



Untersuchung der Formulierung von Leistungsflussrestriktionen auf die Rechenzeit einer Engpassmanagement-Simulation

Lukas Hein, Matthias Preuß, Tobias Sous, Albert Moser

15.02.2024

Agenda

Einleitung & Motivation

Grundlagen

Modellierung

Ergebnisse

Zusammenfassung und Ausblick

Agenda

▶ Einleitung & Motivation

Grundlagen

Modellierung

Ergebnisse

Zusammenfassung und Ausblick

Einleitung & Motivation

Motivation und Ziele

Wandel des Energiesystems

- Zunahme der Anzahl lastferner Erzeugungsanlagen → Steigender Übertragungsbedarf
- Verzögerter Netzausbau sorgt für mehr Netzengpässe und steigende Relevanz des Engpassmanagements (EM)
- Aktuelle Fragestellung fordern Berechnung von Strommarkt und EM
 - Überprüfung von effizienten Gebotszonenkonfigurationen; Ausbau-Heuristiken beinhalten Modelle zur Abbildung des EM
- **Fokussierung:** Wie lässt sich eine EM-Simulation möglichst zeiteffizient implementieren?
- Ansatzpunkt bieten verschiedene Formulierung zur Berechnung des Leistungsflusses im Modell → drei bekannte Formulierungen

Leistungsflussrestriktionen

Winkeldifferenzen

PTDF-Matrix

Maschengleichung

Ziele

- Entwicklung und Implementierung eines konsistenten Engpassmanagement-Modells mit verschiedenen Leistungsflussrestriktionen
- Validierung der verschiedenen Leistungsflussrestriktionen und Vergleich der Zeiteffizienz im (n-0) und (n-1) Fall

Agenda

Einleitung & Motivation

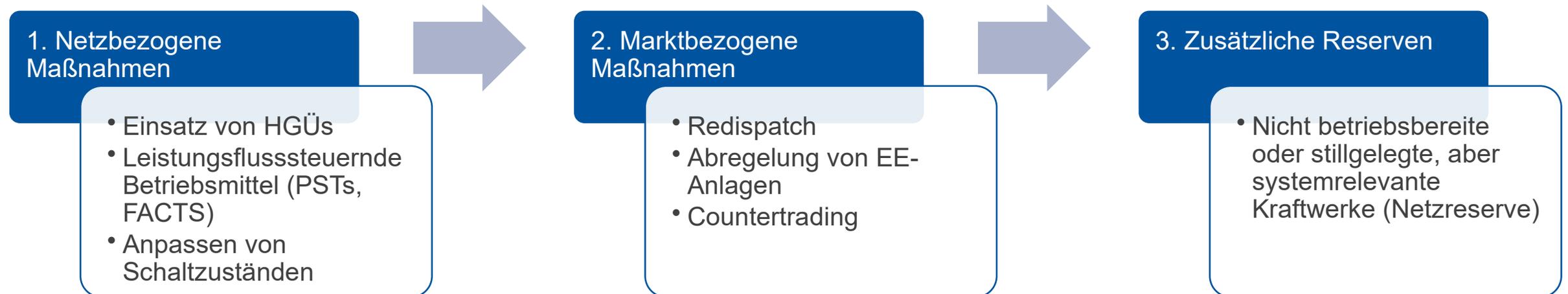
▶ Grundlagen

Modellierung

Ergebnisse

Zusammenfassung und Ausblick

- Strombedingtes Engpassmanagement = Anpassung der Einspeiseleistung von Erzeugungsanlagen zur Vermeidung oder Behebung von Netzüberlastungen ohne die Gesamtsumme der eingespeisten Leistung in einem Marktgebiet zu verändern
- §13 EnWG regelt Priorisierung der Maßnahmen:



- System Operation Guideline fordert Berücksichtigung des (n-1)-Kriteriums
 - Netzbetrieb muss auch nach Ausfall eines Betriebsmittel weiterhin sicher gestellt sein
- Berücksichtigung von (n-0) und (n-1) Ausfällen führen zur Komplexitätssteigerung im Modell

Leistungsflussrestriktionen

- Leistungsfluss in einem Netz stellt sich gemäß physikalischer Gesetze in Abhängigkeit der Leitungsimpedanzen ein
- Maximal zulässiger Leistungsfluss ergibt sich aus thermischen Grenzstrom und darf permanent nicht überschritten werden
- Vollständige Formulierung über trigonometrische AC-Leistungsflussgleichungen nur iterativ lösbar
→ nicht zeiteffizient
- Vereinfachte Berechnung durch Anwendung der linearisierten Wirkleistungsflussberechnung
- Drei verschiedene Formulierungen der Leistungsflussrestriktion zur vereinfachten analytischen Berechnung
- Alle drei Varianten sollten ein näherungsweise identisches Ergebnis liefern

