

CO₂-Emissionszertifikate – Preismodellierung und Derivatebewertung

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Wirtschaftswissenschaften

(Dr. rer. pol.)

von der Fakultät für
Wirtschaftswissenschaften
der Universität Karlsruhe (TH)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Wi.-Ing. Michael W. Wagner

Tag der mündlichen Prüfung: 13. Juli 2007

Referentin: Prof. Dr. Marliese Uhrig-Homburg

Korreferent: Prof. Dr. Christof Weinhardt

Karlsruhe 2007

Dissertation, genehmigt von der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der Universität Fridericiana zu Karlsruhe, 2007

Referentin: Prof. Dr. Marliese Uhrig-Homburg

Korreferent: Prof. Dr. Christof Weinhardt

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als externer Doktorand am Lehrstuhl für Financial Engineering und Derivate an der Universität Karlsruhe (TH). Ermöglicht hat mir dies die Firma McKinsey&Company, die mich freundlicherweise für die Dauer der Anfertigung dieser Arbeit freigestellt hat.

Mein besonderer Dank gilt meiner Doktormutter Frau Prof. Dr. Marliese Uhrig-Homburg für die Betreuung meiner Arbeit. Sie war eine sehr fordernde Doktormutter, immer mit neuen Anregungen, immer fair und jederzeit ansprechbar. Ohne sie hätte die Arbeit nicht die Qualität erreicht, in der sie nun vorliegt.

Herrn Prof. Dr. Christof Weinhardt danke ich für die Übernahme des Korreferats und sein Interesse an meiner Arbeit, ebenso wie dem Prüfer Herrn Prof. Dr. Oliver Stein und dem Prüfungsvorsitzenden Herrn Prof. Dr. Hariolf Grupp.

Ganz herzlich danke ich auch dem ganzen Lehrstuhl-Team, insbesondere Jan, Michael, Stefan, Thorsten, Yalin und Gudrun, die mir durch anregende Diskussionen und ihre Unterstützung das Gefühl gaben, am Lehrstuhl heimisch zu sein. Neben all den anderen, die mir bei der Umsetzung der Arbeit geholfen haben, möchte ich insbesondere Jens Wimschulte erwähnen, mit dem ich in ungezählten Stunden über die Themen der Arbeit diskutiert habe.

Zum Schluss danke ich an dieser Stelle aus tiefstem Herzen meiner Partnerin Diana Conrad, die mich die ganze Zeit über unterstützt und motiviert hat. Diese Arbeit ist ihr gewidmet.

München, im Juli 2007

Michael Wagner

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Rahmenbedingungen des Emissionshandels	5
2.1	Das Kyoto-Protokoll	5
2.1.1	Inhalt und Ziele	6
2.1.2	Stand der Umsetzung	9
2.2	Das EU Emissionshandelssystem (EU EHS)	10
2.2.1	Ziele	10
2.2.2	Institutioneller Rahmen	11
2.2.3	Stand der Umsetzung	16
2.3	Weitere Emissionshandelssysteme	18
2.3.1	Handelssysteme für Treibhausgase	18
2.3.2	US SO ₂ -Handelssystem	19
3	CO₂-Handel und Gestaltung von CO₂-Derivaten	23
3.1	Handel von CO ₂	23
3.1.1	Marktumfeld	24
3.1.2	Preisbildungsmechanismus	28
3.1.3	Einflussfaktoren auf CO ₂ -Preise	30
3.1.4	Vergleich von CO ₂ und anderen Gütern	34
3.2	Gestaltung von CO ₂ -Derivaten	37

3.2.1	Erfolgsfaktoren derivativer Instrumente	37
3.2.2	Bedürfnisse von Marktteilnehmern im EU EHS	41
3.2.2.1	Risiken im EU EHS	41
3.2.2.2	Ziele der Marktteilnehmer im EU EHS	43
3.2.3	Diskussion möglicher Ausgestaltungsoptionen von CO ₂ -Derivaten	44
3.3	Expertenbefragung zum Handel von CO ₂ und zur Gestaltung von CO ₂ -Derivaten	47
3.3.1	Methodik und Expertenauswahl	48
3.3.2	Inhalt des Fragebogens und Ergebnisse der Befragung	49
3.3.2.1	Relevanz der Einflussfaktoren auf CO ₂ -Preise	50
3.3.2.2	Bewertung möglicher Ausgestaltungsoptionen von CO ₂ -Derivaten	52
3.3.2.3	Bewertung der Erfolgchancen von CO ₂ -Derivaten	58
3.4	Fazit: CO ₂ -Handel und Gestaltung von CO ₂ -Derivaten	60
4	Modellierung von CO₂-Preisen	63
4.1	CO ₂ -Preismodellierung in der Literatur	64
4.2	Markteffizienz	67
4.2.1	Diskussion der Markteffizienz im EU EHS	68
4.2.2	Empirische Analyse zur Markteffizienz im EU EHS	69
4.3	Theoretisches CO ₂ -Preismodell	75
4.3.1	Modellbeschreibung	75
4.3.2	Ableitung des Spotpreisprozesses	80
4.3.2.1	Charakteristische Partialdifferentialgleichung	80
4.3.2.2	Analytische Lösung für Spezialfall	82
4.3.2.3	Numerische Lösung für allgemeinen Fall	86
4.3.3	Analyse des resultierenden Spotpreisprozesses	87

4.3.4	Modellerweiterung um Risikoaversion	91
4.3.5	Fazit: Theoretisches CO ₂ -Preismodell	93
4.4	Direkte CO ₂ -Preismodellierung	97
4.4.1	Datengrundlage	97
4.4.2	Stochastische Prozesse für direkte CO ₂ -Preismodellierung . . .	101
4.4.2.1	Geometrisch Brownsche Bewegung	102
4.4.2.2	Ornstein-Uhlenbeck	103
4.4.2.3	Prozess mit Preisobergrenze	103
4.4.2.4	Jump-Diffusion	104
4.4.2.5	Heston-GARCH	105
4.4.2.6	Regime-Switching	106
4.4.3	Kalibrierung und Diskussion der Prozesse für die 1. Handels- periode	107
4.4.4	Kalibrierung der Prozesse für die 2. Handelsperiode und Ver- gleich zur 1. Handelsperiode	114
4.4.5	Robustheitsanalyse	118
4.4.6	Out-of-Sample-Analyse	120
4.4.7	Fazit: Direkte CO ₂ -Preismodellierung	122
5	Bewertung von CO₂-Derivaten	123
5.1	CO ₂ -Derivatebewertung in der Literatur	123
5.2	Bewertung von linearen CO ₂ -Derivaten	125
5.2.1	Zusammenhang von Spot- und Terminmarkt	126
5.2.2	Datengrundlage	128
5.2.3	Empirischer Test des Cost-of-Carry-Zusammenhangs	131
5.2.4	Preisführerschaft Spot- versus Terminmarkt	140
5.2.5	Fazit: Bewertung von linearen CO ₂ -Derivaten	146
5.3	Bewertung von nichtlinearen CO ₂ -Derivaten	147

5.3.1	Risikoneutrale Bewertung	148
5.3.2	Überführung der Prozesse ins risikoneutrale Maß	149
5.3.3	Bewertung am Beispiel von europäischen Kaufoptionen	152
5.3.4	Modellrisiko bei der Bewertung	156
5.3.4.1	Definition des Modellrisikos	156
5.3.4.2	Analyse des Modellrisikos	158
5.3.4.3	Strategien zur Verringerung des Modellrisikos	160
5.3.5	Fazit: Bewertung von nichtlinearen CO ₂ -Derivaten	161
6	Zusammenfassung und Ausblick	163
A	Emissionsziele im Kyoto-Protokoll	167
B	Berechnungen zum CO₂-Preismodell	169
B.1	Herleitung von $G(t)$	169
B.2	Lösung der charakteristischen Partialdifferentialgleichung	171
B.3	Volatilität von $S(t, x_t)$ in Abhängigkeit von $G(t)$	172
C	Interviewleitfaden	175
	Literaturverzeichnis	187

Abbildungsverzeichnis

3.1	Handelsvolumina an europäischen CO ₂ -Börsen	27
3.2	Preisbildung von Emissionszertifikaten am Beispiel von zwei Unternehmen	28
3.3	Preise von EU Allowances (EUAs) an der EEX	30
3.4	EUA-Preise, Strompreise und Fuel-Spreads	34
4.1	Zeitreihen für Autokorrelationsanalyse zur Markteffizienz	71
4.2	Spotpreise $S(t, x_t)$ im theoretischen CO ₂ -Preismodell – risikoneutraler Spezialfall	83
4.3	Spotpreise $S(t, x_t)$ im theoretischen CO ₂ -Preismodell – risikoneutraler allgemeiner Fall	88
4.4	Lokale Volatilität σ_S im theoretischen CO ₂ -Preismodell – risikoneutraler Spezialfall	90
4.5	Spotpreise $S(t, x_t)$ im theoretischen CO ₂ -Preismodell – risikoaverser Fall	94
4.6	Lokale Volatilität σ_S im theoretischen CO ₂ -Preismodell – risikoaverser Fall	94
4.7	EUA-Preise und synthetische Spotpreise 2008	99
4.8	EUA-Renditen	100
4.9	Empirische Dichte logarithmischer EUA-Renditen versus Normalverteilung	100
4.10	Volatilitätsstruktur GBB versus MRBV-Prozess für EUA-Preise . . .	110

4.11	Geschätzte Volatilität für EUA-Preise gemäß dem HG-Prozess	112
5.1	Theoretischer Terminpreis 2006 versus beobachteter Futurespreis . . .	129
5.2	Theoretischer Terminpreis 2008 versus beobachteter Futurespreis . . .	129
5.3	Implizite Rendite aus EUA und Future 2006 versus beobachteter Zinssatz	130
5.4	Implizite Rendite aus Future 2006 und Future 2007 versus beobachteter Zinssatz	130
5.5	Beispiel für bedingte Wahrscheinlichkeitsdichten unter dem risikoneutralen Maß für die 2. Handelsperiode	153
B.1	Lokale Volatilität σ_S in Abhängigkeit vom Prozess der Emissionsrate	173

Tabellenverzeichnis

2.1	Treibhausgase nach Anhang A des Kyoto-Protokolls	6
2.2	Allokation und tatsächliche CO ₂ -Emissionen im EU EHS.	12
2.3	Vergleich US SO ₂ -Handelssystem mit dem EU EHS.	21
3.1	Europäische Börsen für EUAs und gehandelte EUA-Derivate	26
3.2	Detaillierung Interviewpartner für Expertenbefragung	49
3.3	Bedeutsamkeit preistreibender Faktoren für das CO ₂ -Preisrisiko im EU EHS	51
3.4	Bewertung Ausgestaltungsmerkmale von CO ₂ -Derivaten im EU EHS .	53
3.5	Bewertung exemplarischer CO ₂ -Derivate im EU EHS	58
3.6	Optionen auf EUA-Futures an der ICE/ECX	62
4.1	Deskriptive Statistiken für logarithmierte Preise und Renditen für EUAs, EUA-Futures 2006, SO ₂ und den DAX	72
4.2	Autokorrelationen in EUA-Preisen (Powernext)	72
4.3	Autokorrelationen in EUA-Futurespreisen (ICE/ECX)	73
4.4	Autokorrelationen in SO ₂ -Preisen (Platts)	73
4.5	Autokorrelationen in DAX-Kursen (XETRA)	74
4.6	Parameterwerte für die Darstellung der analytischen Lösung von $S(t, x_t)$ im theoretischen CO ₂ -Preismodell	84
4.7	Sensitivität des Spotpreises $S(0, x_0)$ im theoretischen CO ₂ -Preismodell	89
4.8	Sensitivität der lokalen Volatilität σ_S für $t = 0$ im theoretischen CO ₂ - Preismodell	92

4.9	Einheitswurzeltests für EUA-Preise und synthetische Spotpreise 2008	102
4.10	Parameterschätzer aus empirischer Kalibrierung – 1. Handelsperiode	108
4.11	Statistiken zur Anpassungsgüte stochastischer Prozesse – 1. Handelsperiode	113
4.12	Parameterschätzer aus empirischer Kalibrierung – 2. Handelsperiode	116
4.13	Statistiken zur Anpassungsgüte stochastischer Prozesse – 2. Handelsperiode	117
4.14	Robustheitsanalyse für Kalibrierung – 2. Handelsperiode	119
4.15	Analyse der Vorhersagekraft – 2. Handelsperiode	121
5.1	Beschreibung der Zeitreihen für die Tests des Zusammenhangs von Spot- und Terminmarkt	133
5.2	Einheitswurzeltests für Gleichgewichtsfehler Spot- versus Terminpreis – Zeitraum 06/2005 - 11/2006	134
5.3	Einheitswurzeltests für Gleichgewichtsfehler Spot- versus Terminpreis – Zeitraum 12/2005 - 11/2006	135
5.4	Kurzfristige Dynamik Spot- versus Terminpreis ohne Korrektur um Heteroskedastizität und Autokorrelation	138
5.5	Um Heteroskedastizität und Autokorrelation bereinigte t -Statistiken für kurzfristige Dynamik Spot- versus Terminpreis	139
5.6	Schätzergebnisse für vektorielles Fehlerkorrekturmodell mit 5 Zeitdifferenzen	143
5.7	Schätzergebnisse für vektorielles Fehlerkorrekturmodell mit 20 Zeitdifferenzen	144
5.8	Theoretische Preise für europäische Kaufoptionen – 2. Handelsperiode	155
5.9	Modellrisiko für europäische Kaufoption – mit/ohne Cap	159
A.1	Emissionsziele und Emissionsvolumina im Kyoto-Protokoll	167
B.1	$G(t)$ entsprechend verschiedener Prozesse für die Emissionsrate y_t	170

Abkürzungsverzeichnis

AAU	Assigned Amount Unit
ADF	Augmented Dickey-Fuller
AIK	Akaike Informationskriterium
Anhang-I-Land ..	Land, das im Anhang I der Klimarahmenkonvention UNFCCC als Industrie- oder Transformationsland aufgeführt ist (bis auf die zusätzliche Türkei und Weißrussland deckungsgleich mit Ländern aus Anhang B des Kyoto-Protokolls)
ARIMA	Autoregressive Integrated Moving Average
BIK	Bayessches Informationskriterium
CCX	Chicago Climate Exchange
CDM	Clean Development Mechanism
CER	Certified Emission Reduction
CFW	Common Factor Weight
CITL	Community Independent Transaction Log
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DAX	Deutscher Aktienindex
DF	Dickey-Fuller
ECX	European Climate Exchange
EEX	European Energy Exchange
EFET	European Federation of Energy Traders
EHS	Emissionshandelssystem
ERU	Emission Reduction Unit
EU	Europäische Union
EUA	EU Allowance
EURIBOR	Euro Interbank Offered Rate
EXAA	Energy Exchange Austria

GARCH	Generalized Autoregressive Conditional Heteroscedasticity
GBB	Geometrisch Brownsche Bewegung
GVK	Grenzvermeidungskosten
GVKK	Grenzvermeidungskostenkurve
HG	Heston-GARCH
ICE	ICE Futures Exchange (Tochterfirma der Intercontinental Exchange)
IEH	Internationaler Emissionsrechtehandel
IETA	International Emissions Trading Association
ISDA	International Swap Dealers Association
JD	Jump-Diffusion
JI	Joint Implementation
KS	Kolmogorov-Smirnov
LB	Ljung-Box
LLW	Log-Likelihood-Wert
LQG	Linear-Quadratic-Gaussian
MAE	Mean Absolute Error
MAPE	Mean Absolute Percentage Error
ME	Mean Error
MRBV	Mean-Reversion mit begrenzter Volatilität
MWh	Megawattstunde
NAP	Nationaler Allokationsplan
Nord Pool	Nordic Power Exchange
OTC	Over-the-Counter
OU	Ornstein-Uhlenbeck
PDG	Partialdifferentialgleichung
PP	Phillips-Perron
RMU	Removal Unit
RS	Regime-Switching
SO ₂	Schwefeldioxid
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
VECM	Vector Error Correction Model

Symbolverzeichnis

Nur abschnittsübergreifend verwendete Symbole sind hier berücksichtigt.

c	Kostenkoeffizient der Vermeidung in theoretischem CO ₂ -Preismodell
δ	Volatilität der Sprunghöhe für JD-Prozess
dt	Zeitinkrement
dW_t	Inkrement eines Wiener-Prozesses
ε_t	Standardnormalverteilte Innovationen des HG- und JD-Prozesses
$F_t(T)$	Terminpreis für zukünftigen Zeitpunkt T zum heutigen Zeitpunkt t . Je nach Kontext bezieht sich $F_t(T)$ auf den Preis von Forward- oder Futureskontrakten
$G(t)$	Volatilität des nicht kontrollierten Teils des Prozesses x_t in theoretischem CO ₂ -Preismodell
γ	Parameter für HG-Prozess
h_t	Im Zeitablauf variable Varianz des HG-Prozesses
κ	Geschwindigkeit der Mean-Reversion
λ	Intensität des Poisson-Prozesses für JD-Prozess
$\hat{\lambda}$	Parameter für HG-Prozess (bestimmt die Risikoprämie)
μ	Driftparameter
μ_2	Mittel der Sprunghöhe für JD-Prozess
$\hat{\mu}_{R_t}$	Driftparameter für RS-Prozess
N_t	Poisson-Prozess mit Intensität λ
p	Strafzahlung für jedes zu wenig eingereichte Emissionszertifikat in theoretischem CO ₂ -Preismodell

π_1, π_2	Durchschnittliche Aufenthaltsdauer in den Regimes des RS-Prozesses
r	Risikoloser Zinssatz
R_t	Bezeichnung des aktuellen Regimes des RS-Prozesses zum Zeitpunkt t
s_t	Logarithmierter Spotpreis zum Zeitpunkt t
s_t^F	Logarithmierter Futurespreis zum Zeitpunkt t (Fälligkeitsdatum entsprechend Kontext)
s_t^{TF}	Logarithmierter theoretischer Terminpreis zum Zeitpunkt t (Fälligkeitsdatum entsprechend Kontext)
S_t	Spotpreis zum Zeitpunkt t
$S(t, x_t)$	Spotpreis in theoretischem CO ₂ -Preismodell
σ	Volatilitätsparameter
σ_S	Lokale Volatilität des resultierenden Spotpreisprozesses in theoretischem CO ₂ -Preismodell
σ_{R_t}	Volatilitätsparameter für RS-Prozess
θ	Langfristige Volatilität des HG-Prozesses
u_t	Optimale Emissionsrate in theoretischem CO ₂ -Preismodell
$V(t, x_t)$	Wert einer optimalen Vermeidungspolitik $\{u_\tau\}_{\tau \in [t, T]}$ gegeben x_t in theoretischem CO ₂ -Preismodell
x_t	Insgesamt erwartete Emissionen in theoretischem CO ₂ -Preismodell
y_t	Business-as-usual-Emissionsrate in theoretischem CO ₂ -Preismodell
Y_t	Sprunghöhe für JD-Prozess

Kapitel 1

Einleitung

Unter Wissenschaftlern besteht kaum noch Zweifel daran, dass die Menschheit durch ihren Ausstoß von Treibhausgasen zur globalen Klimaerwärmung beiträgt.¹ Ein großer Teil der internationalen Staatengemeinschaft hat sich als Beitrag zur Lösung dieses Problems gemeinsam auf verbindliche Ziele zur Reduktion von Treibhausgasemissionen festgelegt. Zur wirtschaftlich effizienten Umsetzung dieser Ziele hat die EU staatenübergreifend ein Emissionshandelssystem für Kohlenstoffdioxid eingeführt. Kohlenstoffdioxid (CO₂) ist das für den Klimawandel bedeutendste von Menschen freigesetzte Treibhausgas.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem im Jahr 2005 europaweit gestarteten Emissionshandelssystem für CO₂ im Hinblick auf seine Besonderheiten als zusätzlicher Markt in der Welt der Finanz- und Commoditymärkte. Mit dem europäischen Emissionshandelssystem (EU EHS) wurde ein neues Gut, das so genannte CO₂-Emissionszertifikat, geschaffen. Dieses Emissionszertifikat ist frei handelbar und berechtigt den Inhaber zum Ausstoß einer Tonne CO₂.

Die mit Emissionsobergrenzen belegten Unternehmen müssen zukünftig für ihren bei der Produktion entstehenden CO₂-Ausstoß genügend Emissionszertifikate bei den zuständigen Überwachungsbehörden einreichen. Damit stellt sich ihnen CO₂ als ein zusätzlicher Produktionsfaktor dar, dessen Preis mit Unsicherheit behaftet ist. Sowohl in der Finanz- als auch in der Produktionsplanung muss daher der Preis dieser Emissionszertifikate als eine unsichere Größe berücksichtigt werden. Derivative Finanzinstrumente können beim Management der damit verbundenen Risiken helfen.

¹Vgl. Intergovernmental Panel on Climate Change (2007).

Für den Einsatz von derivativen Instrumenten, die sich auf CO₂-Emissionszertifikate als Basiswert (Underlying) beziehen, ist ein umfassendes Verständnis der Preisdynamiken im EU EHS allerdings essenziell.

Die Teilnahme an einem Emissionshandelssystem stellt für viele Marktteilnehmer, wie z. B. Stahl-, Papier- oder Zementproduzenten, eine grundsätzlich neue Situation dar. Große Stromproduzenten haben häufig ein besseres Verständnis der Zusammenhänge und Besonderheiten von CO₂-Emissionen und den damit verbundenen Energie- und Rohstoffmärkten. Allerdings verfügen auch sie auf Grund der noch nicht lange zurückliegenden Liberalisierung der Strommärkte nur über wenige Jahre an Erfahrung mit der Preismodellierung und der Bewertung von derivativen Instrumenten in neuen Märkten.

Für typische Finanzmarktteilnehmer, wie z. B. Banken, Versicherungen oder Hedgefonds, bietet das EU EHS neue Investitions- und Handelsmöglichkeiten, die für Diversifikations-, Arbitrage- oder Spekulationszwecke genutzt werden können. Sie haben in der Regel ein gutes Verständnis von theoretischen Bewertungskonzepten für derivative Finanzinstrumente. Ein fundamentales Verständnis der preistreibenden Faktoren und spezifischen Besonderheiten von Märkten für Strom, Energieträger oder CO₂ fehlt ihnen naturgemäß vielfach.

Zwar gab es schon früher vereinzelte Beispiele von Emissionshandelssystemen, in der Ausprägung und Größe als staatenübergreifendes System ist das EU EHS allerdings einzigartig. Im Vergleich zu vielen anderen Finanz- und Commoditymärkten weist es die Besonderheit auf, dass die insgesamt vorhandene Menge an Emissionszertifikaten nicht auf Grund einer Nachfrage im Markt, sondern vor allem durch umweltpolitische Gründe bestimmt wird. Die Teilnahme von Unternehmen am Handelssystem wird nicht zuletzt dadurch erreicht, dass Unternehmen hohe Strafzahlungen leisten müssen, wenn sie nicht genügend Emissionszertifikate aufweisen können. Vor dem Hintergrund dieser Rahmenbedingungen stellen sich viele auf anderen Finanz- und Commoditymärkten bereits eingehend analysierte Fragen von neuem:

- Wodurch wird der Preis von Emissionszertifikaten beeinflusst?
- Sind die Voraussetzungen dafür erfüllt, dass derivative Instrumente auf Emissionszertifikate langfristig erfolgreich sein können? Wie sollten diese derivativen Instrumente aussehen?

- Wie können die Preise von Emissionszertifikaten modelliert werden?
- Wie hängen Spot-² und Terminmärkte im EU EHS zusammen?
- Wie können derivative Instrumente auf Emissionszertifikate bewertet werden und welche Bedeutung hat dies für das Hedging von Risiken, die mit Emissionszertifikaten verbunden sind?

Ein Antwort auf diese Fragen ist für alle Personen oder Unternehmen notwendig, die sich aktiv am Handel von CO₂-Emissionszertifikaten oder deren Derivaten beteiligen. Darüber hinaus sind diese Antworten auch für den Gesetzgeber bzw. Regulator selbst von Interesse, da sie Aufschluss darüber geben, welche Auswirkungen die regulatorischen Rahmenbedingungen auf das Preisverhalten von Emissionszertifikaten haben können. Die vorliegende Arbeit soll als Grundlagenforschung verstanden werden, die sich diesen Fragestellungen widmet. Da der Markt in einem sehr frühen Stadium ist, gibt es noch wenige Arbeiten mit der hier eingenommenen Finanzmarktsicht. Daher wird zur Beantwortung der oben aufgeführten Fragestellungen neben theoretischen Überlegungen und empirischen Analysen auch das Mittel der Expertenbefragung genutzt. Die empirischen Analysen der Arbeit beziehen sich auf den Stand von Ende 2006.

Die weitere Arbeit ist wie folgt aufgebaut: Das nächste Kapitel gibt einen Überblick über die institutionellen Rahmenbedingungen des Emissionshandels. Kapitel 3 diskutiert zunächst das Marktumfeld und wichtige Einflussfaktoren für die Preisbildung beim Handel von CO₂-Emissionszertifikaten. Danach werden mögliche derivative Instrumente diskutiert und die Ergebnisse der Expertenbefragung hierzu vorgestellt. Kapitel 4 widmet sich der Modellierung von Preisprozessen für Emissionszertifikate, sowohl aus theoretischer als auch aus empirischer Sicht. Kapitel 5 zeigt schließlich, wie derivative Instrumente im EU EHS bewertet werden können und welche Auswirkungen das damit verbundene Modellrisiko haben kann. Das letzte Kapitel fasst die Ergebnisse der Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf zukünftige Forschungsfragen.

²Die Begriffe Spotpreis, Spothandel und Spotmarkt werden in dieser Arbeit synonym für Kassapreis, Kassahandel und Kassamarkt verwendet.

Kapitel 2

Rahmenbedingungen des Emissionshandels

In diesem Kapitel wird zunächst das Kyoto-Protokoll vorgestellt. Es bildet die Grundlage für das anschließend beschriebene europäische Emissionshandelssystem, welches den zentralen Rahmen für diese Arbeit vorgibt. Der letzte Teil des Kapitels vergleicht das europäische Emissionshandelssystem mit weiteren Emissionshandelssystemen hinsichtlich Gestaltung und Volumen.

2.1 Das Kyoto-Protokoll

Seit 1994 ist die UN-Klimarahmenkonvention (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) völkerrechtlich bindend.¹ Im Anhang I dieser Konvention sind die Industrie- und Transformationsländer aufgelistet, die sich verpflichten, Maßnahmen zur Abschwächung des Klimawandels zu ergreifen. Sie werden daher oft auch als Anhang-I-Länder bezeichnet. Basierend auf dieser Konvention wurde 1997 das Kyoto-Protokoll zur UNFCCC von der Gemeinschaft der Industrie- und Transformationsländer verabschiedet.²

¹Zum Inhalt der UNFCCC siehe United Nations (1992).

²Vgl. Betz, Rogge und Schleich (2005), S. 9f., bzw. United Nations (1998). Detaillierte Informationen zur UNFCCC und zum Kyoto-Protokoll finden sich auch auf der Internetseite der UNFCCC (<http://unfccc.int>).

2.1.1 Inhalt und Ziele

Das Hauptziel des Kyoto-Protokolls ist es, auf globaler Ebene die von Menschen verursachten Treibhausgasemissionen zu reduzieren. In Anhang B des Protokolls sind dazu länderspezifische Obergrenzen für den Ausstoß von Treibhausgasen festgelegt, die für den Zeitraum von 2008 bis 2012 gelten. Für spätere Zeiträume waren bis Ende des Jahres 2006 noch keine Obergrenzen festgelegt worden. Gemessen am Stand von 1990 sieht das Kyoto-Protokoll eine Reduzierung des jährlichen Ausstoßes an Treibhausgasen in den beteiligten Ländern um durchschnittlich ca. 5,2 Prozent, in Europa um 8 Prozent vor. Für Entwicklungsländer existieren keine Grenzen. Die bewilligten Emissionen werden dabei insgesamt als Assigned Amount, einzelne Emissionsrechte als Assigned Amount Units (AAUs) bezeichnet. Einen Überblick über die länderspezifischen Obergrenzen gibt Tabelle A.1 im Anhang der vorliegenden Arbeit. Zusätzlich zu den prozentualen Obergrenzen sind dort auch tatsächliche Emissionsvolumina der Jahre 1990 und 2004 angegeben.

In Anhang A des Kyoto-Protokolls werden die für die Emissionsgrenzen relevanten Treibhausgase genannt. Die Emissionsgrenzen des Kyoto-Protokolls beziehen sich immer auf CO₂-Äquivalente. Mit Hilfe des so genannten Erwärmungspotenzials kann errechnet werden, wievielen Tonnen CO₂ eine Tonne eines bestimmten Treibhausgases entspricht. Ein Treibhausgas mit einem hohen Erwärmungspotenzial trägt stärker zur Klimaerwärmung bei. Tabelle 2.1 zeigt die für das Protokoll relevanten Treibhausgase zusammen mit ihrem Erwärmungspotenzial.

Tabelle 2.1: Treibhausgase nach Anhang A des Kyoto-Protokolls.

Treibhausgas	Erwärmungspotenzial
Kohlenstoffdioxid (CO ₂)	1
Methan (CH ₄)	21
Distickstoffoxid (N ₂ O)	310
Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW)	140 - 11.700
Perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW)	6.500 - 9.200
Schwefelhexafluorid (SF ₆)	23.900

Das Erwärmungspotenzial entspricht dem Faktor zur Umrechnung der Treibhausgase in CO₂-Äquivalente. Quelle: Betz, Rogge und Schleich (2005), S. 97.

Umwelt- und Wirtschaftsexperten gehen mittlerweile davon aus, dass Emissionsziele gesamtwirtschaftlich am günstigsten durch ein System handelbarer Emissionszertifikate erreicht werden können.³ In einem solchen System werden den Teilnehmern Emissionszertifikate zugeteilt, die zum Ausstoß einer festgelegten Menge an Emissionen berechtigen. Diese Emissionszertifikate können an andere Teilnehmer weiterverkauft werden. Damit soll erreicht werden, dass Unternehmen mit günstigen Vermeidungsmöglichkeiten mehr vermeiden, als sie dies entsprechend ihrer Zuteilung tun müssten. Die überschüssigen Zertifikate verkaufen sie an Teilnehmer, für die die Vermeidung relativ gesehen teurer wäre. Vermeidung findet dadurch immer dort statt, wo sie am wenigsten kostet.⁴

Im Vergleich zur traditionelleren Methode, feste Emissionsobergrenzen je Teilnehmer unverrückbar festzulegen, ergibt sich ein weiterer Vorteil von Handelssystemen: Die gesamtwirtschaftlichen Vermeidungskosten hängen in einem funktionierenden Markt nicht von der Anfangsallokation der Emissionszertifikate ab, da der Handel auch nachträglich noch für deren optimale Verteilung sorgt. Der Aufwand für die Bestimmung der gesamtwirtschaftlich optimalen Anfangsallokation ist somit deutlich geringer.⁵

Im Hinblick auf die Vorteile solcher Emissionshandelssysteme benennt das Kyoto-Protokoll drei so genannte flexible Mechanismen zur Unterstützung bei der Erreichung der Emissionsziele.⁶

- **Joint Implementation (JI):** Ein Anhang-I-Land oder ein Unternehmen aus einem Anhang-I-Land beteiligt sich an der Finanzierung eines emissionssparenden Projektes in einem anderen Anhang-I-Land. Die Emissionseinsparungen können dem Investorland bzw. dem Unternehmen als so genannte Emission Reduction Units (ERUs) anteilig gutgeschrieben werden. Die ERUs können

³Vgl. z. B. Springer (2003), S. 528f., Tietenberg (2003), S. 350f., oder Voss (2003), S. 27ff. Ein formaler Beweis findet sich z. B. in Montgomery (1972).

⁴Für eine detailliertere Erklärung des Preisbildungsmechanismus von Emissionszertifikaten vgl. Abschnitt 3.1.2.

⁵Auf Grund von Marktunvollkommenheiten, wie etwa Marktmacht oder Transaktionskosten, kann die Anfangsallokation dennoch Einfluss auf die Kosteneffizienz haben. Vgl. hierzu z. B. Tietenberg (2006), S. 139, und Böhringer und Lange (2005). Einen ausführlichen Überblick über die Entwicklung sowie über Vor- und Nachteile von umweltökonomischen Steuerungsinstrumenten bieten Cropper und Oates (1992).

⁶Vgl. Betz, Rogge und Schleich (2005), S. 15f.

zur Erfüllung von Emissionsverpflichtungen oder zum Weiterverkauf verwendet werden. Die Generierung von ERUs ist ab dem Jahr 2008 möglich.

- **Clean Development Mechanism (CDM):** JI und CDM funktionieren ähnlich, allerdings investiert beim CDM ein Anhang-I-Land oder ein Unternehmen aus einem Anhang-I-Land in ein emissionssparendes Projekt in einem Entwicklungsland (oft auch als Nicht-Anhang-I-Land bezeichnet). Die Emissionsersparungen können als so genannte Certified Emission Reductions (CERs) gutgeschrieben werden und ebenfalls eingelöst oder weiterverkauft werden. Die Generierung von CERs ist prinzipiell rückwirkend ab dem Jahr 2000 möglich.
- **Internationaler Emissionsrechtehandel (IEH):** Nicht genutzte AAUs von Ländern, die am Kyoto-Protokoll teilnehmen, können an andere Länder verkauft werden. Dieser Ansatz wurde von der EU mit dem EU Emissionshandelssystem auf Unternehmensebene übertragen.

Zusätzlich ist in beschränktem Maße auch die Anrechnung von so genannten Senkenprojekten möglich, worunter die Bindung von CO₂ in Vegetation und Böden verstanden wird.⁷ Gutschriften aus solchen Projekten werden als Removal Units (RMUs) bezeichnet.

Die zur nationalen Umsetzung über diese Maßnahmen hinaus notwendigen umweltpolitischen Instrumente bleiben in der Verantwortung der jeweiligen Länder. Um zu verhindern, dass ein Land zu viele Emissionszertifikate verkauft und dadurch in die Gefahr der Unterdeckung kommt, darf eine festgelegte Schwelle, die so genannte Commitment Period Reserve, nicht unterschritten werden. Diese Reserve liegt entweder bei 90 Prozent der zugewiesenen Menge der Kyoto-Periode von 2008 - 2012 oder bei der fünffachen Emissionsmenge des letzten Jahres, je nachdem welche Menge niedriger ist.⁸

⁷Vgl. Betz, Rogge und Schleich (2005), S. 30f. Ein Hauptgrund für die Beschränkung solcher Projekte besteht in der sehr hohen Unsicherheit bezüglich der Quantifizierung der Effekte. So ist etwa das CO₂-Absorptionsverhalten von Wäldern noch längst nicht geklärt. Eine Diskussion des Zusammenspiels von herkömmlichen Vermeidungsmaßnahmen und Senkenprojekten findet sich z. B. in van 't Veld und Plantinga (2005).

⁸Vgl. Springer (2003), S. 543ff.

2.1.2 Stand der Umsetzung

Das Kyoto-Protokoll war das Ergebnis eines zweieinhalb Jahre andauernden Prozesses mit schwierigen Verhandlungen und Änderungen in letzter Minute.⁹ Nach der Verabschiedung im japanischen Kyoto 1997 war es notwendig, dass mindestens 55 Prozent der Vertragsstaaten der UNFCCC das Protokoll ratifizieren. Zusätzlich mussten genügend Anhang-I-Länder das Kyoto-Protokoll ratifizieren, um zumindest 55 Prozent des Treibhausgasausstoßes der Anhang-I-Länder abzudecken. Im Jahr 2001 kündigten die USA allerdings an, das Kyoto-Protokoll nicht zu unterzeichnen. Da die USA als weltgrößter CO₂-Produzent allein für ca. ein Drittel der Emissionen der Anhang-I-Länder verantwortlich sind, war es erforderlich, dass Russland das Protokoll unterzeichnet, um diese Quote zu erfüllen. Mit der Ratifizierung des Protokolls durch Russland Ende 2004 waren die Bedingungen erfüllt und das Kyoto-Protokoll trat am 16. Februar 2005 in Kraft.¹⁰ Laut offizieller Begründung verweigerten die USA die Ratifizierung des Kyoto-Protokolls, da China die Unterzeichnung des Abkommens ebenfalls verweigert. Eine häufig zitierte Vermutung für die Verweigerungshaltung ist allerdings, dass die USA negative wirtschaftliche Konsequenzen fürchten, da China in den kommenden Jahren um den Status als größte Wirtschaftsmacht konkurrieren wird.¹¹

Trotz der Verweigerungshaltung der USA ist mittlerweile weltweit ein reger Handel mit Emissionsgutschriften entstanden. In 2005 wurden Gutschriften aus CDM-/JI-Projekten für ca. 425 Millionen Tonnen CO₂ gehandelt, für 2006 wurde ein vergleichbares Volumen vorausgesagt.¹² Ohne die Berücksichtigung der USA lagen im Jahr 2004 auf aggregierter Ebene die Treibhausgasemissionen bereits unterhalb der Ziele des Kyoto-Protokolls.¹³ Dies liegt vor allem daran, dass einige Anhang-I-Länder in den 1990er Jahren einen Zusammenbruch ihrer Wirtschaft und damit auch einen Einbruch der Treibhausgasemissionen erlebten. Die Vorhersagen gehen daher davon aus, dass während der Kyoto-Periode 2008 - 2012 die EU-15-Länder, Japan und Kanada Nettonachfrager und die Ukraine, Osteuropa und Russland Nettoanbieter von Emissionsrechten sind.¹⁴ Unklar ist allerdings, inwieweit Russland als größter

⁹Vgl. Estrada-Oyuela (2000), S. 247.

¹⁰Vgl. Irle (2005), S. 45.

¹¹Vgl. Irle (2005), S. 51.

¹²Vgl. Røine et al. (2006), S. 30. Das Volumen bezieht sich auf Spot- und Terminmärkte.

¹³Vgl. Tabelle A.1.

¹⁴Vgl. Hasselknippe und Røine (2006), S. 8.

potenzieller Nettoanbieter von Emissionsrechten auf dem internationalen Markt auftreten wird. Durch ein Zurückhalten von überschüssigen Emissionsrechten könnte Russland die Preise künstlich hochhalten.

Verhandlungen über die Zeit nach 2012 haben zwar begonnen, sind aber noch in einem sehr frühen Stadium und noch weit von bindenden Abkommen entfernt.¹⁵ Trotzdem sind auf dem globalen Markt bereits erste Transaktionen für Emissionsgutschriften über das Jahr 2012 hinaus getätigt worden.¹⁶

2.2 Das EU Emissionshandelssystem (EU EHS)

Das EU Emissionshandelssystem (EU EHS) basiert auf den Vorgaben des Kyoto-Protokolls. Die rechtliche Grundlage des EU EHS ist die EU-Richtlinie 2003/87/EC, die von allen Mitgliedsstaaten in eine nationale Gesetzgebung überführt werden musste.¹⁷ Nachfolgend werden die Ziele und der institutionelle Rahmen des EU EHS vorgestellt, soweit sie für das weitere Verständnis im Laufe der Arbeit notwendig sind.

2.2.1 Ziele

Die Europäische Union hat das EU-weite Emissionshandelssystem eingeführt, um die Kyoto-Ziele gemeinsam und kosteneffizient umzusetzen. Das Hauptziel ist es, die zur Erreichung der Kyoto-Ziele erforderlichen Treibhausgasreduktionen von den Unternehmen durchführen zu lassen, für die dies am günstigsten ist. Dabei wurden zunächst die vom Kyoto-Protokoll für den europäischen Raum vorgegebenen Ziele im Rahmen des so genannten Burden-Sharing-Abkommens neu auf die einzelnen EU-Länder verteilt, um der unterschiedlichen Leistungsfähigkeit und den wirtschaftlichen Entwicklungen in den Ländern gerecht zu werden. Deutschland muss an Stelle der im Kyoto-Protokoll geforderten 8 Prozent gemäß diesem Abkommen seine Emissionen um 21 Prozent gegenüber dem Emissionsvolumen des Jahres 1990

¹⁵Vgl. Dawson (2006b), S. 5.

¹⁶Vgl. Capoor und Ambrosi (2006), S. 35.

¹⁷Vgl. European Union (2003). In Deutschland führte dies zum so genannten Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz, welches am 15. Juli 2004 in Kraft getreten ist. Ausführliche Informationen zur EU-Richtlinie 2003/87/EC sind in Betz, Rogge und Schleich (2005) oder auch im Internet unter „<http://ec.europa.eu/environment/climat/emission.htm>“ zu finden.

reduzieren. Einige andere Länder, wie z. B. Spanien und Portugal, dürfen dagegen mehr emittieren als im Jahr 1990. Die Ziele beziehen sich jeweils auf das gesamte Emissionsvolumen der Länder, das EU EHS umfasst jedoch nur einen Teil des Emissionsvolumens.¹⁸

Die EU-Richtlinie 2003/87/EC zum EU EHS betrifft Unternehmen mit Anlagen aus den Sektoren Energieerzeugung, Raffinerieprozesse, Kokereien, Stahl-, Zement-, Glas-, Keramik-, Zellstoff- und Papierindustrie. Zum Teil fallen diese Anlagen erst ab einer bestimmten Mindestgröße unter die EU-Richtlinie.¹⁹ Eine zukünftige Ausweitung des Handelssystems auf weitere Sektoren ist möglich. So gibt es z. B. erste Pläne der EU zur Einbeziehung der Luftfahrt in das EU EHS.²⁰ Das EU EHS berücksichtigt zunächst nur das Treibhausgas CO₂. Ab 2008 können weitere Treibhausgase hinzugekommen werden, falls die Emissionen mit hinreichender Genauigkeit bestimmt werden können. Das Handelssystem wurde noch von den EU-15-Ländern beschlossen, ist allerdings auch für die seitdem neu hinzugekommenen Mitgliedsstaaten bindend.

Tabelle 2.2 zeigt das tatsächliche Emissionsvolumen der vom EU EHS betroffenen Industrien in den einzelnen Ländern im Jahr 2005 im Vergleich zur Anfangsallokation für das Jahr 2005. Anscheinend sind die am EU EHS teilnehmenden Industrien mit Emissionszertifikaten eher zu großzügig ausgestattet worden. Mit ca. 55 Prozent der zugeteilten Zertifikate ist die Energieerzeugung der mit Abstand größte Sektor des EU EHS.²¹ Gleichzeitig ist der Energiesektor der einzige Sektor, der vom Regulator nicht mit genügend Zertifikaten zur Deckung seiner Emissionen ausgestattet wurde und dementsprechend auf dem Markt als Nettonachfrager auftritt.²²

2.2.2 Institutioneller Rahmen

Prinzipiell handelt es sich beim EU EHS um ein so genanntes Cap-and-Trade-System. Vom Regulator werden Emissionsobergrenzen je Unternehmen festgelegt und entsprechend Emissionszertifikate an die Unternehmen verteilt. Prinzipiell kann

¹⁸Vgl. European Union (2006a) zu den länderspezifischen Zielen gemäß dem Burden-Sharing-Abkommen.

¹⁹Vgl. European Union (2003), Anhang I.

²⁰Vgl. Heymann (2007). Eine Analyse möglicher Ineffizienzen des Systems auf Grund der Tatsache, dass nicht alle Sektoren vom Handel erfasst sind, findet sich z. B. in Böhringer, Hoffmann und Manrique-de-Lara-Peñate (2006).

²¹Vgl. Hasselknippe und Røine (2006), S. 10, und Dufour (2006).

²²Vgl. Ellerman und Buchner (2006).

Tabelle 2.2: Allokation und tatsächliche CO₂-Emissionen im EU EHS.

Land	Allokation EU EHS	CO ₂ -Emissionen EU EHS
	Mio. t CO ₂ in 2005*	Mio. t CO ₂ in 2005
Belgien	58,3	55,4
Dänemark	37,3	26,5
Deutschland	495,0	474,0
Estland	16,7	12,6
Finnland	44,7	33,1
Frankreich	150,4	131,3
Griechenland	71,1	71,3
Großbritannien	206,0	242,5
Irland	19,2	22,4
Italien	215,8	225,3
Lettland	4,1	2,9
Litauen	13,5	6,6
Luxemburg	3,2	2,6
Niederlande	86,5	80,4
Österreich	32,4	33,4
Polen	143,1	115,1
Portugal	36,9	36,4
Schweden	22,3	19,3
Slowakei	30,5	25,2
Slowenien	9,1	8,7
Spanien	172,1	182,9
Tschechische Rep.	96,9	82,5
Ungarn	30,2	26,0
Gesamt**	1.995,4	1.916,2

* Ohne Reserven für neu in Betrieb genommene Anlagen im EU EHS.

** Differenzen sind rundungsbedingt.

Die Tabelle zeigt die für das Jahr 2005 zugeteilte Menge an CO₂-Emissionsrechten (Allokation) für die in den jeweiligen Ländern vom EU EHS betroffenen Industrien sowie die tatsächlichen CO₂-Emissionen. Für Malta und Zypern lagen keine Daten vor, ihr CO₂-Volumen ist allerdings vernachlässigbar. Quellen: European Union (2006c), Ellerman und Buchner (2006).

jeder diese Zertifikate kaufen oder verkaufen. Im Grundsatz soll dabei innerhalb der EU ohne Einschränkung freier Handel möglich sein.²³

Handelsperioden

Der Handel ist in Perioden unterteilt. Die erste Handelsperiode umfasst den Zeitraum von 2005 - 2007 und wird oft als Versuchsperiode (Trial Period) bezeichnet. Die zweite Periode von 2008 - 2012 entspricht dem ersten Verpflichtungszeitraum des Kyoto-Protokolls (Kyoto Commitment Period). Weitere Handelsperioden sind angedacht. Da allerdings über den Zeitraum des Kyoto-Protokolls hinaus noch keine verbindlichen Regelungen in der internationalen Staatengemeinschaft getroffen wurden, wurde auch im EU EHS bisher noch keine weitere Handelsperiode beschlossen.

