

## **Markttransparenz im CO2-Emissionshandel und Risikomanagement von Stromerzeugern**

Pelster, Matthias; Thamm, Sebastian

*Published in:*  
Zeitschrift für Energiewirtschaft

*DOI:*  
[10.1007/s12398-016-0169-4](https://doi.org/10.1007/s12398-016-0169-4)

*Publication date:*  
2016

*Document Version*  
Begutachtete Fassung (Peer reviewed)

[Link to publication](#)

### *Citation for published version (APA):*

Pelster, M., & Thamm, S. (2016). Markttransparenz im CO2-Emissionshandel und Risikomanagement von Stromerzeugern. *Zeitschrift für Energiewirtschaft*, 40(1), 15-31. <https://doi.org/10.1007/s12398-016-0169-4>

### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

### **Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

# Markttransparenz im CO<sub>2</sub>-Emissionshandel und Risikomanagement von Stromerzeugern

Matthias Pelster · Sebastian Thamm

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2016

**Zusammenfassung** Wir untersuchen die Auswirkungen aktueller Regulierungsmaßnahmen zur Erhöhung der Markttransparenz auf dem CO<sub>2</sub>-Zertifikatemarkt, wie z. B. der Verordnung über die Integrität und Transparenz des Energiegroßhandelsmarktes sowie des aus der Umsetzung und Konkretisierung der REMIT-Verordnung stammende Markttransparenzstellengesetz (Europäisches Parlament, Amtsblatt der Europäischen Union, L 326, 1 – 16, 2011, Amtsblatt der Europäischen Union, L 315, 2012) auf einen erwartungs-nutzenmaximierenden Stromerzeuger. Unter Berücksichtigung der besonderen Eigenschaften von Strom analysieren wir die optimale Zusammensetzung der Produktionsfaktoren zur Stromerzeugung sowie die optimale Risikopolitik eines Stromerzeugers. Unsere Ergebnisse haben Implikationen für die Regulierung von Stromerzeugern, sowohl bzgl. der Versorgungssicherheit als auch bzgl. umweltpolitischer Ziele.

**Schlüsselwörter** Markttransparenz · Risikopolitik · Stromerzeugung · Hedging

**JEL Classification:** D20 · D80

## Market transparency in CO<sub>2</sub> emissions trading and risk management of electricity producers

**Abstract** This paper analyses the effects of recent regulatory measures, namely the Regulation on wholesale Energy Market Integrity and Transparency enacted by the European

Parliament and the Market Transparency Authority Act, that aim to increase transparency in CO<sub>2</sub> emissions trading on an utility maximizing electricity producer. Taking the particular characteristics of electricity into account, we analyze optimal composition of power generation and optimal risk policy. Our results have implications for the regulation of electricity producers with regard goals concerning environmental policy and supply reliability.

## 1 Einführung in die Problemstellung

Zielgerichtetes Risikomanagement bildet eine Kernkompetenz eines jeden Unternehmens. Neben der Steuerung von Risiken durch eine Abwälzung auf Dritte (bspw. mit Terminkontrakten), ist die Beschaffung von zusätzlicher Information zur Verringerung des Risikos über eine für ein Entscheidungsproblem relevante Größe eine Möglichkeit des Risikomanagements (vgl. bspw. Stiglitz 2000). Der veränderte Informationsstand des Entscheiders resultiert in einer Veränderung der Wahrscheinlichkeitsverteilung über die unsichere Größe, da die Bildung der subjektiven Wahrscheinlichkeitsverteilung von der Menge der zur Verfügung stehenden Information abhängt. Die zukünftige Entwicklung der relevanten unsicheren Größe kann besser prognostiziert werden und der Entscheider eine bessere Auswahl der Handlungsalternativen treffen. Es können Kosten reduziert oder zusätzliche Erlöse generiert werden, was wiederum zu effizienteren Entscheidungen führt (vgl. u. a. Eeckhoudt et al. 2005; Hirshleifer et al. 1989; Lawrence 1999). Ist die zusätzliche Information für das betrachtete Entscheidungsproblem relevant, kann somit ein positiver Wert der Information resultieren. Ein maßgeblicher Faktor für die Auswirkung von zusätzlicher Information ist die Unterscheidung zwischen öffentlicher, d. h. für jeden frei zugänglicher Information und privater, nur für den

M. Pelster (✉)  
Leuphana University of Lueneburg,  
Scharnhorststr. 1, 21335 Lueneburg, Deutschland  
E-Mail: pelster@leuphana.de

S. Thamm  
TU Dortmund University, Dortmund, Deutschland

einzelnen Entscheider verfügbarer Information. Die positive Auswirkung auf den Erwartungsnutzen eines Individuums durch den Erhalt oder die Verfügbarkeit von zusätzlicher Information wird als Blackwell-Effekt bezeichnet (vgl. Blackwell (1951, 1953); Blackwell und Girshik (1954); Bohnenblust et al. (1949); Kihlstrom (1984); DeGroot (1962); Cam (1954) oder Sherman (1951)). Die negative Auswirkung des Erhalts oder der Verfügbarkeit von zusätzlicher Information auf den Nutzen von Individuen in einer Gruppe von Individuen wird als Hirshleifer-Effekt bezeichnet (vgl. u. a. Drèze (1960); Eckwert und Zilcha (2003); Hakanasson et al. (1982); Hirshleifer (1971, 1975); Hirshleifer und Riley (1979); Marshall (1974); Morris und Shin (2002); Schlee (2001) oder Zeckhauser (1970).)

In den vergangenen Jahren wurden verschiedene Gesetze, Richtlinien oder Verordnungen fixiert um die Transparenz auf dem Energiemarkt zu erhöhen. Wesentliche Elemente dieser Maßnahmen sind die Verordnung über die Integrität und Transparenz des Energiegroßhandelsmarktes (REMIT) (Europäisches Parlament 2011), die seit dem 7. Januar 2015 vollständig umzusetzen ist, sowie das aus der Umsetzung und Konkretisierung der REMIT-Verordnung stammende Markttransparenzstellengesetz (MTSG) (Europäisches Parlament 2012).<sup>1</sup> Die REMIT-Verordnung beinhaltet umfangreiche Verpflichtungen zur Meldung von Handelsinformationen (Zeitpunkt, Mengen, Preise), welche ab dem 7. Oktober 2015 umzusetzen sind. Dies umfasst die Meldung aller börslich gehandelten Kassakontrakte sowie Terminkontrakte auf Gas und Strom (vgl. Däuper et al., 2015; BDEW 2013). Durch die aus der Regulierung des Marktes resultierende höhere Markttransparenz ist eine verlässlichere Prognose über die Entwicklung der für den Strommarkt relevanten Preise möglich, und das Marktpreisrisiko kann verringert werden.

Der Strommarkt unterscheidet sich von anderen Gütermärkten durch die Homogenität des Gutes Strom sowie durch dessen Nicht-Speicherbarkeit. Ferner kann die Nachfrage nach Strom als unelastisch bzgl. des Strompreises bezeichnet werden, da der Konsum durch die spezifische Nutzung von Strom nur bedingt flexibel ist. Aufgrund der relativ schwachen Preisabhängigkeit der Stromnachfrage erfolgt der Ausgleich zwischen Angebot und Nachfrage durch kurzfristige Anpassungen auf der Angebotsseite (vgl. z. B. Aichele 2012; Erdmann und Zweifel, 2008; Hardes und Uhly 2007). Der produzierte Strom wird über Strombörsen an den Abnehmer vertrieben, so dass der Preis das über die Börsen ermittelte Ergebnis von Angebot und Nachfrage darstellt (vgl. z. B.

Eydeland und Wolyniec (2003); Malcher und Puffe (2015) oder Ströbele et al. (2012)). Zu beachten ist, dass die Bereitstellung von Strom mit einer hohen Versorgungssicherheit zu angemessenen und konstanten Preisen ein wichtiges Element für die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen im internationalen Vergleich ist (vgl. z. B. Erdmann und Zweifel 2008; Ströbele et al. 2012; Zhaoguang und Zheng 2013). Die Erzeugung von Strom kann mit verschiedenen Technologien erfolgen, so dass für einen Stromerzeuger neben der Entscheidung der zu produzierenden Strommenge auch die Entscheidung über zur Produktion zu verwendende Technologien von Bedeutung ist (vgl. z. B. Erdmann und Zweifel 2008). Die Reihenfolge, mit der Stromerzeugungskraftwerke zur Bedienung der Nachfrage eingesetzt werden, hängt wesentlich von den Grenzkosten der Kraftwerke, aber auch von anderen technischen Nebenbedingungen, wie z. B. der Zeit, die die Aktivierung einer Kraftwerkes benötigt, ab (vgl. Ströbele et al. 2012; Monjau und Vollmer, 2015).

Ferner werden auf dem Strommarkt auf europäischer Ebene umweltpolitische Ziele verfolgt. Dies geschieht z. B. durch die Richtlinie 2003/87/EG zur Einführung eines Handelssystems von Zertifikaten, die zur Emission von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) berechtigen (vgl. Europäisches Parlament 2003). Durch die Einführung des CO<sub>2</sub>-Handelssystems sollen externe Effekte der Erzeugung von Strom durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen über einen Marktmechanismus den Kosten der Stromerzeugung hinzugerechnet werden. Damit soll die Emissionsmenge reduziert werden indem die Anzahl der Zertifikate sukzessive verringert wird (vgl. Konstantin 2013). Durch die Einführung des CO<sub>2</sub>-Emissionshandelssystems entsteht für Stromerzeugungsunternehmen ein zusätzlicher Kosten- und Risikofaktor, der die Entscheidungen über die Produktionshöhe oder über Investitionen in neue Stromerzeugungsanlagen beeinflusst (vgl. z. B. Konstantin 2013). Die Höhe der Preise der Zertifikate oder der Grad ihres Preisrisikos haben einen wesentlichen Einfluss auf die Entscheidungen der Teilnehmer am Strommarkt. Da die Anzahl der am Markt verfügbaren CO<sub>2</sub>-Zertifikate aufgrund der CO<sub>2</sub>-Reduktionsziele begrenzt ist, resultiert ein großer Teil des Risikos über die Preisentwicklung aus dem Risiko über die Knappheit der Zertifikate (vgl. z. B. Ströbele et al. 2012). Die Untersuchung der Auswirkungen der eingeführten Emissionszertifikate auf den Markt ist für die Forschung sowie für die Regulatoren von besonderem Interesse (vgl. z. B. Chapple et al. 2013; Ben-David et al. 2000; Keppler und Cruciani 2010). Da die Einführung der Emissionskosten die Grenzkosten der Stromerzeugung beeinflusst und die Einsatzreihenfolge der Stromerzeugungsanlagen kurzfristig gemäß ihrer Grenzkosten bestimmt wird, können die Emissionskosten die Einsatzreihenfolge verändern (vgl. z. B. Delarue und D'Haeseler 2008; Erdmann und Zweifel 2008; Green 2008).

<sup>1</sup>Die REMIT-Verordnung bedarf grundsätzlich keiner Umsetzung in nationales Recht und besitzt unmittelbare Gültigkeit. Teile der Verordnung wurden dennoch in der aktualisierten Fassung des Energiewirtschaftsgesetzes verankert (Bundesgesetzblatt 2012a, 2014). Zudem erfolgte die Umsetzung der REMIT-Verordnung teilweise durch Ergänzungen im Gesetz gegen Wettbewerbsbeschränkungen (Bundesgesetzblatt 2013).

In der vorliegenden Arbeit untersuchen wir den Einfluss einer verbesserten Informationslage durch REMIT auf einen Stromerzeuger. Dazu wird ein partialanalytisches Modell eines Stromerzeugers vorgestellt, welches die besonderen Eigenschaften von Strom berücksichtigt. Damit leisten wir einen bedeutenden Beitrag zur bestehenden Literatur. Die bisherige Literatur konzentriert sich zum einen auf die strategische Interaktion zwischen den Marktteilnehmern bei der Festlegung der Stromerzeugung und der Stromerzeugungskapazitäten, da der Stromerzeugungsmarkt aufgrund der leistungsgebundenen Übertragung sowie Kapazitätsbeschränkungen der Stromübertragung, trotz regulatorischer Anstrengungen der Markttöffnung, zum Teil durch unvollständigen Wettbewerb gekennzeichnet ist. Entsprechende Arbeiten unterstellen zum Beispiel, dass die Entscheidung über die Produktionshöhe von Strom die Entscheidung der anderen Stromerzeuger über deren Stromerzeugung beeinflusst. Die Untersuchung des Verhaltens von Akteuren auf dem Energiemarkt ist somit analog zu einem Oligopol (vgl. z. B. Day et al. 2002; Ellersdorfer 2005; Garcia-Alcada et al. 2002; Murphy und Smeers 2005; Powell 1993; Smeers 1997). Zum anderen wird in der bisherigen Literatur das Entscheidungsverhalten von Teilnehmern auf Märkten mit vollständigem Wettbewerb unter entsprechende Nebenbedingungen, die sich auf Kapazitätsbeschränkungen der Durchleitung oder die simultane Kongruenz der Erzeugung und Nachfrage von Strom beziehen, hinsichtlich der Entscheidung über die Stromerzeugung oder das Absicherungsverhalten studiert (vgl. z. B. Baldursson und Fehr 2012; Murphy und Smeers 2005; Ramos et al. 1998; Smeers 1997; Wogrin et al. 2011; Fleten et al. 2002; Oum und Oren 2009, 2010).<sup>2</sup> Grundsätzlich sind die Modelle für die Untersuchung der Entscheidung über die optimale Höhe der Stromproduktion außerdem hinsichtlich ihres Zeithorizontes, der betrachtet wird, zu unterscheiden. Kurzfristig kann ein Stromerzeuger die Nutzung von vorhandenen Kapazitäten steuern und an Änderungen von exogenen Faktoren anpassen. Nur in einer langfristigen Perspektive besteht für Stromerzeuger die Möglichkeit, Anpassungen der vorhandenen Erzeugungs- oder Leitungskapazitäten vorzunehmen.<sup>3</sup> Wir erweitern die genannte Literatur, indem wir den Einfluss einer verbesserten Informationslage auf dem CO<sub>2</sub>-Zertifikatemarkt, der aus aktuellen regulatorischen Eingriff-

fen (vgl. Europäisches Parlament 2011, 2012) resultiert, auf einen erwartungsnutzenmaximierenden Stromerzeuger untersuchen.