Annahmen linearisierte Wirkleistungsflussberechnung

- Leitungswiderstände vernachlässigbar gegenüber den Leitungsreaktanzen ()
- Flaches Spannungsprofil ()
- Kleine Winkeldifferenzen ()

Leistungsflussrestriktion	Mathematische Formulierung
Winkeldifferenzen	
PTDF-Matrix	
Maschengleichungen	

- Für alle Formulierungen gilt:

Agenda

Einleitung & Motivation

Grundlagen

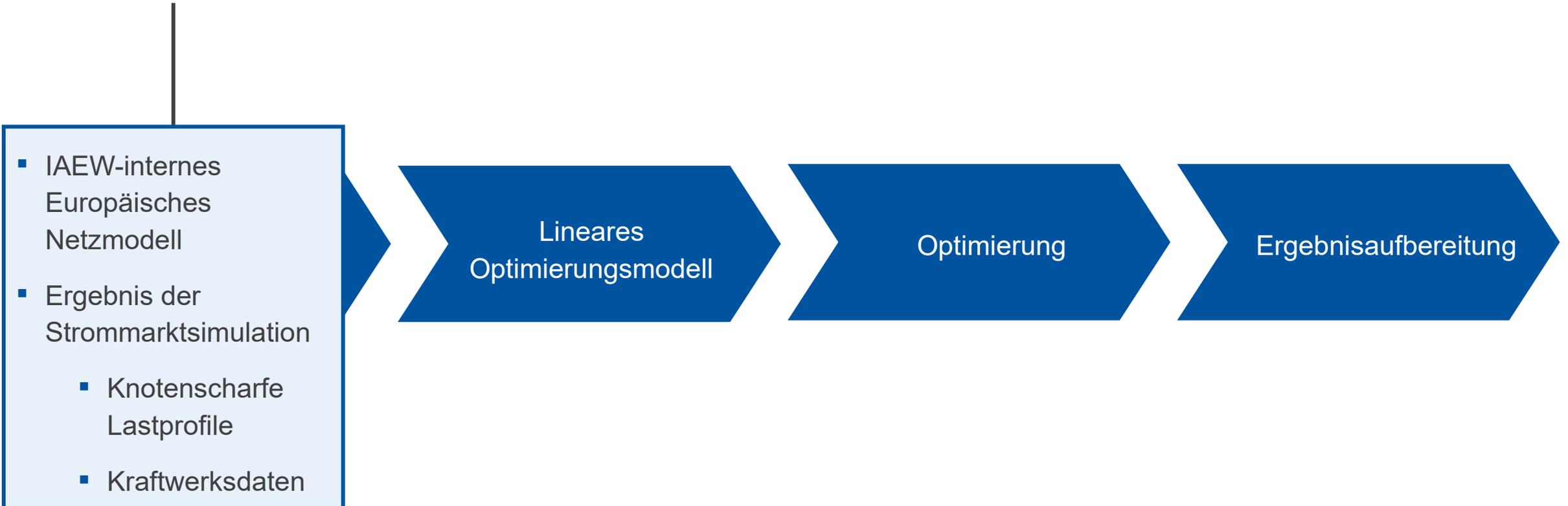
▶ Modellierung

Ergebnisse

Zusammenfassung und Ausblick

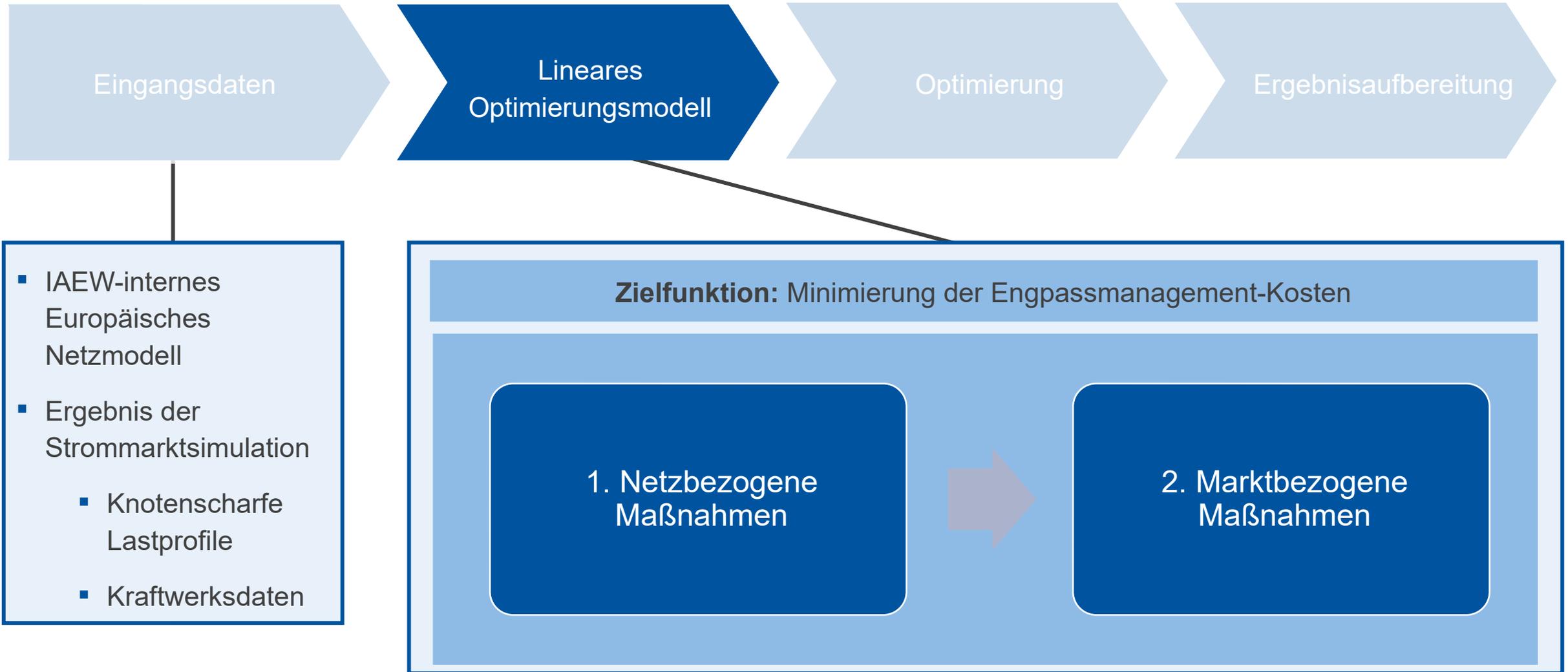
Modellierung

Lineares Optimierungsproblem Engpassmanagement



Modellierung

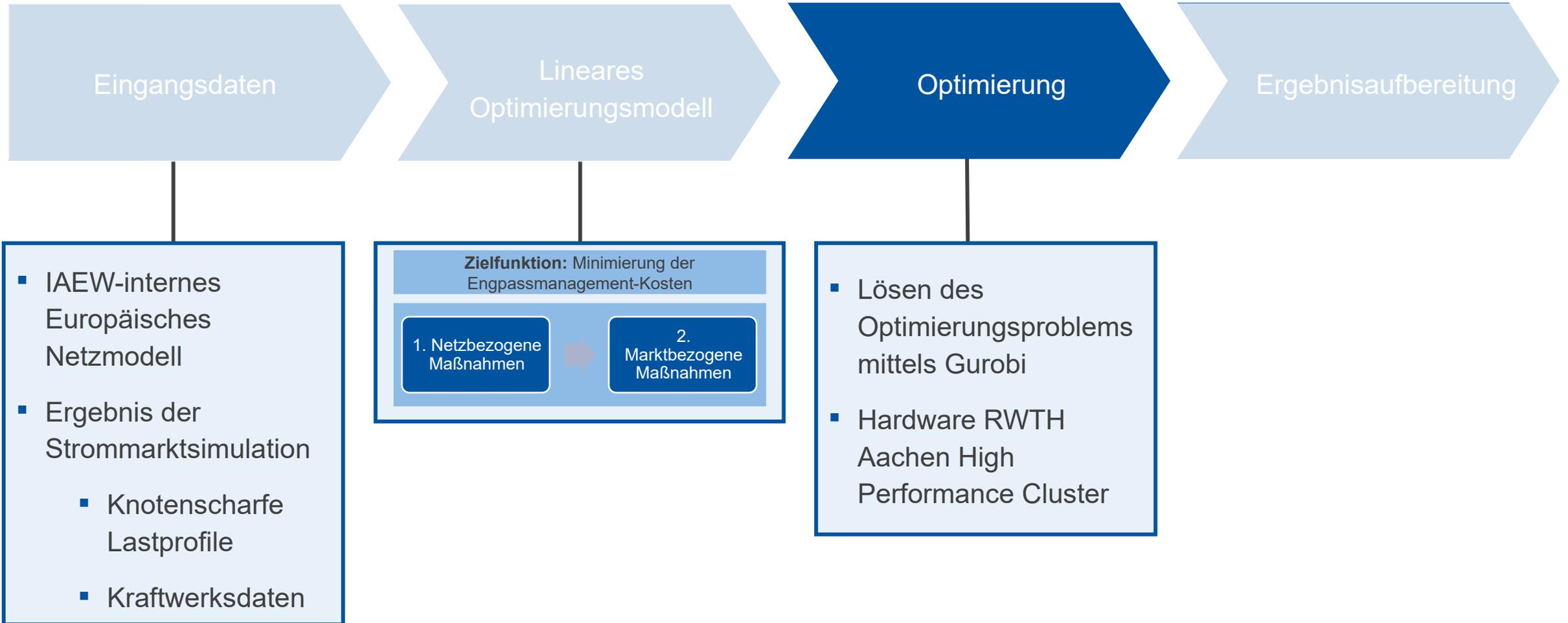
Lineares Optimierungsproblem Engpassmanagement



