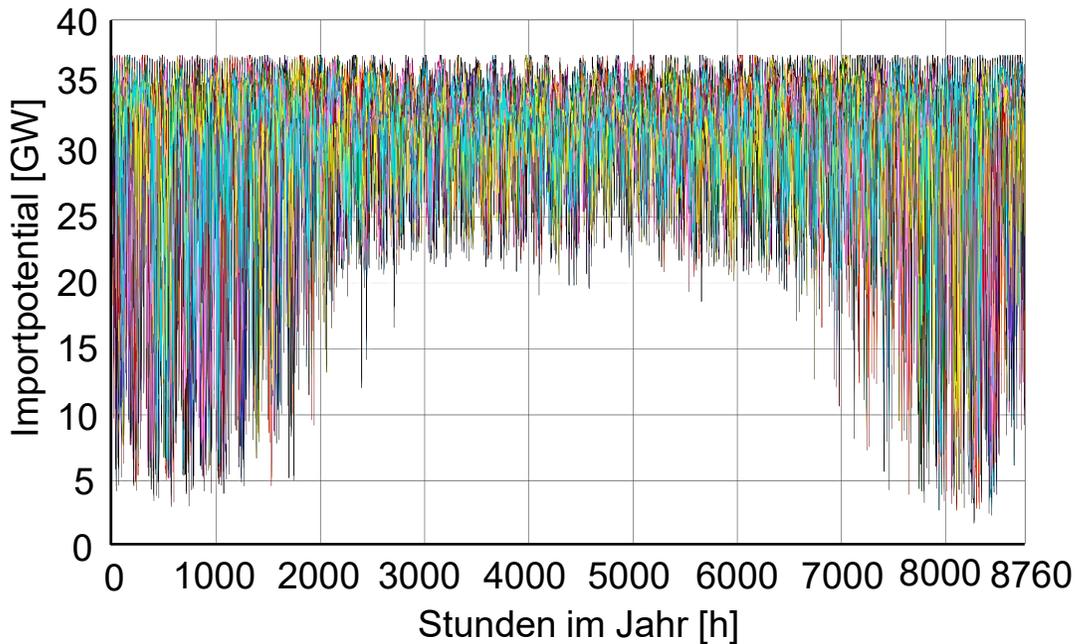
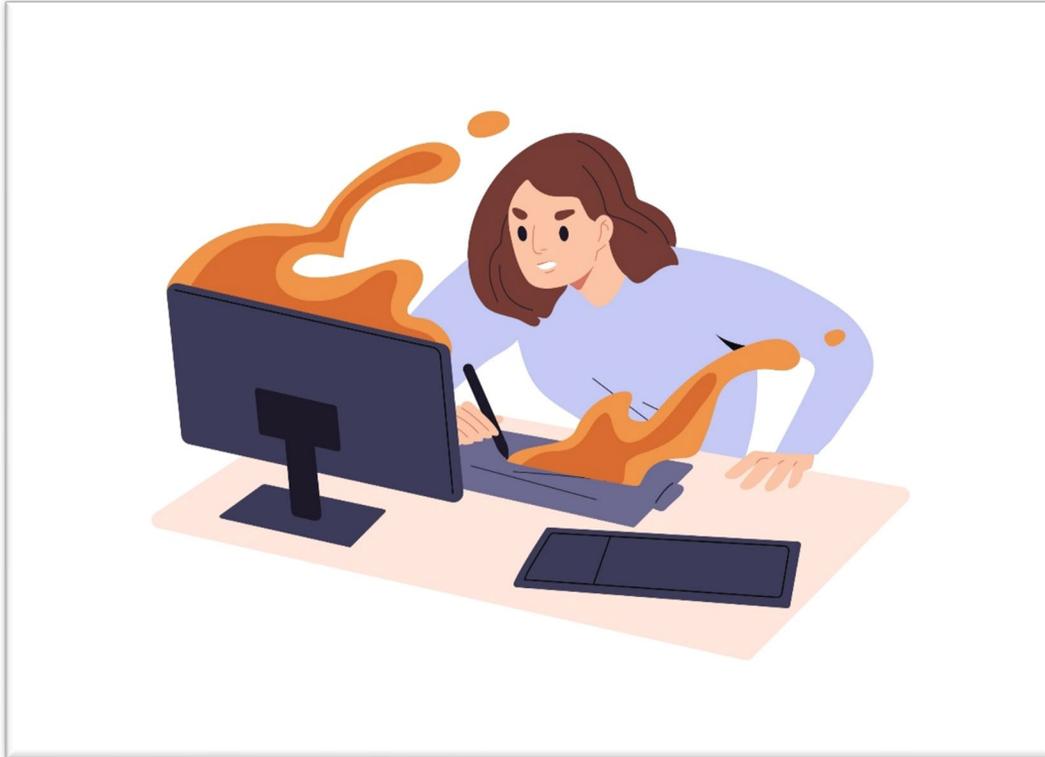


