International Institute for Applied Systems Analysis
IIASA www.iiasa.ac.at

science for global insight

Preisbildung im Regelenergiemarkt

Ein Vergleich von Linearen, Gemischt-Ganzzahligen und Spieltheoretischen Ansätzen

Daniel HUPPMANN, André ORTNER, Christoph GRAF
14. Symposium Energieinnovation 2016
Technische Universität Graz

IIASA

TU WIEN

WU WIRTSCHAFTSUNIVERSITÄT WIEN VIENNA UNIVERSITY OF ECONOMICS AND BUSINESS

JOHNS HOPKINS WHITING SCHOOL of ENGINEERING

Die Bedeutung des Regelenergiemarkts

Für den sicheren Betrieb des Stromsystems ist die Vorhaltung von Regelenergiekapazität notwendig

Die Bereitstellung von Regelenergie verursacht für Kraftwerksbetreiber Opportunitätskosten in zwei Richtungen (Just & Weber, 2008; Ortner & Graf, 2013)

- Entgangene Profite, wenn Grenzkosten < Spotmarktpreis
- Reale Verluste aufgrund der *must-run*-Bedingung auf Mindestlast, wenn Grenzkosten > Spotmarktpreis

⇒ Regelenergiepreise und Spotpreise beeinflussen sich wechselseitig!

Es lässt sich theoretisch zeigen, dass daher *midload*-Kraftwerke am besten geeignet sind, Regelenergie bereitzustellen (Richter, 2012)

Weitere Schwierigkeiten (in diesem Vortrag nicht berücksichtigt):

⇒ Stochastik (Regelenergiekontrakte längerfristig als Spotmarkt)

⇒ Unterschiedliche Typen von Regelenergie (Primär, Sekundär, Minuten)

⇒ Strategisches Verhalten (Annahme: Marktteilnehmer bieten zu Grenzkosten)

Das technische Versagen des Regelenergiemarktes

Der soziale Planer & der profitorientierte Kraftwerksbetreiber, und dazwischen klafft eine Lücke...

Zwei Ansätze zur Bestimmung des optimalen Kraftwerkseinsatzes:

- ⇒ Der soziale Planer (die Elektrotechnikerin) löst ein Kostenminimierungsproblem (*unit-commitment problem*)
- ⇒ Der Markt (die Betriebswirtin) löst ein Gleichgewichtsproblem zwischen nicht-kooperativen Kraftwerksbetreibern

Aufgrund der Anfahrkosten & nicht-konvexer technischer Restriktionen führen die Ansätze nicht zum selben Ergebnis!

- ⇒ Die Opportunitätskosten werden durch die „Marktpreise“ nicht notwendigerweise abgedeckt (Anreizinkompatibilität)
- ⇒ Das Marktdesign (die Volkswirtin) empfiehlt Auktionen, aber das behandelt nur das Symptom, nicht das zugrundeliegende Problem!

Gleichgewicht in Spielen mit ganzzahligen Variablen (I)

In Spielen mit ganzzahligen Entscheidungen gibt es (i.A.) keine markträumenden Preise und kein Nash-Gleichgewicht

Das Problem: in ganzzahligen Optimierungsproblemen existieren keine Dualvariablen (aka Schattenpreise, Lagrange-Multiplikatoren)

⇒ Dadurch lassen sich keine markträumenden Preise finden und es existiert (in vielen Fällen) kein Nash-Gleichgewicht

⇒ Standard-Solver (CPLEX, GUROBI, etc.) liefern Output, der oft fälschlicherweise als Schattenpreise interpretiert wird (O'Neill et al., 2005)

In zentralisierten Strommärkten (z.B. USA: *Independent System Operators*) ist diese Problematik als „*uplift problem*" bekannt (Gribik, Hogan & Pope, 2007)

⇒ In Europa aufgrund des „*energy-only*" Marktdesigns von geringerer Bedeutung, aber für den Regelenergiemarkt von großer Relevanz

⇒ Wir adaptieren einen Ansatz zur Lösung eines Gleichgewichts in binären Strategien (Huppmann & Siddiqui, 2015)

Gleichgewicht in Spielen mit ganzzahligen Variablen (II)

Wir adaptieren den Ansatz von Huppmann & Siddiqui (2015) zur exakten multikriteriellen Lösung von ganzzahligen Spielen

Alternative Ansätze zur Lösung von binären Gleichgewichtsproblem:

⇒ alle Permutationen (*brute-force*) oder Linearisierung des Lösungsraums...

