

Multi-Agenten Systeme als Methode zur Simulation von Entscheidungsprozessen in der Energiewirtschaft*

Dr. Daniel Veit¹, Dr. Wolf Fichtner², Dr. Mario Ragwitz³

¹ Institut für Informationswirtschaft und –management
Universität Karlsruhe (TH), Englerstr. 14, D-76131 Karlsruhe

Tel: +49-721-608-8372; Fax: +49-721-608-8399

E-Mail: veit@iw.uka.de

Internet: <http://www.iw.uni-karlsruhe.de>

² Institut für Industriebetriebslehre und industrielle Produktion
Universität Karlsruhe (TH), Hertzstr. 16, D-76187 Karlsruhe

Tel: +49-721-608-4583; Fax: +49-721-758909,

E-Mail: wolf.fichtner@wiwi.uni-karlsruhe.de

Internet: <http://www-iip.wiwi.uni-karlsruhe.de>

² Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung

Breslauer Straße 48, D-76139 Karlsruhe

Tel.: 0721-6809-157; Fax: 0721-689152

E-Mail: m.ragwitz@isi.fraunhofer.de

Internet: <http://www.isi.fhg.de>

Abstract:

In Kombination von Ökonomie, Naturwissenschaft und Informatik werden in diesem Forschungsvorhaben die Auswirkungen des CO₂-Zertifikatehandels und des verstärkten Einsatzes erneuerbarer Energieträger auf die Kraftwerksstrukt-

* Gefördert durch die VolkswagenStiftung, Hannover

ren, Investitionsentscheidungen und Emissionen im liberalisierten Strommarkt untersucht.

Neben der Liberalisierung sind die Strommärkte künftig zunehmend durch regulierende Eingriffe beeinflusst, die sich wesentlich aus der Notwendigkeit zur Reduktion von CO₂-Emissionen ergeben. Für CO₂-Emissionen, die u.a. bei der Elektrizitätserzeugung anfallen, wird ab dem Jahr 2005 in Europa ein Emissionshandelssystem mit verpflichtender Teilnahme aufgebaut. Ein zusätzliches Novum in der Energieerzeugung ergibt sich aus dem fluktuierenden Charakter einiger erneuerbarer Energieträger. Diese geänderten energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen schaffen neue Strukturen auf den Elektrizitätsmärkten und damit eine neue Emissionssituation. Die Zielsetzung des Forschungsvorhabens ist es daher, auf Basis eines Multi-Agenten-Systems (MAS) ein neues Konzept zur Marktsimulation von Elektrizitätsmärkten zu entwickeln, welches unter anderem die oben skizzierten Anforderungen erfüllt. Hierdurch soll ein verbessertes Verständnis der Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Akteuren und der Marktdynamik eines Marktes mit CO₂-Zertifikaten und erneuerbaren Energieträgern erzielt werden. Schließlich sollen insbesondere Handlungsempfehlungen für die Akteure am Strommarkt sowie politische Entscheidungsträger abgeleitet werden.

1 Problemstellung und Zielsetzung

1.1 Problemstellung und Motivation

Aufgrund der möglichen Folgen eines globalen Temperaturanstiegs, der auf die anthropogen verursachten Emissionen klimarelevanter Spurengase zurückge-

führt wird, steht der Klimaschutz gegenwärtig im Mittelpunkt der umweltpolitischen Diskussion. Die Europäische Union hat im Rahmen des Kyoto-Protokolls eine Minderung dieser Treibhausgase um 8 % bis zum Zielhorizont 2008-2012¹ auf Basis der Emissionen von 1990 übernommen. Im Rahmen des so genannten EU-Burden-Sharings wurden diese 8 % (etwa 340 Mill. t CO₂-Äquivalente) individuell auf die verschiedenen Länder der EU heruntergebrochen. Eine aktuelle Bestandsaufnahme (Gugele and Ritter 2001) zeigt allerdings, dass die meisten Länder Europas sowie die EU insgesamt zur Zeit deutlich von einer Zielerreichung entfernt sind.

