

Gegenstand dieses Artikels ist eine empirische Analyse der Preise von CO₂-Verschmutzungsrechten im Europäischen Emissionshandel seit 2005 und eine darauf basierende Diskussion des Beitrags dieses Instruments zur Klimapolitik.

Emissionshandel ist derzeit das Hauptinstrument der Klimapolitik in Europa zur Erreichung der im Kyoto-Protokoll festgelegten Ziele. Das europäische Emissionshandelssystem (ETS) ist 2005 in Kraft getreten und limitiert den CO₂-Ausstoß von rund 10 000 Unternehmen auf etwa 2 Mrd. Tonnen. Die erste Handelsperiode wurde 2007 abgeschlossen, die zweite Phase erstreckt sich von 2008 bis 2012. Die Begrenzung und der anschließende Handel (cap-and-trade) der Emissionszertifikate (EUA) tragen zur Einhaltung der europäischen Reduktionsverpflichtung bei. In den kommenden Jahren wird die Gesamtmenge der Zertifikate jährlich um den Faktor 1,74 reduziert, so dass 2020 21% weniger Emissionsrechte zur Verfügung stehen als 2005. In den nächsten Jahren wird das Handelssystem einige Veränderungen erfahren, so ist vorgesehen, den Flugverkehr ab 2012 in das ETS miteinzubeziehen. Weiterhin wird derzeit über die Möglichkeit spekuliert, das ETS mit international bestehenden Handelssystemen in den USA oder Neuseeland zu verknüpfen. Mit Hinblick auf die steigende Bedeutung des Emissionshandels ist es Ziel dieser Studie, diesen als Politikinstrument zu bewerten.

Überblick

Besonders mit dem Abschluss der ersten Phase des ETS wird eine Evaluation des Zertifikatehandels wichtig. Insbesondere erfährt die empirische Analyse von Zertifikatepreisen seit kurzer Zeit von wissenschaftlicher Seite stärkere Aufmerksamkeit. Dabei kommen unterschiedliche statistische Methoden zum Einsatz, welche von der empirischen Analyse von Finanzmarktdaten wie Zinssätzen und Wechselkursen bekannt sind. So finden beispielsweise Benz und Trück (2009) oder Paoletta und Taschini (2008) GARCH-Strukturen in Zertifikatepreisen. Mit Hilfe von GARCH-Modellen werden üblicherweise Phasen wechselnder Volatilität aufgefangen – ein für Finanzmarktdaten typisches Phänomen. Darüber hinaus ist die Entwicklung der Preise durch das Auftreten von diskreten Sprüngen gekennzeichnet (vgl. Daskalakis, 2009). Somit liegt es nahe, zur Modellierung von CO₂-Zertifikatepreisen eine Methode zu verwenden, welche beide Verhaltensmuster berücksichtigt, also sowohl für GARCH-Effekte als auch diskrete Sprünge kontrolliert. Folglich kommt ein kombiniertes Conditional-Jump-GARCH-Modell zur Anwendung, welches von Chan und Maheu (2002) entwickelt wurde.

Eine weitere Begründung für die Verwendung dieser Methode liegt in spezifischen Eigenschaften des Marktes für CO₂-Verschmutzungsrechte. Er unterscheidet sich von anderen Finanzmärkten, da besonders viele Entscheidungen über regulatorische Rahmenbedingungen zu treffen sind und davon auszugehen ist, dass diese weitreichende Auswirkungen auf den Handel und somit die Preise haben. Da es sich um ein relativ junges System handelt, müssen Fragen grundsätzlicher Art sowie die genaue Umsetzung dieser in allen Mitgliedstaaten geklärt werden. Festzulegen sind beispielsweise die absolute Menge an Zertifikaten, die nationalen Mengen sowie die Art der Vergabe. Tutthill (2008) und Yang et al. (2008) betonen, dass diese Entscheidungen zu einem sprunghaften Zertifikatepreis führen. Als Konsequenz ergibt sich ein besonders hohes Maß an Unsicherheit an diesem Markt.

