

Kombinierte Optimierung, Simulation und Netzanalyse des elektrischen Energiesystems im europäischen Kontext (KOSiNeK)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

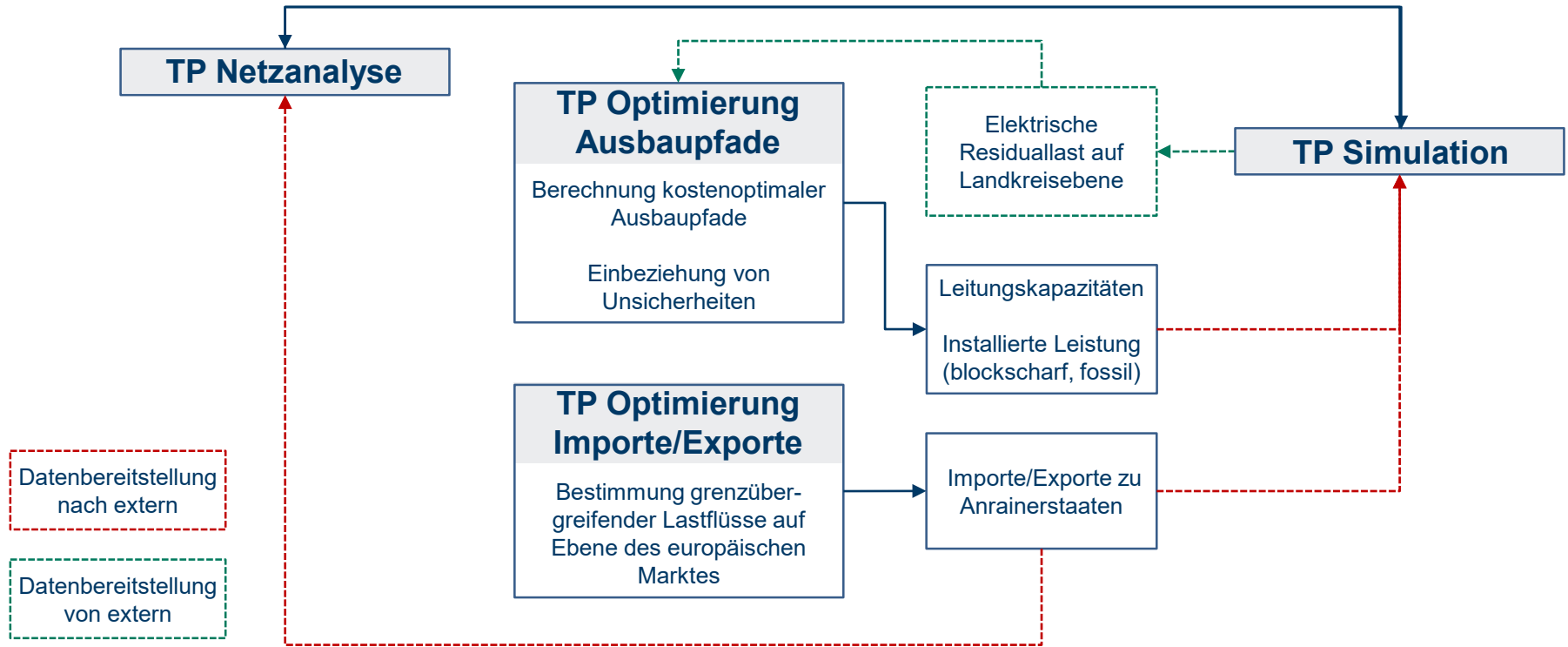
4. Beiratssitzung | Projektabschluss | 02.02.2021 | Nürnberg

Tätigkeitsbericht Lehrstuhl für Wirtschaftsmathematik

Robert Burlacu, Christoph Thurner, Alexander Martin



Integration des TP Optimierung in KOSiNeK



Capacitated Unit Commitment Problem (CUCP)

