

Dannenberg, Henry; Ehrenfeld, Wilfried

Working Paper

Prognose des CO₂-Zertifikatepreisrisikos

IWH Discussion Papers, No. 5/2008

Provided in Cooperation with:

Halle Institute for Economic Research (IWH) – Member of the Leibniz Association

Suggested Citation: Dannenberg, Henry; Ehrenfeld, Wilfried (2008) : Prognose des CO₂-Zertifikatepreisrisikos, IWH Discussion Papers, No. 5/2008, Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung Halle (IWH), Halle (Saale), <https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:3:2-7301>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/29972>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

Prognose des CO₂-Zertifikatepreisrisikos

Henry Dannenberg und Wilfried Ehrenfeld

Mai 2008

Nr. 5

Prognose des CO₂-Zertifikatepreisrisikos

Henry Dannenberg und Wilfried Ehrenfeld

Mai 2008

Nr. 5

Autoren: *Henry Dannenberg*
Abteilung Industrieökonomik
Email: Henry.Dannenberg@iwh-halle.de
Tel.: (0345) 77 53-871

Wilfried Ehrenfeld
Abteilung Industrieökonomik
Email: Wilfried.Ehrenfeld@iwh-halle.de
Tel.: (0345) 77 53-832

The responsibility for discussion papers lies solely with the individual authors. The views expressed herein do not necessarily represent those of the IWH. The papers represent preliminary work and are circulated to encourage discussion with the author. Citation of the discussion papers should account for their provisional character; a revised version may be available directly from the author.

Comments and suggestions on the methods and results presented are welcome.

IWH-Discussion Papers are indexed in RePEc-Econpapers and in ECONIS.

Herausgeber:
INSTITUT FÜR WIRTSCHAFTSFORSCHUNG HALLE – IWH
Prof. Dr. Ulrich Blum (Präsident), Dr. Hubert Gabrisch (Forschungsdirektor)
Das IWH ist Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft
Hausanschrift: Kleine Märkerstraße 8, 06108 Halle (Saale)
Postanschrift: Postfach 11 03 61, 06017 Halle (Saale)
Telefon: (0345) 77 53-60
Telefax: (0345) 77 53-8 20
Internetadresse: <http://www.iwh-halle.de>

Prognose des CO₂-Zertifikatepreisrisikos

Zusammenfassung

Die Modellierung des CO₂-Zertifikatepreisrisikos ist ein wichtiger Teilaspekt eines ganzheitlichen Managements von mit dem Emissionshandel verbundenen Unternehmensrisiken. Das Papier diskutiert ein Preisbildungsmodell, auf dessen Grundlage das Zertifikatepreisrisiko bewertet werden kann. Es wird davon ausgegangen, dass der Zertifikatepreis durch die erwarteten Grenzvermeidungskosten der Handelsperiode determiniert wird und stochastisch um dieses Niveau schwankt. Dieses Verhalten wird mit einem Mean-Reversion-Prozess modelliert.

Aufgrund von Unsicherheiten bezüglich künftiger Umweltzustände ist jedoch zu vermuten, dass innerhalb einer Handelsperiode durch das Bekanntwerden neuer Informationen sprunghafte Veränderungen der erwarteten Grenzvermeidungskosten auftreten können, womit sprunghafte Verschiebungen des erwarteten Preisniveaus einhergehen. Neben der Parameter-Schätzung ist es daher auch ein Ziel der Arbeit, den Mean-Reversion-Prozess so zu modifizieren, dass solche sprunghaften Veränderungen des erwarteten Reversion-Niveaus abgebildet werden können.

Schlagworte: Risiko, CO₂, Emissionshandel, EUA, CO₂-Zertifikatepreis, Mean-Reversion-Prozess

JEL: D81, G32, L59, Q54, Q56, Q58

Forecasting the CO₂ certificate price risk

Abstract

Modeling the price risk of CO₂ certificates is one important aspect of integral corporate risk management related to emissions trading. The paper presents a risk model which may be the basis for evaluating the risk of emission certificate prices.

We assume that the certificate price is determined by the expected marginal CO₂ abatement costs prevailing at the current trade period and stochastically fluctuates around the respective level as returned from the mean reversion process.

Due to uncertainties about future environmental states we suppose that within one trade period, erratic changes in the expected marginal abatement costs may occur leading to shifts in the price level. The aim of the work is to model the erratic changes of the expected reversion level and to estimate the parameters of the mean reversion process.

Key words: risk, carbon dioxide, emissions trading, EUA, CO₂ certificate price, mean reversion process

JEL: D81, G32, L59, Q54, Q56, Q58

Prognose des CO₂-Zertifikatepreisrisikos

1 Einführung

Mit dem Kyoto-Protokoll wurde 1997 ein internationales Abkommen beschlossen, welches zum Ziel hat, die globalen Treibhausgasemissionen zu senken. Ausgehend vom Stand im Jahre 1990 soll bis zum Zeitraum 2008 bis 2012 der Ausstoß von sechs Treibhausgasen um durchschnittlich 5% reduziert werden. Innerhalb dieser Rahmenbedingungen hat sich die Europäische Union verpflichtet, ihre Treibhausgase um 8% zu verringern. Zur Erfüllung der Reduktionsziele sind drei flexible Mechanismen vorgesehen: Der Mechanismus für umweltverträgliche Entwicklung (clean development mechanism, CDM), die gemeinsame Umsetzung (joint implementation, JI) und der internationale Emissionsrechtehandel (international emissions trading, IET). Während es JI Industriestaaten gestattet Emissionsreduktionsprojekte in anderen Industriestaaten durchzuführen, erhalten bei CDM Industriestaaten die Möglichkeit, in Entwicklungsländern solche Projekte durchzuführen. Für die erfolgreiche Durchführung von Reduktionsprojekten werden Emissionsgutschriften erteilt, welche auf die Reduktionsverpflichtung im Inland bis zu einem bestimmten Grad angerechnet werden können. Der IET soll den Vertragsstaaten ab 2008 ermöglichen, untereinander mit Emissionen zu handeln um die Reduktionsvorgaben zu erfüllen.