Der neue Ansatz:

⇒ Wir leiten die Bedingungen 1. Ordnung (Karush-Kuhn-Tucker, KKT) für beide möglichen Werte der binären Entscheidung ab (anstelle einer Linearisierung der Variablen)

⇒ Anreizkompatibilität wird explizit als Nebenbedingung hinzugefügt

⇒ Eine multikriterielle Zielfunktion dient als Auswahlmechanismus

Der Mechanismus ist ein mehrstufiges Optimierungsproblem und...

... Erlaubt eine Abwägung zwischen Markteffizienz (Wohlfahrt) und den Kompensationszahlungen für ein stabiles Gleichgewicht

... Kann als gemischt-ganzzahliges lineares Problem

Regelenergie als mehrstufiges binäres Problem

Die Bereitstellung von Regelenergie ist ein Optimierungsproblem mit binären Entscheidungen auf mehreren Ebenen

Teilnahme am Regelenergiemarkt?

Ja

⇓

Kraftwerk über gesamten Zeitraum in Betrieb

⇓

Erzeugung je Stunde t durch KKT-Bedingungen (Mindestlast berücksichtigt)

⇓

Profit im Fall der Bereitstellung von Regelenergie

Nein

⇓

Kraftwerk in Stunde t in Betrieb?

Ja

⇓

Erzeugung und Profit in Stunde t durch KKT-Bedingungen

Nein

⇓

Keine Erzeugung, Abfahrkosten = Verlust (wenn in Stunde t–1 in Betrieb)

Vergleich der Profite zur Bestimmung der optimalen Entscheidung in Stunde t

⇓

Summe über alle Stunden t ergibt Profit im Fall der Nichtteilname

Vergleich der Profite zur Bestimmung der optimalen Entscheidung

Mehrstufige binäre Gleichgewichtsprobleme

Das Spiel zwischen mehreren Erzeugern kann als gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsproblem gelöst werden

Das Gleichgewichtsmodell für den Regelenergiemarkt besteht aus...

... einer Zielfunktion (Wohlfahrtsmaximierung):

⇒ ein Walrasianischer Auktionator setzt Spot- und Regelenergiepreis

... und Nebenbedingungen:

⇒ je Marktteilnehmer ein Gleichungssystem, das dessen jeweils optimale Entscheidung abbildet (gegeben den Marktpreisen)

⇒ Markträumungsbedingungen

Dieses Problem kann als gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsproblem mit Standard-Methoden gelöst werden (Huppmann & Siddiqui 2015)

⇒ Die Zahl der binären Variablen steigt zwar nicht exponentiell, aber große Anwendungen sind numerisch (noch) zu aufwendig

Drei Regelenergie(markt)modelle im Vergleich

Wir vergleichen drei Modellansätze für den Regelenergiemarkt: linear, gemischt-ganzzahlig und binäres Gleichgewicht

- Das lineare Modell:

  ⇒ Wohlfahrtsoptimum = Marktgleichgewicht
  aber technische Restriktionen durch Linearisierung vereinfacht

- Das Kraftwerkeinsatzmodell (*unit-commitment model*)

  ⇒ Technische Restriktionen sind berücksichtigt
  aber Lösung (Wohlfahrtsoptimum) ist i.A. kein Marktgleichgewicht

