



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN

BOYSEN-TU Dresden-Graduiertenkolleg

Innehalten und Ausblick: Optimierung/Flexibilisierung der konventionellen Kraftwerkseinsatzplanung mit Hilfe von gesellschaftlicher Akzeptanz



Mark Erndt

Graz, 13. Februar, 2014

Friedrich-und-Elisabeth
BOYSEN
Stiftung für Forschung und Innovation



DRESDEN
concept
Exzellenz aus
Wissenschaft
und Kultur

Gliederung

1. Innehalten/Einführung

2. Mathematisches Model

3. Erste Ergebnisse

4. Ausblick

Vorraussetzung für den gesamten Betrachtungszeitraum

> sustainable energy systems >
Boysen-TUD-Graduiertenkolleg

- Sukzessive Abschaltung der Kernkraftwerke bis 2023
- Weiterer Ausbau der Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien
- Vorrangige Einspeisung der volatilen Kraftwerke (PV/Wind)



**Laut
Energiewende-
Konzept**



Abgeleitete Bedingungen

- Die Stromerzeugung der konventionellen Kraftwerke (fossil, nuklear) hängt von der Einspeisung Erneuerbarer Energien ab
- Der weitere Ausbau von PV/Windkraftanlagen wird zunehmend zum wichtigsten Parameter der Stromerzeugungsstruktur
- Die gesellschaftliche Akzeptanz ist Grundvoraussetzung für die Umsetzung der Energiewende



Durchzuführende **Aufgaben** auf dem Weg zum Ziel

›sustainable energy systems›
Boysen-TUD-Graduiertenkolleg

- Prüfung, ob der Kraftwerkspark zukunftstauglich ist
Zeithorizont 2011 – 2022 (Detailanalysen möglich)
- Besteht ein Bedarf an neuen Kraftwerken? Welche?
Wieviele?
- Wo liegt die Grenze in der Stromerzeugung aus
volatilen Kraftwerken?



Wissenschaftliche Herausforderungen

> sustainable energy systems <
Boysen-TUD-Graduiertenkolleg

- Identifikation von benötigten Kraftwerkstypen/-kapazitäten im Hinblick auf
 - kurze An-/Abfahrzeiten
 - hohe zulässige Lastgradienten
- Erkennen von Lücken, die Stromimporte erfordern oder einen Blackout verursachen können



Wissenschaftliche Frage die beantwortet werden soll:

> sustainable energy systems <
Boysen-TUD-Graduiertenkolleg

- Was muss ein kurzfristiges Kraftwerkseinsatzplanungsmodell berücksichtigen, damit Aussagen über die Ausbauziele der Bundesregierung im Hinblick auf
 - versorgungstechnische Eignung
 - gesellschaftliche Akzeptanzgetroffen werden können?



Verwendete Methoden



- Mathematische Modellierung der Wechselwirkungen einzelner Komponenten innerhalb des Kraftwerkssystems
- Ganzheitliche Optimierung

Verwendetes Werkzeug:

- Regelkreis
- GAMS (General Algebraic Modeling System)