Auf Basis der empirischen Ergebnisse lässt sich der Emissionshandel als Politikinstrument bewerten. Im Kern wird dabei die Frage diskutiert, welche Auswirkungen die oben genannte Unsicherheit auf das Investitionsverhalten der Unternehmen hat. Von besonderem Interesse sind dabei Investitionen in umweltfreundliche CO₂-Vermeidungstechnologien. Dabei

werden zentrale Erkenntnisse aus der so genannten Realoptionsliteratur herangezogen. Dieser Ansatz postuliert einen inversen Zusammenhang zwischen Unsicherheit und Investitionstätigkeit, besonders für den Fall von irreversiblen und industriespezifischen Ausgaben. Nach Dixit und Pindyck (1994) wird eine Firma geplante Investitionen verschoben, wenn Unsicherheit über das vorgenommene Projekt besteht und absehbar ist, dass in der Zukunft weitere Informationen über die Rentabilität des Projekts vorliegen. Bezogen auf die spezifische Situation eines Unternehmens im Europäischen Handelssystem bedeutet diese Schlussfolgerung eine Verschiebung von Investitionen in Vermeidungstechnologien. Um den Verpflichtungen des Emissionshandels nachzukommen, hat eine Firma zwei Optionen. Entweder kann sie Zertifikate in Höhe der jährlichen Emissionen erwerben oder Investitionen tätigen, um die eigenen Emissionen zu verringern. Ein sauberer Produktionsprozess verursacht in der Zukunft weniger Kosten für Energie und Emissionen, stellt aber ebenso eine irreversible Aufwendung dar. Bei hoher Unsicherheit bezüglich der Rentabilität von Investitionen in Vermeidungstechnologien geht die Realoptionstheorie von einer Verzögerung eben dieser aus.

Methode und Ergebnisse

Die für diese Analyse verwandte Methode vereint, wie oben bereits erwähnt, traditionelle GARCH- mit so genannten Jump-Modellen. Bezüglich dieser Sprünge wird die Annahme getroffen, dass die Sprunggröße normalverteilt ist und die Sprunghäufigkeit einer Poisson-Verteilung folgt. Geschätzt wird das Modell in zwei Ausgestaltungen: zum einen als Modell mit konstanter und zum anderen mit zeitveränderlicher Sprungintensität. Letzteres ermöglicht eine über die Zeit nicht konstante Dynamik der Sprünge in den Zertifikatepreisen besser abzubilden. Chan und Maheu (2002) haben diese Methode auf den Dow-Jones-Aktienindex angewandt; später folgten Anwendungen im Bereich von Wechselkursen und Preisen von ausgewählten Rohstoffen. Wie die im Folgenden dargestellten Ergebnisse zeigen, lassen sich auch die Preise von Emissionszertifikaten gut mit Hilfe dieser Methode beschreiben.

Für die Schätzungen wurden tägliche EUA Spot-Preise vom 24. Juni 2005 bis 29. Dezember 2006 sowie EUA 2008-Forward-Preise vom 22. April 2005 bis 15. Dezember 2008 verwendet.¹ Somit beinhaltet die Untersuchung sowohl Daten aus der ersten als auch aus frühen Stadien der zweiten Han-

