

Handel an Regelenergie- und Spotmärkten

Methoden zur Entscheidungsunterstützung
für Netz- und Kraftwerksbetreiber

Derk Jan Swider

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung
Universität Stuttgart

Dissertationsvortrag

10. April 2006



Gliederung

- 1 Einleitung
- 2 Grundlagen zu Regelenergie- und Spotmärkten
- 3 Methoden zur Unterstützung von Handelsentscheidungen
- 4 Anwendungen für Netz- und Kraftwerksbetreiber
- 5 Schlussbetrachtung



Einführung von Regelenergiesmärkten

Bisher monopolistische Beschaffung:

- Regulenergiebeschaffung eines ÜNB über zugehörigen KWB.
- Nicht nachvollziehbare Abrechnung von Systemdienstleistungen.

Heute oligopolistische Beschaffung:

- Öffnung für technisch geeignete Anbieter (Kartellamtsauflage).
- Jeder ÜNB betreibt eigenen internetbasierten Beschaffungsmarkt.

Frage: *Mit welchen Methoden können Kraftwerksbetreiber bei Handelsentscheidungen unter Unsicherheit an Regulenergie- und Spotmärkten unterstützt werden?*



Frequenzabweichungen

Wesentliche Aufgaben eines ÜNB:

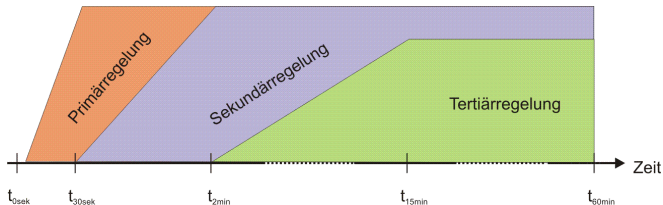
- Frequenzhaltung, Spannungshaltung, Versorgungswiederaufbau.
 - Gleichgewicht von Einspeisung und Entnahme notwendig.
- ▶ Störung der Leistungsbilanz führt zu Abweichungen der Frequenz und im Extremfall zu einem Netzzusammenbruch.

Ursachen von Leistungsbilanzstörungen:

- Ungenaue Last-/Erzeugungsprognosen (Nachfrage, Winddargebot).
 - Unvorhersehbare Ereignisse (Kraftwerksausfälle, Netzstörungen).
- ▶ Regelreserve ist zum Ausgleich von Abweichungen vorzuhalten und gewährleistet so die Versorgungssicherheit.



Regelungsvorgang



Primärregelung: Dezentral und automatisch aufgerufene stabilisierend wirkende Netzfrequenzregelung.

Sekundärregelung: Zentral und automatisch aufgerufene gebietsbezogen wirkende Lastflussregelung.

Tertiärregelung: Zentral und manuell zur Abdeckung von Kraftwerksausfällen aktivierte Reserve.



Bereitstellung von Regelenergie

Thermische Kraftwerke:

Braun-/Steinkohle- und Kernkraftwerke: Bei Betrieb in Teillast sehr gut für Primär- und Sekundärreserve geeignet.

Gaskraftwerke: Mit kurzen Anfahrzeiten und hohen Leistungsänderungsgeschwindigkeiten gut für Minutenreserve geeignet.

Hydraulische Kraftwerke:

Pumpspeicherkraftwerke: Mit besseren Charakteristika als Gaskraftwerke sehr gut für Minutenreserve geeignet.

Laufwasserkraftwerke: Gute Charakteristika in Teillast, aber geringer Stauraum und kaum Entkopplung von Zufluss und Erzeugung.



Marktausgestaltung

Regelenergiemarkt

Auktionstyp:

- Einseitige Nachfragerauktion.
- Gebotspreisverfahren.

Gebotsgestaltung:

- Mehrteilige Preisstellung.

Handelsablauf:

- Täglich (day-ahead).

Spotmarkt

Auktionstyp:

- Zweiseitige Aufrufauktion.
- Einheitspreisverfahren.

Gebotsgestaltung:

- Einteilige Preisstellung.

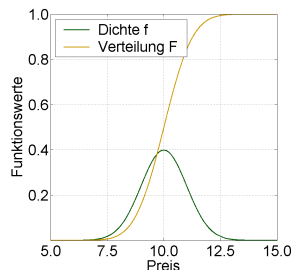
Handelsablauf:

- Täglich (day-ahead).