Im weiteren Verlauf unseres Beitrags führen wir zunächst ein Entscheidungsmodell eines Stromerzeugers ein und untersuchen daran die Auswirkungen einer erhöhten Markttransparenz auf die Unternehmensentscheidungen. Der letzte Abschnitt fasst die Ergebnisse zusammen und gibt einen kurzen Ausblick.

## 2 Einfluss von Markttransparenz auf ein stromerzeugendes Unternehmen

Die unterschiedlichen Transparenzgrade eines Marktes können mit Hilfe von Informationssystemen untersucht werden. Der unterschiedliche Informationsgehalt von zwei Informationssystemen, welche die bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilungen über einen unsicheren Preis enthalten, kann als unterschiedlicher Grad der Markttransparenz aufgefasst werden. Ein informativeres Informationssystem ist gleichbedeutend mit einem Markt, der einen höheren Grad der Transparenz impliziert. Ein Informationssystem ist dabei durch die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung von Umweltzuständen und Informationssignalen gegeben. Unter Verwendung des Ansatzes von Blackwell ist es möglich, Informationssysteme hinsichtlich ihres Informationsgehalts zu unterscheiden (vgl. Blackwell 1951, 1953; Blackwell und Girshick 1954).

### 2.1 Entscheidungsmodell eines Stromerzeugers

Im weiteren Verlauf dieses Abschnittes widmen wir uns zunächst der Ausarbeitung des Modells eines Unternehmens im industrieökonomischen Ansatz, das unter Verwendung von zwei möglichen Erzeugungstechnologien Strom erzeugt und diesen am Strommarkt verkauft (vgl. ähnlich Broll et al. 2010; Drees und Eckwert 2003; Eckwert und Zilcha 2001).<sup>4</sup> Für das Unternehmen besteht das Entscheidungsproblem in der nutzenmaximierenden Wahl der Verwendung der Produktionsfaktoren zur Stromerzeugung und in der Risikopolitik. Dabei nehmen wir an, dass das Unternehmen Strom durch Nutzung von Gas- und von Kohlekraftwerken erzeugen kann.<sup>5</sup> Die Wahl der beiden substitutiven Stromerzeugungstechnologien erlaubt es die verschiedenen Abwägungen

<sup>2</sup>Ventosa et al. (2005) geben einen umfassenden und ausführlichen Überblick über die verschiedenen mathematischen Ausprägungen, die jeweils unterstellten Annahmen über die Wettbewerbsstruktur am Markt sowie den Grad, mit dem die Interaktion mit anderen Marktteilnehmern berücksichtigt werden kann.

<sup>3</sup>Mit Hilfe von Gotham et al. (2009) können auf Basis der erwarteten Kosten und der Varianz der Kosten Aussagen über die kosten- und risikoefiziente Zusammensetzung der Stromerzeugung aus den verschiedenen Technologien abgeleitet werden. Auf Basis des Modells werden Aussagen über mittel- und langfristige Anpassung der Erzeugungskapazitäten der einzelnen Technologien hergeleitet.

<sup>4</sup>Für den industrieökonomischen Ansatz vgl. u. a. Batra und Ullah (1974); Holthausen (1976); Paroush und Wolf (1992); Sandmo (1971) oder auch Anderson und Danthine (1981); Feder et al. (1980); Hey (1981a, 1981b); Ishii (1977); Katz et al. (1982); Kawai und Zilcha (1986); Leland (1972); Rolfo (1980).

<sup>5</sup>Variablen oder Faktoren, die im Zusammenhang zu den Brennstoffen Kohle und Gas stehen, werden jeweils im Index durch die Buchstaben *G* und *K* gekennzeichnet.

gen des Stromerzeugers im Zusammenhang mit der Entscheidung über die Nutzung verschiedener Technologien zu analysieren.<sup>6</sup> Durch die optimale Verwendung der Produktionsfaktoren Gas und Kohle wird die Stromproduktion festgelegt, die am Markt abgesetzt wird. Für die Abbildung der Besonderheiten bei der Erzeugung von Strom aus der Verbrennung von fossilen Brennstoffen ist die Einführung von verschiedenen technologischen Faktoren notwendig. Der Umwandlungsprozess wird durch den Heizwert  $h_i$  und den Wirkungsgrad  $\eta_i$  einer Stromerzeugungstechnologie  $i$  abgebildet. Durch das Produkt von Heizwert und Wirkungsgrad ist der technologiespezifische Faktor  $t_i$  ( $MWh_e/T$ ) gegeben, der pro Mengeneinheit des verwendeten Stoffes die erzeugte Menge an elektrischer Energie angibt (vgl. z. B. Erdmann und Zweifel 2008; Ströbele et al. 2012). Somit sei die Produktionsfunktion für den Elektrizitätsoutput gegeben durch

$$f(x_G, x_K) := t_G x_G^\alpha + t_K x_K^\beta, \quad (1)$$

mit  $0 < \alpha \leq 1$  und  $\beta = 1$ . Die additiv-separabile Produktionsfunktion spiegelt zum einen wider, dass die Faktoren Gas und Kohle Substitute sind, zum anderen auch die Unabhängigkeit der Stromproduktion einer Technologie von der anderen.

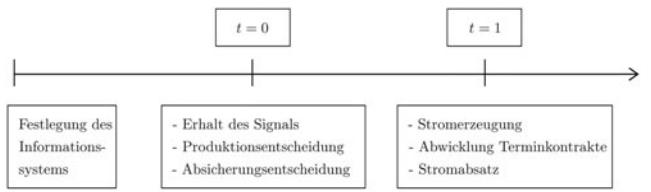
Gemäß dem Handelssystem für CO<sub>2</sub>-Emissionszertifikate, führt die Emission von CO<sub>2</sub> im Rahmen der Stromerzeugung zu Kosten für CO<sub>2</sub>-Zertifikate, die abhängig von den verwendeten Mengen der Produktionsfaktoren Gas und Kohle und den damit verbundenen Emissionsmengen  $e_G x_G + e_K x_K$  sind. Der entsprechende Emissionsfaktor  $e_i$  gibt die Menge von emittiertem CO<sub>2</sub> in Tonnen pro Tonne verbranntem Brennstoff der Technologie an. Zusätzlich fallen Kosten für die Beschaffung der Brennstoffe an, die zu  $P_G$  und  $P_K$  in  $t = 0$  gekauft werden. Schließlich fallen variable Betriebskosten an, die durch die Funktion  $C(x_G^*(y_m), x_K^*(y_m)) = 1/4(x_G^*(y_m) + x_K^*(y_m))^4$  mit  $C', C'', C''' > 0$  gegeben seien.  $C_F$  bezeichne anfallende Fixkosten. Der Preis eines Emissionszertifikats  $\tilde{P}_{CO_2}$ , welches zur Emission von einer Tonne CO<sub>2</sub> berechtigt, ist im Zeitpunkt  $t = 0$  stochastisch.<sup>7</sup> Der Stromerzeuger hat die Möglichkeit, das Preisrisiko der CO<sub>2</sub>-Emissionszertifikate über einen Forwardmarkt zu gestalten.<sup>8</sup> Der Terminkurs wird in Abhängigkeit der Markttransparenz auf Basis der entsprechenden bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilungen des unterstellten Informationssystems bestimmt. Der signalabhängige Terminkurs  $P_{CO_2}^F(y_m)$  ist gegeben durch:

$$P_{CO_2}^F(y_m) = E_{P_{CO_2}|y=y_m}[\tilde{P}_{CO_2}|y = y_m] \quad (2)$$

<sup>6</sup>Grundsätzlich können die beiden Stromerzeugungstechnologien durch Anpassung der technologiespezifischen Parameter durch andere Formen der Energieerzeugung, wie z. B. Wind- und Wasserkraftwerke oder Atomkraftwerke ersetzt werden.

<sup>7</sup>Eine Tilde kennzeichnet eine Größe als Zufallsvariable.

<sup>8</sup>Ähnliche Kontrakte werden bspw. an der EEX in Leipzig gehandelt.



**Abb. 1** Zeitlicher Ablauf von Informationserhalt und Entscheidung über die Verwendung der Produktionsfaktoren.

Die Abwicklung des Termingeschäfts findet im Zeitpunkt  $t = 1$  statt. Die Menge der Terminkontrakte ist beliebig teilbar und wird mit  $h$  bezeichnet. Zudem wird unterstellt, dass keine zusätzlichen Kosten im Zusammenhang zur Nutzung der Forwardkontrakte auftreten. Für  $h > 0$  bzw.  $h < 0$  werden CO<sub>2</sub>-Emissionszertifikate gekauft bzw. verkauft. Die Ausübungsgewinne aus dem Termingeschäft sind zahlungswirksam und beeinflussen den Gewinn des Unternehmens im Umfang des Betrages  $h(\tilde{P}_{CO_2} - P_{CO_2}^F)$ .

Bei dem vorgestellten Partial-Modell handelt es sich um ein Zwei-Zeitpunkt-Modell, bei dem vor Beginn des eigentlichen Modells ein Informationssystem festgelegt wird. Zwischen den Zeitpunkten besteht die Möglichkeit zur sicheren Anlage mit einem Kapitalmarktzinssatz in Höhe von 0 %. Sämtliche Erträge aus dem Verkauf von Strom bzw. sämtliche Kosten sind unmittelbar zahlungswirksam. Der Eigentümer des betrachteten Stromerzeugungsunternehmens ist gleichzeitig alleiniger Entscheidungsträger.<sup>9</sup>

Ziel unseres Beitrags ist es, die Beeinflussung der optimalen Faktorverwendungen durch zusätzliche Informationen über den unsicheren Preis der CO<sub>2</sub>-Zertifikate zu untersuchen. Wir modellieren zusätzliche Information im Rahmen unseres Entscheidungsmodells durch ein Informationssignal, das der Entscheider vor der Wahl seiner Handlungsalternative (d. h. in  $t = -1$ ) erhält und welches mit der unsicheren Größe, die das Ergebnis beeinflusst, in einem stochastischen Zusammenhang steht. Der Prozess der Verarbeitung der erhaltenen Informationen erfolgt durch eine Anpassung der sog. Priori-Verteilung. Der risikoaverse Entscheider trifft seine Entscheidungen auf Basis der auf die Informationssignale bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilungen und maximiert mit seiner Wahl der Menge der Produktionsfaktoren  $x_G$  und  $x_K$  sowie durch die Wahl des Absicherungsvolumens  $h$  eine von Neumann-Morgenstern-Nutzenfunktion  $U(\cdot)$ :  $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  mit positivem und abnehmendem Grenznutzen. Ferner gelte  $U'''(\cdot) > 0$ . D.h. es wird unterstellt, dass die Nutzenfunktion Besonnenheit impliziert.

Abbildung 1 verdeutlicht den zeitlichen Ablauf des Entscheidungsprozesses. Zunächst legt das regulatorische und politische Umfeld das zur Verfügung stehende Infor-

<sup>9</sup>Diese Annahme führt dazu, dass im Rahmen des Modells Interessenkonflikte zwischen Eigentümern sowie Konflikte zwischen Eigentümern und Entscheidungsträgern ausgeschlossen werden.

tionssystem fest. Daraufhin erhält das Unternehmen ein Informationssignal  $y_m$ , mit  $y_m \in Y = [y_U, y_O]$ ,  $0 < y_U < y_m < y_O < \infty$  und  $m = 1, \dots, M$ , des Informationssystems I. Es erfolgt eine Anpassung der Wahrscheinlichkeitsverteilung gemäß des Bayes-Theorems (vgl. u. a. Hirshleifer 1989; Sydsæter et al. 2005). Für jedes mögliche Signal des Informationssystems kann eine bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung über die möglichen Preise der CO<sub>2</sub>-Zertifikate gebildet werden. Der Preis der CO<sub>2</sub>-Zertifikate ist durch  $P_{CO_2,i}$ , mit  $P_{CO_2,i} \in \Omega = [P_{CO_2}^U, P_{CO_2}^O]$ ,  $0 < P_{CO_2}^U < P_{CO_2,i} < P_{CO_2}^O < \infty$  und  $i = 1, \dots, N$  gegeben. Für ein gegebenes Signal  $y_m$  trifft das Management im Zeitpunkt  $t = 0$  die Entscheidung über die Verwendung der Produktionsfaktoren sowie die Absicherungsentscheidung auf Basis der bedingten Wahrscheinlichkeiten  $p(P_{CO_2,i}|y_m)$  mit  $m = 1, \dots, M$  sowie  $i = 1, \dots, N$ , und maximiert den bedingten Erwartungsnutzen für jedes der Signale, die von dem angenommenen Informationssystem erhalten werden können. In Zeitpunkt  $t = 1$  erfolgt die Realisation des CO<sub>2</sub>-Zertifikatepreises am Kassamarkt. Die Erlöse des Unternehmens werden durch den Verkauf der produzierten Menge an Strom zum deterministischen Preis  $P_S$  in  $t = 1$  erzielt. Die Lagerung von Strom wird aufgrund der tatsächlich nur sehr eingeschränkten Möglichkeit der Speicherung ausgeschlossen.