- **Zielfunktion:** \min Investitionskosten über Gesamtzeitraum $\{1, \dots, T\}$

$$+ \sum_{t=1}^T (\text{variable Kosten in } t)$$

- **Nebenbedingungen:**
 - Konventionelle Kraftwerke
 - Speicher
 - Erneuerbare Energien
 - Netzwerk
 - Residuallast

Capacitated Unit Commitment Problem (CUCP)

➤ Installation von Kapazitäten:

$$x_{i,t} = x_{i,t-1} + x_{i,t}^{\text{add}} - x_{i,t}^{\text{sub}} \quad \text{für alle KW } i \text{ und Zeitschritte } t$$

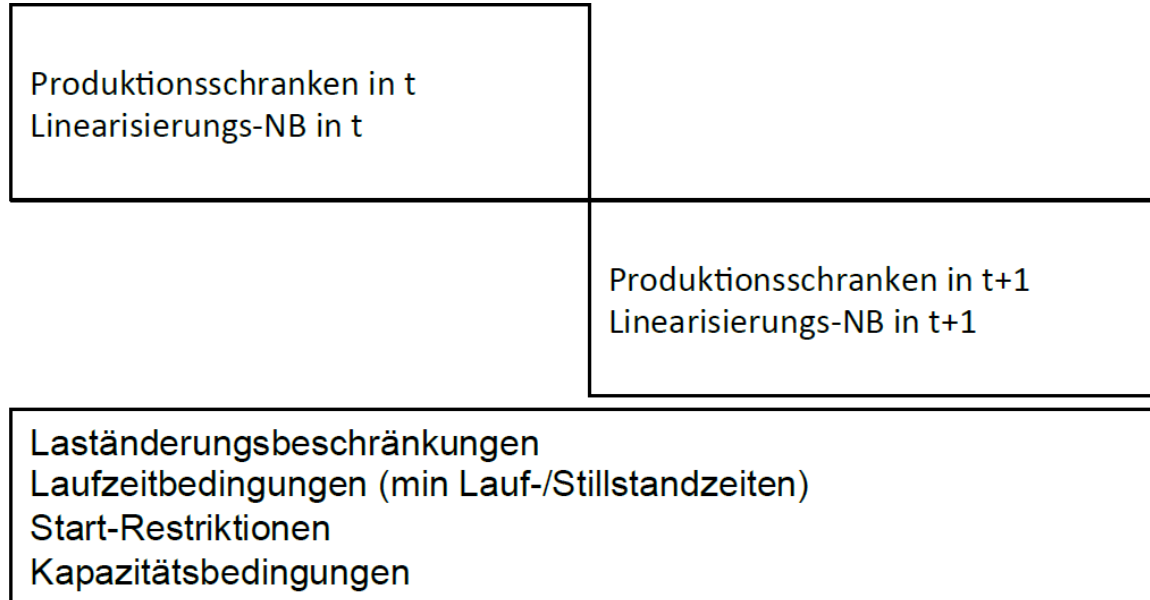
➤ Laufzeitbedingungen (z. B. minimale Betriebszeit von 10 Zeitschritten):

$$\left. \begin{aligned} \sum_{t'=t-10+1}^t h_{i,t'} &\leq u_{i,t} \\ u_{i,t} - u_{i,t-1} &\leq h_{i,t} \\ u_{i,t}, h_{i,t} &\in \{0, 1\} \end{aligned} \right\} \text{für alle KW } i \text{ und Zeitschritte } t = 10, \dots, T$$