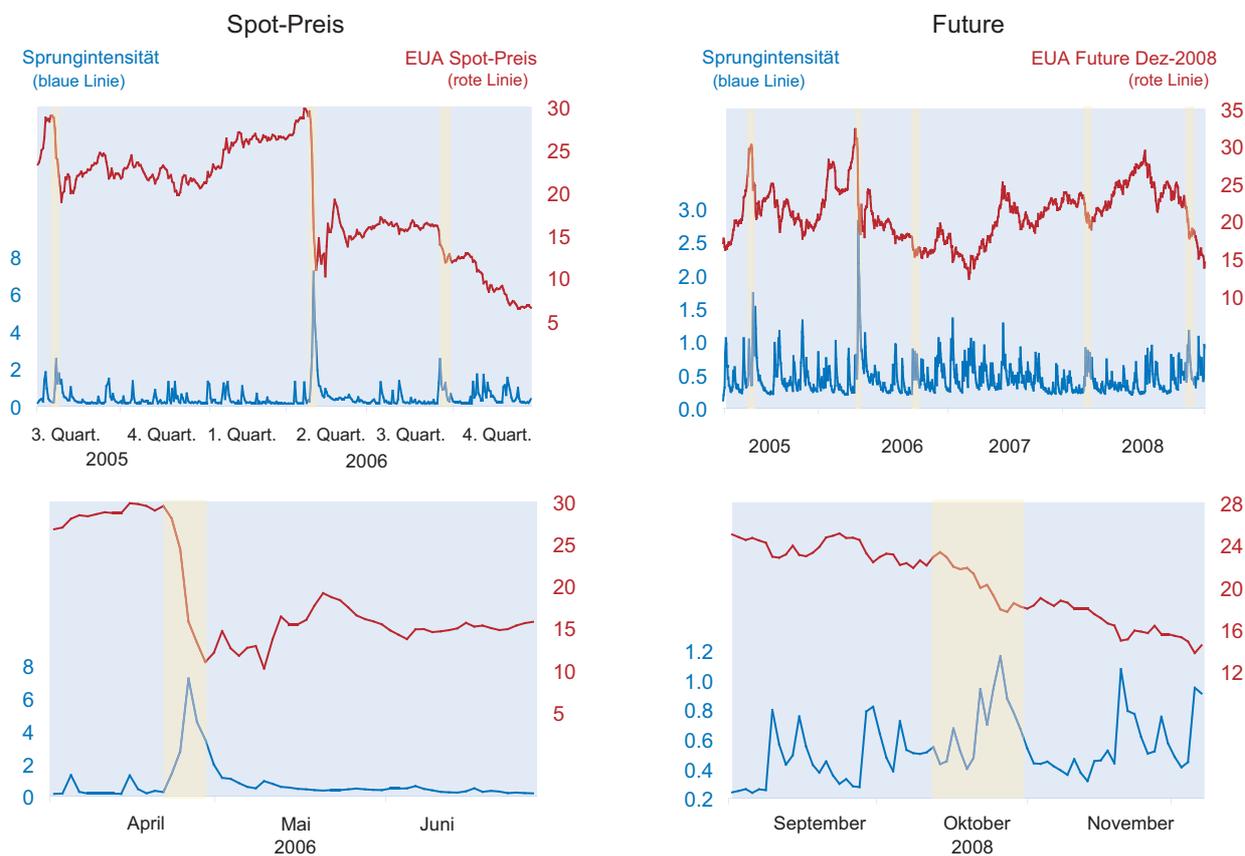
delsperiode. Die Preisdaten wurden in Wachstumsraten transformiert; die Modelle enthalten eine Konstante sowie zwei Verzögerungen der Spot- bzw. eine Verzögerung der Future-Preise. Das zentrale Ergebnis dieser Schätzungen besteht darin, dass alle Sprung-Parameter zu den üblicherweise verwendeten Signifikanzniveaus signifikant sind. Somit ist das Verhalten der Zertifikatepreise durch sprunghafte Veränderungen gekennzeichnet. Untermauert wird dieses Ergebnis durch Abbildung 1. Diese stellt die Preise der Zertifikate sowie die geschätzte Sprungintensität aus dem Modell mit zeitveränderlicher Sprungintensität dar. Je höher diese Intensität ist, desto größer ist auch die Sprungaktivität. Es ist klar ersichtlich, dass die Phasen mit besonders starken Preisbewegungen mit großen Sprungintensitäten einhergehen. Dies gilt insbesondere für den außergewöhnlichen Preisverfall Ende April 2006. Dieser Verfall hatte das Bekanntwerden eines sehr starken Überangebotes an Zertifikaten in der ersten Handelsperiode zur Ursache. Die Schätzungen für die Future-Preise zeigen zudem, dass auch für die Anfänge der zweiten Handelsperiode die Zertifikatepreise unverändert durch sprunghaftes Verhalten gekennzeichnet sind – hervorzuheben sind insbesondere die Preissprünge im Januar und im Oktober 2008. Als Ursachen für diese Art von starken Preisbewegungen sind in der Literatur sowohl Ankündigungen bezüglich der nationalen Allokationspläne und plötzliche Veränderungen in den Handelsvolumina (vgl. Sanin und Violante 2009) als auch schwankende Energiepreise und unvorhergesehene Wetterereignisse (vgl. Alberola et al. 2008) diskutiert worden. Abschließend ist darauf hinzuweisen, dass die in den Zertifikatepreisen gefundene Sprungaktivität stärker ausgeprägt ist als die, die Chan und Maheu (2002) in ihrer Anwendung auf den Dow-Jones-Aktienindex finden: Zwar sind die Ausschläge in den Sprungintensitäten vergleichbar stark, doch treten diese bei den Zertifikatepreisen häufiger auf, und zudem ist die durchschnittliche Sprungintensität größer. Somit ist zu schlussfolgern, dass die Preise von CO₂-Verschmutzungszertifikaten durch stark ausgeprägtes sprunghaftes Verhalten gekennzeichnet sind – starke unerwartete Preisbewegungen sind also keine Seltenheit. Dies impliziert allerdings, dass in diesem Markt ein besonders hohes Maß an Unsicherheit besteht. Im Folgenden soll daher untersucht werden, wie sich diese Unsicherheit auf das Verhalten der Unternehmen bezüglich der Vermeidung von CO₂ auswirkt.