Gliederung

1. Innehalten/Einführung

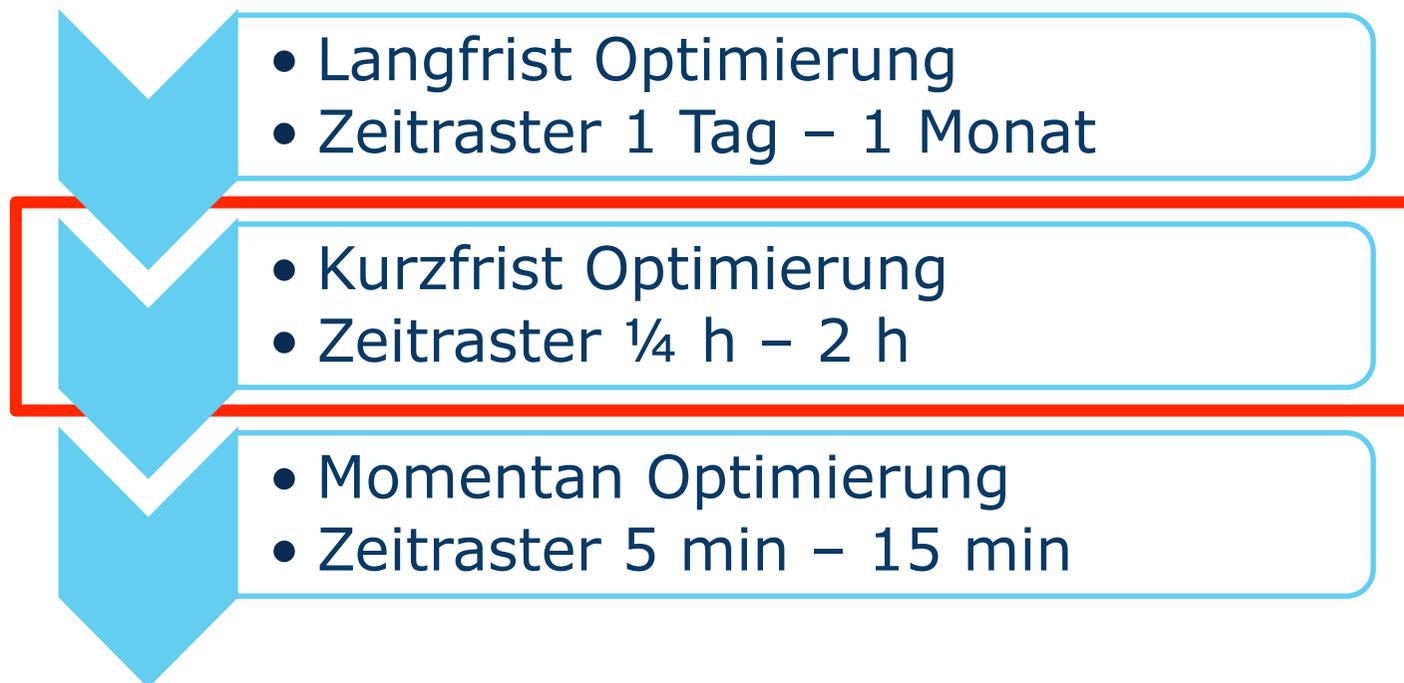
2. Mathematisches Model

3. Erste Ergebnisse

4. Ausblick

Einteilung des Modells in die Kraftwerkseinsatzplanung

Planungsstufen der Kraftwerkseinsatzplanung:

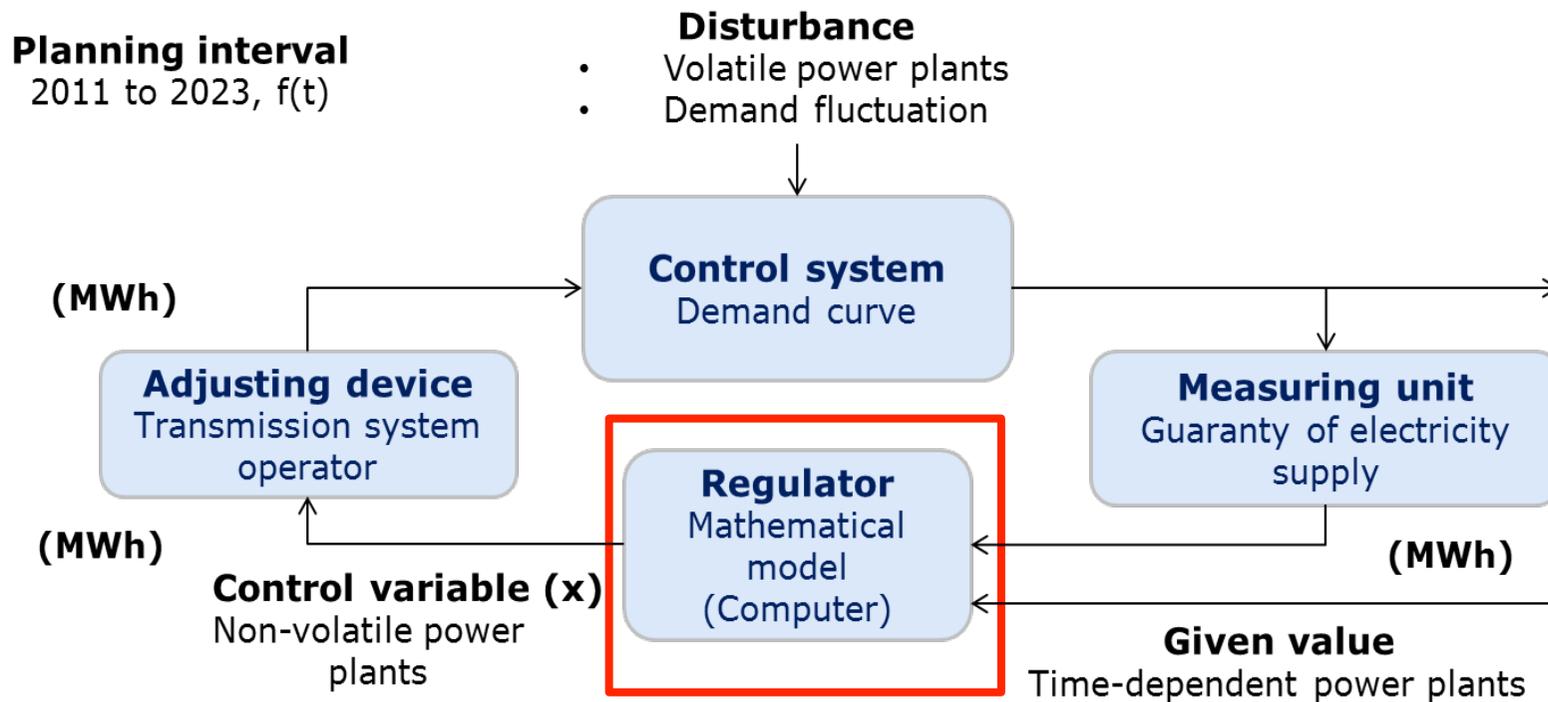


Vgl. Slomski et al.

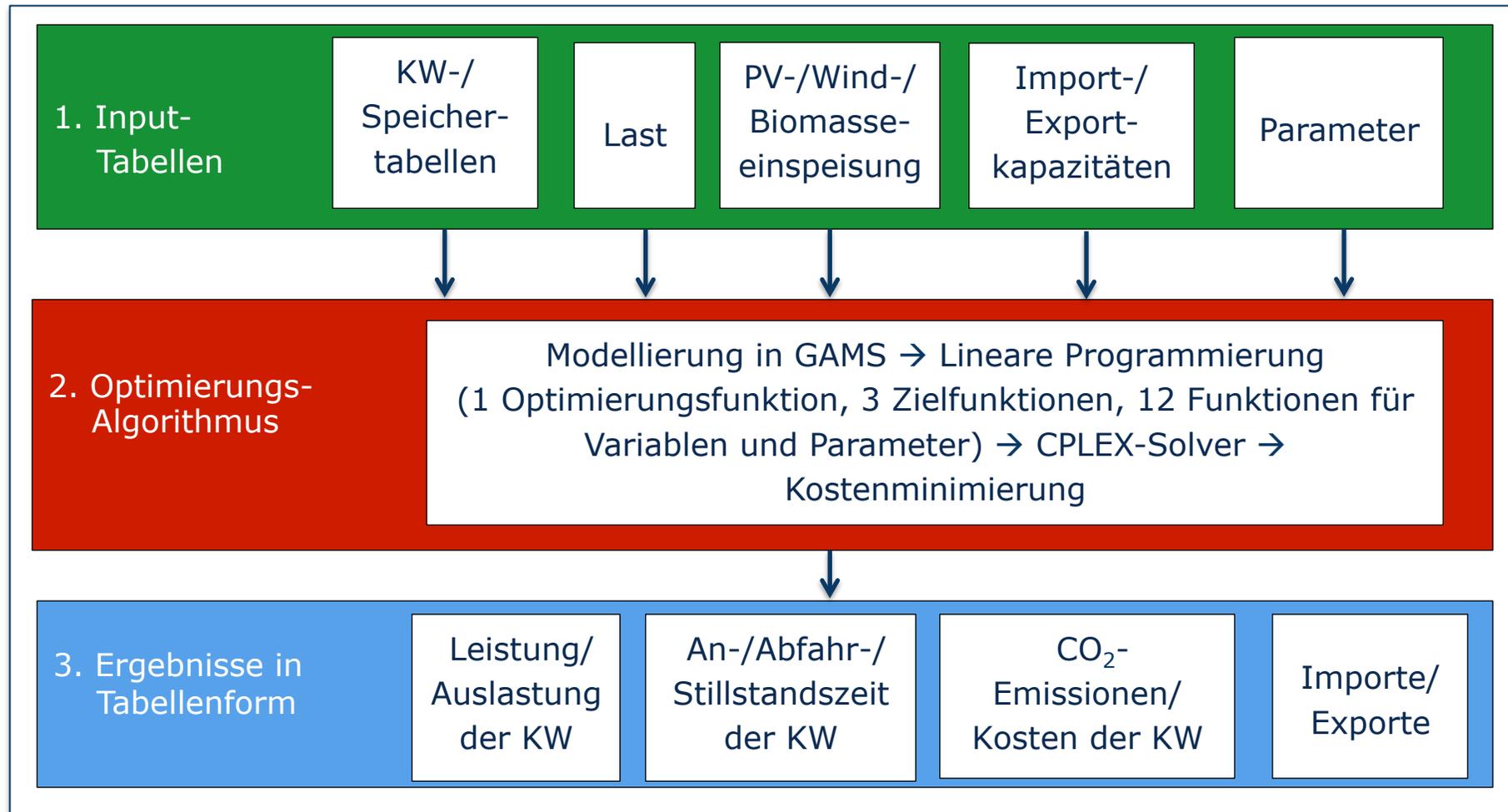
Optimierung/Flexibilisierung der konventionellen Kraftwerkseinsatzplanung mit Hilfe von gesellschaftlicher Akzeptanz