Während der IET auf Staatenebene stattfinden soll, sieht das zum 1. Januar 2005 von der EU eingeführte Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS) den Handel von Emissionszertifikaten auf Unternehmensbasis vor. Die EU-Richtlinie 2003/87/EG schafft für den Zeitraum 2005 bis 2012 die Rahmenbedingungen für den europäischen Emissionshandel und beschreibt die Details des Handelssystems wie Zuteilung und Sanktionen. Ziel des EU ETS ist die kosteneffiziente Senkung von CO₂-Emissionen in Unternehmen aus dem Energiesektor und anderen emissionsintensiven Industrieunternehmen wie z. B. der Zementindustrie. Betroffen sind in diesen Industriebranchen hauptsächlich Verbrennungsanlagen ab 20 MW. Den betroffenen Anlagen wird eine bestimmte Anzahl Zertifikate (EUA) zugeteilt. Jedes Zertifikat berechtigt dabei zur Emission von einer Tonne CO₂. Zum Ende eines jeden Jahres in der Verpflichtungsperiode muss der Anlagenbetreiber die den Emissionen der Anlage entsprechende Menge Zertifikate vorweisen können. Um den Reduktionsvorgaben gerecht zu werden, kann der Anlagenbetreiber aktiv Reduktionsmaßnahmen durchführen und gegebenenfalls überzählige Zertifikate verkaufen. Andererseits kann sich der Anlagenbetreiber im Falle der Unterdeckung Zertifikate am Markt beschaffen. Das Recht, eine bestimmte Menge CO₂ auszustoßen, wird so zu einem handelbaren Gut, dessen Preis durch Angebot und Nachfrage bestimmt wird. Die Emissionszertifikate können auf verschiedenen Spot- und Fu-

tures-Märkten gehandelt werden. Die größten Vertreter dieser Märkte sind Powernext in Frankreich, Nordpool in Skandinavien, die European Climate Exchange (ECX) in den Niederlanden und die European Energy Exchange (EEX) in Deutschland. Aktuell umfasst das EU ETS zwei Phasen: eine Erprobungsphase von 2005 bis 2007 und die so genannte Kyoto-Phase von 2008 bis 2012. Zertifikate können nicht nur von zur Teilnahme am Emissionshandelssystem verpflichteten Unternehmen gehandelt werden, sondern von jeder natürlichen oder juristischen Person. Innerhalb der Phasen können Zertifikate zwischen den Jahren übertragen werden (so genanntes „banking and borrowing“), zwischen den beiden Phasen jedoch nicht.

Für Unternehmen, die am Zertifikatehandel teilnehmen, stellt der Preis dieser Zertifikate eine wichtige Größe bei Entscheidungen über Investitionen in CO₂-vermeidende Technologien dar. Die Wirtschaftlichkeit einer solchen Investition hängt dabei im Wesentlichen von der Entwicklung des Zertifikatepreises ab. Da diese Entwicklung jedoch unsicher ist, ergibt sich für Unternehmen ein Investitionsrisiko. So stellt sich beispielsweise die Frage, ob ein Unternehmen das mit einer konkreten Investitionsentscheidung verbundene Risiko überhaupt tragen kann, also ob genug Eigenkapital vorhanden ist. Die Prognose des CO₂-Zertifikatepreisrisikos ist daher eine notwendige Voraussetzung, um Entscheidungen hinsichtlich konkreter Investitionsalternativen treffen zu können.

Hier wird daher ein Modell entwickelt, welches eine Prognose des CO₂-Zertifikatepreisrisikos ermöglicht. Das heißt, es ist nicht Ziel der Arbeit, eine Prognose für den zu einem bestimmten Zeitpunkt zu erwartenden Zertifikatepreis, sondern für dessen Wahrscheinlichkeitsverteilung zu ermöglichen. Das Papier ist wie folgt gegliedert: Abschnitt zwei liefert einen Überblick über die bereits existierende Literatur zum Thema CO₂-Lizenzpreis. Abschnitt drei befasst sich mit der theoretischen Preisbildung. Abschnitt vier beschreibt den Aufbau des Preismodells. Das Papier schließt mit einer kurzen Zusammenfassung.

2 Überblick über die Literatur

Die Literatur zum CO₂-Preis lässt sich in drei Gruppen untergliedern. Die erste Gruppe schätzt den erwarteten CO₂-Preis oder den Zertifikatepreis für Treibhausgase allgemein. Dabei werden vorzugsweise Makromodelle oder Energiemarktmodelle verwendet und Schätzungen für einen bestimmten Zeitpunkt oder den Verlauf über einen bestimmten Zeitraum erstellt. Springer (2003) liefert eine Übersicht über 25 Modelle und ihre Ergebnisse. Bemerkenswert ist die Bandbreite der zu erwartenden Treibhausgas-Zertifikatepreise, welche von 3 USD/t bis zu 74 USD/t reicht. Matthes et al. (2003) fassen die Ergebnisse weiterer Modelle zusammen und nehmen für das Jahr 2010 eine Preisspanne zwischen 5 und 30 Euro pro Tonne CO₂-Äquivalent an. Für weitere Betrachtungen wählen sie einen mittleren Preis von 10 Euro pro Tonne CO₂.

Die zweite Gruppe konzentriert sich auf die Bestimmung von Einflussfaktoren auf den CO₂-Preis. Wirsching (2004) unterscheidet zwischen langfristigen und kurzfristigen Einflussfaktoren. Zu den langfristigen Faktoren gehören die Ausgestaltung der nationalen Allokationspläne, die CO₂-Vermeidungskosten und das Vermeidungspotenzial, der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromproduktion sowie die Bedingungen, unter welchen Emissionsgutschriften aus CDM- und JI-Projekten innerhalb des europäischen Emissionshandels anerkannt werden (die so genannte linking directive). Zu den kurzfristigen Faktoren zählen das Preisverhältnis von Kohle zu Gas, die Wetterabhängigkeit von erneuerbaren Energien und des Wärmesektors sowie das Wirtschaftswachstum. Uhrig-Homburg und Wagner (2006) führten Befragungen von Experten aus verschiedenen relevanten Berufsgruppen durch und nennen als wichtige Einflussfaktoren neben den bereits genannten Fundamentaldaten vor allem regulatorische und politische Faktoren. Sijm et al. (2005) unterteilen die Einflussfaktoren in Angebots- und Nachfragefaktoren sowie Faktoren, welche Marktstruktur, Regulierung und Markteingriff umfassen. Als wichtigsten Einfluss auf die Marktstruktur nennen Sijm et al. die Anzahl der aktiven Teilnehmer und die deren Fähigkeit, die Marktpreise durch strategisches Verhalten zu beeinflussen. Weiter wird die allgemeine Stimmungslage des Marktes („market sentiments“) als relevant erachtet, da der CO₂-Markt noch sehr jung sei.

Die oben genannten Autoren der zweiten Gruppe untersuchen die Einflussfaktoren lediglich qualitativ. Mansanet-Bataller et al. (2006) unternehmen eine erste quantitative Analyse. Sie schätzen ein multivariates, lineares Regressionsmodell für den CO₂-Preis und erhalten signifikante, positive Koeffizienten für den aktuellen Elektrizitätspreis, den um eine Periode verzögerten Elektrizitätspreis sowie den verzögerten Erdölpreis. Auch der Quotient aus Gas- und Elektrizitätspreis besitzt einen positiven Einfluss auf den CO₂-Preis und ist statistisch signifikant. Dieser Zusammenhang kann dahin gehend interpretiert werden, dass aufgrund des gestiegenen Gaspreises vermehrt Kohle zur Elektrizitätsproduktion herangezogen wird. Die Elektrizitätsproduktion aus Kohle ist jedoch weitaus CO₂-intensiver als die Produktion aus Gas. So steigt die Nachfrage nach CO₂-Zertifikaten und damit deren Preis. Sowohl die Koeffizienten für die Durchschnitts-

temperatur als auch für die gemessene Niederschlagsmenge sind nicht signifikant, wohingegen Temperaturextreme einen hochsignifikanten positiven Einfluss besitzen. Auch Point Carbon (2007) schätzt den Zusammenhang zwischen EUA-Preis, Brennstoffpreis und Wetter. Als Brennstoffpreis wurde der Preis für Kohle oder Gas verwendet, abhängig davon, welcher aufgrund des Preisunterschiedes für die Stromproduktion verwendet wurde. Für 2006 betragen die Korrelationen von EUA-Preis zu Brennstoffpreis und Wetter 0,46 (verglichen mit 0,89 im Jahr 2005) und 0,35 (verglichen mit 0,48 im Jahr 2005). Point Carbon bezeichnet die Änderung dieser Fundamentalwerte als einen Hauptgrund für die Handelsbewegungen am Markt.