Abbildung des **Importpotentials** aus dem benachbarten europäischen Ausland sowie Berücksichtigung von **internationalen Portfolioeffekten**

Die Komplexität der Modelle verhindert die rasche Beantwortbarkeit relevanter Fragestellungen



Bildquelle: shutterstock.com

Müssen wir die **Kernkraftwerke** in den Streckbetrieb nehmen?

Sollten wir die Laufzeiten der **Kohlekraftwerke** verlängern?

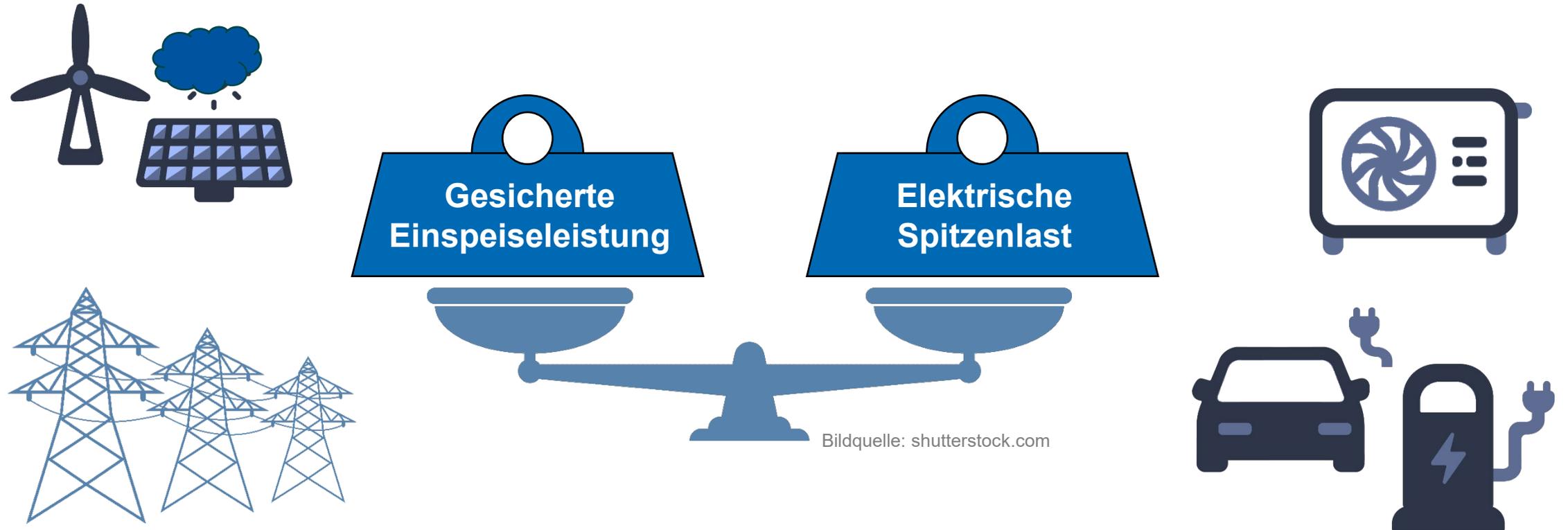
Hilft uns ein langfristig ein **Kapazitätsmarkt**?

Sollten **Strom- und Gaspreise** gedeckelt werden?

(...)