Modellbeschreibung (1/2)

- Mit jeder neuen Information der volatilen Stromeinspeisung und veränderter Nachfrage (Steuervariable) werden die Kontrollvariablen durch den Regler aktualisiert, damit Soll- und Istwert übereinstimmen

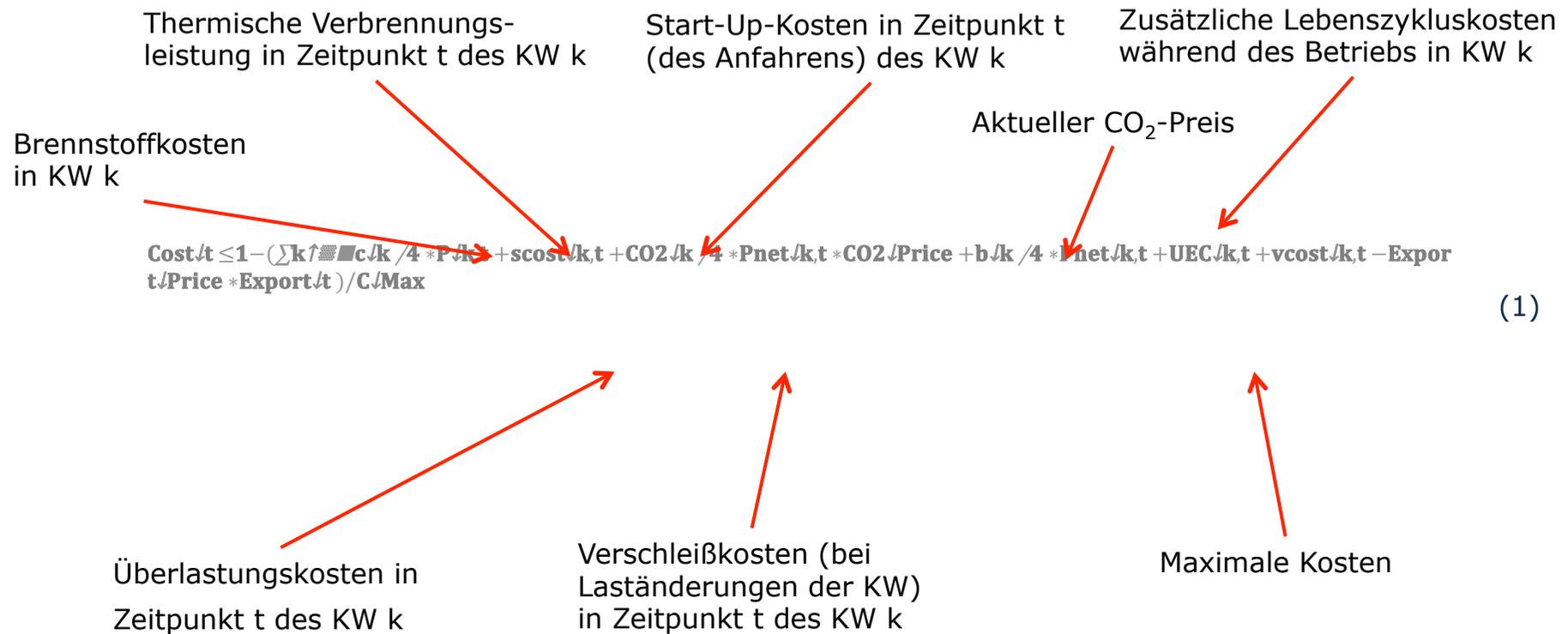


Modellbeschreibung (2/2)