- IAEW-internes Europäisches Netzmodell
- Ergebnis der Strommarktsimulation
 - Knotenscharfe Lastprofile
 - Kraftwerksdaten

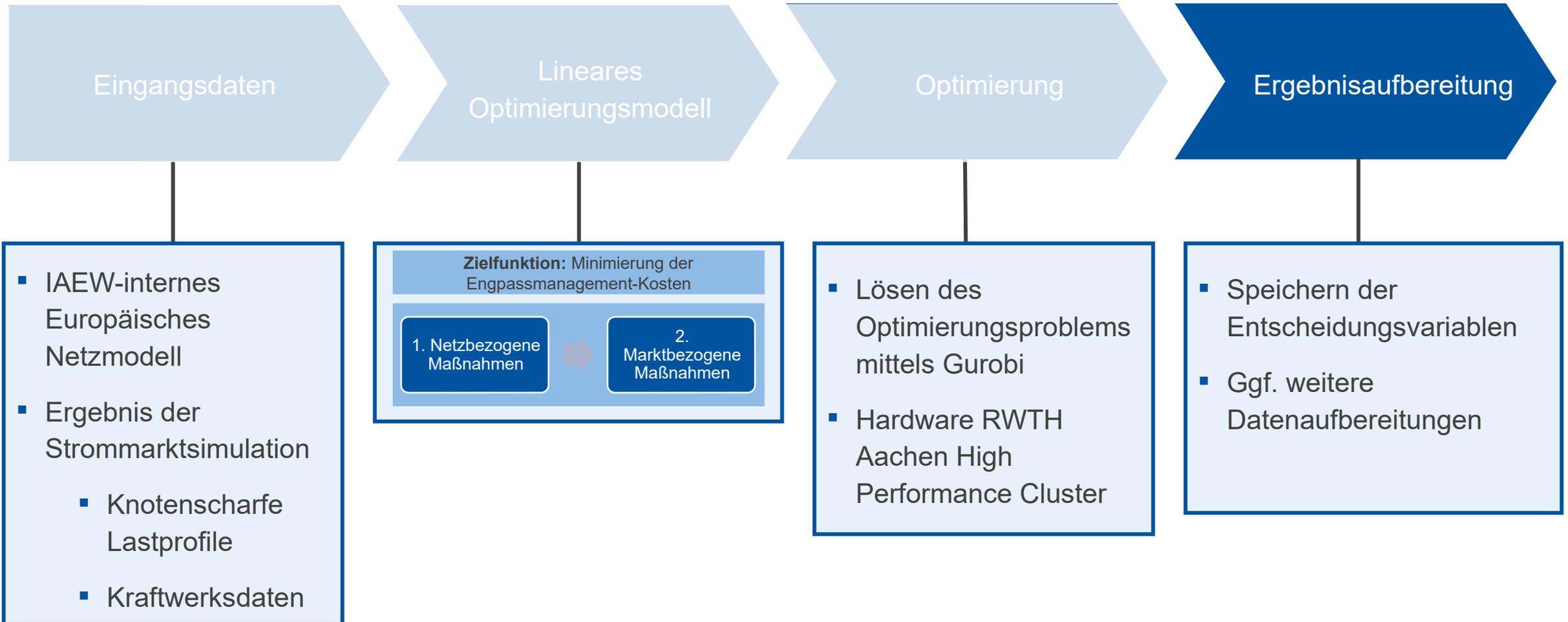
Modellierung

Lineares Optimierungsproblem Engpassmanagement



Modellierung

Lineares Optimierungsproblem Engpassmanagement



Modellierung

Leistungsflussrestriktionen Winkeldifferenzen

Allgemeine Formulierung

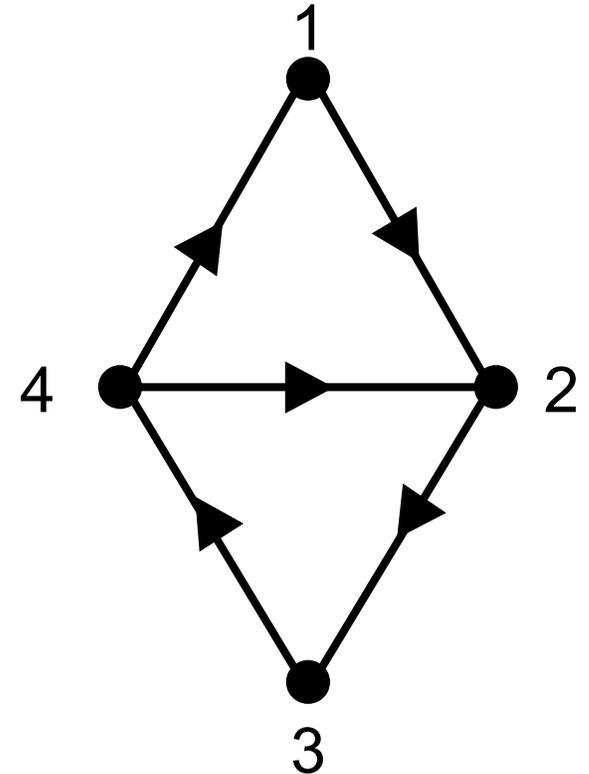
- P_{ij} : Leistungsfluss auf Leitung
- $P_{lim,ij}$: Thermische Grenzleistung der Leitung
- X_{ij} : Reaktanz der Leitung
- θ_i, θ_j : Phasenwinkel der Knotenspannung

➤ Für alle Leitungen im Netz

Beispiel Matrixschreibweise

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{X_{12}} & -\frac{1}{X_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{X_{23}} & -\frac{1}{X_{23}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{X_{34}} & -\frac{1}{X_{34}} \\ -\frac{1}{X_{41}} & 