Diskussion

Die Perspektive der Realoptionsliteratur ist zur Auswertung der empirischen Ergebnisse besonders geeignet, da diese den Einfluss von Unsicherheit auf ökonomische Entscheidungen analysiert. Bernanke (1983) sowie McDonald und Siegel (1986) haben bezüglich der Entscheidungen eines Unternehmens hervorgehoben, dass Unsicherheit über zukünftige Gewinne ein Aufschieben von irreversiblen Investi-

¹ Die Spot-Preise stammen von der Bluenext-Börse und sind verfügbar unter www.bluenext.eu. Diese wird als Quelle der EEX in Leipzig bevorzugt, da dort größere Handelsvolumina zu verzeichnen sind. Der Beobachtungszeitraum für die Spot-Preise endet Ende 2006, weil es anschließend zu einem stetigen Rückgang der Preise auf null gekommen ist; ein Preisverhalten, welches nicht als repräsentativ angesehen werden kann. Die Future-Preise stammen von der European Climate Exchange (www.ecx.eu).

Abb. 1
Zertifikatepreise und Sprungintensitäten



Quelle: Bluenext; European Climate Exchange; Berechnungen der Autoren.

tionen wahrscheinlicher werden lässt. Dixit und Pindyck (1994) betonen, dass die Option, mit der Investition zu warten, an Attraktivität gewinnt, sobald Unsicherheit über Preise (vgl. Pindyck 1981) oder zukünftige Nachfrage (vgl. Pindyck 1993) besteht. Um zusätzliche Informationen zu erlangen, wird die Investition aufgeschoben.

Das Konzept der Realoption spielt auch in der Umwelt- und Ressourcenökonomik eine wichtige Rolle, da hohe Unsicherheit bezüglich des Zustandes der Umwelt oder der Reaktionen des Ökosystems bestehen kann. Arrow und Fischer (1974) wie auch Pindyck (2000) modellieren diesen Einfluss auf Entscheidungen in der Umweltpolitik. Durch Unsicherheit werden die Wahl des Zeitpunkts und des Umfangs umweltpolitischer Maßnahmen erschwert. Dangi und Wirl (2007) untersuchen beispielsweise, wie Klimapolitik von der Unsicherheit bezüglich des Temperaturanstiegs beeinflusst wird.