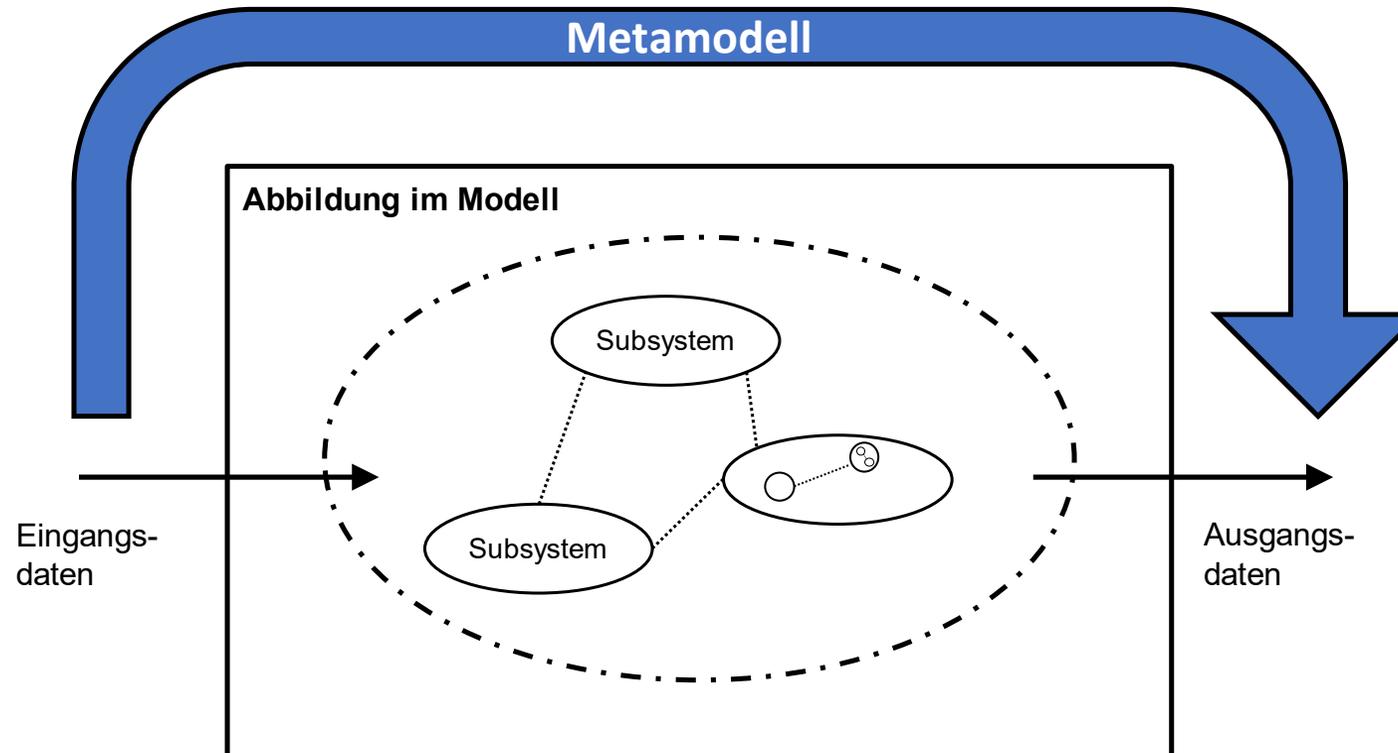
Adäquate Modellierung für seriöse Entscheidungsfindung notwendig

Erste Idee: Drastische Modellvereinfachungen zur Laufzeitreduktion



Komplexitätsdilemma: Detaillierte, mithin komplexe Modelle sind nötig, um das Energiesystem adäquat abbilden zu können, diese haben aber zu hohe Laufzeiten, um sich rasch ändernde Rahmenbedingungen abzubilden.

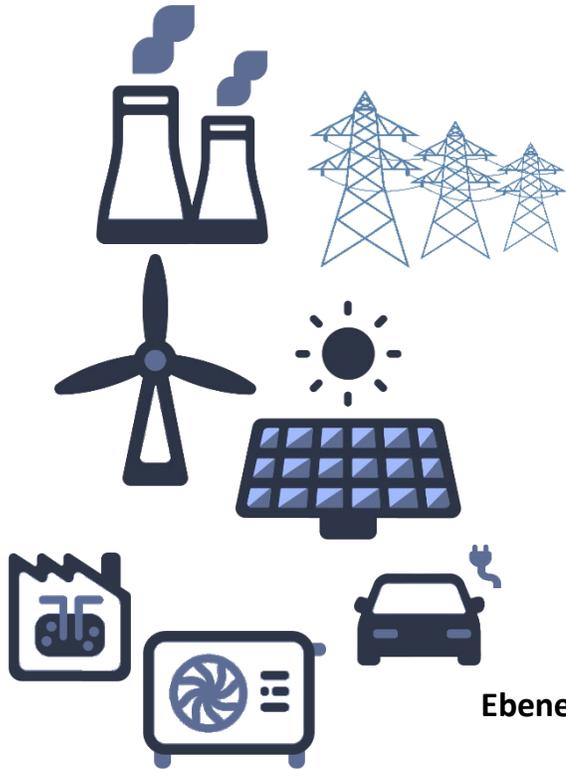
Zweite Idee: Metamodellierung probabilistischer Modelle zur Versorgungssicherheitsbewertung