- Das Marktgleichgewichtsmodell in binären Strategien

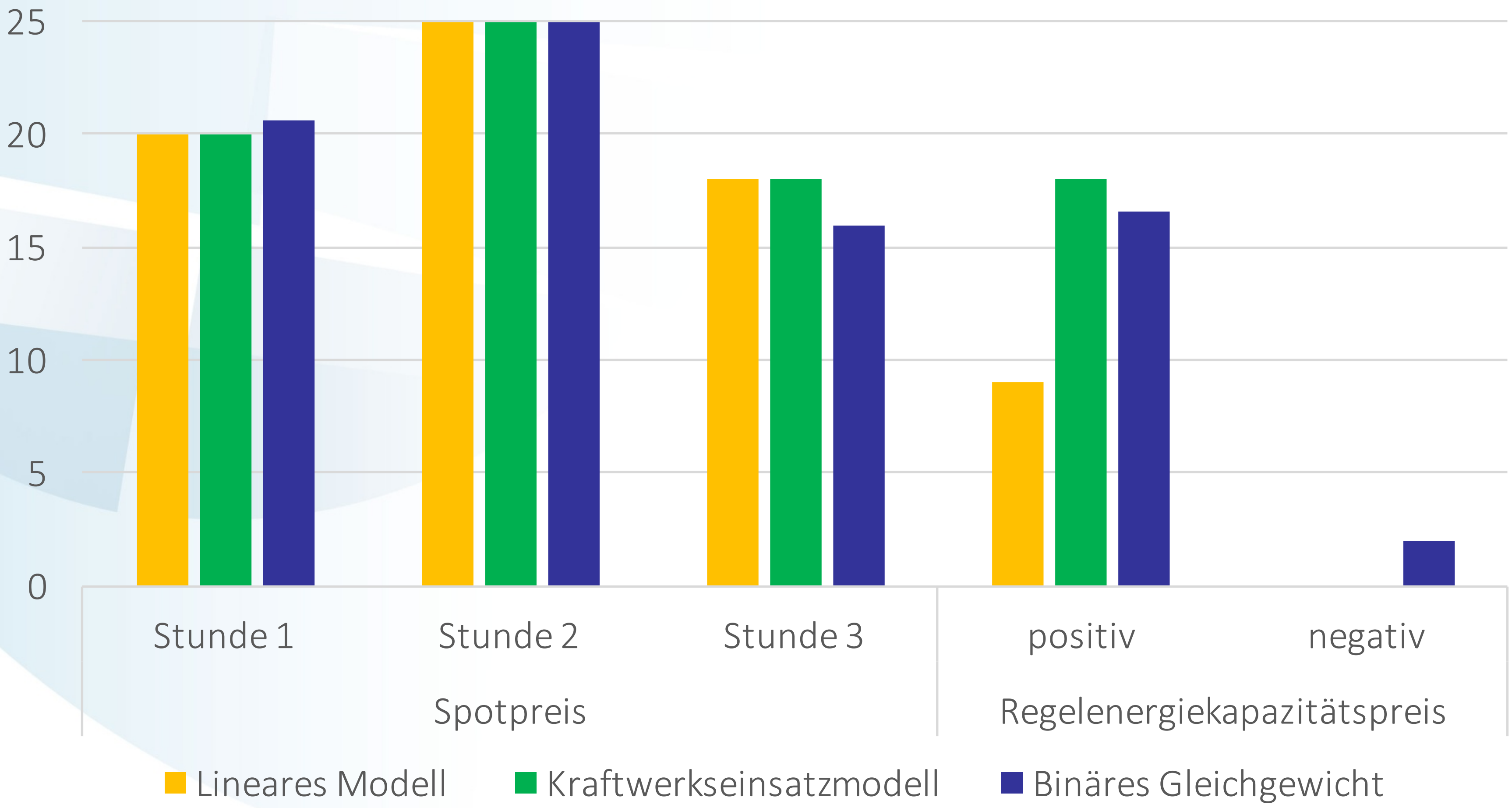
  ⇒ Technische Restriktionen und individuelle Anreize berücksichtigt
  aber wegen numerische Komplexität (vorläufig) nur stilisiertes Beispiel

Wir vergleichen die Modelle anhand eines stilisierten Datensatzes
mit neun Erzeugern und drei Zeitperioden

⇒ Der Kraftwerkseinsatz (und die Systemkosten) über alle Modelle gleich!