Emissionszertifikate und Allokation

Ein Emissionszertifikat ist jeweils für eine Handelsperiode gültig. Emissionszertifikate im EU EHS werden als EU Allowances, kurz EUAs bezeichnet. Wenn im Text nicht anders erwähnt, werden nachfolgend die Kurzformen „CO₂-Preis“, „CO₂-Derivate“ und „CO₂-Handel“ synonym für „EUA-Preis“, „Derivate auf EUAs“ bzw. „Handel von EUAs“ verwendet. Die Emissionszertifikate werden zu Anfang jeden Jahres bis Ende Februar ausgegeben. In der 1. Handelsperiode werden jedes Jahr 1/3, in der 2. Handelsperiode jedes Jahr 1/5 der für die jeweilige Periode vorgesehenen Zertifikate zugeteilt. Spätestens zum 30. April jeden Jahres müssen betroffene Unternehmen die ihrem Vorjahres-Emissionsvolumen entsprechende Menge an Zertifikaten bei den verantwortlichen nationalen Überwachungsbehörden abgeben.²⁴

Die Gesamtmenge der auszugebenden Zertifikate liegt in der Verantwortung der einzelnen Länder. Dazu erstellt jedes Land vor einer Handelsperiode den so genannten nationalen Allokationsplan (NAP). Der Allokationsplan muss konsistent mit den Reduktionsverpflichtungen gemäß dem Burden-Sharing-Abkommen sein und von der EU genehmigt werden.²⁵ Jeder NAP enthält einen Makroplan, in dem das nationale Emissionsziel auf Branchenebene heruntergebrochen wird und einen Mikroplan, der die Zuteilung der Emissionszertifikate für die unter die EU-Richtlinie 2003/87/EC

²³Lediglich bei lokalen Überbelastungen von Treibhausgasen kann es Einschränkungen geben. Dies ist allerdings im Fall von CO₂ als global wirkendes Treibhausgas nicht zu erwarten.

²⁴In Deutschland wurde dafür die Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) gegründet.

²⁵Eine Analyse möglicher Allokationsprobleme bieten z. B. Kruger und Pizer (2004), S. 10ff.

fallenden Unternehmen regelt. In der 1. Handelsperiode wurden die Zertifikate in den meisten EU-Ländern gratis nach dem Prinzip des Grandfathering, also entsprechend historischer Emissionen vergeben. Lediglich Irland, Dänemark, Ungarn und Litauen haben bis zu 5% der Zertifikate auktioniert.²⁶ In der 2. Handelsperiode ab 2008 müssen nach den Regeln des EU EHS mindestens 90% der Emissionsrechte erneut gratis vergeben werden.²⁷ Die Auktionierung zumindest eines Teils der Zertifikate hat den Vorteil, dass frühzeitig Preissignale im Markt erzeugt werden.

Beim Handel mit den Zertifikaten gilt völlige Transparenz, da alle Transaktionen registriert werden müssen. Die Zertifikate haben individuelle Seriennummern und werden in nationalen Registern verbucht. Die so genannte EU Linking Direktive verbindet das EU EHS mit dem Kyoto-Protokoll.²⁸ Anlagenbetreiber dürfen ab 2005 CERs und ab 2008 ERUs an Stelle von EUAs einreichen. In den nationalen Allokationsplänen muss gemäß der EU Linking Direktive allerdings eine prozentuale Begrenzung für den Einsatz von CERs und ERUs an Stelle von EUAs enthalten sein, die von den jeweiligen EU-Ländern beschlossen wird. Diese Obergrenze gilt nicht auf kumulierter Ebene, sondern für jede einzelne Anlage. Im Vorschlag des deutschen NAPs für die 2. Handelsperiode wurde dieses Limit z. B. auf 12% pro Anlage und Jahr gesetzt.²⁹

Ende 2006 war der Prozess der Entwicklung und Genehmigung der NAPs für die zweite Handelsperiode noch nicht abgeschlossen. Eine erste Analyse der bisherigen Vorschläge zeigt aber, dass auch in der kommenden Handelsperiode die Zuteilung an EUAs in den vom EU EHS betroffenen Sektoren eher zu großzügig bemessen sein wird, um auf EU-Ebene eine effiziente Vermeidung zu gewährleisten.³⁰ Es wird sich zeigen, ob die EU die Vorschläge akzeptiert oder diese deutlich kürzt und sich damit gegen die wirtschaftlichen Interessen der einzelnen Mitgliedsstaaten durchsetzt.

Banking und Borrowing

Da EUAs immer für eine ganze Handelsperiode gültig sind, kann man ungenutzte EUAs auch im nachfolgenden Jahr noch einsetzen, solange die Handelsperiode noch

²⁶Vgl. Betz, Rogge und Schleich (2005), S. 175.

²⁷Vgl. European Union (2003).

²⁸Vgl. European Union (2004).

²⁹Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2006).

³⁰Vgl. Rogge, Schleich und Betz (2006).

nicht zu Ende ist. Das Zurückhalten von Emissionszertifikaten für den Einsatz zu einem späteren Zeitpunkt im EU EHS wird Banking genannt. Zwischen der 1. und 2. Handelsperiode kann Banking zwar nach EU-Recht zugelassen werden, die meisten Länder verbieten dies jedoch. Deutschland z. B. als größter CO₂-Verursacher in der EU erlaubt kein Banking zwischen den Handelsperioden. Lediglich Frankreich und Polen planten nach dem Stand von 2006 in ihren NAPs, Banking von 2007 nach 2008 in begrenztem Maße zuzulassen.³¹ Allerdings hat die EU mittlerweile ihre Absicht geäußert, in diesem Fall die Emissionsobergrenzen dieser Länder für die zweite Handelsperiode um die Menge der übertragenen Zertifikate zu reduzieren. Damit wäre Banking von EUAs auf aggregierter Ebene endgültig ausgeschlossen.³²

Ein wichtiger Grund für diese Haltung ist die Tatsache, dass die Kyoto-Ziele 2008 - 2012 unabhängig vom EU EHS eingehalten werden müssen. Zu viel Banking aus der ersten Handelsperiode könnte die Einhaltung der Emissionsziele gefährden, da EUAs aus der ersten Handelsperiode des EU EHS nicht für die Einhaltung der Kyoto-Ziele ab 2008 zugelassen sind. Da das Kyoto-Protokoll im Fall einer weiteren Handelsperiode das Banking über 2012 hinaus erlaubt, ist dies auch im EU EHS für eventuelle weitere Handelsperioden zu erwarten.³³ Die einzige Möglichkeit, Emissionszertifikate von 2007 nach 2008 zu übertragen, liegt somit in den CERs, welche wie erwähnt aus CDM-Projekten bereits vor 2008 generiert und dann in die Kyoto-Periode ab 2008 übertragen werden können. Die EU hat allerdings auch hier bereits ihre Absicht bekundet, den Zufluss von CERs und ERUs auf 10% der nationalen CO₂-Allokationsmenge zu begrenzen.³⁴

Das Gegenteil, die Verwendung zukünftiger Zertifikate zu einem früheren Zeitpunkt als vorgesehen, wird Borrowing genannt. Dies ist zwar im EU EHS nicht explizit erlaubt, jedoch auf Grund der speziellen Regelungen innerhalb von Handelsperioden möglich. Da der letzte Einreichungstermin für EUAs des vorherigen Kalenderjahres erst am 30. April ist, die Zertifikate für das aktuelle Jahr aber bereits im Februar ausgehändigt werden, ist ein Borrowing um ein Jahr möglich. Von 2008 auf 2007 ist Borrowing allerdings auf Grund der Periodengebundenheit der EUAs nicht möglich.

³¹In diesem Fall könnte sich der Preis für ein Emissionszertifikat, welches in die 2. Handelsperiode übertragbar ist, vom Preis der restlichen Zertifikate in der EU unterscheiden.

³²Vgl. Dufour (2006) und Lewis (2006).

³³Vgl. United Nations (1998), Art. 3, Abs. 13.

³⁴Vgl. Lewis (2006). Zudem gilt weiterhin die zuvor erwähnte prozentuale Obergrenze je Anlage für die Anrechnung von CERs und ERUs.

In den meisten Emissionshandelssystemen wird zumindest Banking erlaubt, da mittlerweile Übereinstimmung darüber herrscht, dass unter Unsicherheit die Zulassung von Banking und Borrowing die Preisvolatilität reduziert.³⁵ Zudem wirkt sich ein Verbot des Banking in der Regel negativ auf die Kosteneffizienz des Handelssystems aus.³⁶

Überwachung und Strafen

Die Überwachung der Emissionen kann sowohl durch Berechnung als auch durch Messung geschehen und erfolgt jährlich.³⁷ Die Prüfung der Emissionsdaten kann je nach Beschluss des jeweiligen EU-Landes durch staatliche oder unabhängige Instanzen erfolgen. Werden Ende April von den Unternehmen nicht genügend EUAs eingereicht, um ihre CO₂-Emissionen abzudecken, sind in der 1. Handelsperiode für jedes fehlende EUA eine Strafzahlung von EUR 40 fällig, ab der 2. Handelsperiode sind es EUR 100. Die Zahlung der Strafe entbindet die Anlagenbetreiber jedoch nicht von der Pflicht, die Emissionszertifikate im nächsten Jahr nachzureichen. Tun sie dies nicht, muss die Strafe erneut bezahlt werden.

Naturgemäß gibt es für ein EU-weites Emissionshandelssystem eine Vielzahl an weiteren, bisher nicht diskutierten Detailregelungen. Für das Verständnis dieser Arbeit ist allerdings eine umfassende Kenntnis aller weiteren Regeln nicht erforderlich. Falls notwendig, werden wichtige Details im Kontext erwähnt.

2.2.3 Stand der Umsetzung

Die Richtlinie zum Emissionshandel in der EU ist zum 1. Januar 2005 in Kraft getreten.³⁸ Bereits am 9. März 2005 ist an der European Energy Exchange (EEX) in Leipzig zum ersten Mal ein EUA an einer Börse gehandelt worden. Der erste Preis hierfür wurde mit EUR 10,40 notiert.³⁹

³⁵Vgl. z. B. Cason und Gangadharan (2006) und Godby et al. (1997).

³⁶Vgl. z. B. Schleich et al. (2006).

³⁷Die Genehmigung der gewählten Überwachungsmethode erfolgt durch die zuständigen nationalen Behörden, vgl. Betz, Rogge und Schleich (2005), S. 190ff.

³⁸Vgl. Graichen und Requate (2005), S. 41f.

³⁹Vgl. European Energy Exchange (2005).

Jedes am EU EHS teilnehmende Land muss über ein nationales Emissionsregister verfügen, in dem die Besitzer von Emissionszertifikaten sowie alle Transaktionen verbucht werden. Es handelt sich hierbei um ein elektronisches System, welches mit dem zentralen Registrierungssystem der EU, dem so genannten Community Independent Transaction Log (CITL), verbunden sein muss.⁴⁰ Nach dem Stand von Ende 2006 sind bis auf die im Jahr 2007 neu hinzugekommenen EU-Länder Bulgarien und Rumänien alle anderen Länder (EU-25) an das CITL angeschlossen und können somit am EU EHS teilnehmen.⁴¹

Trotz der teils starken Kritik in der öffentlichen Presse und der Verweigerungshaltung der USA spricht vieles dafür, dass das EU EHS von dauerhafter Natur sein wird.⁴² Zunächst einmal wird das EU EHS von der EU getrieben. Einzelne Länder können es kaum boykottieren, ohne Sanktionen zu riskieren. Abgesehen davon, dass in der ersten Handelsperiode von 2005 - 2007, wie in Tabelle 2.2 zu sehen, ohnehin kaum Knappheit an EUAs zu herrschen scheint, ist die Zielerreichung des EU EHS auf Grund der hohen Strafen praktisch gewährleistet. Zudem zeigen andere Beispiele, dass einmal gestartete Emissionshandelssysteme zum Fortbestand tendieren. Exemplarisch sei hierzu das in Abschnitt 2.3.2 beschriebene US SO₂-Handelssystem genannt.

Die EU hat sich mittlerweile klar zu einer Fortführung des EU EHS nach 2012 bekannt und einen Zeitplan der Überarbeitung des Handelssystems für eine mögliche dritte Handelsperiode ab 2013 veröffentlicht.⁴³ Darüber hinaus hat die EU auch deutlich gemacht, dass sie das EU EHS als Modell zur Errichtung eines globalen Kohlenstoffmarktes sieht und diesen auch aktiv anstrebt.⁴⁴

⁴⁰Vgl. Betz, Rogge und Schleich (2005), S. 138ff.

⁴¹Eine vollständige Übersicht über die funktionsfähigen Register findet sich im Internet unter „<http://ec.europa.eu/environment/ets/welcome.do>“. Zu Beginn des Handels in 2005 verfügten allerdings längst nicht alle Länder über ein funktionsfähiges Register. Insbesondere Polen war bis in die zweite Jahreshälfte 2006 hinein nicht in der Lage, sein Register funktionsfähig aufzustellen.

⁴²Vgl. z. B. Dawson (2006a), S. 46f.

⁴³Vgl. European Union (2006d).

⁴⁴Vgl. European Union (2006b).

2.3 Weitere Emissionshandelssysteme

Neben dem EU EHS gibt es weltweit einige weitere Beispiele für funktionierende Emissionshandelssysteme, die auf regionaler oder nationaler Ebene agieren. Dabei ist zu unterscheiden zwischen Handelssystemen für global wirkende Treibhausgase und Handelssystemen für andere Schadstoffe, die häufig nur regional begrenzte Umweltschäden verursachen. Als erfolgreiches Beispiel für letztere wird das US SO₂-Handelssystem detaillierter vorgestellt.

2.3.1 Handelssysteme für Treibhausgase

Neben dem EU EHS wurden im Jahr 2005 in folgenden drei weiteren Handelssystemen für Treibhausgase signifikante Handelsvolumina festgestellt:⁴⁵

- **UK EHS:** Großbritannien verfügt bereits seit 2002 über ein branchenübergreifendes Emissionshandelssystem, das allerdings nach 2006 in das EU EHS überführt wird. Im Jahr 2005 wurden ca. 300.000 Tonnen CO₂ gehandelt.
- **New South Wales (Australien):** Obwohl Australien das Kyoto-Protokoll nicht ratifiziert hat, wurde vom australischen Bundesstaat New South Wales in 2003 ein eigenes Emissionshandelssystem für CO₂ initiiert. Im Jahr 2005 wurden ca. 6,1 Millionen Tonnen CO₂ gehandelt. Eine Ausweitung des Handelssystems auf weitere australische Bundesstaaten ist geplant.
- **US CCX:** Seit 2003 gibt es in den USA von der Chicago Climate Exchange (CCX) ein Handelssystem, welches neben CO₂ auch andere Treibhausgase berücksichtigt. Die Teilnahme an diesem Handelssystem ist freiwillig. Ein Teilnahmegrund ist z. B. das Sammeln von Erfahrungen im Emissionshandel. In 2005 wurden an der CCX Verträge für etwa 1,4 Millionen Tonnen CO₂ transferiert.

In allen drei Systemen lagen die Preise für Emissionszertifikate durchschnittlich unter EUR 10 je Tonne. Die Handelsvolumina waren deutlich niedriger als für das EU

⁴⁵Für ausführlichere Informationen zu diesen Emissionshandelssystemen vgl. z. B. Betz, Rogge und Schleich (2005), S. 179ff., und Hasselknippe und Røine (2006), S. 26f.

EHS. Weitere Emissionshandelssysteme für Treibhausgase sind z. B. in Japan, Kanada und der Schweiz geplant. In absehbarer Zukunft wird das EU EHS allerdings das volumenmäßig größte Emissionshandelssystem bleiben.

Neben Treibhausgasen sind auch andere Schadstoffe, wie z. B. Schwefeldioxid (SO_2) oder Stickoxide (NO_x), Gegenstand von existierenden Emissionshandelssystemen. Da diese Schadstoffe häufig nur regional wirken, sind sie in der Regel nicht Gegenstand internationaler Abkommen. Herausgestellt sei hier das SO_2 -Handelssystem in den USA. Es existiert bereits seit über einem Jahrzehnt erfolgreich. Da die Preisdynamiken dieses Marktes auch wissenschaftlich eingehend untersucht wurden und in dieser Arbeit einige Male auf dieses Emissionshandelssystem als Beispiel verwiesen wird, sei es im Nachfolgenden kurz vorgestellt und mit dem EU EHS verglichen.

2.3.2 US SO_2 -Handelssystem

Der Handel mit Emissionszertifikaten für SO_2 in den USA begann 1995.⁴⁶ Wie auch das EU EHS ist das US SO_2 -Handelssystem ein Cap-and-Trade-System. Der jährliche Cap der betroffenen Unternehmen wurde zu Beginn bei ca. 9 Millionen Tonnen SO_2 gesetzt, was etwa der Hälfte der Emissionen von 1980 entspricht.⁴⁷ Jedes Unternehmen muss am Ende jeden Jahres eine genügende Anzahl an Zertifikaten vorweisen. Hauptsächlich mit fossilen Brennstoffen befeuerte Kraftwerke in den Kontinentalstaaten der USA sind zur Einreichung von Zertifikaten verpflichtet.⁴⁸

Der Handel mit SO_2 -Emissionszertifikaten selbst ist frei und steht jedem offen. Die Zertifikate gelten jeweils ab einem bestimmten Jahr, wobei Banking erlaubt, Borrowing hingegen verboten ist. Die wichtigsten Teilnehmer am Handel sind Energieversorgungsunternehmen, Broker für Emissionszertifikate und Investmentbanken. Größter Händler in 2003 war die Investmentbank Morgan Stanley mit ca. 2,4 Millionen Tonnen SO_2 , insgesamt wurden im Jahr 2003 Emissionszertifikate für ca. 8 Millionen Tonnen SO_2 zwischen Unternehmen transferiert.⁴⁹

Jedes Jahr wird ein kleiner Teil der Zertifikate von einer öffentlichen Behörde ergebnisneutral versteigert, um ein zuverlässiges Preissignal zu erhalten.⁵⁰ Strafen liegen

⁴⁶ SO_2 verursacht sauren Regen und wirkt im Gegensatz zu CO_2 nicht global.

⁴⁷Vgl. Chicago Climate Futures Exchange (2004), S. 5.

⁴⁸Ca. 68% der SO_2 -Emissionen stammen aus dem Elektrizitätssektor, vgl. Burtraw et al. (2005).

⁴⁹Vgl. Chicago Climate Futures Exchange (2004), S. 8f., und Burtraw et al. (2005).

⁵⁰Vgl. z. B. Godby et al. (1997), S. 361.

bei USD 2000 je Tonne SO₂ (1995), angepasst um die Inflation. Trotz Zahlung einer Strafe muss das Zertifikat wie auch im EU EHS nachgereicht werden. Die Zertifikatspreise lagen typischerweise zwischen den Kosten für die Installation von Entschwefelungsanlagen und den Kosten für das Wechseln auf Brennstoff mit niedrigerem Schwefelanteil und bewegten sich den größten Teil der Zeit in einem Band von USD 70 - 200. Im Jahr 2004 stiegen die Preise auf Grund einer stärkeren Nachfrage nach kohlebasierter Stromerzeugung in den USA und einer erwarteten weiteren Reduzierung der Emissionsziele auf über USD 700 an.⁵¹

In der Literatur herrscht Übereinstimmung, dass das SO₂-Handelssystem ein funktionierender und effizienter Markt ist. Basierend auf historischen Preisen folgern Albrecht, Verbeke und de Clercq (2005), dass neue Informationen im Markt schnell verarbeitet werden. Ähnlich zu anderen Finanzmärkten gibt es zwar Indizien, die gegen eine Informationseffizienz aus rein statistischer Sicht sprechen, allerdings lässt sich nach Berücksichtigung der Transaktionskosten daraus kein Profit ziehen. Joskow, Schmalensee und Bailey (1998) zeigen, dass das SO₂-Handelssystem bereits seit Mitte der 90er Jahre effizient ist. Insbesondere sind Preise nicht mehr durch das strategische Verhalten einzelner Marktteilnehmer beeinflussbar. Der Spot- und Terminhandel im SO₂-Markt hat mittlerweile genug Liquidität angezogen, um zumindest im OTC-Handel relativ standardisierte Optionsgeschäfte zu ermöglichen.⁵² Die festgelegten Reduktionsziele für die betroffenen Unternehmen wurden erreicht.

Tabelle 2.3 stellt wesentliche Aspekte des US SO₂-Handelssystems dem EU EHS gegenüber. Bei der Gestaltung des EU EHS sind die Erfahrungen aus den bisher existierenden Emissionshandelssystemen und insbesondere auch aus dem erfolgreichen US SO₂-Handelssystem eingeflossen. Dementsprechend weisen die beiden Emissionsmärkte viele Gemeinsamkeiten auf, wie beschrieben ist das EU EHS jedoch volumenmäßig um einiges größer und umfasst mehr Industriesektoren. Der größte Unterschied besteht darin, dass es beim US SO₂-Handelssystem zwar von Anfang an keine Einschränkungen beim Banking gab, dafür das Borrowing generell verboten ist. Die theoretischen und praktischen Auswirkungen der Banking-Restriktionen auf die Preisdynamiken im EU EHS werden in Kapitel 4 eingehend untersucht.

⁵¹Vgl. Burtraw et al. (2005).

⁵²Als Beispielanbieter für SO₂-Derivate sei hier der OTC-Broker Evolution Markets (<http://www.evomarkets.com>) genannt.

Tabelle 2.3: Vergleich US SO₂-Handelssystem mit dem EU EHS.

	US SO ₂ -Handelssystem	EU EHS
Emissionen	SO ₂	CO ₂ (weitere ggf. später)
Start	1995	2005
Sektoren	<ul style="list-style-type: none"> • Stromerzeugung • Industrielle Verbrennungsprozesse (freiwillig) 	<ul style="list-style-type: none"> • Energie-/Stromerzeugung • Stahl-, Zement-, Zellstoff-, Keramik-, Glas- und Papierindustrie • Raffinerieprozesse • Kokereien
Länder	1	25*
Anlagen**	Ca. 3.000	Ca. 11.000
Allokation	US-Regierung verteilt Emissionsrechte kostenlos, kleiner Anteil an Zertifikaten wird ergebnisneutral auktioniert	2005 - 2007 mindestens 95%, 2008 - 2012 mindestens 90% Gratiszuteilung. EU-Mitgliedsstaaten entscheiden individuell über Auktionierung.
Banking	Ja	Zunächst nur innerhalb Handelsperiode 2005 - 2007, danach generell erlaubt
Borrowing	Nein	Innerhalb Handelsperioden Borrowing um 1 Jahr möglich
Strafen	USD 2000/t SO ₂ , inflationsangepasst (Zertifikate müssen nachgereicht werden)	2005 - 2007: EUR 40/t CO ₂ sowie 2008 - 2012: EUR 100/t CO ₂ (Zertifikate müssen nachgereicht werden)

* Stand 2006.

** Im Gegensatz zum EU EHS werden in den USA alle Verbrennungsöfen eines Kraftwerks einzeln gezählt. Die ca. 11.000 Anlagen im EU EHS entsprechen ca. 5.000 Unternehmen.

Quellen: Betz, Rogge und Schleich (2005), Chicago Climate Futures Exchange (2004), Dufour (2006), Ellerman und Buchner (2006) und Kruger und Pizer (2004).

Kapitel 3

CO₂-Handel und Gestaltung von CO₂-Derivaten

Dieses Kapitel widmet sich zwei Themenbereichen, deren Verständnis Grundvoraussetzung für die weiteren Analysen im Verlauf dieser Arbeit ist. Zum einen wird untersucht, welche Einflussfaktoren beim Handel von CO₂ relevant sind und wie das EU EHS mit anderen Märkten zusammenhängt. Basierend hierauf werden in Kapitel 4 Preise von CO₂-Emissionszertifikaten modelliert. Zum anderen stellt sich die Frage, in welchem Umfang zusätzlich zu einem CO₂-Spotmarkt auch Märkte für Derivate auf CO₂-Emissionszertifikate entstehen und welche Derivatausprägungen besonders erfolgversprechend sind. Die Bewertung von CO₂-Derivaten ist dann Gegenstand von Kapitel 5. Die Diskussion des Handels von CO₂ und der Gestaltung von CO₂-Derivaten wird durch die Ergebnisse einer hierzu durchgeführten Expertenbefragung ergänzt.

3.1 Handel von CO₂

Ähnlich zu Finanzinstrumenten beinhalten Emissionszertifikate ein Recht, in diesem Fall das Recht, eine vorgegebene Menge an CO₂ zu emittieren. Emissionszertifikate zahlen allerdings weder Zinsen noch Dividenden, sondern dienen der Erfüllung von Umweltschutzauflagen. Sie werden zur Deckung der in industriellen Produktionsprozessen entstehenden CO₂-Emissionen benötigt und damit verbraucht, z. B. bei der Erzeugung von Strom unter Einsatz fossiler Brennstoffe. Damit können sie ähnlich

zu anderen Commodities wie etwa Öl, Gas oder Kohle als Produktionsfaktor gesehen werden. Um die Preisdynamiken von CO₂ zu verstehen, wird nachfolgend analysiert, wie und in welchem Umfeld Preise für diesen Produktionsfaktor entstehen, welche Einflussfaktoren die Höhe des Preises beeinflussen und welche Verbindungen zu anderen Finanz- und Commoditymärkten bestehen.

3.1.1 Marktumfeld

Nicht nur Unternehmen in Industrien, die von Emissionsobergrenzen betroffen sind, sondern jedes Unternehmen, sogar jede Privatperson darf am CO₂-Handel teilnehmen. So wurde etwa in Deutschland entschieden, dass die Emissionszertifikate selbst nicht als Finanzinstrumente im Sinne des Kreditwesengesetz einzustufen sind und damit nicht der Bankaufsicht unterliegen.¹ Damit kann das EU EHS tatsächlich als ein weiterer Commodity- bzw. Rohstoffmarkt auf europäischer Ebene interpretiert werden. Prinzipiell lassen sich direkt am CO₂-Handel beteiligte Akteure im EU EHS in folgende Gruppen unterteilen:

- **CO₂-regulierte Unternehmen:** Alle Unternehmen mit einer Zuteilung von EUAs sind mögliche Teilnehmer am CO₂-Handel. Haben sie Bedarf an EUAs, so können sie entscheiden zwischen dem Kauf im EU EHS oder alternativ einer zusätzlichen Vermeidung von CO₂-Emissionen. Überschüssige EUAs können verkauft werden.
- **Nicht CO₂-regulierte Händler und Investoren:** Nicht direkt von Emissionsobergrenzen betroffene Händler oder Unternehmen können trotzdem Positionen in EUAs einnehmen, z. B. weil sie ihr Portfolio diversifizieren möchten oder wie im Fall von Hedgefonds oder anderen Spekulanten an neuen Märkten partizipieren möchten.
- **Reine Handelsplattformen:** Wie in Finanzmärkten üblich, bieten auch im EU EHS sowohl Broker als auch Börsen Dienstleistungen an, die den Handel

¹Vgl. Wilkens und Wimschulte (2006), S. 397, und Bundestag (2004), Art. 15. Derivate auf Emissionszertifikate hingegen sind wie Finanzinstrumente zu behandeln und unterliegen der Bankaufsicht.

von EUAs und damit den Transfer von CO₂-Risiken erleichtern. Sie selbst gehen dabei aktiv keine Positionen ein.²

- **Risikointermediäre:** Im Gegensatz zu reinen Handelsplattformen sind mit Risikointermediären hier Unternehmen wie etwa Banken oder Versicherungen gemeint, die ebenfalls am Transfer von CO₂-Risiken mitwirken, hierbei aber zumindest teilweise oder temporär selbst Risiken übernehmen. Hier seien auch Fondsgesellschaften genannt, die mit den Einzahlungen von Unternehmen oder Staaten Emissionsvermeidungsprojekte finanzieren und die daraus resultierenden Emissionsgutschriften dann wieder ausschütten.³

Eine Person oder ein Unternehmen kann gleichzeitig mehrere Funktionen übernehmen. So kann ein CO₂-reguliertes Unternehmen über den Handel für den Eigenbedarf hinaus zusätzlich auch Spekulation betreiben. Andere Einteilungen der Akteure in Gruppen sind ebenfalls denkbar. Mit der hier vorgenommenen Einteilung soll hauptsächlich verdeutlicht werden, dass im EU EHS prinzipiell die gleichen Akteure wie auch in anderen Finanz- und Commoditymärkten zu finden sind.⁴ Diese Einteilung der Marktakteure wird auch in der im Abschnitt 3.3 vorgestellten Expertenbefragung verwendet.

Im EU EHS haben sich nach dem Stand von Ende 2006 alle auch auf anderen Commoditymärkten üblichen Handelsformen für EUAs herausgebildet. Sowohl Spot als auch Terminhandel findet nicht mehr nur bilateral im Over-the-Counter-Handel (OTC-Handel) statt, sondern wurde an einigen Börsen europaweit eingeführt. Oftmals handelt es sich um Strombörsen, die den CO₂-Handel in ihre Produktpalette integriert haben. Manche Börsen bieten auch das OTC-Clearing an. Tabelle 3.1 zeigt die fünf wichtigsten Börsen für EUAs und Derivate auf EUAs, die seit dem Jahr 2005 in Europa aktiv waren. Die skandinavische Nordic Power Exchange (Nord Pool) führte als erste Börse Terminkontrakte auf EUAs ein, die European Energy Exchange (EEX) startete als erste Börse den Spothandel mit EUAs.

²Im Fall von Börsen ist in der Regel mindestens ein Clearing House beteiligt, welches das Kontrahentenrisiko übernimmt.

³Vgl. zu solchen Fondsgesellschaften Betz, Rogge und Schleich (2005), S. 38ff. Ein Beispiel ist der 2004 von der KfW aufgelegte Klimaschutzfonds. In diesen können private Unternehmen investieren, die selbst nicht das Know-how oder die Möglichkeit haben, sich in CDM- oder JI-Projekten zu engagieren. Sie verpflichten sich zur Abnahme einer Mindestmenge an Emissionsgutschriften.

⁴Vgl. z. B. Dresig (2000), S. 91ff., für eine Diskussion des fließenden Übergangs zwischen Risikointermediären und reinen Marktorganisationen.

Tabelle 3.1: Europäische Börsen für EUAs und gehandelte EUA-Derivate.

Börse	Standort	Produkte	Handelsstart
Nordic Power Exchange (Nord Pool)	Oslo	Spot	24.10.2005
		Forwards*	11.02.2005
European Energy Exchange (EEX)	Leipzig	Spot	09.03.2005
		Futures	04.10.2005
ICE Futures (ICE) in Koope- ration mit der European Cli- mate Exchange (ECX)	London**	Futures	22.04.2005
		Optionen	13.10.2006
Powernext	Paris	Spot	24.06.2005
Energy Exchange Austria (EXAA)	Graz	Spot	28.06.2005

* Nord Pool nennt seine Terminkontrakte zwar Forwards, es handelt sich aber dennoch ähnlich den Futures um standardisierte Verträge, für die eine an die tatsächlichen Kurse angepasste Sicherheit hinterlegt werden muss.

** In der Partnerschaft von ICE (London) und ECX (Amsterdam) übernimmt die ICE den Handel der Produkte und die ECX Produktentwicklung und Marketing.

Quellen: „<http://www.nordpool.com>“, European Climate Exchange (2006a), European Climate Exchange (2007c), Kristiansen et al. (2006) und Wilkens und Wimschulte (2006).

Im Jahr 2006 wurden im Spot- und Terminmarkt des EU EHS insgesamt Verträge für ca. 1,1 Milliarden Tonnen CO₂ gehandelt. Im Jahr 2006 wurde also bereits ein CO₂-Volumen von knapp über der Hälfte der jährlichen Allokationsmenge im EU EHS gehandelt. Davon entfiel etwa die Hälfte auf den OTC-Handel. Die ICE/ECX verbuchte dabei insgesamt einen Marktanteil von 81 Prozent des Börsenhandels.⁵ Aus dem Jahr 2006 stammt zudem die Aussage von CO₂-Händlern, dass die Powernext (Spothandel) und die ICE/ECX (Terminhandel) den Kampf der Börsen gewonnen hätten und mittlerweile den Großteil des Volumens auf sich ziehen.⁶

Abbildung 3.1 zeigt exemplarisch von März bis Mai 2006 monatliche Volumina für EUAs und EUA-Futures an den vier Börsen Nord Pool, EEX, ICE/ECX und Powernext.⁷ Am Handelsvolumen für den Future 2008 wird deutlich, dass auch für

⁵Vgl. European Climate Exchange (2007b). Das gesamte Handelsvolumen bezieht sich auf das Volumen von Spot- und Terminhandel für beide Handelsperioden des EU EHS. Bei dem Volumen für den OTC-Handel kann es sich naturgemäß nur um eine Schätzung handeln. Über den OTC- und Börsenhandel hinaus waren am Markt zudem erste Retailprodukte für Privatanleger zu finden, z. B. von der Dresdner Bank und ABN Amro, vgl. Wilkens und Wimschulte (2006), S. 401.

⁶Vgl. European Climate Exchange (2006b). Bereits im Jahr 2005 kündigten die Powernext und die ICE/ECX an, zu kooperieren und eine gemeinsame Handelsplattform für ihre Spot- und Terminkontrakte zu entwickeln, vgl. Energy Risk (2005).

⁷Die Volumina an der EXAA sind vernachlässigbar.

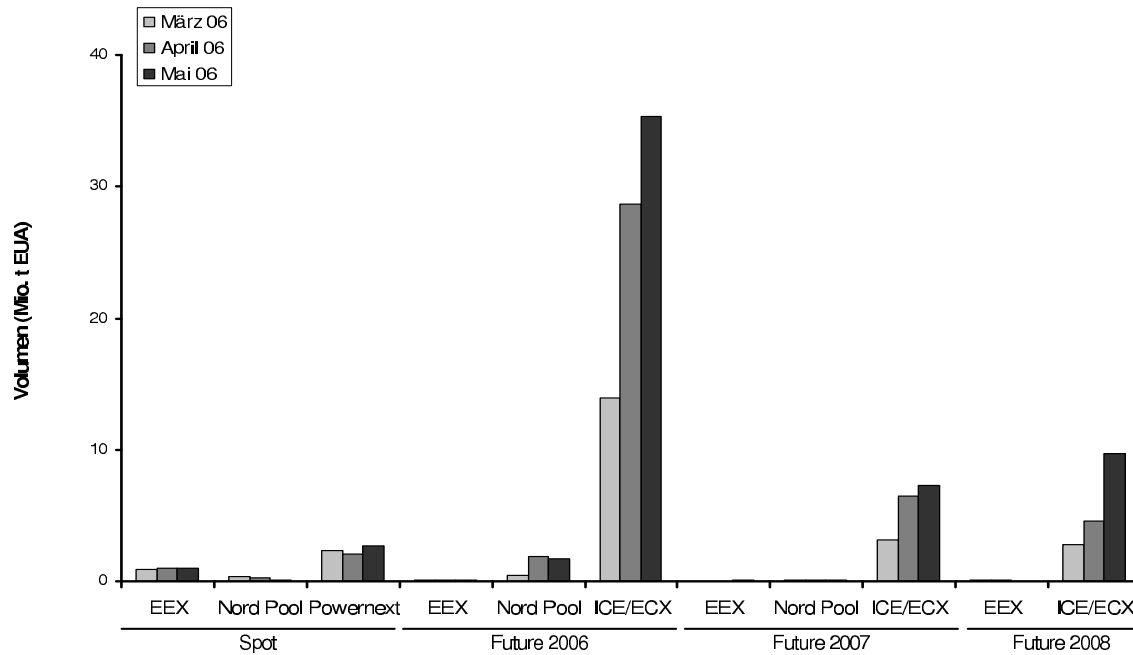


Abbildung 3.1: Handelsvolumina an europäischen CO₂-Börsen. Gezeigt werden monatliche Handelsvolumina im März, April und Mai 2006 von EUAs (Spot) sowie von börsengehandelten Futures 2006, Futures 2007 und Futures 2008 auf EUAs. Die Futures enden im Dezember des jeweiligen Jahres mit der physischen Lieferung der EUAs. Volumina beinhalten keine von der Börse vermittelten OTC-Transaktionen. Quelle: Bloomberg.

die 2. Handelsperiode bereits ein aktiver Terminhandel existiert. Ein Grund für die höhere Liquidität von Futures im Vergleich zu EUAs könnte darin bestehen, dass im Gegensatz zum Spotmarkt beim Handel während der Laufzeit der Futures keine Transaktionen auf den zu Grunde liegenden Emissionskonten notwendig sind. Zudem ist im Vergleich zum direkten Handel mit EUAs weniger Kapitaleinsatz erforderlich.

Zum Handel mit EUAs und EUA-Derivaten gibt es für CO₂-regulierte Unternehmen nur wenige Alternativen. Zwar könnten CERs und ERUs aus dem globalen Kyoto-Handel als Ersatz für EUAs dienen. Wie beschrieben ist der Zufluss dieser Instrumente in das EU EHS allerdings vom Regulator limitiert. Darüber hinaus sind mit dem Engagement in CDM- und JI-Projekten zusätzliche Risiken, wie etwa Lieferrisiken, zeitliche Unsicherheiten oder Risiken bezüglich der regulatorischen Anerkennung der Projekte verbunden, welche beim Handel mit EUAs nicht existieren. Alternativ bleibt nur die aktive Vermeidung von CO₂, um einen notwendigen Kauf von EUAs zu umgehen.

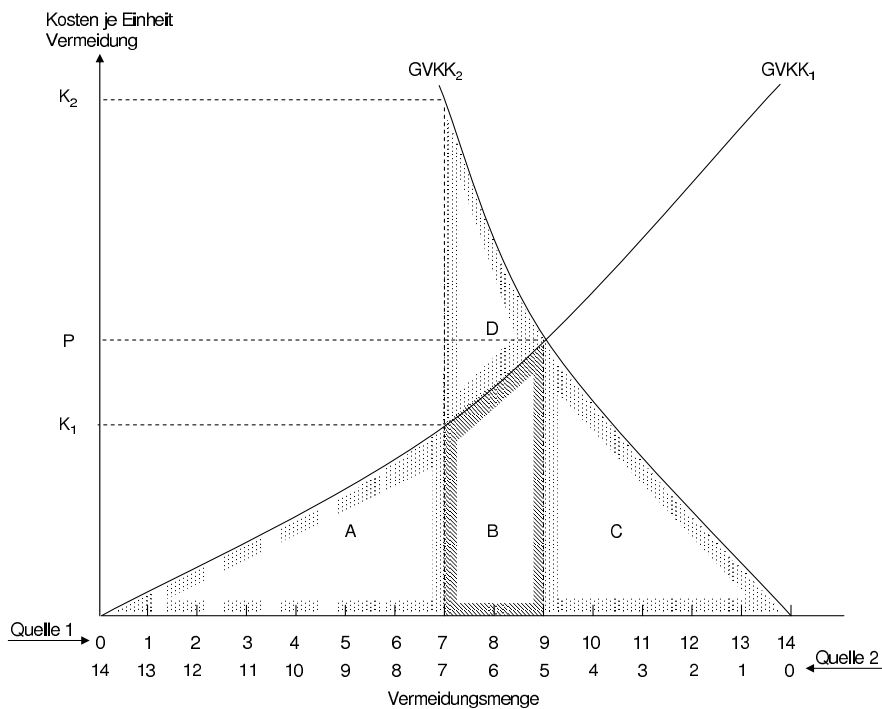


Abbildung 3.2: Preisbildung von Emissionszertifikaten am Beispiel von zwei Unternehmen. Die Abbildung zeigt exemplarisch den Preisbildungsprozess in einem Emissionshandelssystem mit zwei Teilnehmern. Die Darstellung ist an Tietenberg (2006), S. 31, angelehnt.

3.1.2 Preisbildungsmechanismus

Bevor fundamentale Einflussfaktoren auf CO₂-Preise vorgestellt werden, sei zunächst an Abbildung 3.2 verdeutlicht, wie aus theoretischer Sicht Preise von Emissionszertifikaten entstehen.⁸ Dabei werden exemplarisch zwei risikoneutrale Unternehmen angenommen, die gemeinsam insgesamt 14 Einheiten CO₂ aus ihrer jeweiligen CO₂-Quelle vermeiden sollen.

Die Kosten für die Vermeidung einer Einheit CO₂ ist durch die unternehmensspezifische Grenzvermeidungskostenkurve (GVKK) bestimmt. In Abbildung 3.2 ist diese Grenzvermeidungskostenkurve für Unternehmen 1 von links nach rechts und für Unternehmen 2 von rechts nach links aufgetragen. In der Regel steigen die Grenzvermeidungskosten (GVK) eines Unternehmens mit zunehmender Vermeidung. Das Unternehmen wird zunächst mit den günstigsten Vermeidungsmöglichkeiten begin-

⁸Vgl. Tietenberg (2006), S. 27ff.

nen und nach und nach zu den teureren Maßnahmen übergehen. Da auch die Opportunitätskosten einer eventuellen Reduzierung der Produktion zur Erfüllung der CO₂-Auflagen als Vermeidungskosten interpretiert werden können, existieren immer Vermeidungsoptionen.⁹ Auf der unteren Achse sind alle Kombinationen für eine gemeinsame Vermeidung von 14 Einheiten CO₂ ablesbar. Wird nun z. B. vom Regulator festgelegt, dass beide Unternehmen jeweils 7 Einheiten CO₂ vermeiden sollen, so sind die gemeinsamen Kosten durch die Summe der Teilflächen A+B+C+D gegeben.

Dies stellt offensichtlich nicht die kostenminimale Lösung dar. Die letzte Einheit Vermeidung kostet Unternehmen 1 den Preis K_1 , Unternehmen 2 bezahlt K_2 . Wenn nun Unternehmen 1 eine weitere Einheit CO₂ vermeiden würde, so wäre Unternehmen 2 bereit, die Kosten hierfür zu tragen, da diese immer noch deutlich unter seinen eigenen GVK liegen. Dieses Spiel würde sich fortsetzen, bis die GVK beider Unternehmen im Gleichgewicht identisch und gleich P sind. Auf dieser Höhe schneiden sich die beiden GVKK. Unternehmen 1 vermeidet nun 9 Einheiten CO₂ und verkauft Emissionszertifikate im Wert von 2 Einheiten an Unternehmen 2, welches nur noch 5 Einheiten vermeidet. Die gemeinsamen Kosten für diese Strategie liegen nur noch bei der Summe der Teilflächen A+B+C. Der Preis eines Emissionszertifikats entspricht dann genau P . Diese Logik kann äquivalent auch auf mehr als zwei Teilnehmer übertragen werden.¹⁰

In der Realität kann es zu Abweichungen von der beschriebenen Gleichgewichtslösung kommen. Ein typischer Grund hierfür sind Marktfraktionen wie z. B. Transaktionskosten¹¹ oder Preisabsprachen. Aber auch bei vollkommenen Märkten können Abweichungen z. B. dann entstehen, wenn die Marktteilnehmer unterschiedliche Nutzenfunktionen haben.¹²

⁹Für eine Diskussion von GVKK auf nationaler und globaler Ebene siehe z. B. Klepper und Peterson (2006). Konkrete Beispiele für GVKK auf Basis tatsächlicher Vermeidungsmaßnahmen von Unternehmen in verschiedenen Branchen für Deutschland finden sich in umwelttechnik & ingenieure GmbH (2005). Enkvist, Nauc er und Rosander (2007), S. 38, zeigen eine auf geschätzten tatsächlichen Vermeidungsmöglichkeiten basierende globale GVKK. Modellgestützte GVKK für die EU werden z. B. von Viguier, Babiker und Reilly (2001), S. 22ff., präsentiert. Gemeinsam ist all diesen Beispielen, dass die Grenzvermeidungskosten ansteigend im Emissionsvolumen sind.

¹⁰Für eine formale Herleitung siehe z. B. Tietenberg (2006), S. 27ff. Fast alle Arbeiten zu Emissionszertifikatspreisen setzen entweder als Annahme voraus, dass die Zertifikatspreise den Grenzkosten entsprechen, oder zeigen dies formal.

¹¹Vgl. Tietenberg (2006), S. 40ff.

¹²Vgl. Sheeran (2006).