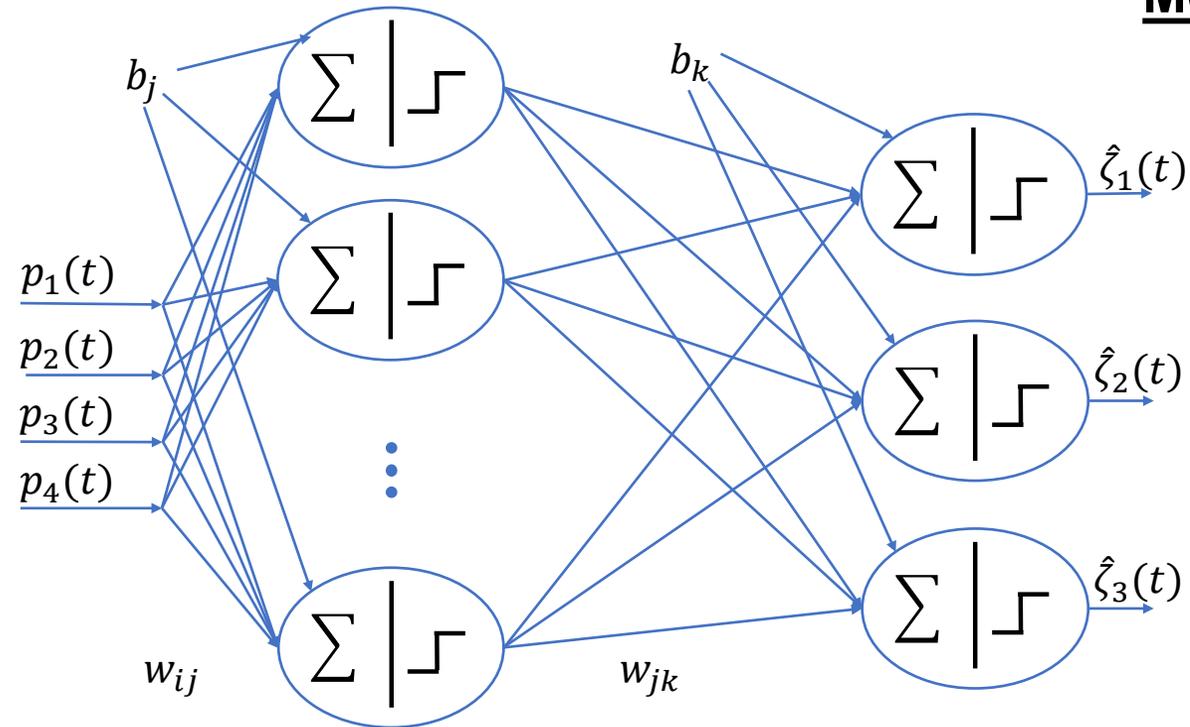
Hypothese: Metamodelle können dazu beitragen, das aufgezeigte **Komplexitätsdilemma** effizient aufzulösen.

Metamodellierung probabilistischer Modelle zur Versorgungssicherheitsbewertung

Modelleingangsgrößen



Ebene der Eingabedaten
(Input Layer)



Verarbeitungsebene
(Hidden Layer)

Ebene der Ausgabedaten
(Output Layer)