Nicht zuletzt aufgrund der aktuellen Emissionsentwicklungen in vielen Staaten Europas hat die Europäische Kommission ein Grünbuch zu einem europaweit harmonisierten Zertifikatehandel erarbeitet und darauf aufbauend einen Direktivenvorschlag für dessen Ausgestaltung unterbreitet. Trotz heftiger Diskussionen beschloss der EU-Umweltministerrat schließlich Anfang Dezember 2002 die grundsätzliche Ausgestaltung des geplanten Emissionshandels (o.V. 2002), der bereits im Jahre 2005 beginnen soll. Durch die so induzierte Verknappung eines bisher freien Gutes, erlangt die Möglichkeit, Treibhausgase in die Atmosphäre zu emittieren, den Status eines unter ökonomischen Gesichtspunkten zu bewirtschaftenden Produktionsfaktors. Mit der Verknappung geht eine Preisbildung einher, deren Ziel es ist, Anpassungen der Planungsprozesse bei energieintensiven Prozessen zu induzieren.

Wenn die künftigen klimapolitisch motivierten Änderungen auf dem Elektrizitätsmarkt betrachtet werden, so kommt den fluktuierenden erneuerbaren Energieträgern wie der Windenergie und der Photovoltaik eine besondere Bedeutung

¹ Aufgrund des langfristigen Charakters des Klimaproblems ist davon auszugehen, dass dieser Zeithorizont sukzessive verlängert und die Minderungsziele erhöht werden.

zu. Unter der Annahme der weiter fortgesetzten Förderung dieser Energieträger kommen verschiedene Prognosen zu dem Schluss, dass im Jahr 2025 in Deutschland Windkraftanlagen mit einer Leistung von 30 bis 50 GW installiert sein können, was nahezu der Hälfte der gesamten installierten Leistung des Kraftwerksparks entspricht. Die Auswirkungen dieser Entwicklung auf den Elektrizitätsmarkt bezüglich der Kraftwerksstruktur (u.a. auf Reservekraftwerke, Regelenergiemengen, Transport- und Verteilungsleitungen, Strompreise) und damit auf die Wirkungen eines CO₂-Zertifikatehandels sind erheblich. Weiterhin stellt sich die Frage, wie eine Förderung von erneuerbaren Energieträgern mit einem System des Zertifikatehandels abzustimmen ist.

Zur Analyse der Auswirkungen von klimapolitischen Instrumenten auf die Planungs- und Investitionsentscheidungen betroffener Akteure wie Energieversorgungsunternehmen, energieintensiver Industriebranchen oder Investoren in Windparks wird häufig auf die Methode der Systemanalyse und Lösungsverfahren aus dem Bereich des Operations Research zurückgegriffen. Allerdings lassen sich so Handlungsweisen der Akteure auf einem Wettbewerbsmarkt nur unvollkommen nachbilden, nicht zuletzt da alternative Ziele der Akteure negiert werden.

Aus der vorangestellten Diskussion ergibt sich deshalb die Notwendigkeit, neue methodische Ansätze zur Marktsimulation des Europäischen Elektrizitätsmarktes zu entwickeln, um die Entscheidungsprozesse aller Akteursgruppen besser nachbilden und somit die Effekte der Einführung eines Europäischen Zertifikatehandels und der großtechnischen Einspeisung von fluktuierender Energieformen quantifizieren zu können.

1.2 Zielsetzung

Die langfristige Erreichung der CO₂-Minderungsziele wird nur durch einen substanziellen Umbau des Energiesystems hin zu innovativen und effizienten Erzeugungstechnologien möglich sein. Eine entsprechende Restrukturierung verlangt jedoch massive Innovationsentscheidungen verbunden mit entsprechenden unternehmerischen Risiken. Neben der Liberalisierung der Märkte ergeben sich aus der Notwendigkeit der CO₂-Minderung sowie des Ausbaus erneuerbarer Energiequellen zwei zusätzliche Randbedingungen, die bei der Planung von Investitionen zu berücksichtigen sind. Verschiedene Akteure werden mit unterschiedlicher Risikofreudigkeit und Innovationsbereitschaft auf die geänderten Rahmenbedingungen reagieren. Das resultierende akteursspezifische Verhalten wird jedoch entscheidend für den Umbau des Energiesystems sein. Aufgrund der am Markt gewonnenen Erfahrungen werden sich die unterschiedlichen Akteure wechselseitig beeinflussen und ihre Strategien dynamisch anpassen. Da für die Modellierung dieser Eigenschaften des Marktsystems der Ansatz eines Multi-Agenten-Systems geeignet erscheint, soll ein solcher Zugang in dem vorgeschlagenen Projekt verfolgt werden.