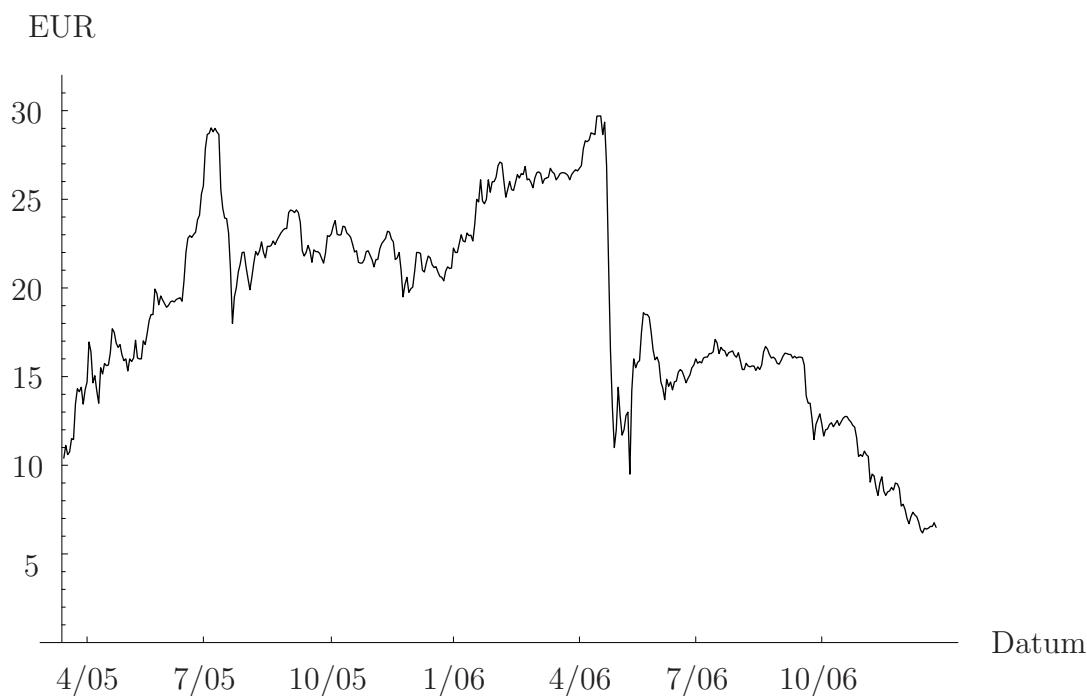


Abbildung 3.3: Preise von EU Allowances (EUAs) an der EEX. Die Abbildung zeigt tägliche Preise für EUAs in EUR/t an der European Energy Exchange (EEX) vom 9. März 2005 bis zum 29. Dezember 2006.

3.1.3 Einflussfaktoren auf CO₂-Preise

Abbildung 3.3 zeigt die Preishistorie für EUAs an der European Energy Exchange (EEX) in Leipzig vom 9. März 2005 bis zum 29. Dezember 2006. Die EUA-Preise waren sehr volatil mit einer annualisierten Volatilität der Renditen von ca. 79% während des dargestellten Zeitraums. Im gleichen Zeitraum lag beispielsweise die annualisierte Volatilität der DAX-Renditen lediglich bei ca. 14%. Abgesehen von Strompreisen, die auf Grund der nicht vorhandenen Lagerbarkeit von Strom teils extreme Sprünge aufweisen, zeigt kaum ein anderes Commodity eine vergleichbar hohe Volatilität.¹³ Zur Beantwortung der Frage, worin die hohe Volatilität begründet liegt, und für ein besseres Verständnis der Dynamiken und Besonderheiten des CO₂-Marktes werden nun mögliche Einflussfaktoren auf CO₂-Preise vorgestellt und diskutiert.¹⁴

¹³Vgl. z.B. Geman (2005), S. 59 und S. 276ff., und Bolinger, Wisser und Golove (2003).

¹⁴Vgl. z.B. auch Sijm et al. (2005) für eine Diskussion von preistreibenden Faktoren im EU EHS.

- **Regulatorische und politische Risiken:** Das EU EHS ist ein künstlich von der EU erzeugter Markt, dessen Rahmenbedingungen sich dementsprechend jederzeit ändern können. Als Beispiele für regulatorische Risiken seien die bis zur endgültigen Verifizierung durch die EU unsicheren NAPs für die folgende Handelsperiode oder auch die Verbindungen zu anderen CO₂-Märkten genannt. Beides beeinflusst die Angebotsmenge an EUAs. Wenn z. B. Russland sein großes Überangebot an Kyoto-Zertifikaten über die EU Linking Directive ins EU EHS verkaufen kann, treibt das die Preise nach unten. Ähnlich wichtig ist die Frage nach der Weiterentwicklung des EU EHS und des globalen Kyoto-Handels nach dem Jahr 2012. Beispiele für politische Risiken sind mögliche Quersubventionierungen bestimmter Industriebranchen durch Regierungen, was EUA Preise verzerren würde, oder eine geänderte Einstellung zur Atomkraft.
- **Brennstoffpreise:** Ein relative Änderung von Gas- und Kohlepreisen kann zu einer neuen Einsatzreihenfolge von Brennstoffen zur Erzeugung von Strom führen. Im Verhältnis zur erzeugten Strommenge ist Gas teurer als Kohle, erzeugt jedoch weniger CO₂. Wird Gas im Verhältnis zu Kohle nach Berücksichtigung der CO₂-Kosten billiger, so hat dies entsprechend einen Einfluss auf die Nachfrageseite von EUAs.
- **Wetter:** Es sind vor allem Energieversorgungsunternehmen, die von Wetterbedingungen beeinflusst werden. Da Energieversorgungsunternehmen gleichzeitig den größten Sektor im EU EHS darstellen, sollte Wetter auch Einfluss auf CO₂-Preise haben. So wird zum Beispiel während eines sehr heißen Sommers durch Klimaanlage mehr Strom verbraucht, während zur gleichen Zeit das Angebot CO₂-freier Stromerzeugung abnimmt. Zum einen können auf Grund der Hitze Atomkraftwerke nicht mehr die volle Leistung bringen, da das Kühlwasser zu warm wird, zum anderen können auch Wasserkraftwerke ausfallen, wenn die Wasserpegel zu niedrig sind.
- **Wirtschaftswachstum:** Ein höheres Wirtschaftswachstum wird in der Regel auf Grund des gesteigerten Stromverbrauchs oder der Produktionssteigerung in CO₂-regulierten Industrien auch ein höheres Emissionsvolumen nach sich ziehen. Große tägliche Schwankungen des erwarteten Wirtschaftswachstums

in der EU sind jedoch nicht zu erwarten, da die EU insgesamt ein relativ reifer Markt ist.¹⁵

- **Technologische Entwicklung:** Sollten durch einen technologischen Fortschritt neue oder günstigere CO₂-Vermeidungstechnologien entstehen, so wird dies auch Auswirkungen auf CO₂-Preise haben. Ähnlich dem Wirtschaftswachstum ist dies ein eher langfristig wirksamer Faktor. Zudem scheint eine kontinuierliche Entwicklung wahrscheinlicher als ein plötzlicher Quantensprung in der Technologie. Kontinuierliche Fortschritte sind z. B. als Effizienzsteigerungen bekannter Stromerzeugungsverfahren zu erwarten. Geforscht wird zudem an der CO₂-Einlagerung, also der Abscheidung und anschließenden Lagerung von CO₂ bei der Stromerzeugung.
- **Technische Risiken:** Technische Risiken sind z. B. der Ausfall eines Atomkraftwerks, welcher durch CO₂-intensivere Stromerzeugungsarten kompensiert werden muss. Diese Risiken sollten sich innerhalb des EU EHS eigentlich diversifizieren.
- **Compliance Buying:** Mit Compliance Buying wird der Effekt bezeichnet, dass Unternehmen erst kurz vor dem Abgabetermin für EUAs auf dem Emissionsmarkt erscheinen und durch das kurzfristig geänderte Gleichgewicht von Angebot und Nachfrage die Preise beeinflusst werden. Ein solcher Effekt war beim ersten Abgabedatum April 2006 allerdings nicht zu beobachten. Die Preise stürzten zwar Ende April bis Anfang Mai massiv ab, dies lag jedoch vielmehr an der erstmaligen Veröffentlichung nationaler Emissionsdaten im EU EHS. Die aggregierten CO₂-Emissionsvolumina fielen deutlich niedriger aus, als von den meisten Marktteilnehmern erwartet.¹⁶

Die bisher diskutierten Faktoren gehen von einem funktionierenden Wettbewerb im Markt aus. Wenn einzelne oder wenige Unternehmen eine marktbeherrschende Stellung ausüben oder Unternehmen rechtswidrig zusammenarbeiten, kann dies allerdings ebenso Einfluss auf CO₂-Preise haben. Diese Frage der Marktmanipulation wird im Rahmen der stochastischen Modellierung von CO₂-Preisen in Kapitel 4 ausführlicher diskutiert werden.

¹⁵Zum langfristigen Zusammenhang zwischen Bruttosozialprodukt und CO₂-Emissionen siehe z. B. Bengochea-Maranchó, Higón-Tamarit und Martínez-Zarzoso (2001).

¹⁶Vgl. Ellerman und Buchner (2006).

Qualitativ sind die Einflussfaktoren auf EUA-Preise gut nachvollziehbar. Es stellt sich allerdings die Frage, wie die Stärke ihres Einflusses gemessen werden kann. Zumindest für Brennstoffpreise und Wetter sind täglich aktualisierte Daten verfügbar und können für eine statistische Analyse genutzt werden. Die entsprechenden Ergebnisse werden nachfolgend vorgestellt. Um auch den Einfluss der weiteren Faktoren abschätzen zu können, erfolgt in Abschnitt 3.3 zudem im Rahmen der Expertenbefragung eine relative Einschätzung der Bedeutsamkeit aller beschriebenen Einflussfaktoren.

Abbildung 3.4 zeigt den Fuel-Spread zwischen Gas und Kohle zusammen mit dem EUA-Preis im Verlauf vom 26. Juli 2005 bis zum 14. Juli 2006. Der Fuel-Spread ist definiert als Differenz der Brennstoffkosten von Gas und Kohle je erzeugter Megawattstunde (MWh) Strom. Für Gas und Kohle werden Forwardpreise verwendet, um kurzfristige Preisverzerrungen auszuschließen. Im Fall von Gas können temporäre Preisanstiege z. B. auf Grund einer ausgefallenen Pipeline entstehen. Der Korrelationskoeffizient von Fuel-Spread und EUA-Preis ist zwar auf dem 1%-Niveau signifikant von null verschieden, mit einem Wert von 0,30 (entsprechend einem Bestimmtheitsmaß von 0,09) ist die Korrelation allerdings gering.¹⁷ Auf Grund einer ähnlichen empirischen Betrachtung folgern auch Paoletta und Taschini (2006), dass sich der Fuel-Spread kaum zur Vorhersage von EUA-Preisen eignet.

Obwohl für Wetter ebenso wie für Fuel-Spreads tägliche Daten zur Verfügung stehen, ist der Einfluss des Wetters auf den EUA-Preis dennoch schwer zu bestimmen. Wetter ist ein lokales Phänomen. Für die Bestimmung des Einflusses auf EUA-Preise ist allerdings eher ein Durchschnitt auf europäischer Ebene von Bedeutung. Eine solche Analyse wurde von Mansanet-Bataller, Pardo und Valor (2006) durchgeführt. Ihre Analyse zeigt keine signifikante Korrelation eines europäischen Wetterindexes zu EUA-Preisen. Allerdings finden sie auf Basis von Wetterdaten für Deutschland, dem größten CO₂-Verursacher im EU EHS, empirische Indizien dafür, dass EUA-Preise von extremen Wetterereignissen beeinflusst werden.

¹⁷Bei der Nutzung von Spotpreisen zur Berechnung des Fuel-Spreads lässt sich keine signifikante Korrelation nachweisen.

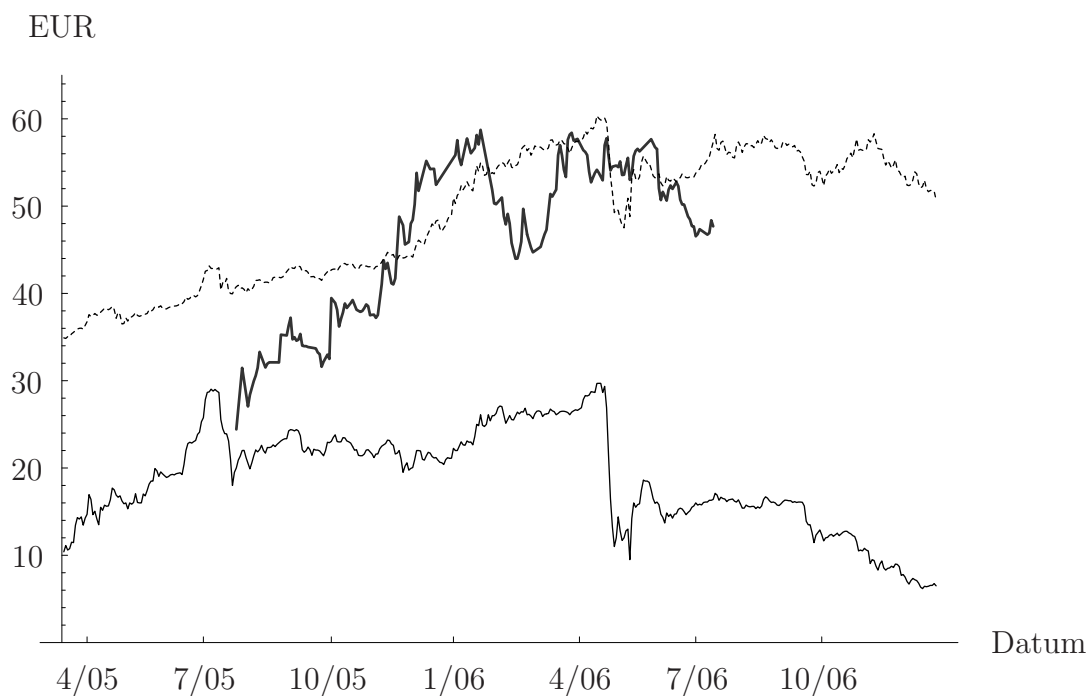


Abbildung 3.4: EUA-Preise, Strompreise und Fuel-Spreads. Die durchgezogene dünne Linie zeigt tägliche Preise für EUAs in EUR/t an der European Energy Exchange (EEX) vom 9. März 2005 bis zum 29. Dezember 2006. Die gestrichelte Linie zeigt für den gleichen Zeitraum Preise für den Phelix Baseload Stromfuture Kalenderjahr 2007 in EUR/MWh. Die dickere durchgezogene Linie zeigt Fuel-Spreads zwischen Gas und Kohle in EUR/MWh vom 26. Juli 2005 bis zum 14. Juli 2006. Zur Berechnung des Fuel-Spreads wurde der Zeebrugge Erdgas Forward Index mit Lieferung für den Winter 2006/2007 von Spectron sowie der Kohle Forward Index 2007 CIF ARA (cost/insurance/freight - Amsterdam/Rotterdam/Antwerpen) von ICAP Europe verwendet. Zur Umrechnung der Gas- und Kohlepreise in MWh wurde eine Kraftwerkseffizienz von 55% für Gas und von 40% für Kohle angenommen. Ein positiver Fuel-Spread zeigt an, dass Gas im Verhältnis zur Kohle teurer ist.

3.1.4 Vergleich von CO₂ und anderen Gütern

Es stellt sich die Frage, ob über den Zusammenhang mit Gas und Kohle hinaus weitere Verbindungen von CO₂ zu anderen Finanzinstrumenten und Commodities existieren.

Wie Daskalakis, Psychoyios und Markellos (2006) zeigen, korrelieren EUA-Renditen nicht mit Renditen von anderen Finanzinstrumenten oder Zinsen. Ihre Analyse ergibt nicht signifikant von null verschiedene Korrelationskoeffizienten bei Tests auf Korrelation zwischen EUA-Renditen und Renditen des DAX, Morgan Stanley Europe Index, S&P 500, Morgan Stanley World Index, Morgan Stanley Euro Credit

Index, der EURIBOR Zinsrate (Laufzeiten 1 Woche bzw. 1 Jahr) sowie des US T-Bill (Laufzeit 13 Wochen).¹⁸ Dieses Ergebnis stimmt mit einer Analyse von Kosobud et al. (2005) überein, die eine ähnliche Untersuchung des US SO₂-Handelssystems zum Inhalt hat. Auch dort ist keine Korrelation von SO₂-Renditen und Renditen anderer Finanzinstrumente und Commodities festzustellen.¹⁹ Beide Untersuchungen kommen zum Schluss, dass Emissionszertifikate eine eigene Anlageklasse darstellen und daher für Diversifikationszwecke in Anlageportfolien eingesetzt werden können.

Darüber hinaus ist auch die Korrelation von EUA-Renditen und Renditen von Strom in Daskalakis, Psychoyios und Markellos (2006) nicht signifikant von null verschieden. Dies überrascht zunächst, da die Annahme nahe liegt, dass die Stromproduzenten die Preise von EUAs seit dem Start des EU EHS zumindest teilweise an ihre Kunden weiterreichen. Aus Sicht der Stromproduzenten ist es unerheblich, ob sie die Zertifikate kostenlos zugeteilt bekommen oder kaufen müssen. Die Zertifikate haben einen Wert und deren Verbrauch muss somit aus kaufmännischer Sicht verrechnet werden. Dieser Durchreicheffekt ist allerdings bei der Verwendung von Spotpreisen für Strom kaum festzustellen, da Spotpreise im Strommarkt durch Saisonalitäten und extreme Sprünge geprägt sind.²⁰ Daher scheint es erfolgversprechender, CO₂-Preise mit Terminpreisen für Strom zu vergleichen, die nicht von kurzfristigen Störungen auf Grund der Nicht-Lagerbarkeit von Strom verzerrt sind.

Die bereits erwähnte Abbildung 3.4 zeigt den Zusammenhang eindrucksvoll. Neben EUA-Preisen und Fuel-Spreads sind dort auch die Preise für den Phelix Baseload Stromfuture mit Lieferung im Kalenderjahr 2007 aufgetragen. Durch die Lieferdauer von einem Jahr ist dieser Stromfuture durch keine Saisonalitäten verzerrt. Der Korrelationskoeffizient für die ersten Differenzen beider Zeitreihen liegt bei 0,68 (entsprechend einem Bestimmtheitsmaß von 0,47) und ist auf dem 1%-Niveau signifikant von null verschieden.²¹ Da bekannt ist, wie viele EUAs bei der Erzeugung

¹⁸DAX, Morgan Stanley Europe/World Index und S&P 500 sind Aktienindizes, der Morgan Stanley Euro Credit Index bezieht sich auf den Anleihenmarkt.

¹⁹Getestet wurde hier die Korrelation zwischen SO₂-Renditen und Renditen des S&P 500, NASDAQ, Russell 2000, Russell 3000, US T-Bill sowie von Gold.

²⁰Ein weiterer Grund für die geringe Korrelation kann auch darin bestehen, dass Daskalakis, Psychoyios und Markellos (2006) für ihre Analyse Strompreise von der Nord Pool verwenden. Der dort gehandelte Strom wird in einem Kraftwerkspark mit hohem Pumpspeicher- und Wasserkraftanteil erzeugt, vgl. Holler und Haberfellner (2006). Zu den Besonderheiten des Strommarktes vgl. z. B. Geman (2005), S. 251ff., und Seifert und Uhrig-Homburg (2006).

²¹Für die Berechnung des Korrelationskoeffizienten wurden Preise von der EEX für den Zeitraum 9. März 2005 - 27. Dezember 2006 verwendet.

von Strom in Abhängigkeit des verwendeten Brennstoffes benötigt werden, kann der durchschnittliche Bedarf an EUAs in der Stromerzeugungsbranche berechnet werden. Basierend auf dem europäischen Kraftwerksmix ermittelt z. B. Franke (2005) einen Bedarf von ca. 0,425 EUAs je erzeugter Megawattstunde. Die Regression der ersten Differenzen der beiden Zeitreihen für CO₂- und Strompreise ergibt einen deutlich signifikanten Regressionskoeffizienten, der mit 0,54 relativ nahe an diesem Wert liegt und deutlich den Einfluss von CO₂- auf Strompreise belegt. Auch Bauer und Zink (2005) sowie Genoese et al. (2007) kommen zum Schluss, dass die Kosten für CO₂ zum großen Teil als Opportunitätskosten in Strom eingepreist werden. Da der Großteil der Zertifikate kostenlos zugeteilt wurde, spricht man in diesem Zusammenhang oft von den so genannten „Windfall-Profits“ der Strombranche.²²

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass viele Gemeinsamkeiten im Preisverhalten von EUAs und herkömmlichen Commodities bestehen. Der EUA-Preis wird prinzipiell durch fundamentale Angebots- und Nachfragefaktoren bestimmt. Die Nachfrage nach Emissionszertifikaten wird durch Faktoren bestimmt, die auch von anderen Commoditymärkten bekannt sind, wie z. B. Brennstoffpreise, Wetter und Wirtschaftswachstum. Die Angebotsseite wird jedoch maßgeblich vom Regulator beeinflusst, was bisher in dieser Ausprägung kaum auf Commoditymärkten beobachtbar war. Mit Finanzinstrumenten teilen EUAs die Eigenschaften des freien Handels und der verlustfreien und bis auf Kontoführungsgebühren kostenlosen Lagerbarkeit innerhalb der Handelsperioden.

Die regulatorischen Besonderheiten könnten trotzdem zu deutlich anderen statistischen Eigenschaften von EUAs im Vergleich zu Finanzinstrumenten und Commodities führen. So wäre auf Grund der Strafzahlungen für zu wenig eingereichte EUAs eine Preisobergrenze denkbar. Eine theoretisch korrekte maximale Preisobergrenze wäre z. B. der Gegenwartswert aller zukünftig möglichen Strafzahlungen. Darüber hinaus kann in der ersten Handelsperiode der aktuelle Preis eines EUAs niemals über die Summe aus der Strafzahlung von EUR 40 und dem diskontierten aktuellen Terminpreis für ein EUA aus der nächsten Handelsperiode steigen. Wäre der aktuelle EUA-Preis höher, würde ein Verkauf von EUAs bei gleichzeitigem Abschluss eines Terminkontrakts und der Bereitschaft, die Strafe zu bezahlen, eine risikolose Arbitragemöglichkeit darstellen. Davon abgesehen ist unklar, wie sich EUA-Preise

²²Vgl. zum Einfluss von CO₂-Preisen auf Strompreise auch Levy (2005) und Sijm, Neuhoff und Chen (2006).

am Ende der ersten Handelsperiode verhalten werden. Ist das Angebot größer als die Nachfrage, wird der Preis gegen null gehen, da EUAs aus der ersten Periode dann verfallen. Wenn die Nachfrage das Angebot übersteigt, wird der Preis rasant ansteigen und gegen die mögliche Preisobergrenze laufen.

3.2 Gestaltung von CO₂-Derivaten

Wie vorgestellt existieren mittlerweile sowohl Spot- als auch Terminmarktbörsen im EU EHS. Nach der Analyse des Marktumfelds und der Preisdynamiken im CO₂-Handel soll nun diskutiert werden, ob langfristig über Forwards und Futures hinaus CO₂-Derivate denkbar sind und welche Formen diese annehmen können. Dazu werden zunächst die in der Literatur üblichen Herangehensweisen für die Beurteilung der Erfolgchancen von Derivaten vorgestellt. Eine Diskussion der speziellen Bedürfnisse der Teilnehmer am Emissionshandel bildet dann die Grundlage für die Beurteilung der Anwendbarkeit dieser Herangehensweisen im EU EHS. Eine Vorstellung möglicher Derivate im EU EHS bildet den Abschluss, bevor in Abschnitt 3.3 die Ergebnisse der Expertenbefragung zum CO₂-Handel und zu CO₂-Derivaten vorgestellt werden.

3.2.1 Erfolgsfaktoren derivativer Instrumente

Der Abschluss von derivativen Verträgen führt generell dazu, dass Risiken von einer Vertragspartei auf eine andere übertragen werden. Gründe für den Handel mit Derivaten sind insbesondere Spekulation, Ausnutzung von Arbitragemöglichkeiten im Markt und Hedging, also das Absichern von Risiken. In Standardmodellen der Finanztheorie ist Hedging für Unternehmen allerdings nicht wertsteigernd, solange Finanzmärkte als perfekt angenommen werden.²³ In der Realität beobachtet man dennoch, dass Unternehmen Hedging-Instrumente für ihr Risikomanagement einsetzen. Gründe dafür können Marktunvollkommenheiten wie z. B. Insolvenzkosten, Kosten für Überwachung und Kontrolle, Transaktionskosten, ein konvexer Steuerungsverlauf oder auch externe Rating-Vorgaben sein.²⁴ Um die Erfolgchancen von

²³Vgl. Modigliani und Miller (1958).

²⁴Vgl. z. B. Brown und Toft (2002), S. 1283f.

derivativen Instrumenten beurteilen zu können, müssen daher immer auch die Besonderheiten des Marktes und die Ziele der Marktteilnehmer analysiert werden.

Wenn von einem erfolgreichen Derivat gesprochen wird, ist zunächst eine Definition von Erfolg notwendig. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf standardisierten Derivaten, wie sie z. B. an Börsen gehandelt werden können. Individuelle, an die Kontrahenten direkt angepasste Verträge werden nicht betrachtet. Für sie müssen individuell angepasste Erfolgsmaßstäbe angelegt werden. Als Erfolgsmaßstab kommen viele Indikatoren in Frage, wie z. B. Akzeptanz bei Händlern und Investoren, Überlebensdauer, Handelsvolumen oder Open Interest in Verträgen.²⁵ In der Regel ist es jedoch das Ziel der Entwickler von derivativen Finanzkontrakten, zusätzliche Erträge zu generieren. Aus diesem Grund wird als empirisch beobachtbares Maß häufig das Handelsvolumen zur Beurteilung des Erfolgs eines Derivats herangezogen. Wenn nachfolgend nicht anders erwähnt, beziehen sich die Erfolgchancen eines Derivats immer auf das potenzielle Handelsvolumen.

Grundsätzlich finden sich in der Finanzmarktliteratur historisch bedingt zwei Herangehensweisen bezüglich der Konstruktion und der Beurteilung der Erfolgchancen von Derivaten. Zum einen werden die Eigenschaften des zu Grunde liegenden Marktes analysiert, zum anderen wird der Fokus auf die Vertragsgestaltung selbst gelegt.²⁶

Eigenschaften des zu Grunde liegenden Marktes

Der erste Ansatz versucht, von den Besonderheiten des zu Grunde liegenden Marktes auf die Erfolgchancen von Derivaten rückzuschließen.²⁷ Dazu werden typische Eigenschaften von Underlyings gesucht, die positiv mit Erfolgchancen von Derivaten korrelieren. Empirische Belege für einen positiven Zusammenhang finden sich

²⁵Vgl. z. B. Black (1985), S. 88ff., und Duffie (1995), S. 4.

²⁶Vgl. z. B. Black (1985), S. 12, und Pennings und Meulenberg (1999). Diese Einteilung wird in ähnlicher Weise auch von Dresig (2000), S. 10, verwendet, wobei er zwischen der Abkopplung der Risikokomponenten durch unterschiedliche Grundmuster von Kontraktformen und der Art der gehandelten Risiken, also der Frage nach neuartigen Underlyings, unterscheidet. Für einen ausführlichen Überblick zu Finanzinnovationen im Allgemeinen siehe auch Duffie (1995). Generell steht bei den genannten Autoren wie auch in der nachfolgenden Diskussion die Frage im Vordergrund, welche Derivate in welcher Ausgestaltung Erfolgchancen haben. Die Frage, wie Märkte für solche Derivate gestaltet und weiterentwickelt werden können, um Angebot und Nachfrage optimal in Transaktionen zusammenzuführen und abzuwickeln, ist unter anderem Gegenstand der Forschungsrichtung „Market Engineering“, vgl. z. B. Weinhardt et al. (2006), S. 5f.

²⁷Die meisten Arbeiten zu Erfolgchancen von Derivaten beziehen sich auf Futureskontrakte, welche neben Forwardkontrakten in einem reifenden Markt typischerweise die ersten Instrumente sind, die über den reinen Spothandel hinausgehen.

insbesondere für eine hohe Preisvolatilität des Underlyings, für dessen Homogenität (z. B. in Qualität und Form) sowie für die Liquidität und Größe des Spotmarktes.²⁸ Weitere Eigenschaften, für die häufig ein positiver Zusammenhang vermutet wird, sind z. B. Haltbarkeit, einfache Lagerbarkeit und geringe Lieferkosten.²⁹ Im Lauf der Zeit hat sich allerdings gezeigt, dass viele der Eigenschaften für sich genommen keine zwingende Voraussetzung für Erfolg sind. Als Beispiel seien börsengehandelte Futures auf Strom genannt. Strom ist ein Underlying, das nur mit sehr großen Verlusten gelagert werden kann.³⁰

Abgesehen von den physischen Eigenschaften eines Underlyings ist auch das Vorhandensein eines Hedging-Bedarfs im Markt vorteilhaft für die Einführung von erfolgreichen Derivaten. Nur wenn ein Hedging-Bedarf besteht, werden sich die Inhaber bzw. Produzenten eines Underlyings aktiv am Markt beteiligen und so die Liquidität erhöhen.³¹

Vertragsgestaltung

Die Eigenschaften des zu Grunde liegenden Marktes sind für die Entwickler neuer Derivate praktisch nicht veränderbar. Der Handlungsspielraum beschränkt sich meist auf die Suche und Auswahl eines geeigneten Marktes. Durch die Vertragsgestaltung kann allerdings aktiv beeinflusst werden, inwieweit neue Derivate die Bedürfnisse von Spekulanten und Hedgern erfüllen und entsprechend Handelsvolumen anziehen. Die Schwierigkeit hierbei ist, zwischen Hedging-Effektivität und Liquidität abzuwägen. Je individueller ein Vertrag auf die Hedging-Bedürfnisse einer bestimmten Gruppe abgestimmt ist, desto kleiner wird das Handelsinteresse in diesem Vertrag sein. Als Folge entstehen zusätzliche Kosten der Illiquidität. Entsprechend ist bei der Gestaltung neuer Derivate zu berücksichtigen, inwieweit am Markt bereits alternative Hedging-Möglichkeiten bestehen (Cross-Hedging). Wenn bereits Verträge gehandelt werden, die eine hohe Korrelation zum abzusichernden Risiko des Unternehmens aufweisen, haben es neue Verträge schwer, Liquidität anzuziehen, wenn sie nicht deutlich stärker mit diesem Risiko korrelieren.³²

²⁸Vgl. z. B. Black (1985), Brorsen und Fofana (2001) und Pennings und Leuthold (1999).

²⁹Vgl. z. B. Black (1985).

³⁰In Deutschland werden Stromfutures an der EEX (<http://www.eex.de>) gehandelt.

³¹In einem theoretischen Rahmen wurde dies z. B. von Cuny (1993) und Duffie und Jackson (1989) gezeigt. Empirische Hinweise auf diese Sichtweise finden sich in Silber (1981)

³²Vgl. z. B. Black (1985) und Johnston und McConnel (1989).

Bei der Gestaltung der Derivate ist zwischen liquiden und illiquiden Underlyings zu unterscheiden:

- **Illiquides Underlying:** Bei sehr illiquiden oder gar nicht gehandelten Underlyings ist eine Bewertung etwaiger derivativer Instrumente schwierig, da eine Duplikation des zu Grunde liegenden Risikos in der Regel kaum möglich ist. Beispiele für solche Derivate sind Katastrophenanleihen (Catbonds) oder Wetterderivate.³³ Der Fokus der Vertragsgestaltung liegt eher auf Hedging-Bedürfnissen als auf Liquidität und die Verträge weisen häufig Parallelen zu Versicherungen auf.
- **Liquides Underlying:** Ist ein Underlying liquide gehandelt, so stellt prinzipiell die Konstruktion und Bewertung von Derivaten auf solche Underlyings kein großes Problem dar. Um ein hohes Handelsvolumen zu erreichen, werden die Vertragsdetails mit dem Ziel ausgestaltet, einen möglichst großen Kreis an Marktteilnehmern anzusprechen. Wie Black (1985) auch empirisch zeigt, ist dabei der zusätzliche Hedging-Nutzen über bereits am Markt verfügbare Produkte von zentraler Bedeutung.³⁴ Bezüglich der Detailgestaltung der Derivate selbst ist allerdings aus allgemeiner theoretischer Sicht für den konkreten Einzelfall wenig abzuleiten. Stattdessen finden sich in der Literatur viele Beiträge, die einzelne Aspekte der Vertragsgestaltung abdecken, wie z. B. Lieferoptionen zur Vermeidung von Engpässen, physische versus finanzielle Abwicklung, Vertragsgröße, Tick Size, Basispreis für Optionen, Laufzeiten, etc.³⁵ Bei der Neuentwicklung von Derivaten müssen allerdings alle Aspekte simultan betrachtet werden.³⁶ In der Praxis werden Börsen und andere Handelsplattformen den Hedging-Bedarf und Marktkorrelationen analysieren und danach mit Marktteilnehmern über präferierte Ausgestaltungsoptionen sprechen.

³³Vgl. z. B. Barriou und El Karoui (2002), Barriou und El Karoui (2004) und Silvestro und Vargiolu (2002).

³⁴Vgl. Black (1985), S. 169ff.

³⁵Vgl. zu verschiedenen Aspekten der Vertragsgestaltung von Derivaten z. B. Johnston und McConnell (1989), Pennings und Meulenberg (1999), Tashjian (1995), Bollen, Smith und Whaley (2002), Chen und Locke (2004), Cuny (2006) und Fehle (2006).

³⁶Bogetoft und Olesen (2002) versuchen beispielsweise für den Landwirtschaftssektor einen ganzheitlichen Ansatz für die Vertragsgestaltung zu entwickeln. Sie erstellen hierzu eine Liste mit 10 Faustregeln zur optimalen Vertragsgestaltung, die zudem untereinander interdependent sind. Bogetoft und Olesen (2002), S. 202, stellen allerdings auch fest, dass Verträge in der Praxis teilweise sehr fortschrittlich sind und die Rolle der Forschung dann primär darin liegt, beobachtete Vertragsmuster zu erklären.

Die bisher beschriebenen Ansätze untersuchen zwar Marktfriktionen, gehen aber von rationalen Marktteilnehmern aus. Ein weiterer Zweig der Literatur beschäftigt sich mit der Frage, wie sich davon abweichend verhaltenswissenschaftliche Erkenntnisse auf die Erfolgchancen von Verträgen auswirken. So wird z. B. nach der Prospekttheorie angenommen, dass Investoren Gewinne und Verluste unterschiedlich und relativ zu einem Referenzpunkt bewerten, wohingegen in der klassischen Portfoliotheorie für Investoren nur das Nettoergebnis relevant ist.³⁷ Dies kann natürlich Einfluss auf die Vertragsgestaltung haben. Zudem wird versucht, den Entscheidungsfindungsprozess der Marktteilnehmer bei der Vertragsgestaltung zu berücksichtigen. Generell allerdings ist der verhaltenswissenschaftliche Ansatz noch weit davon entfernt, einen in sich geschlossenen theoretischen Rahmen zu bilden und über die Beschreibung einzelner Phänomene hinaus normative Aussagen zu treffen.³⁸

3.2.2 Bedürfnisse von Marktteilnehmern im EU EHS

Um die Erfolgchancen von CO₂-Derivaten beurteilen zu können, ist zunächst ein Verständnis der Risiken im EU EHS und der Ziele der Marktteilnehmer notwendig.

3.2.2.1 Risiken im EU EHS

Teilnehmer am EU EHS sehen sich mit den auch von anderen Finanz- und Commoditymärkten bekannten Risiken, wie z. B. Preis- oder Volumenrisiko, konfrontiert und müssen diese managen. Darüber hinaus gibt es auch spezifische Risiken im Emissionshandel, die von anderen Märkten weniger bekannt sind.

- **Preisrisiko:** Das Preisrisiko resultiert aus der Unsicherheit zukünftiger Zertifikatspreise. Gründe hierfür sind, wie bereits erwähnt, unter anderem Unsicherheiten bezüglich regulatorischer Rahmenbedingungen, Brennstoffpreisen, Wirtschaftswachstum oder Wetter. Wenn Unternehmen längerfristige Projekte planen, können sie zwar die voraussichtlich zusätzlich benötigte Menge an Zertifikaten bestimmen, wissen aber nicht, zu welchem Preis diese in der Zukunft zu kaufen sein werden.

³⁷Vgl. z. B. Shefrin und Statman (1993).

³⁸Vgl. z. B. Pennings und Leuthold (2001).

- **Volumenrisiko:** CO₂-regulierte Unternehmen sehen sich zusätzlich einem Volumenrisiko ausgesetzt, wenn ihr Emissionsvolumen nicht sicher planbar ist. Wenn sie unerwartet mehr emittieren, müssen sie Zertifikate nachkaufen. Das Volumenrisiko kann sowohl durch externe, vom Unternehmen nicht beeinflussbare als auch durch individuelle, selbstverschuldete Faktoren entstehen. Beispiele für externe Faktoren sind Nachfrageschwankungen auf Grund von Änderungen im Wirtschaftswachstum, im Wetter, im Fuel-Spread oder in der Brennstoffqualität.³⁹ Als externer Faktor können auch regulatorische bzw. politische Unsicherheiten gesehen werden, z. B. wenn Unternehmen vor der endgültigen Zuteilung nicht sicher wissen, welcher Anteil der CO₂-Emissionen durch die Anfangsallokation bereits abgedeckt ist. Individuelle Faktoren sind z. B. die tatsächliche Realisierung von emissionsmindernden Projekten oder die rechtliche Anerkennung von Emissionseinsparungen. Das Volumenrisiko auf Grund der externen Faktoren korreliert in der Regel mit dem Preisrisiko, da eine insgesamt gesteigerte Nachfrage nach EUAs auch zu gesteigerten Preisen führen wird.
- **Reputationsrisiko:** Eine Besonderheit des Emissionsmarktes ist das Reputationsrisiko. In der Öffentlichkeit könnte es sehr kritisch gesehen werden, wenn ein Unternehmen seine Emissionsreduktionsziele allein durch den Zukauf von Emissionszertifikaten erreichen möchte oder gar auf Grund einer zu riskanten Handelsstrategie am Ende der Handelsperiode nicht genügend Zertifikate besitzt und eine hohe Strafzahlung leisten muss. Das Unternehmen würde dann wahrscheinlich als Umweltsünder angeprangert werden, was letztlich zum Verlust von Kunden und damit von Umsatz führen würde.
- **Operationelles Risiko:** Hierunter werden insbesondere Verluste auf Grund von inadäquaten oder fehlerhaften Prozessen, fehlerhaften Systemen sowie menschlichem Fehlverhalten verstanden. Dieses Risiko ist im EU EHS erhöht, da der Markt noch sehr jung ist und Erfahrungswerte der Marktteilnehmer mit einem solchen Markt fast vollständig fehlen.

Weitere von anderen Märkten bekannten Risiken, wie etwa Basis-, Kontrahenten- oder Liquiditätsrisiko sind natürlich auch im EU EHS von Bedeutung.

³⁹Die Brennstoffqualität ist nur bei Messung statt Berechnung der Emissionen relevant.

3.2.2.2 Ziele der Marktteilnehmer im EU EHS

Wie bereits erwähnt, lassen sich Marktteilnehmer am EU EHS in die Gruppen CO₂-regulierte Unternehmen, nicht CO₂-regulierte Händler und Investoren, reine Handelsplattformen sowie CO₂-Risikointermediäre unterteilen. Um nachfolgend besser beurteilen zu können, welche Formen von CO₂-Derivaten im EU EHS sinnvoll sind, seien die unterschiedlichen Ziele dieser Marktteilnehmergruppen herausgearbeitet:

- **CO₂-regulierte Unternehmen:** Durch das EU EHS sind CO₂-regulierte Unternehmen gezwungenermaßen neuen Risiken ausgesetzt. Da sie zwischen aktiver CO₂-Vermeidung und dem Kauf von Emissionsrechten wählen können, brauchen diese Unternehmen zukünftig eine synchronisierte CO₂-Vermeidungs- und Handelsstrategie.⁴⁰ Problematisch dabei ist, dass sowohl der zukünftige Preis als auch das benötigte Volumen für CO₂-regulierte Unternehmen eine unsichere Größe darstellt.

Hauptinteresse der CO₂-regulierten Unternehmen wird sein, die zusätzlich entstandenen Risiken abzusichern. Die Risiken können zum Teil durch operative Flexibilität und Vertragsgestaltung abgedeckt werden. Wenn z. B. Kosten für CO₂ weitergegeben werden können, existiert ein natürlicher Hedge gegen das CO₂-Preis- und Volumenrisiko. Vor allem aber können derivative Instrumente zur Absicherung insbesondere des Preisrisikos eingesetzt werden. Unternehmen sind dann an niedrigen Transaktionskosten, einem möglichst guten Hedge und der Vermeidung zusätzlicher Risiken, wie etwa dem Kontrahentenrisiko, interessiert. Zudem sind CO₂-regulierte Unternehmen in der Regel daran interessiert, am Ende der Transaktion das Zertifikat zu erhalten, da sie dieses zur Erfüllung der Auflagen einreichen müssen.

- **Nicht CO₂-regulierte Händler und Investoren:** Zum einen gibt es Spekulanten und Arbitrageure, die versuchen in einem jungen Markt hohe Gewinnchancen auszunutzen (z. B. Hedgefonds). Zum anderen können auch klassische Investoren versuchen, die Diversifikationseffekte aus der Berücksichtigung von CO₂ in ihren Anlageportfolien zu nutzen. Allen ist gemein, dass sie an liquiden Märkten, stabilen regulatorischen Bedingungen und im Fall von Spekulanten und Investoren an adäquaten Risikoprämien interessiert sind.

⁴⁰Vgl. Ehrhart et al. (2003), S. 580.

- **Reine Handelsplattformen:** Auch für reine Handelsplattformen, wie z. B. Börsen, ist es das Hauptziel, den eigenen Nutzen zu maximieren.⁴¹ Da sie in der Regel kein eigenes Risiko übernehmen, werden sie demzufolge ein hohes Handelsvolumen mit standardisierten Instrumenten anstreben, um mit Transaktionsgebühren Gewinne zu generieren.
- **Risikointermediäre:** Das Risiko der aktiven Beteiligung in jungen Märkten ist zwar hoch, bietet andererseits aber auch hohe Chancen auf lukrative Zusatzverdienste. Risikointermediäre wie Banken und Versicherungen können versuchen, ihr spezifisches Wissen, wie etwa zum Thema Risikoabschätzung, Risikomanagement oder Kontrahentenrisiko, zu nutzen, um zusätzliche Gewinne zu generieren. Sie sind dabei ebenfalls an liquiden Märkten interessiert, da sie in der Regel versuchen werden, eingegangene Risiken möglichst direkt an anderer Stelle wieder abzusichern.

3.2.3 Diskussion möglicher Ausgestaltungsoptionen von CO₂-Derivaten

Auf Grund der bisherigen Diskussion der Erfolgsfaktoren von derivativen Instrumenten und der Bedürfnisse von Marktteilnehmern im EU EHS lässt sich die Frage nach der Auswahl eines geeigneten Underlyings im Emissionshandel eindeutig beantworten. Die zusätzlichen Risiken für CO₂-regulierte Unternehmen liegen hauptsächlich in der Volatilität der EUA-Preise begründet. Das EUA erfüllt zum einen die meisten der Erfordernisse eines geeigneten Underlyings für derivative Finanzinstrumente. Zum anderen würde jedes andere Underlying die Hedging-Effektivität massiv reduzieren. Beispiele für alternative Underlyings sind CERs/ERUs, Brennstoffe oder künstliche CO₂-Emissionsindikatoren, welche naturgemäß alle deutlich weniger mit dem CO₂-Risiko korrelieren als das EUA selbst.

Im Nachfolgenden wird direkt die Vertragsgestaltung möglicher Derivate auf EUAs diskutiert. Hierzu werden zunächst mögliche derivative Instrumente basierend auf Emissionszertifikaten und deren relevante Ausgestaltungsmerkmale vorgestellt. Die Beurteilung der Erfolgchancen abhängig vom Typ des Derivats und seiner speziellen Ausgestaltungsmerkmale erfolgt dann im Rahmen einer Expertenbefragung.

⁴¹Vgl. z. B. Black (1985), S. 61ff.

Prinzipiell kommen alle typischen Derivate, wie man sie auch von anderen Märkten kennt, für das EU EHS in Frage:

- **Forwards und Futures:** Forwards auf EUAs sind geeignete Instrumente zur Sicherung des zukünftigen Preises aus heutiger Sicht. Sie sind somit für CO₂-regulierte Unternehmen eine natürliche Alternative zum Banking. Standardisierte Futures sind ähnlich, allerdings auf Grund des Marktbewertungsansatzes (Marking to Market) mit zusätzlichem Zinsrisiko verbunden. Sie haben dafür kein Kontrahentenrisiko, da die Börse für ihre Erfüllung sorgt. Im Falle des EU EHS ist insbesondere interessant, ob solche Terminkontrakte von den Marktteilnehmern auch mit Laufzeiten über die Grenze zwischen den Handelsperioden hinaus dauerhaft angenommen werden, da EUAs für die 2. Handelsperiode als entsprechendes Underlying noch nicht gehandelt werden. Weitere wichtige Merkmale sind Lieferoptionen, physisches oder finanzielles Settlement und Vertragsgröße.
- **Optionen:** Auch Optionen können zur Sicherung zukünftiger Preise genutzt werden. Im Gegensatz zu Forwards und Futures, mit denen das Preisrisiko nahezu vollständig eliminiert werden kann, haben Optionen eher den Charakter einer Versicherung mit einer vorab zu zahlenden Prämie.⁴² Optionen sind gegenüber Forwards und Futures unter Umständen bei Vorhandensein von Volumenrisiko von Vorteil. Je nach Korrelation zwischen Preis- und Volumenrisiko kann die Abhängigkeit des Ertrags eines Unternehmens vom Preis des Underlyings eine nichtlineare Form annehmen. Für das Hedging kann in einem solchen Fall ein nichtlineares Instrument wie eine Option besser geeignet sein, als ein rein lineares Instrument, wie es Forwards und Futures sind.⁴³ Da CO₂ in der Regel im Produktionsprozess anfällt, ist im EU EHS das Vorhandensein von Volumenrisiken wahrscheinlich.