Modellausgangsgrößen



Die Metamodellierung erfolgt in zwei Stufen

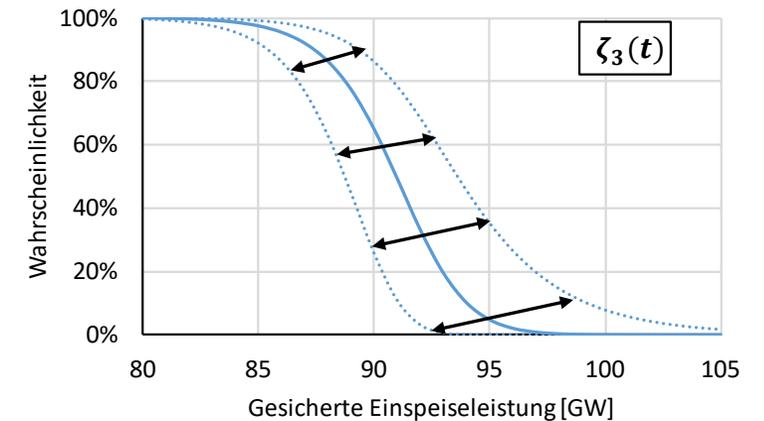
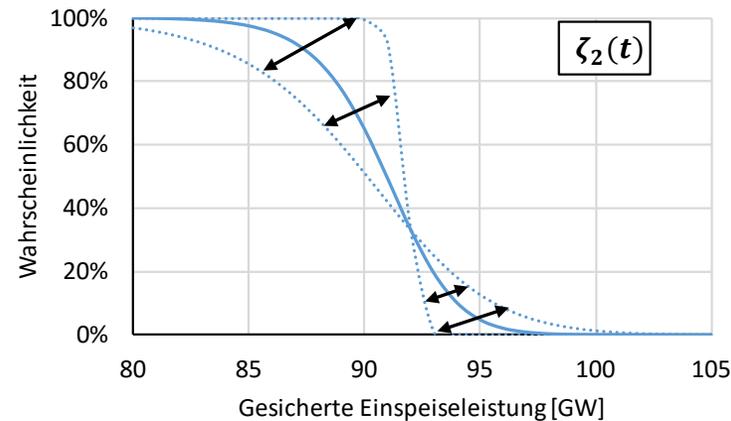
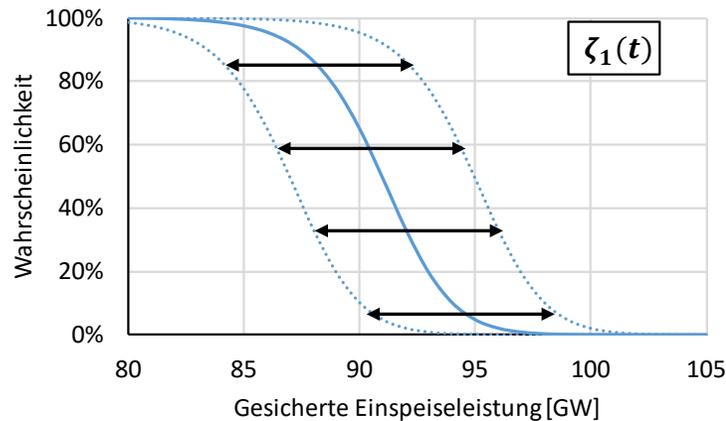
Erste Stufe: Parametrierung der Faltungskurven

$$\widehat{Pr}((P_{\text{installiert}} - P_A) \geq P) = \left(1 + \exp\left(\frac{P - \zeta_1}{\zeta_2}\right) \right)^{-\zeta_3}$$

Mit: $P := \text{Leistung}$

$\widehat{Pr} := \text{Angenäherte Lastdeckungswahrscheinlichkeit}$

$\zeta_k := \text{Kurvenparameter}$



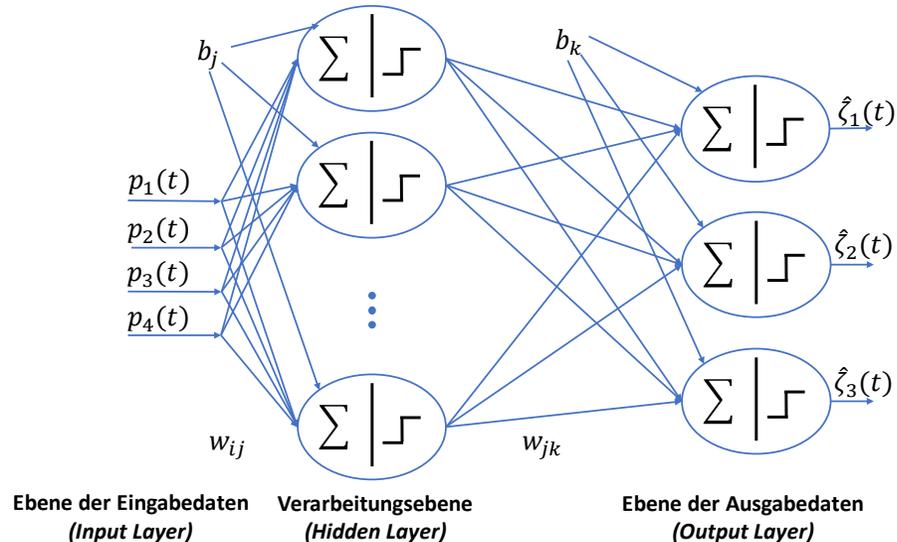
Die Metamodellierung erfolgt in zwei Stufen