Durch eine Änderung der Verwendungsmengen kann die Höhe von erwartetem Gewinn und Gewinnrisiko beeinflusst werden. Somit maximiert der Stromerzeuger das Entscheidungsproblem

$$\max_{x_G(y_m) \geq 0, x_K(y_m) \geq 0, h(y_m)} E_{x|y=y_m} \left[ U \left( \tilde{\Pi}(x_G(y_m), x_K(y_m), h(y_m)) \right) \mid y = y_m \right], \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{mit } \tilde{\Pi}(x_G(y_m), x_K(y_m), h(y_m)) \\ = f(x_G(y_m), x_K(y_m)) P_S - x_G(y_m) P_G - x_K(y_m) P_K \\ - x_G(y_m) P_G - x_K(y_m) P_K - (e_G x_G(y_m) + e_K x_K(y_m)) \tilde{P}_{CO_2} \\ - C(x_G(y_m), x_K(y_m)) - C_F + h(y_m) (\tilde{P}_{CO_2} - P_{CO_2}^F(y_m)) \end{aligned} \quad (4)$$

als Gewinnfunktion.

Innere Lösungen für die Entscheidungsparameter sind gegeben durch:<sup>10</sup>

$$\begin{aligned} E[U'(\tilde{\Pi}^*)(f'(x_G^*) P_S - P_G - e_G \tilde{P}_{CO_2} - C'(x_G^*, x_K^*))] &= 0, \\ E[U'(\tilde{\Pi}^*)(f'(x_K^*) P_S - P_K - e_K \tilde{P}_{CO_2} - C'(x_G^*, x_K^*))] &= 0, \\ E[U'(\tilde{\Pi}^*)(\tilde{P}_{CO_2} - P_{CO_2}^F)] &= 0, \end{aligned}$$

Zusätzlich unterstellen wir, dass  $|H_{x_G, x_G}|, |H_{x_K, x_K}| > |H_{x_K, x_G}|$  und  $H_{x_G, x_K} < 0$  gilt, wobei  $H_{x_G, x_G}$ ,  $H_{x_K, x_K}$  und  $H_{x_K, x_G} = H_{x_G, x_K}$  die zweiten partiellen Ableitungen bezeichne. Die Annahme basiert auf der Überlegung, dass die Stromerzeugungskraftwerke voneinander unabhängig sind und die Grenzproduktivität maßgeblich durch das eigene Auslastungsniveau bestimmt wird. Der Grenznutzen bzgl. eines Produktionsfaktors hängt jedoch indirekt über die Grenzbetriebskostenfunktion auch von der Höhe des Auslastungsniveaus der zweiten Erzeugungstechnologie ab. Wir unterstellen, dass die Wirkung dieses indirekten Effektes über die Betriebskostenfunktion stets geringer als die Wirkung der direkten Effekte auf den Grenznutzen ist und zudem ein substitutionaler Zusammenhang zwischen den Faktoren Gas und Kohle besteht, was durch die Homogenität von Strom motiviert ist. Eine Erhöhung der Verwendung des einen Produktionsfaktors führt somit zu einer Verringerung des Grenznutzens des jeweils anderen Faktors. Ferner unterstellen wir, dass die ungeraden Hauptminoren der Hesse-Matrix ein negatives Vorzeichen und die geraden Hauptminoren der Hesse-Matrix ein positives Vorzeichen aufweisen. Somit folgt die Konkavität der Nutzenfunktion und die Optimalität von  $x_G^*$ ,  $x_K^*$  und  $h^*$ . Umformen der Bedingungen erster Ordnung liefert

**Satz 2.1** Besteht für das Stromerzeugungsunternehmen Zugang zu einem Terminmarkt für CO<sub>2</sub>-Emissionszertifikate, dann ist die optimale Verwendung der Produktionsfaktoren Gas und Kohle unabhängig von der Wahrscheinlichkeitsverteilung der CO<sub>2</sub>-Emissionszertifikate, dem Grad der Risikoaversion des Unternehmens und der Höhe der Fixkosten. Die optimalen Verwendungsmengen von Gas und Kohle sind gegeben durch:

$$\begin{aligned} f'(x_G^*(y_m)) P_S - P_G - e_G P_{CO_2}^F(y_m) - C'(x_G^*(y_m)), \\ x_K^*(y_m)) = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} f'(x_K^*(y_m)) P_S - P_K - e_K P_{CO_2}^F(y_m) - C'(x_K^*(y_m)), \\ x_G^*(y_m)) = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Dieses Ergebnis wird als Separationsergebnis bezeichnet (vgl. z. B. auch Holthausen 1980; Katz und Paroush 1979; Paroush und Wolf 1992).

Die Höhe der optimalen Verwendungsmengen der Produktionsmengen von Gas und Kohle ist somit ausschließlich von nicht stochastischen Größen abhängig. Bei der Entscheidung über die optimale Verwendung der Produktionsfaktoren sowie über die Stromproduktion orientiert sich das Management des Stromerzeugers an der Höhe des Terminkurses sowie der Produktionsfunktion und den anderen Kostenkomponenten in der Gewinngleichung. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung für den Preis der CO<sub>2</sub>-Zertifikate und die Risiko-

<sup>10</sup>Optimallösungen werden durch ein Sternchen gekennzeichnet.

präferenzen des Managements sind nicht entscheidungsrelevant.

Umformen der Bedingungen erster Ordnung erlaubt uns eine Aussage über die optimale Absicherungsentscheidung zu treffen. Die Bedingungen erster Ordnung sind äquivalent zu:

$$\begin{aligned} f'(x_G^*) P_S - P_G - e_G \mathbb{E}[\tilde{P}_{CO_2}] - C'(x_G^*, x_K^*) \\ = \frac{e_G \text{cov}[U'(\tilde{\Pi}^*), \tilde{P}_{CO_2}]}{\mathbb{E}[U'(\tilde{\Pi}^*)]}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} f'(x_K^*) P_S - P_K - e_K \mathbb{E}[\tilde{P}_{CO_2}] - C'(x_G^*, x_K^*) \\ = \frac{e_K \text{cov}[U'(\tilde{\Pi}^*), \tilde{P}_{CO_2}]}{\mathbb{E}[U'(\tilde{\Pi}^*)]}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\mathbb{E}[U'(\tilde{\Pi}^*)](P_{CO_2}^F - \mathbb{E}[\tilde{P}_{CO_2}]) = \frac{\text{cov}[U'(\tilde{\Pi}^*), \tilde{P}_{CO_2}]}{\mathbb{E}[U'(\tilde{\Pi}^*)]}. \quad (9)$$

Ferner benötigen wir folgende

**Definition 2.1** Der Terminmarkt wird als unverzerrt bezeichnet, wenn  $P_{CO_2}^F = \mathbb{E}[\tilde{P}_{CO_2}]$  gilt. Für den Fall  $P_{CO_2}^F > \mathbb{E}[\tilde{P}_{CO_2}]$  ( $P_{CO_2}^F < \mathbb{E}[\tilde{P}_{CO_2}]$ ) ist der Terminmarkt durch Contango (Backwardation) gekennzeichnet (vgl. z. B. auch Hull 2012).

Die Differenz zwischen erwartetem Preis und Terminpreis der CO<sub>2</sub>-Emissionszertifikate kann als durch den Terminmarkt gegebene Spekulationsprämie interpretiert werden, die für die Übernahme des Preisrisikos gezahlt wird. Diese Prämie stellt eine Entlohnung für mehrere Funktionen dar, die durch den Terminmarkt übernommen werden. Der Betrag der Spekulationsprämie umfasst allgemein die Risiko-, Informations- und Abwicklungsprämie (vgl. Holthausen 1979; Mossin 1968; Spremann 1986, 1991). Somit folgt

**Satz 2.2** Ist die Risikoprämie auf dem Terminmarkt für CO<sub>2</sub>-Emissionszertifikate,  $\mathbb{E}[\tilde{P}_{CO_2}] - P_{CO_2}^F$ , auf dem Terminmarkt null (negativ) [positiv], entscheidet sich das Unternehmen für eine Vollabsicherung (Unterabsicherung) [Überabsicherung] (vgl. u. a. Holthausen 1980; Danthine 1978; Feder et al. 1980; Kawai und Zilcha 1986). Dabei bezeichnen in unserem Fall Über-, Voll- und Unterabsicherung die Situationen  $h^* > e_G x_G^* + e_K x_K^*$ ,  $h^* = e_G x_G^* + e_K x_K^*$  und  $h < e_G x_G^* + e_K x_K^*$ . Diese Aussage wird als Vollabsicherungsaussage (Full-Hedge-Aussage) bezeichnet.

**Beweis** Gleichung (9) ist für eine Risikoprämie von null (größer null) [kleiner Null] wenn die Kovarianz der rechten

Seite null (größer null) [kleiner Null] ist. Für das Vorzeichen der Kovarianz folgt wegen

$$\frac{\partial U'(\Pi^*)}{\partial P_{CO_2}} = U''(\Pi^*)(-(e_G x_G^* + e_K x_K^*) + h^*). \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{sign}(P_{CO_2}^F - \mathbb{E}[\tilde{P}_{CO_2}]) &= \text{sign}(\text{cov}[U'(\tilde{\Pi}^*), \tilde{P}_{CO_2}]) \\ &= \text{sign}((e_G x_G^* + e_K x_K^*) - h^*). \end{aligned} \quad (11)$$

□

Im Fall eines unverzerrten Terminmarktes ist es für den Stromerzeuger optimal die gesamte risikobehaftete Position in der Gewinngleichung abzusichern und der Gewinn des Unternehmens ist nicht mehr stochastisch. Somit entsteht in dieser Situation eine Entscheidungssituation, die der unter Sicherheit entspricht (bzgl. Produktionsmengen und Gewinn des Unternehmens). Die Entscheidungen sind unabhängig von der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Preise der CO<sub>2</sub>-Emissionszertifikate.

Im Fall eines verzerrten Terminmarktes dient die Absicherungsentscheidung der Anpassung des Verhältnisses von erwartetem Gewinn und Gewinnrisiko. Für den Gewinn des Unternehmens gilt

$$\begin{aligned} \tilde{\Pi}(x_G^*, x_K^*, \bar{h}^*, \hat{h}^*) &= f(x_G^*, x_K^*) P_S - x_G^* P_G - x_K^* P_K \\ &\quad - \bar{h}^* P_{CO_2}^F - C(x_G^*, x_K^*) - C_F + \hat{h}^*(\tilde{P}_{CO_2} - P_{CO_2}^F). \end{aligned} \quad (12)$$

Dabei bezeichne  $\bar{h}^*$  das optimale Absicherungsvolumen im Falle eines unverzerrten Terminmarktes (Vollabsicherung) und  $\hat{h}^*$  das Volumen der Forwardkontrakte, die mit einer Spekulationsabsicht gekauft oder verkauft werden. Für das optimale Absicherungsvolumen gilt  $h^* = \bar{h}^* + \hat{h}^*$ : Die spekulativen Komponenten bestimmt, ob das optimale Absicherungsvolumen größer oder kleiner als das Vollabsicherungsvolumen ist (vgl. Working 1953). In Abhängigkeit der Risikoprämie determiniert die Wahl der spekulativen Komponente  $\hat{h}^*$  das Gewinnrisiko und beeinflusst gleichzeitig die Höhe des erwarteten Gewinns.<sup>11</sup>

Der folgende Satz macht eine Aussage über den Zusammenhang zwischen der Höhe des Terminkurses der CO<sub>2</sub>-Emissionszertifikate und der Verwendung der Produktionsfaktoren zur Stromerzeugung.

**Satz 2.3** Die Erhöhung des Terminkurses der CO<sub>2</sub>-Emissionszertifikate führt

<sup>11</sup>Dies entspricht offenbar einem Portefeuille-Problem mit der Entscheidung über die Aufteilung eines Anfangsvermögens auf ein risikoloses und ein risikobehaftetes Wertpapier.

- (i) für  $e_G \geq e_K$  zu einer Verringerung der Verwendung des Faktors Gas,
- (ii) für  $e_G \leq e_K$  zu einer Verringerung der Verwendung des Faktors Kohle und
- (iii) für  $e_G = e_K$  zu einer Verringerung der Verwendung der Faktoren Gas sowie Kohle und folglich zu einem Rückgang der Stromproduktion.<sup>12</sup>

**Beweis** Die Aussage des Satzes folgt aus den Gl. (5) und (5). Die optimale Verwendung der Produktionsfaktoren wird gemäß Satz 2.1 auf Basis des nicht stochastischen Terminkurses der CO<sub>2</sub>-Emissionszertifikate bestimmt. Wir bilden die Ableitungen unter Anwendung des impliziten Funktionentheorems (vgl. Sydsæter et al. 2005). Die partiellen Ableitungen werden mit  $\Delta H_{x_G}$  und  $\Delta H_{x_K}$  bezeichnet:

$$\Delta H_{x_G} = -e_G, \quad (13)$$

$$\Delta H_{x_K} = -e_K. \quad (14)$$

Für die zweiten partiellen Ableitungen gilt

$$\frac{\partial^2 E \left[ U(\tilde{\Pi}) \right]}{\partial x_G \partial x_G} = f''(x_G^*) P_S - C''(x_G^*, x_K^*) < 0, \quad (15)$$

$$\frac{\partial^2 E \left[ U(\tilde{\Pi}) \right]}{\partial x_K \partial x_K} = f''(x_K^*) P_S - C''(x_G^*, x_K^*) < 0, \quad (16)$$

$$\frac{\partial^2 E \left[ U(\tilde{\Pi}) \right]}{\partial x_G \partial x_K} = -C''(x_G^*, x_K^*) < 0. \quad (17)$$

Zur Ermittlung der Vorzeichen der notwendigen Änderungen der Verwendungsmengen von Gas und Kohle, infolge einer Erhöhung des Terminkurses, kann das folgende Gleichungssystem auf Basis des totalen Differentials einer impliziten Funktion aufgestellt werden:

$$H_{x_G, x_G} \frac{d x_G}{d P_{CO_2}^F} + H_{x_G, x_K} \frac{d x_K}{d P_{CO_2}^F} = -\Delta H_{x_G}, \quad (18)$$

$$H_{x_K, x_G} \frac{d x_G}{d P_{CO_2}^F} + H_{x_K, x_K} \frac{d x_K}{d P_{CO_2}^F} = -\Delta H_{x_K}. \quad (19)$$

Unter Anwendung der Cramer'schen Regel, der Determinante der Hesse-Matrix,  $\text{Det}(H)$ , sowie den Gl. (13) und (13) kann das System der Gl. (18) und (19) nach  $\frac{d x_G}{d P_{CO_2}^F}$  und  $\frac{d x_K}{d P_{CO_2}^F}$

aufgelöst werden und es folgt:

$$\frac{d x_G}{d P_{CO_2}^F} = \frac{e_G f''(x_G^*) P_S + C''(x_G^*, x_K^*)(e_K - e_G)}{\text{Det}(H)}, \quad (20)$$

$$\frac{d x_K}{d P_{CO_2}^F} = \frac{e_K f''(x_K^*) P_S + C''(x_G^*, x_K^*)(e_G - e_K)}{\text{Det}(H)}, \quad (21)$$

$$\text{mit } \text{Det}(H) = H_{x_G, x_G} H_{x_K, x_K} - (H_{x_G, x_K})^2 > 0. \quad (22)$$

Das Vorzeichen ist abhängig von der Relation der Emissionsraten. Somit folgt, dass die Verwendung des Faktors mit der höheren Emissionsrate durch eine Erhöhung des Terminkurses zurückgeht.