Die dritte Gruppe untersucht, ob sich der Markt für Emissionszertifikate durch stochastische Prozesse beschreiben lässt oder bedient sich dieser Prozesse, um technisch orientierte Modelle für den CO₂-Markt zu erstellen. Seifert et al. (2006) stellen ein stochastisches Gleichgewichtsmodell für den Spotmarkt vor, welches sich (in einem Spezialfall) analytisch lösen lässt. Benz und Trück (2006) betrachten die stilisierten Fakten des Emissionshandels und kommen zu dem Ergebnis, dass aufgrund der unterschiedlichen Phasen im Verhalten von Volatilität und Preisen der Spotmarkt für Emissionszertifikate gut durch Regime-switching-Modelle erfasst werden kann. Daskalakis et al. (2006) untersuchen die Spotmarkt- und Future-Preise für Emissionszertifikate an der deutschen EEX. Ihre Resultate weisen darauf hin, dass die Spotpreise für Emissionszertifikate einem volatilen random walk mit un stetigen Sprüngen folgen. Sie führen Parameterschätzungen für einige stochastische Prozesse durch und kommen zu dem Schluss, dass sich das Preisverhalten gut durch das Jump-diffusion-Modell, welches auf Merton (1976) zurückgeht, beschreiben lässt. Paoella und Taschini (2006) betrachten die Ausläufer-Stärke (tail thickness) einer un konditionalen Verteilung als Risikomaß und entwickeln ein GARCH-Modell für eine bedingte Verteilung.

Uhrig-Homburg und Wagner (2007) konzentrieren sich auf das Verhältnis von Spotmarkt und dem Markt für Futures. Nach eingehendem Vergleich der bisherigen Entwicklung von Spotmarkt-Preisen und Futures-Preisen finden sie einige Hinweise darauf, dass die Preise durch den Cost-of-carry-Ansatz (Erklärung des Preisunterschiedes durch Haltekosten) verknüpft sind. Fehr und Hinz (2007) stellen fest, dass der Markt hauptsächlich auf Änderungen in Fundamentaldaten wie das Verhältnis von Kohle- zu Gaspreis sowie Temperatur und Niederschlag reagiert und stellen ein stochastisches Gleichgewichtsmodell vor, welches diese Faktoren berücksichtigt. Weiter liefern die Autoren einen ersten Ansatz, wie ihre Resultate im Risiko-Management Verwendung finden könnten. Dies geschieht unter Betrachtung eines einfachen Brennstoffwechsel-Prozesses. In ihrem Investitionsrisikomodell für den Energiesektor modellieren Yang und Blyth (2007) den CO₂-Preisverlauf als random walk. Um die Unsicherheit bzgl. der zukünftigen Klimapolitik abzubilden, wird die langfristige Simulation um einen einmaligen Preisschock infolge einer Politikänderung ergänzt. IEA (2007) beschreibt die Ergebnisse einer Simulation unter Verwendung dieses Modells.

In dieser Arbeit wird ein auf einem stochastischen Prozess beruhendes Modell zur Prognose des Zertifikatepreisrisikos entwickelt. Der Fokus liegt also anders als bei den oben aufgeführten Modellen nicht in der Erklärung oder Prognose der Preisentwicklung, sondern in der Prognose des damit verbundenen Risikos.

3 Theoretische Preisbildung

Innerhalb einer Handelsperiode steht eine bestimmte Menge an Zertifikaten zur Verfügung, die den Ausstoß einer politisch erwünschten Menge CO₂ erlauben. Die am CO₂-Handel beteiligten Unternehmen haben die Möglichkeit, die ihnen zugeteilten Zertifikate für eigene Emissionen zu verbrauchen und fehlende Zertifikate am Markt zu erwerben beziehungsweise überflüssige Zertifikate zu verkaufen. Für ein Unternehmen lohnt es sich, in CO₂-vermeidende Technologien zu investieren, wenn die hierdurch eingesparten Verschmutzungsrechte am Markt zu einem höheren Preis gehandelt werden. Sind die Kosten der Emissionsvermeidung im eigenen Unternehmen (oder alternativen Investitionen im Rahmen von JI oder CDM) höher als die Preise der entsprechenden Verschmutzungszertifikate, dann lohnt es sich für ein Unternehmen nicht zu investieren. Stattdessen wird das Unternehmen Zertifikate am Markt erwerben. Da alle Marktteilnehmer vor dieser Entscheidung stehen, spiegelt der Zertifikatspreis einer Handelsperiode die „make or buy“-Entscheidungen aller Marktteilnehmer wider. Der Zertifikatspreis einer Handelsperiode ist also durch die letzte und damit teuerste einzusparende Einheit CO₂-Emission bestimmt. Diese Kosten werden als Grenzvermeidungskosten bezeichnet. Der aktuelle Marktpreis sollte daher den (gegebenenfalls abgezinsten) Grenzvermeidungskosten der Periode entsprechen.¹

Die Grenzvermeidungskosten von CO₂-Emissionen einer Handelsperiode können im Prinzip erst am Ende dieser Periode bestimmt werden, da erst zu diesem Zeitpunkt bekannt ist, wie viel CO₂ tatsächlich und zu welchen Kosten vermieden werden musste. Vorher besteht Unsicherheit darüber, wie hoch die Grenzvermeidungskosten tatsächlich sein werden. Es können über diese jedoch Erwartungen (durchaus auch modellbasiert) gebildet werden. Die Vielzahl der Erwartungen hinsichtlich der Grenzvermeidungskosten einer Periode spiegelt sich im aktuellen Marktpreis wider. Dieser verarbeitet alle verfügbaren Informationen und Prognosen und stellt damit den zum aktuellen Zeitpunkt besten Schätzer der Grenzvermeidungskosten einer Periode dar. Für den Zertifikatspreis wäre daher zu erwarten, dass er zufällig um die vom Markt erwarteten Grenzvermeidungskosten schwankt.

