



Operative Einsatz- und strategische Portfoliooptimierung thermischer Kraftwerke unter dem Einfluss regenerativer Einspeisung



Alexander Franz

Abteilung für BWL und Unternehmensforschung
TU Clausthal

16. Doktorandenworkshop Nordost, Festenburg

Agenda

1 Motivation

2 Promotionsthema

3 Modellierung

4 Ausblick

Agenda

1 Motivation

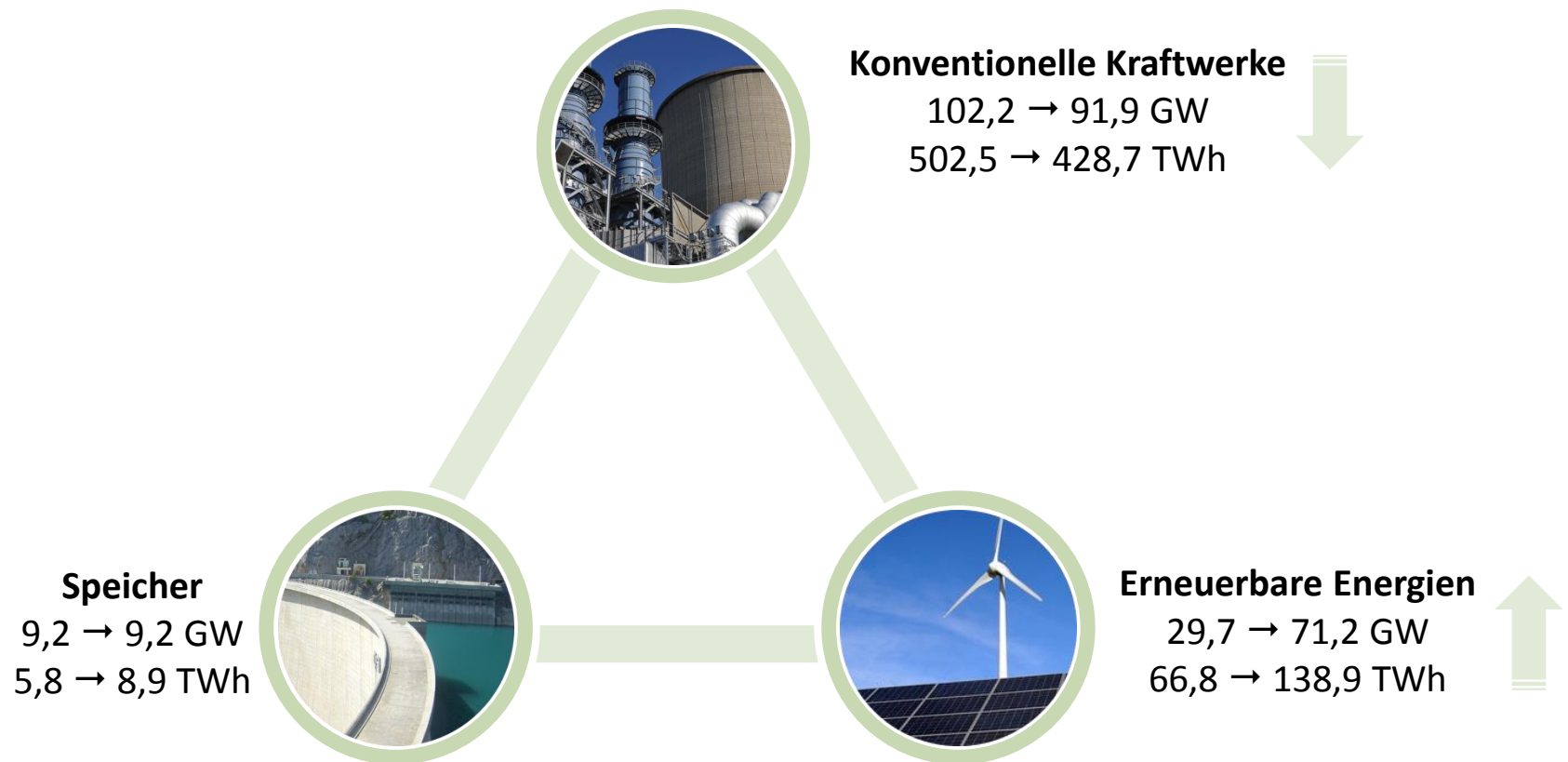
2 Promotionsthema

3 Modellierung

4 Ausblick

Paradigmenwechsel in der Elektrizitätswirtschaft

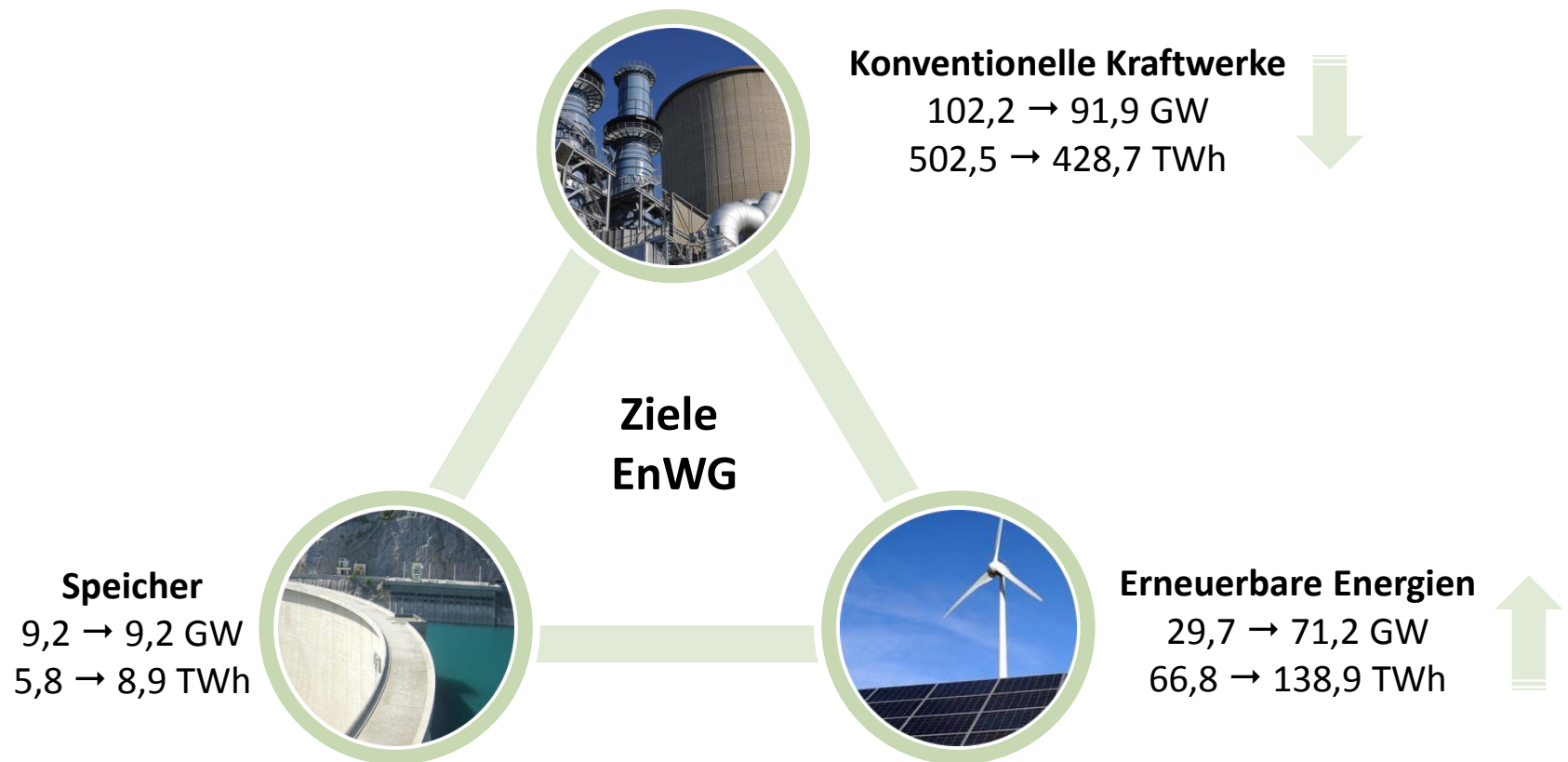
» Erzeugungsangebot im Wandel von 2008 bis 2013



(Datenquelle: Monitoringbericht der BNetzA)

Paradigmenwechsel in der Elektrizitätswirtschaft

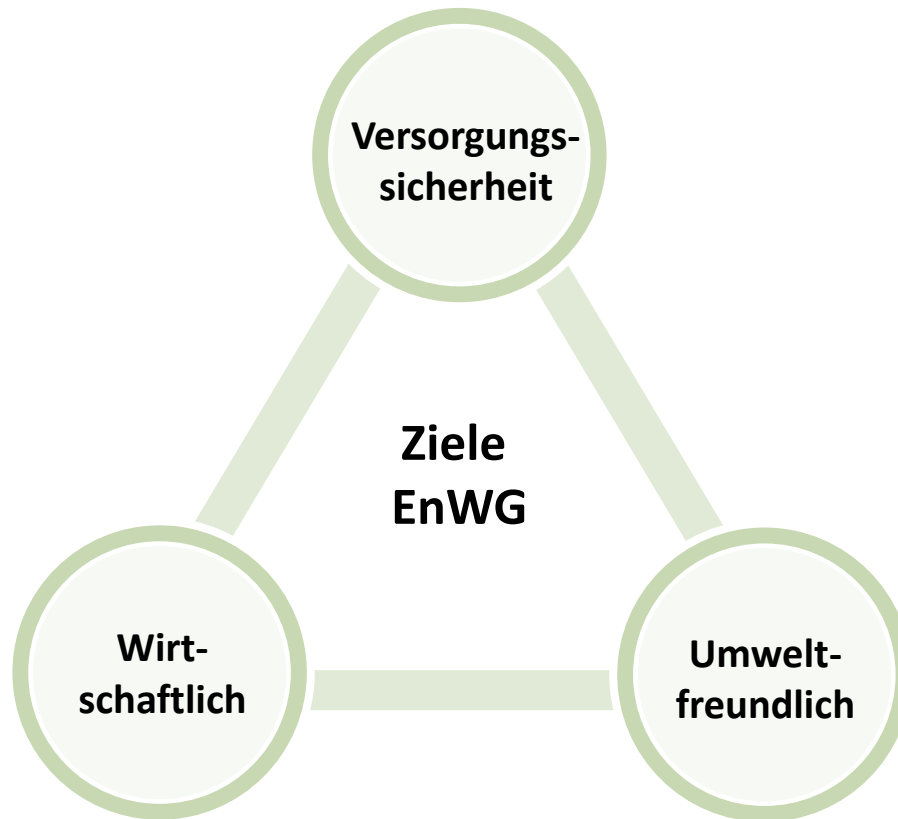
» Erzeugungsangebot im Wandel von 2008 bis 2013