Als besonders relevant stellen sich Papiere dar, welche die Realoptionstheorie auf Emissionshandel beziehen. Herbolot (1994) und Isney (2003) analysieren den Einfluss von

Unsicherheit auf Investitionsentscheidungen von Unternehmen während des Clean Air Act, welcher Mitte der Neunziger in den USA zur Reduzierung von SO₂ implementiert wurde. Einige neuere Papiere beschäftigen sich zudem mit den Implikationen für den Europäischen Zertifikatehandel. Durch dieses System sind Unternehmen verpflichtet, entweder Technologien zur Emissionsreduktion zu implementieren oder ihre Emissionen durch Zertifikate zu kompensieren. Yang et al. (2008) und Tuthill (2008) modellieren diese Situation europäischer Unternehmen theoretisch und stellen fest, dass Regulierungsentscheidungen im ETS eine besondere Rolle spielen. Die Autoren unterstellen, dass die Entscheidungen über Rahmenbedingungen zu Sprüngen der Zertifikatepreise führen. Das sprunghafte Verhalten der Preise induziert Unsicherheit und erschwert die Kostenkalkulation für geplante Investitionsprojekte. Die Schlussfolgerung dieser theoretischen Betrachtung ist, dass die Unternehmen veranlasst werden, ihre Investitionstätigkeit aufzuschieben.

Die hier vorgestellten empirischen Ergebnisse belegen das Auftreten von Sprüngen im gesamten Beobachtungszeitraum und bestätigen, dass Unsicherheit ein inhärentes Prob-

lem des ETS darzustellen scheint. Die Sprungintensität variiert deutlich und einige sehr hohe Sprünge können den Entscheidungen über Zertifikatevergabe und -verteilung zugeschrieben werden, wobei der Preisverfall im April 2006 als deutlichstes Beispiel regulatorischer Unsicherheit hervorsteicht. Gewiss werden die Preise auch von anderen Einflussfaktoren getrieben, wie etwa Energiepreisen, der Entwicklung des Wetters oder der Marktmacht großer Unternehmen.

Sicherlich war die erste Phase des Emissionshandels als Testlauf geplant, um Regulatoren und Marktteilnehmer an den neuen Mechanismus zu gewöhnen. Jedoch haben Verzögerungen bei der Festlegung der nationalen Allokationspläne auch in der zweiten Handelsperiode zu Unsicherheit über die endgültige Zertifikatmenge geführt. Weiterhin besteht Unsicherheit bezüglich der nationalen Anrechnungsgrenzen für CDM- und JI-Zertifikate beziehungsweise des Einflusses der Zertifikateversteigerung.² Es ist aus diesem Grund von unabdinglicher Notwendigkeit, dass Regulatoren aus den Geschehnissen der ersten Handelsperiode lernen und die Funktionalität des Systems zu verbessern.

Diese Studie hat zum Ziel, Emissionshandel als Politikinstrument zu bewerten, besonders im Hinblick auf das Ziel, Emissionen zu reduzieren. Die Ergebnisse geben Grund zur Annahme, dass es durch die inhärente Unsicherheit zu einer Verzögerung von Investitionen in emissionsärmere Produktionsprozesse kommt. Laut Sinn (2008) ist eine möglichst zeitige Verminderung von Emissionen von höchster Relevanz, um die atmosphärische Konzentration von CO₂ zu kontrollieren. Darüber hinaus deutet die Sensitivität der Zertifikatepreise auf verschiedenste Einflussfaktoren darauf hin, dass diese Preise nicht, wie theoretische Überlegungen darlegen, die Grenzvermeidungskosten reflektieren. Somit werden Bedenken von Hintermann (2009) bestärkt.

In der Debatte um eine adäquate Klimapolitik sollten die hier diskutierten Aspekte nicht vernachlässigt werden, denn sie zeigen, wie essentiell die optimale Gestaltung der Rahmenbedingungen eines Handelssystem ist.