Mathematische Formulierung (1/2)

Zielfunktion Kostenminimierung



(1)

Gliederung

1. Innehalten/Einführung

2. Mathematisches Model

3. Erste Ergebnisse

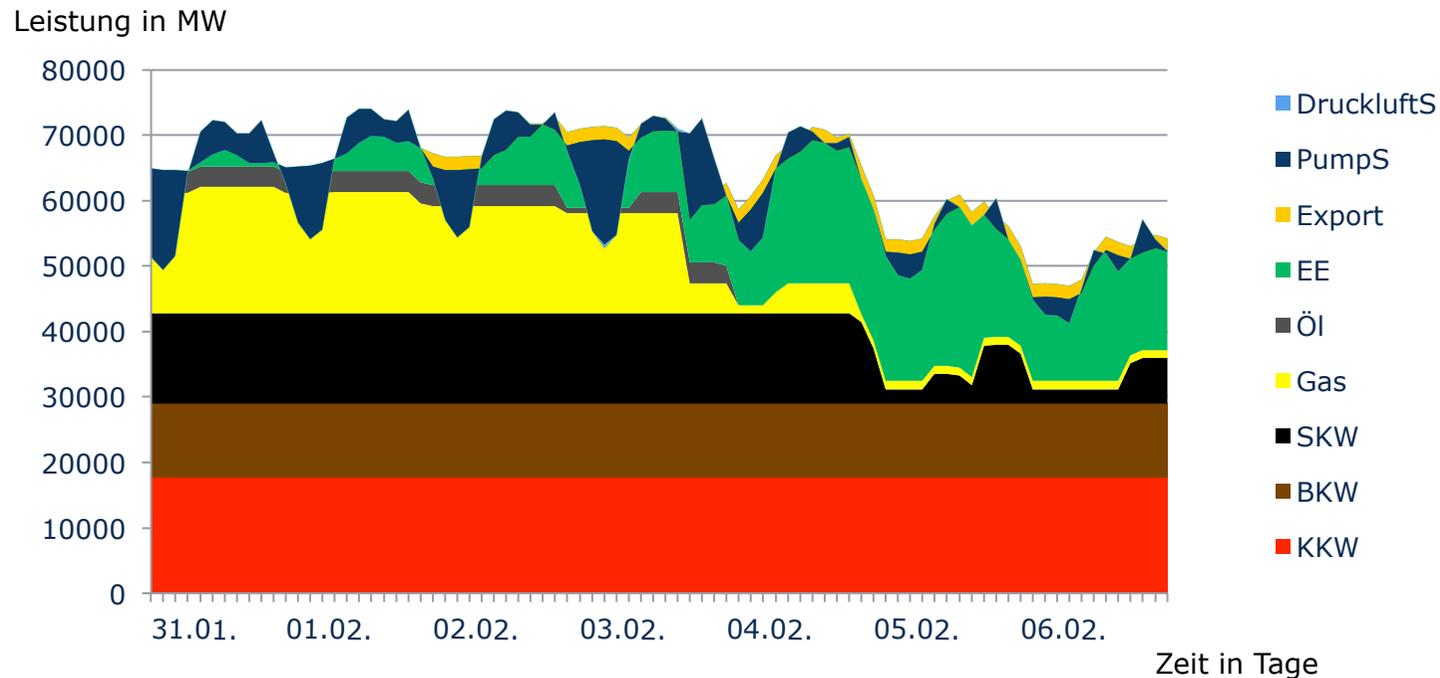
4. Ausblick

Zwischenergebnisse (1/3)

Bei Erreichen der PV/Wind Ausbauziele in 2020 kann die Residuallast zu bestimmten Zeitpunkten auf wenige GW absinken