Die Zielsetzung des Forschungsvorhabens ist die Simulation der zukünftigen Entwicklung des europäischen Elektrizitätsmarktes auf Basis der Entwicklung eines neuartigen Modellierungskonzeptes. Dabei sollen sowohl die Auswirkungen des neuen Wettbewerbsystems und der Einführung eines europäischen Zertifikatehandels wie auch der Einfluss der verstärkten Integration von fluktuierenden Energieträgern adäquat berücksichtigt werden. Durch das zu entwickelnde Simulationswerkzeug lassen sich letztendlich Aussagen zur Bewertung des Zertifikatehandels hinsichtlich seiner ökonomischen Effizienz und seiner ökologischen Effektivität ableiten. Weiterhin werden Schlussfolgerungen zur Abstimmung eines Zertifikatehandels mit einem Fördersystem für regenerative Energieträger angestrebt.

Diese Zielsetzungen sollen durch die Erstellung eines Modells zur Simulation der Entwicklung des wettbewerblich organisierten Elektrizitätsmarkts in Deutschland unter Berücksichtigung der relevanten europäischen Anrainerstaaten für einen Zeitraum von 20-30 Jahren umgesetzt werden. Hierzu soll ein Marktsimulationsmodell konzipiert und unter Anwendung des Paradigmas der Multi-Agenten-Systeme entwickelt werden. Die verschiedenen Marktteilnehmer sollen dabei als eigenständige Einheiten (in Form autonomer Software-Agenten) abgebildet werden, welche am Elektrizitätsmarkt autonom operieren und kommunizieren. Damit soll den neuen Wettbewerbsstrukturen Rechnung getragen werden.

Während die Abbildung von konventionellen Technologien und Anlagen in derartigen Modellkonzepten aufgrund der Erfahrungen mit Modellen des Operations Research relativ einfach zu integrieren ist, ist die adäquate Modellierung von Anlagen mit fluktuierender Einspeisung bisher nicht gelöst. Eine Zielsetzung des Forschungsvorhabens ist deshalb, diese Anlagen in das Modellkonzept zu integrieren. Dabei kommt der genauen Charakterisierung sowie Modellierung und Vorhersage der Fluktuationen erneuerbarer Energieträger eine elementare Bedeutung zu, die über Verfahren aus dem Bereich der stochastischen Prozesse angestrebt wird.

2 Methoden

2.1 Entscheidungsunterstützende Modelle im Energiesektor

Zur Entscheidungsunterstützung für politische Entscheidungsträger bei Fragen der künftigen Energiesystemgestaltung werden seit Beginn der siebziger Jahre –

im Zuge der beiden Ölpreiskrisen und später vor dem Hintergrund umweltpolitischer Anforderungen – national wie international eine Vielzahl an Energiemodellen entwickelt und eingesetzt. Die Modelle lassen sich in Energiesystemmodelle einerseits und Energiewirtschaftsmodelle unterscheiden (o.V. 1999). Die beiden Modellkategorien unterscheiden sich wesentlich durch die Wahl der Modellgrenzen und dem damit erforderlichen Grad der Aggregation für Systemelemente.

In Energiesystemmodellen wird auf prozessorientierter, technologischer Basis die gesamte Energienutzungskette von der Gewinnung der Primärenergien bis zur Bereitstellung von Nutzenergien oder Energiedienstleistungen dargestellt. Konkurrierende Maßnahmen zur Erreichung energiepolitischer Zielsetzungen können auf sämtlichen Stufen der Energieumwandlung, des Energietransports und der Energieanwendung einschließlich der Energieeinsparung berücksichtigt werden. Zur Ermittlung von Minderungsstrategien für Luftschadstoffe und Treibhausgasen werden in Energiesystemmodellen die Emissionen der einzelnen Technologien mit Hilfe von deren Emissionsfaktoren bilanziert. Die Emissionen können dann über Restriktionen beschränkt und durch Vergleich der Ergebnisse der Optimierläufe mit und ohne Obergrenzen ökonomisch effiziente Minderungsmaßnahmen identifiziert werden. So können Strategien erarbeitet werden, in welcher Weise sich der Energiesektor in der Zukunft entwickeln sollte, um Vorgaben im Bereich der Luftreinhaltung zu erreichen.