0 & 0 & \frac{1}{X_{41}} \\ 0 & -\frac{1}{X_{42}} & 0 & \frac{1}{X_{42}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{12} \\ P_{23} \\ P_{34} \\ P_{41} \\ P_{42} \end{pmatrix}$$

Beispielnetz



Modellierung

Leistungsflussrestriktionen PTDF-Matrix

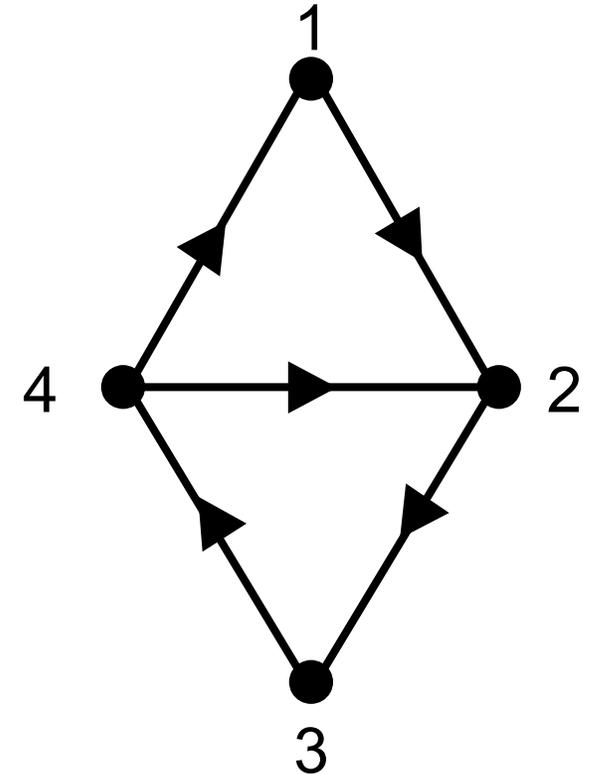
Allgemeine Formulierung

- : Vektor mit Leistungsflüssen auf den Leitungen
- : Thermische Grenzleistung der Leitung
- : Matrix beschreibt linearen Zusammenhang zwischen Einspeiseleistung und Wirkleistungsfluss auf Leitungen
- : Vektor mit Knoten-Leistungsbilanzen

Beispiel Matrixschreibweise

$$\underbrace{\begin{pmatrix} ptdf_{11} & \dots & ptdf_{14} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ ptdf_{51} & \dots & ptdf_{54} \end{pmatrix}}_{\text{PTDF-Matrix}} \cdot \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{12} \\ P_{23} \\ P_{34} \\ P_{41} \\ P_{42} \end{pmatrix}$$