Optionen können sowohl auf EUAs direkt als auch auf Forwards oder Futures geschrieben werden. Auch so genannte Quantity-triggered Optionen sind denkbar, wie sie z. B. seit 2002 in den USA außerbörslich auf Rohöl angeboten werden.⁴⁴ In diesem Fall ist die Auszahlung einer Verkaufsoption auf den

⁴²Vgl. Hull (1998), S. 7.

⁴³Vgl. z. B. Brown und Toft (2002).

⁴⁴Vgl. z. B. Nam, Tucker und Wei (2002).

Rohölpreis abhängig von der Produktionsmenge der OPEC. Ähnlich könnte man die Ausübung einer Option auf EUAs an tatsächliche CO₂-Emissionen in Europa binden. Vorteil einer solchen Option wäre es, dass damit Volumenrisiken besser abgesichert werden können. Dazu bedarf es jedoch eines bereits sehr liquiden und erfahrenen Marktes.

Eine wichtige Frage bei der Ausgestaltung der Optionen betrifft die Art des Ausübungsrechts. Während im Aktienmarkt eher amerikanische Optionen üblich sind, kann dies nicht einfach auf das EU EHS übertragen werden. EUAs werden nur einmal im Jahr von den CO₂-regulierten Unternehmen benötigt. Zudem setzen amerikanische Optionen bei physischer Lieferung einen sehr liquiden Spotmarkt voraus, da jederzeit eine Lieferung des Underlyings möglich sein muss. Die einzigen bisher an einer Börse eingeführten Optionsverträge der ICE/ECX sind von europäischer Natur.⁴⁵

- **Swaps:** Ein Swap bezeichnet ein Geschäft, bei dem Ansprüche auf unterschiedliche Zahlungsströme oder Güter getauscht werden. Für das EU EHS interessant sind vor allem Laufzeit-Swaps. Bei diesen auch als Vintage-Swaps bezeichneten Geschäften werden Ansprüche auf Emissionszertifikate für unterschiedliche Jahre getauscht. Solche Vintage-Swaps können allerdings relativ einfach durch das Eingehen entsprechender Positionen in Forwards nachgebildet werden.
- **Hybride Produkte:** Wie in anderen Finanz- und Commoditymärkten lassen sich Emissionszertifikate auch mit weiteren Produkten kombinieren. Ein Beispiel hierfür ist so genanntes CO₂-neutrales Erdgas. Bei diesem Produkt werden mit dem Erdgas die entsprechend seinem CO₂-Gehalt bei der Verfeuerung benötigten Emissionszertifikate gleich mitgeliefert. Dies ist allerdings eher aus Gründen des Marketings interessant, da beide Produkte problemlos auch getrennt gekauft werden können. Das russische Erdgasförderunternehmen Gazprom hat kürzlich tatsächlich Pläne angekündigt, auf Wunsch die Lieferung von Erdgas nach Europa mit Emissionszertifikaten aus CDM-Projekten zu bündeln.⁴⁶

⁴⁵Vgl. auch Tabellen 3.1 und 3.6.

⁴⁶Vgl. Kramer (2007).

- **Verbriefungen:** Unternehmen können sich an Projekten beteiligen, die nach dem Kyoto-Protokoll Emissionszertifikate generieren. Die Zertifikate werden dann entsprechend der Beteiligungen an die Unternehmen verteilt. Somit können sich z. B. auch Mittelständler mit zusätzlichen Zertifikaten versorgen.⁴⁷ Ein zusätzlicher Pluspunkt ist die Diversifizierung dieser Projekte, wenn sie in Investmentfonds zusammengefasst werden und so das aggregierte Volumenrisiko bei der Erzeugung der Zertifikate verringert wird. Für große, internationale Unternehmen mag das weniger interessant sein, da gleichzeitig weniger Kontrolle besteht und die Kosten möglicherweise höher sind, als wenn sie die Projekte eigenverantwortlich durchführen. Die Risiken sind im Vergleich zum Handel mit EUAs wesentlich größer, da ex ante meist unsicher ist, wieviele Emissionszertifikate aus Vermeidungsprojekten tatsächlich generiert werden. Zudem sind solche Projekte oft mit einem Kontrahentenrisiko von Unternehmen aus Entwicklungsländern behaftet.⁴⁸

Bisher existiert praktisch keine Literatur, aus dem sich ein allgemeingültiger Rahmen ableiten ließe, um die Fragen der konkreten Ausgestaltung von Derivaten im EU EHS zu beantworten. Um dennoch eine Einschätzung für die Erfolgchancen der beschriebenen CO₂-Derivate und eine Beurteilung von möglichen Ausgestaltungsmerkmalen dieser Derivate zu erhalten, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit im Jahr 2005 eine Expertenbefragung hierzu durchgeführt.⁴⁹

3.3 Expertenbefragung zum Handel von CO₂ und zur Gestaltung von CO₂-Derivaten

Die Expertenbefragung fand im August und September 2005 statt. Zum Zeitpunkt der Befragung gab es somit erst seit ca. einem halben Jahr einen börslichen Handel von EUAs und bis auf Forwards und Futures gab es noch keine weiteren gehandelten Derivate auf EUAs. Vor diesem Hintergrund seien nun die Ergebnisse der Befragung zum Handel von CO₂ und zur Gestaltung von CO₂-Derivaten vorgestellt.

⁴⁷Vgl. z. B. Betz, Rogge und Schleich (2005), S. 38ff.

⁴⁸CDM-Projekte haben gerade zum Inhalt, Emissionsvermeidungsmaßnahmen in Entwicklungsländern durchzuführen.

⁴⁹Vgl. Uhrig-Homburg und Wagner (2006).

3.3.1 Methodik und Expertenauswahl

Die Expertenbefragung wurde mit Hilfe eines Interviewleitfadens durchgeführt. Dieser enthält hauptsächlich geschlossene Fragen mit einer jeweils siebenstufigen Skala, um die Meinung der Befragten zu den diskutierten Fragen zu messen. Die geschlossene Form hat den Vorteil, vergleichbare Antworten zu bekommen. Um das Wissen der Experten besser zu nutzen, wurden zudem offene Fragen zum Leitfaden hinzugefügt.

Auf Grund des noch sehr frühen Stadiums des Emissionsmarktes gab es relativ wenige Personen, die sowohl auf dem Gebiet des Emissionshandels als auch auf dem Gebiet derivativer Finanzinstrumente über fundiertes Expertenwissen verfügen. Um die Qualität der Ergebnisse zu steigern und trotz der relativ kleinen Stichprobe verwertbare Ergebnisse zu erhalten, wurden die Interviews alle entweder persönlich oder telefonisch durchgeführt. Dadurch konnten die Fragen bei Bedarf näher erklärt und die Antworten direkt während bzw. im Anschluss der Interviews diskutiert werden. Anhang C zeigt den Interviewleitfaden, wie er nach mehrmaligen Probedurchläufen letztlich für die Interviews verwendet wurde.⁵⁰ Der Interviewleitfaden wurde schließlich in englischer Fassung genutzt.

Insgesamt haben sich 25 Personen zu einem Interview bereit erklärt, wobei die Interviews im Durchschnitt zwischen ein und zwei Stunden dauerten. Die Ergebnisse wurden schriftlich festgehalten. An den Interviews nahmen unter anderem Mitarbeiter von drei europäischen CO₂-Börsen, drei deutschen Großbanken und vier großen Stromproduzenten aus Deutschland teil. Befragt wurden ausschließlich Mitarbeiter, die auf Grund ihrer Funktion im Unternehmen mit dem CO₂-Handel vertraut sind. Eine Zusammenfassung der teilnehmenden Interviewpartner gibt Tabelle 3.2.⁵¹ Für die Darstellung in Tabelle 3.2 wurden die Marktteilnehmergruppen Risikointermediäre sowie nicht CO₂-regulierte Händler und Investoren zusammengelegt, da außerhalb der CO₂-regulierten Unternehmen keine Investoren in CO₂ für die Teilnahme an den Experteninterviews gewonnen werden konnten.⁵²

⁵⁰Vgl. zur Gestaltung von Fragebogen und Auswahl von Interviewpartnern z. B. Kumar, Aaker und Day (2002).

⁵¹Einer der Interviewpartner nahm nur an einer offenen Diskussion teil, insgesamt standen also die Ergebnisse von 24 ausgefüllten Interviewleitfäden zur Auswertung zur Verfügung. Es wurde Anonymität bei der Veröffentlichung der Ergebnisse zugesagt.

⁵²Im Markt kursierten allerdings bereits 2005 erste Gerüchte darüber, dass Hedgefonds Interesse am CO₂-Markt zeigen, vgl. z. B. Kurdas (2005), S. 2.

Tabelle 3.2: Detaillierung Interviewpartner für Expertenbefragung.

Kategorie Marktteilnehmer	Beschreibung
CO ₂ -regulierte Unternehmen	8 Energieversorgungsunternehmen (darunter vier große Stromproduzenten aus Deutschland) 1 Stahlproduzent 1 Raffinerie
Reine Handelsplattformen	3 europäische CO ₂ -Börsen
Nicht CO ₂ -regulierte Händler und Investoren sowie Risikointermediäre	5 Banken (darunter drei deutsche Großbanken sowie eine für das Management eines Carbon-Fonds verantwortliche Bank) 2 Energie-/CO ₂ -Händler
Andere	3 Berater im Bereich Energie/CO ₂ * 1 Berater im Bereich Banken/Finanzhandel 1 Wissenschaftler im Bereich Energie

* Davon ein Interview lediglich als offene Diskussion.

3.3.2 Inhalt des Fragebogens und Ergebnisse der Befragung

Neben einer kurzen Einführung in Umfang und Ziel des Forschungsprojekts zu CO₂-Derivaten („Introduction of research project“) kann der Interviewleitfaden inhaltlich in vier Bereiche eingeteilt werden. Im ersten Teil werden die in Abschnitt 3.1.3 vorgestellten preisbeeinflussenden Faktoren nach ihrer Relevanz beurteilt („Risks in the EU ETS“). Dies dient vor allem auch als einfacher Einstieg in das Interview, da die Befragten diese Faktoren aus ihrer täglichen Arbeit kennen sollten.

Im zweiten Teil wird die Frage adressiert, ob wichtige Voraussetzungen im EU EHS erfüllt sind, so dass ein aktiver Handel stattfinden kann und das Preisrisiko von einem Marktteilnehmer auf den anderen übertragen werden kann. Es handelt sich hierbei um Voraussetzungen, die der Gestalter eines Derivats nicht aktiv beeinflussen kann („Risk related success factors“ und „Market participant related success factors“). Die Ergebnisse zu dieser Teilfrage werden nachfolgend nicht explizit vorgestellt. Zum einen sahen die Interviewteilnehmer bereits zum Zeitpunkt der Interviews im August und September 2005 bis auf die Frage nach der Liquidität des Underlyings praktisch alle Voraussetzungen als erfüllt an. Zum anderen hat die rasante Marktentwicklung im EU EHS diese Frage mittlerweile faktisch beantwortet. Mit einem durchschnittlichen täglichen Handelsvolumen in der Größenordnung von

4 - 5 Millionen Tonnen CO₂ über das Jahr 2006 hinweg kann das EU EHS kaum noch als ein illiquider Markt angesehen werden.⁵³

Im dritten Teil des Interviewleitfadens sollen Aussagen zu wichtigen Ausgestaltungsmerkmalen für Derivate auf CO₂-Emissionszertifikate beurteilt werden, die von einer Börse oder einem Marktplatz aktiv gestaltet werden können („Contract specific success factors“). Schließlich werden die Experten im letzten Teil nach ihrer Einschätzung der Erfolgchancen von Beispielen typischer CO₂-Derivate befragt („Example evaluation of derivatives in the EU ETS“).

3.3.2.1 Relevanz der Einflussfaktoren auf CO₂-Preise

Die Befragten sollten zunächst die in Abschnitt 3.1.3 vorgestellten preisbeeinflussenden Faktoren nach ihrer Bedeutsamkeit für das Preisrisiko von EUAs beurteilen, wobei Preisrisiko als Preisvolatilität interpretiert wird. Zur Bewertung der Faktoren konnten sie auf der siebenstufigen Skala Werte von „1: Play no role“ bis „7: Play important role“ vergeben. Zusätzlich wurde gefragt, ob andere, nicht erwähnte Faktoren den Preis beeinflussen. Tabelle 3.3 zeigt die Ergebnisse der Bewertung. Neben dem Median der Bewertung werden zusätzlich erstes und drittes Quartil angegeben, um die Verteilung der Antworten zu verdeutlichen.

Regulatorische Unsicherheiten mit einem Median von 7,00 und politische Risiken mit einem Median von 6,00 werden als sehr bedeutsam für die Preisentwicklung von EUAs angesehen. Für einen rein regulatorisch erzeugten Markt ist dies kaum überraschend. Die meisten Befragten ergänzten, dass zwar der regulatorische Rahmen der aktuellen Handelsperiode grob abgesteckt sei, insbesondere hinsichtlich der NAPs für die zweite Handelsperiode und der möglichen Weiterführung des Systems nach 2012 noch sehr große Unsicherheiten bestehen. Brennstoffpreise und das Wetter werden mit einem Median von 7,00 und 5,50 ebenfalls als bedeutsam für die Preisentwicklung eingeschätzt. Wie in Abschnitt 3.1.3 diskutiert, ist die empirische Datenlage in Bezug auf diese zwei Faktoren allerdings nicht eindeutig und gibt nur wenig Aufschluss über tatsächliche Zusammenhänge zum CO₂-Preis.

Mit einer Bewertung von 4,50 sind die befragten Experten skeptischer bezüglich des Compliance Buying. Die Interviews fanden noch vor dem ersten Einreichungstermin

⁵³Vgl. European Climate Exchange (2007b).

Tabelle 3.3: Bedeutsamkeit preistreibender Faktoren für das CO₂-Preisrisiko im EU EHS.

Preistreibender Faktor	Bedeutsamkeit*		
	1. Quartil	Median	3. Quartil
Regulatorische Unsicherheiten	6,00	7,00	7,00
Brennstoffpreise (Fuel-Spreads)	5,00	7,00	7,00
Politische Risiken	4,00	6,00	6,75
Wetter	4,25	5,50	6,00
Compliance Buying	3,25	4,50	5,75
Wirtschaftswachstum	3,00	4,50	5,50
Technologische Entwicklung	3,00	4,00	5,00
Technische Risiken	1,75	2,00	4,00

* 1: Spielt keine Rolle - 7: Spielt bedeutsame Rolle. Der Begriff Preisrisiko wird als Preisvolatilität interpretiert. Die Berechnung der Quartile erfolgt nach Freund und Perles (1987), Methode 1.

für EUAs statt. Wie in Abschnitt 3.1.3 erwähnt, gab es bisher keine Anzeichen dafür, dass ein verändertes Handelsverhalten durch den näherrückenden Einreichungstermin verursacht wird. Die Faktoren Wirtschaftswachstum und technologische Entwicklung werden als nicht so bedeutsam eingestuft. Auf Nachfrage wurde dies damit begründet, dass diese Faktoren sich kurzfristig wenig ändern bzw. gut vorhersehbar seien und daher für die aktuelle Preisentwicklung innerhalb einer Handelsperiode kaum Einfluss haben. Technische Risiken wurden nicht als bedeutsamer Faktor eingestuft, da technische Ausfälle auf europäischer Ebene und über die Dauer einer Periode hinweg kaum eine Rolle bezüglich tatsächlicher Emissionen spielen.

Weitere und von mehr als einem Experten genannte Einflussfaktoren auf CO₂-Preise sind die bereits angedeutete Möglichkeit der Marktmanipulation und operationelle Risiken. Unter operationellen Risiken seien im EU EHS insbesondere Fehler in den Handelssystemen für CO₂, Managementfehler in einem neuen Markt und die Nichtverfügbarkeit der nationalen Emissionsregister zu verstehen.

Neben der Bedeutsamkeit für das Preisrisiko wurde im Interview auch gefragt, inwieweit sich die preistreibenden Faktoren auf das individuelle Volumenrisiko von CO₂-regulierten Unternehmen auswirken, also auf unerwartete Änderungen in der Nachfrage nach EUAs. Wenig überraschend war die häufige Antwort, dass CO₂-Preise und individuelle Nachfrage stark korrelieren. So wird z. B. ein erhöhtes Wirtschaftswachstum oder ein heißer Sommer sowohl den CO₂-Preis als auch die indivi-

duelle Nachfrage vieler Marktteilnehmer erhöhen. Wie die Bezeichnung individuelles Volumenrisiko („Individual volume risk“) bereits andeutet, können die Ergebnisse dieser Teilfrage jedoch nicht repräsentativ für das EU EHS sein, weshalb auf eine detailliertere Darstellung verzichtet wird. So haben z. B. nur wenige Unternehmen die Möglichkeit, zwischen der Verwendung von Gas und Kohle bei der Stromerzeugung zu wählen. Für alle anderen Unternehmen beeinflusst der Faktor Brennstoffkosten zwar gemeinsam das Preisrisiko, aber eben nicht das individuelle Volumenrisiko.

3.3.2.2 Bewertung möglicher Ausgestaltungsoptionen von CO₂-Derivaten

Was sind typische Ausgestaltungsmerkmale, die ein auf EUAs basierendes Derivat haben sollte, um Handelsvolumen zu generieren? Um das zu beurteilen, wurde den Experten eine Liste mit Aussagen zu ausgewählten Aspekten der Ausgestaltung von CO₂-Derivaten vorgelegt. Diese konnten sie auf einer Skala von „1: Disagree Strongly“ bis „7: Agree Strongly“ bewerten. Tabelle 3.4 zeigt die Quartile der von den Befragten vergebenen Bewertungen. Diese werden nachfolgend zusammen mit den zusätzlich von den Experten gemachten Aussagen diskutiert.

Underlying: Wie bereits erwähnt, werden EUAs sowie mittlerweile auch Forwards und Futures auf EUAs relativ liquide im EU EHS gehandelt. Ein mit dem CO₂-Preisrisiko der Marktteilnehmer perfekt korreliertes Underlying gibt es also bereits und sollte daher auch als Underlying verwendet werden. Die hohen Bewertungen der ersten beiden Aussagen bestätigen, dass sowohl das EUA selbst als auch ein Forward oder Future auf EUAs geeignete Underlyings für derivative Kontrakte sind. Es wurde dabei mehrmals von den Interviewpartnern betont, dass in diesem Markt eine physische Lieferung der zu Grunde liegenden EUAs von großer Bedeutung sei, da die EUAs zur Erfüllung der CO₂-Auflagen gebraucht würden. Eine Verletzung der Auflagen des EU EHS hätte nicht nur finanzielle Folgen, sondern darüber hinaus auch eine rufschädigende Wirkung, was Kunden abschrecken könnte. Die Befragung der Experten fand statt, bevor die ersten Futures im Dezember 2005 zur Lieferung fällig wurden. Daraus ist erklärbar, dass teilweise eine leichte Präferenz für EUAs als Underlying erkennbar ist. In dem noch sehr jungen und unerfahrenen Markt herrschte möglicherweise noch ein leichtes Misstrauen gegenüber der sicheren Lieferung der EUAs bei Futureskontrakten vor.

Tabelle 3.4: Bewertung Ausgestaltungsmerkmale von CO₂-Derivaten im EU EHS.

Teilaspekt	Aussage	Zustimmungsgrad*		
		1. Quart.	Median	3. Quart.
Underlying	The CO ₂ certificate can be a good underlying.	5,00	6,50	7,00
	A future/forward on CO ₂ certificates can be a good underlying.	5,00	6,00	7,00
	There is no existing simple product in the spot or futures market suitable as underlying for a derivative.	1,00	1,00	1,00
New risks	When dealing with regulated emitters, counterparty risk has to be considered.	6,00	7,00	7,00
	When dealing with risk intermediaries, counterparty risk has to be considered.	6,00	7,00	7,00
	The industry in the EU ETS is used to deal with counterparty risk (e.g., within accounts receivable management).	3,50	5,00	6,25
	The liquidity of a potential derivative is more important than having a 100%-fitting hedge.	4,00	5,00	6,00
Maturity	Derivatives may have a maturity of a maximum of 1 year (end date within same compliance year).	1,00	1,00	1,25
	The maximum end date of a derivative must lie always within the current trading period (maximum maturity of 3 years in 2005, max. of 5 years in 2008).	1,00	4,00	6,00
	The maximum end date of a derivative should be 2012 (emission caps are only certain until 2012).	3,00	5,50	7,00
	There will be the need (and supply) to trade derivatives even for time horizons longer than 2012 (uncertain emission caps after 2012).	1,00	1,00	3,00

* „1: Stimme klar nicht zu“ bis „7: Stimme klar zu“. Die Berechnung der Quartile erfolgt nach Freund und Perles (1987), Methode 1.

Tabelle 3.4: Bewertung Ausgestaltungsmerkmale von CO₂-Derivaten im EU EHS (Fortsetzung).

Teilaspekt	Aussage	Zustimmungsgrad*		
		1. Quart.	Median	3. Quart.
Complexity	Only simple products like a plain vanilla future, option or swap will succeed in the market place.	5,00	6,00	6,63
	The more standardized the derivatives contract the better.	6,00	6,00	7,00
	There will also be success chances for more complex products (e.g., securitizations of certificates generated from pooled abatement projects).	4,00	5,50	6,00
Signaling	An aggressive marketing for the new derivative contracts is important to gain attention also from outside the group of regulated emitters.	2,00	2,00	6,00
	Price information on CO ₂ derivatives should be public.	5,50	7,00	7,00
Trading platform	There will be enough demand for a standardized product to justify an exchange for CO ₂ derivatives.	6,00	7,00	7,00
	The OTC market will be liquid enough to prevent the development of exchanges on CO ₂ derivatives.	1,00	2,00	3,00
	Exchanges will offer more liquidity to CO ₂ derivatives contracts than the OTC market.	2,88	4,00	5,00

* „1: Stimme klar nicht zu“ bis „7: Stimme klar zu“. Die Berechnung der Quartile erfolgt nach Freund und Perles (1987), Methode 1.

Neue Risiken: Die Nutzung von derivativen Kontrakten zu Hedging-Zwecken erzeugt auch neue Risiken, insbesondere kann ein Kontrahentenrisiko auftreten. Dies ist im Spothandel nicht der Fall. Tatsächlich sind sich die Befragten dieses Risikos bewusst und bestätigen mit einem Median von 7,00, dass das Kontrahentenrisiko im EU EHS beachtet werden muss. Dies spricht für börsengehandelte Derivate wie Futures im Vergleich zu OTC-Instrumenten. Die meisten Unternehmen haben klare Vorgaben, mit welchen Kontrahenten sie handeln dürfen und mit welchen nicht. Ein Befragter ergänzte, dies führe dazu, dass bisweilen die großen Energieversorgungs-

unternehmen in Deutschland als Intermediär zwischen zwei kleineren Unternehmen fungieren, die auf Grund dieser Vorgaben nicht direkt miteinander handeln können.

Bezüglich der Frage, ob die Marktteilnehmer im EU EHS das Know-how haben, mit dem Kontrahentenrisiko umzugehen, divergieren die Meinungen deutlich. Dies ist aus der großen Differenz zwischen dem ersten Antwortquartil mit 3,50 und dem dritten Quartil mit 6,25 ersichtlich. Erklärt werden kann dies dadurch, dass einerseits nur wenige große und erfahrene Marktteilnehmer gute Risikomanagementsysteme haben, diese aber andererseits für den Großteil des Handelsvolumens aufkommen. Die Beantwortung der Frage ist also davon abhängig, ob man vom Großteil der Marktteilnehmer oder vom Großteil des Handelsvolumens spricht.

Die Antwort auf die Frage, ob Liquidität wichtiger als ein perfekter Hedge sei, hängt davon ab, ob eher eine handelsgetriebene bzw. spekulative Sicht eingenommen wird oder ob eher die Erfüllung der regulatorischen Auflagen im Vordergrund steht. Mehrere Interviewpartner betonten, dass insbesondere kleine und mittlere Unternehmen im EU EHS praktisch nur aus Hedging-Aspekten am Handel teilnehmen. Sie können in der Regel mit einem einfachen Terminkontrakt ihr Preisrisiko zum Großteil eliminieren. CO₂-/Energiehändler und einige größere Unternehmen sind dagegen vor allem an Liquidität interessiert, um ihre CO₂-Positionen kontinuierlich anpassen zu können. Da die Beantwortung der Frage von der jeweiligen Perspektive abhängt, favorisieren die Antworten mit einem Median von 5,00 nur leicht die Liquidität.

Laufzeit: Die Befragten glauben, dass die maximale Laufzeit von CO₂-Derivaten entweder das Ende der ersten oder das Ende der zweiten Handelsperiode sei, mit einer leichten Präferenz für das Ende der zweiten Periode, wie am Median von 4,00 bzw. 5,50 ersichtlich. Allerdings war die Bandbreite an Antworten für keine andere Frage größer, wie an den Antwortquartilen zu erkennen ist. Der Grund wurde während der Gespräche mit den Experten klar. Man sollte hier unterscheiden zwischen linearen Derivaten, wie Forwards und Futures, und nichtlinearen Derivaten, wie z. B. Optionen. Für nichtlineare Derivate ist das Risiko auf Grund des wahrscheinlich anormalen, nicht vorhersehbaren Preisverhaltens während des Übergangs von der ersten zur zweiten Handelsperiode nochmals wesentlich höher als für lineare Derivate. Die Bewertung einer Option mit einer Laufzeit nahe dem Periodenende oder darüber hinaus wird daher als schwierig empfunden. Die Unterteilung in lineare und nichtlineare Derivate war in der Frage nach der Laufzeit nicht berücksichtigt.

Im Interviewleitfaden nicht enthalten war die Frage nach einer minimalen Laufzeit für CO₂-Derivate. Allerdings würde man im EU EHS Verträge mit Laufzeiten von einigen Tagen oder Wochen, wie man sie beispielsweise aus dem Strommarkt kennt, nicht erwarten. EUAs werden nicht kontinuierlich, sondern nur einmal im Jahr zur Einreichung benötigt. Handel zwischen diesen Terminen sollte nur der optimalen Umsetzung geplanter Positionen in EUAs oder schlicht der Spekulation dienen.

Komplexität: Zumindest zu Beginn des Handels mit EUAs haben nur einfache, standardisierte Produkte eine Chance, Handelsvolumen anzuziehen. Das Hauptaugenmerk wird hierbei auf Forwards und Futures liegen. Diese sind einfach zu konstruieren und sind darüber hinaus geeignet, das für CO₂-regulierte Unternehmen relevante Preisrisiko von EUAs praktisch vollständig abzusichern. Allerdings räumen die Befragten auch komplexeren Produkten, wie etwa der Verbriefung von Emissionszertifikaten aus zusammengefassten Emissionsvermeidungsprojekten, Chancen ein. Daraufhin angesprochen, argumentierten die Befragten, dass es zwar immer Raum für individuelle Lösungen und komplexere Nischenprodukte gebe, es dafür aber kein großes Handelsvolumen und keine Marktpreise geben werde.

Signalwirkung: Das Antwortverhalten auf die Frage, ob neue CO₂-Derivate auch außerhalb der Gruppe der CO₂-regulierten Unternehmen beworben werden sollten, weist ein interessantes Muster auf. Sowohl das erste Antwortquartil als auch der Median haben einen Wert von 2,00, wohingegen das dritte Quartil einen Wert von 6,00 aufweist. Bei näherer Analyse der Antworten zeigt sich, dass es trotz der kleinen Stichprobe deutlich zwei Gruppen von Befragten gab. Die erste Antwortgruppe wird von CO₂-regulierten Unternehmen dominiert. Diese ergänzten auf Nachfrage häufig, dass es außerhalb der vom CO₂-Handel direkt betroffenen Industrien nur eine kleine Zielgruppe für CO₂-Derivate gebe. Die zweite Antwortgruppe besteht aus Banken, Börsen und Beratern und ist klar für ein Marketing auch außerhalb der Gruppe der CO₂-regulierten Unternehmen. Als Beispiele wurden CO₂ als nicht konservative Beimengung zu Anlageportfolien oder schlicht Spekulation mit CO₂ genannt. Ein Bedarf nach öffentlich zugänglichen Preisinformationen zu CO₂-Derivaten ist klar gegeben.

Handelsplattform: Offensichtlich gibt es genug Nachfrage, die eine Existenz von CO₂-Börsen rechtfertigt, zumindest was Futures betrifft. Der große Vorteil von Börsen ist das Fehlen des Kontrahentenrisikos. Auf der anderen Seite schaffen Börsen

auch zusätzliche Eintrittsbarrieren für kleinere Unternehmen, wie etwa Anbindungs- und Transaktionsentgelte oder regulatorische Restriktionen. Auf Nachfrage gaben die meisten Befragten an, dass sich langfristig maximal zwei bis drei Börsen für CO₂-Derivate durchsetzen würden. Unabhängig davon wird es in einigen Ländern zumindest Börsen für den Spothandel mit Zertifikaten geben. Börsen sind nicht unbedingt eine Gefahr für den OTC-Handel, sie können parallel existieren. Liquide CO₂-Börsen können den OTC-Handel sogar stützen, da dadurch auch die Hedging-Möglichkeiten für komplexere CO₂-Derivate zunehmen. Zum Zeitpunkt der Interviews waren die meisten Befragten der Meinung, dass das Handelsvolumen für Futures an Börsen weiter steigen wird, Optionen allerdings eher ein OTC-Produkt bleiben würden.

Zwei weitere Ausgestaltungsmerkmale wurden häufig während der Interviews angesprochen. Zum einen wäre der Erfolg von europäischen Optionen wahrscheinlicher als der von amerikanischen Optionen. Auf Grund des noch sehr jungen Marktes könnten temporäre Lieferengpässe für EUAs entstehen. Das würde den Verkäufer einer amerikanischen Option in eine sehr riskante Situation bringen, da er verpflichtet ist, zu jedem gewünschten Zeitpunkt das Underlying zu liefern. Zum anderen stelle sich die Frage nach dem Rahmenvertragswerk. Nach dem Stand von Ende 2006 gibt es drei verschiedene Rahmenverträge, die beim Handel mit CO₂-Derivaten herangezogen werden, nämlich die Vertragswerke der European Federation of Energy Traders (EFET), der International Swap Dealers Association (ISDA) und der International Emissions Trading Association (IETA). Während Banken ISDA bevorzugen, bevorzugt die Energiebranche den EFET-Rahmen. Das kann zu zusätzlichem Basisrisiko für abgesicherte Positionen führen, zum Beispiel auf Grund unterschiedlicher Strafen bei Vertragsverletzungen.

Neben den Fragen zu Ausgestaltungsoptionen für CO₂-Derivate ist im Fragebogen auch noch die ergänzende Frage nach möglichen Gütern für ein Cross-Hedging von CO₂-Risiken enthalten. Die Mediane der Antworten für Strom, Wetter und Gas/Öl lagen bei 6,00, 4,00 und 6,00. Eine Mehrzahl der Interviewpartner betonte allerdings, dass nicht der Gas- bzw. Ölpreis allein, sondern der Gas-Kohle-Spread (Fuel-Spread) relevant für ein mögliches Cross-Hedging sei. Während die Korrelation zwischen CO₂ und Strom offensichtlich ist, ist trotz der hohen Bewertung durch die Interviewteilnehmer die Korrelation von CO₂ und dem Fuel-Spread eher schwach ausgeprägt (vgl. Abschnitt 3.1.3). Wetter als lokales Phänomen wird skeptischer beurteilt, zu-

Tabelle 3.5: Bewertung exemplarischer CO₂-Derivate im EU EHS.

Beispielderivat		Bewertung*		
		1. Quart.	Median	3. Quart.
Future on CO ₂ emission certificates	Hedging effectiveness	6,00	7,00	7,00
	Tradability	6,00	7,00	7,00
	Success chances	6,00	7,00	7,00
Call option on CO ₂ emission certificates	Hedging effectiveness	5,00	6,00	6,00
	Tradability	3,00	4,00	5,00
	Success chances	3,25	4,00	6,00
Vintage swap on CO ₂ emission certificates	Hedging effectiveness	4,00	5,00	6,00
	Tradability	2,00	3,50	4,75
	Success chances	2,00	3,00	5,00
Securitization of CO ₂ emission certificates from abatement projects	Hedging effectiveness	2,50	4,00	6,00
	Tradability	1,25	3,00	4,00
	Success chances	3,00	4,75	5,00
Forward on a constructed EU wide CO ₂ emissions index (physical CO ₂ emissions)	Hedging effectiveness	2,00	3,50	4,25
	Tradability	2,00	2,00	4,00
	Success chances	1,00	2,00	2,00
Quantity-triggered call option on CO ₂ emission certificates	Hedging effectiveness	3,00	4,00	6,00
	Tradability	1,75	2,00	4,00
	Success chances	2,00	3,00	4,00

* 1: Nicht gut - 7: Sehr gut. Die Berechnung der Quartile erfolgt nach Freund und Perles (1987), Methode 1.

dem ist der Markt für Wetterderivate in Europa kaum entwickelt. Weitere, für das Cross-Hedging von CO₂ gut geeignete Güter wurden keine genannt.

3.3.2.3 Bewertung der Erfolgchancen von CO₂-Derivaten

Tabelle 3.5 präsentiert die Ergebnisse der Einschätzung ausgewählter Beispielderivate im EU EHS. Für jedes Derivat sollten die Befragten die Hedging-Effektivität, die Handelbarkeit und die generellen Erfolgchancen auf einer Skala von „1: Worst“ bis „7: Optimum“ einschätzen. Wie nachfolgend erläutert ist die Einschätzung der Experten konsistent mit der bisherigen Diskussion der Ausgestaltungsmerkmale von CO₂-Derivaten.

Wenig überraschend bekommt der Future Höchstnoten in allen Kategorien. Futures werden mittlerweile mit Laufzeiten sowohl für die erste als auch die zweite Handelsperiode liquide gehandelt. Typisch sind physische Lieferung und Vertragsgrößen von 1000 Tonnen CO₂.⁵⁴

Bezüglich Optionen zeigt ein Median von 4,00, dass die befragten Experten eine etwas kritischere Sicht der generellen Erfolgchancen haben. Die wichtigste Voraussetzung für den Erfolg optionsartiger Instrumente sei die Entwicklung von Marktliquidität, da dies für das dynamische Hedging solcher Positionen unerlässlich ist. Manche Experten betonten allerdings explizit, dass das EU EHS eigentlich ein klassischer Optionsmarkt sein sollte, wenn die Liquidität im Underlying gegeben ist. Dies bezieht sich insbesondere auf CO₂-regulierte Unternehmen mit dem Risiko, am Ende der Handelsperiode zu wenig EUAs zu besitzen. Solche Unternehmen würden mit Optionen im Vergleich zu Forwards und Futures das Risiko vermeiden, am Ende zu viele möglicherweise wertlose EUAs zu besitzen. Optionen auf Emissionszertifikate könnten z. B. während der Planungsphase eines langfristigen Emissionsvermeidungsprojektes genutzt werden. Abgesehen vom Hedging lässt sich durch den Verkauf von CO₂-Optionen auch die Finanzierung von Vermeidungsprojekten verbessern, da die Optionsprämie vorab bezahlt wird. Der Median der Bewertung der Hedgingeffektivität liegt bei 6,00.

Auch Erfolgchancen von Laufzeit-Swaps werden mit einem Median von 3,00 eher niedrig eingeschätzt. Mit ihrer Hilfe kann zwar das Banking-Verbot zwischen den Handelsperioden umgangen werden. So könnte z. B. Unternehmen A aus der Energiebranche, welches zu wenig EUAs besitzt, allerdings bereits ein Emissionsvermeidungsprojekt für die nächste Handelsperiode geplant hat, einen Swap mit Unternehmen B eingehen, welches zu viele EUAs zugeteilt bekommen hat. In diesem Fall würde also Unternehmen A in der ersten Handelsperiode EUAs bekommen und sie in der zweiten Handelsperiode an Unternehmen B zurückgeben. Dieses ist an dem Handel interessiert, weil es an niedrigere Emissionsgrenzen ab der zweiten Periode glaubt. Allerdings können Laufzeit-Swaps auch durch die mittlerweile liquide gehandelten Forwards und Futures nachgebildet werden und sind damit redundante Instrumente.

⁵⁴Vgl. ICE/ECX (<http://www.europeanclimateexchange.com>), EEX (<http://www.eex.de>) und Nord Pool (<http://www.nordpool.com>).

Mit einem Median von 4,75 werden der Verbriefung von Emissionszertifikaten aus Vermeidungsprojekten gute Erfolgchancen eingeräumt. Auf Grund der beschriebenen Risiken von Vermeidungsprojekten sind diese verbrieften Zertifikate allerdings nur schlecht für das Hedging einsetzbar. Wenn die Risiken allerdings akzeptiert werden, ist dies ein Weg, das Banking-Verbot zwischen den Handelsperioden zu umgehen, da CERs von der ersten in die zweite Periode übertragbar sind.

Komplexeren als den besprochenen Instrumenten, wie z. B. Quantity-triggered Optionen oder Forwards auf nicht gehandelte, künstlich generierte Umweltindizes, werden nur wenig Erfolgchancen eingeräumt. Sie seien zwar langfristig denkbar, allerdings könne die Lernphase im Emissionsmarkt länger andauern, da viele Unternehmen in diesem Markt wenig Erfahrung mit Finanzmärkten haben. Um den Handel zu erleichtern, sollten sich Börsen also zunächst an Standards und Strukturen halten, die von anderen Finanz- und Commoditymärkten bekannt sind.

3.4 Fazit: CO₂-Handel und Gestaltung von CO₂-Derivaten

Die Diskussion hat gezeigt, dass sich das EU EHS mittlerweile durchaus ähnlich zu anderen Finanz- und Commoditymärkten entwickelt. Es zeigt allerdings darin seine Besonderheiten, dass die Preise von EUAs nicht nur durch Fundamentaldaten getrieben sind, sondern sich politische und regulatorische Faktoren deutlich stärker auswirken. Besonders der Bruch zwischen den zwei Handelsperioden ist von anderen Märkten nicht bekannt und hat mit Sicherheit Einfluss auf die Preisdynamiken. Dies wird bei der Modellierung von CO₂-Preisen zu berücksichtigen sein.

Zwar ist eine Stichprobe von 25 Interviews nicht zwingend repräsentativ für das gesamte EU EHS und viele Unternehmen haben bisher wenig Erfahrungen mit Emissionshandelssystemen gemacht, dennoch haben die Gespräche bezüglich der Erfolgsaussichten und möglichen Ausgestaltungsformen von CO₂-Derivaten klare Hinweise ergeben. Die Aussichten für den langfristigen Erfolg von Derivaten auf CO₂-Emissionszertifikate, insbesondere von Forwards und Futures, zu einem geringeren Teil auch von Optionen, sind positiv zu beurteilen. Wenn die EU langfristig für eine stabile regulatorische Umgebung im EU EHS sorgt, sind CO₂-Derivate ein ge-

eignetes Instrument, um die mit schwankenden CO₂-Preisen verbundenen Risiken zu hedgen. Bei der Ausgestaltung von CO₂-Derivaten sollten die regulatorischen Erfordernisse der CO₂-regulierten Unternehmen berücksichtigt werden. Daher ist sowohl für Futures als auch für Optionen eine physische Lieferung des Underlyings dem finanziellen Settlement vorzuziehen. Optionen sollten eher europäischer als amerikanischer Natur sein, zum einen auf Grund möglicher Lieferengpässe in einem neuen Markt, zum anderen aber auch, weil die Zertifikate nur einmal im Jahr benötigt werden. Laufzeiten von mehreren Jahren, auch in die nächste Handelsperiode hinein, sind durchaus erwünscht, da Unternehmen bereits für mehrere Jahre im Voraus wissen, dass sie Emissionszertifikate brauchen werden.

Seit Oktober des Jahres 2006 werden an der ICE/ECX standardisierte Optionen für die 1. und 2. Handelsperiode gehandelt. Diese Optionen haben die in Tabelle 3.6 gezeigten Ausstattungsmerkmale. Offenbar entsprechen diese Optionen den Kriterien, die sich aus den Experteninterviews ergeben haben. Sie sind von europäischer Art mit einer Laufzeit von bis zu drei Jahren. Formal ist das Underlying zwar ein Future, da die zu Grunde liegenden Futures allerdings die gleiche Laufzeit wie die Optionen haben und drei Tage nach Fälligkeit der Option in der physischen Lieferung von EUAs resultieren, ist dies prinzipiell gleichbedeutend mit einer Option direkt auf EUAs.

Die Liquidität dieser Optionen in den ersten Monaten war noch verschwindend gering.⁵⁵ Dies kann möglicherweise dadurch erklärt werden, dass die 1. Handelsperiode sich ihrem Ende nähert und die Marktteilnehmer dadurch bereits relativ gut einschätzen können, wie ihr endgültiger Bedarf an EUAs aussehen wird. Für die 2. Handelsperiode waren Ende 2006 noch sehr viele regulatorische und politische Faktoren unklar, insbesondere die nationalen Allokationspläne waren noch nicht genehmigt. Es wird sich zeigen, ob der Markt diese Optionen mittel- bis langfristig annimmt, wenn die regulatorischen und politischen Unsicherheiten für die 2. Handelsperiode geringer werden. Nur dann erscheint auch die mögliche Einführung komplexerer CO₂-Derivate auf standardisierter Basis sinnvoll.

⁵⁵Vgl. European Climate Exchange (2006a) und „<http://www.europeanclimateexchange.com>“. Bis Ende 2006 hat die ICE/ECX fünf Transaktionen von Optionen mit einem Volumen von insgesamt 560.000 Tonnen CO₂ veröffentlicht. Im Januar 2007 lag das Volumen bei ca. 1,2 Millionen Tonnen CO₂.

Tabelle 3.6: Optionen auf EUA-Futures an der ICE/ECX.

Merkmal	Beschreibung
Laufzeiten	Angeboten werden jeweils Verträge mit Fälligkeit im nächsten oder übernächsten Monat sowie für die nächsten drei Jahre im Dezember (also z. B. im Oktober 2006: Okt06, Nov06, Dez06, Dez07 und Dez08).
Underlying	Future mit physischer Lieferung und gleicher Laufzeit wie die Option, Vertragsgröße 1000 Tonnen CO ₂ .
Settlement	Europäische Option, bei Ausübung Tausch von Option gegen entsprechenden Future (Fälligkeitstermin der Option ist drei Handelstage vor Fälligkeit des zu Grunde liegenden Futures).
Basispreis	Palette von je 26 Basispreisen für Call und Put, EUR 5 - 30.
Tick Size	EUR 0,01
Preisfindung	Kontinuierlicher Handel von 8:00 bis 18:00.

Die Tabelle beschreibt Ausgestaltungsmerkmale von börsengehandelten Optionen wie sie im Oktober 2006 an der ICE/ECX eingeführt wurden, vgl. European Climate Exchange (2006a).

Kapitel 4

Modellierung von CO₂-Preisen

Nachdem im vorangegangenen Kapitel deutlich wurde, dass derivative Instrumente wie Futures oder europäische Optionen auf EUAs gute Erfolgchancen haben, stellt sich die Frage, wie diese Derivate zu bewerten sind. Dazu ist zunächst ein Verständnis der stochastischen Eigenschaften des Preises des zu Grunde liegenden Underlyings, der EUAs, notwendig. Das Verständnis dieser Eigenschaften ist nicht nur zur Bewertung von derivativen Instrumenten, sondern darüber hinaus generell für alle Unternehmen notwendig, welche die durch die Teilnahme am EU EHS zu tragenden Risiken in ihre Risikomanagementsysteme integrieren wollen.

Auf Grund des frühen Marktstadiums des EU EHS sind die bisher verfügbaren Preiszeitreihen noch kurz und könnten zudem von einmaligen Störungen verzerrt sein. Als Beispiel sei der Ende April 2006 erfolgte Preisabsturz von über 50% innerhalb weniger Tage auf Grund der erstmaligen Informationen der Marktteilnehmer bezüglich tatsächlicher CO₂-Emissionen genannt.¹

Vor der Analyse der empirischen Daten soll daher zunächst auf Basis eines theoretischen CO₂-Preismodells abgeleitet werden, welchen typischen stochastischen Eigenschaften CO₂-Preise genügen sollten. Wichtige Fragen hierzu sind, ob CO₂-Preise saisonale Komponenten aufweisen, ob sie Unter- bzw. Obergrenzen haben, ob sie Mean-Reversion zeigen oder eher vergleichbar einem Random Walk sind. Zudem ist auch die Volatilitätsstruktur von CO₂-Preisen von Interesse, da deren Kenntnis Voraussetzung für ein erfolgreiches Risikomanagement ist.

¹Ende April bis Anfang Mai 2006 wurden die Inhalte der nationalen CO₂-Emissionsberichte bekannt. Eine ausführlichere Diskussion dieses Ereignisses ist in Abschnitt 4.2 zur Markteffizienz des EU EHS zu finden.

Nachfolgend werden zunächst die bisher aus der Literatur bekannten Modellierungsansätze für Preise von Emissionszertifikaten vorgestellt. Danach wird die Hypothese der Markteffizienz diskutiert, die die Grundlage fast aller Preismodelle in Emissionszertifikatemärkten ist. Daran anschließend folgt die Entwicklung des theoretischen CO₂-Preismodells, um daraus Aussagen über mögliche Preisdynamiken abzuleiten. Eine ausführliche Untersuchung der historischen Preiszeitreihen mit der Kalibrierung typischer stochastischer Prozesse beendet dieses Kapitel.