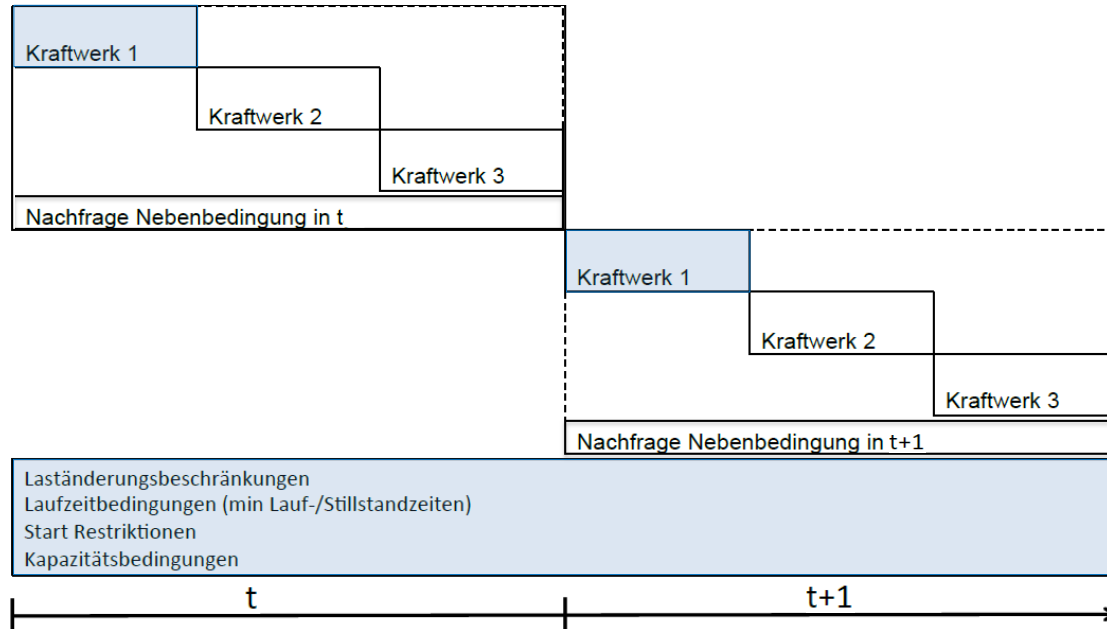
Blockstruktur des Optimierungsproblems

- Modellierung eines Kraftwerks in zwei aufeinanderfolgenden Zeitschritten:



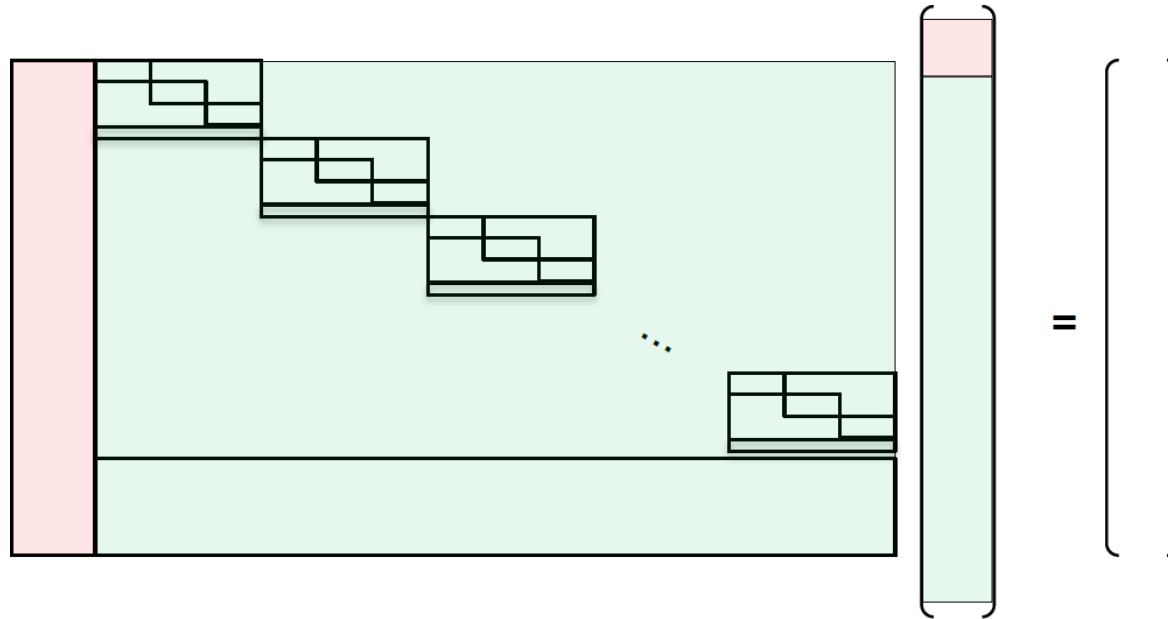
Blockstruktur des Optimierungsproblems

➤ Modellierung zweier aufeinanderfolgender Zeitschritte:



Blockstruktur des Optimierungsproblems

➤ Modellierung für den Gesamtzeitraum:



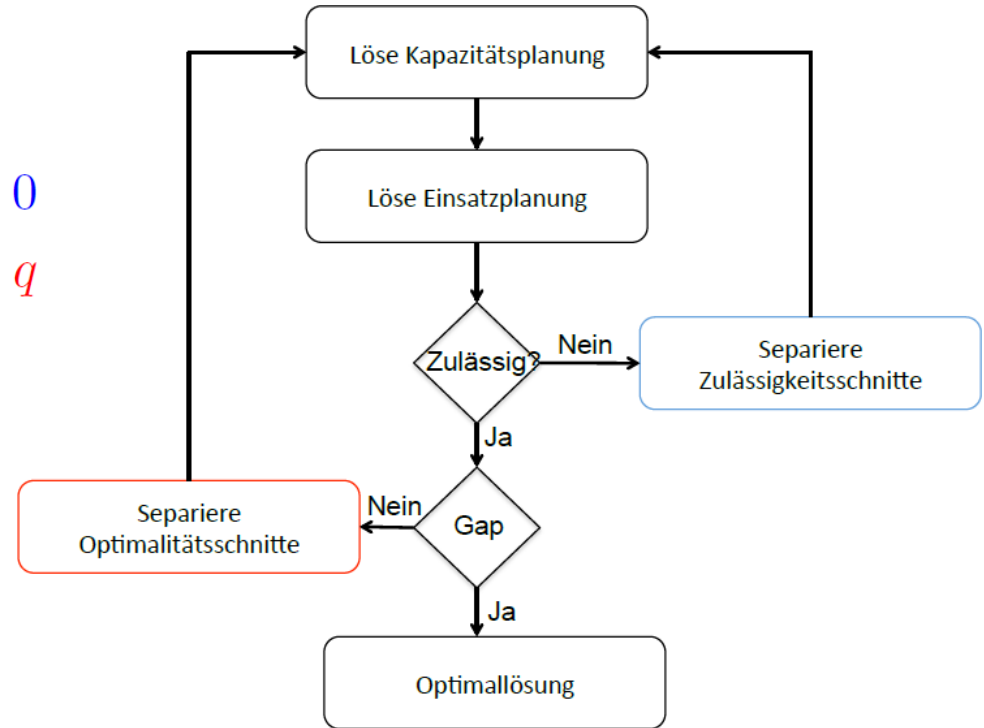
Benders' Dekomposition

➤ Masterproblem:

$$\begin{aligned} \min \quad & cx + q \\ \text{u.d.N.} \quad & \lambda_r(b - Ax) \leq 0 \\ & \lambda_p(b - Ax) \leq q \\ & x \in X \\ & q \in \mathbb{R} \end{aligned}$$

➤ Subproblem:

$$\begin{aligned} \max \quad & \lambda(b - A\bar{x}) \\ \text{u.d.N.} \quad & \lambda B \leq d \\ & \lambda \in \mathbb{R} \end{aligned}$$



Anwendung auf CUCP

➤ Problematik:

Subproblem (UC) nicht konvex!