Literatur

- Abel, A.B. (1983), »Optimal Investment under Uncertainty«, *American Economic Review* 73, 228–233.
- Alberola, E., J. Chevallier, und B. Cheze (2008), »Price Drivers and Structural Breaks in European Carbon Prices 20052007«, *Energy Policy* 36, 787–797.
- Arrow, H.J. und A.C. Fisher (1974), »Environmental preservation, Uncertainty, and Irreversibility«, *Quarterly Journal of Economics* 88, 312–319.
- Benz, E. und S. Trück (2009), »Modelling the Price Dynamics of CO₂ Emission Allowances«, *Energy Economics* 31, 4–15.
- Bernanke, B.S. (1983), »Irreversibility, Uncertainty, and Cyclical Investment«, *Quarterly Journal of Economics*, 85–106.
- Carruth, A., A. Dickerson und A. Henley (2000), »What Do We Know About Investment under Uncertainty«, *Journal of Economic Surveys* 14, 119–153.
- Chan, W.H. (2003), »A Correlated Bivariate Poisson Jump Model for Foreign Exchange«, *Empirical Economics* 28, 669–689.
- Chan, W.H. (2004), »Conditional Correlated Jump Dynamics in Foreign Exchange«, *Economics Letters* 83, 23–28.
- Chan, W.H. und J.M. Maheu (2002), »Conditional Jump Dynamics in Stock Market Returns«, *Journal of Business & Economic Statistics* 20, 377–389.
- Chan, W.H. und D. Young (2006), »Jumping Hedges: an Examination of Movements in Copper Spot and Futures Markets«, *Journal of Futures Markets* 26, 169–188.
- Dangl, T. und F. Wirl (2007), »The Consequences of Irreversibility on Optimal Intertemporal Emission Policies under Uncertainty«, *Central European Journal of Operations Research* 15, 143–166.
- Daskalakis, G., D. Psychoyios und R.N. Markellos (2009), »Modelling CO₂ Emission Allowance Prices and Derivatives: Evidence from the European Trading Scheme«, *Journal of Banking & Finance*, im Erscheinen.
- Dixit, A.K. und R.S. Pindyck (1994), *Investment under Uncertainty*, Princeton University Press, Princeton.
- Fisher, A.C. (2000), »Investment under Uncertainty and Option Value in Environmental Economics«, *Resource and Energy Economics* 22, 197–204.
- Hartman, R. (1972), »The Effects of Price and Cost Uncertainty«, *Journal of Economic Theory* 5, 258–266.
- Herbelot, O. (1992), *Option Valuation of Flexible Investments: the Case of Environmental Investments in the Electric Power Industry*, Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- Hintermann, B. (2009), »An Option Pricing Approach to CO₂ Allowances in the EU ETS«, unveröffentlichtes Manuskript, ETH Zürich.
- Insley, M.C. (2003), »On the Option to Invest in pollution Control under a Regime of Tradable Emissions Allowances«, *Canadian Journal of Economics* 36, 860–883.
- Mc Donald, R. und D. Siegel (1986), »The Value of Waiting to Invest«, *The Quarterly Journal of Economics* November, 707–727.
- Paoletta, M. und L. Taschini (2008), »An Econometric Analysis of Emission Trading Allowances«, *Journal of Banking and Finance* 32, 2022–2032.
- Pindyck, R.S. (1981), »The Optimal Production of an Exhaustible Resource when Price is Exogenous and Stochastic«, *Scandinavian Journal of Economics* 83, 277–288.
- Pindyck, R.S. (1993), »A Note on Competitive Investment under Uncertainty«, *American Economic Review* 83, 273–277.
- Pindyck, R.S. (2000), »Irreversibilities and the Timing of Environmental Policy«, *Resource and Energy Economics* 22, 233–259.
- Pindyck, R.S. (2002), »Optimal Timing Problems in Environmental Economics«, *Journal of Economic Dynamics and Control* 26, 1677–1697.
- Sanin, M.E. und F. Violante. (2009), »Understanding Volatility Dynamics in the EU-ETS Market: Lessons from the Future«, CORE Discussion Paper 2009/24.
- Sinn, H.W. (2008), »Public Policies against Global Warming: a Supply Side Approach«, *International Tax and Public Finance* 15, 360–394.
- Tuthill, L. (2008), »Investment in Electricity Generation under Emission Price Uncertainty: the Plant-Type Decision«, Oxford Institute for Energy Studies Working Paper EV 39.
- Yang, M., W. Blyth, R. Bradley, D. Bunn, C. Clarke und T. Wilson (2008), »Evaluating the Power Investment Options with Uncertainty in Climate Policy«, *Energy Economics* 30, 1933–1950.

² In der dritten Handelsperiode sollen Anteile der Zertifikate versteigert werden, 2013 erst 20%, 2020 70% aller Zertifikate.