Die Analyse des Kapitels zielt darauf ab, die stochastischen Eigenschaften von CO₂-Preisen zu verstehen und mit Hilfe eines geeigneten stochastischen Modells abbilden zu können. Im Unterschied zu Modellen, die die derzeitige Höhe des CO₂-Preises fundamental zu erklären versuchen, steht hier die Abbildung der Preisdynamik im Fokus. Dabei soll soweit als möglich von Einmaleffekten, die auf einen noch unreifen Markt zurückzuführen sind, abstrahiert werden.

4.1 CO₂-Preismodellierung in der Literatur

Das Verhalten von Preisen in Emissionshandelssystemen hat zwar einiges an Interesse in der Literatur hervorgerufen. Allerdings beschäftigt sich der überwiegende Teil der Literatur eher mit ökologischen oder umweltpolitischen Fragestellungen sowie mit der Frage nach dem kostenoptimalen Design von Emissionshandelssystemen.² Zum dynamischen Preisverhalten von Emissionszertifikaten unter Unsicherheit sind bisher nur wenige Forschungsbeiträge bekannt. Nachfolgend werden die wichtigsten Arbeiten zur CO₂-Preismodellierung kurz vorgestellt, soweit sie für die vorliegende Arbeit von Bedeutung sind. Prinzipiell kann dabei zwischen deterministischer Gleichgewichtsmodellierung, stochastischer Gleichgewichtsmodellierung und direkter Preismodellierung unterschieden werden.³

²Einen umfassenden Überblick über den Themenbereich Umweltwirtschaft und insbesondere Luftverschmutzungskontrolle geben z. B. Tietenberg (2003) und Tietenberg (2006). Die Frage nach dem optimalen Design von Emissionshandelssystemen wird nicht nur mit Hilfe von ökonomischen Modellen, sondern auch mit Hilfe von Laborexperimenten, vgl. z. B. Ehrhart et al. (2003), und Multiagentensystemen, vgl. z. B. Veit und Weidlich (2005), untersucht.

³Nicht angesprochen werden Gleichgewichtsmodelle, die versuchen, aus einer Vielzahl ökonomisch beobachtbarer Größen Voraussagen für Preise von Emissionszertifikaten im globalen Kyoto-Handel zu treffen. Diese Modelle bilden zwar teilweise ganze Industrien detailgetreu nach, sind aber nicht geeignet, das dynamische Verhalten von Zertifikatspreisen zu beschreiben. Ein Überblick zu solchen Modellen findet sich in Springer (2003), als Beispiel für ein EU-spezifisches Modell seien Perchwitz, Möst und Rentz (2007) genannt.

Deterministische Gleichgewichtsmodelle: Es wird angenommen, dass Angebot und Nachfrage sicher bekannt sind. Ziel ist es dann, zum einen die absolute Höhe des CO₂-Preises im Gleichgewicht abzuleiten und zum anderen die Entwicklung von CO₂-Preisen über die Zeit zu bestimmen.

Bereits in Abschnitt 3.1.2 wurde gezeigt, dass unter Sicherheit und freiem Handel der Zertifikatspreis gerade den Grenzvermeidungskosten der beteiligten Unternehmen entsprechen muss. Dabei wurde allerdings keine zeitliche Komponente berücksichtigt. Rubin (1996) analysiert den zeitlichen Entwicklungspfad von Zertifikatspreisen in einem deterministischen Rahmen, wobei er sowohl Banking als auch Borrowing zulässt. Das Modell hat einen begrenzten zeitlichen Horizont und geht von konvexen Grenzvermeidungskostenkurven aus. Der Rahmen ist somit vergleichbar zur ersten Handelsperiode im EU EHS. Im Modell minimieren Unternehmen in kontinuierlicher Zeit ihre Kosten unter der Voraussetzung, dass sie zum einen miteinander handeln dürfen und zum anderen die Emissionsgrenzen eingehalten werden müssen.

Mit Hilfe der optimalen Kontrolltheorie zeigt er, dass die Grenzkosten der CO₂-Vermeidung für alle Unternehmen durch den Handel zu jedem Zeitpunkt identisch sind und der Zertifikatspreis gerade diesen Grenzkosten entspricht. Darüber hinaus müssen die diskontierten Grenzkosten über die Zeit konstant sein. Somit wachsen Zertifikatspreise gerade entsprechend dem Diskontierungssatz und folgen der so genannten Hotelling-Regel, wonach der Preis einer erschöpfbaren Ressource in einem Markt mit vollkommenem Wettbewerb mit dem Diskontierungssatz steigen muss.⁴ Vergleichbare Ergebnisse werden z. B. in kontinuierlicher Zeit von Leiby und Rubin (2001) und in diskreter Zeit von Cronshaw und Kruse (1996) abgeleitet.

Stochastische Gleichgewichtsmodelle: Im Gegensatz zur deterministischen geht die stochastische Gleichgewichtsmodellierung davon aus, dass einige der Größen im Modell mit Unsicherheit belastet sind und kann so zusätzlich Aussagen über das dynamische Preisverhalten unter Unsicherheit treffen. Im einfachsten Fall lassen sich anhand eines Modells mit nur zwei Zeitpunkten die prinzipiellen Auswirkungen von Unsicherheit auf den Zertifikatspreis analysieren. Als Beispiel hierfür sei Maeda (2001) genannt, der das Verhalten von Zertifikatspreisen in einem Modell unter Unsicherheit untersucht, wobei er CO₂-regulierte Unternehmen und Spekulanten inte-

⁴Vgl. Hotelling (1931). Rubin (1996) zeigt auch, dass der Zertifikatspreis mit einer Rate zwischen null und dem Diskontierungsfaktor steigen muss, wenn Borrowing verboten wird.

griert. Er erlaubt Banking, verbietet Borrowing und nimmt Treibhausgasemissionen als unsicher an. Eine Zunahme der Unsicherheit über zukünftige Emissionen kann auf Grund der Teilnahme von Spekulanten zunächst zu sinkenden, wird letztlich allerdings zu steigenden Spotpreisen führen.⁵

Für die vorliegende Arbeit interessant ist eher das Verhalten unter Unsicherheit im Zeitablauf. Schennach (2000) baut auf der Arbeit von Rubin (1996) auf und fügt im zeitkontinuierlichen Rahmen Unsicherheit hinzu, wobei sie allerdings diesmal von einem unendlichen Zeithorizont ausgeht. Banking ist erlaubt, Borrowing hingegen nicht und Unternehmen minimieren erwartete Kosten. Im Ergebnis wachsen auf Grund der Borrowing-Restriktion nun erwartete Zertifikatspreise mit einer Rate zwischen null und dem Diskontierungssatz. Tatsächliche Preise reagieren allerdings sofort auf Änderungen in der Zufallsvariablen. Darüber hinaus werden bezüglich der Dynamik keine Aussagen gemacht, da keine Lösung für Zertifikatspreise abhängig von Zeit und Emissionsmenge abgeleitet wird.

Da die bisherigen Ansätze zum einen keine Aussagen bezüglich der zeitabhängigen Volatilitätsstruktur von Zertifikatspreisen ableiten und zudem die Besonderheiten des EU EHS nur unzureichend berücksichtigen, war die Entwicklung eines eigenen Gleichgewichtsmodells notwendig. Parallel zur vorliegenden Arbeit wurde auch von Fehr und Hinz (2006) ein Modell zur Analyse der CO₂-Preisdynamiken unter Unsicherheit in zeitdiskretem Rahmen entwickelt. Obwohl teilweise deutlich unterschiedliche Annahmen getroffen werden, kommen sie im Ergebnis zu ähnlichen Aussagen, wie sie aus dem nachfolgend in Abschnitt 4.3 entwickelten CO₂-Preismodell folgen.

Direkte Preismodellierung: Häufig können die Größen, die in ein Gleichgewichtsmodell einfließen, nicht hinreichend genau bestimmt werden, um reale Preisbewegungen im Modell direkt abbilden zu können. Als Beispiel sei das tatsächliche CO₂-Emissionsvolumen genannt, welches sicher die Nachfrage nach Emissionszertifikaten beeinflusst, aber nicht auf täglicher Basis verlässlich bestimmt werden kann. In diesen Fällen wird häufig die direkte Preismodellierung gewählt. Im Gegensatz zur Gleichgewichtsmodellierung ergeben sich Preise nicht modellendogen aus Angebot und Nachfrage, sondern werden direkt mit statistischen Methoden aus historischen Daten geschätzt. Das kann zum einen mit diskreten Zeitreihenmodellen, wie z. B.

⁵Vgl. auch Maeda und Tezuka (2004). Einige andere Arbeiten, wie z. B. Ben-David et al. (2000) oder Rouse und Sévi (2005) untersuchen zwar ebenfalls das Emissionsverhalten von Unternehmen unter Unsicherheit, nehmen allerdings den Zertifikatspreis als exogen gegeben an.

GARCH- oder ARIMA-Modellen⁶, geschehen und zum anderen über die Kalibrierung kontinuierlicher Prozesse, wie z. B. der geometrisch Brownschen Bewegung.

In jüngerer Zeit sind zunehmend solche auf historischen Daten basierenden Studien zu den Eigenschaften von Zertifikatspreisen entstanden. So analysieren Kosobud et al. (2005) empirisch Preiszeitreihen aus dem US SO₂-Handelssystem. Wie beschrieben unterscheidet sich dieser Markt zwar in seinen regulatorischen Details vom EU EHS, ist aber unbestreitbar ein klassisches, funktionierendes Emissionshandelssystem und stellt zudem mittlerweile Daten über den Zeitraum von mehr als 10 Jahren zur Verfügung. Die Autoren stellen fest, dass sich Emissionsmärkte in ihren Preisdynamiken deutlich von anderen Finanz- und Commoditymärkten unterscheiden.⁷

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit waren zumindest drei Arbeiten bekannt, die historische EUA-Preise analysieren. Während Benz und Trück (2006) sich auf die Analyse von Regime-Switching- und GARCH-Prozessen konzentrieren, stellen Daskalakis, Psychoyios und Markellos (2006) vor allem Sprungdiffusionsprozesse in den Vordergrund. Auch Paoella und Taschini (2006) schlagen vor, GARCH-Prozesse zur Modellierung von EUA Preisen zu verwenden. Die drei zitierten Arbeiten entstanden alle parallel im Jahr 2006 und vergleichen daher die Ergebnisse kaum untereinander. Die Antwort auf die Frage, welche der untersuchten Prozessklassen am besten auf die Daten passt, lässt sich demzufolge aus diesen Arbeiten noch schwer ableiten. Dies ist unter anderem Gegenstand der Prozesskalibrierung in Abschnitt 4.4.

4.2 Markteffizienz

Die erwähnten Ansätze zur Modellierung von Emissionsmärkten wie auch das nachfolgend entwickelte Modell gehen von funktionierenden und effizienten Märkten aus, um handhabbare Lösungen zu erhalten. Wie bereits in Kapitel 3 bei der Diskussion der Ergebnisse der Expertenbefragung erwähnt, wird von Marktteilnehmern im EU EHS bisweilen vermutet, dass der Missbrauch von Marktmacht Preisverzerrungen verursachen könnte.⁸ Nachfolgend werden mögliche Ineffizienzen im Emissionsmarkt diskutiert und eine kurze empirische Analyse zur Markteffizienz durchgeführt.

⁶GARCH und ARIMA stehen abkürzend für Generalized Autoregressive Conditional Heteroscedasticity bzw. Autoregressive Integrated Moving Average.

⁷Vgl. Kosobud et al. (2005), S. 63.

⁸Vgl. auch Franke (2005).

4.2.1 Diskussion der Markteffizienz im EU EHS

Insbesondere Energieversorgungsunternehmen konkurrieren nicht global, sondern auf Grund beschränkter Übertragungskapazitäten eher auf regionaler Ebene. Nach wie vor können Verbraucher im Strommarkt daher nur unter wenigen Anbietern wählen.⁹ Dies führt dazu, dass diese Unternehmen den EUA-Preis voll an die Verbraucher weitergeben können. EUAs werden bis auf sehr wenige Ausnahmen den CO₂-regulierten Unternehmen kostenlos zugeteilt. Da Verbraucher allerdings mit dem Strompreis den vollen Preis dieser EUAs bezahlen, haben Stromproduzenten theoretisch einen starken Anreiz, EUA-Preise hoch zu halten.¹⁰

Es gibt Hinweise im Markt, dass die mögliche Weitergabe der EUA-Preise an die Verbraucher eine Rolle spielen könnte, zumindest in der Frühphase des Marktes. Ab dem 25. April 2006 kamen erstmals Gerüchte über den Inhalt der nationalen Emissionsberichte der EU-Mitgliedsstaaten für das Jahr 2005 im Emissionsmarkt auf. Diese Gerüchte wurden spätestens mit der offiziellen Veröffentlichung der Emissionsberichte am 15. Mai 2006 bestätigt.¹¹ Es wurde offenbar, dass deutlich weniger CO₂-Emissionen als erwartet verursacht worden waren. Daraufhin brachen die EUA-Preise dramatisch ein. Kritisch zu hinterfragen ist dabei, ob z. B. Stromproduzenten wirklich nicht wussten, dass der Emissionsmarkt wesentlich besser mit Emissionszertifikaten ausgestattet war als erwartet. Immerhin hat der Energiesektor den größten Marktanteil im EU EHS und sollte zumindest seine eigene Marktposition besser gekannt haben.¹² Der Energiesektor hätte aber keinen Anreiz gehabt, dieses Wissen weiterzugeben, da er von hohen EUA-Preisen profitiert. Der Preisverfall wäre natürlich genauso eingetreten, wenn niemand die tatsächliche Marktposition gekannt hätte. Allerdings sollten extreme Ereignisse in einem reifer werdenden Markt seltener werden. Marktteilnehmer haben nach der erstmaligen Veröffentlichung der Emissionsberichte eine wesentlich bessere Basis, um zukünftige Marktpositionen einzuschätzen.

⁹Vgl. z. B. Frankfurter Allgemeine Zeitung (2005) und Ockenfels, Gatzert und Peek (2005). Vgl. auch von Hirschhausen, Weigt und Zachmann (2007), die zum Schluss kommen, dass der deutsche Strommarkt durch geringen Wettbewerb charakterisiert ist.

¹⁰Ehrhart, Hoppe und Löschel (2005) zeigen, dass bei einem Strommarkt-Oligopol Unternehmen auch bei nicht kostenlos zugeteilten Zertifikaten von einem höheren CO₂-Preis profitieren können.

¹¹Aktuelle Meldungen zu diesen Gerüchten wurden z. B. täglich von Point Carbon in den Carbon Market News veröffentlicht.

¹²Vgl. z. B. Hasselknippe und Røine (2006), S. 10.

Eine weiterführende Frage ist, ob Stromproduzenten die EUA-Preise aktiv beeinflussen können. Svendsen und Vesterdal (2002) analysieren die Wahrscheinlichkeit, dass die Preise von Emissionszertifikaten in der EU durch Marktmacht im Energiesektor beeinflusst werden könnten. Aus einer empirischen Analyse der Marktanteile folgern sie, dass die Konzentration von CO₂-emittierenden Unternehmen nicht hoch genug ist, um Marktmacht aktiv auszuüben. Daher können Marktteilnehmer im EU EHS als reine EUA-Preisnehmer gesehen werden. In der öffentlichen Diskussion um die Marktmacht der Unternehmen wird oft vergessen, dass zwar national wenige Stromproduzenten die Märkte beherrschen, das EU Emissionshandelssystem allerdings einen europäischen Markt darstellt.¹³ Trotzdem könnten Unternehmen auch auf europäischer Ebene zusammenarbeiten, um den Markt zu beeinflussen. Da dies wettbewerbsrechtlich in der EU verboten ist, bliebe nur eine Form der stillen Zusammenarbeit ohne direkte Absprachen. Ein Hinweis darauf könnten nach Franke (2005) positive Autokorrelationen in EUA-Renditen sein. In einem effizienten Markt sollten zu jedem Zeitpunkt alle verfügbaren Informationen im aktuellen Preis enthalten sein.¹⁴ Positive Autokorrelationen können daher ein Indiz dafür sein, dass EUA-Preise nur verzögert auf neue Informationen im Markt reagieren und ein effizienter Wettbewerb nicht stattfindet.¹⁵ Dies soll nachfolgend überprüft werden.

4.2.2 Empirische Analyse zur Markteffizienz im EU EHS

Die Frage nach Autokorrelationen in EUA-Renditen wird auf der Basis von täglichen Spot- und Futurespreisen untersucht. Die Futures werden in die Analyse mit aufgenommen, da sie wesentlich liquider an Börsen gehandelt werden als die Emissionszertifikate selbst. Für die empirische Analyse werden jeweils die liquidesten Kontrakte verwendet, also Preise von Emissionszertifikaten an der Powernext und Preise für den im Dezember 2006 fällig gewordenen Futureskontrakt der ICE/ECX. Nachfolgend seien mit $s_t = \ln(S_t)$ logarithmierte Spotpreise, mit $\Delta s_t = s_t - s_{t-1}$

¹³So besitzt z. B. die gesamte deutsche Stromwirtschaft nur ca. 10% der europaweit zugeteilten EUAs, vgl. Weizsäcker (2005), S. 3.

¹⁴Die Literatur unterscheidet zwischen drei Abstufungen bezüglich der Informationseffizienz von Märkten, vgl. z. B. Fama (1970), S. 383. Die starke Form berücksichtigt alle Informationen, die existieren, die mittelstarke Form alle öffentlich verfügbaren Informationen und die schwache Form nur Informationen, die in historischen Preisen enthalten sind.

¹⁵Im Fall von zeitvariablen erwarteten Renditen genügen autokorrelierte Renditen allerdings nicht, um die Markteffizienz zu widerlegen, vgl. z. B. Fama (1991), S. 1577ff.

logarithmische Renditen und mit $(\Delta s_t)^2$ quadrierte logarithmische Renditen der getesteten Zeitreihe S_t bezeichnet. Logarithmierte Futurespreise seien mit s_t^F bezeichnet.

Um die Ergebnisse der Analyse besser beurteilen zu können, werden geschätzte Autokorrelationen mit denen anderer Märkte verglichen. Daher werden Autokorrelationen auch für tägliche Renditen des DAX sowie für SO₂-Preise des US SO₂-Handelssystems ermittelt. Um auch statistisch vergleichbare Resultate zu erhalten, wird für alle getesteten Märkte die gleiche Zeitperiodenlänge verwendet.¹⁶

Die Abbildung 4.1 zeigt historische logarithmierte Preise und Renditen auf den getesteten Märkten grafisch, während die Tabelle 4.1 hierfür deskriptive Statistiken präsentiert. Die Ergebnisse der Autokorrelationsanalyse werden in den Tabellen 4.2 bis 4.5 dargestellt. Dabei gibt $ac(m)$ den Autokorrelationskoeffizienten zum um m Zeiteinheiten verzögerten Wert an, während $t(m)$ die t -Statistik auf Signifikanz des entsprechenden Autokorrelationskoeffizienten bezeichnet.

Alle getesteten Preiszeitreihen zeigen das typische Verhalten nicht stationärer Preisdaten, das heißt einen Autokorrelationskoeffizienten von nahe eins für $m = 1$ sowie langsam fallende Autokorrelationskoeffizienten für höhere m . Tabelle 4.2 zeigt, dass EUA-Renditen Δs_t für $m = 1$ einen Autokorrelationskoeffizienten von 0,23 aufweisen, welcher auf dem 1%-Niveau signifikant ist. Im Vergleich zu den anderen drei getesteten Zeitreihen ist das ein relativ hoher Wert. Bis auf $m = 10$ und $m = 11$ sind alle anderen Koeffizienten für EUA-Renditen insignifikant. Wie bereits zuvor erklärt ist der EUA-Future 2006 besser für die Autokorrelationsanalyse geeignet, da der Terminmarkt deutlich liquider als der Spotmarkt ist. Tatsächlich zeigt Tabelle 4.3 für $m = 1$ nun einen Wert von lediglich 0,10, welcher nur noch auf dem 10%-Niveau signifikant ist. Allerdings existieren für einige weitere $m \geq 3$ signifikante Autokorrelationskoeffizienten. Die Ergebnisse für SO₂ sind vergleichbar. Sowohl in Bezug auf die Höhe als auch auf die Signifikanzen sind die Autokorrelationskoeffizienten für SO₂-Renditen ähnlich denen für Renditen im EU EHS. Für DAX-Renditen sind die Koeffizienten kleiner und nicht signifikant. Allerdings zeigt Tabelle 4.5 selbst für diesen sehr reifen Markt einen Wert für den ersten Autokorrelationskoeffizienten von -0,08. Dieser Wert liegt nur knapp unter dem 10%-Signifikanzniveau.

¹⁶Für SO₂ waren nur Daten bis Juli 2005 verfügbar, daher startet die getestete Zeitperiode für diesen Markt entsprechend früher.

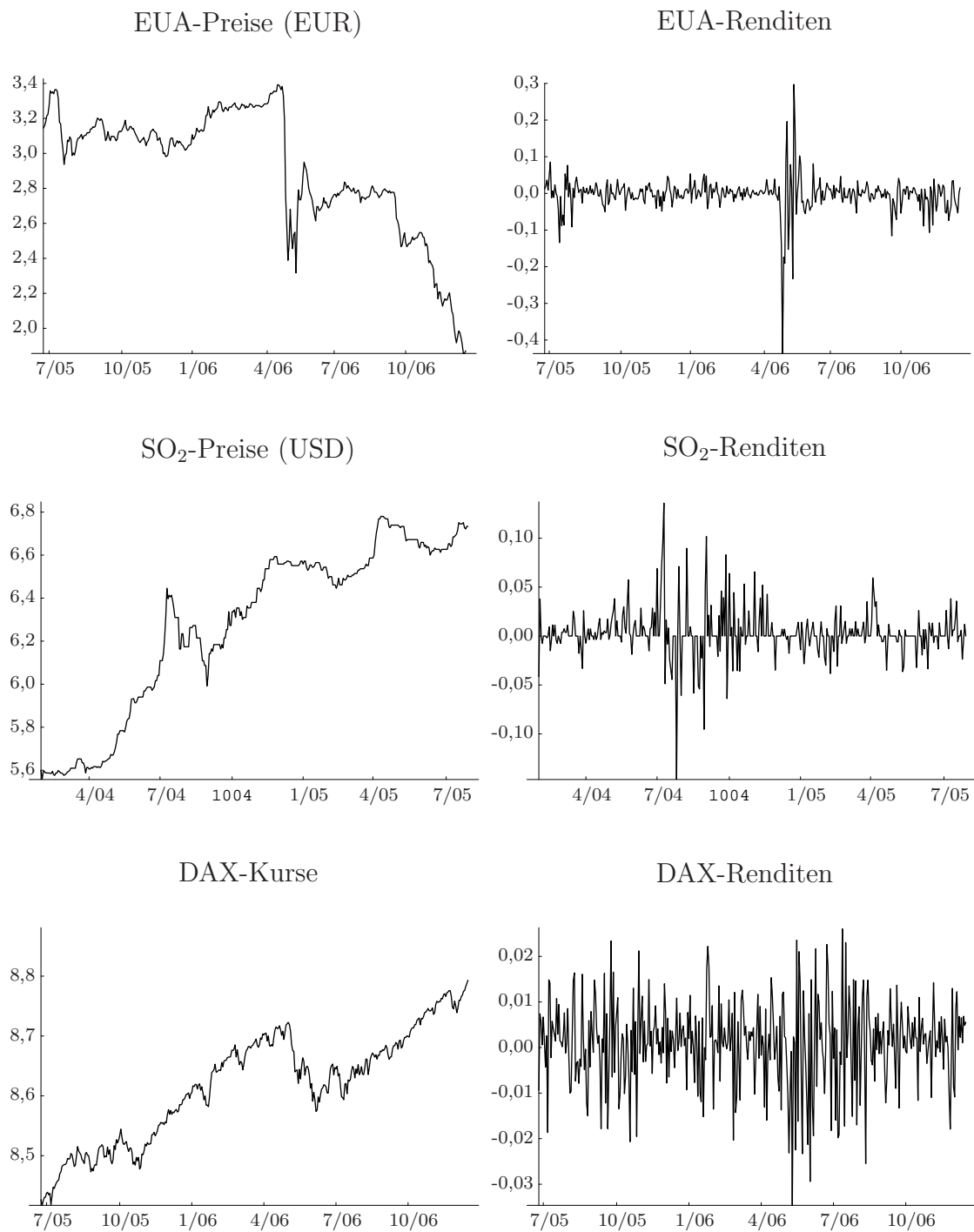


Abbildung 4.1: Zeitreihen für Autokorrelationsanalyse zur Markteffizienz. Die Abbildung zeigt logarithmierte Preise und Renditen für EUAs, SO₂ und den DAX.

Tabelle 4.1: Deskriptive Statistiken für logarithmierte Preise und Renditen für EUAs, EUA-Futures 2006, SO₂ und den DAX.

	EUA (Powernext)		EUA-Future 2006 (ICE/ECX)		SO ₂ (Platts)		DAX (XETRA)	
	s_t	Δs_t	s_t^F	Δs_t^F	s_t	Δs_t	s_t	Δs_t
Mittel	2,91	-0,0035	2,92	-0,0034	6,28	0,0030	8,62	0,0096
Varianz	0,125	0,0023	0,127	0,0024	0,151	0,0006	0,009	0,0001
Schiefe	-0,978	-1,887	-0,953	0,793	-0,633	0,308	-0,247	-0,402
Kurtosis	3,36	29,10	3,36	38,13	2,00	12,40	2,05	3,79
Anzahl	367	366	380	379	374	373	382	381

EUA-Preise stammen von der Powernext, Preise für EUA-Futures 2006 von der ICE/ECX, SO₂-Preise von Platts und DAX-Kurse von XETRA. $s_t = \ln(S_t)$ bezieht sich auf logarithmierte Preise und $\Delta s_t = s_t - s_{t-1}$ auf logarithmische Renditen der Zeitreihe S_t (tägliche Daten). Die Zeitreihe für SO₂ umfasst den Zeitraum vom 02.02.2005 - 29.07.2005, alle anderen den Zeitraum vom 24.06.2005 - 15.12.2006. Die unterschiedliche Anzahl der Preisdaten von EUAs und EUA-Futures liegt darin begründet, dass zu Beginn der Zeitreihen nicht an jedem Tag Handel stattfand.

Tabelle 4.2: Autokorrelationen in EUA-Preisen (Powernext).

Lag m	s_t		Δs_t		$(\Delta s_t)^2$	
	ac(m)	t(m)	ac(m)	t(m)	ac(m)	t(m)
1	0,98	90,68***	0,23	4,48***	0,35	7,23***
2	0,95	59,70***	-0,03	-0,55	0,21	4,14***
3	0,93	47,08***	0,07	1,31	0,09	1,68*
4	0,90	39,57***	0,03	0,53	0,18	3,57***
5	0,87	34,47***	-0,05	-0,99	0,18	3,57***
6	0,85	30,82***	0,02	0,40	0,11	2,18**
7	0,82	27,85***	0,06	1,07	0,09	1,69*
8	0,80	25,24***	-0,04	-0,75	0,08	1,58
9	0,77	23,05***	-0,04	-0,70	0,25	4,93***
10	0,74	21,27***	-0,20	-3,93***	0,34	6,99***
11	0,72	19,97***	-0,10	-1,86*	0,14	2,73***
12	0,70	18,97***	-0,03	-0,65	0,01	0,17

*, **, *** bedeutet Ablehnung der Nullhypothese, dass keine Autokorrelation vorhanden ist, auf dem 10, 5, 1 Prozentniveau. Die Tabelle präsentiert Ergebnisse einer Autokorrelationsanalyse, wobei sich $s_t = \ln(S_t)$ auf logarithmierte Preise, $\Delta s_t = s_t - s_{t-1}$ auf logarithmische Renditen und $(\Delta s_t)^2$ auf quadrierte Renditen der getesteten Zeitreihe S_t beziehen. ac(m) bezeichnet den Autokorrelationskoeffizienten zum um m Zeiteinheiten verzögerten Wert, während t(m) die t -Statistik auf Signifikanz des entsprechenden Autokorrelationskoeffizienten bezeichnet. Verwendet werden tägliche EUA-Preise der Powernext vom 24.06.2005 bis zum 15.12.2006.

Tabelle 4.3: Autokorrelationen in EUA-Futurespreisen (ICE/ECX).

Lag m	s_t^F		Δs_t^F		$(\Delta s_t^F)^2$	
	ac(m)	t(m)	ac(m)	t(m)	ac(m)	t(m)
1	0,98	92,56***	0,10	1,92*	0,40	8,43***
2	0,95	62,50***	-0,06	-1,26	0,08	1,64
3	0,93	50,03***	0,14	2,80***	0,03	0,63
4	0,91	41,96***	0,13	2,45**	0,03	0,65
5	0,88	36,24***	0,02	0,37	0,07	1,27
6	0,85	32,03***	-0,19	-3,68***	0,11	2,19**
7	0,83	29,19***	0,03	0,63	0,08	1,57
8	0,81	26,64***	0,12	2,43**	0,04	0,72
9	0,78	24,22***	-0,09	-1,71*	0,05	1,02
10	0,75	22,35***	-0,04	-0,78	0,05	1,04
11	0,73	20,80***	-0,09	-1,79**	0,17	3,36***
12	0,71	19,62***	-0,01	-0,15	0,23	4,53***

Verwendet werden tägliche Preise für den EUA-Future 2006 der ICE/ECX vom 24.06.2005 bis zum 15.12.2006. Zur Erklärung der Tabelleninhalte siehe Tabelle 4.2.

Tabelle 4.4: Autokorrelationen in SO₂-Preisen (Platts).

Lag m	s_t		Δs_t		$(\Delta s_t)^2$	
	ac(m)	t(m)	ac(m)	t(m)	ac(m)	t(m)
1	0,99	153,50***	0,08	1,49	0,19	3,75***
2	0,98	105,01***	-0,00	-0,01	0,22	4,37***
3	0,98	85,33***	0,01	0,16	-0,01	-0,21
4	0,97	73,31***	0,22	4,28***	0,11	2,04**
5	0,96	64,15***	0,10	1,92*	0,07	1,28
6	0,95	57,34***	-0,05	-1,03	0,10	1,95*
7	0,94	52,25***	-0,06	-1,07	0,06	1,12
8	0,93	48,26***	-0,02	-0,41	-0,04	-0,68
9	0,92	44,95***	0,01	0,12	0,12	2,30**
10	0,91	42,22***	-0,02	-0,43	0,02	0,29
11	0,90	39,93***	-0,09	-1,73**	0,30	5,96***
12	0,89	37,95***	-0,11	-2,07**	0,10	1,96*

Verwendet werden tägliche SO₂-Preise von Platts vom 02.02.2004 bis zum 29.07.2005. Zur Erklärung der Tabelleninhalte siehe Tabelle 4.2.

Tabelle 4.5: Autokorrelationen in DAX-Kursen (XETRA).

Lag m	s_t		Δs_t		$(\Delta s_t)^2$	
	ac(m)	t(m)	ac(m)	t(m)	ac(m)	t(m)
1	0,98	109,66***	-0,08	-1,53	0,10	1,98**
2	0,97	77,18***	0,04	0,79	0,10	2,00**
3	0,95	62,56***	0,02	0,47	0,32	6,62***
4	0,94	53,84***	-0,06	-1,24	0,11	2,09**
5	0,93	47,97***	-0,04	-0,69	0,11	2,13**
6	0,91	43,80***	0,02	0,33	0,23	4,51***
7	0,90	40,40***	-0,06	-1,15	0,13	2,53**
8	0,89	37,72***	-0,06	-1,08	0,02	0,33
9	0,88	35,52***	-0,03	-0,54	0,15	3,04***
10	0,86	33,56***	-0,03	-0,68	0,19	3,70***
11	0,85	32,04***	-0,00	-0,03	0,01	0,29
12	0,84	30,69***	0,00	0,07	0,11	2,23**

Verwendet werden tägliche DAX-Schlusskurse (XETRA) vom 24.06.2005 bis zum 15.12.2006. Zur Erklärung der Tabelleninhalte siehe Tabelle 4.2.

Die Ergebnisse für quadratische Renditen $(\Delta s_t)^2$ deuten daraufhin, dass die Volatilitäten der Renditen im EU EHS autokorreliert sind.¹⁷ Allerdings zeigen die Ergebnisse für SO₂ und den DAX, dass dies zumindest auf täglicher Basis typisch für Renditen in Finanzmärkten ist. Abbildung 4.1 zeigt das daraus resultierende Volatilitätsclustering der Renditen für EUAs, SO₂ und den DAX deutlich.

Die Ergebnisse sind konsistent mit Albrecht, Verbeke und de Clercq (2005), die für das US SO₂-Handelssystem basierend auf monatlichen Daten feststellen, dass dieser Markt aus informationstechnischer Sicht effizient funktioniert. In Bezug auf Autokorrelationen in den Renditen unterscheidet sich das EU EHS nicht wesentlich vom mittlerweile gut funktionierenden US SO₂-Handelssystem. Obwohl das EU EHS noch recht jung ist, sind die Ergebnisse vielversprechend und deuten darauf hin, dass der Markt sich gut entwickelt. Aus empirischer Sicht lassen sich wenig Anhaltspunkte für manipulierte Märkte gewinnen. Auch wenn dies die Existenz von Manipulationen nicht sicher ausschließt, wird nachfolgend bei der Entwicklung des theoretischen CO₂-Preismodells von einem effizienten Emissionshandelssystem ausgegangen.

¹⁷Vgl. Albrecht, Verbeke und de Clercq (2005), S. 1475.

4.3 Theoretisches CO₂-Preismodell

Das zu entwickelnde Preismodell soll einerseits einfach genug sein, um klare und nachvollziehbare Aussagen zu Emissionsmärkten zu generieren, andererseits soll es die typischen Eigenschaften des EU EHS reflektieren. Ziel ist es, nach Möglichkeit eine explizite Lösung für die resultierende Dynamik des Zertifikatspreises abzuleiten. Um die Gegebenheiten des EU EHS möglichst gut wiederzugeben, wird ein begrenzter Zeithorizont und ein stochastischer Rahmen gewählt. Das nachfolgend hergeleitete Emissionsmarktmodell beinhaltet dabei Strafkosten, Banking und Borrowing sowie im Emissionsvolumen ansteigende Grenzvermeidungskosten.¹⁸

Das Modell soll somit das Preisverhalten innerhalb der ersten Handelsperiode von 2005 - 2007 beschreiben, welche die Besonderheit aufweist, dass Banking über die Handelsperiode hinaus nicht möglich ist. Das entworfene Modell ist allerdings nicht nur für die erste Handelsperiode des EU EHS, sondern generell für alle Emissionshandelssysteme mit abgeschlossenem Zeithorizont relevant.

4.3.1 Modellbeschreibung

CO₂-regulierte Unternehmen im EU EHS haben prinzipiell drei Handlungsmöglichkeiten. Sie können CO₂ vermeiden, ihre CO₂-Positionen durch Handel ausgleichen oder freiwillig die Strafe bezahlen und die Emissionszertifikate nachliefern, falls sie nicht genügend Zertifikate zur Einreichung besitzen. Jedes Unternehmen wird nun versuchen, eine für sich kostenminimale Lösung zu finden. Die zentrale Annahme für das weitere Vorgehen ist, dass die durch den Markt induzierte Lösung der gesamtkostenminimalen Lösung entspricht. In einem deterministischen Rahmen wurde diese Annahme z. B. von Rubin (1996) und Cronshaw und Kruse (1996) für Emissionsmärkte formal bewiesen. Schennach (2000) verwendet die gleiche Annahme in einem stochastischen und zeitkontinuierlichen Rahmen für einen Emissionsmarkt mit unendlichem Zeithorizont. Diese Annahme war ein Hauptargument für die Einführung des EU EHS. Der ökonomische Grund für die Annahme besteht in dem in Abschnitt 3.1.2 beschriebenen Preisbildungsmechanismus für Emissionszertifikate. Durch den Emissionshandel gleichen sich die Grenzkosten der CO₂-Vermeidung für alle CO₂-regulierten Unternehmen an und entsprechen dann dem CO₂-Preis,

¹⁸Vgl. Seifert, Uhrig-Homburg und Wagner (2007).

da sonst Arbitragemöglichkeiten im Markt bestehen. Als Folge sind nur aggregierte CO₂-Emissionen und Vermeidungskosten für den CO₂-Preis relevant. Nachfolgend wird daher vereinfachend von einem zentralen Planer ausgegangen, der basierend auf aggregierten Größen eine optimale Lösung sucht. Dabei wird implizit von einem funktionierenden, effizienten Markt ausgegangen.

Der Markt sei zu Beginn mit der Menge e_0 an EUAs ausgestattet und emittiert kontinuierlich CO₂ mit einer Rate von y_t über die Handelsperiode hinweg. y_t bezeichne Business-as-usual-Emissionen, also Emissionen ohne Berücksichtigung eventueller Vermeidungsaktivitäten. Das Ende der Handelsperiode sei mit T bezeichnet, womit der Planungshorizont für das Modell $t \in [0, T]$ umfasst. Die Emissionsrate y_t folge während der Handelsperiode einem stochastischen Prozess der Form

$$dy_t = \mu(t, y_t)dt + \sigma(t, y_t)dW_t. \quad (4.1)$$

Die Emissionsrate y_t besitzt somit die Drift $\mu(t, y_t)$ und eine Volatilität von $\sigma(t, y_t)$. Dabei ist dt ein Zeitinkrement und dW_t das Inkrement eines Wiener-Prozesses. Weiter sei u_t die optimal zu bestimmende kontinuierliche CO₂-Vermeidungsrate des Marktes. Die Vermeidungsrate u_t ist selbst eine Zufallsvariable, da sie zu jedem Zeitpunkt entsprechend der Entwicklung der tatsächlichen Emissionen angepasst werden muss. Gegeben die Emissionsrate y_t ergibt sich somit für die Entwicklung der im Zeitpunkt t insgesamt erwarteten Emissionen x_t für die gesamte Handelsperiode $[0, T]$

$$x_t = - \int_0^t u_s ds + E_t \left[\int_0^T y_s ds \right]. \quad (4.2)$$

$E_t[\cdot]$ als Kurzform für $E[\cdot | \mathcal{F}_t]$ bezeichne den Erwartungswert bedingt auf die zur Zeit t verfügbare Informationsmenge \mathcal{F}_t . x_t ist ein kontrollierter stochastischer Prozess mit der Kontrollvariable u_t . Mit anderen Worten, x_t beschreibt zu jedem Zeitpunkt t den Erwartungswert der gesamten Emissionen über die ganze Handelsperiode hinweg unter Berücksichtigung der bereits erfolgten Emissionen als auch Emissionsvermeidungsmaßnahmen bis zum Zeitpunkt t sowie den noch zukünftig erwarteten Emissionen bis zum Ende der Handelsperiode. Entsprechend dieser Formulierung bezeichnet x_T die am Ende der Handelsperiode realisierten Emissionen und wird somit eventuelle Strafkostenzahlungen determinieren.

Zu Beginn erwartet der Markt insgesamt eine Emissionsmenge ohne Berücksichtigung eventueller Vermeidungsaktivitäten von

$$x_0 = E_0 \left[\int_0^T y_s ds \right]. \quad (4.3)$$

Ein möglicher deterministischer Trend bzw. saisonale Komponenten in y_t sind somit bereits in x_0 berücksichtigt und es folgt für x_t

$$dx_t = -u_t dt + G(t) dW_t. \quad (4.4)$$

$G(t)$ bezeichnet die Volatilität des nicht kontrollierten Teils des Prozesses x_t und wird durch die Drift $\mu(t, y_t)$ und die Volatilität $\sigma(t, y_t)$ der zu Grunde liegenden Emissionsrate y_t bestimmt. Die Ableitung von $G(t)$ für die drei exemplarischen Prozesse White-Noise, arithmetisch Brownsche Bewegung und Ornstein-Uhlenbeck findet sich in Anhang B.1.

Der zentrale Planer der Modellökonomie bestimmt nun in einer risikoneutralen Welt die optimale Emissionsvermeidungspolitik durch Maximierung des Gewinns unter Abwägung von Vermeidungskosten und möglichen Strafzahlungen. Es seien

$$C(u_t) = -\frac{1}{2} c u_t^2 \quad (4.5)$$

die Vermeidungskosten je Zeiteinheit. Wie bereits beschrieben ist u_t die Vermeidungsmenge zum Zeitpunkt t und somit die Kontrollvariable. Die Gleichung (4.5) führt zu linearen Grenzvermeidungskosten $C'(u_t) = -c u_t$. Dies stellt zwar eine Vereinfachung dar, berücksichtigt allerdings die Beobachtung, dass die Grenzkosten der Vermeidung im EU EHS nicht konstant sind, sondern mit zunehmender Emissionsvermeidung steigen. Der Kostenkoeffizient der Vermeidung c wird dabei als konstant angenommen. Innerhalb des Zeitraumes einer Handelsperiode von nur wenigen Jahren ist kaum eine signifikante Weiterentwicklung bzw. Vergünstigung der Vermeidungstechnologie zu erwarten.

Die mögliche Strafzahlung am Ende der Handelsperiode sei mit

$$P(x_T) = \max[0, p(e_0 - x_T)] \quad (4.6)$$

bezeichnet. Zum Zeitpunkt T muss der Markt insgesamt genügend Zertifikate entsprechend der Menge der realisierten Emissionsmenge x_T einreichen. Für jedes zu wenig eingereichte Zertifikat muss eine Strafe in Höhe von p getragen werden. Übrig gebliebene Zertifikate verfallen wertlos, da sie nicht in die nächste Handelsperiode mitgenommen werden dürfen. Im EU EHS müssen zwar nach jedem Jahr Zertifikate eingereicht werden, allerdings erlaubt das System ein Borrowing um ein Jahr. Es ist daher unwahrscheinlich, dass Marktteilnehmer vor dem Ende der Handelsperiode zu einem der Einreichungstermine für EUAs tatsächlich zu wenig EUAs zur Verfügung haben. Dies ändert sich zum Zeitpunkt T , da Borrowing aus der folgenden Periode nicht erlaubt ist. Daher werden vereinfachend nur mögliche Strafkosten zum Zeitpunkt T modelliert. Die Strafkosten p im Modell beschreiben alle Kosten, die ein Marktteilnehmer trägt, sofern er nicht genügend Zertifikate besitzt, nicht nur die vom Regulator festgelegte Strafzahlung. So muss zusätzlich zur Strafzahlung auch noch zu einem späteren Zeitpunkt ein Zertifikat nachgereicht werden. Am Ende der Handelsperiode kann dies nur ein Zertifikat aus der folgenden Handelsperiode sein und die zusätzlichen Kosten würden dann dem Terminpreis dieses Zertifikats entsprechen.¹⁹

Mit Gleichung (4.5) und (4.6) ergibt sich die Zielfunktion im Modell zu

$$\max_{\{u_t\}_{t \in [0, T]}} E_0 \left[\int_0^T e^{-rt} C(u_t) dt + e^{-rT} P(x_T) \right]. \quad (4.7)$$

Gleichung (4.7) ist als Maximierung negativer Kosten formuliert, damit bei der Modellerweiterung um Risikoaversion die Formulierung beibehalten werden kann. Das Ergebnis des Maximierungsproblems ist eine von der Zeit t und den insgesamt erwarteten Emissionen x_t abhängige optimale Vermeidungspolitik u_t . Es handelt sich somit um ein klassisches Problem aus der stochastischen Kontrolltheorie.²⁰

¹⁹Dieser Terminpreis ist selbst eine Zufallsvariable, weshalb die hier erfolgte Strafkostenmodellierung eine Vereinfachung darstellt. Auf Grund des Borrowing-Verbots zwischen den Handelsperioden wirkt sich eine Verknappung der Zertifikate und damit eine Erhöhung der CO₂-Preise in der ersten Handelsperiode allerdings nicht direkt auf CO₂-Preise der zweiten Handelsperiode aus.

²⁰Das Modell scheint zudem relativ ähnlich einer Problemstellung aus der klassischen Kontrolltheorie zu sein, die unter dem Stichwort Linear-Quadratic-Gaussian (LQG) bekannt ist. Wenn die asymmetrische Randbedingung aus Gleichung (4.6) z. B. in eine symmetrische, quadratische Funktion geändert würde, die sowohl positive als auch negative Abweichungen von e_0 bestraft, wäre das Sicherheitsäquivalenzprinzip anwendbar und das Problem könnte gelöst werden, als wäre es deterministisch. Allerdings würde das eben gerade die Tatsache der asymmetrischen Strafkosten im EU EHS vernachlässigen und das Resultat wäre nicht repräsentativ für den Emissionsmarkt. Eine kurze Übersicht über die LQG-Thematik findet sich z. B. in Casti (1980).

Im beschriebenen Modell werden Terminkontrakte bisher nicht explizit erwähnt. Da es für jede Long-Position in einem Terminkontrakt eine entsprechende Short-Position geben muss, ist auf aggregierter Ebene die Nettoposition des Marktes in Terminkontrakten immer gleich null. Im Gleichgewicht spielen Terminkontrakte für den zentralen Planer somit keine Rolle.