➤ Lösung:

- Definiere alternative Zulässigkeitsschnitte (Netzwerkflussproblem)
- Approximiere Optimalitätsschnitte (Lagrange Dekomposition für Subproblem)

Vor- und Nachteile des Ansatzes

➤ Vorteile:

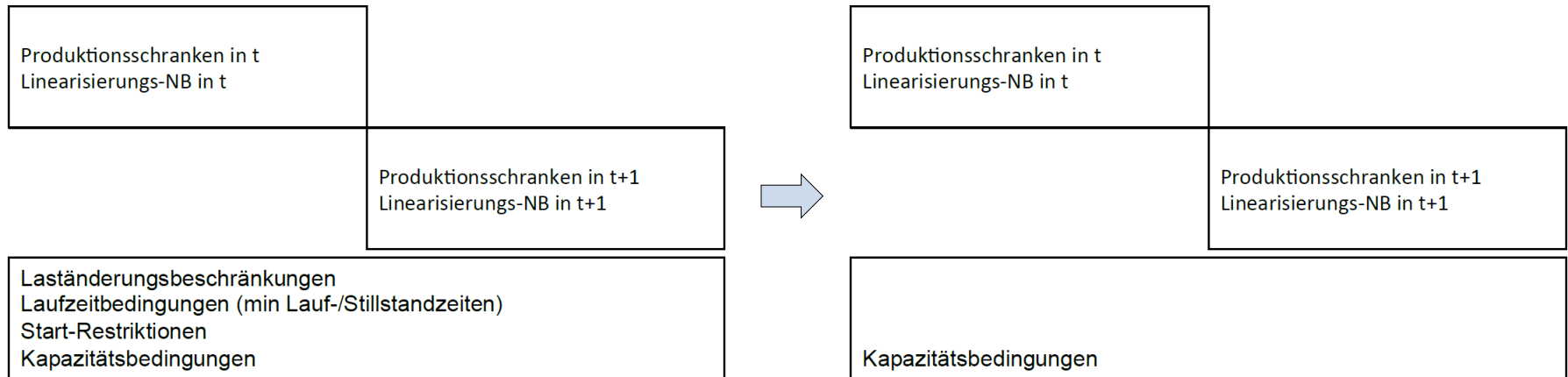
- Dekompositionsverfahren sehr gut geeignet für Kapazitätsplanungsprobleme
- Ausnutzung der Blockstruktur durch Lagrange-basiertes Verfahren

➤ Nachteile:

- Nicht zufriedenstellende Ergebnisse bei großen Systemen

Weitere Potentiale

- **Blockstruktur für einzelne Kraftwerke**
- **Viele kombinatorische Restriktionen in Optimallösung nicht bindend**



Kombiniertes Verfahren

➤ Dekomposition:

- Zerlegung in Kapazitätsplanung und Einsatzplanung
- Lagrange Dekomposition für Subproblem

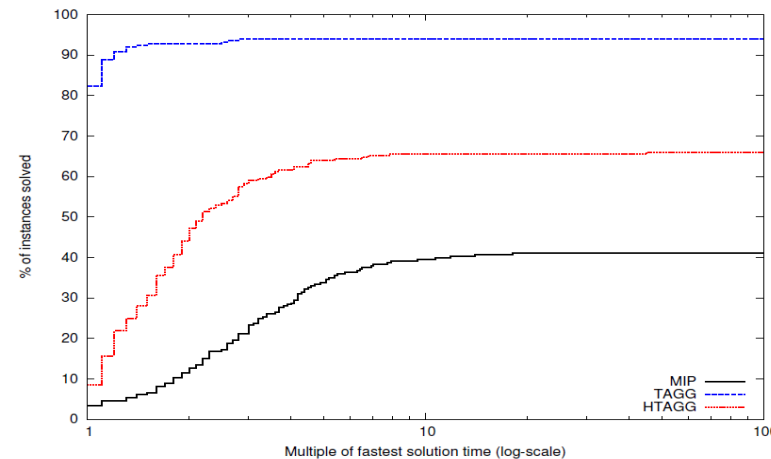
➤ Adaptives Verfahren:

- Anpassung unzulässiger Zeitpunkte in der Kapazitätsplanung
- Zeitliche Verfeinerung / Entkopplung der Einsatzplanung