Entscheidungen bei Risiko

- Methoden zur optimalen und z. T. strategischen Angebotserstellung an Auktionsmärkten werden im Rahmen der Auktionstheorie diskutiert.
- Hier: *Entwicklung von Methoden im Rahmen der Entscheidungstheorie.*
- Bei Risikosituationen kann für eine Zufallsvariable χ eine Dichtefunktion abgeleitet werden:
- Mit dieser kann die Wahrscheinlichkeit $P[\chi \leq x]$ über die Verteilungsfunktion angegeben werden:



$$f^{\chi}(x) : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}_{+}$$

$$F^{\chi}(x) = \int_{-\infty}^x f^{\chi}(x) dx$$



Problembeschreibung

Ziel: *Entwicklung einer mathematischen Methode zur gewinnmaximalen Angebotserstellung am Regulenergiemarkt.*

Annahmen:

- ① Der Bieter versucht die Unvollkommenheit des Marktes zu nutzen.
- ② Der Bieter verhält sich risikoneutral.
- ③ Ein Gebot bildet sich aus Gebotsleistung L^G und Gebotspreis p^G .
- ④ Das gehandelte Produkt ist homogen.
- ⑤ Die Veröffentlichung der Entscheidungen zur Angebotsauswahl erfolgt transparent aber anonym.

Zielfunktion:

$$\max \tilde{\Pi}^R = P^Z(p^M > p^G; L^G) L^G (p^G + \Delta \tilde{p}^\nu(p^G) - c^G)$$



Methodischer Ansatz

- Bei der Angebotserstellung an einer Single-unit Auktion gilt für den erwarteten Gewinn als Funktion des Gebotspreises:

$$\max \tilde{\Pi} = P^Z(p^M > p^G) L^G(p^G - c^G)$$

- Die Zuschlagswahrscheinlichkeit ist bestimmt über:

$$P^Z(p^M > p^G) = 1 - F^M(p^G) = 1 - \int_{-\infty}^{p^G} f^M(p) dp$$

- Gebotsverhalten der gegnerischen Bieter ist mit Dichtefunktion des einheitlichen Marktpreises beschreibbar (*Bayes-Strategie*).

Problematische Aspekte:

- 1 Kein einheitlicher Marktpreis am Regulenergiemarkt.
- 2 Gebot des strategischen Bieters kann Preise beeinflussen.

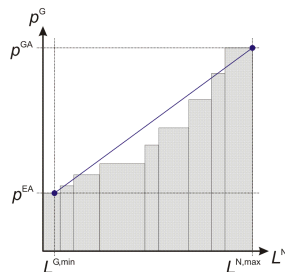


Identifikation relevanter Marktpreise

Frage 1: *Welcher Marktpreis ist bei der Angebotserstellung relevant?*

- Identifikation des für den Nachfrager günstigsten und teuersten Gebots.
- Der Bieter erhält einen Zuschlag, wenn der Gebotspreis unterhalb eines relevanten Marktpreises liegt.
- Für diesen relevanten Marktpreis gilt:

$$p^M = (p^{GA} - p^{EA}) k(L^G) + p^{EA}$$



Lösung 1: *Dichtefunktion des relevanten Marktpreises.*

$$f^M(p^G; L^G) = \int_0^{\infty} f^{EA}(p^G - k(L^G) u) f^{\Delta GEA}(u) du$$



Beeinflussung der relevanten Marktpreise

Frage 2: Wie reagieren Konkurrenten auf negativen Preisimpuls?

- Dichtefunktion der relevanten Marktpreise nicht unabhängig von der Angebotserstellung des strategischen Bieters.
- Hier kann die Preisentwicklung als stochastisches System, beschrieben über ein ARMA(p,q)-Modell, angesehen werden.
- In einem stabilen System klingt die Reaktion ν auf einen Impuls mit der Zeit ab und ist über die Sprungantwort bestimmbar.
- Höhe des Impulses ist über die durch den Gebotspreis des Bieters bestimmte Minderung des Effizienzpreises gegeben.

Lösung 2: Systemansatz zur Preisbeeinflussung.

$$\Delta \tilde{p}^\nu(p^G) = \nu \mathbb{P}[p^{\text{EA}} > p^G] (p^G - \mathbb{E}[p^{\text{EA}} | p^{\text{EA}} > p^G])$$



Exemplarische Anwendung

- Bieter steht vor der Entscheidung, in welchen Markt welche noch freie Leistung zu welchem Preis angeboten werden soll.
- Beschränkung auf zwei Märkte für Minutenreserve (RWE und E.ON) sowie einen Spotmarkt (EEX).
- Hier: *Vergleichende Betrachtung der simultanen und sequentiellen Angebotserstellung an mehreren Märkten.*
- Kraftwerkseinsatzplanung nur im Ansatz; auf die Abbildung von Verfügbarkeiten, Anfahrzeiten und -kosten, etc. wird verzichtet.

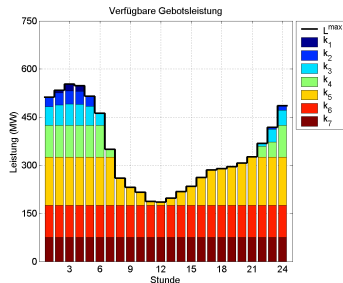
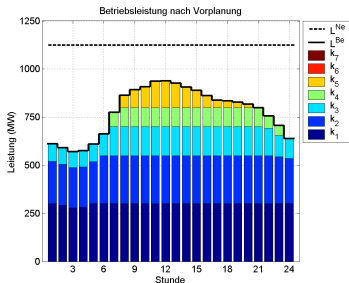
Kraftwerksportfolio:

- k_1 bis k_4 Steinkohlekraftwerke.
- k_5 Gas- und Dampfkraftwerk.
- k_6 Pumpspeicherkraftwerk.
- k_7 Gasturbine.