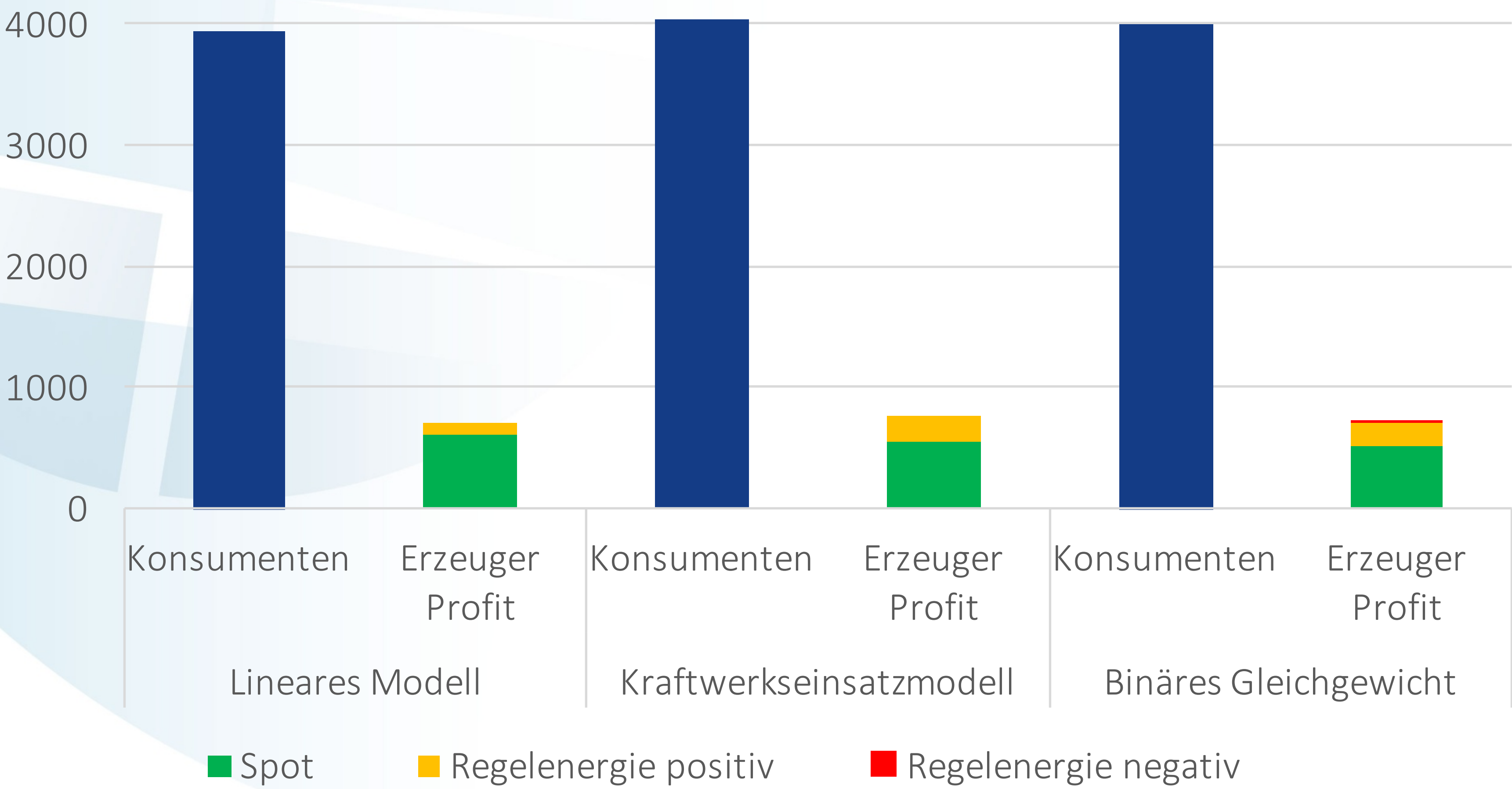
Vergleich der „Preise“ zwischen den Modellen

Es gibt keine klare Tendenz, ob Preise in bestimmten Ansätzen höher oder niedriger sind



Konsumentenausgaben und Profite der Erzeuger

Die Konsumentenausgaben sinken (im untersuchten Fall) durch die Berücksichtigung der spieltheoretischen Anreize



Zusammenfassung und Ausblick

Wir präsentieren ein Regelenergiemarktmodell, das technische Restriktionen und ökonomische Anreize explizit kombiniert

Aktuelle Modelle für den Regelenergiemarkt vernachlässigen entweder

... die technischen Aspekte (Anfahrkosten, Mindestlast) oder

... das Spiel zwischen nicht-kooperativen Marktteilnehmern (Wohlfahrtsmaximierung, dadurch keine Garantie der Anreizkompatibilität)

⇒ Aufgrund der Nichtkonvexität gibt es (u.U.) keine markträumenden Preise, und das ist keine Frage des Marktdesigns (Auktionen, etc.)!