Energiesystemmodelle sind es stets Partialmodelle, in dem Sinne, dass nur die Energiewirtschaft ohne die Rückkoppelungen zu den anderen Teilen der Volkswirtschaft berücksichtigt wird. Methodisch basieren sie auf einer linearen bzw. stochastisch linearen Programmierung (siehe z.B. PERSEUS-EVU- oder EUDIS-Modell (Kreuzberg 1999, Wietschel, Fichtner et al. 1999)), einer Simulation auf der Basis der numerischen Lösung von Differentialgleichungen beispielsweise am System Dynamics-Ansatz (Grobbe 1999).

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollen die Vorteile dieser Modelle, die zur Mehrzahl auf einer hierarchisch-zentralen deterministischen oder stochastischen linearen Optimierung basieren, mit den Vorteilen der im folgenden vorgestellten Multi-Agenten-Systeme kombiniert werden.

2.2 Multi-Agenten-Systeme und Simulation

Als Multi-Agenten-System bezeichnet man eine Softwareplattform, die aus einer Menge mehreren intelligenten autonomen Software-Agenten besteht, die als eigenständige Einheiten miteinander kommunizieren und kooperieren können. Ein intelligenter autonomer Software-Agent ist eine Software-Einheit, die die folgenden zentralen Eigenschaften aufweist (Ferber 1999, Weiss 1999): Interaktionsfähigkeit mit der Umwelt, autonomes Handeln, Reaktionsfähigkeit auf andere Software-Agenten, Proaktivität, soziales Verständnis und Kommunikation, Rationalität sowie Adaptivität. Diese Eigenschaften ermöglichen eine realitätsnahe Modellierung dezentral verteilter Problemlösungsprozesse. Das Paradigma der Multi-Agenten-Systeme, welches seinen Ursprung im Forschungsbereich der Verteilten Künstlichen Intelligenz (VKI) hat, findet zunehmend Eingang in die wirtschaftswissenschaftliche Forschung (Jennings and Wooldridge 1998, Kirn 2002, Veit 2003).

Aufgrund ihrer Skalierbarkeit, der Autonomie der einzelnen Software-Agenten sowie der Flexibilität in der Gestaltung von Rollenprofilen (Teilnehmer an Märkten lassen sich im Allgemeinen in Gruppen einteilen, denen je eine Rolle zugeordnet werden kann) sind Multi-Agenten-Systeme prädestiniert zur Abbildung bzw. Simulation von marktlichen Koordinationsproblemen. Seit einigen Jahren werden Multi-Agenten-Systeme zur Abbildung realer Märkte sowie zur Simulation von Märkten und Marktentwicklungen in der Zukunft eingesetzt. Hierzu existiert seit 1998 der Workshop on Multi-Agent Based Simulation

(Sichman, Conte et al. 1998, Moss and Davidsson 2001) sowie der Workshop Agent-Based Simulation (Urban 2000, Urban 2001). Es existieren bereits erste Modellansätze zur Simulation des englischen und deutschen Elektrizitätsmarktes, die sich jedoch ausschließlich auf den kurzfristigen Bereich beziehen (Bower, Bunn et al. 2000, Bunn and Oliveira 2001). Sie modellieren die Marktsituation unter den geänderten Handelsbedingungen seit der Liberalisierung. Im Falle des deutschen Marktes wurde ein Simulationsmodell erstellt, im Falle des englischen sowohl ein Simulationsmodell als auch eine agentenbasierte Simulationsumgebung. In diesen Ansätzen wird ein einfacher Reinforcement-Learning Ansatz verfolgt, der unter Verwendung von verschiedenen Auktionsregeln als Lernverfahren innerhalb der Software-Agenten eingesetzt wird. Die Erkenntnisse aus diesen Arbeiten werden für die Konzeption des im Rahmen des Forschungsvorhabens zu entwickelnden Simulationsmodells berücksichtigt.

Die Anwendung von Multi-Agenten-Systemen in der wirtschaftswissenschaftlichen Forschung hat unter anderem zu dem recht neuen und viel versprechenden Forschungsgebiet der Agent-based Computational Economics (ACE) geführt. In diesem Forschungsgebiet wird ein Bottom-up-Ansatz zur Simulation ökonomischer Märkte verfolgt. Im Gegensatz zu Modellen der konventionellen Simulation, in denen die Akteure aggregiert dargestellt werden (top-down), werden bei dieser Methode die Teilnehmer individuell modelliert, was zu einer realitätsnahen Simulation führt. Durch die Modellierung entsteht ein sich selbst entwickelndes dynamisches System, welches einen besseren Einblick in die Prozesse und Ergebnisse von strategischen Entscheidungen erlaubt (Edmonds 2001, Tesfatsion 2003).