(Datenquelle: Monitoringbericht der BNetzA)

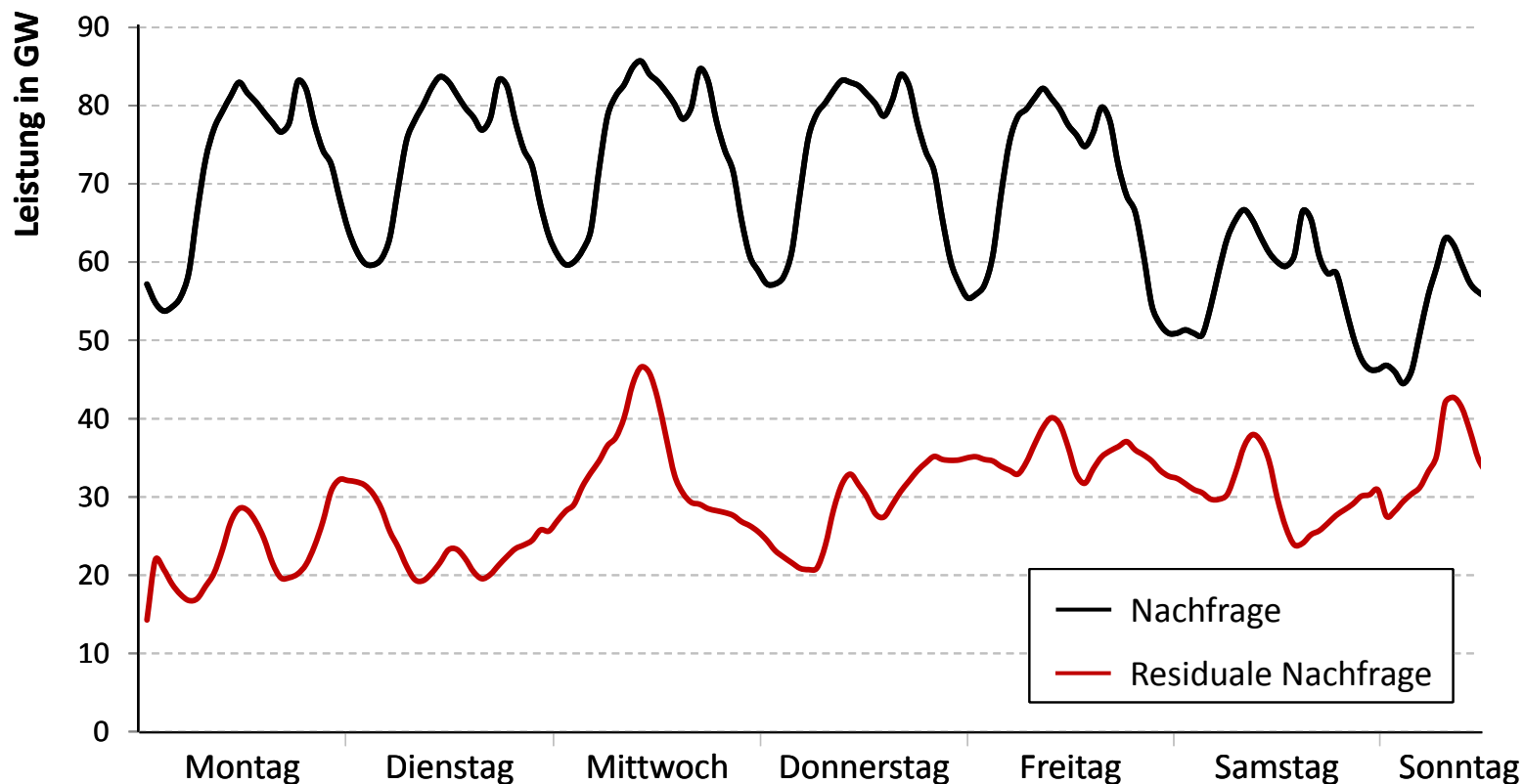
Paradigmenwechsel in der Elektrizitätswirtschaft

» Energiepolitisches Zieldreieck nach dem Energiewirtschaftsgesetz



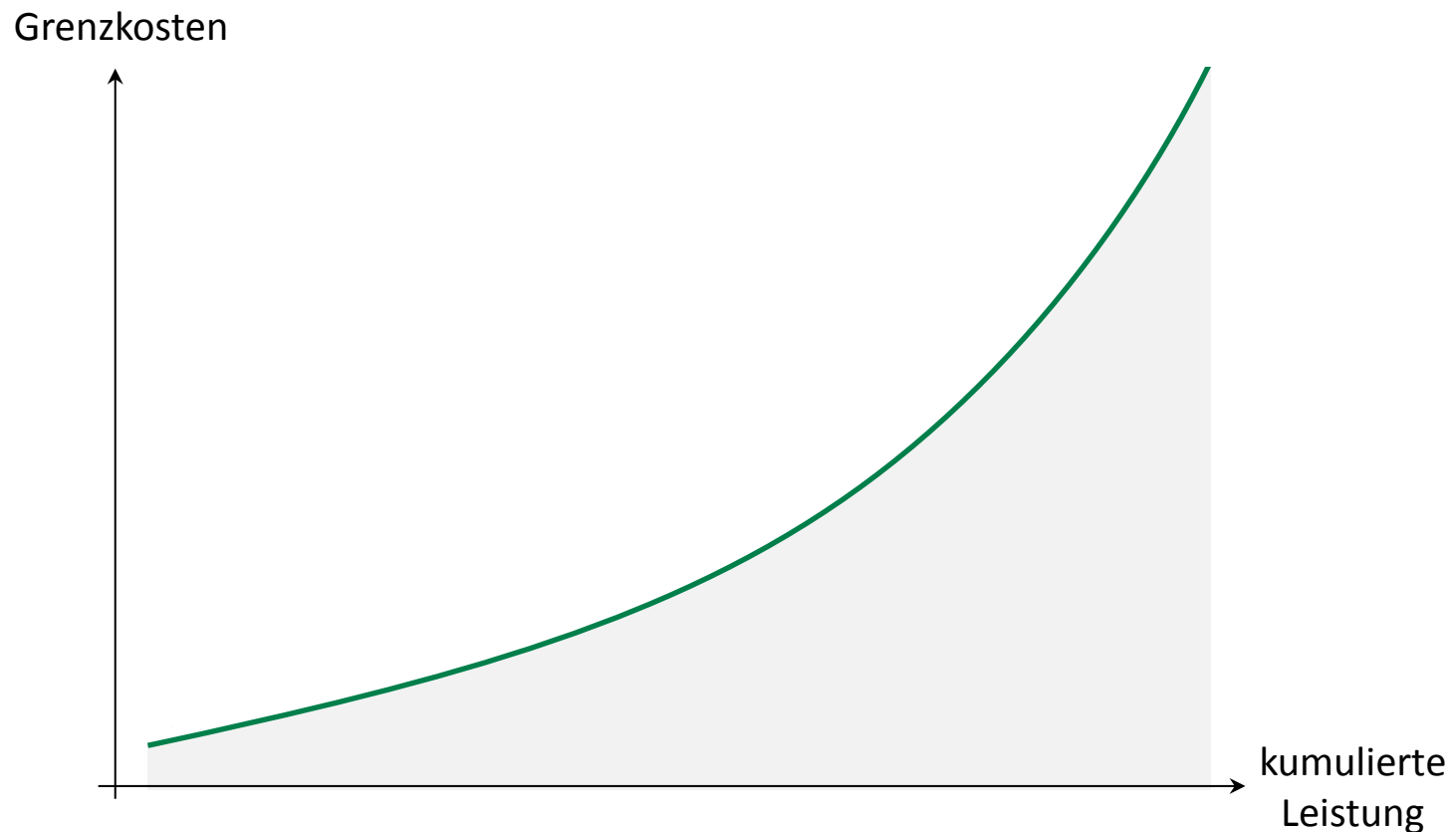
Paradigmenwechsel in der Elektrizitätswirtschaft