Wir adaptieren einen Ansatz zur Lösung von Nash-Gleichgewichten in nicht-kooperativen Spielen mit binären Strategien (Huppmann & Siddiqui, 2015)

Wir vergleichen dieses Modell hinsichtlich der "Preise" mit den Standardansätzen

Offene Fragen und die nächsten Herausforderungen:

⇒ Numerische Skalierbarkeit, Anwendbarkeit auf reale Daten,...

⇒ Änderung des Kraftwerkseinsatzes (und der Kosten) durch „bessere" Preise?

International Institute for
Applied Systems Analysis
IIASA www.iiasa.ac.at

science for global insight

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Daniel HUPPMANN, IIASA und Johns Hopkins University
André ORTNER, *Energy Economics Group*, TU Wien
Christoph GRAF, Institut für Regulierungsökonomie, WU Wien

Dr. Daniel Huppmann
Research Scholar – Energy Program
International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)
Schlossplatz 1, A-2361 Laxenburg, Austria
huppmann@iiasa.ac.at
+43 (0) 2236 807 - 572
http://www.iiasa.ac.at

IIASA

Bibliographie

Paul R. Gribik, William W. Hogan, and Susan L. Pope. *Market-clearing electricty prices and energy uplift*: Working Paper, John F. Kennedy School of Government, Harvard University, 2007. http://www.hks.harvard.edu/fs/whogan/Gribik_Hogan_Pope_Price_Uplift_123107.pdf

Daniel Huppmann and Sauleh Siddiqui. *An exact solution method for binary equilibrium problems with compensation and the power market uplift problem*: DIW Discussion Paper 1475, 2015. http://diw.de/sixcms/detail.php?id=diw_01.c.502763.de
GAMS codes available at www.github.com/danielhuppmann/binary_equilibrium

Sebastian Just and Christoph Weber. Pricing of reserves: Valuing system reserve capacity against spot prices in electricity markets. *Energy Economics* 30(6):3198-3221, 2008. http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2008.05.004

Richard P. O'Neill, Paul M. Sotkiewicz, Benjamin F. Hobbs, Michael H. Rothkopf, and William R. Stewart Jr. Efficient market-clearing prices in markets with nonconvexities. *European Journal of Operational Research* 164(1):269-285, 2005. http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2003.12.011

André Ortner and Christoph Graf. Multi-market unit-commitment and capacity reserve prices in systems with a large share of hydro power: A case study. *10th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, 2013. http://dx.doi.org/10.1109/EEM.2013.6607336

Jan Richter. *On the interaction between product markets and markets for production capacity: The case of the electricity industry*: EWI Working Paper 2011/09, 2011.

Backup slides

The math – Obtaining “duals” in integer programming

Duals in integer programs using a two-step procedure

O’Neill et al. (2005) proposed a two-step approach:

⇒ Solve the MIP using standard methods (Problem 1)

⇒ Solve the linearized LP model (Problem 2), fixing discrete/binary variables at optimal level x^* as determined by Problem (1)

$$
\begin{aligned}
\min_{x,y}\ & f(x,y) && (1)\\
\text{s.t.}\ & g(x,y) \le 0 \\
& x \in \{0,1\}^n \\
& y \in \mathbb{R}^m
\end{aligned}
\qquad\qquad
\begin{aligned}
\min_{x,y}\ & f(x,y) && (2)\\
\text{s.t.}\ & g(x,y) \le 0 && (\lambda)\\
& x = x^* && (\mu)\\
& (x,y) \in \mathbb{R}^{n+m}
\end{aligned}
$$

⇒ The dual variables (λ^*, μ^*) to Problem (2) can be interpreted as market-clearing, Walrasian prices!

⇒ But these are not actually the correct prices for Problem (1)!