In den genannten Arbeiten sowie den Entwicklungen in vielen Forschungsbereichen der Wirtschaftswissenschaften und der Informatik zeigt sich, dass das Paradigma der Multi-Agenten-Systeme für das Design und die Implementierung von Simulationssystemen sehr gut geeignet ist. Insbesondere liberalisierte

Strommärkte weisen Eigenschaften auf, die sich sehr gut mit Hilfe von Multi-Agenten-Systemen modellieren und abbilden lassen. Hierbei muss jedoch eine Reihe von Annahmen über das Verhalten der Akteure getroffen werden. Aus einem solchen Simulationssystem lassen sich dann nach einer Kalibrierungs- und Validierungsphase an realen Vergangenheitsdaten bei entsprechender Ausrichtung des Simulationsmodells Ergebnisse aus Simulationsläufen für zukünftige Entwicklungen am Markt ableiten. Diese Ergebnisse können als Handlungsempfehlungen für strategische Entscheidungen der Akteure sowie für politische Entscheidungsträger genutzt werden.

2.3 Modellierung fluktuierender Energiequellen

Die fluktuierenden erneuerbaren Energieträger sollen in diesem Projekt durch geeignete stochastische Prozesse modelliert werden. Hierbei kommen Methoden aus den Bereichen Statistik, der Signalverarbeitung bzw. Zeitreihenanalyse zur Anwendung.

Anhand gemessener Wetterdaten (Windgeschwindigkeiten, Strahlungsdaten) werden mittels bekannter Anlagenkennlinien Zeitreihen der produzierten elektrischen Leistung einzelner Anlagen generiert und anschließend aufgrund geographischer Anlagenverteilungen zu Leistungsdauerlinien in typischen Erzeugungsregionen aggregiert. Der somit erzeugte multivariate Datensatz kann mit gängigen Methoden der Statistik untersucht werden. Hierzu zählen u.a. die Auswertung von Mittelwerten, Varianzen, Wahrscheinlichkeitsverteilungen, linearer Korrelationen und Kreuzkorrelationen sowie von Leistungsspektren.

Besondere Bedeutung hat jedoch die Auswertung der Vorhersagbarkeit dieser Daten durch datengetriebene Modelle, da dies die Steuerungsmöglichkeit des übrigen Kraftwerksparks in Bezug auf die Schwankungen festlegt. Zur Bestim-

mung der Vorhersagbarkeit werden verschiedene Modelle, wie multivariate autoregressive Modelle, neuronale Netze, Phasenraumverfahren, an die Daten angepasst und deren Vorhersagekraft ermittelt. Aus dieser Untersuchung lassen sich die beobachteten Fluktuationen in einen deterministischen und einen stochastischen Teil untergliedern. Weiterhin lässt sich der Anteil nichtlinearer Fluktuationen in den Daten bestimmen.

3 Zum prinzipiellen Aufbau des Marktsimulationsmodells

Neben energieangebotsseitigen Akteuren wie Energieversorgungsunternehmen, Betreiber von Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien und Energiehändlern sollen Haushalte und Kleinverbraucher sowie Industrieunternehmen durch Nachfrageagenten modelliert werden. Des Weiteren können Regulierungsbehörden im Modell als neutrale Agenten eingebunden werden. Im folgenden soll beispielhaft auf die unterschiedlichen Software-Agenten, die die verschiedenen Planungsabteilungen eines Energieversorgungsunternehmens (EVU) repräsentieren, näher eingegangen werden.

Der Investitionsplaner im EVU, der einen eigenständigen Software-Agenten bildet, analysiert Zubauentscheidungen seines Unternehmens für einen längerfristigen Zeitraum (z.B. 20 Jahre). Dabei bezieht er einerseits exogen vorgegebene Faktoren wie aktuelle gesetzliche Vorgaben und Informationen zu bereits bestehenden Kapazitäten der Konkurrenz ein. Des Weiteren werden Marktparameter wie die aktuellen Strompreise, die als endogene Faktoren dem Investitionsplaner und somit als Ergebnis aus den vorherigen Handlungsrunden zur Verfügung stehen, in die Entscheidungsfindung einbezogen.