» 1. Herausforderung: Planbarkeit und Volatilität in der Energiewirtschaft



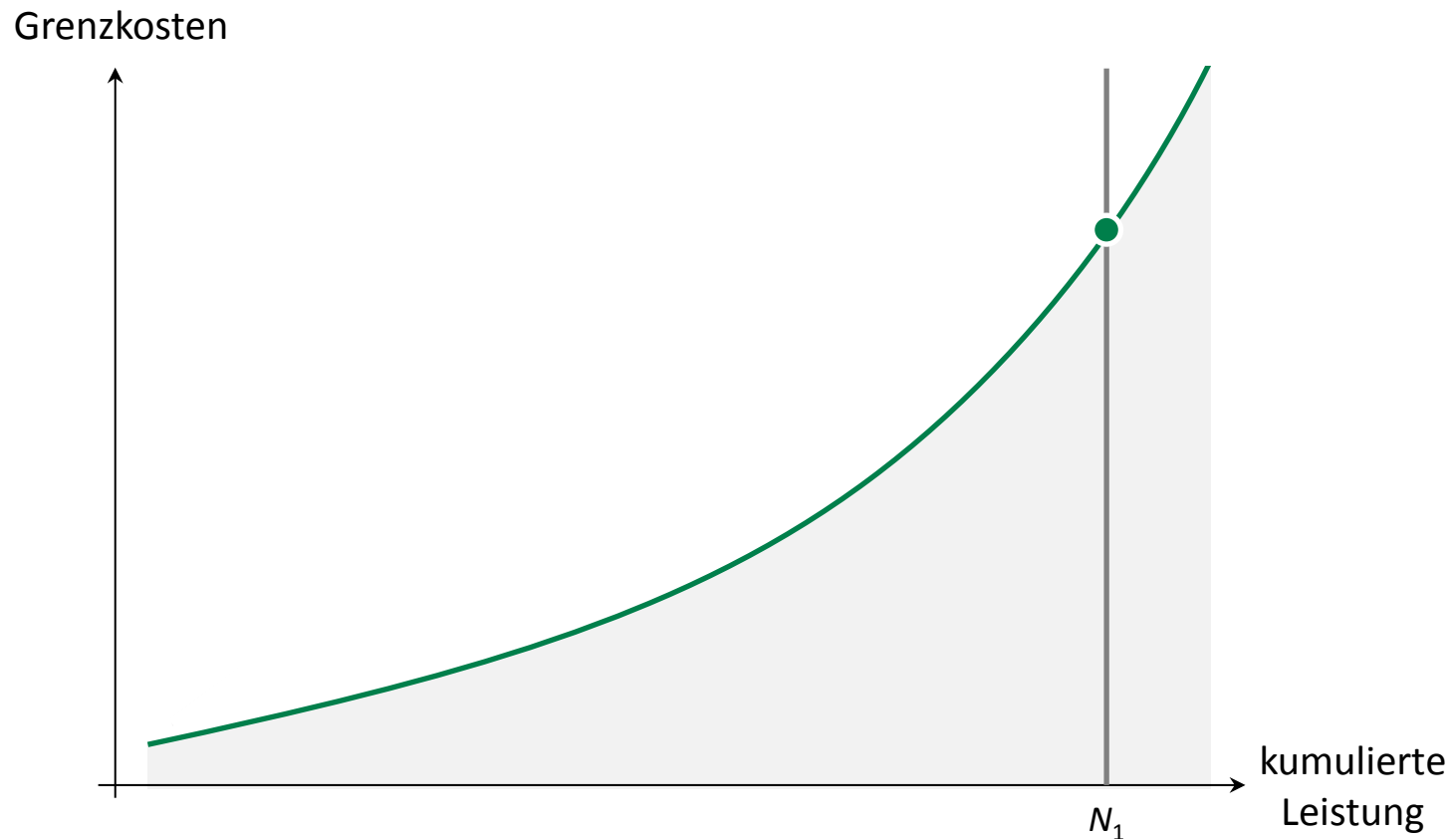
Paradigmenwechsel in der Elektrizitätswirtschaft

» 2. Herausforderung: Preiseffekt der Erneuerbaren Energien



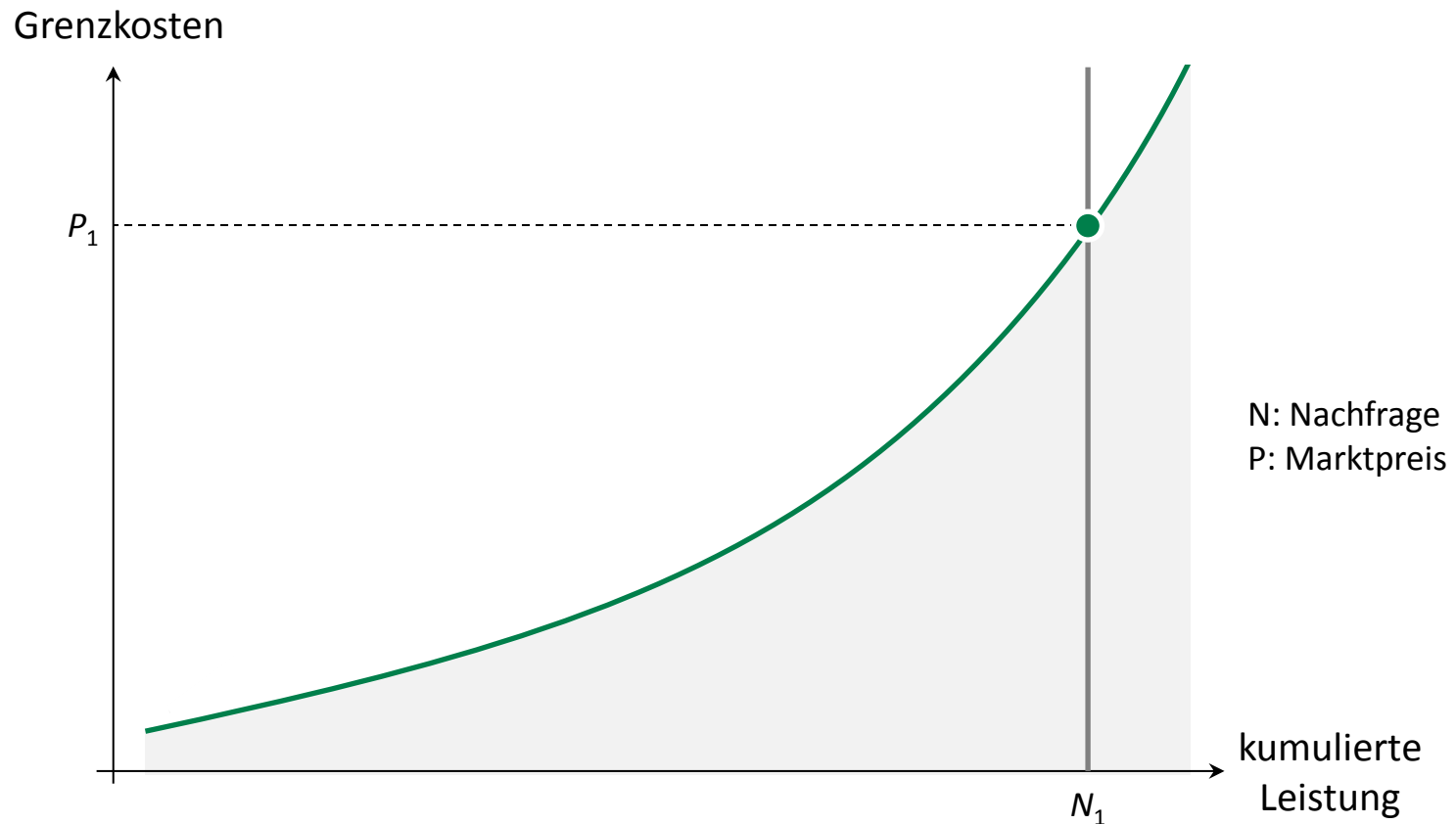
Paradigmenwechsel in der Elektrizitätswirtschaft

» 2. Herausforderung: Preiseffekt der Erneuerbaren Energien



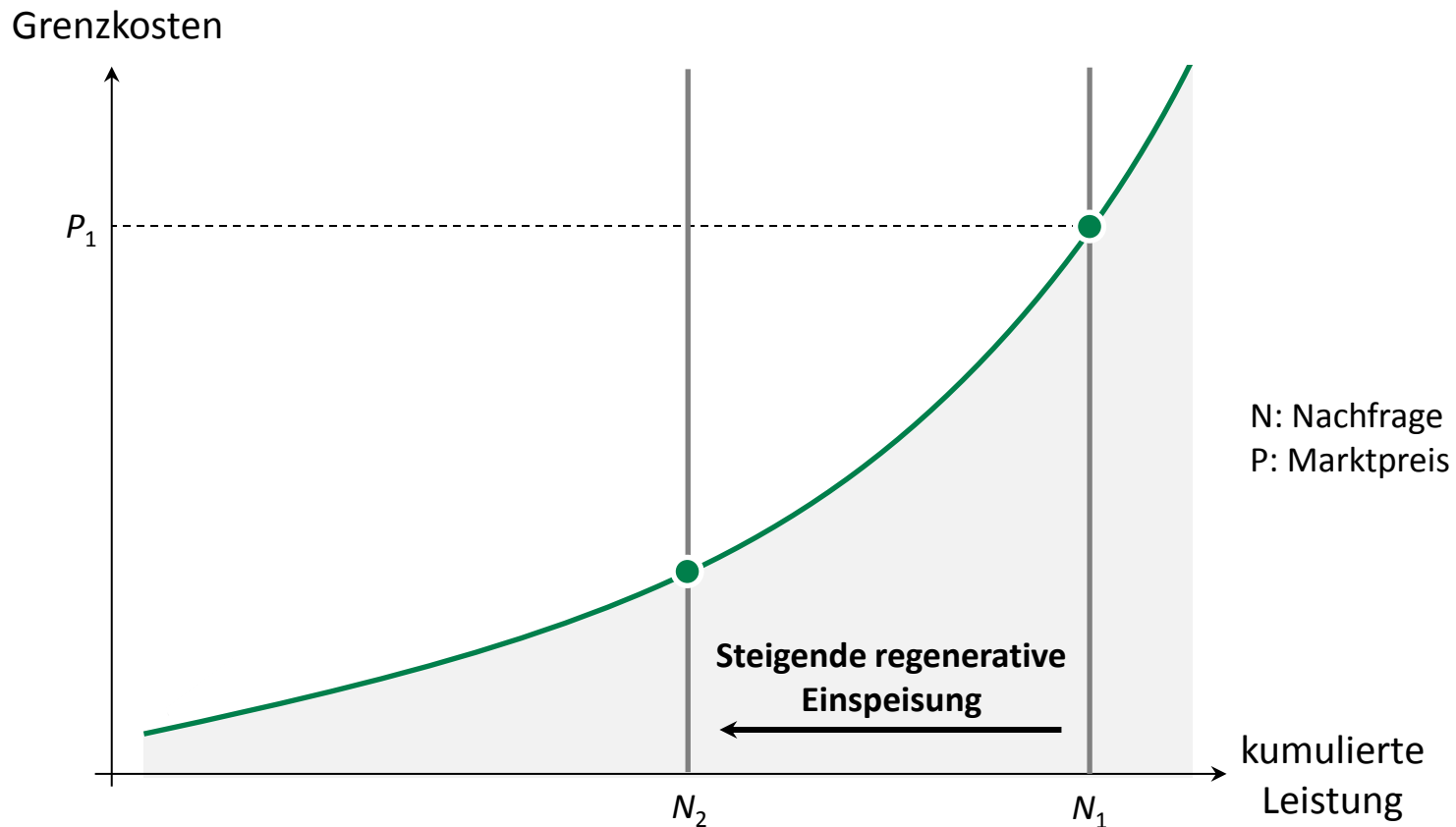
Paradigmenwechsel in der Elektrizitätswirtschaft