An exact solution method & the "switch value"

Rather than focusing on relaxations of binary variables, let's look at the loss from deviation ("switch value")

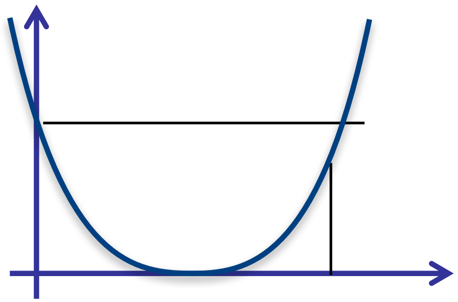
We introduce the term "switch value κ" to describe the absolute (not marginal) loss when deviating from the optimal value of x^*:

$$f\left(x^*, y^*\right) = f\left(x^\times, y^\times\right) - \kappa$$

$$\text{where } x^\times = 1 - x^* \text{ and } y^\times = \arg\min_y f\left(x^\times, y\right)$$

Applying this idea to the simple example:

$$\begin{array}{ll} \min_x & (x-0.5)^2 \\ \text{s.t.} & x \in \{0,1\} \end{array}$$



$$\mu(x^* = 0) = -1$$
$$\mu(x^* = 1) = 1$$
$$\kappa = 0$$

⇒ The switch variable can be interpreted as a shadow price!

⇒ It can be used as a measure of "disequilibrium" (Çelebi & Fuller, 2016)

The core idea of our solution approach

We compute the optimal value w.r.t. the continuous variables for both states of the binary variable simultaneously

Assume that KKT conditions are necessary and sufficient w.r.t. continuous variables y_i for fixed binary x_i and given rivals actions y_{-i}, then…

…we compute the optimal response for *both states* of variable x_i

assuming $x_i=1$:

$$\begin{aligned} 0 = \nabla_{y_i} f_i\Big(\mathbf{1}, \widetilde{y}_i^{(\mathbf{1})}, y_{-i}(x_{-i})\Big) + \widetilde{\lambda}_i^{(\mathbf{1})} \nabla_{y_i} g_i\big(\mathbf{1}, \widetilde{y}_i^{(\mathbf{1})}\big) \quad &, \quad \widetilde{y}_i^{(\mathbf{1})} \text{ (free)} \\ 0 \geq g_i\big(\mathbf{1}, \widetilde{y}_i^{(\mathbf{1})}\big) \quad &\perp \quad \widetilde{\lambda}_i^{(\mathbf{1})} \geq 0 \end{aligned}$$

and assuming $x_i=0$:

$$\begin{aligned} 0 = \nabla_{y_i} f_i\Big(\mathbf{0}, \widetilde{y}_i^{(\mathbf{0})}, y_{-i}(x_{-i})\Big) + \widetilde{\lambda}_i^{(\mathbf{0})} \nabla_{y_i} g_i\big(\mathbf{0}, \widetilde{y}_i^{(\mathbf{0})}\big) \quad &, \quad \widetilde{y}_i^{(\mathbf{0})} \text{ (free)} \\ 0 \geq g_i\big(\mathbf{0}, \widetilde{y}_i^{(\mathbf{0})}\big) \quad &\perp \quad \widetilde{\lambda}_i^{(\mathbf{0})} 1 \geq 0 \end{aligned}$$

And then, we check which strategy is optimal by comparing pay-offs:

$$f_i\big(\mathbf{1}, \widetilde{y}_i^{(\mathbf{1})}, y_{-i}(x_{-i})\big) \lesseqgtr f_i\big(\mathbf{0}, \widetilde{y}_i^{(\mathbf{0})}, y_{-i}(x_{-i})\big)$$

The core idea of our solution approach (II)

We use the switch value to the incentive-compatibility check to replace the cumbersome "if-then" conditions

The "if-then" conditions to determine the individually optimally binary decision are very painful to compute in large-scale problems:

$$
\begin{aligned}
f_i\big(\mathbf{1}, \widetilde{y}_i^{(\mathbf{1})}, y_{-i}(x_{-i})\big) &< f_i\big(\mathbf{0}, \widetilde{y}_i^{(\mathbf{0})}, y_{-i}(x_{-i})\big) & \Rightarrow \quad & x_i^* = 1 \\
f_i\big(\mathbf{1}, \widetilde{y}_i^{(\mathbf{1})}, y_{-i}(x_{-i})\big) &> f_i\big(\mathbf{0}, \widetilde{y}_i^{(\mathbf{0})}, y_{-i}(x_{-i})\big) & \Rightarrow \quad & x_i^* = 0 \\
f_i\big(\mathbf{1}, \widetilde{y}_i^{(\mathbf{1})}, y_{-i}(x_{-i})\big) &= f_i\big(\mathbf{0}, \widetilde{y}_i^{(\mathbf{0})}, y_{-i}(x_{-i})\big) & \Rightarrow \quad & x_i^* = \{0, 1\}
\end{aligned}
$$