5.2.2011

34 GW Residuallast bei 20 GW EE-Einspeisung



Eigene Berechnungen in Anlehnung an die Einspeisewerte von Wind/PV

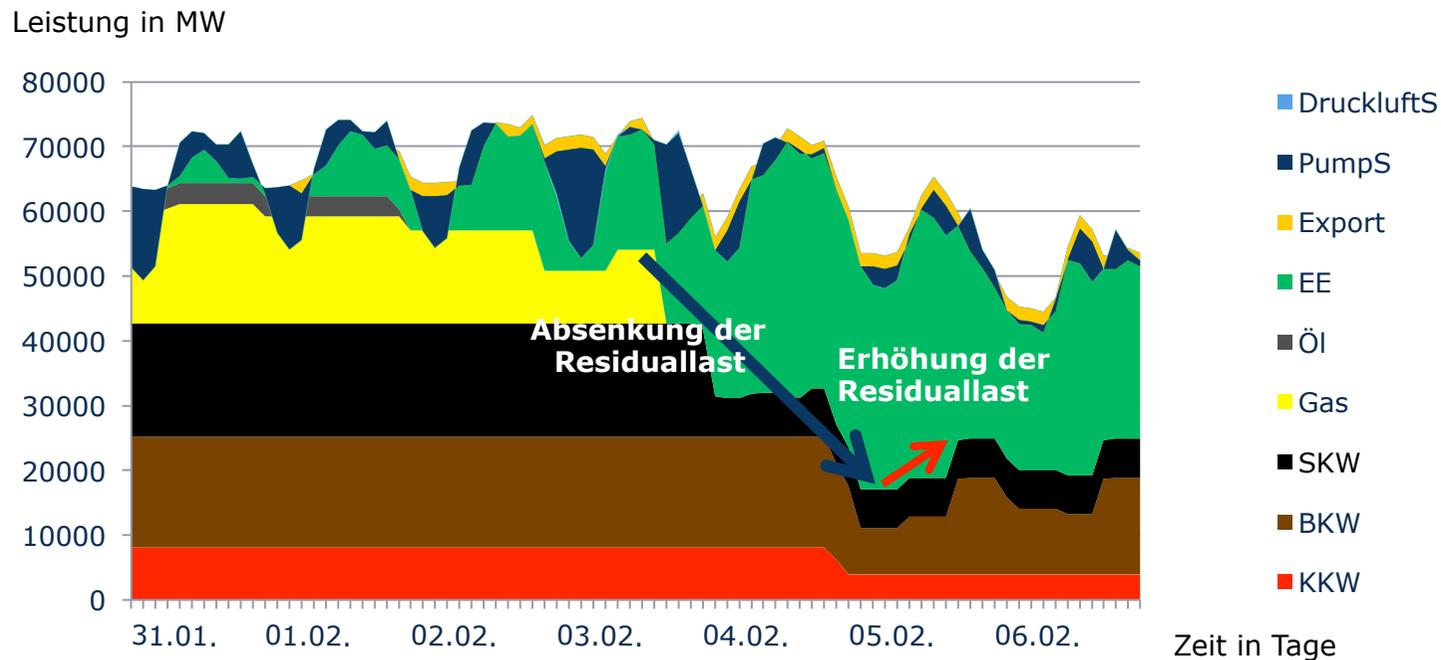
13.02.2014

Optimierung/Flexibilisierung der konventionellen
Kraftwerkseinsatzplanung mit Hilfe von gesellschaftlicher Akzeptanz

Folie Nr. 15

Zwischenergebnisse (2/3)

Extrapolation auf 5.2.2020
 17 GW Residuallast bei 40 GW EE-Einspeisung)



Eigene Berechnungen in Anlehnung an die Einspeisewerte von Wind/PV

Zwischenergebnisse (3/3)

Der weitere Ausbau der Erneuerbaren Energien über das Jahr 2020 wird voraussichtlich zu negativen Residuallasten führen

Folge für den Kraftwerkspark:

- Konventionelle Kraftwerke müssen auf Mindestlast abgesenkt bzw. abgeschaltet werden

Risiko für den Kraftwerkspark:

- Kann der verbleibende Kraftwerkspark bei minimaler Residuallast einen Leistungsanstieg bewältigen?