Innerhalb einer Handelsperiode können jedoch zusätzliche Informationen bereitgestellt werden, die zu einer fundamentalen Neubewertung der zu erwartenden Grenzvermeidungskosten durch den Markt führen. Wird also beispielsweise bekannt, dass bis zu einem bestimmten Zeitpunkt weniger CO₂ emittiert wurde als bis dahin angenommen, ändern sich auch die Erwartungen hinsichtlich der CO₂-Emissionen der gesamte Periode. Damit muss in dieser Periode weniger CO₂ vermieden werden als bis dahin vermutet. Der Markt bildet auf Grundlage der neuen Information eine neue Erwartung hinsichtlich der für die gesamte Periode zu erwartenden Grenzvermeidungskosten. Aus diesem Grund sind sprunghafte Verschiebungen des Preisniveaus vorstellbar, die nicht allein auf stochastische Preisschwankungen zurückgeführt werden können.

¹ Die Abzinsung wird im Folgenden vernachlässigt.

4 Modellierung des CO₂-Zertifikatepreises

4.1 Der Mean-Reversion-Prozess

Grundsätzlich stehen verschiedene stochastische Prozesse zur Beschreibung möglicher künftiger Preise einer Aktie oder eines Gutes zur Verfügung (beispielsweise Geometrische Brownsche Bewegung mit und ohne Berücksichtigung von Sprüngen, Mean-Reversion-Prozesse mit und ohne Berücksichtigung von Sprüngen etc.).² Ein Mean-Reversion-Prozess kann als eine Modifikation eines random walk betrachtet werden, bei dem Preisänderungen nicht mehr völlig unabhängig erfolgen. Es wird vielmehr davon ausgegangen, dass ein Mittelwert existiert, zu dem es den Preis zurück zieht.

Die Modellierung von Energie- oder Gaspreisen mittels Mean-Reversion-Prozess ist durchaus üblich.³ Bei Gütern wie Energie oder Gas wird dieser Mittelwert durch die Grenzkosten der Produktion und dem Umfang der Nachfrage determiniert. Auf kurze Sicht können Abweichungen von diesem Mittelwert beobachtet werden. Auf lange Sicht nähert sich der Preis aber wieder in Richtung Grenzkosten der Produktion. Da hier aus den im vorangegangenen Abschnitt formulierten Gründen davon ausgegangen wird, dass sich der Preis von Emissionszertifikaten auf Grundlage der erwarteten Grenzvermeidungskosten bildet, erscheint der Mean-Reversion-Prozess besonders geeignet, um den CO₂-Preis abzubilden.⁴

Der Mean-Reversion-Prozess beziehungsweise Ornstein-Uhlenbeck-Prozess oder auch elastischer random walk,⁵ geht auf die beiden niederländischen Mathematiker George Uhlenbeck und Leonard Ornstein zurück.⁶ Vasicek (1977) nutzte diesen Prozess erstmals zur Modellierung von Zinsraten.⁷ Der Ornstein-Uhlenbeck-Prozess weist die folgende Form auf:

$$d \ln(S_{t+1}) = \alpha(\ln(S^*) - \ln(S_t))dt + \sigma dW_t \quad (1)$$

mit:

- S_t bezeichnet den Spotpreis zum Zeitpunkt t .

² Vgl. bspw. Blanco, Choi, Soronow (2001); Blanco, Soronow (2001 a, b).

³ Vgl. Clewlow, Strickland, Kaminski (2000); Blanco, Choi, Soronow (2001), S. 74.

⁴ Spangardt, Meyer (2005) sowie IEA (2007) vertreten ebenfalls diese Ansicht.

⁵ Vgl. Vasicek (1977), S. 185.

⁶ Siehe Uhlenbeck, Ornstein (1930), S. 823 ff.

⁷ Vgl. Vasicek (1977), S. 177 ff.

- $d \ln(S_{t+1}) = \ln(S_{t+1}) - \ln(S_t)$ ist die erwartete logarithmierte Preisänderung.
- S^* ist das gleichgewichtige Niveau des Prozesses (Mean-Reversion-Level)
- α ist die Mean-Reversion-Geschwindigkeit beziehungsweise Mean-Reversion-Rate. Sie steht für die Stärke, mit welcher der Kurs zum Mittelwert zurückgezogen wird.
- σ ist die Volatilität.
- W_t ist ein Standard Wiener Prozess, also ein zufälliger Schock zwischen den Zeitpunkten t und $t+1$.

In der Literatur werden darüber hinaus auch Mean-Reversion-Prozesse mit Sprüngen beschrieben.⁸ Hierbei handelt es sich um kurzfristige Sprünge (Spikes), die beispielsweise durch Nachfrageschocks oder Produktionsausfälle bei Gütern, die nicht speicherbar sind, auftreten können.⁹ Ist die kurzfristige Nachfrageelastizität sehr gering, können erhebliche Preissprünge auftreten. Diese Art von Mean-Reversion-Prozessen wird als Mean-Reversion Jump Diffusion (MRJD) bezeichnet und z. B. in der Modellierung des Strommarktes eingesetzt. Für die Modellierung des Zertifikatepreises erscheint sie jedoch weniger geeignet, da Zertifikate zumindest innerhalb der einzelnen Handelsperioden speicherbar und damit zeitlich begrenzte Nachfrage- beziehungsweise Angebotsprünge höchstens in der letzten Phase der Handelsperiode vorstellbar sind.

4.2 Modifizierung des Mean-Reversion-Prozesses

Für die Modellierung des CO₂-Zertifikatepreises soll hier also ein Mean-Reversion-Prozess ohne Jump Diffusion verwendet werden. Was geschieht nun, wenn eine neue Information bekannt wird, welche die Erwartungen über die Grenzvermeidungskosten *fundamental* verändert? Die Änderung von Erwartungen kann in diesem Fall durchaus sprunghaft erfolgen. Es wird hier deshalb davon ausgegangen, dass die mittleren erwarteten Zertifikatepreise durch die Aufdeckung zusätzlicher Informationen¹⁰ verschoben werden können. Um die sprunghaften Preisniveaushiftungen aufgrund von fundamentalen Erwartungsänderungen abbilden zu können, muss der Mean-Reversion-Prozess grundlegend modifiziert werden, was zu folgendem erweiterten Modell führt:¹¹

$$d \ln(S_{t+1}) = \alpha(\ln(S_{t+1}^*) - \ln(S_t))dt + \sigma dW_t \quad (2)$$

⁸ Siehe z. B. *Straja* (2001), S. 1 ff.

⁹ *Blanco, Soronow* (2001 b), S. 83.

¹⁰ Siehe z. B. *Spangardt, Meyer* (2005), S. 226.