Die Auswirkung auf die Summe der verwendeten Produktionsfaktoren ergibt sich aus der Summe der Zähler der Gl. (20) und (21).

$$\frac{d(x_G + x_K)}{d P_{CO_2}^F} = \frac{e_G f''(x_G^*) P_S + e_K f''(x_K^*) P_S}{\text{Det}(H)}, \quad (23)$$

$$\text{mit } \text{Det}(H) = H_{x_G, x_G} H_{x_K, x_K} - (H_{x_G, x_K})^2 > 0. \quad (24)$$

Da der Zähler von Gl. (23), aufgrund der Konkavität der Produktionsfunktion, unabhängig von der Relation der Emissionsraten der Stromerzeugungstechnologien negativ ist, verringert sich die Verwendung der Summe der Produktionsfaktoren durch eine Erhöhung des Terminkurses der CO<sub>2</sub>-Emissionszertifikate. □

Die Wirkungen auf die Verwendungen der beiden Faktoren lassen sich in zwei Teilwirkungen separieren, die zu einem Einkommens- und einem Substitutionseffekt äquivalent sind (vgl. z. B. Silberberg und Suen 2001). In den Gl. (20) und (20) bildet der jeweils erste Summand im Zähler den direkten Effekt der Kostenerhöhung ab, nach dem durch den Anstieg der Kosten der Anreiz zur Verringerung der Verwendung von beiden Faktoren besteht. Durch die Erhöhung der deterministischen Kosten der CO<sub>2</sub>-Emission verändert sich die relative Attraktivität der Nutzung der beiden Stromerzeugungs-technologien, wenn beide Technologien unterschiedlich hohe Emissionsraten haben. Durch die Emissionsraten werden die Gewichtungsfaktoren des Preises der CO<sub>2</sub>-Emission für jede Technologie bestimmt. Die Technologie mit der höheren Emissionsrate wird durch die Preiserhöhung relativ unattraktiver, was im Rahmen des zweiten Teileffektes, der zum Substitutionseffekt äquivalent ist, eine die Verwendung verringende Wirkung hat. Der emissionsärmere Faktor gewinnt an Attraktivität zur Stromerzeugung und dessen Verwendung steigt im Zusammenhang zum Substitutionseffekt an. Für den emissionsärmeren Faktor wirken die genannten Teilwirkungen gegensätzlich, so dass keine Aussage über die Änderung der Nutzung dieses Faktors gemacht werden kann.

<sup>12</sup>Vgl. 1978: S. 82 f., 1980: S. 324 1979: S. 273, oder 1992: S. 840.

Für den emissionsstärkeren Faktor wirken beide Effekte in die gleiche Richtung und die Verwendung des emissionsstärkeren Faktors geht durch die Erhöhung des Terminpreises der CO<sub>2</sub>-Zertifikate zurück. Die Summe der Verwendung der beiden Produktionsfaktoren wird durch die Erhöhung des Terminpreises der Zertifikate verringert, da sich die Substitutionseffekte von beiden Faktoren ausgleichen und die Änderung durch den jeweiligen Einkommenseffekt der Änderung von Gas und Kohle bestimmt wird.

## 2.2 Markttransparenz gemäß des Blackwell-Ansatzes

Als Grundlage für die weiteren Analysen wird zunächst der Begriff der Transparenz auf dem CO<sub>2</sub>-Zertifikatemarkt mit Hilfe von Informationssystemen definiert:

**Definition 2.2** *Die Markttransparenz bzgl. des unsicheren Preises der CO<sub>2</sub>-Emissionszertifikate ist für das gemäß des Blackwell-Ansatzes informativere Informationssystem I<sub>1</sub> höher als für das weniger informative Informationssystem I<sub>2</sub> (vgl. auch Broll und Eckwert 2006a; Broll et al., 2012; Drees und Eckwert 2003).*

Zwei Informationssysteme I<sub>1</sub> und I<sub>2</sub>, die durch die bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilungen über die Umweltzustände für jedes der möglichen Informationssignale gegeben sind, können nach Blackwell bzgl. ihres Informationsgehalts verglichen werden, wenn eines der beiden Informationssysteme durch einen Prozess der Informations-Zerstreuung aus dem anderen Informationssystem erhalten wird (vgl. Blackwell 1951, 1953). Bei diesem Prozess erfolgt eine Verringerung des Informationsgehalts des ursprünglichen Informationssystems, so dass das neu erhaltene Informationssystem einen geringeren Informationsgehalt aufweist als das ursprüngliche Informationssystem. Nach dem Blackwell-Ansatz können ausschließlich Rangordnungen über den Informationsgehalt von Informationssystemen erstellt werden, zwischen denen der beschriebene Zusammenhang besteht, so dass die Vergleichbarkeit von Informationssystemen nur für eine Teilmenge aller Informationssysteme möglich ist. Der Ansatz von Blackwell zum Vergleich von Informationssystemen stellt daher keine vollständige Ordnung dar (vgl. z. B. Blackwell und Girshik, 1954; Gollier 2001; McGuire, 1972).

**Definition 2.3** *Werden zwei Informationssysteme, I<sub>1</sub> und I<sub>2</sub>, die die Informationssignale y<sub>m</sub> und y'<sub>m'</sub>, mit m = 1, ..., M bzw. m' = 1, ..., M', übermitteln bzgl. ihres Informationsgehalts verglichen, dann ist System I<sub>1</sub> nicht weniger informativ als System I<sub>2</sub>, abgekürzt durch I<sub>1</sub> ≥<sub>Black</sub> I<sub>2</sub>, wenn eine M × M'*

*Matrix B existiert mit*

$$\begin{aligned} (i) \quad & b_{mm'} \geq 0, \\ (ii) \quad & \sum_{m=1}^M b_{mm'} = 1, \\ (iii) \quad & \sum_{m'=1}^{M'} b_{mm'} p(y'_{m'}) = p(y_m), \end{aligned}$$

*so gilt so dass*

$$I_2 = I_1 \times B \quad (25)$$

*gilt (vgl. Blackwell 1953; Marschak und Miyasawa 1968; Lawrence 1999; McGuire, 1972).*

Zusätzlich benötigen wir

**Definition 2.4** *Eine Funktion L(·) ist konkav (konvex) in den Eintrittswahrscheinlichkeiten über die Umweltzustände ŝ, wenn für zwei Verteilungen über ŝ mit den Wahrscheinlichkeiten, p(ŷ) sowie q(ŷ) und α, mit α ∈ [0, 1] gilt (vgl. DeGroot 1970):*

$$\begin{aligned} L(\alpha p(\hat{s}) + (1 - \alpha)q(\hat{s})) &\geq (\leq) \alpha L(p(\hat{s})) \\ &+ (1 - \alpha)L(q(\hat{s})). \end{aligned} \quad (26)$$

Damit gilt

**Satz 2.4** *Ist ein Informationssystem I<sub>1</sub> informativer als ein anderes Informationssystem I<sub>2</sub>, so dass I<sub>1</sub> ≥<sub>Black</sub> I<sub>2</sub>, dann gilt für jede Funktion F: ℝ → ℝ, die konvex in den Posteriori-Wahrscheinlichkeiten der Informationssysteme ist (vgl. Blackwell und Girshik 1954; McGuire, 1972; Kemperman 1975; Savage 1972):*

$$\begin{aligned} & \sum_{m=1}^M p(y_m)F(p(s_i|y_m)) \\ & \geq \sum_{m=1}^{M'} p(y'_{m'})F(p(s_i|y'_{m'})), \end{aligned} \quad (27)$$

$$\text{bzw. } E_y [F(p(\hat{s}|\hat{y}))] \geq E_{y'} [F(p(\hat{s}|\hat{y}'))]. \quad (28)$$

Bezogen auf die Markttransparenz bzw. den höheren Informationsgehalts eines Informationssystems I<sub>1</sub> im Vergleich zu einem zweiten System I<sub>2</sub> gemäß des Blackwell-Ansatzes gilt damit für unser Modell

**Lemma 2.1** Ist die Transparenz auf dem Markt für CO<sub>2</sub>-Zertifikate unter Informationssystem I<sub>1</sub> größer als unter Informationssystem I<sub>2</sub> ( $I_1 \geq_{Black} I_2$ ), dann gilt für jede Funktion  $F: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ , die konkav in den Posteriori-Wahrscheinlichkeiten der Informationssysteme ist:

$$\begin{aligned} & \sum_{m=1}^M p(y_m) F(p(P_{CO2,i}|y_m)) \\ & \geq \sum_{m=1}^{M'} p(y'_{m'}) F(p(P_{CO2,i}|y'_{m'})), \end{aligned} \quad (29)$$

bzw.

$$\begin{aligned} & E_y \left[ F(p(\tilde{P}_{CO_2}|\tilde{y})) \right] \\ & \geq E_{y'} \left[ F(p(\tilde{P}_{CO_2}|\tilde{y}')) \right]. \end{aligned} \quad (30)$$

Durch  $y_m$  und  $y'_{m'}$ , mit  $m = 1, \dots, M$  bzw.  $m' = 1, \dots, M'$ , sind die Informationssignale der beiden Informationssysteme I<sub>1</sub> und I<sub>2</sub> gegeben. Beide Systeme sind jeweils durch ihre Posteriori-Wahrscheinlichkeiten gegeben.

Eine Lemma 2.1 entsprechende Aussage lässt sich ebenfalls für konkave bzw. lineare Funktionen in den Posteriori-Wahrscheinlichkeiten treffen (vgl. Kihlstrom, 1984).

Im weiteren Verlauf werden wir zunächst die Auswirkungen einer höheren Markttransparenz auf die Verwendung der einzelnen Produktionsfaktoren untersuchen, bevor wir die Auswirkungen auf die allgemeine Stromproduktion, den erwarteten Gewinn der Stromerzeugers und schließlich den Erwartungsnutzen des Unternehmens analysieren. Dazu unterstellen wir einen unverzerrten Terminmarkt. Die Beweise der entsprechenden Sätzen befinden sich im Anhang.

Die Erwartungswerte der optimal zu verwendenden Produktionsfaktoren  $X_G$  und  $X_K$  vor Erhalt eines Signals des Informationssystems sind gegeben durch:

$$X_G = \sum_{m=1}^M p(y_m) x_G^*(y_m), \quad (31)$$

$$X_K = \sum_{m=1}^M p(y_m) x_K^*(y_m). \quad (32)$$

Für die Auswirkung einer Erhöhung der Markttransparenz gilt

### Satz 2.5

a) Die Erhöhung der Markttransparenz auf dem Markt für CO<sub>2</sub>-Emissionszertifikate führt für  $0 < \alpha < 1$  sowie  $\beta = 1$  zu einer Verringerung der erwarteten Verwendung von Kohle  $X_K$  zur Stromerzeugung und zu einer Erhöhung der erwarteten Verwendung von Gas  $X_G$ .

b) Weisen beide Stromerzeugungstechnologien gleich hohe Emissionsraten auf, so dass  $e_G = e_K$  gilt, wird durch eine Erhöhung der Markttransparenz für  $0 < \alpha < 1$  sowie  $\beta = 1$  die erwartete Verwendung von Gas  $X_G$  zur Stromerzeugung nicht verändert. Die erwartete Verwendung des Faktors Kohle  $X_K$  wird infolge der Transparenzerhöhung reduziert. So mit führt die Erhöhung der Transparenz auf dem Markt für CO<sub>2</sub>-Emissionszertifikate zu einem Rückgang der Stromproduktion.

Das Ausmaß der Veränderung der verwendeten Produktionsfaktoren ist sowohl von der ursprünglichen Faktorverwendung als auch von der Krümmung der Produktionsfunktion abhängig. Grundsätzlich können die Auswirkungen einer Transparenzerhöhung in zwei Teileffekte zerlegt werden, die als Substitutions- und Einkommenseffekt interpretiert werden können.<sup>13</sup> Der Einkommenseffekt auf der einen Seite weist einen negativen Wert auf. Der Substitutionseffekt auf der anderen Seite kann sowohl entgegengesetzt oder gleichgerichtet zum Einkommenseffekt wirken und diesen sogar überkompensieren. In diesem Fall kann eine Erhöhung der Transparenz auf dem CO<sub>2</sub>-Zertifikatemarkt zu einer Erhöhung der Verwendung von Gas und Kohle führen. Unter Berücksichtigung unserer Annahmen tritt dieser Fall jedoch nicht ein.