Rechenergebnisse Deutschland

Instanz	Int-Variablen	Nebenbedingungen
Inst-BY-BW-RP	0.04	0.59
Inst-BY-HE-NI-SH-HB-HH	0.04	0.57
Inst-GER	0.04	0.57
Inst-NW-HE-RP-SL	0.02	0.54
Inst-NW-HE-TH-SN	0.02	0.49
Inst-SH-MV-NI-ST-BB-BE	0.08	0.61
Inst-SN-ST-TH-BB-BE-MV	0.03	0.58



➤ Größe des Optimierungsproblems für Instanz Deutschland für ein Jahr:

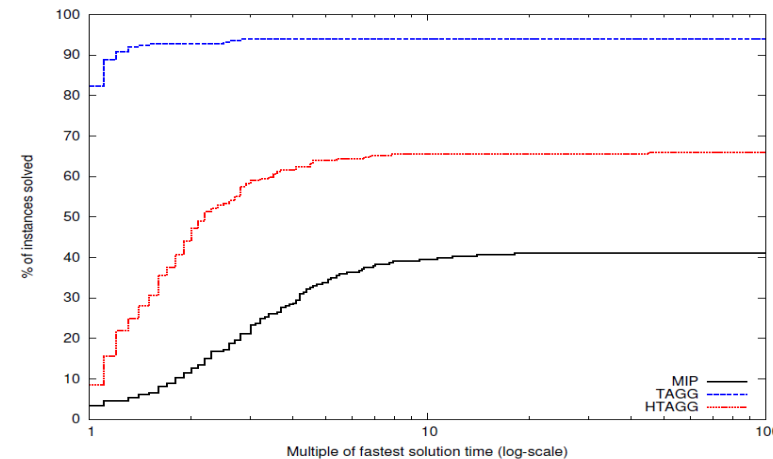
- 25.000.000 Nebenbedingungen
- 4.500.000 ganzzahlige, 16.000.000 kontinuierliche Variablen



Laufzeit ~ 2 h

Rechenergebnisse Deutschland

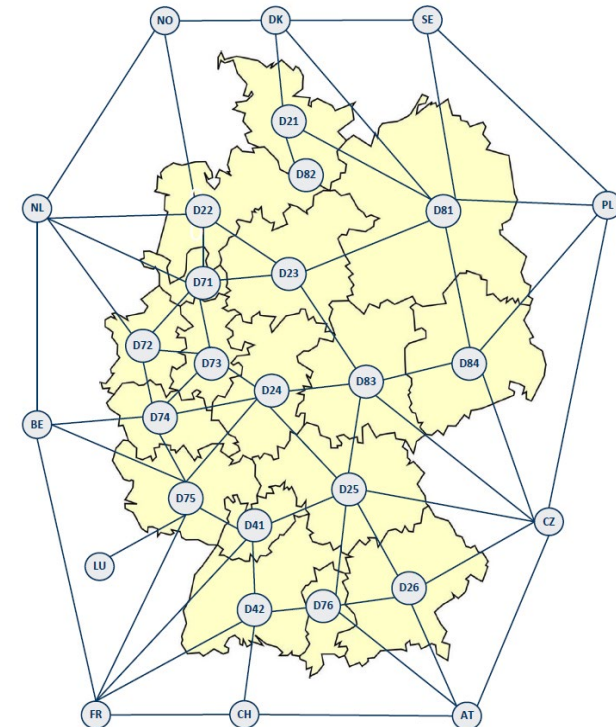
Instanz	Int-Variablen	Nebenbedingungen
Inst-BY-BW-RP	0.04	0.59
Inst-BY-HE-NI-SH-HB-HH	0.04	0.57
Inst-GER	0.04	0.57
Inst-NW-HE-RP-SL	0.02	0.54
Inst-NW-HE-TH-SN	0.02	0.49
Inst-SH-MV-NI-ST-BB-BE	0.08	0.61
Inst-SN-ST-TH-BB-BE-MV	0.03	0.58



- **Größe des Optimierungsproblems für Instanz Deutschland für ein Jahr:**
 - 25.000.000 Nebenbedingungen
 - 4.500.000 ganzzahlige, 16.000.000 kontinuierliche Variablen
- ➔ Laufzeit ~ 2 h
- **Größenunterschied zum Gesamthorizont von 16 Jahren (2015-2030):**
 - Faktor 16 Problemgröße
 - Faktor $2^{16} = 65536$ Laufzeitunterschied!