¹¹ Den Autoren ist nicht bekannt, dass eine solche Vorgehensweise zur Modellierung des CO₂-Preisrisikos bereits verwendet worden wäre.

mit

$$S_{t+1}^* = S_t^* (1 + SP \cdot VZ \cdot H)$$

- S_t^* bezeichnet das Mean-Reversion-Level zum Zeitpunkt t , S_{t+1}^* das Reversion-Level zum Zeitpunkt $t+1$. Wenn keine Verschiebung des Mean-Reversion-Levels erfolgt, gilt: $S_{t+1}^* = S_t^*$.
- SP ist die „Sprungvariable“. Sie folgt einem Bernoulli-Prozess mit dem Parameter p , wobei dieser die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer „sprungverursachenden“ Information bezeichnet. SP fungiert als eine Art Schalter: Entweder eine sprunghafte Verschiebung des Mean-Reversion-Levels tritt auf ($SP=1$) oder nicht ($SP=0$).
- VZ ist eine Vorzeichenvariable, die mit Wahrscheinlichkeit $q = 50\%$ den Wert 1 und sonst -1 annimmt. Die Verwendung von $q = 50\%$ hat zur Folge, dass die Wahrscheinlichkeit einer Preiserhöhung gleich der Wahrscheinlichkeit einer Preissenkung angenommen wird.
- H ist die Variable, welche das Ausmaß des Sprunges im Verhältnis zum Reversion-Level S_t^* modelliert. Hier wird zur Modellierung zunächst eine Normalverteilung gewählt: $H \sim N(\mu, \gamma^2)$. Das heißt, es wird davon ausgegangen, dass die Sprünge symmetrisch mit einer Standardabweichung γ um eine erwartete Sprunghöhe μ streuen.

Dieses Modell beschreibt also keinen klassischen Mean-Reversion-Prozess mehr, sondern eine Verkettung von verschiedenen Mean-Reversion-Prozessen, die unterschiedliche Parameterausprägungen, insbesondere hinsichtlich des Reversion-Levels, aufweisen können.

4.3 Bewertung der historischen Preisentwicklung der CO₂-Zertifikate

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt ein Modell zur Beschreibung der Zertifikatepreisentwicklung vorgestellt wurde, wird nun untersucht, ob ein Mean-Reversion-Prozess mit Niveauverschiebung der Preisentwicklung in der ersten Handelsperiode zugrunde gelegen haben kann. Dazu erfolgt eine empirische Untersuchung der Zeitreihe des Spotmarkt-Zertifikatepreises an der EEX für den Zeitraum zwischen 04.08.05 und 26.04.07. Für diesen Zeitraum stehen 438 Tagesendpreise zur Verfügung.

Abbildung 1:
CO₂-Zertifikatepreis 04.08.2005 bis 26.04.2007



Zu Beginn der Zeitreihe (04.08.05 bis 16.01.06) bewegte sich der Zertifikatepreis auf einem Niveau um 22 Euro. Die Woche zwischen dem 13.01.06 und 19.01.06 zeichnet sich durch extrem kaltes Wetter in weiten Teilen Europas, rasant steigende Ölpreise und sehr hohe Strompreise aus. Aufgrund der Substituierbarkeit von Gas oder Öl durch Kohle könnten sich in dieser Zeit die Erwartungen der tatsächlichen Grenzvermeidungskosten in dieser Periode nach oben verschoben haben, da die Energieerzeugung auf Kohlebasis deutlich CO₂-intensiver ist als auf Öl- oder Gasbasis. In der Periode zwischen dem 19.01.06 und dem 04.04.06 bewegte sich der Preis auf einem Niveau um 26 Euro. In den darauffolgenden drei Wochen (bis 24.04.06) stieg der Preis noch einmal kurz bis auf knapp 30 Euro an. Diese Periode ist unter anderem durch einen Ölpreis auf Rekordniveau und Steigerungen beim deutschen Strompreis geprägt. Es ist daher möglich, dass die Marktteilnehmer (v. a. Energiekonzerne) in dieser Phase ihre Erwartungen bezüglich der Grenzvermeidungskosten in dieser Handelsperiode nach oben korrigierten.

In der Woche zwischen dem 21.04.06 und dem 27.04.06 halbierten sich die Zertifikatepreise nahezu. In diesem Zeitraum publizierten die Niederlande, Belgien, Frankreich, Spanien und die Tschechische Republik ihre Emissionsberichte. Es wurde deutlich, dass die Unternehmen in diesen Ländern bis zu diesem Zeitpunkt deutlich weniger emittiert hatten als erwartet worden war. Damit sanken auch die erwarteten Zertifikatepreise der

Periode auf ein wesentlich geringeres Niveau. In der Periode bis ca. Ende Juni verarbeitete der Markt die neue Information bezüglich der tatsächlich erfolgten Emissionen und pendelte sich dann bis zur Woche vom 15.09.06 bis 21.09.06 auf ein Niveau um 16 Euro ein. Danach fiel der Preis in mehreren Sprüngen, bis er am 19.02.07 erstmals unter einen Euro notierte. Die Periode zwischen September 2006 und Februar 2007 ist auf dem ersten Blick nicht typisch für einen Mean-Reversion-Prozess, da scheinbar ein kontinuierlicher Abwärtstrend beobachtet werden kann. Während dieser Zeit sind dem Markt verschiedene Informationen bekannt geworden, die darauf hindeuteten, dass geringere Emissionen in der Handelsperiode erfolgen werden als ursprünglich erwartet wurden. So sanken die Öl- und Gaspreise, und die Temperaturen waren für die Jahreszeit ungewöhnlich hoch. Darüber hinaus wird in dieser Periode deutlich, dass es eine Überausstattung an Zertifikaten gibt. Eine genauere Untersuchung dieses Zeitabschnittes lässt die Hypothese der sprunghaften Verschiebungen des Reversion Niveaus jedoch plausibel erscheinen. So sank der Preis zwischen dem 18.09.06 und dem 26.09.06 von 16 Euro auf 12 Euro und verharrte dann bis zum 26.10.06 auf diesem Niveau. Danach fiel der Preis bis zum 10.11.06 auf ein Niveau von 8,50 Euro. Um diesen Wert schwankte der Preis bis zum 28.11.06 und fiel dann auf ein Niveau um 6,50 Euro, auf dem er sich dann bis Ende des Jahres 2006 hielt. Danach können noch zwei Sprünge bis zum 19.02.07 identifiziert werden. Die erwarteten Grenzvermeidungskosten sanken dadurch auf ein Niveau nahe null (ca. 2 ct), auf dem sie bis zum Ende der ersten Handelsperiode verharrten.

4.4 Schätzung der Parameter für einzelne Perioden

Im Folgenden sollen vier Abschnitte des Zertifikatepreises näher untersucht werden. Dabei handelt es sich um die Perioden vom 04.08.05 bis 16.01.06 (Periode 1), 19.01.06 bis 04.04.06 (Periode 2), 26.06.06 bis 19.09.06 (Periode 3) sowie 19.02.07 bis 26.04.07 (Periode 4). Diese Perioden scheinen jeweils einem Mean-Reversion-Prozess zu folgen, der sich jedoch hinsichtlich des Reversion-Levels unterscheidet. Die Perioden wurden zunächst auf Stationarität getestet. Für die Perioden 1, 2 und 3 kann die Hypothese, dass eine Einheitswurzel vorliegt, verworfen werden, für Periode 4 jedoch nicht. Vermutlich wurde der Preis in Periode 4 kaum noch durch die Grenzvermeidungskosten bestimmt. Vielmehr ist anzunehmen, dass Preisänderungen hier primär auf Spekulationen zurückzuführen sind. Diese Periode wird daher nicht weiter untersucht.