» 2. Herausforderung: Preiseffekt der Erneuerbaren Energien



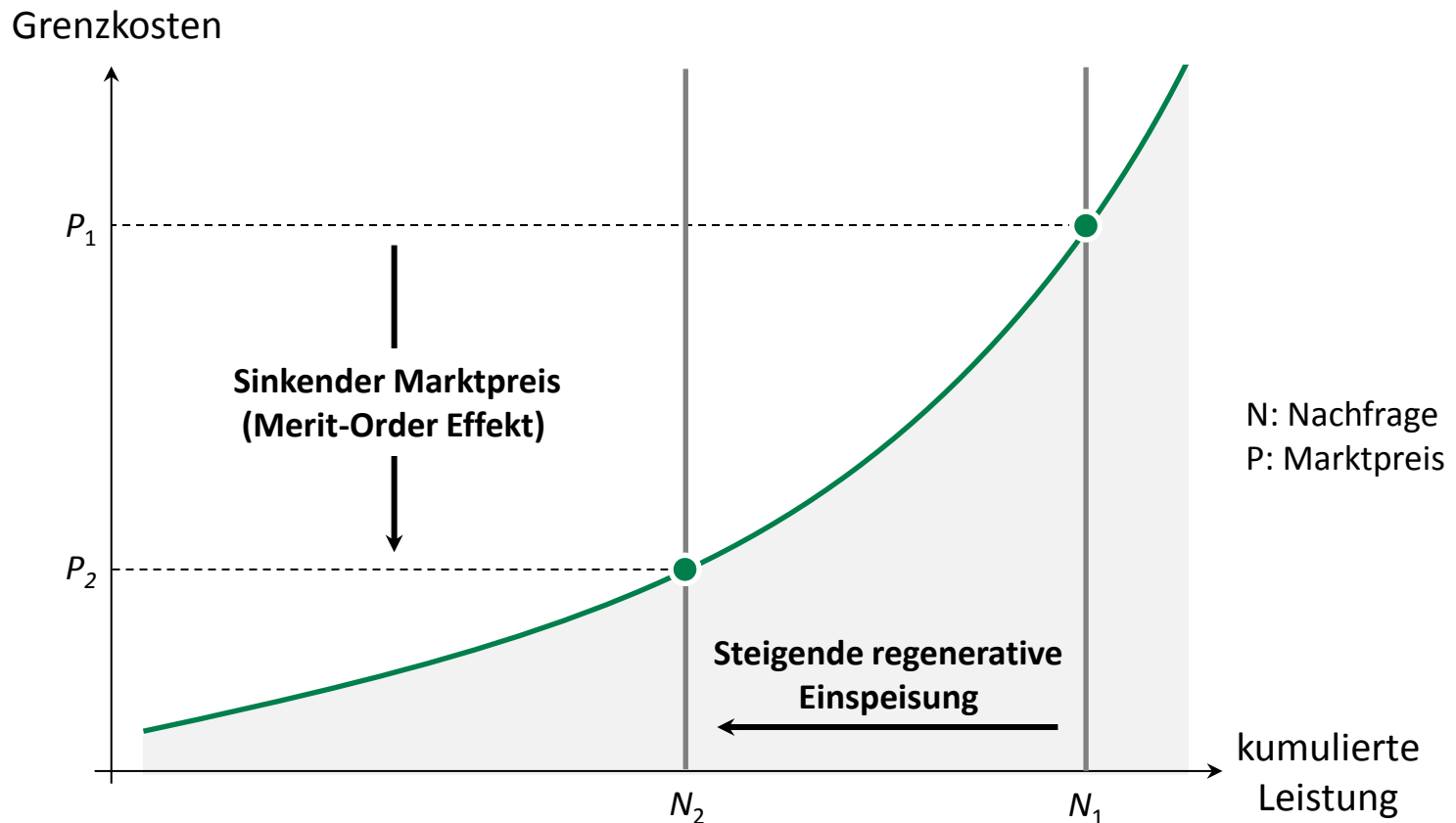
Paradigmenwechsel in der Elektrizitätswirtschaft

» 2. Herausforderung: Preiseffekt der Erneuerbaren Energien



Paradigmenwechsel in der Elektrizitätswirtschaft

» 2. Herausforderung: Preiseffekt der Erneuerbaren Energien



Paradigmenwechsel in der Elektrizitätswirtschaft

» 3. Herausforderung: Gewährleistung einer sicheren Energieversorgung

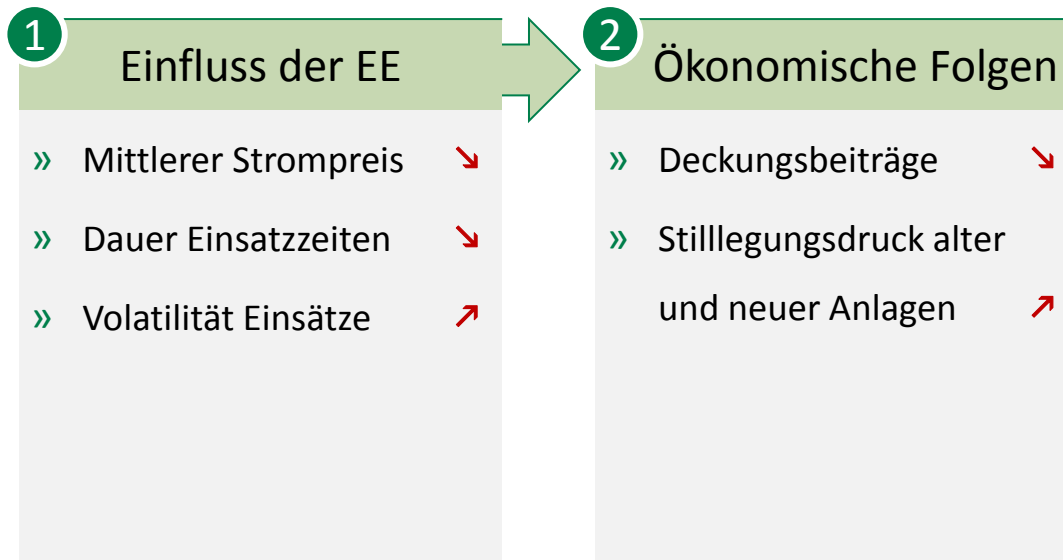
1

Einfluss der EE

- » Mittlerer Strompreis ↘
- » Dauer Einsatzzeiten ↘
- » Volatilität Einsätze ↗

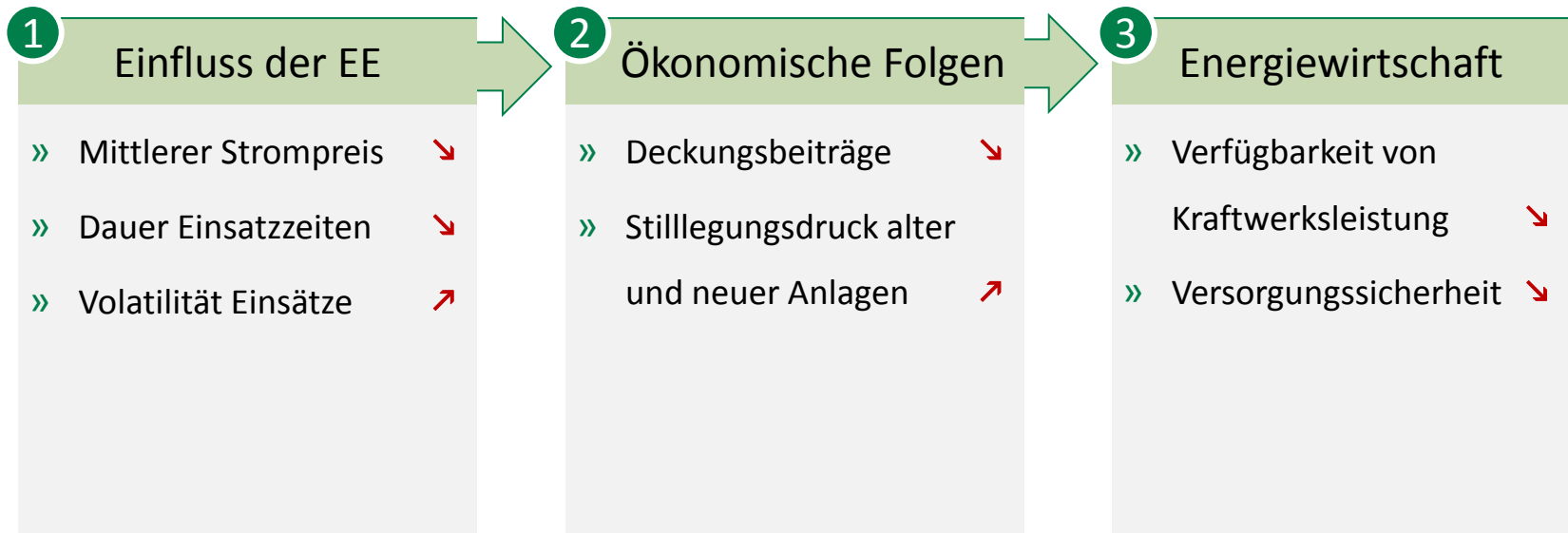
Paradigmenwechsel in der Elektrizitätswirtschaft