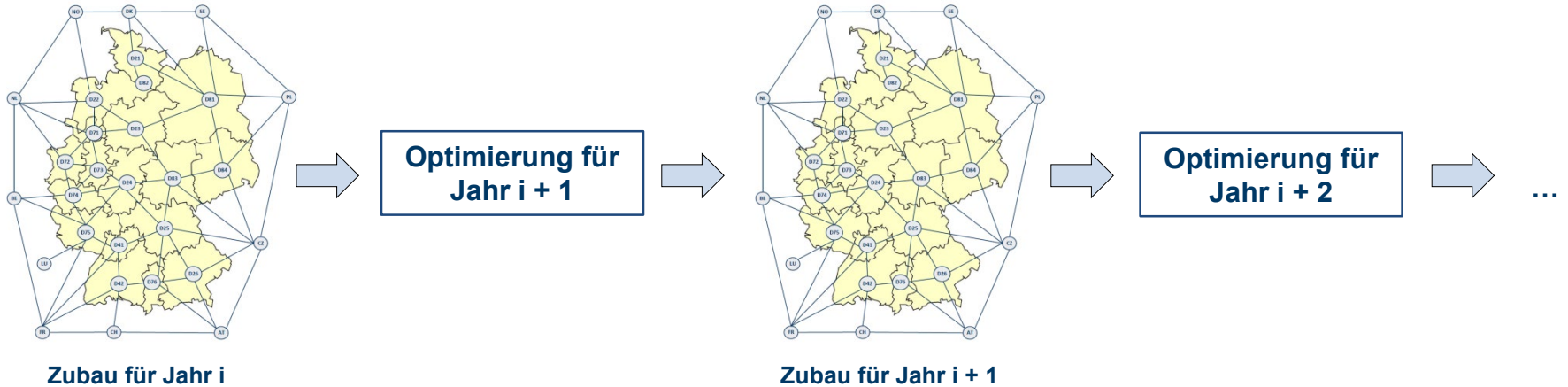
Modellierung der Anrainerstaaten

- Je Anrainerstaat ein Knoten (insgesamt $18 + 11 = 29$ Knoten)
- Ein Superkraftwerk pro Energieträger (Installierte Leistung gemäß Prognosen von TYNDP 2018 - 2030 EUCO)
- Lastdaten gemäß TYNDP 2018
- Residuallast durch Regionenmodell (Anwendung auf nächstgelegene DE-Knoten, die gemeinsam alle EE des Anrainerstaates enthalten):
 - CH \Rightarrow D42
 - AT \Rightarrow D26 und D76
- Kuppelkapazitäten aufbauend auf NTC-Werten aus TYNDP 2018 - NTC2020:
 - Änderung pro Jahr um max. 6,66%
 - Verdopplung des NTC-Wertes bis 2030 möglich $[2, 3] \Rightarrow [4, 1]$ oder $[0, 5]$



Instantansteuerung

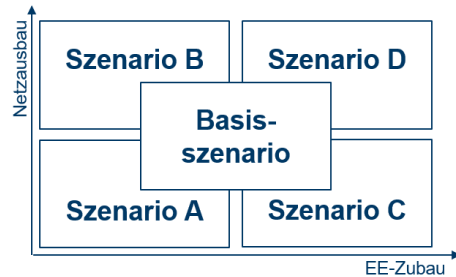
- **Optimierte Lösung eines Jahres als Input bei der Optimierung des nachfolgenden Jahres**