Anschließend werden die Parameter der den Perioden 1 bis 3 zugrunde liegenden Mean-Reversion-Prozesse bestimmt. Hierbei handelt es sich um das Niveau des Prozesses (mean), die Mean-Reversion-Rate und die Volatilität. Diese Parameter werden geschätzt, indem die absoluten Preisänderungen der aktuellen Periode in Beziehung zu den Preisen der Vorperiode gesetzt werden.¹² Dies geschieht in Form einer einfachen, line-

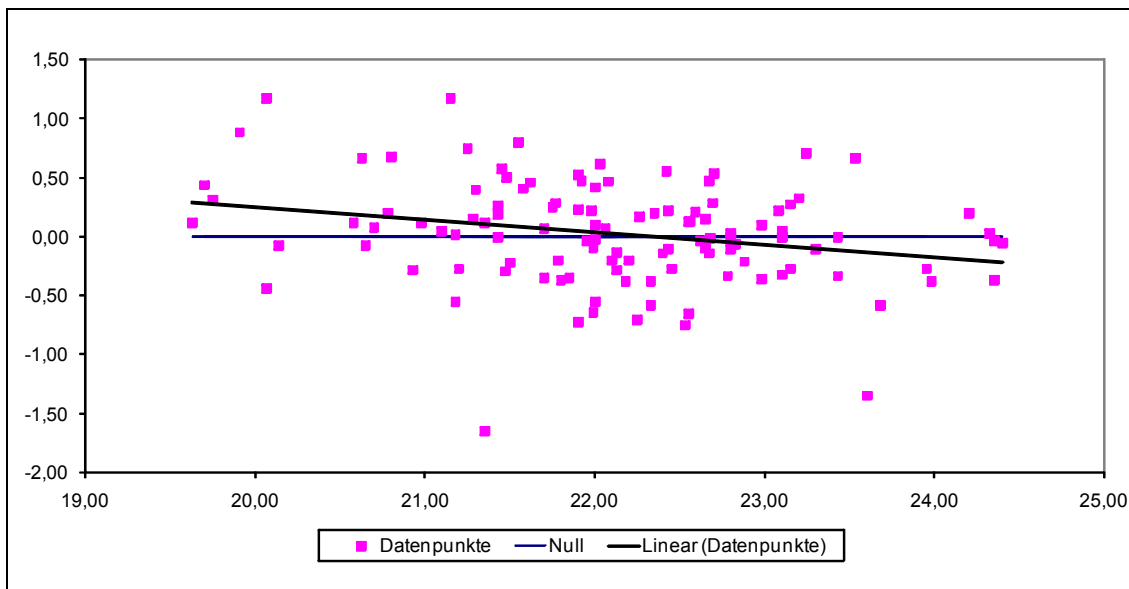
¹² Vgl. Blanco, Soronow (2001 a), S. 71.

ren Regression. Abbildung 2 veranschaulicht das Vorgehen für die Periode 1. Die Mean-Reversion-Geschwindigkeit errechnet sich aus dem mit -1 multiplizierten Anstieg der Regressionsgeraden. Das gleichgewichtige Niveau des Prozesses ergibt sich aus dem Schnittpunkt der Regressionsgeraden mit der Abszisse. Die Volatilität des Prozesses errechnet sich als Quotient aus Standardfehler und dem gleichgewichtigen Niveau des Prozesses. In Tabelle 2 sind die geschätzten Parameter für die einzelnen Perioden angegeben.

Tabelle 1:
Test auf Stationarität der vier betrachteten Perioden¹³

Periode		t-Statistik	Wahrscheinlichkeit
1	Augmented Dickey-Fuller Teststatistik	-3.000357	0.0378
2	Augmented Dickey-Fuller Teststatistik	-2.795334	0.0659
3	Augmented Dickey-Fuller Teststatistik	-3.396553	0.0148
4	Augmented Dickey-Fuller Teststatistik	-0.946067	0.7644

Abbildung 2:
Schätzung der Parameter des Mean-Reversion-Prozesses in Periode 1



¹³ Der Einheitswurzeltest wurde mit Konstante durchgeführt.

Tabelle 2:

Geschätzte Parameter der Mean-Reversion-Prozesse in drei Perioden

Periode	Mean-Reversion-Geschwindigkeit	Beobachtungen	Volatilität	Niveau des Prozesses
1	0,11	114	0,019	22,4
2	0,33	53	0,014	26,3
3	0,23	51	0,016	16,0

Die Mean-Reversion-Geschwindigkeit α bewegt sich in einem Korridor zwischen 0,11 und 0,33. Die Volatilität der einzelnen Perioden schwankt zwischen 0,014 und 0,019. Im gesamten Betrachtungszeitraum können sieben Niveauverschiebungen beobachtet werden.¹⁴ Damit ergibt sich eine Sprungwahrscheinlichkeit von $p = 7/438 = 1,6\%$. Die jeweiligen Sprunghöhen werden in Tabelle 3 im Verhältnis zum Ausgangsniveau angegeben.

Tabelle 3:

Sprunghöhen

Zeitraum	16.01.06 - 19.01.06	04.04.06 - 06.04.06	25.04.06 - 06.06.06	19.09.06 - 22.09.06	27.10.06 - 08.11.06	28.11.06 - 01.12.06	29.12.06 - 05.01.07
Höhe	17,4%	9,5%	-44,4%	-23,1%	-28,5%	-23,9%	-49,3%
Absolute Höhe	17,4%	9,5%	44,4%	23,1%	28,5%	23,9%	49,3%

Basierend auf diesen historischen Beobachtungen wird eine durchschnittliche Sprunghöhe $\mu = 0,28$ im Verhältnis zum jeweils aktuellen Reversion-Niveau und eine Standardabweichung $\gamma = 0,142$ der Sprunghöhe geschätzt.