» 3. Herausforderung: Gewährleistung einer sicheren Energieversorgung



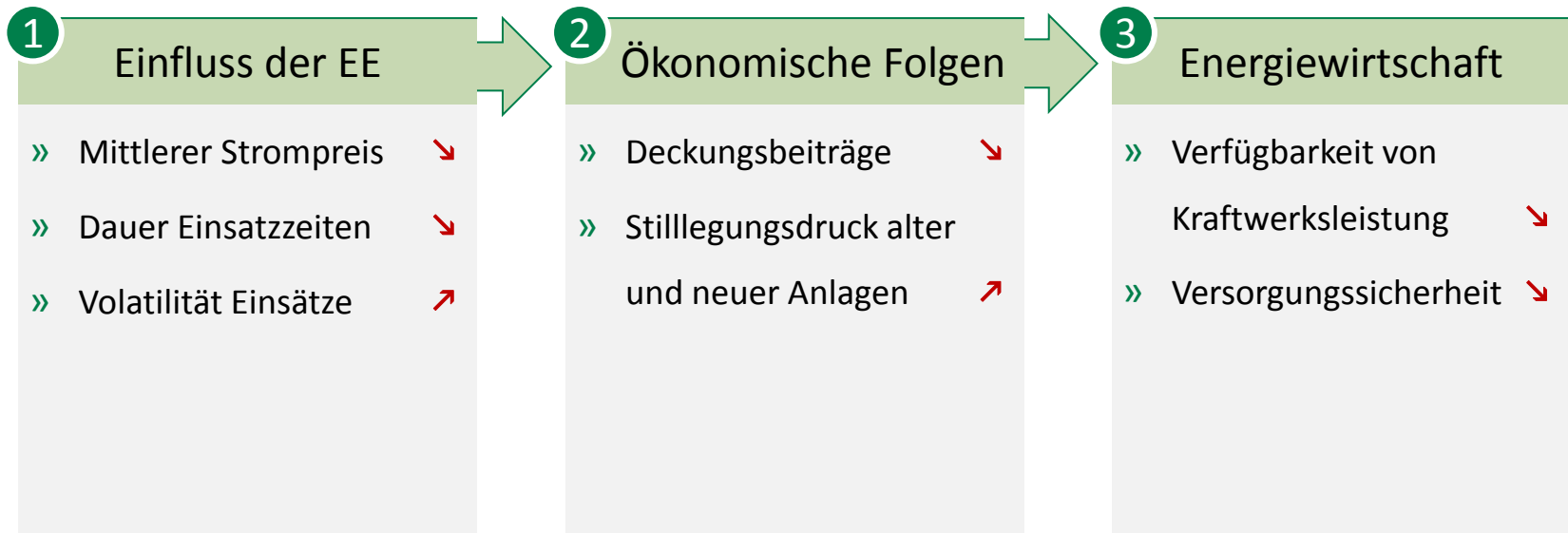
Paradigmenwechsel in der Elektrizitätswirtschaft

» 3. Herausforderung: Gewährleistung einer sicheren Energieversorgung



Paradigmenwechsel in der Elektrizitätswirtschaft

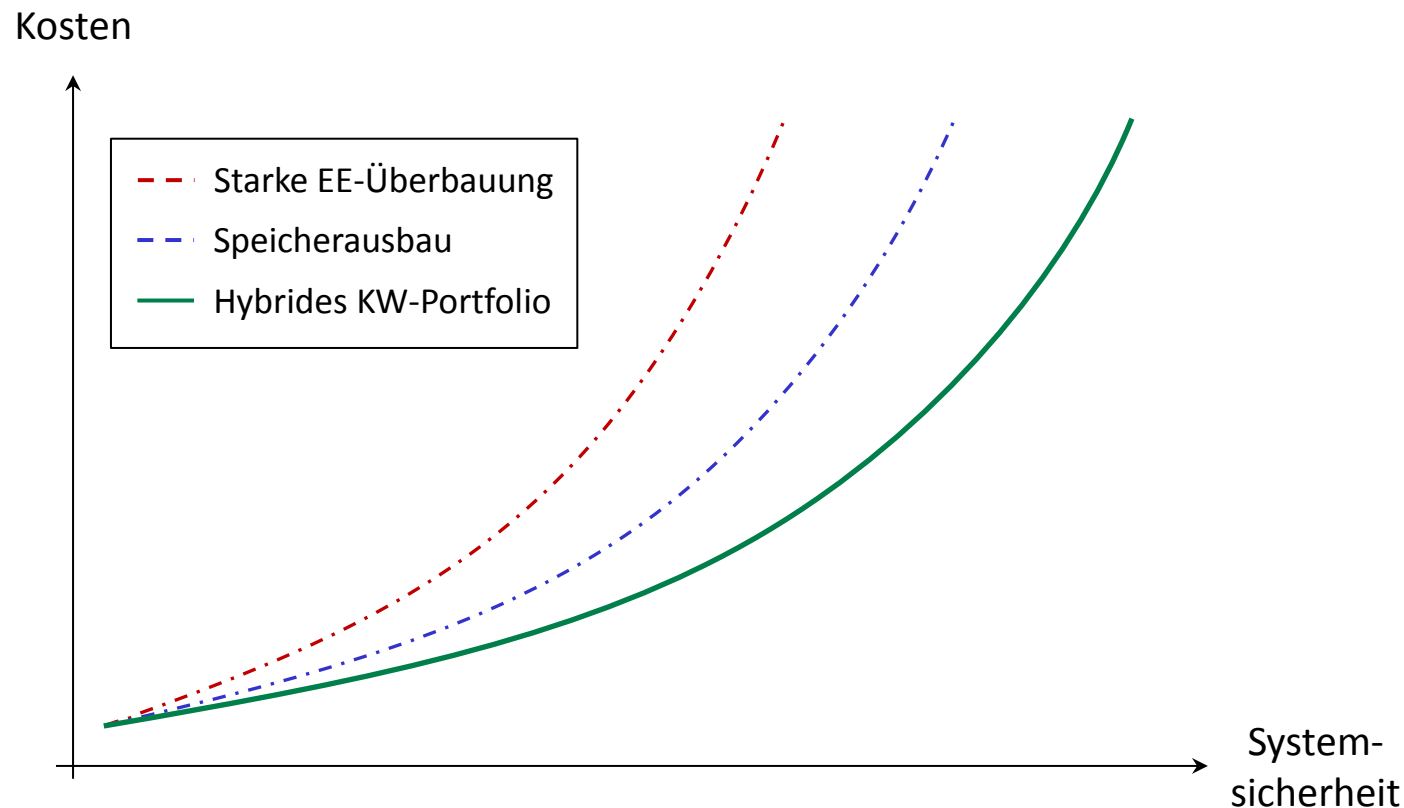
» 3. Herausforderung: Gewährleistung einer sicheren Energieversorgung



Wie kann eine ausreichende Versorgungssicherheit in Deutschland gewährleistet werden?

Paradigmenwechsel in der Elektrizitätswirtschaft

» Wege aus dem Dilemma der regenerativen Energien



Agenda

1 Motivation

2 Promotionsthema

3 Modellierung

4 Ausblick

Modellierung und Optimierung eines KW-Portfolios

» Ziele der Modellierung

- Realistische Abbildung von Erzeugung und Nachfrage in Deutschland
- Bestimmung eines effizienten und robusten hybriden Kraftwerks-parks aus gesamtwirtschaftlicher Sichtweise (Weiterbetrieb, Modernisierung, Stilllegung, Neubau)
- Maßnahmen zur einzelwirtschaftlichen Zielharmonisierung

Modellierung und Optimierung eines KW-Portfolios

» Ziele der Modellierung

- Realistische Abbildung von Erzeugung und Nachfrage in Deutschland
- Bestimmung eines effizienten und robusten hybriden Kraftwerks-parks aus gesamtwirtschaftlicher Sichtweise (Weiterbetrieb, Modernisierung, Stilllegung, Neubau)
- Maßnahmen zur einzelwirtschaftlichen Zielharmonisierung

» Komplexe Problemstellung bestehend aus

- Portfoliooptimierung (Strategische Planungsebene)
- Einsatzoptimierung (Operative Planungsebene)

Stand der Forschung

» Operative Kraftwerkseinsatzplanung

- Morales-España, G., Latorre, J. M. und Ramos, A. (2013): *Tight and Compact MILP Formulation for the Thermal Unit Commitment Problem*, in: IEEE Transaction on Power Systems, Jg. 28, Nr. 2, S. 1288–1296.
- Soliman, S. A.-H. und Mantawy, A.-A. H. (2012): *Energy Systems: Modern Optimization Techniques with Applications In Electric Power Systems*, Energy systems, 1. Auflage, Springer: New York.
- Goetz, J., Luedtke, J. und Heights, Y. (2008): *Stochastic Unit Commitment Problem*, in: IBM Research Report, Nr. RC24713.
- Birge, J. R. und Shiina, T. (2004): *Stochastic Unit Commitment Problem*, in: International Transactions in Operational Research, Jg. 11, Nr. 1, S. 19–32.
- Wood, A. J. und Wollenberg, B. F. (1996): *Power Generation Operation and Control*, 2. Auflage, John Wiley & Sons: New York.

Stand der Forschung

» Strategische Kapazitätserweiterungsplanung

- Bakirtzis, G. A., Biskas, P. N. und Chatziathanasiou, V. (2012): *Generation Expansion Planning by MILP considering mid-term scheduling decisions*, in: Electric Power Systems Research, Jg. 86, Nr. 1, S. 98–112.
- Zhang, Q., Mclellan, B. C., Tezuka, T. und Ishihara, K. N. (2012): *Economic and environmental analysis of power generation expansion in Japan considering Fukushima nuclear accident using a multi-objective optimization model*, in: Energy, Jg. 44, Nr. 1, S. 986–995.
- Ehrenmann, A. und Smeers, Y. (2010): *Generation Capacity Expansion in a Risky Environment: A Stochastic Equilibrium Analysis*, in: Operations Research, Jg. 59, Nr. 6, S. 1332–1346.
- Ramos, A., Perez-Arriaga, I. J. und Bogas, J. (1989): *A nonlinear programming approach to optimal static generation expansion planning*, in: IEEE Transactions on Power Systems, Jg. 4, Nr. 3, S. 1140–1146.
- Phillips, D., Jenkin, F. P., Pritchard, J. A. T. und Rybicki, K. (1969): *A mathematical model for determining generating plant mix*, in: Third Power Systems Computation Conference, Rome.