- **Gut geeignet für Zulässigkeitsproblemen**
- **Optimierung?**

Ergebnisse Kraftwerkszubau

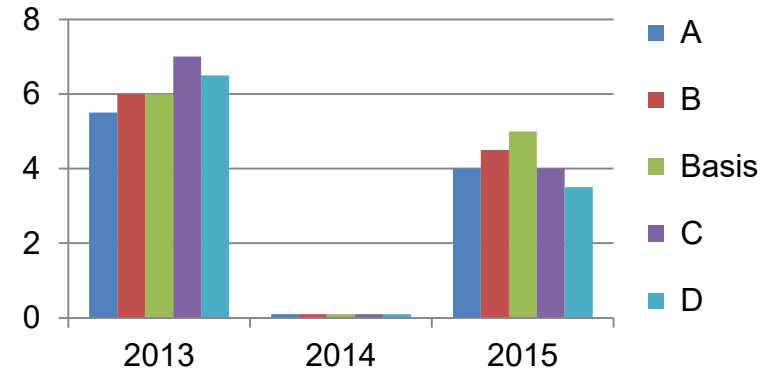
➤ Szenarienrechnungen bis 2030:



[GW]	Referenz 2014	BASIS 2030	Szenario A/B 2030	Szenario C/D 2030
Photovoltaik	37.90	76.39	72.10	85.72
Wind offshore	0.99	16,61	15.71	17.87
Wind onshore	37.62	71.79	68.77	78.33
Geothermie	0.03	0.04	1.15	1.19
Wasserkraft	5.58	6.84	7.05	6.91
Biomasse	6.80	5.96	5.89	5.96
Gesamt	99.04	177.62	170.66	195.98



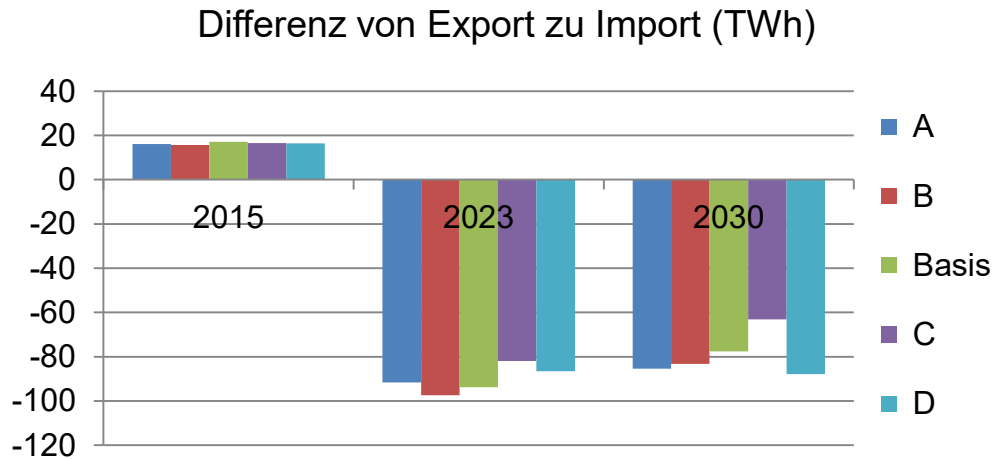
Kraftwerkszubau bis 2030 (GW)



- **Kein Zubau vor 2027!**
- **Instanstansteuerung gut geeignet**
Laufzeit ~ 48 h

Ergebnisse Export/Import

➤ Exporte/Importe für Wetterjahr 2015:



➤ DE vom Netto-Stromexporteur zum Netto-Stromimporteur!

Fazit & Ausblick

- **Ausnutzen der Problemstruktur durch Dekompositionsverfahren**
- **Entkoppelung der zeitliche Blockstruktur durch Adaptives Verfahren**
- **Instantansteuerung für Planungsprobleme bis 2030**
- **Wetterjahre sehr dominant bei der Planung des Kraftwerkzubaues**
- **Deutschland entwickelt sich vom Exportland zum Importland**

Fazit & Ausblick

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!