Unmittelbar verknüpft mit der Verwendung der einzelnen Inputfaktoren ist die gesamte Stromproduktion des Unternehmens. Führt eine Erhöhung der Markttransparenz zu einer geringeren Verwendung eines Inputfaktors, so ist dies umweltpolitisch durchaus wünschenswert, falls es sich dabei um den Faktor mit der höheren Emissionsrate handelt. Dieser Effekt sollte jedoch durch emissionsschwächere Technologien aufgefangen werden. Daher untersuchen wir im folgenden die Auswirkungen einer erhöhten Markttransparenz auf die gesamte Stromproduktion. Für die weiteren Analysen benötigen wir die folgenden Maße für die Konkavität bzw. Konvexität der Produktions- und der Grenzproduktivitätsfunktion (vgl. Broll et al. 2010; Hermelingmeier 2010a):

**Definition 2.5** Die Produktionsfunktion bzgl. des Produktionsfaktors Gas weist Konkavität (Konvexität) auf, wenn der folgende Term positiv (negativ) ist (vgl. ähnlich Broll und Eckwert 2007; Hermelingmeier 2010b):

$$RF(x_G(y_m)) = -\frac{f''(x_G(y_m))}{f'(x_G(y_m))} > (<) 0. \quad (33)$$

<sup>13</sup> Mit Hilfe des Substitutions- und Einkommenseffekts, lassen sich Wirkungsprozesse in verschiedenen mikroökonomischen Fragestellungen beschreiben und zerlegen (vgl. bspw. Henderson und Quandt 1971; Silberberg und Suen 2001; Varian 2010).

**Definition 2.6** Die Grenzproduktivitätsfunktion bzgl. des Produktionsfaktors Gas weist Konvexität (Konkavität) auf, wenn der folgende Term positiv (negativ) ist (vgl. ähnlich Broll und Eckwert 2007; Hermelingmeier 2010a):

$$PF(x_G(y_m)) = -\frac{f'''(x_G(y_m))}{f''(x_G(y_m))} > (<) 0. \quad (34)$$

Der Faktor  $RF(x_G(y_m))$  stellt ein Maß für die Krümmung der Produktionsfunktion dar und  $PF(x_G(y_m))$  das entsprechende Maß für die Krümmung der Grenzproduktivitätsfunktion. Da die Grenzerlösfunktion durch Multiplikation mit dem Strompreis erhalten wird, stellen beide Faktoren auch ein Maß für die Krümmung der Grenzerlösfunktion dar. Für die in unserem bisherigen Beitrag unterstellte Produktionsfunktion ist die Grenzproduktivitätsfunktion konvex und die Produktivitätsfunktion konkav, so dass  $RF(x_G(y_m)) > 0$  und  $PF(x_G(y_m)) > 0$  gelten.

Für die Auswirkungen einer Erhöhung der Transparenz auf dem CO<sub>2</sub>-Zertifikatemarkt auf die erwartete Stromproduktion gilt der folgende

### Satz 2.6

a) Eine Erhöhung der Markttransparenz auf dem Markt für CO<sub>2</sub>-Emissionszertifikate führt zu einer Verringerung der erwarteten Stromproduktion falls  $RF(x_G^*(y_m)) \geq PF(x_G^*(y_m))$  gilt.

b) Weisen beide Stromerzeugungstechnologien gleich hohe Emissionsraten auf, so dass  $e_G = e_K$  gilt, wird die erwartete Stromproduktion, infolge der Transparenzerhöhung auf dem Markt für CO<sub>2</sub>-Emissionszertifikate reduziert.

Die Auswirkungen einer Transparenzerhöhung werden im Wesentlichen durch

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 f(x_G^*, x_K^*)}{\partial (P_{CO_2}^F(y_m))^2} \\ &= \frac{(e_G - e_K)^2}{f''(x_G^*(y_m))^2 P_S^2} \left( f''(x_G^*(y_m)) \left( 1 - \frac{PF(x_G^*(y_m))}{RF(x_G^*(y_m))} \right) \right. \\ & \quad \left. - PF(x_G^*(y_m)) t_K \right) - \frac{t_K e_K C'''(x_G^*(y_m), x_K^*(y_m))}{C''(x_G^*(y_m), x_K^*(y_m))^2}. \quad (35) \end{aligned}$$

charakterisiert.

Anhand von Gl. (35) können verschiedene Teileffekte abgelesen werden, die für die Auswirkung einer höheren Transparenz auf die erwartete Produktion relevant sind. Der Einfluss der Transparenzerhöhung wird durch den Faktor  $1 - PF(x_G^*(y_m))/RF(x_G^*(y_m))$  bestimmt, abhängig von den Maßen für die Konkavität der Produktions- und der Grenzproduktivitätsfunktion (vgl. Definitionen 2.5 und 2.6). Für  $1 - PF(x_G^*(y_m))/RF(x_G^*(y_m)) > 0$  wird die Ableitung insgesamt negativ.

Für das betrachtete Stromerzeugungsunternehmen mit konkaver Produktions- und konvexer Grenzproduktivitätsfunktion wirken die beiden beschriebenen Effekte gegensätzlich.  $PF(x_G^*(y_m))$  beschreibt den Teileffekt, der zu einer Erhöhung der Stromproduktion aus Gasverbrennung durch eine höhere Faktorverwendung von Gas führt (vgl. auch Hermelingmeier 2010a). Durch  $RF(x_G^*(y_m))$  wird der gegenläufige Effekt beschrieben, nach dem durch die Konkavität der Produktionsfunktion in Verbindung mit Definition 2.2 und Lemma 2.1 die Erhöhung der Transparenz die erwartete Stromproduktion reduziert. Da die Produktionsfunktion positive und abnehmende Grenzproduktivität impliziert, führen Anstiege der Verwendung von Gas um eine Einheit zu einer betragsmäßigen geringeren Ausweitung der Produktion als eine Verringerung der Nutzung von Gas um eine Einheit. Nur für den Fall, dass der durch den Faktor  $RF(x_G^*(y_m))$  beschriebene Teileffekt den zweiten Teileffekt, der durch  $PF(x_G^*(y_m))$  gegeben ist, überkompensiert, kann gefolgert werden, dass die Stromproduktion durch eine Erhöhung der Transparenz zurückgeht (vgl. ähnlich Hermelingmeier, 2010b). Dies ist immer dann der Fall, wenn die Konkavität der Produktionsfunktion größer als die Konvexität der Grenzproduktivitätsfunktion ist.

Neben den Auswirkungen auf die gesamte Stromproduktion und die Verwendung der einzelnen Faktormengen sind Fragestellungen bzgl. des Profits der Stromerzeugers und dem Nutzen der Geschäftstätigkeit von Bedeutung. Zunächst untersuchen wir die Auswirkung einer Erhöhung der Markttransparenz auf den erwarteten Gewinn des Stromerzeugers. Es gilt

**Satz 2.7** Die Erhöhung der Markttransparenz auf dem Markt für CO<sub>2</sub>-Emissionszertifikate führt zu einer Erhöhung des erwarteten Gewinns des stromerzeugenden Unternehmens.

Durch den höheren Grad der Markttransparenz und den dadurch implizierten Anstieg des Informationsgehalts des Systems kann das Stromerzeugungsunternehmen den Einsatz der Produktionsfaktoren effizienter festlegen. Entsprechend der Höhe des signalabhängigen Erwartungswertes der Preise der Zertifikate bzw. entsprechend der Höhe des Terminkurses werden für höhere Werte niedrigere Faktormengen von Gas und Kohle gewählt und für niedrigere Werte des Terminkurses höhere Verwendungsmengen der Faktoren. Dieses Vorgehen kann vom Unternehmen durch einen Anstieg der Markttransparenz effizienter durchgeführt werden, so dass der erwartete Gewinn des Unternehmens mit steigender Markttransparenz ebenfalls zunimmt.

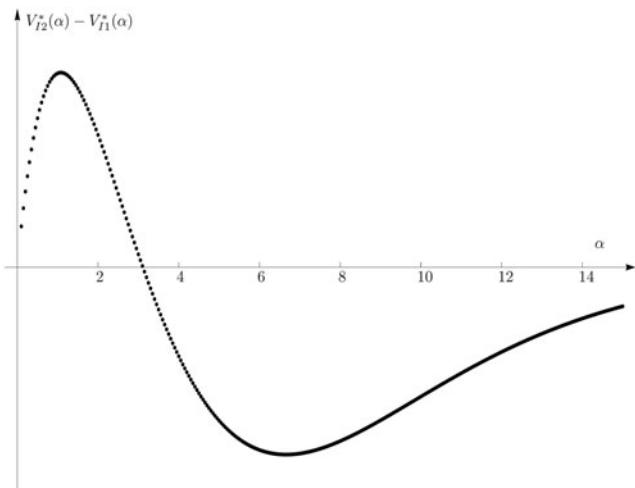
Für die Veränderung des Nutzens des Stromerzeugers durch einen Anstieg der Markttransparenz auf dem Markt für CO<sub>2</sub>-Emissionszertifikate gilt

**Satz 2.8** Die Erhöhung der Markttransparenz auf dem Markt für CO<sub>2</sub>-Emissionszertifikate führt dann zu einer Erhöhung des erwarteten Nutzens des stromerzeugenden Unternehmens, wenn für den Grad der absoluten Risikoaversion gilt:

$$ARA(\Pi^*) \leq -\frac{(e_K - e_G)^2}{f''(x_G^*(y_m))P_S(e_G x_G^*(y_m) + e_K x_K^*(y_m))^2}. \quad (36)$$

Für  $e_G = e_K$  kann keine spezifische Aussage getroffen werden.

Wesentlich für die Auswirkung einer erhöhten Markttransparenz auf den erwarteten Nutzen des Stromerzeugers ist der Grad der absoluten Risikoaversion. Dementsprechend kann der Anstieg der Markttransparenz den Erwartungsnutzen erhöhen. Es sind jedoch auch Konstellationen möglich, in denen eine Erhöhung der Markttransparenz zu einer Verringerung des erwarteten Nutzens führt (vgl. auch Ahlers et al. 2013; Broll und Eckwert 2009a; Eckwert und Zilcha 2001). Es wirken zwei gegensätzliche Effekte auf den Erwartungsnutzen. Diese beiden entgegengesetzt wirkenden Effekte werden als Hirshleifer- und als Blackwell-Effekt bezeichnet. Als *Hirshleifer-Effekt* wird allgemein die Wirkung von zusätzlicher öffentlicher Information bezeichnet, die den erwarteten Nutzen von einem oder mehreren Marktteilnehmer reduziert. In unserem Modell handelt sich zwar um ein Partial-Modell, jedoch interagiert der Stromerzeuger über einen kompetitiven Terminmarkt mit anderen Teilnehmer und gestaltet so sein Preisrisiko der CO<sub>2</sub>-Zertifikate. Durch eine erhöhte Markttransparenz nutzen alle Teilnehmer am Markt ein Informationssystem mit höherem Informationsgehalt. Der Terminpreis der Zertifikate entspricht dem erwarteten Preis der CO<sub>2</sub>-Zertifikate (unverzerrter Terminmarkt) und ist somit abhängig von Änderungen der bedingten Wahrscheinlichkeiten durch die geänderte Markttransparenz bzw. die Erhöhung des Informationsgehalts der Informationssysteme. Dieser Wirkungsmechanismus von erhöhter Markttransparenz entspricht dem Erhalt eines öffentlichen Informationssignals und kann daher einen negativen Effekt auf den Nutzen des Stromerzeugers haben (vgl. z. B. Broll et al. 2012; Eckwert und Zilcha, 2001). Da der Handel mit Terminkontrakten erst nach Erhalt eines Informationssignals beginnt, können nur die Risiken am Markt geteilt und gehandelt werden, die nach Erhalt des Signals noch vorhanden sind. Das Risiko des unsicheren Informationssignals kann der Stromerzeuger nicht über den Terminmarkt absichern. Ein Anstieg der Transparenz erhöht daher ex ante das nicht absicherbare Risiko und hat separat betrachtet einen negativen Effekt auf den Erwartungsnutzen eines risikoaversen Entscheiders (vgl. z. B. Broll et al. 2012; Eckwert und Zilcha 2004).



**Abb. 2** Auswirkungen einer Erhöhung der Transparenz auf dem Markt für CO<sub>2</sub>-Zertifikate auf den Erwartungsnutzen in Abhängigkeit des Grades der absoluten Risikoaversion.

Durch den Blackwell-Effekt wird der Teileffekt einer Erhöhung der Markttransparenz beschrieben, der aufgrund der Reduzierung des Risikos nach Erhalt von einem der Informationssignale über die Entwicklung der Preise der CO<sub>2</sub>-Zertifikate zu einer Erhöhung des Erwartungsnutzens führt. Höhere Markttransparenz ermöglicht eine bessere Prognose der Zertifikatepreise und eine effizientere Festlegung der Verwendungsmengen von Gas und Kohle, im Vergleich zu der Situation ohne das zusätzliche Informationssignal (vgl. Eckwert und Zilcha 2003, 2004; Sulganik und Zilcha 1996).

Abhängig vom Grad der Risikoaversion kann der negative Effekt des zusätzlichen Risikos durch das Signalrisiko, das nicht über den Terminmarkt abgesichert werden kann, eine stärkere Wirkung auf den Erwartungsnutzen haben als der positiv auf den Erwartungsnutzen wirkende Blackwell-Effekt.