Agenda

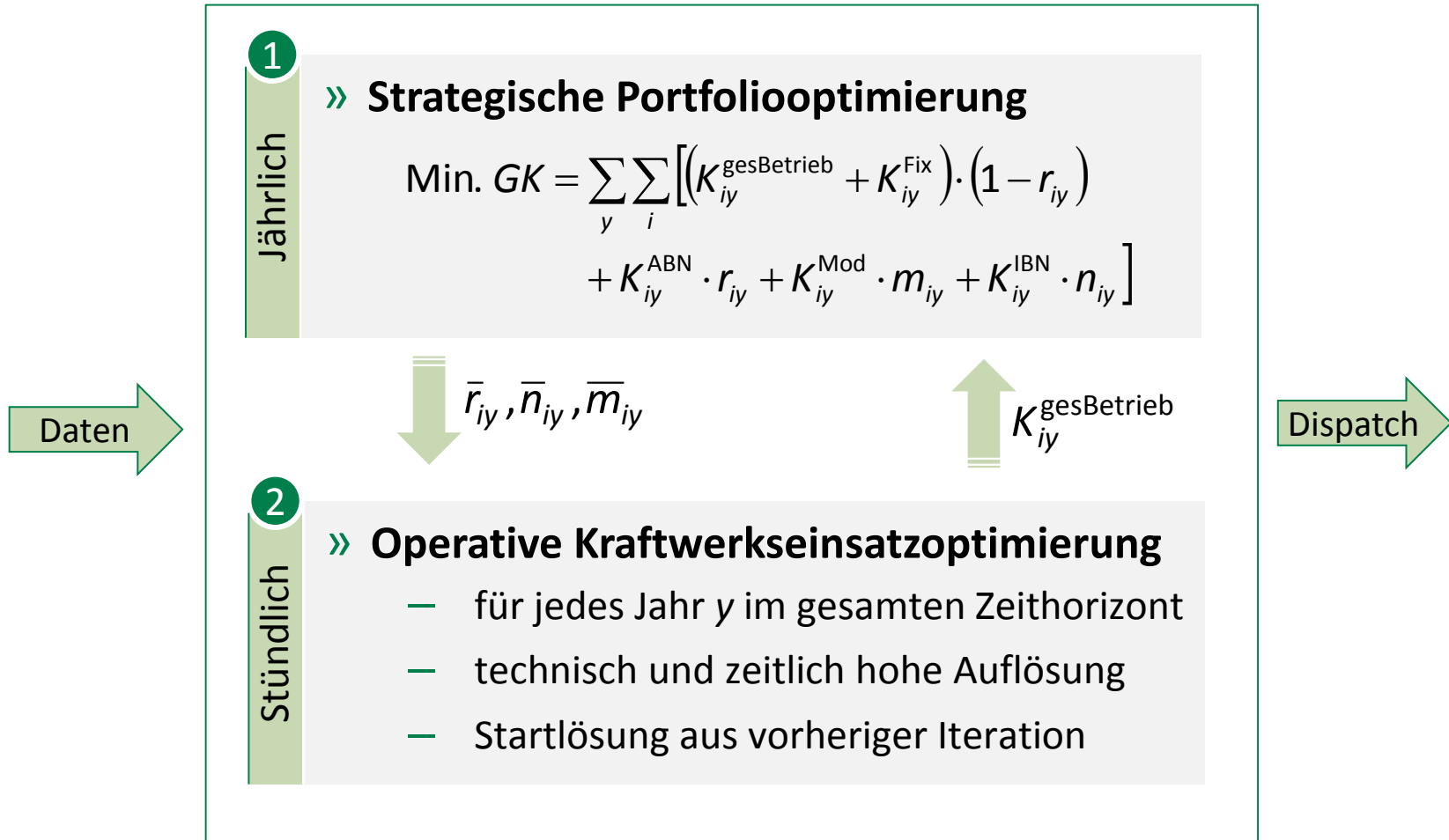
1 Motivation

2 Promotionsthema

3 Modellierung

4 Ausblick

Hierarchisierung der Portfoliooptimierung



Grundmodell der Kraftwerkseinsatzplanung

» Gemischt-ganzzahliges (lineares) Optimierungsproblem

- Betriebsstatus: $u_{it} \in \{1, 0\}$
- Elektrische Leistung: $\Delta P_{it} \geq 0, \Delta P_{it} \in [0, P^{\text{Max}} - P^{\text{Min}}]$
- Nicht gedeckte Last: $nbl_t \geq 0$

Grundmodell der Kraftwerkseinsatzplanung

» Gemischt-ganzzahliges (lineares) Optimierungsproblem

- Betriebsstatus: $u_{it} \in \{1, 0\}$
- Elektrische Leistung: $\Delta P_{it} \geq 0, \Delta P_{it} \in [0, P^{\text{Max}} - P^{\text{Min}}]$
- Nicht gedeckte Last: $nbl_t \geq 0$

» Zielfunktion: Minimierung der Gesamtkosten

$$\text{Min. } K(u, \Delta P) = \sum_t \sum_i \left[K_{it}^{\text{Betrieb}} + K_{it}^{\text{Anfahr}} \right] + \sum_t k_t^{\text{nbl}} \cdot nbl_t$$

» mit

$$K_{it}^{\text{Betrieb}} = k_i^{\text{var}} \cdot \Delta P_{it} + k_i^{\text{fix}} \cdot u_{it}$$

$$K_{it}^{\text{Anfahr}} = k_i^{\text{WStart}} \cdot u_{it}^{\text{Anf}} + \Delta k_i^{\text{KStart}} \cdot u_{it}^{\text{AnfKS}}$$

Grundmodell der Kraftwerkseinsatzplanung

» Nebenbedingungen

- Nachfragedeckung

$$\sum_i (p_i^{\text{Min}} \cdot u_{it} + \Delta p_{it}) + nbl_t \geq N_t$$

- Reservevorhaltung

$$\sum_i (p_i^{\text{Max}} \cdot u_{it}) + nbl_t \geq p_t^{\text{Res}} + N_t$$

- Technische Maximalleistung

$$\Delta p_{it} \leq (p_i^{\text{Max}} - p_i^{\text{Min}}) \cdot u_{it}$$

Grundmodell der Kraftwerkseinsatzplanung

» Nebenbedingungen

- Mindestbetriebszeit

$$\sum_{t'=\max(1, t-\tau_i^{\text{MBZ}}+1)}^t u_{it'}^{\text{Anf}} \leq u_{it}$$

- Mindeststillstandszeit

$$\sum_{t'=\max(1, t-\tau_i^{\text{MSZ}}+1)}^t u_{it'}^{\text{Aus}} \leq 1 - u_{it}$$

- Hilfsbedingungen

$$u_{it}^{\text{AnfKS}} + \sum_{t'=1}^{\tau_i^{\text{KS}}-1} u_{i(t-t')}^{\text{Aus}} \geq u_{it}^{\text{Anf}}$$

$$u_{it} - u_{i(t-1)} = u_{it}^{\text{Anf}} - u_{it}^{\text{Aus}}$$

Dekompositionsansatz nach Benders

» Partitionierung des Grundproblems in

- Masterproblem ausschließlich mit binären Entscheidungsvariablen
- Subproblem mit fixierten binären Entscheidungsvariablen

Dekompositionsansatz nach Benders

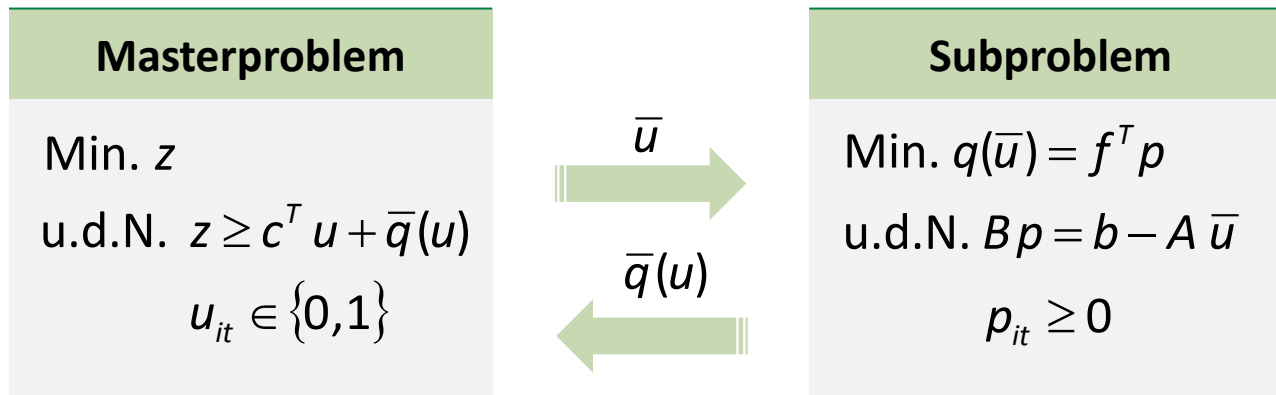
» Partitionierung des Grundproblems in

- Masterproblem ausschließlich mit binären Entscheidungsvariablen
- Subproblem mit fixierten binären Entscheidungsvariablen

» Beispiel

$$\text{Min. } c^T u + f^T p$$

$$\text{u.d.N. } A u + B p = b, u_{it} \in \{0, 1\}, p_{it} \geq 0$$



Dekompositionsansatz nach Benders

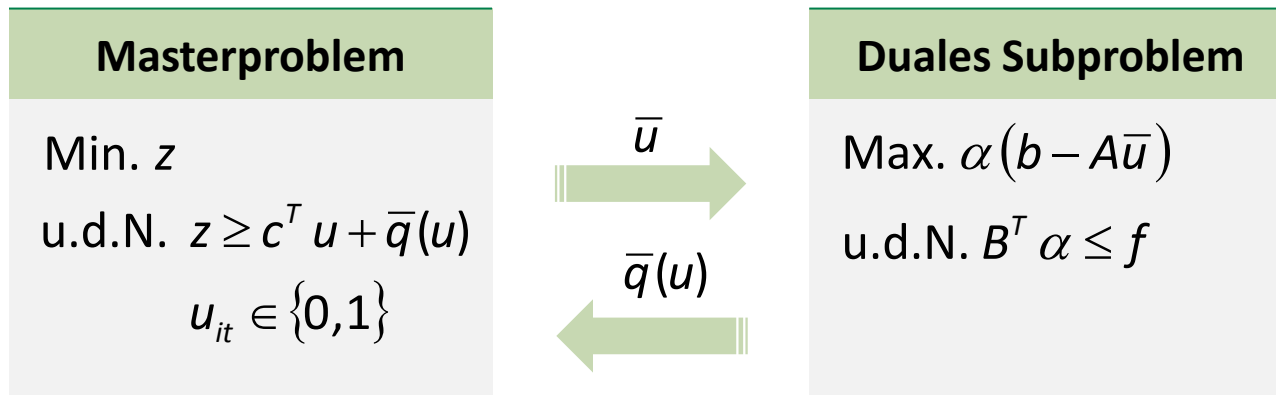
» Partitionierung des Grundproblems in

- Masterproblem ausschließlich mit binären Entscheidungsvariablen
- Subproblem mit fixierten binären Entscheidungsvariablen