Zweite Stufe: Approximation der Kurvenparameter

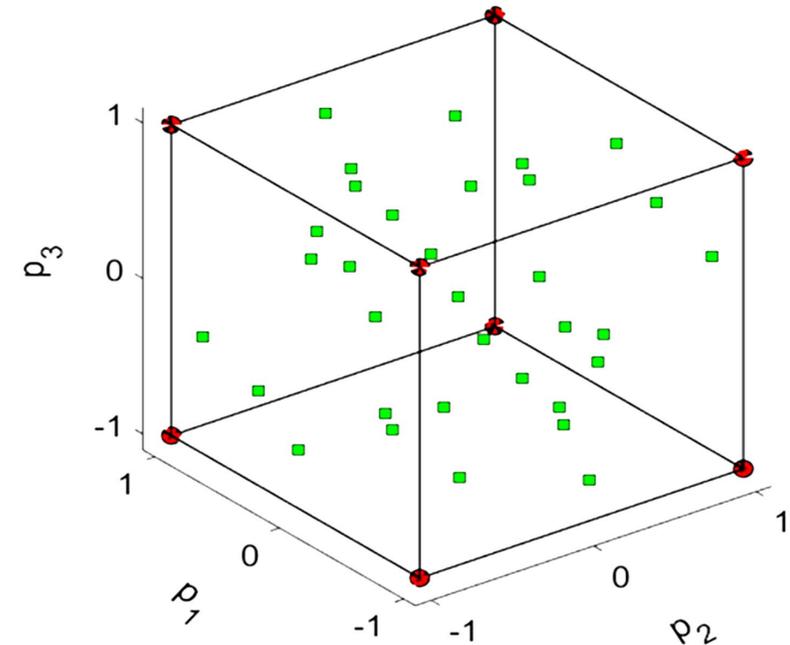
Variante 1: Lineare Regression

$$\hat{\zeta}_k(t) = b_{0,k} + \sum_{i=1}^n (b_{i,k} \cdot p_i(t)) + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (b_{ij,k} \cdot p_i(t) \cdot p_j(t))$$

Variante 2: Künstliches neuronales Netz



Statistische Versuchsplanung*



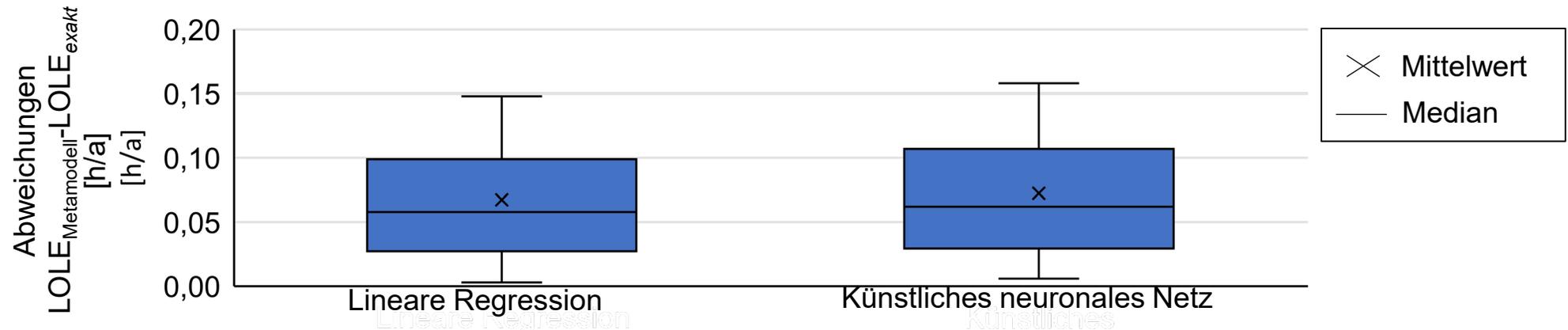
* Vereinfachte Darstellung für den dreidimensionalen Fall, normierte Darstellung der Achsen. Vgl. Nolting *et al.* (2020)