Um eine Lösung ableiten zu können, enthält das Modell zusätzlich zu den bereits erwähnten Annahmen implizit einige weitere Vereinfachungen im Vergleich zum EU EHS, die kurz diskutiert werden sollen. Zunächst einmal sind in der Realität viele Vermeidungsmaßnahmen nicht sofort wirksam, sondern brauchen eine gewisse Vorlaufzeit. Ein Beispiel hierfür sind Effizienzverbesserungsmaßnahmen an Kraftwerken. Allerdings sollte die verzögerte Wirksamkeit die Preisdynamik im Modell nicht wesentlich beeinflussen, da insgesamt erwartete Emissionen der Handelsperiode modelliert werden. Der Erwartungswert selbst würde unmittelbar nach der Entscheidung zur Implementierung eines Vermeidungsprojekts angepasst werden, unabhängig von der notwendigen Vorlaufzeit. Eine weitere Vereinfachung ist der strikte Bruch zwischen erster und zweiter Handelsperiode. Tatsächlich ist das EU EHS über die Linking Richtlinie an den globalen Kyoto-Handel angebunden. Emissionszertifikate aus dem Kyoto-Handel können in das EU EHS importiert werden. Da insbesondere für Zertifikate aus CDM-Projekten Banking erlaubt ist, kann damit die Banking-Restriktion im EU EHS umgangen werden. Allerdings besteht eine prozentuale Obergrenze für die Nutzung solcher importierter Zertifikate. Die Angebotsseite kann also maximal bis zu der dadurch festgelegten Obergrenze erhöht werden.

Ein zusätzlicher Punkt ist, dass die Emissionsrate y_t in der Realität von mehreren Faktoren beeinflusst wird, wie z. B. Wetter, Wirtschaftswachstum und Brennstoffpreise. Im Modell wird angenommen, dass sich all diese Faktoren auf aggregierter Ebene durch einen Wiener-Prozess erfassen lassen. Es wird sich allerdings zeigen, dass die resultierenden Preisdynamiken qualitativ nur schwach von der Form des angenommenen Prozesses für CO₂-Emissionen abhängen. Abgesehen vom Einfluss auf die Emissionsrate y_t können Brennstoffpreise auch direkt die Grenzvermeidungskosten beeinflussen. Wie erwähnt emittieren Gaskraftwerke im Verhältnis weniger CO₂ als Kohlekraftwerke. Ändert sich der Fuel-Spread stark, kann sich die ökonomisch sinnvolle Einsatzreihenfolge für Gas- und Kohlekraftwerke und damit auch die Grenzvermeidungskostenkurve ändern. Im vorliegenden Modell würde sich eine

Änderung der Brennstoffpreise nur implizit durch eine sich ändernde Emissionsrate y_t auswirken.

4.3.2 Ableitung des Spotpreisprozesses

Nachfolgend wird für die durch die Gleichung (4.7) beschriebene Zielfunktion zunächst die charakteristische Partialdifferentialgleichung abgeleitet. Diese kann dann analytisch gelöst werden, wenn für die Emissionsrate y_t der White-Noise-Prozess angenommen und die Zinsrate r gleich null gesetzt wird. Im Anschluss werden die aus diesem Spezialfall gewonnenen Erkenntnisse durch numerische Lösungen für allgemeinere Fälle validiert.

4.3.2.1 Charakteristische Partialdifferentialgleichung

Die Lösung für Gleichung (4.7) folgt Sethi und Thompson (2005). Das Optimalitätsprinzip aus der stochastischen Kontrolltheorie verlangt, dass

$$V(t, x_t) = \max_{u_t} E[e^{-rt} C(t, u_t) dt + V(t + dt, x_t + dx_t)], \quad (4.8)$$

wobei $V(t, x_t)$ den erwarteten Wert einer optimalen Politik $\{u_\tau\}_{\tau \in [t, T]}$ gegeben x_t beschreibt.²¹ Nach Gleichung (4.8) ist der Wert $V(t, x_t)$ bei Ausübung einer optimalen Vermeidungspolitik genau gleich den diskontierten Kosten der aktuell optimalen Vermeidung plus dem Wert $V(t + dt, x_t + dx_t)$ bei Annahme zukünftig optimaler Vermeidung. Es seien $V^{(t)}$, $V^{(x)}$ und $V^{(xx)}$ die partiellen Ableitungen von $V(t, x_t)$. Nach Itô muss für $V(t, x_t)$ gelten

$$dV = V^{(t)} dt + V^{(x)} dx + \frac{1}{2} V^{(xx)} (dx)^2. \quad (4.9)$$

Zusammen mit Gleichung (4.4) folgt damit

$$E[dV] = V^{(t)} dt - u_t V^{(x)} dt + \frac{1}{2} (G(t))^2 V^{(xx)} dt. \quad (4.10)$$

²¹Vgl. Sethi und Thompson (2005), S. 339ff.

Die Kombination von Gleichung (4.10) und Gleichung (4.8) liefert die so genannte Hamilton-Jacobi-Bellman-Gleichung

$$0 = \max_{u_t} [e^{-rt}C(u_t) + V^{(t)} - u_tV^{(x)} + \frac{1}{2}(G(t))^2V^{(xx)}] \quad (4.11)$$

mit der Randbedingung

$$V(T, x_T) = e^{-rT}P(x_T). \quad (4.12)$$

Nach Maximierung der rechten Seite von Gleichung (4.11) durch Ableiten nach u_t und Nullsetzen erhält man

$$u_t = -\frac{1}{c}e^{rt}V^{(x)}. \quad (4.13)$$

Das Einsetzen von Gleichung (4.13) in Gleichung (4.11) führt schließlich zur charakteristischen Partialdifferentialgleichung (PDG)

$$V^{(t)} = -\frac{1}{2}(G(t))^2V^{(xx)} - \frac{1}{2c}e^{rt}(V^{(x)})^2. \quad (4.14)$$

Zusammen mit der Randbedingung (4.12) beschreibt diese die Lösung für die optimale Emissionsvermeidungspolitik u_t . Als Lösung der PDG erhält man die Funktion $V(t, x_t)$. Zusammen mit Gleichung (4.13) sowie der Annahme, dass Spotpreise genau den Grenzvermeidungskosten entsprechen, ergibt sich die Lösung für den Spotpreis abhängig von Zeit t und insgesamt erwarteten Emissionen x_t zu

$$S(t, x_t) = cu_t = -e^{rt}V^{(x)}. \quad (4.15)$$

Auf Grund der quadratischen Formulierung der Vermeidungskostenfunktion ist sichergestellt, dass sich eine negative Vermeidung u_t zu keinem Zeitpunkt als optimal erweist. Nach Gleichung (4.15) können somit auch Spotpreise nicht negativ werden.

Bevor versucht wird, die charakteristische PDG zu lösen, sei nachfolgend auf eine interessante Eigenschaft der Lösung hingewiesen. Entsprechend Gleichung (4.10) gilt für die erwartete Änderung von $V^{(x)}$

$$E[dV^{(x)}] = (V^{(xt)} - u_tV^{(xx)} + \frac{1}{2}(G(t))^2V^{(xxx)})dt. \quad (4.16)$$

Zusammen mit Gleichung (4.13) und der Annahme, dass $V(t, x_t)$ zweimal differenzierbar ist, ergibt sich

$$E[dV^{(x)}] = (V^{(tx)} + \frac{1}{c}e^{rt}V^{(xx)}V^{(x)} + \frac{1}{2}(G(t))^2V^{(xxx)})dt. \quad (4.17)$$

Es fällt auf, dass die rechte Seite dieser Gleichung der charakteristischen PDG (4.14) entspricht, wenn die PDG nochmals nach x abgeleitet wird. Demzufolge muss die erwartete Änderung von $V^{(x)}$ null sein. Gleichung (4.15) zeigt, dass somit der resultierende diskontierte Spotpreis $e^{-rt}S(t, x_t)$ ein Martingal ist. Dieses Ergebnis hängt nicht von der Form von $G(t)$ und somit insbesondere in keiner Weise von der angenommenen Form für die stochastische Emissionsrate y_t ab. Der ökonomische Hintergrund für dieses Ergebnis ist die Lagerbarkeit von CO₂-Emissionszertifikaten innerhalb der Handelsperiode zusammen mit der unterstellten Risikoneutralität.

4.3.2.2 Analytische Lösung für Spezialfall

Die PDG nach Gleichung (4.14) beschreibt mit der dazu gehörenden Randbedingung (4.12) vollständig die Lösung des beschriebenen Modells. Für den Spezialfall eines konstanten $G(t) = \sigma$ und eines Zinssatzes von $r = 0$ kann diese PDG analytisch gelöst werden. Die analytische Lösung trägt entscheidend zum Verständnis des Zusammenhangs von wesentlichen Aspekten des Emissionsmarktes und den resultierenden Spotpreisdynamiken bei.

In Anhang B.1 wird gezeigt, dass ein konstantes $G(t)$ äquivalent zur Annahme ist, dass die Emissionsrate y_t einem White-Noise-Prozess mit Volatilität σ und Erwartungswert x_0/T folgt. Dies ist zwar eine starke Einschränkung für den Emissionsprozess, zeigt aber dennoch den Einfluss unsicherer Emissionen auf die Eigenschaften der Lösung des beschriebenen Modells. Zudem werden diese Eigenschaften im nachfolgenden Abschnitt auch numerisch für allgemeinere Fälle validiert. Die charakteristische PDG lässt sich in diesem Fall zu

$$V^{(t)} = -\frac{1}{2}\sigma^2V^{(xx)} - \frac{1}{2c}(V^{(x)})^2 \quad (4.18)$$

vereinfachen. Gleichung (4.18) beschreibt eine semilineare parabolische Partialdifferentialgleichung zweiter Ordnung. Wie in Anhang B.2 gezeigt, lässt sich diese durch die so genannte Cole-Hopf-Transformation in die gewöhnliche lineare Wärme-

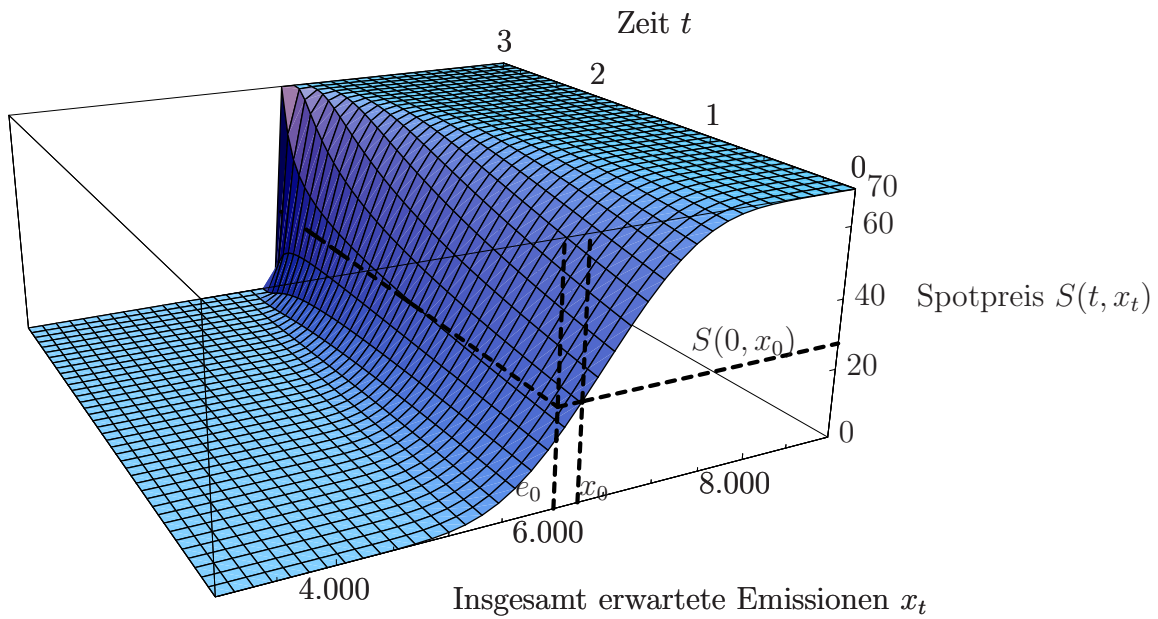


Abbildung 4.2: Spotpreise $S(t, x_t)$ im theoretischen CO₂-Preismodell – risikoneutraler Spezialfall. Die Abbildung zeigt Spotpreise für Emissionszertifikate abhängig von Zeit t und insgesamt erwarteten Emissionen x_t innerhalb einer Handelsperiode nach Gleichung (4.19). Die Emissionsrate folgt einem White-Noise-Prozess und für den Zinssatz gilt $r = 0$. Parameterwerte wurden wie in Tabelle 4.6 gewählt. Als Erwartungswert für den Spotpreis ergibt sich daraus $S(0, x_0) = 27,46$.

leitungsgleichung überführen. Für die Wärmeleitungsgleichung können analytische Lösungen für eine große Bandbreite an möglichen Randbedingungen konstruiert werden, insbesondere auch für Randbedingungen, deren Definitionsbereich nicht begrenzt ist. Nach einer Rücktransformation lässt sich schließlich die Lösung für $V(t, x_t)$ angeben. Mit Gleichung (4.15) ergibt sich schließlich als Lösung für den Spotpreis

$$S(t, x_t) = -V(x) = \frac{p}{1 - \frac{e^{-\frac{p(T-t)+2c(\epsilon_0-x_t)}{2c^2\sigma^2}} (-2 + \operatorname{Erfc}(\frac{\epsilon_0-x_t}{\sqrt{2\sigma\sqrt{T-t}}})}{\operatorname{Erfc}(\frac{p(T-t)+c(\epsilon_0-x_t)}{\sqrt{2\sigma\sqrt{T-t}}})}}, \quad (4.19)$$

wobei mit $\operatorname{Erfc}(z) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt$ die komplementäre Fehlerfunktion bezeichnet sei. Abbildung 4.2 zeigt die Lösung von $S(t, x_t)$ entsprechend Gleichung (4.19) als Funktion von Zeit t und insgesamt erwarteten Emissionen x_t . Falls im Text nicht anders erwähnt, sind die Parameterwerte für die exemplarischen Grafiken zum theoretischen CO₂-Preismodell Tabelle 4.6 entnommen.

Tabelle 4.6: Parameterwerte für die Darstellung der analytischen Lösung von $S(t, x_t)$ im theoretischen CO₂-Preismodell.

Parameter	Wert*
Strafkosten: p	70
Länge Handelsperiode: T	3
Anfangsausstattung mit Zertifikaten: e_0	6.000
Insgesamt erwartete Emissionen: x_0	6.240
Grenzvermeidungskostenkoeffizient: c	0,24
Volatilität Emissionsrate: σ	$500/\sqrt{T}$

Die Parameterwerte wurden gewählt, um in vereinfachter Weise die Rahmenbedingungen des EU EHS widerzuspiegeln. Die Strafkosten p setzen sich zusammen aus der möglichen Strafzahlung von EUR 40 in der ersten Handelsperiode plus den Kosten für die Lieferung eines zusätzlichen Emissionszertifikats, welche hier mit EUR 30 angenommen werden. Vom Regulator wurden für die erste Handelsperiode EU Allowances für ca. $e_0 = 6.000$ Millionen Tonnen CO₂ zugeteilt. Mit den weiteren Parameterwerten für T , x_0 und c würde sich in einer deterministischen Welt ein Zertifikatspreis von $c(x_0 - e_0)/T = 19,2$ ergeben. Die Volatilität σ wurde hoch genug gesetzt, um den Effekt der Unsicherheit auf die Zertifikatspreise deutlich zu zeigen.

Wie erwartet bleibt der Spotpreis $S(t, x_t)$ für alle Kombinationen von t und x_t begrenzt auf das Intervall $[0, p]$. Auf der einen Seite kann der Preis niemals über die Strafkosten p steigen, da es sonst günstiger wäre, die Strafzahlung in Kauf zu nehmen. Auf der anderen Seite kann der Spotpreis nie null erreichen, bevor das Ende der Handelsperiode erreicht wird. Dieses Verhalten ist auch von Optionspreisen bekannt und reflektiert in der Tat den Optionswert von Emissionszertifikaten.²² Solange es eine positive Wahrscheinlichkeit gibt, dass das realisierte Emissionsvolumen x_T am Ende der Handelsperiode über dem Volumen der anfangs zugeteilten Zertifikatsmenge e_0 liegt, gibt es auch eine positive Wahrscheinlichkeit, dass der Markt Strafkosten tragen muss. Da die erwarteten Strafkosten somit vor dem Ende der Handelsperiode immer von null verschieden sind, muss auch das Emissionszertifikat bis dahin immer einen positiven Wert haben.

²²Vgl. z. B. auch Chao und Wilson (1993), die auf den Optionswert in SO₂-Emissionszertifikaten hinweisen.

Wenn man sich in Abbildung 4.2 entlang der Zeitachse von $t = 0$ in Richtung $t = T$ bewegt, beobachtet man eine zunehmende Steigung in Richtung der x_t -Achse im Bereich um die Anfangsausstattung e_0 herum. Je näher das Ende der Handelsperiode rückt, desto weniger Zeit hat der Emissionsmarkt, auf Änderungen in x_t zu reagieren. Die Möglichkeit, Vermeidungsmaßnahmen über die Zeit zu verteilen, nimmt ab. Am Ende der Handelsperiode zum Zeitpunkt $t = T$ weist die Oberfläche der Spotpreisfunktion in Abbildung 4.2 sogar eine Diskontinuität auf. Zu diesem Zeitpunkt ist jegliche Unsicherheit über das tatsächliche Emissionsvolumen im Markt beseitigt und der Preis $S(T, x_T)$ ist entweder null oder entspricht den Strafkosten p . Weiter lässt sich erkennen, dass die Steigung in Richtung der x_t -Achse gegen null geht, sobald man sich von der Region um die Anfangsausstattung e_0 entfernt. Dies bedeutet, dass auch die Volatilität des Spotpreises abnimmt und schließlich gegen null geht, wenn der Spotpreis gegen eine der Preisgrenzen läuft. Die Volatilität des Spotpreises in Abhängigkeit von Zeit t und aktuellem Spotpreis $S(t, x_t)$ wird in Abschnitt 4.3.3 nochmals explizit analysiert werden.

Was bedeutet die resultierende Spotpreisgleichung (4.19) für das aggregierte Vermeidungs- und Bankingverhalten des Marktes? Im Kontext des vorgestellten Modells wird Banking bzw. Borrowing im Zeitpunkt t definiert als

$$b_t = u_t + \frac{e_0}{T} - y_t. \quad (4.20)$$

$\frac{e_0}{T}$ beschreibt die Anfangsausstattung mit Emissionszertifikaten je Zeiteinheit. Wenn diese zusammen mit der aktuellen Vermeidungsrate u_t über der Emissionsrate y_t liegt, findet Banking von Emissionszertifikaten für einen potenziellen späteren Einsatz statt. Ein negatives b_t entspricht äquivalent einem Borrowing von Emissionszertifikaten aus der Zukunft. In einer deterministischen Welt mit einer im Zeitablauf konstanten Grenzvermeidungskostenkurve ist der einzige Grund für Banking ein von null verschiedener Diskontierungssatz.²³ Im vorliegend diskutierten Spezialfall eines White-Noise-Prozesses für die Emissionsrate und $r = 0$ gilt im deterministischen Rahmen $y_t = y_0$ und somit $b_t = u_t + \frac{e_0}{T} - y_0 = u_t + \frac{e_0 - x_0}{T}$. Im deterministischen Rahmen müssen insgesamt gerade $x_0 - e_0$ Einheiten CO₂ vermieden werden. Da auf Grund der quadratischen Vermeidungskostenfunktion bei gegebener Vermeidungsmenge eine konstante Vermeidung am günstigsten ist, folgt $u_t = \frac{x_0 - e_0}{T}$ und damit

²³Vgl. z. B. Rubin (1996).

$b_t = 0$. Dies ändert sich in einer Welt mit Unsicherheit. Ein positives Banking kann in diesem Fall eine Versicherung gegen mögliche zukünftige Verluste auf Grund plötzlicher, unerwarteter Änderungen der Emissionsrate sein.

Auf Grund von Gleichung (4.13) und der Tatsache, dass die erwartete Änderung von $V^{(x)}$ zu jedem Zeitpunkt gleich null ist, folgt, dass für $r = 0$ auch die erwartete Änderung der Vermeidung u_t gleich null ist. Somit gilt

$$E_0[b_t] = u_0 + \frac{e_0 - x_0}{T}. \quad (4.21)$$

Aus Gleichungen (4.15) und (4.19) folgt bei Anwendung der Parameterwerte aus Tabelle 4.6 eine erwartete Vermeidung $u_0 = 114.4$ pro Zeiteinheit. Im deterministischen Fall wäre die Vermeidung lediglich $-\frac{(e_0 - x_0)}{T} = 80$ je Zeiteinheit. Somit ist das erwartete Banking $E_0[b_t]$ über die Handelsperiode hinweg größer als null. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund interessant, dass im beschriebenen Modell weder Risikoaversion noch positive Diskontfaktoren oder zeitabhängige Grenzvermeidungskosten notwendig sind, um ein Banking durch den Markt zu induzieren. Somit würden selbst risikoneutrale Marktteilnehmer mehr CO₂ vermeiden, als es vom Regulator vorgesehen ist. Dies wird so lange geschehen, wie eine von null verschiedene Wahrscheinlichkeit besteht, dass am Ende der Handelsperiode Strafzahlungen zu entrichten sind. Es sei zusätzlich angemerkt, dass ein höheres Vermeidungsvolumen einen insgesamt niedrigeren Bedarf nach CO₂-Zertifikaten impliziert und dadurch auch das Handelsvolumen sinken würde.

4.3.2.3 Numerische Lösung für allgemeinen Fall

Sobald $G(t)$ nicht konstant ist oder $r > 0$ gilt, hat die charakteristische PDG (4.14) zeitabhängige Koeffizienten und eine analytische Lösung ist nicht länger bekannt. Nachfolgend soll kurz demonstriert werden, dass die resultierenden Eigenschaften für Zertifikatspreise aus dem analytisch lösbaren Spezialfall repräsentativ für allgemeinere Fälle sind. Daher wird numerisch eine Lösung bei Verwendung eines zeitabhängigen $G(t)$ als auch positiver Zinssätze bestimmt. Um den Effekt des Zinssatzes deutlich zu machen, wird ein relativ hoher Zinssatz von $r = 0,1$ verwendet. Die Emissionsrate y_t folge nun einer arithmetisch Brownschen Bewegung an Stel-

le eines White-Noise-Prozesses.²⁴ Wie in Anhang B.1 gezeigt, gilt in diesem Fall $G(t) = \sigma(T - t)$ für den kontrollierten Prozess x_t . Alle anderen Parameter bleiben unverändert. Dies führt zur semilinearen PDG mit zeitabhängigen Koeffizienten

$$V^{(t)} = -\frac{1}{2}(\sigma(T - t))^2 V^{(xx)} - \frac{1}{2c} e^{rt} (V^{(x)})^2. \quad (4.22)$$

Diese PDG kann numerisch gelöst werden. Die Lösung für den Spotpreis $S(t, x_t)$ ist in Abbildung 4.3 dargestellt.²⁵ Vergleicht man diese mit Abbildung 4.2, so kann das gleiche qualitative Verhalten beobachtet werden. Der offensichtlichste Unterschied wird durch den von null verschiedenen Zinssatz verursacht. Wenn man sich für große x_t entlang der t -Achse bewegt, so ist gut zu erkennen, dass die Preisobergrenze nun den diskontierten Strafkosten $e^{-r(T-t)}p$ entspricht. Verglichen mit Abbildung 4.2 zeigt sich der Effekt des nicht konstanten $G(t)$ hauptsächlich im unterschiedlich schnellen Wachstum der Steigung in Richtung der x_t -Achse, wenn man sich entlang der t -Achse bewegt. Mit anderen Worten, der Anstieg der Volatilität des Spotpreisprozesses im Zeitablauf unterscheidet sich leicht vom zuvor beschriebenen Spezialfall. Dieser Effekt wird nachfolgend noch ausführlicher diskutiert, wenn die Volatilitätsfläche des resultierenden Spotpreisprozesses genauer analysiert wird.

4.3.3 Analyse des resultierenden Spotpreisprozesses

Die Herleitung und Diskussion der Lösung hat bereits gezeigt, dass unabhängig von der Form der Emissionsrate y_t der resultierende diskontierte Spotpreis $S(t, x_t)$ für Emissionszertifikate ein Martingal ist und nicht von eventuellen deterministischen Komponenten in der Emissionsrate y_t beeinflusst wird. Zudem existiert eine Obergrenze für den Spotpreis, die von der Höhe der Strafkosten p abhängt. Für eine weitere Analyse der Eigenschaften des resultierenden Spotpreisprozesses wird wieder der analytisch lösbare Spezialfall $G(t) = \sigma$ und $r = 0$ genutzt.

Tabelle 4.7 zeigt die Ergebnisse einer kurzen Sensitivitätsanalyse des Modells in Bezug auf Änderungen der gewählten Parameterwerte. Die Tabelle zeigt, in welche

²⁴Anders als der White-Noise- und der Ornstein-Uhlenbeck-Prozess kann sich die arithmetisch Brownsche Bewegung beliebig weit vom Startwert entfernen. Sie dient daher als gutes Beispiel, um die Auswirkungen einer qualitativen Änderung der Dynamiken der Emissionsrate y_t zu zeigen.

²⁵Die Lösung der PDG erfolgt mit Hilfe der vertikalen Linienmethode, vgl. Großmann und Roos (2005), S. 116f. Zur räumlichen Diskretisierung wird dabei ein Finite-Differenzen-Verfahren verwendet.

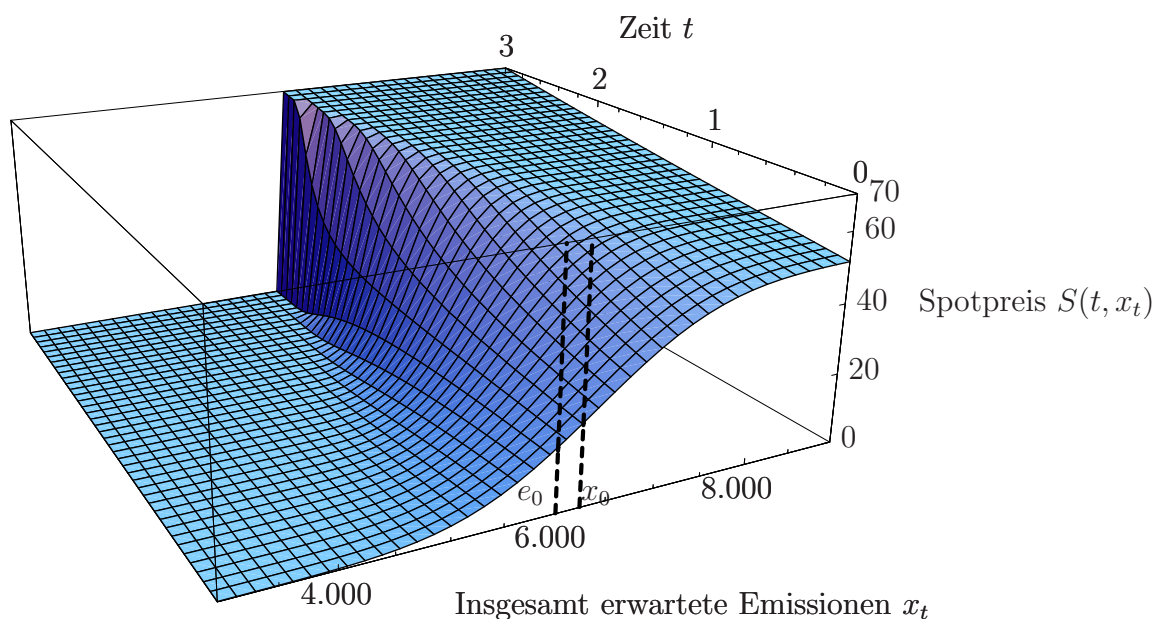


Abbildung 4.3: Spotpreise $S(t, x_t)$ im theoretischen CO₂-Preismodell – risikoneutraler allgemeiner Fall. Die Abbildung zeigt Spotpreise für Emissionszertifikate abhängig von Zeit t und insgesamt erwarteten Emissionen x_t innerhalb einer Handelsperiode entsprechend der numerischen Lösung für die PDG (4.22). Die Emissionsrate folgt einer arithmetisch Brownschen Bewegung und für den Zinssatz gilt $r = 0,1$. Die restlichen Parameterwerte wurden wie in Tabelle 4.6 gewählt.

Richtung sich der Spotpreis $S(0, x_0)$ zum Zeitpunkt $t = 0$ verändert, wenn ein Parameterwert geändert wird und alle anderen Parameterwerte unverändert bleiben. Wie erwartet steigt der Spotpreis und damit auch die Vermeidung u_0 mit steigenden Strafkosten p , anfänglich erwarteten Emissionen x_0 sowie Vermeidungskostenkoeffizient c . Der Spotpreis fällt mit steigender Anfangsausstattung an Emissionszertifikaten e_0 . Die Richtung der Änderung des Spotpreises in Abhängigkeit von der Volatilität σ der Emissionsrate y_t hängt von der Höhe des anfänglichen Spotpreises $S(0, x_0)$ ab. Der Grenzwert von Gleichung (4.19) für $\sigma \rightarrow \infty$ liegt bei $0,5p$. Dieser wird sowohl von oben als auch von unten her erreicht. Intuitiv erwartet man, dass eine ansteigende Volatilität immer zu einem Anstieg des anfänglichen Spotpreises führt. Es sei nun aber der anfängliche Spotpreis $S(0, x_0)$ bereits über $0,5p$ und nahe der oberen Preisgrenze p . In diesem Fall erhöht ein Anstieg von σ nur die Wahrscheinlichkeit, dass am Ende der Handelsperiode der Spotpreis bei null liegt. Höher kann der anfängliche Spotpreis ohnehin kaum steigen, daher fällt er, bis er schließlich das Limit $0,5p$ erreicht.

Tabelle 4.7: Sensitivität des Spotpreises $S(0, x_0)$ im theoretischen CO₂-Preismodell.

Geänderter Parameter	Richtung Preisänderung*
Strafkosten: p	↑
Anfangsausstattung mit Zertifikaten: e_0	↓
Insgesamt erwartete Emissionen: x_0	↑
Grenzvermeidungskostenkoeffizient: c	↑
Volatilität Emissionsrate: σ	↑ ↓

* Die Tabelle beschreibt die Richtung der Änderung des Spotpreises $S(0, x_0)$ bei positiver Änderung des entsprechenden Parameterwerts. Die Analyse bezieht sich auf den in Abschnitt 4.3.2.2 diskutierten Spezialfall, dass die Emissionsrate y_t einem White-Noise-Prozess folgt und der Zinssatz r gleich null ist.

Mit Ausnahme des Parameters p ist die Existenz einer Grenze für den Spotpreis $S(0, t_0)$ in Bezug auf Änderungen der zu Grunde liegenden Parameterwerte trivial, da bereits zuvor gezeigt wurde, dass Spotpreise niemals p übersteigen können. Interessanterweise hat der Spotpreis $S(0, t_0)$ allerdings auch eine Obergrenze in Bezug auf positive Änderungen im Parameter p .²⁶ Diese Obergrenze existiert, da die Strafkosten für die CO₂-Vermeidungsstrategie irrelevant werden, wenn sie zu hoch ansteigen. Die Strategie in diesem Fall wäre nämlich diejenige, für welche mit Sicherheit keine Strafkosten zu zahlen sind. Sie wird somit zwar von allen anderen Parametern, aber nicht mehr länger von p abhängen.

Wie bereits erwähnt, ist die Volatilität des resultierenden Spotpreis $S(t, x_t)$ nicht konstant, sondern hängt sowohl von der Zeit t als auch erwarteten Emissionen x_t ab. Dieser Zusammenhang soll nun genauer analysiert werden. Da $S(t, x_t)$ eine Funktion von t und x_t ist und x_t gerade

$$dx_t = -u_t dt + G(t) dW_t \quad (4.23)$$

folgt, ergibt die Anwendung von Itô's Lemma

$$dS = (-u_t S^{(x)} + S^{(t)} + \frac{1}{2}(G(t))^2 S^{(xx)}) dt + G(t) S^{(x)} dW_t. \quad (4.24)$$

²⁶Im Fall der Gleichung (4.19) für den analytisch lösbaren Spezialfall kann diese Obergrenze zu $\frac{ce - \frac{(e_0 - x_0)^2}{2T\sigma^2} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sigma}{\sqrt{T}(1 + \operatorname{Erfc}[\frac{e_0 - x_0}{\sqrt{2}\sqrt{T}\sigma})]}$ bestimmt werden.

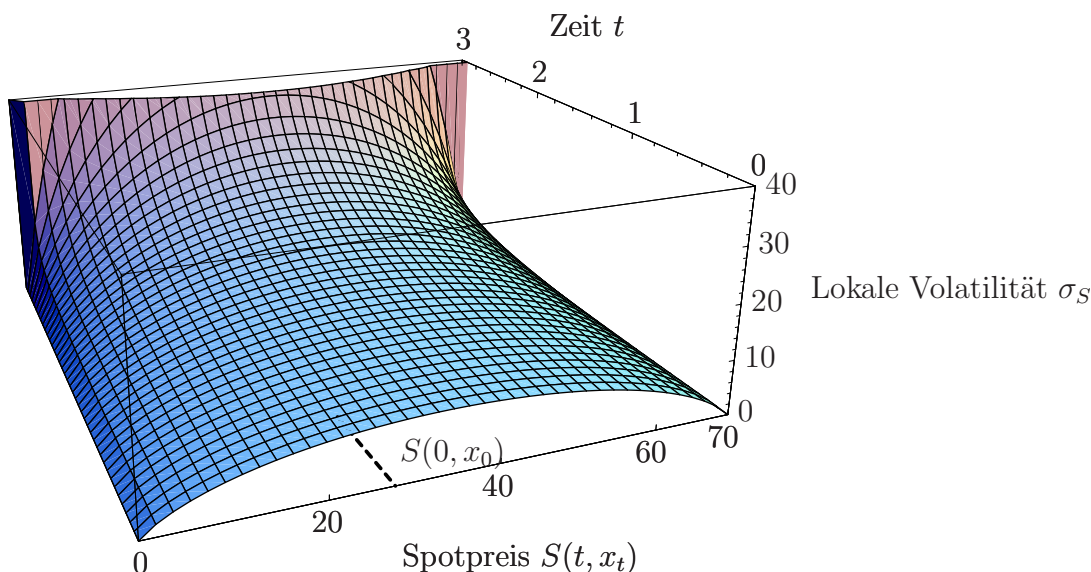


Abbildung 4.4: Lokale Volatilität σ_S im theoretischen CO₂-Preismodell – risikoneutraler Spezialfall. Die Abbildung zeigt die lokale Volatilität σ_S des nach Gleichung (4.19) resultierenden Spotpreisprozesses abhängig von Zeit t und Spotpreis $S(t, x_t)$. Die Emissionsrate folgt einem White-Noise-Prozess und für den Zinssatz gilt $r = 0$. Parameterwerte wurden wie in Tabelle 4.6 gewählt. Als Erwartungswert für den Spotpreis ergibt sich $S(0, x_0) = 27,46$.

Offensichtlich ist die Volatilität von $S(t, x_t)$ nicht konstant, sondern hängt sowohl von t und x_t ab. Nachfolgend sei $\sigma_S = G(t)S(x)$ als lokale Volatilität des resultierenden Spotpreisprozesses $S(t, x_t)$ bezeichnet. Es sei erneut $G(t) = \sigma$ und $r = 0$. Wie zuvor besprochen sind eine Vielzahl der sich aus diesem Spezialfall ergebenden Eigenschaften repräsentativ für allgemeinere Fälle. Abbildung 4.4 zeigt σ_S abhängig von der Zeit t und dem Spotpreis $S(t, x_t)$.²⁷

Die Diskussion von Abbildung 4.2 gab bereits einen Eindruck davon, wie die Volatilitätsfläche des resultierenden Spotpreisprozesses $S(t, x_t)$ aussehen sollte. Abbildung 4.4 bestätigt dies deutlich. Die lokale Volatilität geht zu beiden Enden des möglichen Preisintervalls gegen null. Das Maximum auf der S -Achse wird in der Mitte des Spotpreisintervalls erreicht. In Richtung der t -Achse nimmt die lokale Volatilität zu und geht schließlich im Maximum gegen unendlich, wenn das Peri-

²⁷Analytisch bestimmt werden kann dabei nur σ_S in Abhängigkeit von t und x_t . Die Transformation der x_t -Achse in die in der Abbildung 4.4 gezeigte $S(t, x_t)$ -Achse kann nur numerisch erfolgen.

odenende erreicht wird.²⁸ Der Grund dafür, dass σ_S zum Zeitpunkt $t = T$ gegen unendlich geht, liegt darin, dass die Ableitung der Spotpreisfunktion $S(t, x_t)$ auf Grund des Knicks in der Randbedingung (4.12) an der Stelle $x_T = e_0$ gegen unendlich geht. Bei Annahme sowohl einer arithmetisch Brownschen Bewegung als auch eines Ornstein-Uhlenbeck-Prozesses für die Emissionsrate y_t ergibt sich qualitativ ein ähnliches Bild. Ein Vergleich der drei Prozesse in Bezug auf die resultierende lokale Volatilität findet sich in Anhang B.3. Für alle drei diskutierten Prozesse ist die lokale Volatilität strikt ansteigend in t und geht gegen null, wenn der Spotpreis sich den Preisgrenzen nähert.

Tabelle 4.8 zeigt auch für die lokale Volatilität σ_S die Ergebnisse einer kurzen Sensitivitätsanalyse. Ähnlich dem Spotpreis $S(0, x_0)$ steigt die lokale Volatilität σ_S mit steigenden Strafkosten p und Vermeidungskostenkoeffizient c . Darüber hinaus steigt σ_S auch mit steigender Volatilität σ der zu Grunde liegenden Emissionsrate. Interessanterweise gibt es aber eine Obergrenze für den Anstieg von σ_S in Bezug auf ein steigendes σ .²⁹ Dieses möglicherweise etwas überraschende Ergebnis hat eine intuitive Erklärung. Wie gezeigt kann der Spotpreis $S(t, x_t)$ unabhängig von der Volatilität σ der zu Grunde liegenden Emissionsrate das Intervall $[0, p]$ nicht verlassen. Daher sollte auch die lokale Volatilität σ_S immer begrenzt sein. Im Fall der Anfangsausstattung e_0 und den insgesamt erwarteten Emissionen x_0 ist für die Sensitivität nicht die absolute Höhe entscheidend. Vielmehr geht σ_S für hohe absolute Differenzen $|e_0 - x_0|$ gegen null. Im Fall von $e_0 > x_0$ geht der Spotpreis dabei gegen null, im umgekehrten Fall gegen die obere Preisgrenze. Dies zeigt auch ein erneuter Blick auf Abbildung 4.2. Die Steigung in Richtung x_t -Achse nähert sich um so mehr null an, je weiter sich x_0 von e_0 entfernt.

4.3.4 Modellerweiterung um Risikoaversion

Selbst ohne Risikoaversion resultiert das vorgestellte Modell in einem Emissionsmarkt, der mehr CO₂ vermeidet als vom Regulator gefordert. Dementsprechend sind auch die erwarteten Spotpreise höher, als sie dies in einer deterministischen Welt wären. Nachfolgend wird darüber hinaus der mögliche Einfluss von Risikoaversion

²⁸Abbildung 4.4 ist daher nach oben hin abgeschnitten.

²⁹Im Fall der Lösung (4.19) für den analytisch lösbaren Spezialfall kann diese Obergrenze zu $\frac{p}{\sqrt{2\pi T}}$ bestimmt werden.

Tabelle 4.8: Sensitivität der lokalen Volatilität σ_S für $t = 0$ im theoretischen CO₂-Preismodell.

Geänderter Parameter	Richtung Volatilitätsänderung*
Strafkosten: p	↑
Anfangsausstattung mit Zertifikaten: e_0	↑ ↓
Insgesamt erwartete Emissionen: x_0	↑ ↓
Grenzvermeidungskostenkoeffizient: c	↑
Volatilität Emissionsrate: σ	↑

* Die Tabelle beschreibt die Richtung der Änderung der lokalen Volatilität σ_S zum Zeitpunkt $t = 0$ bei positiver Änderung des entsprechenden Parameterwerts. Die Analyse bezieht sich auf den in Abschnitt 4.3.2.2 diskutierten Spezialfall, dass die Emissionsrate y_t einem White-Noise-Prozess folgt und der Zinssatz r gleich null ist.

auf CO₂-Preise diskutiert. Zu diesem Zweck sei die logarithmische Nutzenfunktion

$$util(f) = \frac{\ln(1 + gf)}{g} \quad (4.25)$$

definiert, wobei f die Kosten bezeichne und g den Grad der Risikoaversion angibt.³⁰ Es sei nun weiter ein repräsentativer Agent angenommen, für den diese Nutzenfunktion Gültigkeit besitzt.³¹ Somit kann die Nutzenfunktion (4.25) auf die ursprüngliche Zielfunktion (4.7) des Modells angewandt werden. Bei ansonsten unveränderten Rahmenbedingungen maximiert der zentrale Planer im Modell nun den erwarteten Nutzen des repräsentativen Agenten. Mit der Annahme $r = 0$ folgt somit für die neue Zielfunktion im risikoaversen Fall

$$\max_{\{u_t\}_{t \in [0, T]}} E_0 \left[\int_0^T \frac{\ln(1 - \frac{1}{2}gcu_t^2)}{g} dt + \frac{\ln(1 + g \min[0, p(e_0 - x_T)])}{g} \right]. \quad (4.26)$$

³⁰An Stelle der verwendeten Funktion kann auch jede andere Nutzenfunktion verwendet werden, die negative Werte für f zulässt. Die Art der Risikoaversion wird hier nicht näher thematisiert, da nur der prinzipielle Einfluss von Risikoaversion auf die CO₂-Preisdynamik diskutiert werden soll. In Abbildung 4.5 würde sich die qualitative Form des Preisanstiegs über die risikoneutrale Preisgrenze p hinaus je nach Form der Nutzenfunktion leicht unterscheiden.

³¹Ein repräsentativer Agent im Modell ist notwendig, da je nach den Risikoeinstellungen der Marktteilnehmer nicht mehr ohne weiteres angenommen werden kann, dass sich die Grenzvermeidungskosten der CO₂-regulierten Unternehmen angleichen. Vielmehr muss sich nun der Grenznutzen angleichen (was im risikoneutralen Fall gerade den Grenzkosten entspricht). Ein Nebeneffekt davon ist, dass unter diesen Annahmen das Emissionshandelssystem nicht mehr zur gesamt-kostenminimalen Lösung führt, vgl. z. B. Baldursson und von der Fehr (2004), S. 703.

Folgt man erneut den in Abschnitt 4.3.2 beschriebenen Schritten, ergibt sich für die Kontrollvariable

$$u_t = \frac{c - \sqrt{c^2 + 2gc(V^{(x)})^2}}{gcV^{(x)}}. \quad (4.27)$$

Dies führt dann wiederum zu der für die Lösung charakteristischen PDG, die allerdings nur numerisch nach dem Spotpreis $S(t, x_t)$ gelöst werden kann.

Abbildung 4.5 zeigt beispielhaft die resultierende Spotpreisfunktion zum Zeitpunkt $t = 2$. Die Parameterwerte sind erneut Tabelle 4.6 entnommen und der Risikoaversionskoeffizient ist mit $g = 10^{-6}$ bestimmt. Der zentrale Unterschied zum risikoneutralen Fall ist das Fehlen einer Preisobergrenze. Die neue Zielfunktion bestraft große Abweichungen vom erwarteten Preispfad im Verhältnis stärker als kleine Abweichungen. Deshalb versucht das Modell, einmalige hohe Strafkosten am Ende der Handelsperiode zu vermeiden, auch wenn dies bedeutet, innerhalb der Periode im Durchschnitt höhere Vermeidungskosten zu akzeptieren als dies sonst notwendig wäre. Dieser Effekt zeigt sich auch in Abbildung 4.6, welche zum Zeitpunkt $t = 2$ die resultierende lokale Volatilität σ_S im risikoaversen Fall zeigt. Der Verlauf ist zwar immer noch ähnlich zum risikoneutralen Fall, allerdings verbleibt nun auch oberhalb der früheren Preisgrenze p ein gewisses Maß an Volatilität. Die Höhe dieser Volatilität hängt vom Grad der Risikoaversion ab.

Ist es realistisch, dass CO₂-Preise oberhalb der Strafkosten p existieren können? Die zentrale Annahme hierbei ist die eines repräsentativen risikoaversen Agenten. Sollten im Markt risikoneutrale Unternehmen agieren, so stellen Preise oberhalb der Strafkosten für diese eine Arbitragemöglichkeit dar. Sie würden sofort Emissionszertifikate verkaufen und dafür später die niedrigeren Strafkosten bezahlen, womit sie die Preise nach unten treiben würden. Solange also risikoneutrale Unternehmen ohne Verkaufsbeschränkungen im Markt existieren, können CO₂-Preise nicht über den Strafkosten liegen.