Abbildung 2 verdeutlicht diesen Zusammenhang. Wir betrachten eine Erhöhung des Transparenzgrades für den CO<sub>2</sub>-Zertifikatemarkt durch einen Übergang der Nutzung von einem uninformativen Informationssystem  $I_1$  (unterstellt eine Gleichverteilung) zu System  $I_2$ . Die zur Erstellung der Abbildung verwendete Datenkonstellation ist im Anhang zu finden. Die Präferenzen des Stromerzeugers werden durch eine exponentielle Nutzenfunktion abgebildet, wobei der Grad der Risikoaversion durch  $\alpha$  gegeben ist. Die Abbildung zeigt die Differenz der maximalen Erwartungsnutzen  $V_{I2}^*(\alpha) - V_{I1}^*(\alpha)$  in Abhängigkeit des Grades der Risikoaversion  $\alpha$  angegeben und verdeutlicht, dass die Auswirkung eines geänderten Informationsstandes nicht einheitlich positiv oder negativ ist.

Tabelle 1 fasst die Ergebnisse unserer Analysen zu den Auswirkungen einer Erhöhung der Transparenz auf dem Markt für CO<sub>2</sub>-Zertifikate zusammen.

**Tab. 1** Ergebnisse der Analyse einer Erhöhung der Transparenz auf dem CO<sub>2</sub>-Zertifikatemarkt

	Erhöhung der Markttransparenz
$X_G$	$\uparrow$ , für $e_G = e_K$ : $\rightarrow$
$X_K$	$\downarrow$ , für $e_G = e_K$ : $\downarrow$
erw. Stromproduktion	für $RF(x_G^*(y_m)) \geq PF(x_G^*(y_m))$ : $\downarrow$ , für $e_G = e_K$ : $\downarrow$
erw. Gewinn	$\uparrow$
erw. Nutzen	für $ARA(\Pi^*) \leq -\frac{(e_K - e_G)^2}{f''(x_G^*(y_m))P_S(e_G x_G^*(y_m) + e_K x_K^*(y_m))^2}$ : $\uparrow$

### 3 Zusammenfassung

Die Besonderheiten des Stromerzeugungsmarktes, wie z. B. die Homogenität von Strom, der leitungsgebundene Transport sowie verschiedene Nebenbedingungen, die die Erzeugungs- und Transportkapazitäten betreffen, führen für stromerzeugende Unternehmen zu einem komplexen Entscheidungsumfeld. Dies wird durch die vielfältigen Regulierungsvorschriften, deren regelmäßige Veränderungen sowie die mit der Erfüllung der Vorschriften verbundenen Kosten zusätzlich verschärft. Im Rahmen unseres Beitrags untersuchen wir die Auswirkungen durch das gemäß des Kyoto-Protokolls eingeführte CO<sub>2</sub>-Zertifikatehandelssystem sowie die Auswirkungen einer erhöhten Markttransparenz auf dem Markt für CO<sub>2</sub>-Zertifikate. Die Entscheidungssituation des Stromerzeugers kann durch zusätzliche Information über die Entwicklung der unsicheren Größen verbessert werden, so dass eine präzisere Prognose über die Entwicklung der unsicheren Größen getätigt werden kann.

Aufbauend auf Blackwell (1951, 1953) und Kihlstrom (1984) leisten wir einen Beitrag zur Literatur, indem wir ein Modell aus dem industrieökonomischen Ansatz vorstellen, dass die Besonderheiten der Stromproduktion berücksichtigt. Wir leiten die optimalen Entscheidungen über die Verwendung von Gas und Kohle zur Stromerzeugung her und untersuchen daran die Auswirkung einer Erhöhung der Markttransparenz. Dabei zeigen wir, dass eine Erhöhung der Markttransparenz zu einem Anstieg der erwarteten Verwendung des Faktors Gas und zu einer verringerten erwarteten Nutzung des Faktors Kohle führt. Des Weiteren kann gezeigt werden, dass aus dem kosteneffizienteren Einsatz der Produktionsfaktoren, der durch die erhöhte Transparenz ermöglicht wird immer ein Anstieg des erwarteten Gewinns resultiert. Dies gilt jedoch nicht für den Nutzen des Stromerzeugers. Der Erwartungsnutzen des stromerzeugenden Unternehmens kann in Abhängigkeit der Risikoaversion sowohl steigen als auch sinken.

Die Ergebnisse unseres Beitrags haben regulatorische Implikationen. So gilt es neben umweltpolitischen Zielen die Versorgungssicherheit bei der Stromerzeugung zu gewährleisten. Unser Beitrag zeigt auf, dass unter bestimmten Konstellationen eine Transparenzerhöhung zur Reduktion eines

Inputfaktors bei der Stromerzeugung und der Erhöhung eines anderen Inputfaktors führt. Diese Tatsache gilt es bei umweltpolitischen Zielen auszunutzen. Ebenfalls zu berücksichtigen ist der Rückgang der erwarteten Stromproduktion im Hinblick auf die Versorgungssicherheit.

In unserem Beitrag nicht berücksichtigt haben wir die Interaktion zwischen einzelnen Stromerzeugern. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf. Ebenfalls nicht berücksichtigt haben wir die Berücksichtigung von zusätzlichen Kosten im Zusammenhang mit einem Transparenzanstieg. Höhere Markttransparenz entsteht z. B. durch das Sammeln und der Verpflichtung zur Meldung von Daten über den Handel oder die Erzeugung von Strom sowie über die vorhandenen Erzeugungskapazitäten. Die Schaffung von Prozessabläufen oder der Aufbau der Infrastruktur einer elektronischen Informationstechnik, die in einem Unternehmen die Sammlung von Daten sicherstellt, verursacht Kosten und kann daher einen Teil der möglicherweise positiven Effekte von höherer Markttransparenz kompensieren oder überkompensieren.

### A Beweise

#### A.1 Beweis von Satz 4.4.

**Beweis** Gemäß Lemma 2.1 ist zu zeigen, dass die optimale Verwendungsmenge von Kohle  $x_K^*(y_m)$  konkav und die optimale Verwendungsmenge von Gas  $x_G^*(y_m)$  konvex in den Posteriori-Wahrscheinlichkeiten ist um die Aussage über die Veränderung des unbedingten Erwartungswertes der verwendeten Produktionsfaktoren Gas und Kohle zu belegen. Für die Ermittlung des optimalen Einsatzes der Stromerzeugungstechnologien wählt das Unternehmen Mengen von Gas und Kohle, so dass die Bedingungen erster Ordnung aus den Gleichungen (5) und (6) erfüllt sind. Ist der Terminmarkt unverzerrt ist entspricht der Terminkurs dem Erwartungswert der Preise der CO<sub>2</sub>-Emissionszertifikate auf Basis der Posteriori-Wahrscheinlichkeiten und ist somit eine lineare Funktion dieser Wahrscheinlichkeiten (vgl. z. B. Eckwert und Zilcha 2001; Gollier 2001). Dementsprechend kann eine Aussage über die Krümmung der betrachteten Funktion in Abhängigkeit der bedingten Wahrscheinlichkeiten auf eine Untersu-

chung des Krümmungsverhaltens der Funktionen bzgl. des Terminkurses zurückgeführt werden. Wir differenzieren die optimalen Faktormengen (Folgen aus den Bedingungen erster Ordnung) nach dem Terminkurs der CO<sub>2</sub>-Zertifikate:

$$\begin{aligned} f''(x_G^*(y_m)) x'_G(y_m) P_S \\ - e_G - x'_G(y_m) C''(x_G^*(y_m), x_K^*(y_m)) = 0, \end{aligned} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} f''(x_K^*(y_m)) x'_K(y_m) P_S \\ - e_K - x'_K(y_m) C''(x_G^*(y_m), x_K^*(y_m)) = 0, \end{aligned} \quad (38)$$

wobei  $x'_G(y_m)$  bzw.  $x'_K(y_m)$  die Ableitungen der optimalen Verwendungsmengen nach dem Terminkurs der CO<sub>2</sub>-Zertifikate bezeichnet.

Für die Ermittlung der Krümmung der zu untersuchenden Funktionen der Faktorverwendungen von Gas und Kohle ist die zweite Ableitung nach dem Terminkurs zu bilden. Da für den Faktor  $\beta$  der Produktionsfunktion ein Wert von eins unterstellt wurde, gilt  $f''(x_K^*(y_m)) = 0$ . Die ersten Ableitungen der Verwendungsmengen von Gas und Kohle vereinfachen sich daraufhin zu:

$$x'_G(y_m) = \frac{(e_G - e_K)}{f''(x_G^*(y_m)) P_S}, \quad (39)$$

$$x'_K(y_m) = \frac{-(e_G - e_K)}{f''(x_G^*(y_m)) P_S} - \frac{e_K}{C''(x_G^*(y_m), x_K^*(y_m))}. \quad (40)$$

Für die zweiten Ableitungen der Verwendungsmengen von Gas und Kohle nach dem Terminkurs  $P_{CO_2}^F(y_m)$  folgt:

$$x''_G(y_m) = \frac{(e_G - e_K) f'''(x_G^*(y_m)) P_S x'_G(y_m)}{(f''(x_G^*(y_m)) P_S)^2}, \quad (41)$$

$$\begin{aligned} x''_K(y_m) &= \frac{-(e_G - e_K) f'''(x_G^*(y_m)) P_S x'_G(y_m)}{(f''(x_G^*(y_m)) P_S)^2} \\ &+ \frac{e_K C'''(x_G^*(y_m), x_K^*(y_m))(x'_G(y_m) + x'_K(y_m))}{C''(x_G^*(y_m), x_K^*(y_m))^2}. \end{aligned} \quad (42)$$

Durch Einsetzen der ersten Ableitungen  $x'_G(y_m)$  und  $x'_K(y_m)$  ergibt sich

$$x''_G(y_m) = -\frac{(e_G - e_K)^2 f'''(x_G^*(y_m)) P_S}{(f''(x_G^*(y_m)) P_S)^3} > 0, \quad (43)$$

$$\begin{aligned} x''_K(y_m) &= \frac{(e_G - e_K)^2 f'''(x_G^*(y_m)) P_S}{(f''(x_G^*(y_m)) P_S)^3} \\ &- \frac{e_K C'''(x_G^*(y_m), x_K^*(y_m))}{C''(x_G^*(y_m), x_K^*(y_m))^2} < 0. \end{aligned} \quad (44)$$

Aus den beiden zweiten Ableitungen in den Gleichungen (43) und (44) folgt die Konvexität von  $x_G^*(y_m)$  bzw. die Konkavität

von  $x_K^*(y_m)$ . Da die Produktionsfunktion konkav ist und damit  $f''(x_G^*(y_m)) < 0$  gilt, wird das Vorzeichen von  $x''_G(y_m)$  durch die dritte Ableitung der Produktionsfunktion nach dem Faktor Gas bestimmt, so dass gilt:

$$\text{sign}(x''_G(y_m)) = \text{sign}(f'''(x_G^*(y_m))). \quad (45)$$

Das Vorzeichen der dritten Ableitung der Produktionsfunktion wird durch die Krümmung der Grenzproduktivitätsfunktion bestimmt. Ist  $f'(x_G^*(y_m))$  konvex (konkav) [linear] führt die Erhöhung der Transparenz zu einer Zunahme (zu einer Abnahme) [zu keiner Veränderung] der Verwendung von Gas zur Stromerzeugung.

Für  $e_G = e_K$  gilt

$$x''_G(y_m) = -\frac{0}{(f''(x_G^*(y_m)) P_S)^3}, \quad (46)$$

$$x''_K(y_m) = -\frac{e_K C'''(x_G^*(y_m), x_K^*(y_m))}{C''(x_G^*(y_m), x_K^*(y_m))^2}. \quad (47)$$

In diesem Fall wird die erwartete Verwendung von Gas zur Stromerzeugung durch eine Erhöhung der Markttransparenz für CO<sub>2</sub>-Emissionszertifikate nicht verändert und die erwartete Verwendung von Kohle verringert. Aufgrund der Eigenschaften der Produktionsfunktion wird folglich die erwartete Stromproduktion durch eine Erhöhung der Markttransparenz reduziert.  $\square$

## A.2 Beweis von Satz 4.5.

**Beweis** Wir bestimmen die Ableitung der Produktionsfunktion nach dem Terminpreis der CO<sub>2</sub>-Zertifikate im Optimum. Da der Terminkurs linear in den Eintrittswahrscheinlichkeiten ist, können wir so eine Aussage über die Auswirkung von erhöhter Markttransparenz auf die Stromproduktion erzielen. Es gilt

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(x_G^*(y_m), x_K^*(y_m))}{\partial P_{CO_2}^F(y_m)} &= f'(x_G^*(y_m)) x'_G(y_m) \\ &+ f'(x_K^*(y_m)) x'_K(y_m). \end{aligned} \quad (48)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 f(x_G^*(y_m), x_K^*(y_m))}{\partial (P_{CO_2}^F(y_m))^2} &= f''(x_G^*(y_m)) x'_G(y_m)^2 \\ &+ f'(x_G^*(y_m)) x''_G(y_m) \\ &+ f''(x_K^*(y_m)) x'_K(y_m)^2 + f'(x_K^*(y_m)) x''_K(y_m). \end{aligned} \quad (49)$$