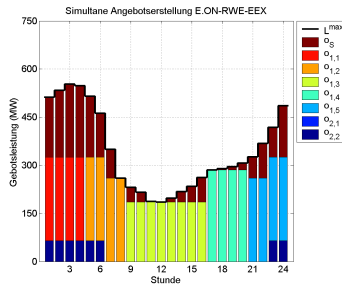
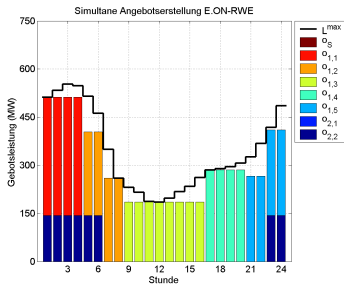


Vorplanung und verfügbare Gebotsleistung

- Mit dem definierten exemplarischen Kraftwerkportfolio sind langfristige Lieferverträge zu erfüllen.
- Differenzleistung ist gewinnmaximal an Regelenergie- und Spotmärkten anzubieten.



Simultane Entscheidungen

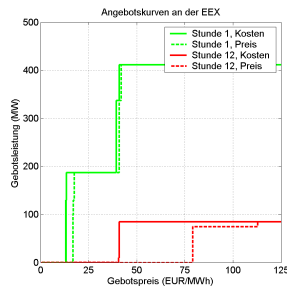
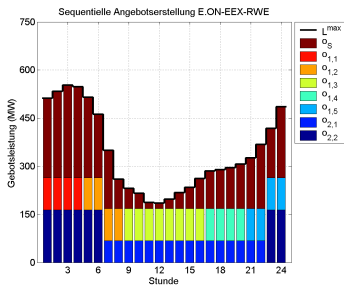


Wesentliche Ergebnisse:

- 1 In einzelnen Stunden ist die Angebotserstellung am Spotmarkt vorteilhaft gegenüber der an den Regelenergiemärkten.
- 2 Erwarteter Gewinn ist maßgeblich durch die Angebotserstellung an den Regelenergiemärkten bestimmt.



Sequentielle Entscheidungen (E.ON-EEX-RWE)

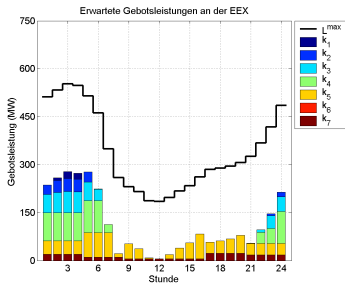
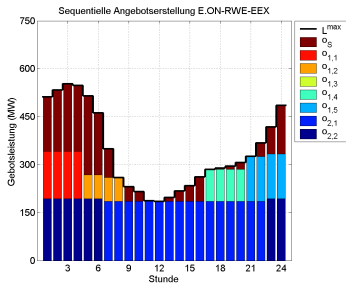


Wesentliche Ergebnisse:

- 1 An vorgelagerten Märkten wird mit höheren Leistungen und Preisen geboten als an den folgenden Märkten, d. h. weitere Möglichkeiten zur Vermarktung werden berücksichtigt.
- 2 Handelssequenz hat Auswirkungen auf das Gebotsverhalten.



Sequentielle Entscheidungen (E.ON-RWE-EEX)



Wesentliche Ergebnisse:

- 1 Durch Verschiebung des Spotmarkts ans Ende der Handelssequenz wird die Liquidität an den Regelenergiemärkten erhöht.
- 2 Weiterhin sinkt der erwartete Gewinn des Bieters in Folge des sich ändernden optimalen Gebotsverhaltens.



Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden Methoden entwickelt, die bei Handelsentscheidungen an Regelernergie- und Spotmärkten unterstützen können.

Wesentliche Ergebnisse der Anwendung:

- 1 Die Angebotserstellung an Regelergiemärkten ist für einen Kraftwerksbetreiber lukrativ (Markt ist unvollkommen, geringe Arbitrage).
- 2 Die Handelssequenz hat Auswirkungen auf das Gebotsverhalten der Bieter (höhere Gebotspreise an zeitlich vorgelagerten Märkten).

Möglichkeiten der methodischen Weiterentwicklung:

- 1 Integration der entwickelten Methoden in bestehende Programme zur Handels- bzw. Kraftwerkseinsatzplanung.
- 2 Berücksichtigung weiterer Märkte in Europa und damit beispielsweise von Auktionen zum Engpassmanagement.