4.3.5 Fazit: Theoretisches CO₂-Preismodell

Das Ziel der Entwicklung des theoretischen CO₂-Preismodells war es, Anhaltspunkte für das dynamische Preisverhalten von Emissionszertifikaten in einem Markt wie dem EU EHS zu erhalten. Das beschriebene Modell bildet dazu zentrale Elemente

Spotpreis für $t = 2$

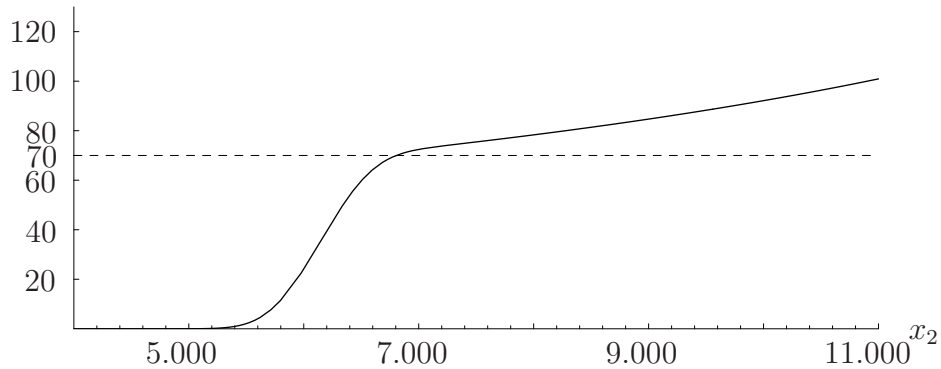


Abbildung 4.5: Spotpreise $S(t, x_t)$ im theoretischen CO₂-Preismodell – risikoaverser Fall. Die Abbildung zeigt Spotpreise für Emissionszertifikate zum Zeitpunkt $t = 2$ abhängig von insgesamt erwarteten Emissionen x_2 für den risikoaversen Fall. Die Emissionsrate folgt einem White-Noise-Prozess und für den Zinssatz gilt $r = 0$. Die Preisobergrenze im risikoneutralen Fall ist durch die gestrichelte Linie angedeutet. Der Risikoaversionskoeffizient ist $g = 10^{-6}$, die restlichen Parameterwerte wurden wie in Tabelle 4.6 gewählt.

Lokale Volatilität σ_S für $t = 2$

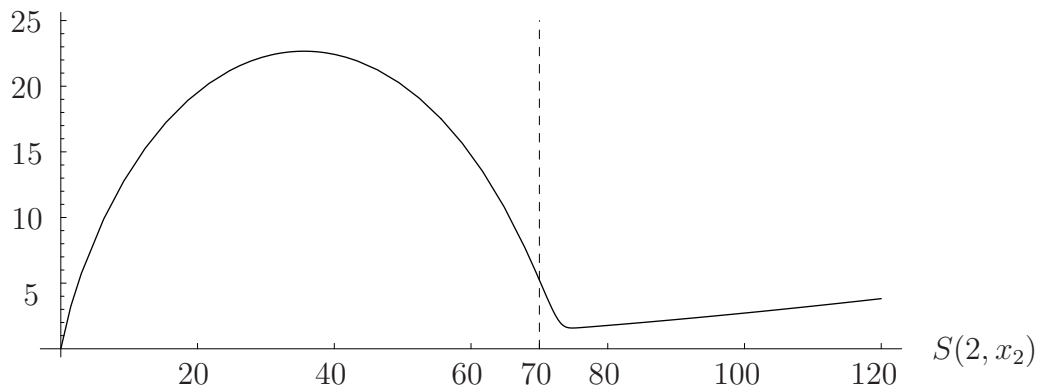


Abbildung 4.6: Lokale Volatilität σ_S im theoretischen CO₂-Preismodell – risikoaverser Fall. Die Abbildung zeigt die lokale Volatilität σ_S abhängig vom Spotpreis $S(t, x_t)$ zum Zeitpunkt $t = 2$ für den risikoaversen Fall. Die Emissionsrate folgt einem White-Noise-Prozess und für den Zinssatz gilt $r = 0$. Die Preisobergrenze im risikoneutralen Fall ist durch die gestrichelte Linie angedeutet. Der Risikoaversionskoeffizient ist $g = 10^{-6}$, die restlichen Parameterwerte wurden wie in Tabelle 4.6 gewählt.

des EU EHS ab, insbesondere den Bruch zwischen den Handelsperioden. Bei Annahme von Risikoneutralität lassen sich folgende Aussagen für die Dynamiken in der ersten Handelsperiode ableiten:

- Eventuelle saisonale bzw. deterministische Komponenten der Emissionsrate haben keinen Einfluss auf die Dynamiken des resultierenden Spotpreisprozesses, da sie bereits in den insgesamt für die Handelsperiode erwarteten Emissionen enthalten sind.
- Spotpreise sind immer nicht negativ und Strafkosten markieren eine Preisobergrenze. Dabei ist zu beachten, dass die Strafkosten alle Kosten, inklusive der Kosten für die Nachlieferung fehlender Zertifikate beinhalten.
- Diskontierte Spotpreise sind Martingale, unabhängig von der Form des zu Grunde liegenden Prozesses für die Emissionsrate. Selbst wenn die Emissionsrate Mean-Reversion aufweist wird der resultierende Spotpreisprozess trotzdem keine Mean-Reversion zeigen.
- Die Volatilität des Spotpreises nimmt zu den Preisgrenzen hin ab, während sie gleichzeitig zum Ende der Handelsperiode hin zunimmt.

Bei Annahme von Risikoaversion im Markt ist die Preisobergrenze nicht mehr bindend, zumindest wenn man zusätzlich annimmt, dass alle Marktteilnehmer risikoavers sind. Die Volatilität des Spotpreises nimmt allerdings auch im risikoaversen Fall ab, wenn sich der Preis der Obergrenze aus dem risikoneutralen Fall nähert.³²

Ein reales Beispiel für den direkten und sofortigen Einfluss der erwarteten Emissionen ist wiederum der starke Preiseinbruch für EUAs Ende April/Anfang Mai, als die Marktteilnehmer auf Grund der von der EU veröffentlichten nationalen Emissionsberichte ihre Erwartungen bezüglich CO₂-Emissionen stark korrigiert haben. Daher ist es sinnvoll, über Sprünge im Prozess für erwartete Emissionen x_t nachzudenken, z. B. wenn neue Informationen bezüglich Emissionsvolumen gehäuft an bestimmten Tagen veröffentlicht werden. Der resultierende Spotpreisprozess wird dann ebenfalls

³²Trotz der zum Teil sehr unterschiedlichen Annahmen sind die Ergebnisse des theoretischen CO₂-Preismodells insoweit konsistent mit den Ergebnissen aus dem erwähnten Modell von Fehr und Hinz (2006), als beide Modelle zu einer strikten Preisobergrenze und einer im Zeitablauf zunehmenden Volatilität des resultierenden Spotpreisprozesses führen.

Sprünge aufweisen. Eine ebenso wahrscheinliche Erklärung ist aber, dass auf Grund des frühen Marktstadiums des EU EHS die Erwartungsbildung noch mit zu vielen Unsicherheiten belastet ist, um effizient zu funktionieren. Es wäre daher von Vorteil für einen effizienten Handel, wenn Emissionsberichte nicht mehr nur jährlich, sondern z. B. quartalsweise veröffentlicht werden.

Aus der Diskussion des Modells wird zudem klar, dass eine strikte Trennung der Handelsperioden, wie vom EU EHS vorgesehen, aus Sicht der Marktteilnehmer sehr nachteilig ist, da die Preisvolatilität gegen Ende hin stark ansteigen kann. Der Regulator sollte daher darüber nachdenken, den Übergang zwischen den Handelsperioden anders zu gestalten. Viele Marktteilnehmer gehen mittlerweile davon aus, dass ab der zweiten Handelsperiode das Banking zwischen den Perioden erlaubt wird, insbesondere, da Banking auch im Kyoto-Protokoll über 2012 hinaus vorgesehen ist. Damit wäre auch ein Ansteigen der Volatilität im Zeitablauf nicht mehr unbedingt zu erwarten. Zudem stellt sich auch die Frage nach einer Preisobergrenze neu. Auf Grund der fehlenden Trennung der Handelsperioden würde sich eine Erhöhung der Preise in der aktuellen Handelsperiode auch auf zukünftige Perioden auswirken. Dann erscheint die Annahme von Strafkosten plus einem fixen Wert für ein Emissionszertifikat aus der nächsten Handelsperiode als Preisobergrenze nicht mehr gerechtfertigt.

Die Ergebnisse aus dem entwickelten Modell sind nicht nur aus rein theoretischer Sicht interessant. Ein Käufer oder Verkäufer eines Optionsvertrages auf CO₂-Emissionszertifikate wird in der Regel einen zu Grunde liegenden Spotpreisprozess annehmen, um den Vertrag zu bewerten. Wenn dieser Prozess z. B. eine vorhandene Preisobergrenze ignoriert, wird der Optionsvertrag gegebenenfalls signifikant falsch bewertet.

Obwohl das Modell bereits relativ einfach aufgebaut ist, ist es dennoch nur für den beschriebenen Spezialfall analytisch lösbar. Eine Kalibrierung an Daten ist daher aufwändig.³³ Darüber hinaus sind CO₂-Emissionsdaten nicht auf täglicher Basis beobachtbar, was eine Kalibrierung des Modells an EUA-Preise weiter erschwert.³⁴ Stattdessen wird nachfolgend versucht, Preise für EUAs im EU EHS direkt mit

³³Vgl. zur numerischen Kalibrierung von Partialdifferentialgleichungen z. B. Banks und Kunisch (1989).

³⁴Tatsächlich gab es bis Ende 2006 nur einen einzigen Beobachtungspunkt für CO₂-Emissionen, die nationalen Emissionsberichte mit den jährlichen CO₂-Emissionen für 2005.

ausgewählten stochastischen Prozessen zu modellieren. Im Idealfall berücksichtigen diese Prozesse Eigenschaften, die sich aus der Diskussion des theoretischen Modells ergeben haben. Die kalibrierten Prozesse können dann z. B. für die Bewertung von CO₂-Derivaten oder die genauere Modellierung von Strompreisen verwendet werden.

4.4 Direkte CO₂-Preismodellierung

Das Ziel dieses Abschnittes ist es, geeignete Prozesse für die direkte Modellierung von CO₂-Preisen aus empirischer Sicht zu identifizieren. Daher wird nach der Beschreibung der verwendeten Datengrundlage zunächst für verschiedene stochastische Prozesse diskutiert, inwieweit diese geeignet sind, die Besonderheiten des EU EHS zu berücksichtigen und abzubilden. Danach werden diese Prozesse an Daten kalibriert und die Ergebnisse miteinander verglichen. Um den Unterschieden in der ersten und zweiten Handelsperiode gerecht zu werden, werden sowohl Spotpreise aus der ersten Handelsperiode als auch Futurespreise der zweiten Handelsperiode in die Analyse einbezogen.

4.4.1 Datengrundlage

Obwohl die Powernext die liquideste Börse für EUAs ist, werden nachfolgend Spotpreise von der EEX für die Kalibrierung genutzt, da die EEX am frühesten mit dem Börsenhandel von EUAs begann und daher über die umfangreichste Datenhistorie verfügt. Auf Grund des freien Handels in Europa sollten jedoch untereinander keine Preisunterschiede bestehen, da sonst Arbitragemöglichkeiten zwischen den Börsen existieren würden.³⁵

Spotpreise für die zweite Handelsperiode sind frühestens ab dem Jahr 2008 verfügbar, wenn CO₂-regulierte Unternehmen zum ersten Mal EUAs für die 2. Handelsperiode zugeteilt bekommen. Bereits heute werden allerdings Terminkontrakte für das Jahr 2008 und danach an Börsen gehandelt. Möchte ein Investor eine Position in EUAs für die zweite Handelsperiode aufbauen, so kann er dies mit Hilfe dieser Terminkontrakte umsetzen. An Stelle eines direkten Investments in die noch nicht existierenden

³⁵Geringe Unterschiede können auf Grund von Transaktionskosten existieren. Vgl. auch Kristiansen et al. (2006).

EUAs geht er äquivalent eine Long-Position in einen Terminkontrakt mit physischer Lieferung ein und legt zur gleichen Zeit einen Betrag in Höhe des diskontierten Terminpreises zum risikolosen Zinssatz an. Am Fälligkeitstag des Terminkontrakts begleicht er den Kaufpreis mit der Rückzahlung aus der risikolosen Anlage.³⁶ Entsprechendes gilt für eine gewünschte Leerverkaufsposition.

Stellvertretend für die Dynamiken in der zweiten Handelsperiode werden daher diskontierte Terminpreise gemäß

$$\tilde{S}_t = e^{-r(T-t)} F_t(T) \quad (4.28)$$

analysiert. \tilde{S}_t sei nachfolgend in diesem Kontext auch als „synthetischer Spotpreis“ für die 2. Handelsperiode bezeichnet, während $F_t(T)$ den Terminpreis für einen Forward bzw. Future mit Lieferdatum T zum Zeitpunkt t beschreibe. Zur Berechnung des synthetischen Spotpreises wird der Future 2008 der ICE/ECX mit Lieferdatum 15. Dezember 2008 genutzt, da er der liquideste börsengehandelte Terminkontrakt für die 2. Handelsperiode ist. Für die Diskontierung der Futurespreise mit dem risikolosen Zinssatz r werden EURIBOR/EuroSwap-Sätze entsprechend der Laufzeit des Futures verwendet.³⁷

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass hier und im weiteren Verlauf der Arbeit eventuelle Bewertungsunterschiede von Forwards und Futures vernachlässigt werden und daher in der Regel vereinfachend der Begriff „Terminkontrakt“ verwendet wird, außer es soll ein tatsächlich gehandelter Forward- oder Futureskontrakt bezeichnet werden. Dies wird dadurch begründet, dass gehandelte EUA-Futures keine impliziten Optionen enthalten und EUAs nicht mit Zinssätzen korrelieren.³⁸

Abbildung 4.7 zeigt die für die Kalibrierung verwendeten EUA-Preise und synthetischen Spotpreise im Zeitraum vom 22. April 2005 bis zum 15. Dezember 2006.

³⁶Der erste verpflichtende Einreichungstermin für EUAs in der zweiten Handelsperiode ist der 30. April 2009. Somit ist bei einem Terminkontrakt mit physischer Lieferung im Jahr 2008 sichergestellt, dass die EUAs auch für regulatorische Erfordernisse zur Verfügung stehen, falls benötigt.

³⁷Die Quotierung des EURIBOR erfolgt nach „actual/360“, des EuroSwap nach „30/360“.

³⁸Vgl. zum Zusammenhang von Forward- und Futurespreisen bei Annahme stochastischer Zinssätze z. B. Geman (2005), S. 44 und S. 119f. Eine kurze Analyse der Korrelation zwischen Änderungen von EUA-Preisen an der Powernext und Änderungen des EURIBOR-Zinssatzes (12-Monatssatz) ergibt ein Bestimmtheitsmaß von lediglich 0,03. Getesteter Zeitraum ist Juni 2005 - November 2006. Die Korrelationsanalyse für Zinssätze mit Laufzeiten von einem Monat bzw. 3 Jahren ergibt jeweils Bestimmtheitsmaße von unter 0,01. Bewertungsunterschiede auf Grund des bei Forwards möglicherweise vorhandenen Kontrahentenrisikos werden hier vernachlässigt.

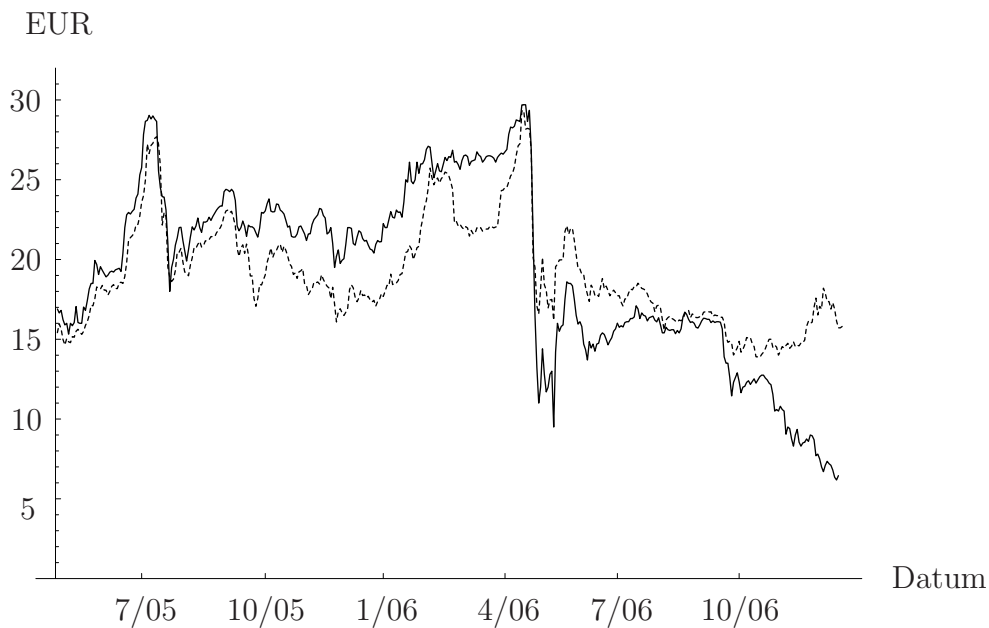


Abbildung 4.7: EUA-Preise und synthetische Spotpreise 2008. Die durchgezogene Linie zeigt Spotpreise für EUAs an der EEX, die gestrichelte Linie zeigt synthetische Spotpreise für die 2. Handelsperiode basierend auf Futures 2008 der ICE/ECX. Der Beobachtungszeitraum umfasst den 22. April 2005 bis zum 15. Dezember 2006.

Die EUA-Preise waren im Beobachtungszeitraum relativ volatil. Von ungefähr EUR 15 kommend, stiegen sie bis auf ca. EUR 30 an, um dann wieder bis auf unter EUR 10 zurückzufallen. Es sei s_t der logarithmierte Spotpreis. Die Volatilität der logarithmischen EUA-Renditen ($s_t - s_{t-1}$) lag bei ca. 4,8 Prozent auf täglicher Basis. Auf jährlicher Basis entspricht dies der relativ hohen Volatilität von ca. 76 Prozent. Zudem zeigt Abbildung 4.7, dass manche Preisbewegungen eher als Sprung zu beschreiben sind, z. B. Ende April 2006, als die Preise nach der Veröffentlichung der nationalen Emissionsberichte innerhalb weniger Handelstage um mehr als 50% gefallen sind. Die Darstellung der logarithmischen Renditen in Abbildung 4.8 zeigt zudem, dass die Volatilität der EUA-Preise über die Zeit offensichtlich nicht konstant war. Scheinbar gab es Marktphasen, in denen mehr Informationen in den Markt kamen und für volatilere Preise sorgten als in ruhigeren Marktphasen. Zusammengefasst sind dies erste Indizien, dass eine Normalverteilung vermutlich nicht ausreichen wird, die Verteilung der logarithmischen EUA-Renditen zu erklären.

Abbildung 4.9 zeigt die empirische Verteilung der logarithmischen Renditen für EUAs. In der gleichen Abbildung wird auch die an die empirische Verteilung ka-

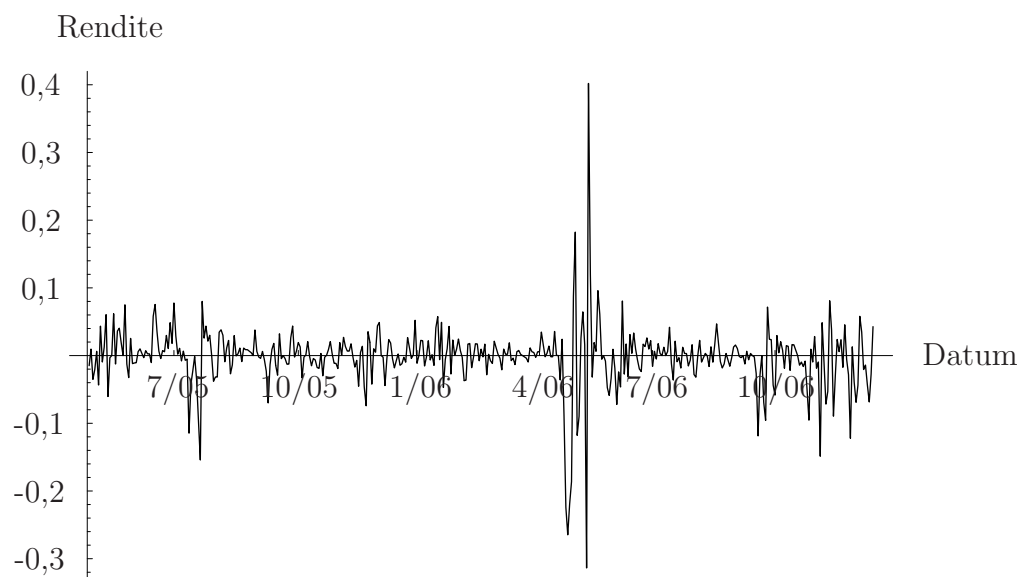


Abbildung 4.8: EUA-Renditen. Die Abbildung zeigt tägliche logarithmische Renditen für EUAs vom 23. April 2005 bis zum 15. Dezember 2006.

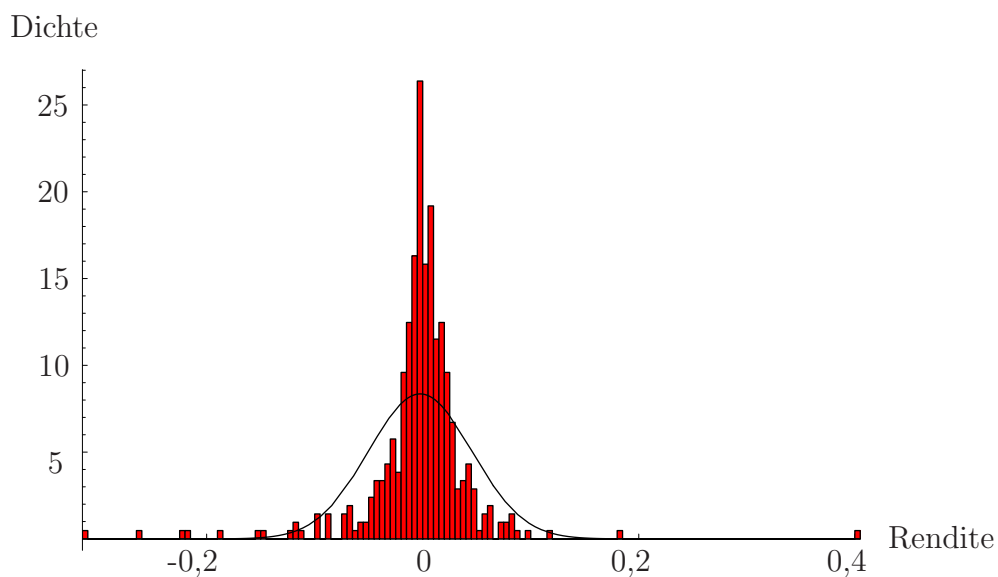


Abbildung 4.9: Empirische Dichte logarithmischer EUA-Renditen versus Normalverteilung. Das Histogramm zeigt die empirische Dichte von logarithmischen Renditen für EUAs an der EEX (23. April 2005 - 15. Dezember 2006). Die schwarze Linie zeigt dagegen die an die Daten kalibrierte Normalverteilung.

librierte Normalverteilung gezeigt. Während eine Schiefe zumindest visuell nicht direkt auffällt, so zeigt die Verteilung doch eine im Vergleich zur Normalverteilung überproportional große Gewichtung extremer Werte, weist also eine positive Kurtosis auf. Ein valides Spotpreismodell muss diese bereits nach kurzer Inspektion festzustellenden Eigenheiten in den EUA-Renditen erklären können.

Bisweilen hört man von Marktteilnehmern die Vermutung, dass EUA-Preise Mean-Reversion zeigen sollten, da sie von fundamentalen Angebots- und Nachfragefaktoren getrieben sind. Wie im Abschnitt 4.3 gezeigt, gibt es allerdings aus theoretischer Sicht keinerlei Gründe für eine Mean-Reversion. Aus ökonometrischer Sicht kann auf Mean-Reversion mit Hilfe diverser Einheitswurzeltests geprüft werden, da Mean-Reversion eine Stationarität in den EUA-Preisen zur Folge haben müsste. Für die Überprüfung der Stationarität seien nachfolgend der bekannte Augmented Dickey-Fuller (ADF) und der Phillips-Perron (PP) Einheitswurzeltest verwendet.³⁹ Eine signifikante Teststatistik ist gleichbedeutend mit der Ablehnung der Nullhypothese einer Einheitswurzel in den Preisdaten und deutet somit auf Stationarität hin. Sowohl für den ADF- als auch den PP-Test ist ein Abbruchparameter notwendig, der angibt, bis zu welcher Zeitdifferenz Autokorrelationen in den Daten berücksichtigt werden sollen. Dieser wurde gemäß dem Akaike Informationskriterium (AIC) sowie der Ljung-Box (LB) Teststatistik gewählt. Tabelle 4.9 zeigt klar, dass die Annahme einer Einheitswurzel in den Daten nicht abgelehnt werden kann, weder für EUA-Preise noch für synthetische Spotpreise der 2. Handelsperiode. Dies gilt unabhängig davon, ob eine Konstante oder ein Trend in der Regressionsgleichung des Einheitswurzeltests berücksichtigt wurde oder nicht. Die getesteten Zeitreihen sind nicht stationär und daher erscheint auch die Annahme von Mean-Reversion unplausibel.

4.4.2 Stochastische Prozesse für direkte CO₂-Preismodellierung

Nachfolgend werden die zu testenden stochastischen Prozesse für die CO₂-Preismodellierung vorgestellt und diskutiert. Die Parameterschätzer aus der daran anschließenden empirischen Kalibrierung beziehen sich exakt auf die vorgestellten Prozessformulierungen. Die Prozesse wurden ausgewählt, um typische Vertreter verschie-

³⁹Vgl. Dickey und Fuller (1979) und Phillips (1987).

Tabelle 4.9: Einheitswurzeltests für EUA-Preise und synthetische Spotpreise 2008.

	DF t	LB	ADF t	PP Zt
EUA-Preis				
Ohne Konstante	-0,96	12	-0,91	-0,87
Mit Konstante	0,21	12	0,35	-0,22
Mit Konstante und Trend	-1,46	12	-1,59	-1,66
Synthetischer Spotpreis 2008				
Ohne Konstante	-0,08	2	-0,12	-0,10
Mit Konstante	-2,11	1	-2,36	-2,25
Mit Konstante und Trend	-2,72	1	-2,91	-2,82

*, **, *** bedeutet Ablehnung der Nullhypothese einer Einheitswurzel auf dem 10, 5, 1 Prozentniveau. ADF t , bzw. PP Zt bezeichnen die (transformierten) t -Statistiken der ADF- bzw. PP-Einheitswurzeltests. Zusätzlich wird mit DF t die einfache Dickey-Fuller t -Statistik angegeben, da zumindest das Akaike Informationskriterium dafür spricht, keine verzögerten Autokorrelationen zu berücksichtigen. Es wird jeweils ohne als auch mit Konstante bzw. mit Berücksichtigung eines Trends in der Regressionsgleichung getestet. Der getestete Zeitraum umfasst den 23. April 2005 bis zum 15. Dezember 2006.

Für die ADF- und PP-Tests gibt LB an, bis zu welcher Zeitdifferenz Autokorrelationen berücksichtigt wurden, wobei das Kriterium für die aufzunehmenden Zeitdifferenzen hier die Insignifikanz der LB-Teststatistik für $H=20$ Lags auf dem 10%-Niveau ist.

dener Modellierungsansätze zu berücksichtigen, also z. B. die Berücksichtigung von Sprüngen, Regimewechseln oder nicht konstanter Volatilität. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, werden alle stochastischen Prozesse für logarithmierte Preise $s_t = \ln[S_t]$ formuliert.⁴⁰

4.4.2.1 Geometrisch Brownsche Bewegung

Der wahrscheinlich bekannteste stochastische Prozess in der Finanzwelt ist die geometrisch Brownsche Bewegung (GBB), wonach für den logarithmierten CO₂-Preis gilt

$$ds_t = \left(\mu - \frac{1}{2}\sigma^2\right)dt + \sigma dW_t. \quad (4.29)$$

⁴⁰Die Verwendung von logarithmierten Preisen impliziert die Annahme von stetigen Renditen, welche oft auch als Log-Renditen bezeichnet werden. Die Verwendung von Log-Renditen hat insbesondere Vorteile bei der Kalibrierung von Zeitreihenmodellen und ist die korrekte Annahme im Rahmen der Black/Scholes-Welt. Eine Diskussion zu Vor- und Nachteilen der Verwendung diskreter versus stetiger Renditen findet sich z. B. in Dorfleitner (2002) und Dorfleitner (2003).

Unter dieser Formulierung weist s_t eine deterministische Drift von $(\mu - \frac{1}{2}\sigma^2)$ und eine Volatilität von σ auf, wobei dW_t das Inkrement eines Wiener-Prozesses ist. Die GBB impliziert normalverteilte Renditen. Bei der Datenbeschreibung ist bereits klar geworden, dass eine Normalverteilung die empirisch beobachteten Renditen vermutlich nicht hinreichend genau beschreibt, dennoch wird die GBB oft von Praktikern als erste Annäherung verwendet und kann daher als Referenz für die Anpassungsgüte weiterer Prozesse dienen.

4.4.2.2 Ornstein-Uhlenbeck

Im Gegensatz zur GBB wird der Ornstein-Uhlenbeck-Prozess (OU-Prozess) häufig für die Modellierung von Commodities verwendet, die Mean-Reversion aufweisen, wie z. B. Strom oder Landwirtschaftsprodukte.⁴¹ Für den OU-Prozess gilt

$$ds_t = \kappa(\hat{\mu} - s_t)dt + \sigma dW_t. \quad (4.30)$$

Während κ die Geschwindigkeit der Mean-Reversion beschreibt, gibt $\hat{\mu}$ das langfristige Mittel des Prozesses an. Da auf Grund der bisherigen Diskussion eine Mean-Reversion für CO₂-Preise nicht erwartet wird, sollten sich die Ergebnisse für den OU-Prozess nicht wesentlich von denen für die GBB unterscheiden.

4.4.2.3 Prozess mit Preisobergrenze

Wie in Abschnitt 4.3 diskutiert, existiert möglicherweise in der ersten Handelsperiode im EU EHS eine Preisobergrenze. Somit würde sich der CO₂-Preis ausschließlich in einem festgelegten Preisintervall bewegen können. Preisintervalle sind aus der Modellierung von Wechselkursen bekannt, die teilweise von Zentralbanken durch Interventionen innerhalb festgelegter Grenzen gehalten werden. Solch ein Prozess sei definiert als

$$ds_t = \left[\kappa(\hat{\mu} - s_t) - \frac{\sigma^2}{2(e^{st})^2} \left((e^{-rt}e^{st} - a) \left(1 - \frac{e^{-rt}e^{st}}{b} \right) \right)^2 \right] dt + \frac{\sigma}{e^{st}} (e^{-rt}e^{st} - a) \left(1 - \frac{e^{-rt}e^{st}}{b} \right) dW_t. \quad (4.31)$$

⁴¹Vgl. Geman (2005), S. 64ff.

Der Prozess basiert auf Ingersoll (1997). Nach Anwendung von Itô folgt für den Spotpreis S_t

$$dS_t = \kappa(\hat{\mu} - \ln[S_t])S_t dt + \sigma(e^{-rt}S_t - a)\left(1 - \frac{e^{-rt}S_t}{b}\right)dW_t. \quad (4.32)$$

Der Volatilitätsterm von Gleichung (4.32) besitzt offensichtlich die zwei Nullstellen $e^{-rt}S_t = a$ und $e^{-rt}S_t = b$. Der diskontierte Preis $e^{-rt}S_t$ ist somit zwar stochastisch, allerdings beschränkt auf das Intervall (a, b) , zumindest sofern der Preis zu Beginn innerhalb dieses Intervalls liegt. Ist die Drift wie in Gleichung (4.32) mit der Eigenschaft der Mean-Reversion definiert, so können die Intervallgrenzen a und b nicht erreicht werden.⁴² Dies ist erforderlich, um Arbitragemöglichkeiten auszuschließen. Würde z. B. der diskontierte Preis die Obergrenze erreichen, so würde der Leerverkauf von einem Emissionszertifikat in einem risikolosen Gewinn resultieren. Wäre die Drift ohne Mean-Reversion formuliert, so würde bei dem wie in Gleichung (4.32) definierten Volatilitätsterm eine Drift oberhalb der risikolosen Zinsrate unweigerlich zum Erreichen der Grenzen führen. Der Prozess sei nachfolgend mit MRBV abgekürzt (Mean-Reversion mit begrenzter Volatilität).

Eine weitere Eigenheit des MRBV-Prozesses ist, dass die Volatilität des Spotpreises zu den Preisgrenzen hin abnimmt. Wie in Abschnitt (4.3) zum theoretischen CO₂-Preismodell gezeigt, existiert im Markt entweder ein sehr großes Über- oder Unterangebot an Emissionszertifikaten, wenn der CO₂-Preis nahe einer der Grenzen ist. In einem solchen Fall ist es unwahrscheinlich, dass sich die Situation bis zum Ende der Handelsperiode nochmals wesentlich ändert und damit wird auch der CO₂-Preis keinen großen Veränderungen mehr unterliegen.

4.4.2.4 Jump-Diffusion

Manche CO₂-Preisbewegungen scheinen eher Sprüngen zu ähneln, z. B. wenn wichtige Informationen sehr schnell in den Markt gelangen. Zudem kann eine Sprungkomponente helfen, die Kurtosis in der Verteilung der logarithmischen CO₂-Renditen zu erklären. Ein Sprungdiffusionsprozess sei definiert als

$$ds_t = \left(\mu - \frac{1}{2}\sigma^2\right)dt + \sigma dW_t + Y_t dN_t, \quad (4.33)$$

⁴²Vgl. Ingersoll (1997), S. 164f.

wobei

$$N_t \sim \text{Poisson}(\lambda dt),$$

$$Y_t \sim N(\mu_2, \delta^2).$$

Dies ist das klassische Sprungdiffusionsmodell von Merton (1976). Zusätzlich zur Drift und zum Diffusionsterm der geometrisch Brownschen Bewegung wird eine Sprungkomponente hinzugefügt. Während das Auftreten der Sprünge einem Poisson-Prozess N_t mit der Intensität λ folgt, wird die Sprunghöhe Y_t aus einer Normalverteilung mit dem Mittel μ_2 und der Varianz δ^2 gezogen. Der Prozess sei nachfolgend mit JD abgekürzt (Jump-Diffusion).

4.4.2.5 Heston-GARCH

Ein Vertreter der Klasse der GARCH-Prozesse (Generalized Autoregressive Conditional Heteroscedasticity) ist

$$s_t = s_{t-1} + r + \hat{\lambda}h_t + \sqrt{h_t}\varepsilon_t, \quad (4.34)$$

$$h_t = \omega + \beta h_{t-1} + \alpha(\varepsilon_{t-1} - \gamma\sqrt{h_{t-1}})^2,$$

wobei

$$\varepsilon_t \sim N(0, 1).$$

Dieser Prozess wurde Heston und Nandi (2000) entnommen, wobei es sich um die GARCH(1,1)-Variante handelt. Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Prozessen (GBB, OU, MRBV, JD) ist dieser Prozess in diskreter Zeit formuliert und kann somit direkt an die täglichen Daten kalibriert werden. In Gleichung (4.34) bestimmt h_t die im Zeitablauf variable bedingte Varianz des Prozesses, wobei ε_t die stochastischen Innovationen des Prozesses beschreibt. ε_t wird aus einer Standardnormalverteilung gezogen. Der Parameter r bezeichnet den risikolosen Zinssatz und der Term $\hat{\lambda}h_t$ kann als von der Varianz abhängige Risikoprämie interpretiert werden. Die Parameter γ und α bestimmen die Schiefe und die Kurtosis der resultierenden Verteilung der

Renditen.⁴³ Der Vorteil dieses Prozesses liegt in der nicht konstanten Varianz der Renditen, eine Beobachtung, die man gerade im EU EHS findet. Der Prozess sei nachfolgend mit HG abgekürzt (Heston-GARCH).

4.4.2.6 Regime-Switching

Als letzter Prozess für die Untersuchung sei ein Vertreter der Regime-Switching-Prozesse definiert. Es sei

$$s_t = s_{t-1} + \hat{\mu}_{R_t} + \sigma_{R_t} \varepsilon_t, \quad (4.35)$$

wobei $R_t \in \{1; 2\}$ einer Markovkette mit zwei Zuständen und den Übergangswahrscheinlichkeiten

$$(p_{ij}) = \begin{pmatrix} p_{11} & 1 - p_{11} \\ 1 - p_{22} & p_{22} \end{pmatrix}$$

folgt. Der ökonomische Hintergrund für die mögliche Annahme eines Regime-Switching-Prozesses ist, dass es im EU EHS sowohl ruhige als auch aktivere Marktphasen geben kann, zwischen denen mit einer gewissen Übergangswahrscheinlichkeit gewechselt wird. Nach Gleichung (4.35) ist sowohl die Drift $\hat{\mu}_{R_t}$ als auch die Volatilität σ_{R_t} der logarithmierten CO₂-Preise vom aktuellen Regime R_t abhängig. Der Prozess sei mit RS abgekürzt (Regime-Switching). Die hier verwendete Formulierung des RS-Prozesses impliziert, dass nur das Mittel und die Varianz der Renditen zwischen den Regimes springt, nicht aber das Preisniveau s_t .

⁴³Für die Varianzgleichung sind auch andere Spezifikationen denkbar. Mit $\gamma = 0$ ergibt sich $h_t = \omega + \beta h_{t-1} + \alpha \varepsilon_{t-1}^2$. Dies unterscheidet sich z. B. leicht von der in Benz und Trück (2006) verwendeten Variante $h_t = \omega + \beta h_{t-1} + \alpha h_{t-1} \varepsilon_{t-1}^2$, die an die ursprüngliche Formulierung von Bollerslev (1986) angelehnt ist (Benz und Trück (2006) verwenden ebenfalls eine GARCH(1,1)-Variante). Die hier verwendete Formulierung von Heston und Nandi (2000) hat den Vorteil, dass eine geschlossene Lösung für den Wert europäischer Optionen bekannt ist. Eine kurze Überprüfung der empirischen Performance zeigt für den vorliegenden Datensatz in Relation zu den anderen getesteten Prozessen keine wesentlichen Unterschiede zwischen der Formulierung von Heston und Nandi (2000) und Bollerslev (1986).

4.4.3 Kalibrierung und Diskussion der Prozesse für die 1. Handelsperiode

Zunächst werden die beschriebenen Prozesse an EUA-Preise der ersten Handelsperiode kalibriert und die Ergebnisse diskutiert. Anschließend erfolgt der Vergleich mit Ergebnissen für die Kalibrierung an synthetische Spotpreise der 2. Handelsperiode.

Die Parameterschätzung für alle beschriebenen Prozesse erfolgt über die Maximierung des Log-Likelihood-Wertes, welcher definiert ist als

$$LLW = \sum_{i=2}^n \ln[f(s_i|I_{i-1}, \Phi)]. \quad (4.36)$$

Dabei beschreibt n die Anzahl der Beobachtungen, I_t alle zum Zeitpunkt t verfügbaren Informationen und Φ einen Parametervektor. $f(s_t|I_{t-1}, \Phi)$ bezeichnet die Wahrscheinlichkeitsdichte von s_t bedingt auf die Informationsmenge I_{t-1} und Parameterwerte Φ . Die Maximierung von (4.36) nach Φ ergibt optimale Parameterschätzer Φ^* . Standardabweichungen für die Parameterschätzer werden durch Invertierung der Negativen der Hessematrix von Gleichung (4.36) an der Stelle Φ^* geschätzt.

Für die GBB, den OU- und den MRBV-Prozess wird für die Schätzung der Parameter die Euler-Diskretisierung genutzt. Als Zeitintervall wird $\Delta t = 1$ gewählt, alle Parameter sind also auf eine tägliche Basis normiert. Der JD-Prozess wird nach dem Verfahren von Honoré (1998) kalibriert.⁴⁴ Parameterschätzwerte und die entsprechenden Standardabweichungen für den HG- und RS-Prozess werden durch eine numerische Maximierung der Log-Likelihood-Funktion sowie eine numerische Berechnung und Invertierung der Hessematrix an der Stelle Φ^* bestimmt. Der Parameter r für den risikolosen Zinssatz im MRBV- und HG-Prozess wird auf den Durchschnitt des EURIBOR-Zinssatzes mit Laufzeit 12 Monate über den Beobachtungszeitraum hinweg gesetzt, was 2,966 Prozent entspricht. Damit gilt auf täglicher Basis bei Annahme von 252 Handelstagen im Jahr $r = 0,0116$ Prozent. Parameterwerte, deren Standardabweichungen und entsprechende t -Statistiken werden in Tabelle 4.10 präsentiert und nachfolgend diskutiert.

⁴⁴Für die Schätzung der Parameter nach Gleichung (4.36) wird dazu der Volatilitätsparameter δ aus der Sprungkomponente durch $\sigma\sqrt{\hat{m}}$ ersetzt und \hat{m} an Stelle von δ geschätzt. Erst durch dieses Vorgehen ist gewährleistet, dass der Log-Likelihood-Wert nicht gegen unendlich gehen kann, vgl. Honoré (1998).

Tabelle 4.10: Parameterschätzer aus empirischer Kalibrierung – 1. Handelsperiode.

GBB	μ	σ					
Wert	-0,001172	0,04770					
Std.-Ab.	0,002337	0,001652					
<i>t</i> -Stat.	-0,5015	28,88***					
OU			σ	κ	$\hat{\mu}$		
Wert			0,04770	$2,62 \cdot 10^{-6}$	-877,5		
Std.-Ab.			0,001652	0,0001157	38826,9		
<i>t</i> -Stat.			28,88***	0,02268	-0,02260		
MRBV	r	σ	κ	$\hat{\mu}$	a	b	
Wert	0,0001160	0,06569	0,00003893	-32,57	0	64,7137	
Std.-Ab.		0,002275	0,001586	1448,5			
<i>t</i> -Stat.		28,88***	0,02454	-0,02248			
MRBVm	r	σ	κ	$\hat{\mu}$	a	b	
Wert	0,0001160	0,08333	0,002559	2,400	0	42,75	
Std.-Ab.		0,005340	0,007296	2,004		2,577	
<i>t</i> -Stat.		15,60***	0,3507	1,198		16,59***	
JD	μ	σ	λ	δ	μ_2		
Wert	0,001935	0,01926	0,2320	0,08342	-0,01750		
Std.-Ab.	0,001240	0,001572	0,05997	0,01254	0,009970		
<i>t</i> -Stat.	1,560	12,25***	3,868***	6,651***	-1,755*		
HG	r	$\hat{\lambda}$	ω	β	α	γ	
Wert	0,0001160	-1,615	0,00003431	0,7432	0,0001984	22,71	
Std.-Ab.		1,269	0,00002377	0,06601	0,00004534	7,493	
<i>t</i> -Stat.		-1,273	1,443	11,26***	4,376***	3,031***	
RS	$\hat{\mu}_1$	σ_1	$\hat{\mu}_2$	σ_2	p_{11}	p_{22}	
Wert	0,002361	0,01865	-0,01781	0,09143	0,9461	0,8238	
Std.-Ab.	0,001165	0,001258	0,01002	0,008399	0,01724	0,06164	
<i>t</i> -Stat.	2,027**	14,83***	-1,777*	10,89***	812,1***	13,36***	

*, **, *** bedeutet Ablehnung eines Parameterwerts von null auf dem 10, 5, 1 Prozentniveau. Alle Parameter wurden mittels Maximierung des Log-Likelihood-Wertes geschätzt. Gezeigt werden Parameterschätzer, Standardabweichungen der Parameterschätzer und die *t*-Statistiken für den Test auf null. Ist eine Standardabweichung nicht angegeben, wurde der Parameter nicht geschätzt, sondern direkt gesetzt.

Die Prozesse sind an tägliche Schlusskurse für EUAs von der EEX vom 22. April 2005 bis zum 15. Dezember 2006 kalibriert (GBB – geometrisch Brownsche Bewegung, OU – Ornstein-Uhlenbeck, MRBV/MRBVm – Mean-Reversion mit begrenzter Volatilität/modifiziert, JD – Jump-Diffusion, HG – Heston-GARCH, RS – Regime-Switching).

Geometrisch Brownsche Bewegung und Ornstein-Uhlenbeck

Wie bereits erwähnt, liegt die Volatilität der logarithmischen EUA-Renditen bei 4,8 Prozent und demzufolge gilt auch $\sigma = 0,0477$ für die GBB. Der Driftparameter μ ist nicht signifikant von null verschieden. Interessanterweise ändert die Einführung von Mean-Reversion den Volatilitätsparameter nicht, es gilt ebenso $\sigma = 0,0477$ für den OU-Prozess. Mit einem κ von $2,62 \cdot 10^{-6}$ ist die Geschwindigkeit der Mean-Reversion vernachlässigbar. Zudem sind sowohl der Parameter κ als auch der Parameter $\hat{\mu}$ für das Mittel der logarithmischen Preise mit einer t -Statistik von 0,02 und -0,02 klar insignifikant und ohne Aussagewert.⁴⁵ Der OU-Prozess scheint im Vergleich zur GBB keine zusätzliche Erklärungskraft zu bieten.