Ausgehend von diesen Informationen werden vom Investitionsplaner Prognosen für die Primärenergiepreise, die Energienachfrage und schließlich die Strompreise entwickelt, die für die Planung von Zubauentscheidungen notwendig sind. Die vom Investitionsplaner vorgeschlagenen (De-)Investitionen in Kraftwerke werden an die Unternehmensleitung weitergeleitet und auf Basis der dort gewählten Strategie bewertet. Hierzu werden die vorgelegten Informationen so gewichtet, dass dem abgebildeten Risikoverhalten Rechnung getragen wird.

Der kurzfristige Planer hat die Aufgabe, Strommengen auf dem Strommarkt anzubieten. Dazu fällt er mit Hilfe der ihm von der Unternehmensleitung vorgegebenen Strategie die Entscheidung darüber, welche Strommengen er zu welchen Preisen zum aktuellen Zeitpunkt auf dem Markt anbietet, sowie zu welchen Konditionen bilaterale Stromverträge angeboten werden. Der Markt wird dann unter Berücksichtigung der Nachfrage für jede Stunde durch Einlastung der Kraftwerke nach ansteigenden Angebotspreisen geräumt. Der Software-Agent kann aus seinen bisherigen Handlungsweisen lernen, d.h. er analysiert mit welchen Preis-/Mengenstrategien in den zurückliegenden Perioden die beste Zielerreichung realisiert werden konnte und entwickelt so neue Handelsstrategien.

Nachdem diese kurzfristigen Marktaktivitäten für einige Monate simuliert worden sind bzw. sich die Rahmenbedingungen verändert haben, greift der Investitionsplaner wieder ins Geschehen ein. Der kurzfristige Planer und Marktintermediäre stellen Informationen für den Investitionsplaner zur Verfügung, der mit diesen Informationen wiederum seine Investitionsplanung durchführt und schließlich seine Planungsergebnisse an die Unternehmensleitung rückmeldet.

4 Erwartete Ergebnisse

Als Ergebnis dieser neuen Forschungsrichtung der Modellbildung sind wesentliche Erkenntnisse zum Verständnis der Marktdynamik im Elektrizitätssektor nach der Einführung eines CO₂-Zertifikatehandels und bei der verstärkten Nutzung von erneuerbaren Energien zu erwarten. Insbesondere können die Ergebnisse wesentlich zum Verständnis der zukünftigen Entwicklung von Luftschadstoffen und Treibhausgasen beitragen. Letztlich eröffnet dieser methodische Ansatz die Möglichkeit, gruppenspezifische Verhaltensmuster und Hemmnisse mit energiepolitischen Maßnahmen konsistent und transparent zu simulieren, wo heute noch eine Trennwand zwischen Energiemodellen und policy-orientierten Analysen und ex-ante Evaluationen besteht.

Bisherige Modellkonzepte, die zur Analyse von Elektrizitätsmärkten verwendet wurden, stammen i. d. R. aus dem Bereich des Operations Research (OR). Diese Modellkonzepte beinhalten aber natürliche Grenzen und weisen folgende Schwachpunkte auf:

- Akteurspezifische Marktstrategien, die über eine Gewinnmaximierung hinausgehen, sind nicht oder nur eingeschränkt realisierbar.
- Die Wechselwirkung zwischen Strom- und Zertifikatsmarkt wird nicht oder nur unzureichend betrachtet.
- Anpassungen der Strategien der Akteure aufgrund von gewonnenen Erfahrungen durch Erfolg bzw. Misserfolg auf dem Markt werden nicht integriert.
- Das Zusammenspiel zwischen der strategischen Planung und den eher kurzfristigen Mengen-Preis-Strategien auf dem Elektrizitätsmarkt wird nicht beachtet.

- Der Einfluss des Ausbaus erneuerbarer Energieträger auf akteurspezifische Investitionsentscheidungen wird nur unzureichend berücksichtigt.
- Oftmals wird eine Preisbildung auf Grenzkostenbasis herangezogen, die negiert, dass Gewinne durch Preisbildung über Grenzkosten in bestimmten Marktkonstellationen bzw. auf bestimmten Marktsegmenten (wie Haushalten) erzielbar sind.
- Die Marktdynamik durch die Vielzahl an bestehenden und neuen Akteuren mit ihren unterschiedlichen Funktionen wird nicht abgebildet.
- Der beschränkte Zugang der Akteure zu Informationen wird nicht beachtet.