Beispielnetz



Modellierung

Leistungsflussrestriktionen Maschengleichungen

Allgemeine Formulierung

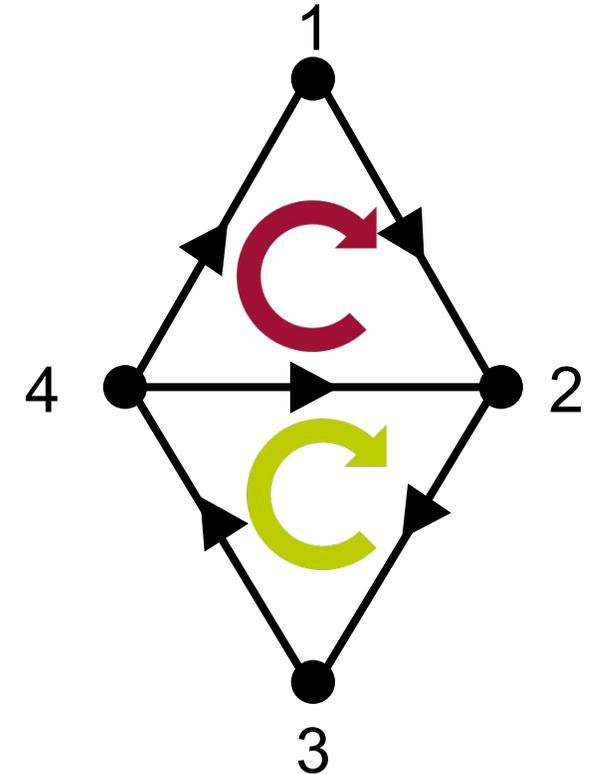
P_{ij} : Leistungsfluss auf Leitung
 $P_{lim,ij}$: Thermische Grenzleistung der Leitung
 X_{ij} : Reaktanz der Leitung
 M_i : Zeile der Matrix zur Beschreibung der unabhängiger Masche

- Anwendung Kirchhoffschen Maschengleichung
- Spannung im Per-Unit System entspricht Multiplikation aus Reaktanz und Leistungsfluss
- Für alle linear unabhängigen Maschen eines Netzes
- Linear unabhängige Maschen mit Algorithmus aus Graphentheorie bestimmen

Beispiel Matrixschreibweise

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_{12} \cdot P_{12} \\ X_{23} \cdot P_{23} \\ X_{34} \cdot P_{34} \\ X_{41} \cdot P_{41} \\ X_{42} \cdot P_{42} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Beispielnetz