4.5 Modellierung der Zertifikatepreise mittels Monte-Carlo-Simulation

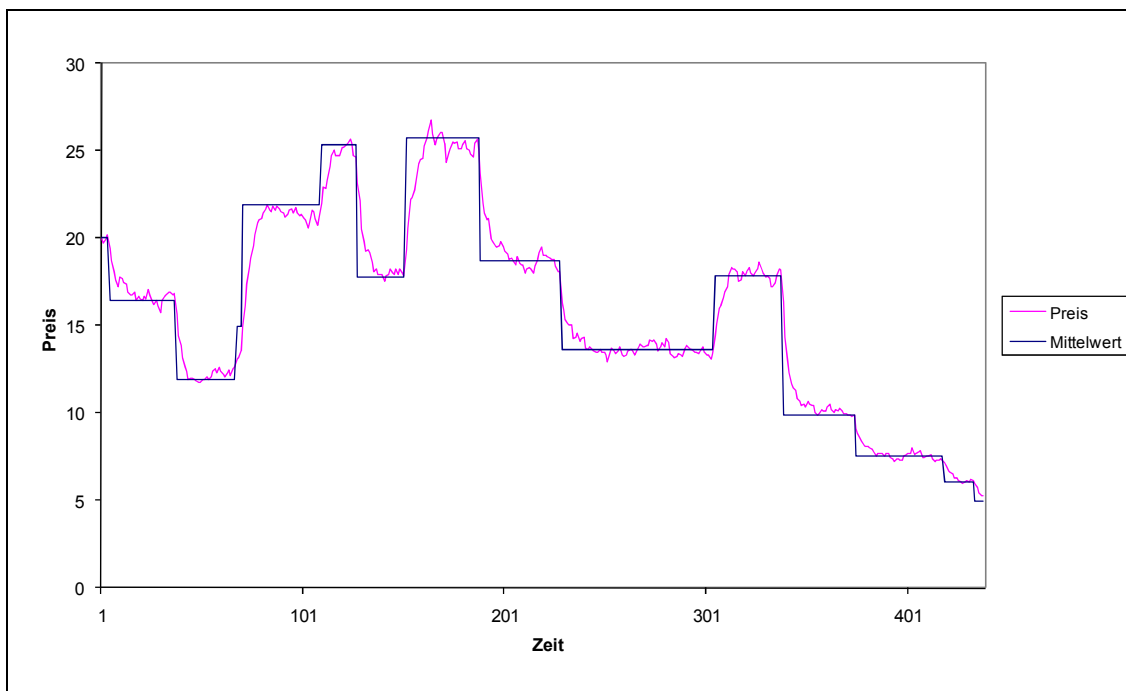
Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten ein Modell entwickelt wurde, auf dessen Grundlage eine Bewertung des Zertifikatepreissrisikos erfolgen könnte, wird in diesem Abschnitt exemplarisch das Zertifikatepreissrisiko bewertet. Es wird zunächst davon ausgegangen, dass zu Beginn der Periode Grenzvermeidungskosten in Höhe von 20 Euro erwartet werden. Der Spotpreis S_1 wird ebenfalls mit 20 Euro angenommen. Es wird

¹⁴ Die Festlegung einer Niveauverschiebung erfolgt hier auf Grundlage einer graphischen Auswertung der historischen Preisentwicklung.

eine Zeitreihe über 438 Handelstage simuliert. Für die Volatilität σ wird ein Wert von 0,0163 angenommen. Dieser entspricht dem mittleren Wert der in Tabelle 2 ausgewiesenen drei Volatilitäten der ersten Handelsperiode. Weiter seien basierend auf den Werten der ersten Handelsperiode $p = 0,016$, $\mu = 0,28$ und $\gamma = 0,142$. Als Mean-Reversion-Geschwindigkeit wird mit $\alpha = 0,22$ ebenfalls ein mittlerer Wert angenommen. Abbildung 3 veranschaulicht eine mögliche Preisentwicklung während dieser Periode.

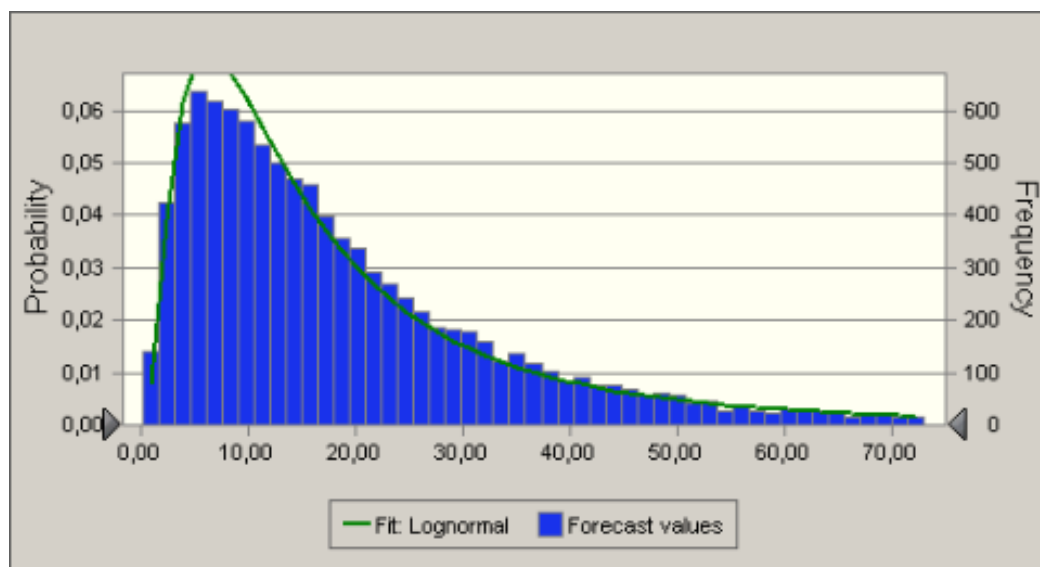
Durch die wiederholte Simulation möglicher Preisentwicklungen kann für jeden beliebigen Zeitpunkt der Handelsperiode eine Wahrscheinlichkeitsverteilung des Zertifikatspreises bestimmt werden. Abbildung 4 veranschaulicht die Wahrscheinlichkeitsverteilung zum letzten Handelstag der Periode. Es wurden 10.000 Zeitreihen simuliert. Im Mittel ist ein Preis in Höhe von 20,14 Euro zu erwarten, was im Wesentlichen den erwarteten Grenzvermeidungskosten im Zeitpunkt $t = 1$ entspricht. Es wird nur mit einer Restwahrscheinlichkeit von 1% ein Preis beobachtet, der größer als 97,30 Euro ist. Die Schiefe der Verteilung ist auf die Modellierung der Sprunghöhe zurückzuführen. Die Verteilung kann am ehesten durch eine Lognormalverteilung mit den Parametern $\mu = 20,8$ und $\sigma = 23,5$ beschrieben werden.

Abbildung 3:
Ein mögliches CO₂-Preis-Szenario



Auf Grundlage dieser Verteilung kann eine Einschätzung des Zertifikatepreisrisikos erfolgen, da aus der Verteilung des Zertifikatepreises Rückschlüsse auf möglichen Kosten- und Ausgabenbelastungen, und damit auf die erforderliche Risikoreserve gezogen werden können. Ein Unternehmen, welches beispielsweise die Handlungsalternativen hat, Zertifikate sofort zu kaufen und zu lagern oder abzuwarten und die Zertifikate später zu erwerben, kann auf Grundlage der Verteilung abwägen, ob genügend Liquidität und Eigenkapital vorhanden ist, ein solches Risiko einzugehen. Wird abgewartet, besteht das Risiko, dass der Preis steigt, wodurch die nachzukaufenden Zertifikate so teuer werden, dass das Unternehmen Verluste realisieren muss. Diese Verluste müssen durch hinreichend hohe Eigenkapital und Liquiditätsreserven kompensiert werden können. Es besteht bei dieser Strategie allerdings auch die Chance, dass die Preise fallen und damit der Ertrag des Unternehmens gesteigert werden kann. Auch durch Investitionen in CO₂-vermeidende Technologien kann das Zertifikatepreisrisiko verändert werden. Fällt der Zertifikatepreis, können eingesparte Zertifikate gegebenenfalls nicht zu den erwarteten Preisen verkauft werden, womit sich eine Investition im Nachhinein als unrentabel erweisen kann. Dieses Risiko kann ebenfalls auf Grundlage des hier vorgestellten Modells bewertet werden.