Metamodellierung probabilistischer Modelle zur Versorgungssicherheitsbewertung

Auswertung der Laufzeit- und Speichereinsparungen

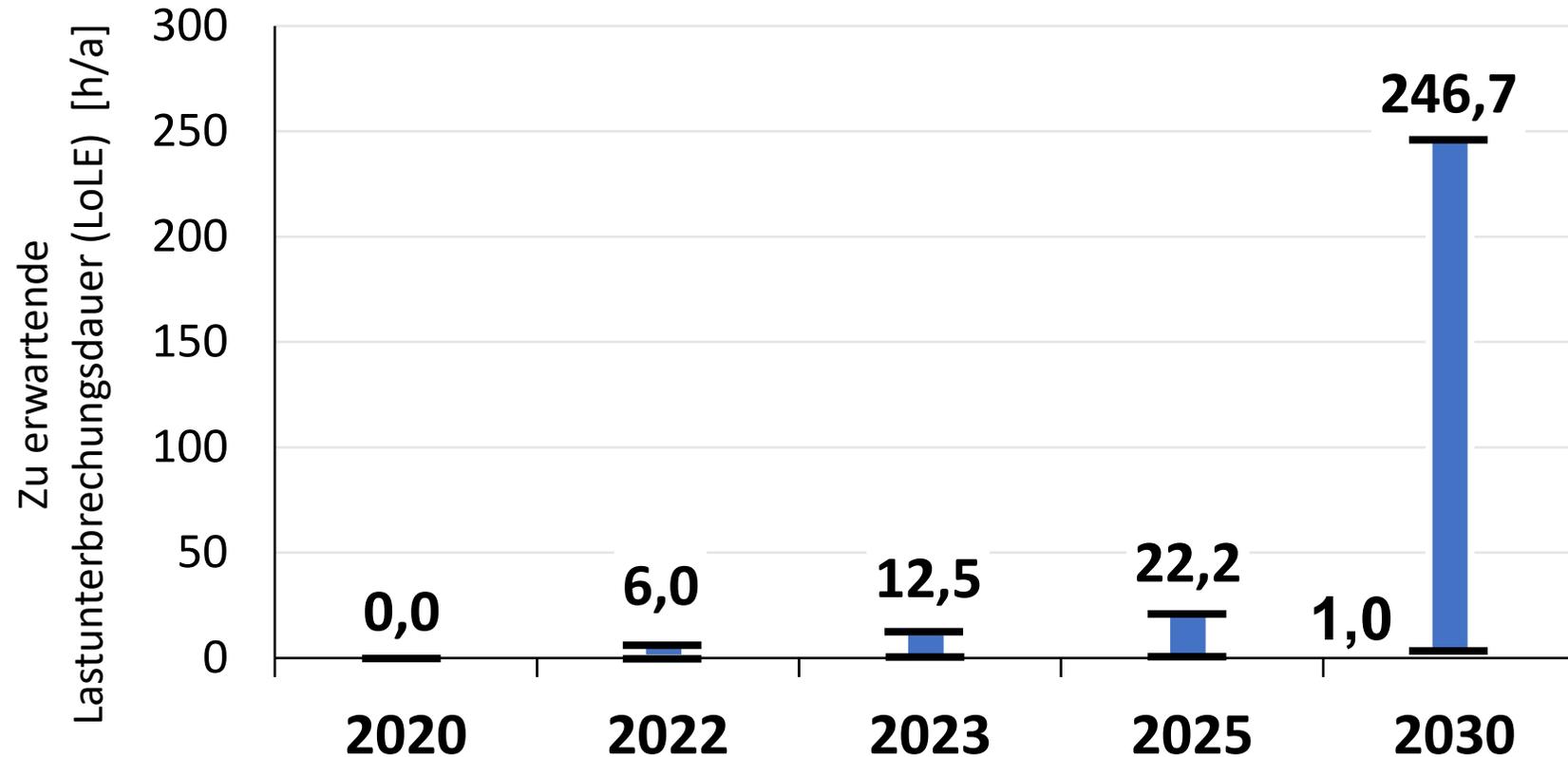
	Laufzeit	RAM Speicherbedarf [MB]
Exakte Modellierung	8,5 h	8.367
Metamodell basierend auf einem linearen Regressionsmodell	1,8 min	1.799
Metamodell basierend auf einem künstlichen neuronalen Netz	3,0 min	2.967

Auswertung der Approximationsgüte im Vergleich zur exakten Modellierung



Beide Metamodelle tragen erheblich zur **Reduktion der Laufzeit** bei und erlauben eine **hohe Genauigkeit** der Approximation.