Eigene Berechnungen in Anlehnung an die Einspeisewerte von Wind/PV

Gliederung

1. Innehalten/Einführung

2. Mathematisches Model

3. Erste Ergebnisse

4. Ausblick

Deutschlandweite Bevölkerungsumfrage

1. Quartal 2014 Befragung der deutschen Bevölkerung zu:

- Kosten
- Emissionen
- Versorgungssicherheit
- Akzeptanz

Mathematische Formulierung (2/2)

Mathematische Formulierung der Randbedingung zur Implementierung von Akzeptanzfaktoren:

- Die Begrenzung der Kosten setzt sich wie folgt zusammen:

$$C_{\text{Aim}} \geq \sum_k \left(c_{k,t} / 4 * P_{k,t} + scost_{k,t} + CO2_{k,t} / 4 * P_{net,k,t} * CO2_{Price} + b_{k,t} / 4 * P_{net,k,t} + UEC_{k,t} + vcost_{k,t} - Export_{Price} * Export_{k,t} \right) \quad (2)$$

C_{Aim} : Maximalwert der Gesamtkosten

Weitere Arbeiten

In welcher Form können weitere Parameter in das mathematische Modell aufgenommen werden?

- Analyse der deutschen Kraftwerke
- Modellverbesserung
- Integration von Akzeptanzfaktoren als zusätzliche Parameter
- Risikobewertung

Innehalten und Ausblick: Optimierung/Flexibilisierung der konventionellen Kraftwerkseinsatzplanung mit Hilfe von gesellschaftlicher Akzeptanz

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Friedrich-und-Elisabeth
BOYSEN
Stiftung für Forschung und Innovation

Literatur (1/2)

Amprion (2014). *Photovoltaikeinspeisung*.

Verfügbar unter: <http://www.amprion.de/photovoltaikeinspeisung> [21.01.2014]

Amprion (2014). *Windenergieeinspeisung*.

Verfügbar unter: <http://www.amprion.de/windenergieeinspeisung> [21.01.2014]

Beckmann, M., Hurtado, A. M. (2012). Sichere und nachhaltige Energieversorgung. In:

M. Beckmann & A.M. Hurtado (Hrsg.). *44. Kraftwerkstechnisches Kolloquium 2012*. Dresden: TK Verlag.

Schubert, D., Selasinsky, A., Meyer, T., Schmidt, A., Thuß, S., Erdmann, N., Erndt, M., Möst,

D. (2013). Gefährden Stromausfälle die Energiewende? Einfluss auf Akzeptanz und Zahlungsbereitschaft. *Energiewirtschaftliche Tageszeitung*, 63(10), 35-39.

Spliethoff, H., Wauschkuhn, A., Schuhbauer, C. (2011). Anforderungen an zukünftige

Kraftwerke. *Chemie Ingenieur Technik*, 83(11), 1792-1804.

Steck, M., Mauch, W., (2008). Technische Anforderungen an neue Kraftwerke im Umfeld

dezentraler Stromerzeugung. *10. Symposium Energieinnovation Graz*, 1-13.

Tennet (2014). *Tatsächliche und prognostizierte Solarenergieeinspeisung*.

Verfügbar unter: <http://www.tennetso.de/site/Transparenz/veroeffentlichungen/>

[netz-kennzahlen/tatsaechliche-und-prognostizierte-solarenergieeinspeisung](http://www.tennetso.de/site/Transparenz/veroeffentlichungen/netzkennzahlen/tatsaechliche-und-prognostizierte-solarenergieeinspeisung) [21.01.2014]

Literatur (2/2)

Tennet (2014). *Tatsächliche und prognostizierte Solarenergieeinspeisung*.

Verfügbar unter: [http://www.tennetso.de/site/Transparenz/veroeffentlichungen/
netzkennzahlen/tatsaechliche-und-prognostizierte-solarenergieeinspeisung](http://www.tennetso.de/site/Transparenz/veroeffentlichungen/netzkennzahlen/tatsaechliche-und-prognostizierte-solarenergieeinspeisung) [21.01.2014]

Tennet (2014). *Tatsächliche und prognostizierte Windenergieeinspeisung*.

Verfügbar unter: [http://www.tennetso.de/site/Transparenz/veroeffentlichungen/
netzkennzahlen/tatsaechliche-und-prognostizierte-windenergieeinspeisung](http://www.tennetso.de/site/Transparenz/veroeffentlichungen/netzkennzahlen/tatsaechliche-und-prognostizierte-windenergieeinspeisung)
[21.01.2014]

TRANSNET BW (2014). *Fotovoltaik*.