We use the switch value κ and introduce a compensation payment ξ:

$$
\begin{aligned}
f_i\Big(\mathbf{1}, \widetilde{y}_i^{(\mathbf{1})}, y_{-i}\Big) + \kappa_i^{(\mathbf{1})} - \zeta_i^{(\mathbf{1})} - \kappa_i^{(\mathbf{0})} + \zeta_i^{(\mathbf{0})} &= f_i\Big(\mathbf{0}, \widetilde{y}_i^{(\mathbf{0})}, y_{-i}\Big) \\
\kappa_i^{(\mathbf{1})} + \zeta_i^{(\mathbf{1})} &\leq x_i \; \widetilde{K} \\
\kappa_i^{(\mathbf{0})} + \zeta_i^{(\mathbf{0})} &\leq \big(1 - x_i\big) \; \widetilde{K} \\
\kappa_i^{(\mathbf{1})}, \kappa_i^{(\mathbf{0})}, \zeta_i^{(\mathbf{1})}, \zeta_i^{(\mathbf{0})} &\in \mathbb{R}_+
\end{aligned}
$$

Definitions for binary games and notions of equilibrium

We introduce the notion of a binary quasi-equilibrium to describe incentive-compatible outcomes with compensation

Definition: *Binary game*

We have a set of players $i \in I$, each seeking to solve a binary problem:

$$\begin{cases} \min\limits_{\substack{x_i \in \{0,1\} \\ y_i \in \mathbb{R}^m}} & f_i\left(x_i, y_i, y_{-i}\left(x_{-i}\right)\right) \\ \text{s.t.} & g_i\left(x_i, y_i\right) \leq 0 \qquad \left(\lambda_i\right) \end{cases}$$

Definition: *Equilibrium in a binary game*

A (Nash) equilibrium in binary variables is a feasible vector $\left(x_i^*, y_i^*\right)_{i \in I}$ such that:

$$f_i\left(x_i^*, y_i^*, y_{-i}^*\left(x_{-i}^*\right)\right) \leq f_i\left(x_i^\times, y_i^\times, y_{-i}^*\left(x_{-i}^*\right)\right) \quad \forall\ i \in I$$

Definition: *Quasi-equilibrium in a binary game with compensation*

A (Nash) quasi-equilibrium in binary variables is a feasible vector $\left(x_i^*, y_i^*\right)_{i \in I}$ and a vector of compensation payments $\left(\zeta_i\right)_{i \in I}$ such that:

$$f_i\left(x_i^*, y_i^*, y_{-i}^*\left(x_{-i}^*\right)\right) - \zeta_i \leq f_i\left(x_i^\times, y_i^\times, y_{-i}^*\left(x_{-i}^*\right)\right) \quad \forall\ i \in I$$

Lösung mehrstufiger binärer Gleichgewichtsprobleme

Die Teilnahme am Regelenergiemarkt erfordert binäre Entscheidungen auf mehreren Ebenen

Teilnahme am Regelenergiemarkt?

- **Ja** ⇒ Kraftwerk über den gesamten Zeitraum in Betrieb ⇒ Optimale Erzeugung je Stunde t durch KKT-Bedingungen bestimmt (Mindestlast berücksichtigt) ⇒ Profit im Fall der Bereitstellung von Regelenergie
- **Nein** ⇒ Kraftwerk in Stunde t in Betrieb?
  - **Ja** ⇒ Optimale Erzeugung und Profit in Stunde t durch KKT-Bedingungen bestimmt
  - **Nein** ⇒ Keine Erzeugung, Abfahrkosten = Verlust (wenn in Stunde $t–1$ in Betrieb)
  - *Vergleich zur Bestimmung der optimalen Entscheidung in Stunde t* ⇒ Summe über alle Stunden t ergibt Profit im Fall der Nichtteilname

Vergleich zur Bestimmung der optimalen Entscheidung

⇒ Das Spiel zwischen mehreren Erzeugern kann als ganzzahlig-gemischtes lineares Optimierungsproblem gelöst werden