Agenda

Einleitung & Motivation

Grundlagen

Modellierung

▶ Ergebnisse

Zusammenfassung und Ausblick

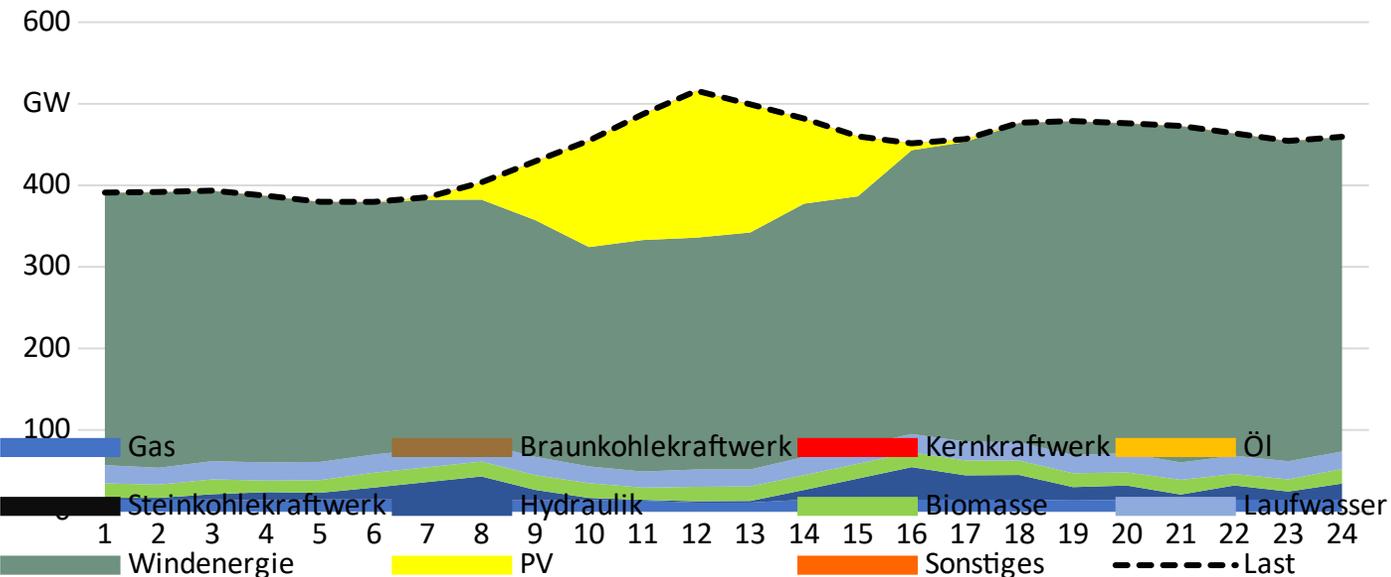
Ergebnisse

Szenariorahmen

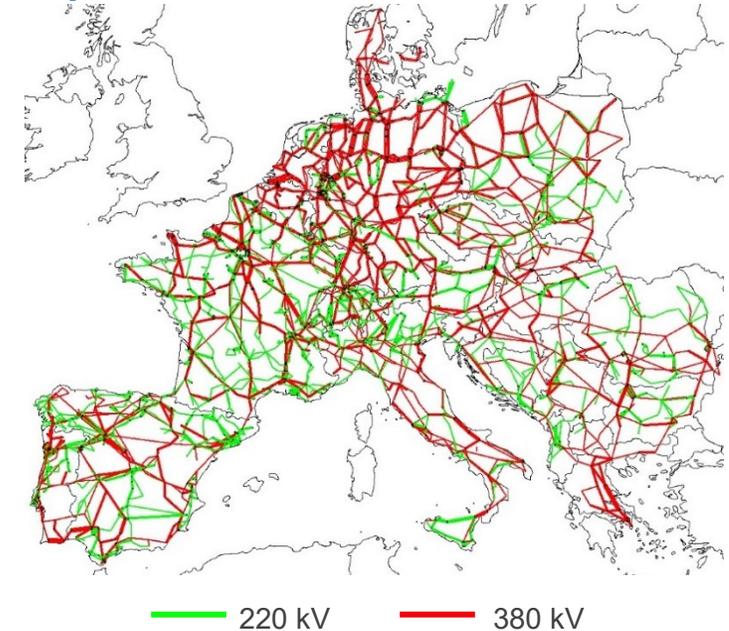
Szenario

- IAEW-internes Modell des europäischen Übertragungsnetzes
- 4263 Knoten, 5993 Leitungen, 2984 Kraftwerke
- Betrachtung der ersten 24 Stunden im Betrachtungsjahr

Eingespeiste Leistung vor Engpassmanagement



Europasnetz

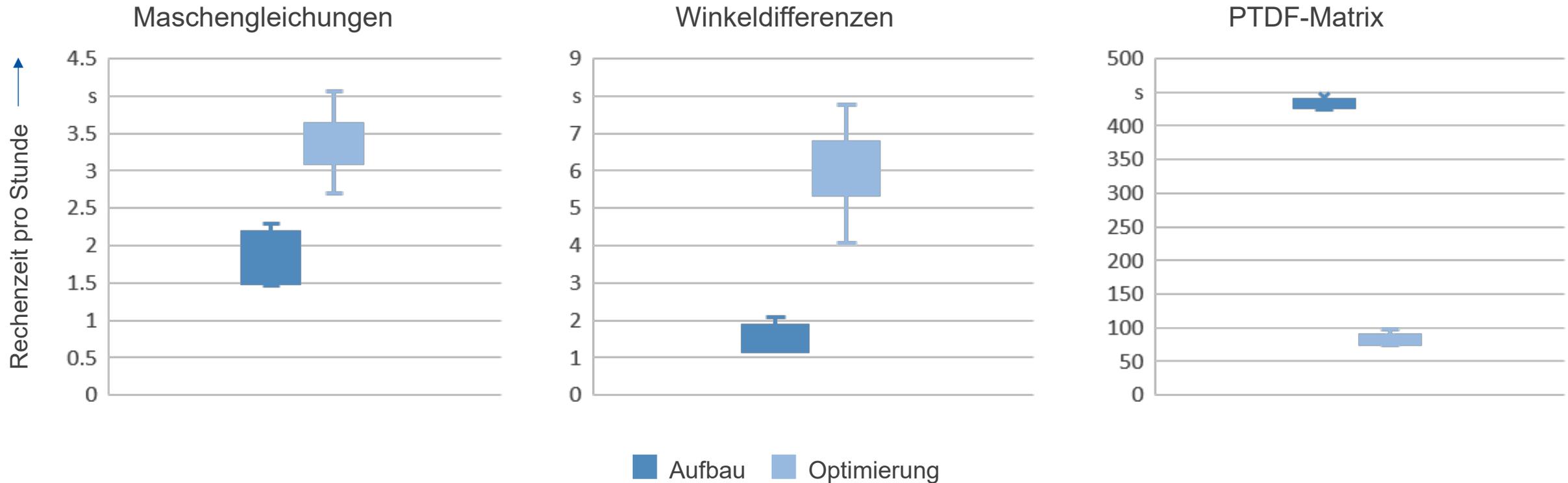


Untersuchungsprogramm

1. Zeitvergleich für drei Formulierungsmöglichkeiten im (n-0) Fall
2. Zeitvergleich für Winkeldifferenzen und Maschengleichungen im (n-1) Fall