Abbildung 4:
Verteilung für den CO₂-Preis am letzten Handelstag (T = 438 Handelstage)



5 Zusammenfassung

Mit dem Papier wurde eine Idee vermittelt, wie der CO₂-Zertifikatepreis im Risikomanagement modelliert werden könnte. Forschungsbedarf besteht vor allem noch bei der Modellierung der Sprünge des Reversion-Niveaus. Hier stellt sich die Frage, ob diese in Abhängigkeit von der Entwicklung anderer ökonomischer Größen (zum Beispiel BIP) modelliert werden sollten. Auch könnte untersucht werden, ob ein Zusammenhang zwischen Restlaufzeit und Sprunghöhe besteht. So dürften gegebenenfalls am Ende der Periode keine großen Sprünge mehr beobachtet werden, da von den Erwartungen abweichende Rahmenbedingungen nur noch geringe Auswirkungen auf die Grenzvermeidungskosten haben sollten. Bei der Modellierung wurde keine obere Preisschranke berücksichtigt. In der Realität wird die Preisobergrenze von der Strafzahlung im Falle der Unterdeckung (100 Euro im Zeitraum 2008 bis 2012) und den erwarteten Grenzvermeidungskosten der folgenden Periode bestimmt.¹⁵ Auch wurde im Modell nicht berücksichtigt, dass der erwartete Preis zum Periodenende auf den aktuellen Zeitpunkt abgezinst werden müsste. Das heißt, der aktuelle Marktpreis beschreibt eigentlich nicht die erwarteten, sondern die abgezinsten erwarteten Grenzvermeidungskosten zum Periodenende. Die Höhe des Abzinsungsfaktors hängt dabei wieder von der Höhe des Risikos ab. Es ist allerdings zu vermuten, dass dieser Effekt vernachlässigt werden kann. Künftige Forschungen könnten diesen Zusammenhang genauer untersuchen.

¹⁵ Gegebenenfalls zuzüglich einer Risikoprämie.

Literatur

- Benz, E.; Trück, S.* (2006): Modeling CO₂ Emissions Allowance Prices. SSRN Working Paper 903240. <http://ssrn.com/abstract=903240>.
- Blanco, C.; Choi, S.; Soronow, D.* (2001): Energy Price Processes Used for Derivatives Pricing & Risk Management. *Commodities Now*, March 2001, pp. 74-80.
- Blanco, C.; Soronow, D.* (2001a): Mean Reverting Processes - Energy Price Processes Used for Derivatives Pricing & Risk Management. *Commodities Now*, June 2001, pp. 68-72.
- Blanco, C.; Soronow, D.* (2001b): Jump Diffusion Processes - Energy Price Processes Used for Derivatives Pricing & Risk Management. *Commodities Now*, September 2001, pp. 83-87.
- Clewell, L.; Strickland, C.; Kaminski, V.* (2000): Making the Most of Mean Reversion. *Energy Power Risk Management*. Risk Waters Group 5 (8), 2000.
- Daskalakis, G. et al.* (2006): Modeling CO₂ Emission Allowance Prices and Derivatives: Evidence from the EEX. SSRN Working Paper 912429. <http://ssrn.com/abstract=912429>.
- Fehr, M.; Hinz, J.* (2007): A Quantitative Approach to Carbon Price Risk Modeling. *Working Paper*. Institute for Operations Research, ETH Zentrum, Zürich.
- IEA* (2007): Climate Policy Uncertainty and Investment Risk. IEA Publications.
- Mansanet-Bataller, M. et al.* (2006): CO₂ Prices, Energy and Weather. SSRN Working Paper 913964. <http://ssrn.com/abstract=913964>.
- Matthes, F. et al.* (2003): Auswirkungen des europäischen Emissionshandelssystems auf die deutsche Industrie. Endbericht. <http://www.bmu.de/emissionshandel/doc/-4773.php>.
- Merton, R.C.* (1976): Option pricing when underlying stock returns are discontinuous. *Journal of Financial Economics* 3, pp. 125-144.
- Paolella, M. S.; Taschini, L.* (2006): An Econometric Analysis of Emission Trading Allowances. SSRN Working Paper 947055. <http://ssrn.com/abstract=947055>.
- Point Carbon* (2007): Carbon 2007 - A new climate for carbon trading. http://www.pointcarbon.com/getfile.php/fileelement_105366/Carbon_2007_final.pdf.
- Sijm, J. P. M. et al* (2005): CO₂ price dynamics: The implications of EU emissions trading for the price of electricity. ECN report ECN-C-05-081. <http://www.ecn.nl/publications/default.aspx?nr=c05081>.

- Seifert, J. et al.* (2007): Dynamic Behavior of CO₂ Spot Prices - Theory and Empirical Evidence. SSRN Working Paper 903289. <http://ssrn.com/abstract=903289>.
- Spangardt, G.; Meyer, J.* (2005): Risikomanagement im Emissionshandel, in: M. Licht, G. Spangardt (Hrsg.), Emissionshandel – ökonomische Prinzipien, rechtliche Regelungen und technische Lösungen für den Klimaschutz. Springer Verlag: Berlin, Heidelberg.
- Springer, U.* (2003): The market for tradable GHG permits under the Kyoto Protocol: a survey of model studies. *Energy Economics*, 25, pp. 527-551.
- Straja, S.* (2001): Mean-Reversion Jump Diffusion. Montgomery Investment Technology, Inc., 2001.
- Uhlenbeck, G. E.; Ornstein, L. S.* (1930): On the theory of Brownian Motion. *Phys.Rev.* 36, pp. 823-841.
- Uhrig-Homburg, M; Wagner, M.* (2006): Market Dynamics and Derivative Instruments in the EU Emissions Trading Scheme – An Early Market Perspective. SSRN Working Paper 882792. <http://ssrn.com/abstract=882792>.
- Uhrig-Homburg, M.; Wagner, M.* (2007): Forward Price Dynamics of CO₂ Emission Certificates – An Empirical Analysis. SSRN Working Paper 941167. <http://ssrn.com/abstract=941167>.
- Vasicek, O.* (1977): An Equilibrium Characterization of the Term Structure. *Journal of Financial Economics* 5, pp. 177-188.
- Wirsching, M.* (2004): Determinanten der Preisbildung für Emissionsrechte (EU-Allowances) im Rahmen des Europäischen Emissionshandelssystems. KfW Bankengruppe, Konzernkommunikation. Frankfurt am Main. http://www.kfw.de/DE_Home/Research/Sonderthem68/Klimaschut91/Preisbildung_von_EUAs_041129.pdf.
- Yang, M.; Blyth, W.* (2007): Modeling Investment Risks and Uncertainties with Real Options Approach. IEA Working Paper LTO/2007/WP 01. http://www.iea.org/textbase/papers/2007/ROA_Model.pdf.