

PowerACE: Ein agentenbasiertes Tool zur Simulation von Strom- und Emissionsmärkten

Anke Weidlich, Daniel Veit

Stiftungslehrstuhl für ABWL und Wirtschaftsinformatik – E-Business und
E-Government –
Universität Mannheim
Schloss
68131 Mannheim
weidlich@uni-mannheim.de
veit@uni-mannheim.de

Abstract: Im vorliegenden Beitrag wird ein agentenbasiertes Simulationsmodell vorgestellt, mit dem der Day-Ahead-Strommarkt, der Markt für positive Minutenreserve und der Emissionshandel abgebildet wird. Die Betreiber von Kraftwerken werden als lernende Agenten (mit Q-Learning) abgebildet und konkurrieren auf der Anbieterseite der Strommärkte. Das Modell wurde mit Daten des deutschen Strommarkts simuliert und liefert realistische Ergebnisse sowohl auf dem Day-Ahead- als auch auf dem Minutenreservemarkt. Eine grafische Oberfläche erleichtert die Verwendung des Modells als regulatorisches Tool, mit dem verschiedene Szenarien der Marktstruktur und Marktmechanismen *in silico* getestet werden können.

1 Einleitung

Der Energiesektor ist nicht nur durch erhebliche technische Restriktionen, sondern auch durch ein Ineinanderverwirken verschiedener Märkte gekennzeichnet: Brennstoffmärkte und Märkte für Forward- und Future-Kontrakte, Day-Ahead-Märkte und Regelenergie-märkte, Intraday-Märkte und bilateraler Handel sowie zusätzliche Märkte bspw. für den Emissionshandel. Des Weiteren sind die oligopolistische Struktur des Stromsektors und dessen vertikale Integration zusätzliche Faktoren, die Strommärkte zu den komplexesten Märkten überhaupt machen.

Die Komplexität des Stromsektors treibt traditionelle Modellierungsmethoden an ihre Grenzen. Gleichgewichtsmodelle vernachlässigen entweder strategisches Bietverhalten gänzlich, oder nehmen an, dass Akteure jeweils alle relevanten Informationen über die Charakteristika und das Verhalten der anderen Akteure haben. Sie vernachlässigen darüber hinaus Lerneffekte, die aus der täglichen Wiederholung des Bietprozesses resultieren [Ro99]. Spieltheoretische Analysen sind geeignet, Erkenntnisse über sehr spezifische Fragestellungen des Stromhandels zu erlangen [Wi02]. Allerdings sind diese Modelle beschränkt auf stark stilisierte Handelssituationen und verwenden starre – meist unrealis-

tische – Annahmen über das Verhalten der Akteure. Auch Experimente mit menschlichen Akteuren können nur schwer auf Forschungsfragen im Stromsektor angewendet werden, da eine gewisse Expertise nötig ist, um das Bietverhalten von Stromerzeuger-Firmen realistisch zu imitieren. Aus diesem Grund sind Experimente nur für bestimmte, sehr einfache Stromhandels-Szenarien sinnvoll anwendbar.

Die zentrale Bedeutung des Stromsektors für wettbewerbsfähige Volkswirtschaften macht es erforderlich, neue Modellierungsmethoden anzuwenden, um verschiedene Aspekte von Strommärkten zu untersuchen. Agentenbasierte Modelle erlauben eine flexible Spezifizierung von Szenarien und sind geeignet, einige Schwächen der vorher genannten traditionellen Modellierungsmethoden zu überwinden. Sie können als voll kontrollierbare „virtuelle Labore“ für Marktdesign-Alternativen im Stromsektor verwendet werden und dazu dienen, Marktdesigns ausfindig zu machen, die in einem Umfeld von Profit maximierenden Akteuren am besten funktionieren [Te06]. Dieser Ansatz folgt der Forderung von [Ro02], dass Märkte mit den Werkzeugen der Ingenieure gestaltet werden sollten, d.h. unter Verwendung von Experimenten und Simulationen. In der Literatur sind bereits einige Ansätze der agentenbasierten Simulation von Strommärkten beschrieben worden, z.B. [BB01], [NPT01], [BS05], oder [ST06]. Das hier beschriebene Modell hat zum Ziel, einen Beitrag zu den genannten Herausforderungen zu leisten, indem ein Simulationsmodell entwickelt wird, das als Werkzeug zur Gestaltung von Märkten im deutschen Stromsektor dienen kann.

Darüber hinaus soll durch die Einbettung des Simulationsmodells in eine grafische Benutzeroberfläche Entscheidern in der Energiebranche die Möglichkeit gegeben werden, Strommarktsimulationen durchzuführen und auf einfache Weise spezifische Szenarien zu definieren. Hierzu wurde die Simulationsumgebung in die Toolsuite PowerACE eingebettet, die eine einfache Nutzung, Konfiguration und Umsetzung von eigenen Szenarien erlaubt. Das Tool wurde nach dem gleichnamigen Forschungsprojekt benannt, in dem seine Entwicklung stattfand (siehe www.powerace.de).