Ergebnisse

(n=0) Engpassmanagement-Simulation



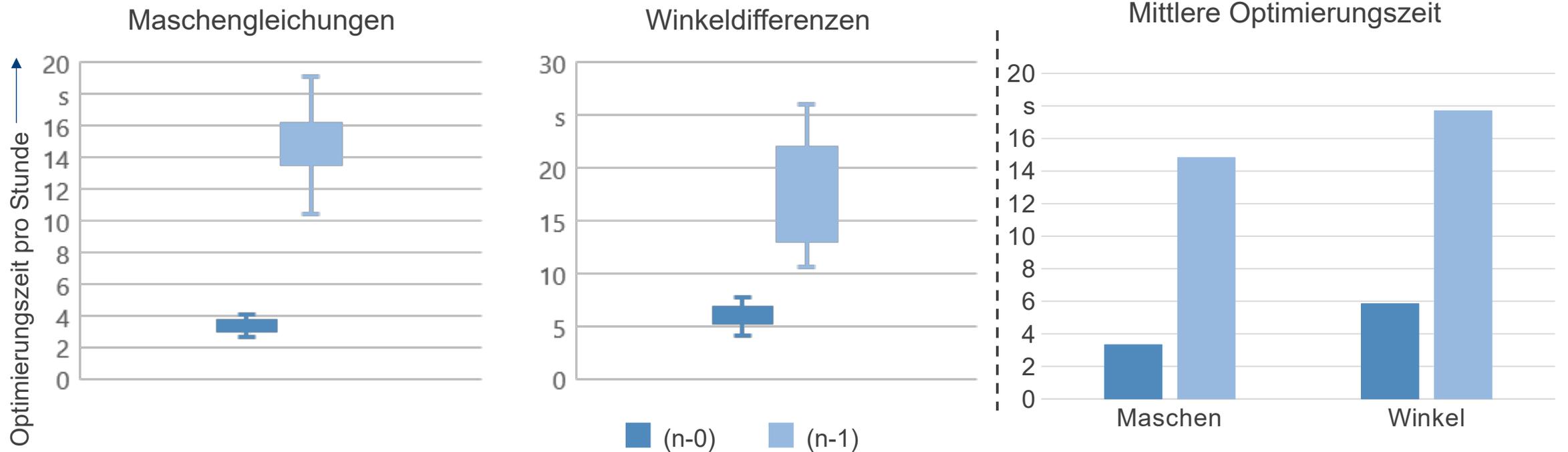
Schlussfolgerung

- Aufbau und Optimierungszeit bei Formulierung über Maschengleichungen und Winkeldifferenzen signifikant schneller als PTDF-Formulierung
- Formulierung über Maschengleichungen im langsamsten Fall noch schneller als über Winkeldifferenzen

Ergebnisse

(n-1) Engpassmanagement-Simulation

- Bestimmung des betrachteten (n-1) Ausfalls anhand des Grundlastflusses nach Marktergebnis
- (n-1) Ausfälle nur innerhalb von Deutschland



Schlussfolgerung

- Bereits signifikante Steigerung der benötigten Optimierungszeit bei Berücksichtigung eines kritischen Ausfalls

Agenda

Einleitung & Motivation

Grundlagen

Modellierung

Ergebnisse

▶ Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

- Wandel des Energiesystems führt zu steigender Komplexität von Engpassmanagement-Modellen
- Verschiedene Formulierungen der Leistungsflussrestriktionen
→ Untersuchung hinsichtlich Zeiteffizienz
- PTDF-Matrix nicht für laufzeitkritische Anwendungen geeignet
- Maschengleichungen geringfügig schneller als Winkeldifferenzen
 - Berücksichtigung der Zeit für die Identifikation der unabhängigen Maschengleichungen
- Wahl der geeigneten Formulierung kann dennoch von der geforderten Fokussierung abhängen
 - Bisher Unterstellung des Aufbaus aller Leistungsflussrestriktionen

Ausblick

- Geschickte Vorfilterung relevanter Nebenbedingungen

**Vielen Dank
für Ihre Aufmerksamkeit**



Lukas Hein, M.Sc.

+49 241 80-96721

l.hein@iaew.rwth-aachen.de