Verfügbar unter: [http://www.transnetbw.de/de/kennzahlen/erneuerbare-energien/
fotovoltaik](http://www.transnetbw.de/de/kennzahlen/erneuerbare-energien/fotovoltaik) [21.01.2014]

TRANSNET BW (2014). *Windenergie*.

Verfügbar unter: [http://www.transnetbw.de/de/kennzahlen/erneuerbare-energien/
windenergie](http://www.transnetbw.de/de/kennzahlen/erneuerbare-energien/windenergie) [21.01.2014]

50hertz (2014). *Photovoltaics*.

Verfügbar unter: <http://www.50hertz.com/en/PV.htm> [21.01.2014]

50hertz (2014). *Wind power*.

Verfügbar unter: <http://www.50hertz.com/en/151.htm> [21.01.2014]

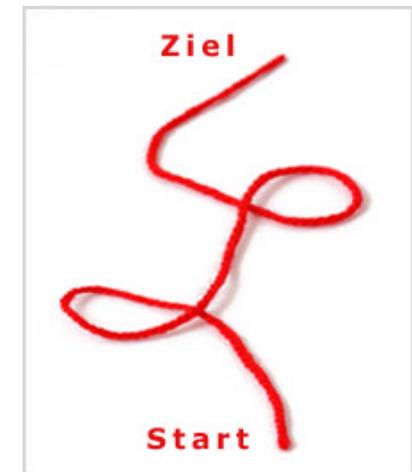
Backup

> sustainable energy systems >
Boysen-TUD-Graduiertenkolleg

Wissenschaftlicher Mehrwert/Nutzen (1/2)

> sustainable energy systems >
Boysen-TUD-Graduiertenkolleg

- Überschaubares Werkzeug mit der Möglichkeit Eingabewerte zu ändern
- Klares, verständliches mathematisches Modell mit dem Kraftwerksparkvarianten berechnet und gesellschaftlich/politisch optimierte Szenarien entwickelt werden können



Wissenschaftlicher Mehrwert/Nutzen (2/2)

› sustainable energy systems ›
Boysen-TUD-Graduiertenkolleg

- Das mathematische Modell kann umgehend Ergebnisse zu folgenden Punkten liefern:
 - Kosten
 - Versorgungssicherheit
 - CO₂ Emissionen
 - Zusätzlich benötigte installierte Leistung
 - Überkapazitäten des Kraftwerksparks



Modellbeschreibung (1/2)

Der Regelkreis wird zur Beschreibung des Problems verwendet um:

- das Zusammenspiel der wichtigsten Komponenten und Akteure des Energiemarktes in Deutschland abzubilden
- eine übersichtliche/technisch korrekte Beschreibung der einzelnen Phänomene/Funktionen/Aufgaben des Kraftwerkssystems zu erstellen
- das Problem und die allgemeine Vorgehensweise anhand eines Grundgerüsts zu veranschaulichen

Modellbeschreibung (2/2)

General Algebraic Modeling System – GAMS



- Erprobtes System, das als „high level system“ zur Optimierung von energiewirtschaftlichen Fragestellungen eingesetzt wird
- Die erzielten Ergebnisse können algebraisch gelesen werden
- Große Datenmengen mit nichtlinearen Zusammenhängen können durch Linearisierung der Gleichungen in GAMS unter Berücksichtigung entsprechender Charakteristika verringert werden:
 - 410 Stromkraftwerke
 - 2 Energiespeichertechnologien

Zwischenergebnisse

Beispiel der verfügbaren Steuergröße (Kohlekraftwerke) im Gesamtsystem

- Alle Kohlekraftwerke können bei einer Mindestleistung von 22.000 MW im Jahr 2011 betrieben werden (zum Vergleich: 55 GW installierte Leistung)

Grenzen der Kohlekraftwerksleistung:

- Maximale Heißreserve (2011: 33.000 MW)
- Minimale Leistung 40 % (für das bestehende Erzeugungssystem)

Risiken der Kohlekraftwerksleistung:

- Abschaltung führt zu veränderten Korrosionsmechanismen/Ausfällen

Eigene Berechnungen in Anlehnung an die Wirkungsgradkurve des Kohlekraftwerks "Schwarze Pumpe" von Vattenfall