2 Modellbeschreibung

Das Simulationsmodell beinhaltet drei Märkte: einen Day-Ahead-Strommarkt, der in Anlehnung an die Ausgestaltung des Spotmarktes der European Energy Exchange (EEX) implementiert wurde, einen Markt für Regelenergie (hier wird nur die positive Minutenreserve betrachtet), der sich an der Ausgestaltung der vier in Deutschland betriebenen Regelenergiemärkte orientiert, und einen Markt für CO₂-Emissionszertifikate der als einfacher Call Market implementiert ist. Ein Call Market ist eine Doppelauktion mit verdeckten Geboten, bei der alle Gebote gesammelt und zu einem festgelegten Zeitpunkt das Marktgleichgewicht ermittelt wird. Für die hier zu bearbeitenden Fragestellungen reicht es aus, den Day-Ahead-Strommarkt ebenfalls als einfachen Call Market zu modellieren. Auf diesem werden Kauf- und Verkaufsgebote nach Preisen sortiert und so eine stufenförmige Angebots- und Nachfragekurve errechnet. Der Schnittpunkt der beiden Kurven bestimmt den markträumenden Preis und die Menge.

Die Marktteilnehmer werden als Softwareagenten modelliert, die strategisch auf dem Day-Ahead-Markt und dem Markt für Minutenreserve handeln. In den hier vorgestellten Szenarien ist die Nachfrage fest vorgegeben und preis-unelastisch. Es werden hierfür stündliche Daten der deutschen Gesamtlast verwendet. Somit konkurrieren nur auf der Angebotsseite mehrere Kraftwerksbetreiber um den Verkauf ihrer Stromproduktion. Das strategische Verhalten der Agenten wird mittels Reinforcement Learning Algorithmen simuliert. Die Agenten „erlernen“ dadurch im Laufe der Simulation die Preis- und Mengengebote, die ihre Handelserlöse maximieren. Anhand eines vereinfachten Szenarios sind im Vorfeld der Untersuchung mehrere Lernalgorithmen mit verschiedenen Parameterkombinationen ausgiebig auf ihre Eignung, das Bietverhalten von Akteuren im Strommarkt abzubilden, getestet worden. Mehrere Varianten haben sich hierbei als geeignet herausgestellt. Simulationen, die zur Analyse von Marktdesign-Szenarien durchgeführt werden, sollten unter Verwendung mehrerer Lernmodelle fundiert werden. Im vorliegenden Beitrag wird jedoch zunächst nur auf Ergebnisse von Simulationsläufen mit Q-Learning [Wa89] eingegangen.

Am Day-Ahead-Markt (DAM) werden Stundenkontrakte für die Lieferung von elektrischem Strom am Folgetag gehandelt. Es werden Preis-Mengen-Paare geboten, die die Agenten erlernen. Der Aktionsraum möglicher Gebote erstreckt sich dementsprechend über die beiden Dimensionen Gebotspreis und –menge. Gebotspreise reichen von 0 bis 100 EUR/MWh in 21 diskreten Schritten. Mögliche Gebotsmengen berechnen sich als Anteil β an der verfügbaren Leistung, die ein Agent auf dem Markt anbietet; hierbei sind sechs Werte zwischen 0 und 100 % der verfügbaren Leistung möglich. Der resultierende Aktionsraum der Agenten ergibt sich wie folgt:

$$M^{DAM} = [p^{DAM}, \beta^{DAM}] = [\{0,0\}, \{0,20\}, \dots, \{0,100\}, \{5,0\}, \{5,20\}, \dots, \{100,100\}] \quad (1)$$

Am Regelenergiemarkt (BPM) wird eine festgelegte Menge an vorgehaltener Leistung beschafft. Hierbei werden sechs Gebotsblöcke von jeweils vier Stunden unterschieden (d.h. von 0-4 Uhr, 4-8 Uhr u.s.w.); die ausgeschriebene Leistung ist für alle Blöcke gleich hoch (3500 MW). Der Aktionsraum möglicher Gebote auf dem Markt für Regelenergie (positive Minutenreserve) beinhaltet die beiden Dimensionen Preis für vorgehaltene Leistung und Preis für tatsächlich abgerufene Arbeit. Mögliche Preise reichen von 0 bis 200 EUR/MW in 21 diskreten Schritten (Leistungspreis) und 0 und 100 EUR/MWh in fünf Schritten (Arbeitspreis). Somit ergibt sich folgender Aktionsraum:

$$M^{BPM} = [p^{BPM, cap}, p^{BPM, energy}] = [\{0,0\}, \{0,25\}, \dots, \{10,25\}, \dots, \{200,100\}] \quad (2)$$

Die gewählten Aktionsräume für die beiden Märkte stellen einen Kompromiss zwischen möglichst vielen wählbaren Preisen und Mengen auf der einen Seite und einer nicht zu großen Menge an Aktionen auf der anderen Seite, sodass alle Aktionen hinreichend oft ausprobiert werden können. Die absolute Höhe der wählbaren Preise hat einen signifikanten Einfluss auf die simulierten Marktergebnisse und muss daher mit Bedacht gewählt bzw. für das zu untersuchende Szenario kalibriert werden. Die Erhöhung des höchstmöglichen Preises auf dem Day-Ahead-Markt von 100 auf 110, 120 oder 150 EUR/MWh erhöht die durchschnittlichen resultierenden Preise um 6,2, 12,5 bzw. 31.3%.