Aufgrund der linearen Produktionsfunktion bzgl. des Faktors Kohle hat die erste Ableitung den Wert  $t_K$  und die entsprechende zweite Ableitung den Wert null. Für die ersten

und zweiten Ableitungen der optimalen Verwendungsmengen von Gas und Kohle werden die Werte aus den Gl. (39) und (40) sowie (43) und (44) eingesetzt.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 f(x_G^*(y_m), x_K^*(y_m))}{\partial (P_{CO_2}^F(y_m))^2} &= f''(x_G^*(y_m)) \left( \frac{(e_G - e_K)}{f''(x_G^*(y_m)) P_S} \right)^2 \\ &+ f'(x_G^*(y_m)) \left( - \frac{(e_G - e_K)^2 f'''(x_G^*(y_m)) P_S}{(f''(x_G^*(y_m)) P_S)^3} \right) \\ &+ \left( \frac{(e_G - e_K)^2 f'''(x_G^*(y_m)) P_S t_K}{(f''(x_G^*(y_m)) P_S)^3} \right. \\ &\left. - \frac{t_K e_K C'''(x_G^*(y_m), x_K^*(y_m))}{C''(x_G^*(y_m), x_K^*(y_m))^2} \right). \end{aligned} \quad (50)$$

Die Gleichung kann durch Zusammenfassen und Ausklammern in zwei weiteren Schritten wie folgt vereinfacht werden:

$$\begin{aligned} &= \frac{(e_G - e_K)^2}{f''(x_G^*(y_m))^2 P_S^2} \\ &\left( \frac{f''(x_G^*(y_m))^2 P_S - f'(x_G^*(y_m)) f'''(x_G^*(y_m)) P_S +}{f''(x_G^*(y_m)) P_S} \right. \\ &\left. \frac{f'''(x_G^*(y_m)) P_S t_K}{f''(x_G^*(y_m)) P_S t_K} \right) \\ &- \frac{t_K e_K C'''(x_G^*(y_m), x_K^*(y_m))}{C''(x_G^*(y_m), x_K^*(y_m))^2}, \end{aligned} \quad (51)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{(e_G - e_K)^2}{f''(x_G^*(y_m))^2 P_S^2} \left( f''(x_G^*(y_m)) \right. \\ &\left. \frac{f''(x_G^*(y_m))^2 - f'(x_G^*(y_m)) f'''(x_G^*(y_m))}{(f''(x_G^*(y_m)))^2} \right. \\ &\left. + \frac{f'''(x_G^*(y_m)) t_K}{f''(x_G^*(y_m))} \right) - \frac{t_K e_K C'''(x_G^*(y_m), x_K^*(y_m))}{C''(x_G^*(y_m), x_K^*(y_m))^2} \end{aligned} \quad (52)$$

Unter Verwendung der in den Definitionen 2.5 und 2.6 vorgestellten Größen kann Gl. (52) dargestellt werden als:

$$\begin{aligned} &= \frac{(e_G - e_K)^2}{f''(x_G^*(y_m))^2 P_S^2} \left( f''(x_G^*(y_m)) \left( 1 - \frac{PF(x_G^*(y_m))}{RF(x_G^*(y_m))} \right) \right. \\ &\left. - PF(x_G^*(y_m)) t_K \right) - \frac{t_K e_K C'''(x_G^*(y_m), x_K^*(y_m))}{C''(x_G^*(y_m), x_K^*(y_m))^2} \end{aligned} \quad (53)$$

Das Vorzeichen von Gl. (53) kann in Abhängigkeit der Konkavität von Produktions- bzw. der Konvexität der Grenzproduktivitätsfunktion des Faktors Gas ermittelt werden. Für  $RF(x_G^*(y_m)) \geq PF(x_G^*(y_m))$  ist der erste Summand der Gl. (53) negativ. Da auch der zweite Summand (53) aufgrund der Konvexität der Grenzkosten einen negativen Wert aufweist, ist für  $RF(x_G^*(y_m)) \geq PF(x_G^*(y_m))$  die optimale Stromproduktion eine im Terminkurs der CO<sub>2</sub>-Zertifikate konkave

Funktion. Im beschriebenen Fall führt die Erhöhung der Markttransparenz daher zu einer Verringerung der erwarteten Stromproduktion.

Für  $e_G = e_K$  vereinfachen sich die Ableitungen analog zu dem Beweis von Satz 4.4. Die Auswirkungen werden vollständig durch den zweiten Summanden von (53) beschrieben. Dieser hat einen negativen Wert, so dass die erwartete Stromproduktion durch eine Erhöhung der Markttransparenz zurückgeht.  $\square$

### A.3 Beweis von Satz 4.6.

**Beweis** Unter Verwendung des Envelope-Theorems (vgl. Silberberg und Suen 2001; Sydsæter et al. 2005; Wied-Nebbeling und Schott 2007) folgt

$$\begin{aligned} &\frac{\partial E[\Pi^*(x_G^*(y_m), x_K^*(y_m))]}{\partial P_{CO_2}^F(y_m)} \\ &= -(e_G x_G^*(y_m) + e_K x_K^*(y_m)) \end{aligned} \quad (54)$$

sowie

$$\begin{aligned} &\frac{\partial^2 \Pi^*(x_G^*(y_m), x_K^*(y_m))}{\partial (P_{CO_2}^F(y_m))^2} \\ &= -(e_G x'_G^*(y_m) + e_K x'_K^*(y_m)). \end{aligned} \quad (55)$$

Einsetzen der zweiten Ableitungen aus den Gl. (43) und (44) liefert

$$\begin{aligned} &\frac{\partial^2 \Pi^*(x_G^*(y_m), x_K^*(y_m))}{\partial (P_{CO_2}^F(y_m))^2} \\ &= -\frac{(e_G - e_K)^2}{f''(x_G^*(y_m)) P_S} + \frac{e_K}{C''(x_G^*(y_m), x_K^*(y_m))}. \end{aligned} \quad (56)$$

Aufgrund der Konkavität der Produktionsfunktion und der Konvexität der Kostenfunktion hat die zweite Ableitung des Gewinns nach dem Terminkurs einen positiven Wert, so dass der Gewinn konvex in den bedingten Wahrscheinlichkeiten des Informationssystems ist. In Verbindung mit Definition 2.2 und Lemma 2.1 folgt daher, dass die höhere Markttransparenz zu einem Anstieg des erwarteten Gewinns des Stromerzeugers führt.  $\square$

### A.4 Beweis von Satz 4.7.

**Beweis** Da das Stromerzeugungsunternehmen Zugang zu einem unverzerrten Terminmarkt hat, an dem Terminkontrakte für CO<sub>2</sub>-Zertifikate gehandelt werden, ist für das Unternehmen gemäß Satz 2.2 eine vollständige Absicherung der risikobehafteten Position optimal. Das Unternehmen erzielt einen deterministischen Gewinn. Der Nutzen, der bei optimalem Faktoreinsatz erhalten wird, ist dann ebenfalls deterministisch und wird mit  $U(\Pi^*(x_G^*(y_m), x_K^*(y_m))) = U(\Pi^*)$

bezeichnet. Die Aussage des Satzes ergibt sich unmittelbar aus der Krümmung der Nutzenfunktion bzgl. der bedingten Eintrittswahrscheinlichkeiten des Informationssystems. Unter Verwendung des Envelope-Theorems gilt (vgl. Ahlers et al. 2013; Broll und Eckwert 2009a; Broll et al. 2010)

$$\frac{\partial E[U(\Pi^*)]}{\partial P_{CO_2}^F(y_m)} = -U'(\Pi^*)(e_G x_G^*(y_m) + e_K x_K^*(y_m)) \quad (57)$$

sowie

$$\begin{aligned} \frac{\partial E[U(\Pi^*)]}{\partial (P_{CO_2}^F(y_m))^2} &= U''(\Pi^*)(e_G x_G^*(y_m) + e_K x_K^*(y_m))^2 \\ &\quad - U'(\Pi^*)(e_G x'_G(y_m) + e_K x'_K(y_m)). \end{aligned} \quad (58)$$

Durch Umformen und Einsetzen der ersten Ableitungen der Funktionen der optimalen Verwendung von Gas und Kohle aus den Gl. (39) und (40) kann die zweite Ableitung des Nutzens dargestellt werden als

$$\begin{aligned} \frac{\partial E[U(\Pi^*)]}{\partial (P_{CO_2}^F(y_m))^2} &= -U'(\Pi^*)\left(-\frac{U''(\Pi^*)}{U'(\Pi^*)}(e_G x_G^*(y_m)\right. \\ &\quad \left.+ e_K x_K^*(y_m))^2 + \frac{(e_G - e_K)^2}{f''(x_G^*(y_m))P_S} - \frac{e_K^2}{C''(x_G^*(y_m), x_K^*(y_m))}\right). \end{aligned} \quad (59)$$

Der Quotient von zweiter und erster Ableitung der Nutzenfunktion entspricht dem Maß für die absolute Risikoaversion,  $ARA(\Pi)$ , und wird an der entsprechenden Stelle eingesetzt. Umstellen von Gl. (58) liefert:

$$\begin{aligned} &= -U'(\Pi^*)(ARA(\Pi^*)(e_G x_G^*(y_m) + e_K x_K^*(y_m))^2 \\ &\quad + \frac{(e_G - e_K)^2}{f''(x_G^*(y_m))P_S}) + \frac{U'(\Pi^*)e_K^2}{C''(x_G^*(y_m), x_K^*(y_m))}. \end{aligned} \quad (60)$$

Das Vorzeichen der zweiten Ableitung der Nutzenfunktion kann nur dann bestimmt werden, wenn der erste Summand einen insgesamt positiven Wert aufweist, da auch der zweite Summand einen positiven Wert hat. Weist der Term in der Klammer einen negativen Wert auf, ist der Wert der zweiten Ableitung der Nutzenfunktion positiv und die Nutzenfunktion konvex im Terminkurs der CO<sub>2</sub>-Zertifikate. Die Bedingung für einen positiven Wert des Klammerterms im ersten Summanden kann dargestellt werden als:

$$ARA(\Pi^*) < -\frac{(e_K - e_G)^2}{f''(x_G^*(y_m))P_S(e_G x_G^*(y_m) + e_K x_K^*(y_m))^2}. \quad (61)$$

## B Informationssysteme zur Erstellung von Abb. 2.

Abbildung 2 unterstellt, dass der Preis der CO<sub>2</sub>-Zertifikate ganzzahlige Werte zwischen 2€ und 9€ pro Zertifikat annehmen kann. Vor der Erhöhung der Transparenz wird das Informationssystem  $I_1$  genutzt. Dieses System impliziert für den Erhalt von jedem der acht möglichen Informationssignalen eine bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung über die Zertifikatepreise, die einer Gleichverteilung entspricht. Dementsprechend ist dieses System vollständig uninformativ. Das Informationssystem wird durch die Matrix der bedingten Posteriori-Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Zustände,  $p(r_i|y_j)$ , mit  $i = 1, \dots, 8$ , für jedes der möglichen Signale  $y_j$ , mit  $j = 1, \dots, 8$ , dargestellt:

$$I_1 := \begin{pmatrix} 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 \\ 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 \\ 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 \\ 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 \\ 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 \\ 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 \\ 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 \\ 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.125 \end{pmatrix}.$$

Durch eine Erhöhung des Transparenzgrades auf dem CO<sub>2</sub>-Zertifikatemarkt kann das Informationssystem  $I_2$  genutzt werden. Dieses ist informativer und gegeben durch

$$I_2 := \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{pmatrix}.$$

Informationssystem  $I_1$  enthält keine Informationen, da die Nutzung dieses Informationssystems nach Erhalt von jedem der Informationssignalen zu einer bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilung führt, die jedem der möglichen acht Umweltzustände die gleiche Eintrittswahrscheinlichkeit in Höhe von 0.125 zuordnet. Informationssystem  $I_2$  hingegen übermittelt Informationssignale, die zu bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilungen führen, in denen fünf Umweltzuständen die Eintrittswahrscheinlichkeit Null zugeordnet wird. Die anderen Zustände haben eine Eintrittswahrscheinlichkeit in Höhe von  $\frac{1}{3}$  bzw.  $\frac{2}{3}$ . Informationssystem  $I_2$  liegt somit bzgl. des Informationsgehalts über System  $I_1$ .