Wesentliche Erkenntnisse in Bezug auf den gegenwärtigen Forschungsstand werden auf folgenden Gebieten erwartet:

- Eine realitätsnähere Abbildung der Kraftwerksstruktur in Deutschland für einen Planungshorizont von 20-30 Jahren in Abhängigkeit von CO₂-Zertifikatepreisen
- Evaluierung von CO₂-Minderungsmöglichkeiten bei den verschiedenen Akteuren des Europäischen Elektrizitätsmarktes
- Entwicklung der regionalen Schadstoffemissionen
- Zur Aufnahme fluktuierender Energieformen benötigte Regelenergien
- Prognose der Entwicklung der Energienachfragemenge
- Zusammensetzung der Stromproduktion (Anteil Kernkraft, Braunkohle etc.)

Zusammenfassend besteht die Erwartung auf Basis flexibler und agentenspezifischer Simulationssysteme neue methodische Ansätze zur Marktsimulation des Strommarktes zu entwickeln und somit die Auswirkungen von Emissionshandel und einem steigenden Anteil erneuerbarer Energieträger zu untersuchen.

Literatur

Bower, J., D. Bunn and F. Oliveira (2000), "A model-based comparison of pool and bilateral market mechanisms for electricity trading", *Energy Journal* 21: 1-29.

Bunn, D. and F. Oliveira (2001), "Agent-based simulation: An application to the new electricity trading arrangements of england and wales", *7th International Conference of the Society for Computational Economics, Yale University, USA*.

Edmonds, B. (2001), "Towards a descriptive model of agent strategy search", *Computational Economics (ACE Special Issue)* 18(1): 113-135.

Ferber, J. (1999), "Multi-agent systems : an introduction to distributed artificial intelligence", *Harlow, Bonn, Addison-Wesley*.

Grobbe, C. (1999), "Competition in electricity generation in germany and neighboring countries from a system dynamics perspective", *Frankfurt a. M., Peter Lang*.

Gugele, B. and M. Ritter (2001), "Community and member states greenhouse gas emission trends 1990-99", *Kopenhagen, European Environment Agency (EEA), European Topic Centre on Air and Climate Change*.

Jennings, N. R. and M. Wooldridge (1998), "Applications of intelligent agents", *Agent Technology: foundations, applications and markets, Heidelberg, Springer*: 10ff.

Kirn, S. (2002), "Kooperierende intelligente Softwareagenten", *Wirtschaftsinformatik* 44(1): 53-63.

Kreuzberg, M. (1999), "Spotpreise und Handelsflüsse auf dem europäischen Strommarkt - Analyse und Simulation", *Zeitschrift für Energiewirtschaft (ZfE)* 1/1999.

Moss, S. and P. Davidsson (2001), "Multi-Agent-Based Simulation", *Heidelberg, Springer*.

o.V. (1999), "Energiemodelle zum Klimaschutz in Deutschland: Strukturelle und gesamtwirtschaftliche Auswirkungen aus nationaler Perspektive", *Heidelberg, Physica-Verlag*.

o.V. (2002), "Amended proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council establishing a scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community and amending Council Directive 96/61/EC", *Brussels, Commission of the European Communities (COM)*.

Sichman, J. S., R. Conte and N. Gilbert (1998), "Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation." *Heidelberg, Springer*.

Tesfatsion, L. (2003), "Agent-based computational economics: Growing economies from the bottom-up", ISU Economics Working Paper.

Urban, C. (2000), "Workshop 2000 agent-based simulation", *Passau, Proceedings*.

Urban, C. (2001), "Workshop 2001 agent-based simulation II", *Passau, Proceedings*.

Veit, D. (2003), "Matchmaking in electronic markets: An agent-based approach towards matchmaking in electronic negotiations", *Heidelberg, Springer*.

Weiss, G. (1999), "Multi-agent systems, a modern approach towards distributed artificial intelligence", *Cambridge und London, MIT Press*.

Wietschel, M., W. Fichtner and O. Rentz (1999), "Konzeption und Anwendung eines Modells zum strategischen Produktionsmanagement bei Energieversorgungsunternehmen", *Zeitschrift für Betriebswirtschaft (ZfB)* 69(4): 429-448.