

# STRATEGISCHES DILEMMA IN LOKALEN REDISPATCH MÄRKTN

**Viktor ZOBERNIG<sup>1,2</sup>, Jochen L. CREMER<sup>1,2</sup>, Jochen STIASNY<sup>2</sup>,  
Lauren J. deVRIES<sup>2</sup>**

## Einleitung

Die zunehmende Dezentralisierung der Stromerzeugung sowie die wachsende Marktkopplung in Europa haben den Redispatch (RD) Bedarf deutlich erhöht. Es besteht die Sorge, dass die Einführung von RD-Märkten zu übermäßigen Investitionen in bereits exportbeschränkten Regionen (überwiegend abregelnden Regionen) führen könnte, da sich hier zusätzliche Arbitragemöglichkeiten ergeben, auch bekannt als Inc-Dec-Gaming [1]. Gleichzeitig könnten solche Märkte lokale Anreize schaffen, die RD-Kosten senken oder den Netzausbaubedarf reduzieren [2].

Bisherige Studien konzentrieren sich überwiegend auf die Analyse von Preisgeboten, innerhalb bereits bestehender struktureller Übertragungsgrenzen. Langfristigen Auswirkungen auf erwartbare Investitionserlöse bleiben dabei weitgehend unberücksichtigt. Wir untersuchen daher stattdessen strategische Mengengebote (nach Cournot), um erwartbare Investitionsentwicklungen realitätsnäher abzubilden. Durch die Annahme großer verfügbarer Kapazitäten bilden wir das Verhalten eines vorausschauenden und gewinnorientierten Investors ab. Die resultierende optimale Mengenstrategie steht für die ökonomisch effiziente Kapazitätserweiterung, da ungenutzte Kapazität einer unrentablen Investition entspricht. Aus dieser Perspektive zeigt sich, dass übermäßige Investitionen ein Koordination Dilemma erzeugen. Einbrechende Day-Ahead (DA) Preise bergen ein Risiko für die langfristig erzielbaren Erträge. Zur Analyse des strategischen Verhaltens in diesem Dilemma unter unterschiedlichen Unsicherheitsniveaus verwenden wir Multi-Agent Reinforcement Learning (RL).

## Methode

In unserem Marktmodell betrachten wir zwei Knoten,  $N$  und  $S$ , die über eine Leitung mit einer Kapazitätsgrenze  $L$  verbunden sind. Die Nachfrage  $D$  befindet sich ausschließlich in Knoten  $S$  und wird als vollkommen preisinelastisch angenommen. Zunächst wird ein zonaler DA Markt geräumt, gefolgt von einem lokalen RD-Markt. Beide Märkte basieren auf uniformen Preisen. Wir lösen das System hinsichtlich der optimalen Mengenentscheidung  $X$ , die das gesamte zugeschlagene Angebotsvolumen in Knoten  $N$  im DA repräsentiert. Aus dieser Entscheidung ergibt sich die Engpass Menge aus  $\max\{x - L, 0\}$ . Wir nehmen an, dass die Agenten ihre Opportunitätslöse berücksichtigen und daher entweder ihre eigenen Grenzkosten  $c_i$  bieten, wenn kein Engpass besteht, oder die erwarteten Preise des RD-Marktes, wenn ein Engpass vorliegt:  $p_i^N = \min\{c_i^N, p_N^{RD}\}$ ,  $p_i^S = \max\{c_i^S, p_S^{RD}\}$ . Vorangegangene Studien zeigen, dass die Opportunitätsgebote bei Auftreten eines Engpasses zu den nodalen Preisen konvergieren,  $p_N^{RD} = c_\mu^N(L)$ ,  $p_S^{RD} = c_\mu^N c_\mu^S(D - L)$ . Zusätzlich unterstellen wir das Vorliegen eines strukturellen Engpasses. Dieser ist dadurch gekennzeichnet, dass  $c_\mu^N(L) < c_\mu^S(D - L)$ . Dadurch entsteht ein positiver Arbitrage-Anreiz und somit die Möglichkeit für Inc-Dec-Gaming. Die nach  $X$  abgeleitet maximalen Profite  $\Pi^N$  für Agenten in  $N$  ergeben sich dann aus:

$$\frac{d\Pi^N}{dx} \begin{cases} p^{DA} - c_\mu^N(X) \geq 0, & 0 \leq X \leq L \\ c_\mu^S(D - L) - c_\mu^N(L) > 0, & L \leq X < D \\ c_\mu^N(L) - c_\mu^N(L) = 0, & X = D \end{cases}$$

Aus der Formel wird ersichtlich, dass die Gewinne für  $L \leq x < D$  am höchsten sind, da der Marktpreis hier durch die teuerste Einheit in  $S$  bestimmt wird, da  $c_\mu^S(D - L) > c_\mu^S(D - X)$ . In  $X = D$ , fällt der DA-Preis auf das Niveau der Grenzkosten und die erzielbaren Margen gehen gegen null. Unter der Annahme, dass  $X \geq D$ , entsteht ein Koordinationsdilemma. Jede Einheit in  $N$  erzielt ihre höchsten Erlöse, wenn sie ihre gesamte eigene Menge  $x_i$  anbietet. Die optimale Gesamtmenge  $X = \sum_i x_i$  muss jedoch  $X < D$  bleiben, damit der DA Preis nicht einbricht. Ohne Koordination darüber, welche Einheit ihre Angebotsmenge reduziert, entsteht ein klassisches Koordinationsdilemma.

<sup>1</sup> AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Giefingasse 2, 1210 Wien, AT; [viktor.zobernig@ait.ac.at](mailto:viktor.zobernig@ait.ac.at).