» Beispiel

$$\text{Min. } c^T u + f^T p$$

$$\text{u.d.N. } A u + B p = b, u_{it} \in \{0, 1\}, p_{it} \geq 0$$



Dekompositionsansatz nach Benders

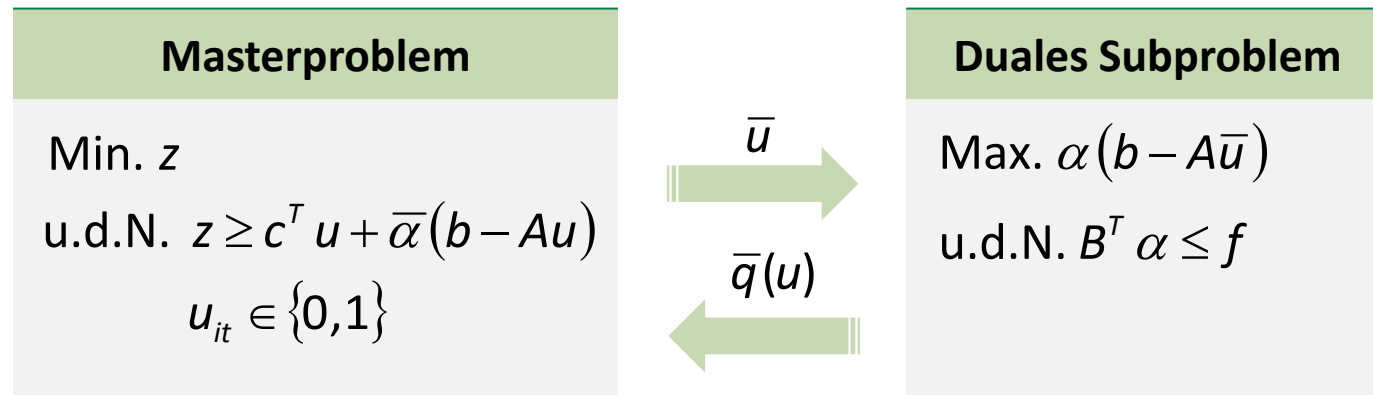
» Partitionierung des Grundproblems in

- Masterproblem ausschließlich mit binären Entscheidungsvariablen
- Subproblem mit fixierten binären Entscheidungsvariablen

» Beispiel

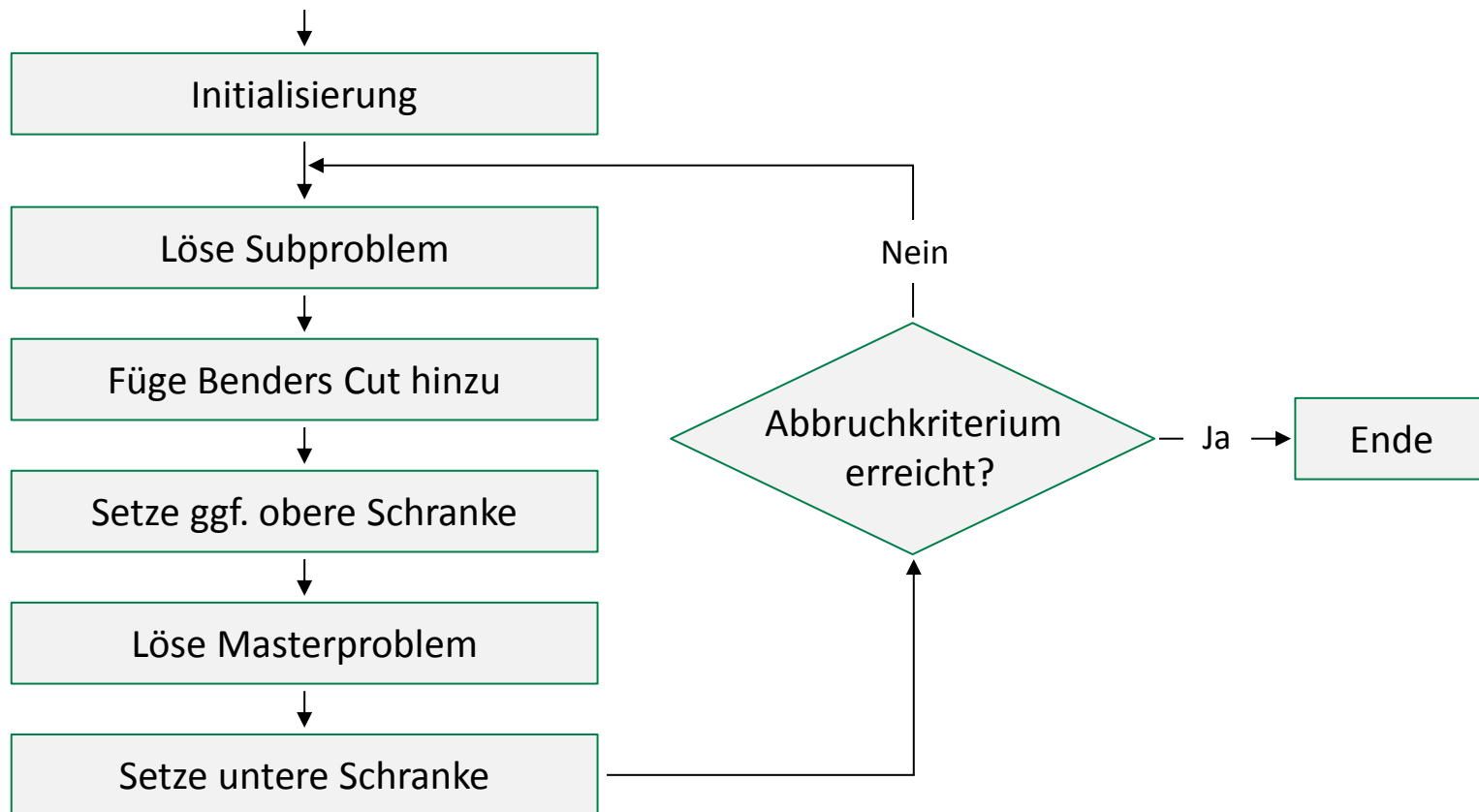
$$\text{Min. } c^T u + f^T p$$

$$\text{u.d.N. } A u + B p = b, u_{it} \in \{0, 1\}, p_{it} \geq 0$$



Dekompositionsansatz nach Benders

» Schematische Implementierung



Erste Ergebnisse

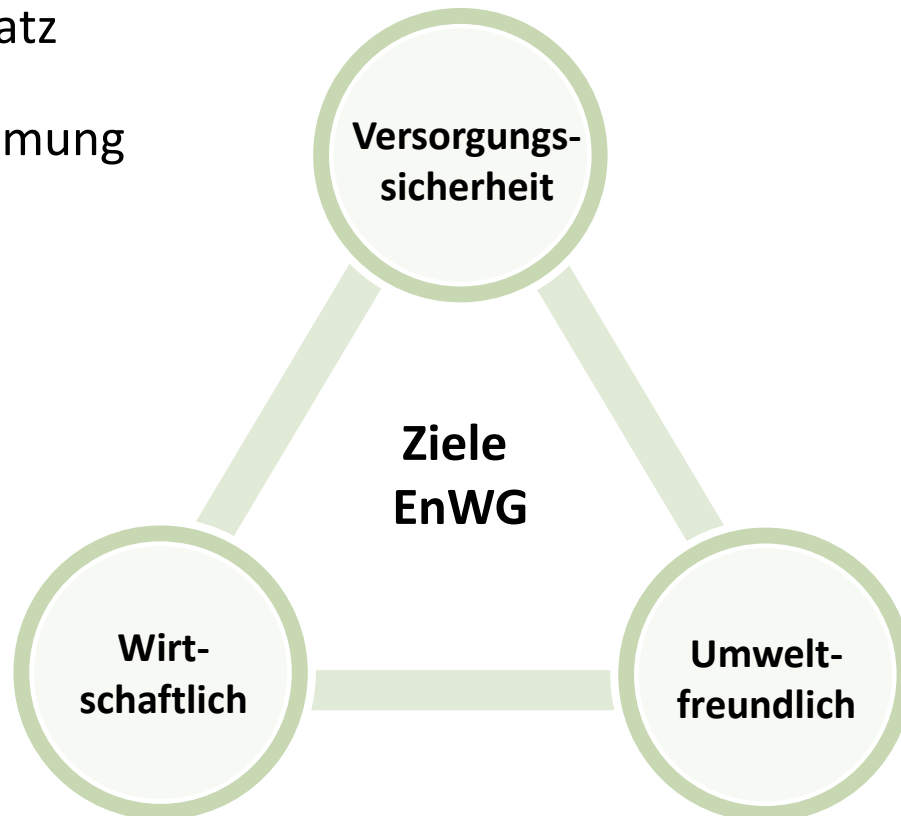
Version	Instanz	ZFW (GE) ¹⁾	Zeit (hh:mm:ss) ²⁾
Morales-España et al. (2013)	168 ZE, periodische Last	3.650.028	00:00:09
MIP-Modell	168 ZE, periodische Last	3.672.091	00:00:02
Benders Dekomposition	168 ZE, periodische Last	3.667.620	00:00:05
Morales-España et al. (2013)	1344 ZE, periodische Last	156.050.626	04:38:32
MIP-Modell	1344 ZE, periodische Last	154.788.286	00:28:36
Benders Dekomposition	1344 ZE, periodische Last	155.308.500	00:02:26
Morales-España et al. (2013)	1344 ZE, RL2012	-/-	-/-
MIP-Modell	1344 ZE, RL2012	122.272.295	02:31:07
Benders Dekomposition	1344 ZE, RL2012	121.550.600	00:03:25
Morales-España et al. (2013)	8760 ZE, RL2012	-/-	-/-
MIP-Modell	8760 ZE, RL2012	697.054.580	06:53:08
Benders Dekomposition	8760 ZE, RL2012	-/-	-/-
Benders Dekomposition, ohne PSW	8760 ZE, RL2012	706.263.400	01:03:14

¹⁾ Zeitschranke 7 Stunden, Optimalitätslücke 1 %

²⁾ i7, 2,4 GHz, 8 GB RAM, GAMS 23.9.2 mit CPLEX 12.4

Zusammenfassung

- » Komplexe energiewirtschaftliche Problemstellung
- » Hierarchischer Lösungsansatz
- » Zwei Methoden zur Bestimmung des Kraftwerkseinsatzes



Ausblick

- » Exakte Lösungsfindung nur für relativ kleine Probleminstanzen
- » Weitere Methoden zur Bestimmung des Kraftwerkseinsatzes
 - Nested Benders Dekompositionsansatz
 - Lagrange Relaxation
 - Heuristiken, z.B. Merit-Order-Heuristik
- » Modellierung weiterer Einflussgrößen
 - Import- und Exportmöglichkeiten mit ENTSO-E Mitgliedern
 - Planmäßige und außerplanmäßige Nichtverfügbarkeiten
 - ...