Bewertung der Versorgungssicherheit mit Elektrizität in Deutschland im europäischen Kontext

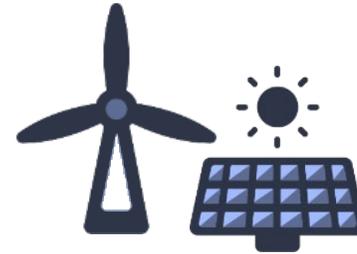


Erhebliches Unsicherheitsband hinsichtlich der Modellergebnisse mit einer Vielzahl von Szenarien **ohne absolutes Maß an Versorgungssicherheit** mit Elektrizität

Wesentliche Parameter für Versorgungssicherheit:



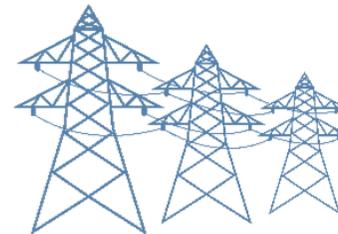
- Flexibilisierung der Nachfrage
- Anreize für **Speicher-** und **Spitzenlastkapazitäten**



- **Zubaugeschwindigkeit** der **Erneuerbaren**



- Vorhaltung von **Kapazitätsreserven**
- Zeitpfade geplanter **Kraftwerksstilllegungen**



- **Rascher Netzausbau**
- **Kapazitätsentwicklungen** im **europäischen Ausland**

Der Strom kommt aus der Steckdose, oder?

- 1) Modellergebnisse zeigen, dass die Versorgungssicherheit im aktuellen **Marktdesign mittel- bis langfristig absinken könnte**
- 2) Dabei sind **erhebliche Unsicherheiten** und eine **hohe Systemkomplexität** zu berücksichtigen
- 3) **Politische Weichenstellungen** beeinflussen die Versorgungssicherheit
- 4) **Metamodellierung** komplexer Modelle kann hier die **fundierte Entscheidungsfindung** ermöglichen

Empfehlung: Berücksichtigung der gesteigerten Anforderungen an die Bewertung von Versorgungssicherheit in den entsprechenden regulatorischen Vorgaben

Ausgewählte Referenzen

- **Bale, C.S., Varga, L., Foxon, T.J., 2015.** Energy and complexity: New ways forward. *Applied Energy*, 138, 150–159. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.057>
- **Brückl, O., 2006.** *Wahrscheinlichkeitstheoretische Bestimmung des Regel- und Reserveleistungsbedarfs in der Elektrizitätswirtschaft*. Dissertation, TU München, Deutschland, 2006.
- **DeCarolis, J., Daly, H., Dodds, P., Keppo, I., Li, F., McDowall, W., Pye, S., Strachan, N., Trutnevyte, E., Usher, W., Winning, M., Yeh, S., Zeyringer, M., 2017.** Formalizing best practice for energy system optimization modelling. *Applied Energy*, 194, 184–198. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.001>
- **ENTSO-E, 2021a.** *Mid-term Adequacy Forecast 2020 (MAF 2020)*. Bericht, Brüssel, Belgien, 2021. Online verfügbar unter: <https://www.entsoe.eu/outlooks/midterm/> [zuletzt abgerufen am 31.07.2021]
- **Lloyd, S., 2001.** Measures of complexity: a nonexhaustive list. *IEEE Control Systems Magazine*, 21(4), 7–8. <https://doi.org/10.1109/MCS.2001.939938>
- **Nolting, L., Praktijnjo, A., 2020.** Can we phase-out all of them? Probabilistic assessments of security of electricity supply for the German case. *Applied Energy*, 263, 114704. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114704>
- **Nolting, L., Spiegel, T., Reich, M., Adam, M., Praktijnjo, A., 2020.** Can Energy System Modeling Benefit from Artificial Neural Networks? Application of Two-Stage Metamodels to Reduce Computation of Security of Supply Assessments. *Computers & Industrial Engineering*, 142, 106334. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106334>
- **Praktijnjo, A., Moser, M., Kockel, C., Nolting, L., Pacco, K., Schmitt, C., 2022.** Wie abhängig ist das europäische Stromsystem von Erdgas?, [Energiewirtschaftliche Tagesfragen](#) 05/2022, 14-19.
- **Stirling, A., 2010.** Keep it complex. *Nature*, 468, 1029–1031. <https://doi.org/10.1038/4681029a>

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Ich freue mich auf die Diskussion.