<sup>2</sup> Delft University of Technology, Mekelweg 5, 2628 CD Delft, NL.

Für die Analyse des strategischen Verhaltens unter Unsicherheit verwenden wir TD3 [3], einen modernen *model-free* RL-Ansatz, der das System als Markov-Entscheidungsprozess abbildet und Preis- und Mengengebotsstrategien ohne Annahme vollständiger Information erlernen kann.

## Ergebnisse

Abbildung 1 zeigt die Ergebnisse zweier strategisch bietender RL-Agenten in  $N$  unter unterschiedlichen uniform verteilten exogenen Unsicherheitsniveaus (0%, 30%, 60%, 90%). Die mittlere Kurve stellt die theoretisch optimalen erwarteten Profite unter perfekter Koordination dar, flankiert von den empirischen Mengenangeboten (oben) und Profiten (rechts) der RL-Agenten. In allen Szenarien erreichen die Agenten mehr als 90% des theoretisch optimalen gemeinsamen Gebots, wobei die Aufteilung der Profite nahezu ausgeglichen bleibt. Bei Unsicherheiten unter 50% ist ein konservatives Mengenangebot optimal, während höhere Unsicherheiten zu aggressiveren Strategien führen, da Angebotsmengen unterhalb der Hälfte des maximal möglichen Engpasses (hier 10MW) unprofitabel werden. In Fällen mit einer Unsicherheit über 50%, erhöht dies die Wahrscheinlichkeit von Überbietungen und damit von Preiszusammenbrüchen im DA Markt, was wiederum die größere Streuung der realisierten Profite erklärt.

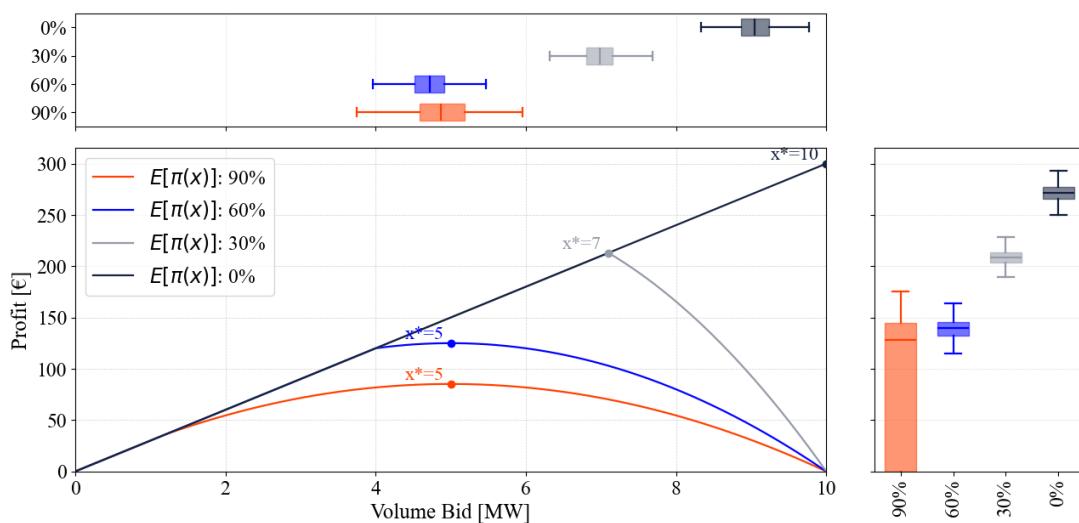


Abbildung 1: Erwartete Gewinnkurven für ein maximal nutzbares Volumen von  $D - L = 10 \text{ MW}$  und eine Gaming-Marge von  $c_\mu^S(D - L) - c_\mu^N(L) = 30 \text{ €/MWh}$ , entsprechend dem optimalen Benchmark bei perfekter Koordination. Das obere Panel zeigt die Verteilungen der Mengenangebote, das rechte Panel die erzielten Profite für alle Unsicherheitsniveaus mit Koordinationsdilemma.

## Conclusio

Insgesamt zeigt die Analyse, dass Inc-Dec-Möglichkeiten in exportbeschränkten Regionen zwar bestehen, ihre langfristige Relevanz jedoch deutlich abnimmt, sobald Unsicherheit und strategische Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Die resultierenden Investitionsdynamiken nähern sich damit jenen anderer Märkte an, da potenzielle Gaming-Renditen durch Unsicherheit und das zugrunde liegende Koordinationsdilemma spürbar abgeschwächt werden. Dies bedeutet nicht, dass Risiken vollständig ausgeschlossen werden können. Vielmehr deutet das Ergebnis darauf hin, dass ein marktbasierter Redispatch in Verbindung mit geeigneten Begrenzungsmechanismen (insbesondere in exportbeschränkten Regionen) eine effiziente Alternative darstellen kann.

## Referenzen

- [1] L. Hirth and I. Schlecht, "Market-Based Redispatch in Zonal Electricity Markets," *SSRN Electron. J.*, 2018, doi: 10.2139/ssrn.3286798.
- [2] K. Poplavskaya, G. Totschnig, F. Leimgruber, G. Doorman, G. Etienne, and L. de Vries, "Integration of day-ahead market and redispatch to increase cross-border exchanges in the European electricity market," *Appl. Energy*, vol. 278, p. 115669, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115669.
- [3] S. Fujimoto, H. van Hoof, and D. Meger, "Addressing Function Approximation Error in Actor-Critic Methods," Oct. 22, 2018, *arXiv*: arXiv:1802.09477. doi: 10.48550/arXiv.1802.09477.