□

## Literatur

- Ahlers C, Broll U, Eckwert B (2013) Information and output in agricultural markets: the role of market transparency. *Agr. Food Econ* 1:1–10
- Aichele C (2012) Smart Energy: Von der reaktiven Kundenverwaltung zum proaktiven Kundenmanagement. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden
- Anderson RW, Danthine J-P (1981) "Cross Hedging.". *J Polit Econ* 89:1182–1196
- Baldursson FM, Fehr v. d. N-HM (2012) "Price volatility and risk exposure: on the interaction of quota and product markets". *Environ Resour Econ* 52:213–233
- Batra RN, Ullah A (1974) "Competitive firm and the theory of input demand under price uncertainty.". *J Polit Econ* 82:537–548
- BDEW (2013) Zur Umsetzung der REMIT - Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über die Integrität und Transparenz des Energiegroßhandelsmarkts -, im, 2 edn. <https://www.bdew.de/internet.nsf/id/20141219-bdew-extra-remit-durchfuehrungsverordnung-am-7-januar-2015-in-kraft-damit-beginnen-die-me> (Stand: 11.03.2015)
- Ben-David S, Brookshire D, Burness S, McKee M, Schmidt C (2000) "Attitudes toward risk and compliance in emission permit markets". *Land Econ* 76:590–600
- Blackwell D (1951) "Comparison of experiments," Proceedings of the Second Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, 93–102
- Blackwell D (1953) "Equivalent comparisons of experiments," *Ann Math Stat*, 24:265–272
- Blackwell D, Girshik MA (1954) Theory of games and statical decisions, 5th Printing. Wiley, New York
- Bohnenblust HF, Shapley LS, Shermann S (1949) "Reconnaissance in game theory". *Res Mem, RM-208*
- Broll U, Eckwert B (2006a) "Transparency in the interbank market and the volume of Bank Intermediated Loans". *Int J Econ Theory* 2:123–133
- Broll U, Eckwert B (2007) The Competitive Firm Under Price Uncertainty: The Role of Information and Hedging, Dresden Discussion Paper Series in Economics, 1–17
- Broll U, Eckwert B (2009a) "Modelling information and hedging: the exporting firm," *Econ Model* 26:974–977
- Broll U, Eckwert B, Eickhoff A (2012) "Financial intermediation and endogenous risk in the banking sector". *Econ Model* 29:1618–1622
- Broll U, Eckwert B, Wong KP (2010) "International Trade and the Role of Market Transparency," Dresden Discussion Paper Series in Economics 08/10, 1–16
- Bundesgesetzblatt (2012a) "Drittes Gesetz zur Neuregelung energiewirtschaftsrechtlicher Vorschriften (3. EnWG)," Bundesgesetzblatt, Teil 1, Nr. 61, 2730–2744
- Bundesgesetzblatt (2013) "Gesetz gegen Wettbewerbsbeschränkungen in der Fassung der Bekanntmachung vom 26. Juni 2013," Bundesgesetzblatt, Teil 1, Nr. 32, 1750–1799
- Bundesgesetzblatt (2014) "Gesetz zur grundlegenden Reform des Erneuerbaren - Energien - Gesetzes und zur Änderung weiterer Bestimmungen des Energiewirtschaftsrechts," Bundesgesetzblatt, Teil 1, Nr. 33, 1066–1132
- Cam LL (1964) "Sufficiency and approximate sufficiency". *Ann Math Statistics* 35:1419–1455
- Chapple L, Clarkson PM, Gold DL (2013) "The cost of carbon: capital market effects of the proposed emission trading scheme (ETS)". *Abacus* 49:1–33
- Danthine J-P (1978) "Information, futures prices, and stabilizing speculation". *J Econ Theory* 17:79–98
- Day CJ, Hobbs BF, Pang J-S (2002) "Oligopolistic competition in power networks: a conjectured supply function approach". *IEEE Trans Power Syst* 17:597–607
- DeGroot MH (1962) "Uncertainty, information, and sequential experiments". *Ann Math Stat* 33:404–419
- DeGroot MH (1970) Optimal statistical decisions. McGraw-Hill, New York
- Delarue E, D'Haeseleer W (2008) "Greenhouse gas emission reduction by means of fuel switching in electricity generation: addressing the potentials". *Energ Convers Manage* 49:843–853
- Drees B, Eckwert B (2003) "Welfare effects of transparency in foreign exchange markets: the role of hedging opportunities". *Rev Int Econ* 11:453–463
- Drèze JH (1960) "Le paradoxe de l'information". *Econ Appl* 13:71–80
- Däuper O, Fischer C, Pilgram T (2015) "Ein- und Verkauf". In: Zenneke I, Wollschläger S, Eder J (Hrsg) Preise und Preisgestaltung in der Energiewirtschaft: Von der Kalkulation bis zur Umsetzung von Preisen für Strom, Gas, Fernwärme, Wasser und CO<sub>2</sub>. de Gruyter, Berlin, pp 61–98
- Eckwert B, Zilcha I (2001) "The value of information in production economies". *J Econ Theory* 100:172–186
- Eckwert B, Zilcha I (2003) "Incomplete risk sharing arrangements and the value of information," *Econ Theory* 21:43–58
- Eckwert B, Zilcha I (2004) "Economic implications of better information in a dynamic framework" *J Econ Theory* 24:561–581
- EEckhoudt L, Gollier C, Schlesinger H (2005) Economic and financial decisions under risk. Princeton University Press, Princeton
- Ellersdorfer I (2005) "A Multi-Regional Two-Stage Cournot Model for Analyzing Competition in the German Electricity Market," 1–32, iAEE European Conference, 8. November 2005
- Erdmann G, Zweifel P (2008) Energieökonomik: Theorie und Anwendung, Springer, Berlin
- Europäisches Parlament (2003) "Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Oktober 2003 über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Gemeinschaft und zur Änderung der Richtlinie 96/61/EG des Rates," Amtsblatt der Europäischen Union, L275, 32–46
- Europäisches Parlament (2011) "Verordnung Nr. 1227/2011 über die Integrität und Transparenz des Energiegroßhandelsmarkts (REMIT), Amtsblatt der Europäischen Union", L326, 1–16
- Europäisches Parlament (2012) "Richtlinie zur Energieeffizienz, zur Änderung der Richtlinien 2009/125/EG und 2010/30/EU und zur Aufhebung der Richtlinien 2004/8/EG und 2006/32/EG," Amtsblatt der Europäischen Union, L315
- Eydeland A, Wolyniec K (2003) Energy and power risk management: new developments in modeling, pricing and hedging. Wiley, Hoboken
- Feder G, Just RE, Schmitz A (1980) "Futures markets and the theory of the firm under price uncertainty". *Quart J Econ* 94:317–328
- Fleten SE, Ziembka WT, Wallace SW (2002) "Hedging electricity portfolios via stochastic programming". In: Greengard C, Ruszcynski A (Hrsg) Decision making under uncertainty: energy and power 128 of IMA volumes on mathematics and its applications. Springer, New York, pp 71–93
- Garcia-Alcade A, Ventosa M, Rivier M, Ramos A, Relano G (2002) "Fitting Electricity Market Models. A Conjectural Variations Approach," 14th Power System Computation Conference, 1–6
- Gollier C (2001) The economics of risk and time. :MIT Press, Cambridge
- Gotham D, Muthuraman K, Preckel P, Rardin R, Ruangpattana S (2009) "A load factor based mean-variance analysis for fuel diversification". *Energ Econ* 31:249–256
- Green R (2008) "Carbon tax or carbon permits: the impact on generators' risks". *Energ J* 29:67–89
- Hakanasson NH, Kunkel JG, Ohlson JA (1982) "Sufficient and necessary conditions for information to have social value in pure exchange". *J Financ* 37:1169–1181
- Hardes H-D, Uhly A (2007) Grundzüge der Volkswirtschaftslehre. Oldenbourg Verlag, München

- Henderson JM, Quandt RE (1971) Microeconomic theory: a mathematical approach, 2. Aufl. McGraw-Hill, New York
- Hermelingmeier C (2010a) "Decisions under Imperfect Information - The Ordering of Information Structures and Production under Endogenous Uncertainty". In: Kovac VD Schriftenreihe volkswirtschaftliche Forschungsergebnisse, Bd 157. Kovac, Hamburg
- Hermelingmeier C (2010b) "The competitive firm and the role of information about uncertain factor prices". *Econ Model*, 27:547–552
- Hey JD (1981a) "Hedging and the Competitive Labor-Managed Firm under Price Uncertainty". *Am Econ Rev* 71:753–757
- Hey JD (1981b) "A Unified Theory of the Behaviour of Profit-Maximising, Labor-Managed and Joint Stock Firms Operating under Uncertainty". *Econ J* 91:364–374
- Hirshleifer J (1971) "The private and social value of information and the reward to inventive activity". *Am Econ Rev* 61:561–574
- Hirshleifer J (1975) "Speculation and equilibrium: information, risk, and markets". *Q J Econ* 89:519–542
- Hirshleifer J (1989) Time, uncertainty and information. Cambridge University Press, Cambridge
- Hirshleifer J, Riley JG (1979) "The analytics of uncertainty and information – an expository survey". *J Econ Lit* 17:1375–1421
- Holthausen DM (1976) "Input choices and uncertain demand". *Am Econ Rev* 66:94–103
- Holthausen DM (1979) "Hedging and the competitive firm under price uncertainty". *Am Econ Rev*. 69:989–995
- Holthausen DM (1980) "Forward markets and the multiproduct, multifactor firm under price uncertainty," *Econ Lett* 6:217–223
- Hull JC (2012) Optionen, Futures und andere Derivate. München, 8 edn
- Ishii Y (1977) "On the theory of the competitive firm under price uncertainty: note". *Am Econ Rev* 67:768–769
- Katz E, Paroush J (1979) "The effect of forward markets on exporting firms". *Econ Lett* 4:271–274
- Katz E, Paroush J, Kahana N (1982) "Price uncertainty and the price discriminating firm in international trade". *Int Econ Rev* 23:389–400
- Kawai M, Zilcha I (1986) "International trade with forward-futures markets under exchange rate and price uncertainty". *J Int Econ* 20:83–98
- Kemperman JHB (1975) "The dual of the cone of all convex functions on a vector space". *Aequationes Math* 13:103–119
- Keppler JH, Cruciani M (2010) "Rents in the European power sector due to carbon trading". *Energ Policy* 38:4280–4290
- Kihlstrom RE (1984) "A bayesian exposition of blackwells theorem on the comparison of experiments". In: Boyer M, Kihlstrom RE (Hrsg) Bayesian models in economic theory, Bd 5. Elsevier Science Pub., Amsterdam, S 12–31
- Konstantin P (2013) Praxisbuch Energiewirtschaft: Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt, 3. Aufl. Springer, Berlin
- Lawrence DB (1999) The economic value of information. Springer, New York
- Leland HE (1972) "Theory of the firm facing uncertain demand". *Amer Econ Rev* 62:278–291
- Malcher M, Puffe M (2015) "Preiskalkulation". In: Zenke I, Wollschläger S, Eder J (Hrsg) Preise und Preisgestaltung in der Energiewirtschaft: Von der Kalkulation bis zur Umsetzung von Preisen für Strom, Gas, Fernwärme, Wasser und CO<sub>2</sub>. De Gruyter, Berlin, S 13–40
- Marschak J, Miyasawa K (1968) "Economic comparability of information systems". *Int Econ Rev* 9:137–174
- Marshall JM (1974) "Private incentives and public information". *Am Econ Rev* 64:373–390
- McGuire CB (1972) Comparisons of Information Structures. North-Holland Publ. Co., Amsterdam, S 101–130
- Monjau R, Vollmer M (2015) "Erzeugung". In: Zenke I, Wollschläger S, Eder J (Hrsg) Preise und Preisgestaltung in der Energiewirtschaft: Von der Kalkulation bis zur Umsetzung von Preisen für Strom, Gas, Fernwärme, Wasser und CO<sub>2</sub>. De Gruyter, Berlin, S 41–60
- Morris S, Shin HS (2002) "Social value of public information". *Am Econ Rev* 92:1521–1534
- Mossin J (1968) "Aspects of rational insurance purchasing". *J Polit Econ* 76:553–568
- Murphy FH, Smeers Y (2005) "Generation capacity expansion in imperfectly competitive restructured electricity markets". *Oper Res* 53:646–661
- Oum Y, Oren SS (2009) "VaR constrained hedging of fixed price load following obligations in competitive electricity markets". *Risk Decis Anal* 1:43–56
- Oum Y, Oren SS (2010) "Optimal static hedging of volumetric risk in a competitive wholesale electricity market". *Deci Anal* 7:107–122
- Paroush J, Wolf A (1992) "The derived demand with hedging cost uncertainty in the futures markets". *Econ J* 102:831–844
- Powell A (1993) "Trading forward in an imperfect market: the case of electricity in Britain". *Econ J* 103:444–453
- Ramos A, Ventosa M, Rivier M (1998) "Modeling competition in electric energy markets by equilibrium constraints". *Util Policy* 7:233–242
- Rolfo J (1980) "Optimal hedging under price and quantity uncertainty: the case of a cocoa producer". *J Polit Econ* 88:100–116
- Sandmo A (1971) "On the theory of the competitive firm under price uncertainty". *Am Econ Rev* 61:65–73
- Savage LJ (1972) The foundations of statistics, 2. Aufl. Dover, New York
- Schlee E (2001) "The value of information in efficient risk-sharing arrangements". *Am Econ Rev* 91:509–524
- Sherman S (1951) "On a theorem of hardy, littlewood, polya, and blackwell". *Proc Natl Acad Sci USA* 37:826–831
- Silberberg E, Suen W (2001) The structure of economics: a mathematical analysis, 3. Aufl. Irwin/McGraw Hill, Boston
- Smeers Y (1997) "Computable equilibrium models and the restructuring of the european electricity and gas markets". *Energ J* 18:1–31
- Spremann K (1986) "Produktion, Hedging, Spekulation - Zu den Funktionen von Futures-Märkten". *Z Betriebswirtsch Forsch* 38:443–464
- Spremann K (1991) "Kann man mit Terminkontrakten hedgen?" *Z Betriebswirtsch Forsch* 43:295–312
- Stiglitz JE (2000) "The contributions of the economics of information to twentieth century economics". *Q J Econ* 115:1441–1481
- Ströbele W, Pfaffenberger W, Heuterkes M (2012) Energiewirtschaft: Einführung in Theorie und Politik, 3. Aufl. Oldenbourg, München
- Sulganik E, Zilcha I (1996) "The value of information in the presence of futures markets". *J Futur Mark* 16:227–240
- Sydsæter K, Strøm A, Berck P (2005) Economists' mathematical manual, 4. Aufl. Springer, Berlin
- Varian HR (2010) Intermediate microeconomics: a modern approach, 8. Aufl. W.W. Norton & Company, New York
- Ventosa M, Bafillo A, Ramos A, Rivier M (2005) "Electricity markets modeling trends.". *Energ Policy* 33:897–913
- Wied-Nebbeling S, Schott H (2007) Grundlagen der Mikroökonomik, 3. Aufl. Springer, Berlin
- Wogrin S, Centeno E, Barquín J (2011) "Generation capacity expansion in liberalized electricity markets: a stochastic MPEC approach" *IEEE Trans Power Syst*
- Working H (1953) "Futures trading and hedging". *Amer Econ Rev* 43:314–330
- Zeckhauser R (1970) "A case study of the tradeoff between risk spreading and appropriate incentives". *J Econ Theory* 2:10–26
- Zhaoguang H, Zheng H (2013) Electricity economics: production functions with electricity, Springer, Dordrecht