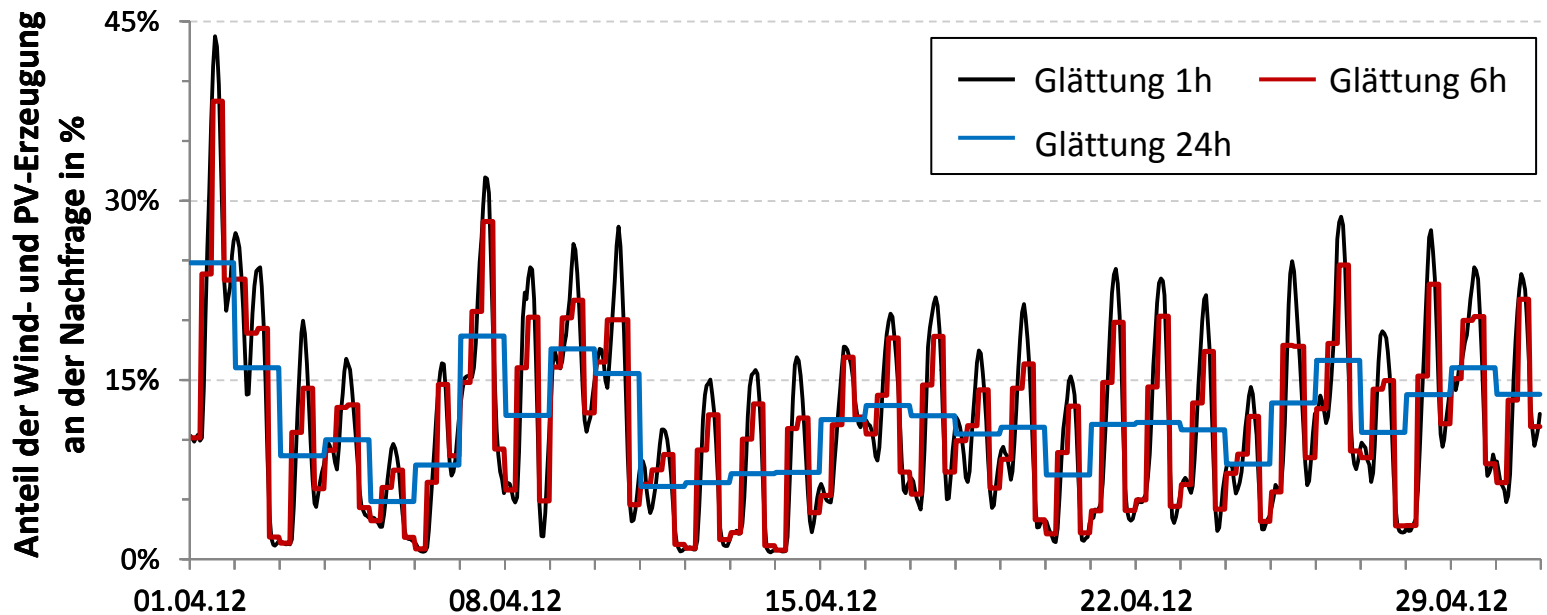
**VIELEN DANK FÜR IHRE
AUFMERKSAMKEIT!**



Methoden zur Datenreduktion

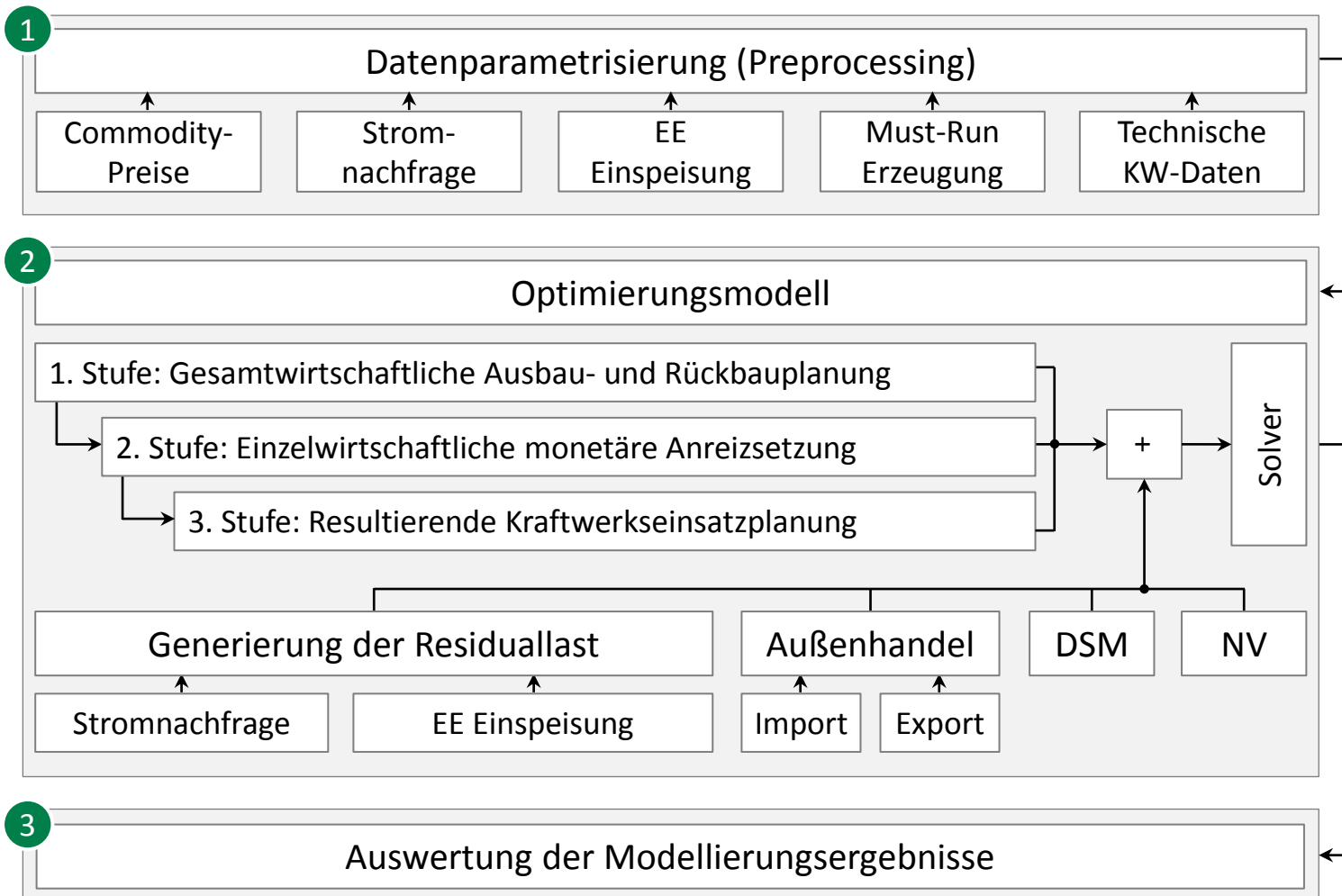
» Zeitliche Auflösung

- Segmentierte Optimierung
- Verwendung von repräsentativen Zeitabschnitten
- Adaptive vs. konstante Zeitraster



Datenquelle: BDEW, ENTSO-E, Netzbetreiber

Dekompositionsansatz



Strom und seine besonderen Eigenschaften

» Merkmale von Strom

- nicht lagerbar,
- Produktion zum Zeitpunkt des Verbrauchs,
- hohe Fluktuation der Nachfrage, der Erzeugung und des Preises,
- kurzfristig keine Preiselastizität der Nachfrage,
- vollständig homogen,
- Produktion auf unterschiedliche Arten möglich.

Strom und seine besonderen Eigenschaften

» Preisbildung am Strommarkt – oder wie funktioniert der Strommarkt?

- Produktion nur, wenn $\text{Preis} \geq \text{Grenzkosten}$,
- Vielzahl verschiedener Elektrizitätserzeugungsanlagen mit unterschiedlichen Grenzkosten in Deutschland und Europa,
- homogene Güter fordern identische Preise für alle Anbieter und Nachfrager (ansonsten Arbitragemöglichkeiten),
- nur Produzenten mit Grenzkosten unterhalb des sog. einheitlichen Market Clearing Price stellen Strom bereit,
- preissetzende Anbieter (Grenzanbieter) erzielen keinen Gewinn und keine Fixkostendeckung.

Strom und seine besonderen Eigenschaften

» Kraftwerkseinsatzplanung

- ... zeitgenaues Scheduling der Elektrizitätserzeugung durch ein Portfolio an Erzeugungseinheiten (Gaskraftwerke, Steinkohlekraftwerke, Braunkohlekraftwerke, Kernkraft, Erneuerbare, Speicher, ...) zur Deckung einer vorgegebenen Last.
- Klassische OR-Probleme:
 - Economic Dispatch Problem (EDP):
Optimierung der Fahrweise bei vorgegebenen Einschaltentscheidungen
 - Unit Commitment Problem (UCP):
synchrone Optimierung der Fahrweise und der Einschaltentscheidungen