Prozess mit Preisobergrenze

Der Parameter b für den MRBV-Prozess wurde auf 64,71 gesetzt. Gemäß Gleichung (4.32) beschreibt b die potenzielle obere Preisgrenze für Spotpreise, diskontiert auf den Beginn der Zeitreihe. Der Wert wurde so gewählt, dass sich für Ende 2007 eine Preisobergrenze von EUR 70 ergibt. Die Strafzahlung für fehlende EUAs beträgt EUR 40 in der ersten Handelsperiode plus die Verpflichtung, ein zusätzliches EUA aus dem folgenden Jahr nachzuliefern. Diese Zusatzkosten seien der Einfachheit halber mit EUR 30 je EUA angenommen.⁴⁶ Erneut sind die Parameter κ und $\hat{\mu}$ zur Beschreibung von Geschwindigkeit und Mittel der Mean-Reversion insignifikant. Abbildung 4.10 vergleicht die Volatilitätsstruktur der an EUA-Preise kalibrierten GBB und des MRBV-Prozesses. Die Volatilität $\sigma(S_t)$ wird für absolute, nicht für logarithmierte Preise gezeigt. Das zusätzlich eingefügte Histogramm der beobachteten EUA-Preise zeigt, dass die Werte von $\sigma(S_t)$ in der Region um die beobachteten Preise herum für die GBB und den MRBV-Prozess vergleichbar sind.

Die potenzielle Preisobergrenze kann wie jeder andere Parameter auch mittels der Maximierung des Log-Likelihood-Wertes geschätzt werden. Der entsprechend modifizierte Prozess ist in Tabelle 4.10 mit MRBVm bezeichnet. Für die diskontierte Preisobergrenze ergibt sich dann $b = 42,75$. Dies entspricht einer Preisobergrenze

⁴⁵Die extrem geringe Signifikanz hat zur Folge, dass sich selbst beim Weglassen auch nur eines Tages die Werte für κ und $\hat{\mu}$ stark ändern können. Selbst eine Änderung der Rechengenauigkeit hat hier feststellbare Auswirkungen auf die Parameterwerte. Dies gilt entsprechend auch für den MRBV-Prozess.

⁴⁶Der höchste Schlusskurs eines Futures 2008 auf ein EUA der 2. Handelsperiode an der ICE/ECX war EUR 32,25 im April 2006.

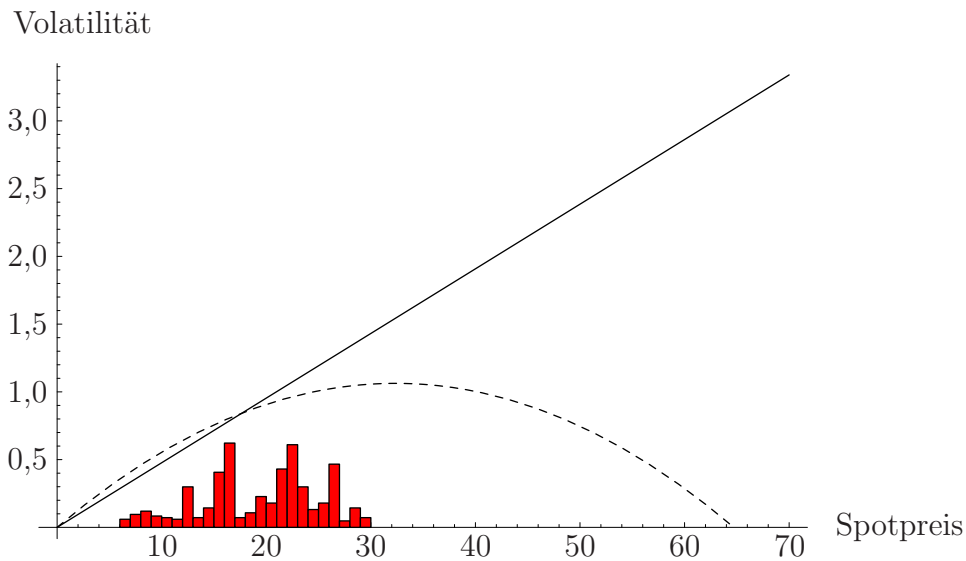


Abbildung 4.10: Volatilitätsstruktur GBB versus MRBV-Prozess für EUA-Preise. Die Abbildung zeigt die Volatilitätsstruktur der auf EUA-Preise kalibrierten Prozesse GBB (durchgezogene Linie) und MRBV (gestrichelte Linie). Die Volatilitätsstruktur bezieht sich auf absolute Preise S_t (nicht auf logarithmierte Preise s_t). Das Histogramm zeigt die Häufigkeit der tatsächlich beobachteten EUA-Preise (Skala für Histogramm nicht im Bild).

Ende 2007 von EUR 46,24. Diese Beobachtung mag einerseits ein statistisches Artefakt sein, kann andererseits jedoch auf Grund der realistischen Größenordnung durchaus als eine implizit von Marktteilnehmern im EU EHS angenommene Grenze interpretiert werden.

Jump-Diffusion

Die geschätzte Sprungintensität beträgt $\lambda = 0,232$. Dementsprechend interpretiert der JD-Prozess ungefähr eine Preisbewegung pro Woche als Sprung. Sollen Sprünge modelliert werden, so ist eine vereinfachende Approximation des Prozesses durch ein Bernoulli-Diffusionsmodell nicht zulässig. Dies wäre nur möglich für $\lambda\Delta \approx 0$, wobei Δ ein Zeitinkrement bezeichnet.⁴⁷ Als Folge der relativ hohen Sprungwahrscheinlichkeit wird die Volatilität $\sigma = 0,0193$ der Diffusionskomponente im Vergleich zu den reinen Diffusionsprozessen GBB, OU und MRBV deutlich geringer geschätzt. Erneut ist der Driftparameter μ nicht signifikant von null verschieden. Auch der Pa-

⁴⁷Die Annahme eines Bernoulli-Diffusionsmodells impliziert, dass je Zeitinkrement Δ nur maximal ein Sprung auftreten kann. Diese Annahme wird z. B. bei der Modellierung von Strompreisen verwendet, vgl. Seifert und Uhrig-Homburg (2006).

parameter zur Bestimmung der Sprunghöhe μ_2 ist nur auf dem 10%-Niveau von null verschieden. Tendenziell sind die Sprünge eher negativ, was auf Grund des drastischen Preisverfalls innerhalb weniger Tage Ende April 2006 nicht überrascht.

Heston-GARCH

Abbildung 4.11 zeigt die historisch geschätzte tägliche bedingte Volatilität $\sqrt{h_t}$ des HG-Prozesses zusammen mit den absoluten EUA-Renditen. Es ist gut zu erkennen, wie der HG-Prozess auf die Zeiten größerer Renditen mit einer Anpassung der Volatilität reagiert. Die Darstellung deutet darauf hin, dass das durchschnittliche Niveau der Volatilität beim HG-Prozess deutlich geringer als die 4,8 Prozent bei der GBB angenommen wird und zudem die Volatilität bei Abweichungen relativ schnell wieder auf dieses Level zurückkehrt. Die langfristige Volatilität des HG-Prozesses entspricht nach Heston und Nandi (2000)

$$\theta = \sqrt{(\omega + \alpha)/(1 - \beta - \alpha\gamma^2)}. \quad (4.37)$$

Das Einsetzen der Parameterwerte liefert $\theta = 0,0388$. Der HG-Prozess interpretiert also die Phase des großen Preisverfalls als eine Art Ausnahmezustand und vermutet generell eine niedrigere Volatilität. Der Grad an Mean-Reversion kann mit $\beta + \alpha\gamma^2 = 0,846$ bestimmt werden. Die Volatilität wird somit relativ schnell wieder zum langfristigen Gleichgewichtsniveau zurück gezogen.⁴⁸

Regime-Switching

Der RS-Prozess unterscheidet zwischen einem ruhigen Regime mit einer geschätzten Volatilität von $\sigma_1 = 0,0186$ und einem aktiven Regime mit $\sigma_2 = 0,0914$. Das aktive Regime ist somit ca. fünfmal volatiliter als das ruhige Regime. Mit den Aufenthaltswahrscheinlichkeiten $p_{11} = 0,95$ und $p_{22} = 0,82$ befindet sich der Prozess im Durchschnitt $\pi_1 = \frac{1-p_{22}}{2-p_{11}-p_{22}} = 76,6$ Prozent der Zeit im ruhigen Regime und verbleibt im Durchschnitt 19 Tage im ruhigen sowie 6 Tage im aktiven Regime, bevor ein Regimewechsel erfolgt. Die Parameterwerte erscheinen somit plausibel.

⁴⁸Die geschätzten Parameterwerte garantieren sowohl die Stationarität des HG-Prozesses als auch die Positivität der bedingten Varianz h_t , vgl. Heston und Nandi (2000), S. 588f.

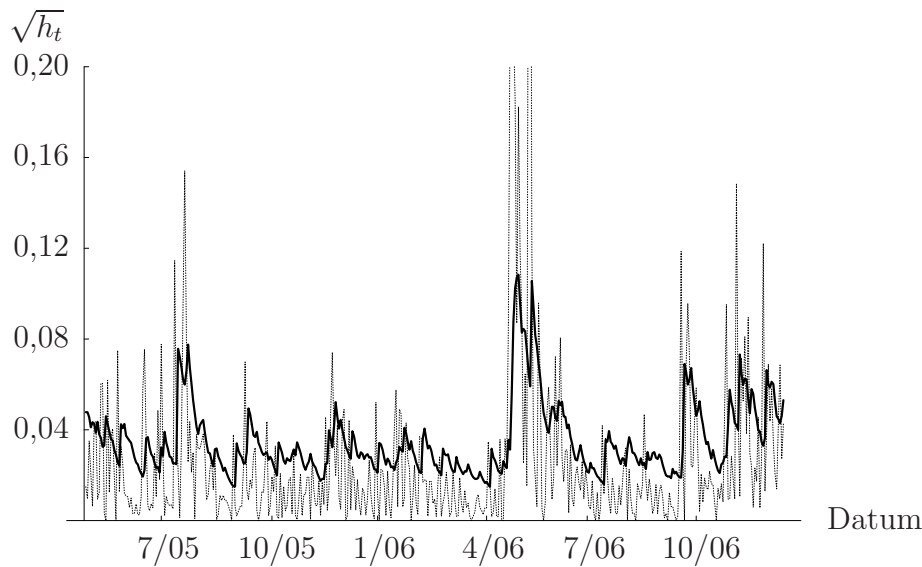


Abbildung 4.11: Geschätzte Volatilität für EUA-Preise gemäß dem HG-Prozess. Die dicke Linie zeigt die vom HG-Prozess geschätzte zeitabhängige Volatilität $\sqrt{h_t}$ von EUA-Renditen während des Beobachtungszeitraums vom 22. April 2005 bis zum 15. Dezember 2006. Zusätzlich werden absolute EUA-Renditen im gleichen Zeitraum gezeigt (gestrichelt).

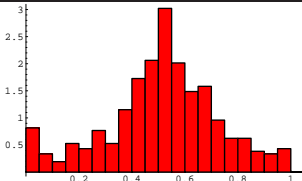
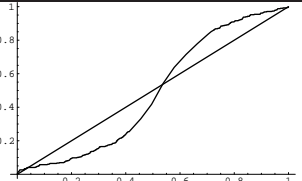
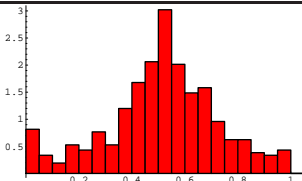
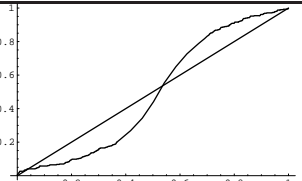
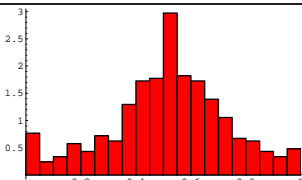
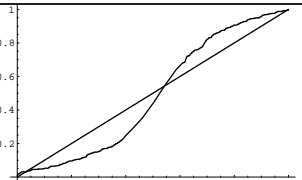
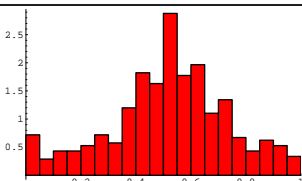
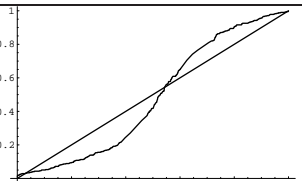
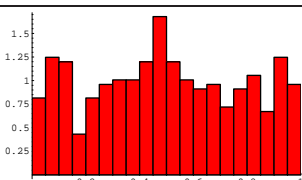
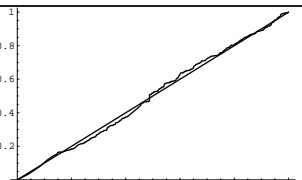
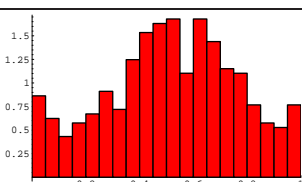
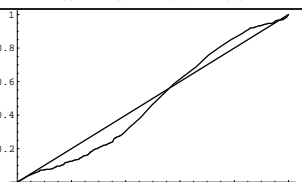
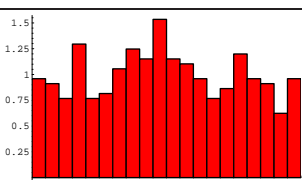
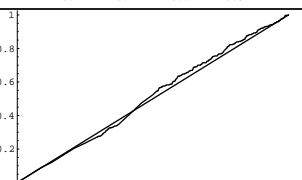
Nach der Diskussion der geschätzten Parameterwerte stellt sich die Frage, welcher der beschriebenen Prozesse die EUA-Renditen am besten beschreibt. Zur Beurteilung der Anpassungsgüte sei mit $f(s_t|I_{t-1}, \Phi^*)$ die vermutete theoretische Wahrscheinlichkeitsdichte für logarithmierte Spotpreise s_t bedingt auf die Informationsmenge I_{t-1} und optimale Parameterschätzer Φ^* beschrieben. Wenn die vermutete Wahrscheinlichkeitsdichte der tatsächlichen entspräche, so müsste gemäß Diebold, Gunther und Tay (1998) das Ergebnis der Transformation

$$\bar{s}_t = \int_{-\infty}^{s_t} f(x|I_{t-1}, \Phi^*) dx = F(s_t|I_{t-1}, \Phi^*) \quad (4.38)$$

zwischen null und eins gleichverteilt sein. Histogramme der transformierten Werte \bar{s}_t für alle kalibrierten Prozesse werden in der zweiten Spalte von Tabelle 4.11 gezeigt. Um auch formal zu testen, ob die Hypothese der Gleichverteilung akzeptiert werden kann, wird der Kolmogorov-Smirnov-Test (KS-Test) verwendet. Dazu wird zunächst die empirische Verteilungsfunktion

$$\bar{F}_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \begin{cases} 1, & \text{wenn } \bar{s}_i \leq x \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.39)$$

Tabelle 4.11: Statistiken zur Anpassungsgüte stochastischer Prozesse – 1. Handelsperiode.

Prozess	Histogramm für $\bar{s}_t = \int_{-\infty}^{s_t} f(x I_{t-1}, \Phi^*)dx$	Empirische Verteilungs- funktion zu \bar{s}_t	Anpassungsgüte
GBB			LLW 677,14 AIK -1350,28 BIK -1342,21 KS 0,175***
OU			LLW 677,14 AIK -1348,28 BIK -1336,17 KS 0,175***
MRBV			LLW 700,93 AIK -1395,87 BIK -1383,76 KS 0,170***
MRBVm			LLW 709,48 AIK -1410,96 BIK -1394,82 KS 0,173***
JD			LLW 827,23 AIK -1644,46 BIK -1624,28 KS 0,036
HG			LLW 838,56 AIK -1667,11 BIK -1646,94 KS 0,112***
RS			LLW 855,34 AIK -1698,68 BIK -1674,46 KS 0,044

*, **, *** bedeutet Ablehnung der Kolmogorov-Smirnov (KS) Statistik auf dem 10, 5, 1 Prozent-niveau. LLW bezeichnet den Log-Likelihood-Wert, AIK/BIK das Akaike/Bayessche Informationskriterium. Die Plots zum KS-Test werden in Abschnitt 4.4.3 erklärt.

berechnet, wobei n die Anzahl der Beobachtungen ist. Das Ergebnis wird in der dritten Spalte von Tabelle 4.11 gezeigt. Wäre $f(s_t|I_{t-1}, \Phi^*)$ die korrekte Wahrscheinlichkeitsdichte, würde das Ergebnis nach Gleichung (4.39) der Gleichverteilung entsprechen, welche ebenfalls in der dritten Spalte von Tabelle 4.11 durch die Gerade repräsentiert wird. Der KS-Test untersucht nun, ob die maximale Distanz zwischen der Gleichverteilung und der empirisch beobachteten Verteilung akzeptabel ist. Ein signifikanter KS-Wert bedeutet eine Ablehnung der Nullhypothese, dass $f(s_t|I_{t-1}, \Phi^*)$ eine gültige Wahrscheinlichkeitsdichte für die beobachteten Daten ist. Als weitere Maße für die Anpassungsgüte sind in der vierten Spalte von Tabelle 4.11 neben dem KS-Wert auch der Log-Likelihood-Wert aus der Kalibrierung sowie das Akaike und Bayessche Informationskriterium gegeben.

Die Prozesse MRBV und MRBVM mit einer Preisobergrenze passen etwas besser als die GBB und der OU-Prozess ohne Preisobergrenze. Dennoch werden diese vier Prozesse vom KS-Test klar abgelehnt. Die Histogramme dieser Prozesse in Tabelle 4.11 zeigen, dass zu wenig Gewicht auf sehr hohe positive oder negative Renditen gelegt wird. Sowohl dem Augenschein nach als auch nach dem Log-Likelihood-Wert sowie den AIK/BIK-Werten passt der HG-Prozess deutlich besser zu den Daten. Die zeitabhängige Volatilität kann extreme Renditen besser erklären, allerdings ist das Gewicht auf diesen Renditen immer noch zu gering. Am besten können die Daten durch den JD-Prozess und den RS-Prozess repräsentiert werden. Beide Prozesse sind in der Lage, extreme Renditen zu reproduzieren. Während der JD-Prozess extreme Renditen als Preissprünge interpretiert, ordnet sie der RS-Prozess dem aktiven Regime zu. In der Tat wird sowohl für den JD- als auch den RS-Prozess die Verteilungsannahme mit KS-Werten von 0,036 und 0,044 nicht abgelehnt.

4.4.4 Kalibrierung der Prozesse für die 2. Handelsperiode und Vergleich zur 1. Handelsperiode

Schon Ende 2007 wird die erste Handelsperiode zu Ende gehen. Marktteilnehmer im EU EHS haben bereits begonnen, sich mit der zweiten Handelsperiode zu beschäftigen und diese in ihrer Risikomanagementstrategie zu berücksichtigen. Um auch mögliche Prozesse zur Beschreibung der CO₂-Preisdynamiken für die kommende Handelsperiode zu analysieren, wird die Kalibrierung mit den zuvor definierten syn-

thetischen Spotpreisen auf Basis des Futures 2008 wiederholt. Die Ergebnisse sollen nun mit denen der ersten Handelsperiode verglichen werden.

Die Tabellen 4.12 und 4.13 zeigen geschätzte Parameterwerte und Maße für die Anpassungsgüte der kalibrierten Prozesse für synthetische Spotpreise der zweiten Handelsperiode. Ohne auf alle Ergebnisse im Detail einzugehen, ist deutlich zu sehen, dass die Ergebnisse stabil und in qualitativer Hinsicht vergleichbar zur ersten Handelsperiode sind. Generell hat sich die Anpassungsgüte aller Prozesse erhöht, wobei nach wie vor der JD- und der RS-Prozess die einzigen Prozesse sind, für die die Verteilungsannahme nicht abgelehnt wird.

Einige Details sind es wert, hervorgehoben zu werden. Allgemein scheint die Volatilität im Vergleich zur 1. Handelsperiode geringer zu sein. So ist z. B. für die GBB die Volatilität von 4,8 Prozent auf 3,3 Prozent gesunken. Einer der Hauptgründe hierfür ist, dass sich der große Preisverfall April/Mai 2006 auf Preise für die zweite Handelsperiode geringer ausgewirkt hat als auf Preise der ersten Handelsperiode. Die langfristige Volatilität des HG-Prozesses ist nun mit $\theta = 0,0323$ auch deutlich näher an der durchschnittlichen Volatilität der übrigen Prozesse. Ökonomisch sollten die unterschiedlich hohen Volatilitäten allerdings nicht überbewertet werden. Je näher das Jahr 2008 rückt, desto mehr relevante Informationen, die nur die zweite Handelsperiode betreffen, werden in den Markt kommen. Ein Beispiel hierfür sind EU-Entscheidungen zu den NAPs der einzelnen Länder für das Jahr 2008 und danach. Dies kann die Volatilität der Preise für die zweite Handelsperiode im Vergleich zur ersten Handelsperiode auch wieder ansteigen lassen.

Ein weiterer Unterschied zur ersten Handelsperiode besteht darin, dass der MRBV-Prozess mit Preisobergrenze nicht länger eine höhere Anpassungsgüte im Vergleich zur GBB und zum OU-Prozess aufweist.⁴⁹ Zudem ist mittels Maximierung des Log-Likelihood-Wertes keine sinnvolle Preisobergrenze für den MRBVm-Prozess mehr zu finden. Stattdessen wird der Parameter b hoch genug geschätzt, um nicht länger relevant zu sein.⁵⁰ Wie bereits erwähnt, ist die Zulassung von Banking über 2012 hinaus durchaus wahrscheinlich, wenn das EU EHS weitergeführt wird. Eine Preisobergrenze

⁴⁹Für die 2. Handelsperiode wurde der Parameter $b = 103,84$ gesetzt, was einer Preisobergrenze von EUR 130 in 2012 entspricht (EUR 100 Strafzahlung plus Kosten für Nachlieferung).

⁵⁰Der Wert $b = 1,22 * 10^7$ in Tabelle 4.12 ist daher auch von begrenztem Aussagewert. Die sehr kleine t -Statistik von 0,01 zeigt, dass eine Änderung des Wertes praktisch keine Auswirkung mehr auf das Schätzergebnis der anderen Parameter hat (das Schätzverfahren bricht daher ab, wenn eine weitere Erhöhung von b eine zu geringe Erhöhung des Log-Likelihood-Wertes zur Folge hat).

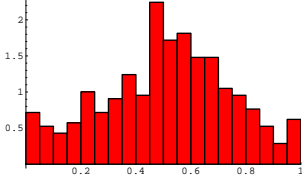
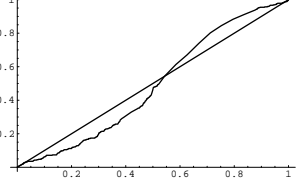
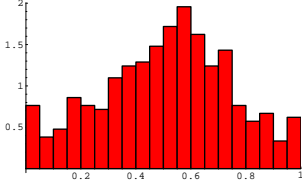
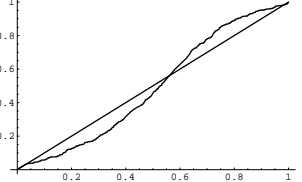
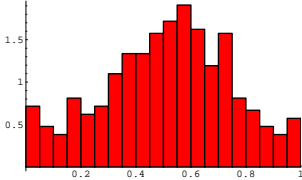
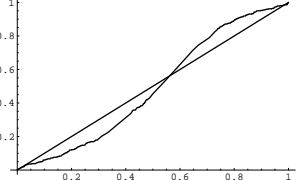
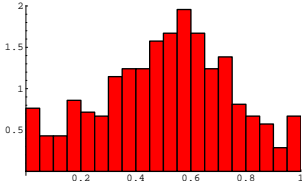
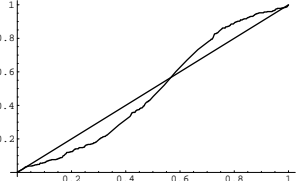
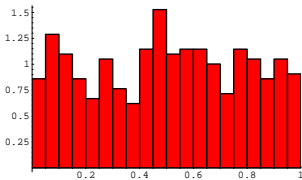
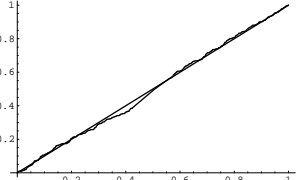
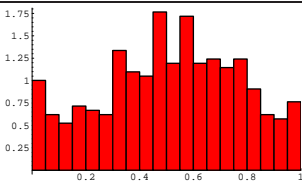
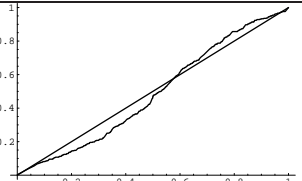
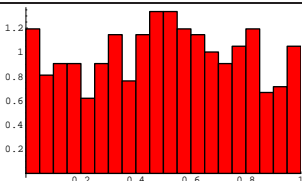
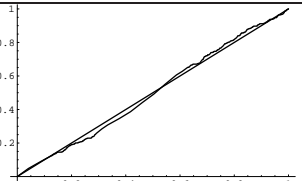
Tabelle 4.12: Parameterschätzer aus empirischer Kalibrierung – 2. Handelsperiode.

GBB	μ	σ				
Wert	0,0006115	0,03324				
Std.-Ab.	0,001625	0,001148				
<i>t</i> -Stat.	0,3764	28,95***				
OU			σ	κ	$\hat{\mu}$	
Wert			0,03307	0,02068	2,937	
Std.-Ab.			0,001142	0,009788	0,07810	
<i>t</i> -Stat.			28,95***	2,114**	37,60***	
MRBV	r	σ	κ	$\hat{\mu}$	a	b
Wert	0,0001160	0,04231	0,02166	2,960	0	103,8
Std.-Ab.		0,001462	0,009785	0,07659		
<i>t</i> -Stat.		28,95***	2,213***	38,64***		
MRBVm	r	σ	κ	$\hat{\mu}$	a	b
Wert	0,0001160	0,03389	0,02052	2,959	0	1,22*10 ⁷
Std.-Ab.		0,001171	0,009764	0,07983		1,12*10 ⁹
<i>t</i> -Stat.		28,95***	2,101**	37,07***		0,01095
JD	μ	σ	λ	δ	μ_2	
Wert	0,002429	0,01823	0,2008	0,05761	-0,01098	
Std.-Ab.	0,001201	0,001570	0,07553	0,01083	0,007653	
<i>t</i> -Stat.	2,023**	11,61***	2,658***	5,319***	-1,434	
HG	r	$\hat{\lambda}$	ω	β	α	γ
Wert	0,0001160	-0,05320	0,0001141	0,5183	0,0003755	5,700
Std.-Ab.		1,510	0,00004313	0,07627	0,00008405	5,109
<i>t</i> -Stat.		-0,03522	2,647***	6,796***	4,468***	1,116
RS	$\hat{\mu}_1$	σ_1	$\hat{\mu}_2$	σ_2	p_{11}	p_{22}
Wert	0,002248	0,02010	-0,01426	0,07387	0,9535	0,6945
Std.-Ab.	0,001189	0,001545	0,01146	0,01025	0,02592	0,1172
<i>t</i> -Stat.	1,891*	13,00***	-1,245	7,206***	801,8***	5,925***

*, **, *** bedeutet Ablehnung eines Parameterwerts von null auf dem 10, 5, 1 Prozentniveau. Alle Parameter wurden mittels Maximierung des Log-Likelihood-Wertes geschätzt. Gezeigt werden Parameterschätzer, Standardabweichungen der Parameterschätzer und die *t*-Statistiken für den Test auf null. Ist eine Standardabweichung nicht angegeben, wurde der Parameter nicht geschätzt, sondern direkt gesetzt.

Die Prozesse sind an tägliche Schlusskurse von EUA-Futures 2008 der ICE/ECX kalibriert, nachdem sie mit dem risikolosen Zinssatz (EURIBOR/EuroSwap) diskontiert wurden, um synthetische Spotpreise für die 2. Handelsperiode zu berechnen. Der Beobachtungszeitraum umfasst den 22. April 2005 bis zum 15. Dezember 2006 (GBB – geometrisch Brownsche Bewegung, OU – Ornstein-Uhlenbeck, MRBV/MRBVm – Mean-Reversion mit begrenzter Volatilität/modifiziert, JD – Jump-Diffusion, HG – Heston-GARCH, RS – Regime-Switching).

Tabelle 4.13: Statistiken zur Anpassungsgüte stochastischer Prozesse – 2. Handelsperiode.

Prozess	Histogramm für $\bar{s}_t = \int_{-\infty}^{s_t} f(x I_{t-1}, \Phi^*)dx$	Empirische Verteilungsfunktion zu \bar{s}_t	Anpassungsgüte
GBB			LLW 831,69 AIK -1659,39 BIK -1651,31 KS 0,113***
OU			LLW 833,92 AIK -1661,83 BIK -1649,71 KS 0,109***
MRBV			LLW 823,94 AIK -1641,88 BIK -1629,76 KS 0,117***
MRBVm			LLW 833,87 AIK -1659,75 BIK -1643,59 KS 0,111***
JD			LLW 919,86 AIK -1829,73 BIK -1809,53 KS 0,045
HG			LLW 903,81 AIK -1797,62 BIK -1777,42 KS 0,098***
RS			LLW 926,55 AIK -1841,09 BIK -1816,85 KS 0,043

*, **, *** bedeutet Ablehnung der Kolmogorov-Smirnov (KS) Statistik auf dem 10, 5, 1 Prozent-niveau. LLW bezeichnet den Log-Likelihood-Wert, AIK/BIK das Akaike/Bayessche Informationskriterium. Die Plots zum KS-Test werden in Abschnitt 4.4.3 erklärt.

ze ist dann nicht mehr zwingend vorhanden, da sich dann z. B. eine Knappheit in der dritten Handelsperiode mit möglicherweise höheren Strafkosten auch in einer Verknappung in der vorangehenden zweiten Handelsperiode bemerkbar machen würde.

Die nun anschließende Robustheitsanalyse als auch die darauf folgende Out-of-Sample-Analyse werden nur für synthetische Spotpreise der bald beginnenden zweiten Handelsperiode gezeigt. Die Aussagen gelten allerdings in qualitativer Hinsicht auch für EUA-Preise der ersten Handelsperiode.

4.4.5 Robustheitsanalyse

In diesem Abschnitt soll die Frage beantwortet werden, wie robust die Schätzergebnisse im Hinblick auf die sehr volatile Marktphase April/Mai 2006 sind, als Preise für die erste und zweite Handelsperiode innerhalb weniger Handelstage drastisch eingebrochen sind. Um den Effekt dieser Marktphase zu eliminieren, wird die Parameterschätzung und die Berechnung der Anpassungsgütemaße für synthetische Spotpreise der zweiten Handelsperiode wiederholt, wobei Preise vom 25. April 2006 bis zum 15. Mai 2006 entfernt werden. Am 24. April 2006, bevor erste Gerüchte zu den nationalen Emissionsberichten bekannt wurden, lag der Preis für den Future 2008 bei EUR 30,95. Am 16. Mai 2006, nachdem die Emissionsberichte auch offiziell veröffentlicht waren, lag der Preis noch bei EUR 21,60. Tabelle 4.14 vergleicht sowohl Parameterwerte als auch Anpassungsgütemaße für die ursprüngliche und die um die extrem volatile Marktphase 25. April 2006 - 15. Mai 2006 bereinigte Zeitreihe.

Es fällt auf, dass sich die Anpassungsgütemaße aller Prozesse verbessern. Dennoch sind nach wie vor der JD- und der RS-Prozess die einzigen Prozesse, für welche die Verteilungsannahme gemäß dem KS-Test nicht abgelehnt wird. Obwohl allgemein die geschätzte Volatilität erwartungsgemäß sinkt, ändern sich die Schätzergebnisse auf qualitativer Ebene nicht. In der Praxis müssen Marktteilnehmer bei der Kalibrierung von stochastischen Prozessen für sich die Frage beantworten, ob sie solche volatile Marktphasen wie April/Mai 2006 als eine Ausnahme auf Grund des jungen Marktes sehen, oder eher als typische Nebeneffekte von regulierten Emissionsmärkten. So lange allerdings die Rahmenbedingungen und insbesondere auch die nationalen Allokationspläne immer nur für wenige Jahre im Voraus festgelegt werden, ist mit starken Kursschwankungen sicher auch in der Zukunft zu rechnen.

Tabelle 4.14: Robustheitsanalyse für Kalibrierung – 2. Handelsperiode.

Prozess	Parameterschätzer	Anpassungsgüte				
		Ursprünglich	Bereinigt		Ursprünglich	Bereinigt
GBB	μ	0,0006115	0,001196	LLW	831,69	896,95
	σ	0,03324	0,02656	AIK	-1659,39	-1789,89
				BIK	-1651,31	-1781,88
				KS	0,113***	0,084***
OU	σ	0,03307	0,02653	LLW	833,92	897,41
	κ	0,02069	0,007619	AIK	-1661,83	-1788,82
	$\hat{\mu}$	2,937	3,045	BIK	-1649,71	-1776,79
				KS	0,109***	0,079***
MRBV	σ	0,04231	0,03359	LLW	823,94	892,07
	κ	0,02166	0,007832	AIK	-1641,88	-1778,14
	$\hat{\mu}$	2,960	3,082	BIK	-1629,76	-1766,11
				KS	0,117***	0,071**
MRBV _m	σ	0,03389	0,02713	LLW	833,87	898,24
	κ	0,02052	9,62*10 ⁻⁶	AIK	-1659,75	-1788,48
	$\hat{\mu}$	2,959	123.3	BIK	-1643,59	-1772,44
	b	1,22*10 ⁷	1,05*10 ⁵	KS	0,111***	0,075**
JD	μ	0,002429	0,003985	LLW	919,86	933,41
	σ	0,01823	0,01364	AIK	-1829,73	-1856,82
	λ	0,2008	0,5879	BIK	-1809,53	-1836,62
	δ	0,05761	0,02840	KS	0,045	0,029
	μ_2	-0,01098	-0,005186			
HG	$\hat{\lambda}$	-0,05320	0,9065	LLW	903,81	920,83
	ω	0,0001141	-0,00006293	AIK	-1797,62	-1831,66
	β	0,5183	0,7209	BIK	-1777,42	-1811,62
	α	0,0003755	0,0001265	KS	0,098***	0,074**
	γ	5,700	10,71			
	θ	0,03229	0,02660			
RS	$\hat{\mu}_1$	0,002248	0,002801	LLW	926,55	938,80
	σ_1	0,02010	0,01296	AIK	-1841,09	-1865,60
	$\hat{\mu}_2$	-0,01426	-0,001507	BIK	-1816,85	-1841,55
	σ_2	0,07387	0,03661	KS	0,043	0,030
	p_{11}	0,9535	0,8550			
	p_{22}	0,6945	0,8273			

*, **, *** bedeutet Ablehnung des Kolmogorov-Smirnov (KS) Verteilungstests auf dem 10, 5, 1 Prozentniveau. Angegeben sind zusätzlich zu den Parameterschätzern die Log-Likelihood-Werte sowie die AIK-/BIK-Werte. In der bereinigten wurden gegenüber der ursprünglichen Zeitreihe die Preise vom 25. April 2006 bis zum 15. Mai 2006 entfernt.

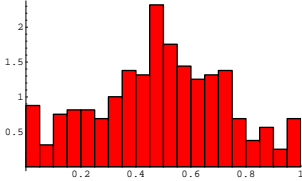
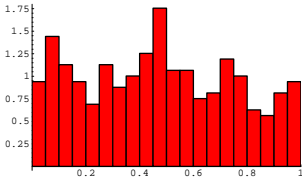
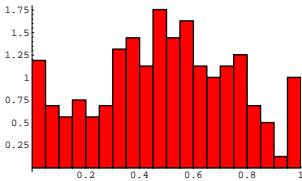
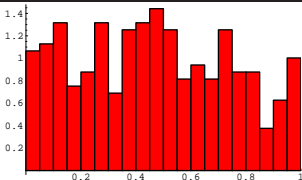
4.4.6 Out-of-Sample-Analyse

Zur Beurteilung der Anpassungsgüte eines stochastischen Prozesses ist auch die Vorhersagequalität von großem Interesse. Dazu werden typischerweise die Maße durchschnittlicher Fehler (ME – Mean Error), durchschnittlicher absoluter Fehler (MAE – Mean Absolute Error) und durchschnittlicher absoluter prozentualer Fehler (MAPE – Mean Absolute Percentage Error) von Vorhersagen herangezogen. Für das Risikomanagement ist allerdings vor allem die Vorhersage der Renditeverteilung von Interesse, z. B. um sich gegen extreme Ereignisse abzusichern. Daher soll auch der KS-Test auf die vorhergesagten Renditen angewendet werden.

Zunächst werden die ersten 100 Preisbeobachtungen verwendet, um ein anfängliches Parameterset für jeden der getesteten Prozesse zu schätzen. Damit wird eine Preisvorhersage für Tag 101 erstellt. Anschließend wird die tatsächliche Preisbeobachtung dieses Tages zur Informationsmenge hinzugefügt und die Parameter neu geschätzt, um eine weitere Vorhersage für Tag 102 zu generieren. Auf diese Weise wird eine Serie von Vorhersagen erzeugt, die jeweils alle bis zum Vortag verfügbaren Informationen nutzen. Diese Vorhersagen können dann mit den beobachteten Werten verglichen werden. Die Ergebnisse dieser Out-of-Sample-Analyse werden in Tabelle 4.15 präsentiert. Neben den ME-, MAE-, MAPE-, und KS-Werten findet sich in der zweiten Spalte erneut das bereits in den vorangegangenen Abschnitten besprochene Histogramm zur Beurteilung der Anpassungsgüte der Verteilung. In diesem Fall lässt sich damit beurteilen, wie gut der jeweilige Prozess die Verteilung der Renditen vorhersagen kann. Außerdem werden zum Vergleich die Vorhersagefehler und der KS-Wert auch für eine In-Sample-Analyse berechnet. Dazu werden, ebenfalls beginnend nach den ersten 100 Preisbeobachtungen, 1-Tagesvorhersagen gebildet, allerdings auf Basis der in Tabelle 4.12 gezeigten Parameterschätzer, welche alle Informationen im Beobachtungszeitraum berücksichtigen. Für die Out-of-Sample-Analyse werden die Prozesse OU, MRBV und MRBVm nicht berücksichtigt, da wie gezeigt sowohl Mean-Reversion als auch eine Preisobergrenze für die zweite Handelsperiode nicht sinnvoll erscheinen.

Bezüglich der Maße ME, MAE und MAPE ist die GBB den anderen Prozessen gleichwertig. Allerdings sind die Verteilungseigenschaften der GBB Out-of-Sample nach wie vor am schlechtesten, wie sowohl die Histogramme als auch die KS-Werte in Tabelle 4.15 zeigen. Die Prozesse JD, HD und RS verschlechtern sich Out-of-

Tabelle 4.15: Analyse der Vorhersagekraft – 2. Handelsperiode.

Prozess	Out-of-Sample-Histogramm $\bar{s}_t = \int_{-\infty}^{s_t} f(x I_{t-1}, \Phi^*)dx$	Vorhersagefehler und Kolmogorov-Smirnov		
			In-Sample	Out-of-Sample
GBB		ME	0,000858	0,001725
		MAE	0,020618	0,020602
		MAPE	0,007078	0,007076
		KS	0,126***	0,127***
JD		ME	0,001200	0,002058
		MAE	0,020615	0,020621
		MAPE	0,007078	0,007083
		KS	0,046	0,070*
HG		ME	0,000857	0,001769
		MAE	0,020615	0,020725
		MAPE	0,007077	0,007116
		KS	0,085**	0,089**
RS		ME	0,000868	0,001712
		MAE	0,020617	0,020611
		MAPE	0,007078	0,007079
		KS	0,056	0,082**

*, **, *** bedeutet Ablehnung der Kolmogorov-Smirnov (KS) Statistik auf dem 10, 5, 1 Prozentniveau. ME, MAE und MAPE bedeuten durchschnittlicher Fehler, durchschnittlicher absoluter Fehler und durchschnittlicher absoluter prozentualer Fehler. Die Parameter für die Out-of-Sample-Analyse werden nach jeder Vorhersage (also für jeden Tag) neu geschätzt, wobei alle Preisinformationen bis zum vorhergehenden Tag genutzt werden. Die erste Schätzung startet nach den ersten 100 Werten der Preiszeitreihe. Die Berechnung der Vorhersagefehler für die In-Sample-Analyse startet ebenfalls erst nach den ersten 100 Werten, um vergleichbar zu sein. Für die In-Sample-Analyse werden allerdings auf der kompletten Preiszeitreihe geschätzte Parameter verwendet.

Sample bezüglich ihrer KS-Werte, wobei der HG-Prozess relativ zu den anderen aufholt und mit einem KS-Wert von 0,089 kaum noch schlechter als der RS-Prozess mit einem KS-Wert von 0,082 ist. Der JD-Prozess scheint Out-of-Sample die besten Verteilungseigenschaften aufzuweisen. Mit einem KS-Wert von 0,070 wird die Verteilungsannahme nur knapp auf dem 10%-Signifikanzniveau abgelehnt.

4.4.7 Fazit: Direkte CO₂-Preismodellierung

Aus der Prozesskalibrierung haben sich einige interessante Erkenntnisse bezüglich der dynamischen Eigenschaften historisch beobachteter EUA-Preise ergeben. Zunächst einmal gibt es empirisch keinen Hinweis auf Mean-Reversion in den Daten. Dementsprechend sind auch die geschätzten Volatilitäten σ für die GBB und den OU-Prozess praktisch gleich groß und die beiden Prozesse unterscheiden sich nur durch ihre Drift. Da das EUA als Underlying handel- und lagerbar ist, ist die Drift der beiden Prozesse unter dem risikoneutralen Maß irrelevant.⁵¹ Dies bedeutet aber auch, dass für EUAs Optionswerte bei Annahme eines OU-Prozesses praktisch gleich den Optionswerten bei Annahme einer GBB sein werden. Der OU-Prozess kann daher von der weiteren Analyse ausgeschlossen werden.

Die Einführung einer Preisobergrenze mit dem MRBV-Prozess verbessert die Anpassungsgüte im Vergleich zur einfachen geometrisch Brownschen Bewegung für die 1. Handelsperiode. Allerdings kann der MRBV-Prozess nicht mit dem Sprungdiffusions-, dem Heston-GARCH- und dem Regime-Switching-Prozess konkurrieren. Für die zweite Handelsperiode gibt es empirisch keine Hinweise auf eine Preisobergrenze und auch aus regulatorischer Sicht erscheint eine Obergrenze ab 2008 wenig wahrscheinlich. Da die erste Handelsperiode nahezu vorüber ist, kann somit auch der MRBV/MRBVm-Prozess für die weitere Analyse ausgeschlossen werden. In-Sample scheinen der JD- und der RS-Prozess die beste Anpassungsgüte aufzuweisen. Während für Out-of-Sample-Prognosen von einem Tag der HG-Prozess zwar aufholen kann, scheint der JD-Prozess am geeignetsten zu sein und verpasst die Insignifikanz des KS-Verteilungstests auf dem 10%-Niveau nur knapp.

Die empirische Performance der untersuchten Prozesse ist zum Teil recht vielversprechend. Wie z. B. von Paoletta und Taschini (2006) am Beispiel von GARCH-Prozessen gezeigt, können die diskutierten Prozesse natürlich weiter verfeinert werden, z. B. im Hinblick auf zusätzliche stochastische Komponenten oder alternative Verteilungsannahmen. Dabei sollte aber die praktische Anwendbarkeit, insbesondere im Hinblick auf die Bewertung von Derivaten, wie z. B. Optionen, im Auge behalten werden.

⁵¹Vgl. z. B. Lo und Wang (1995).

Kapitel 5

Bewertung von CO₂-Derivaten

Sowohl die Ergebnisse der Expertenbefragung als auch die aktuelle Marktentwicklung zeigen deutlich, dass im EU EHS ein aktiver Markt für CO₂-Derivate entsteht. Aufbauend auf der im vorigen Kapitel erfolgten ausführlichen Analyse der CO₂-Preisdynamiken sollen nun Bewertungsmethoden für diese CO₂-Derivate diskutiert werden.

Grundsätzlich kann zwischen Instrumenten mit linearer Auszahlungsfunktion, wie Forwards und Futures, und solchen mit nichtlinearer Auszahlungsfunktion, wie z. B. Optionen, unterschieden werden. Bezüglich der Bewertung von Forwards und Futures wird nachfolgend analysiert, inwieweit innerhalb von Handelsperioden auf den Cost-of-Carry-Ansatz zurückgegriffen werden kann. Für die Optionsbewertung wird hingegen die risikoneutrale Bewertung diskutiert. Eine Voraussetzung für die risikoneutrale Bewertung ist allerdings die Annahme eines zu Grunde liegenden stochastischen CO₂-Preisprozesses. Da diese Annahme im noch jungen EU EHS mit großer Unsicherheit belastet ist und sich zudem im EU EHS noch kein Prozess als Standard herausgebildet hat, wird am Beispiel von europäischen Optionen analysiert, inwieweit das mit der Bewertung verbundene Modellrisiko empirisch relevant ist und durch welche Strategien es gemindert werden kann.

5.1 CO₂-Derivatebewertung in der Literatur

Da es erst seit wenigen Jahren empirische Arbeiten zu möglichen stochastischen Prozessen für CO₂-Preise gibt, sind derzeit auch nur sehr wenige Arbeiten bekannt, die

sich darüber hinaus mit der Bewertung von Derivaten auf CO₂-Emissionszertifikate beschäftigen.

Vor dem Start des EU EHS im Jahr 2005 nutzten praktisch alle einschlägigen Arbeiten, die sich in irgendeiner Form mit der Bewertung von Optionen auf Emissionszertifikate beschäftigen, Standardverfahren aus dem Aktienbereich, ohne die dahinter liegenden Annahmen zu hinterfragen. Beispiele sind Tucker (2001), der die bekannte Black/Scholes-Formel nutzt, und de Jong und Oosterom (2004), die ein Binomialmodell gemäß Cox, Ross und Rubinstein (1979) verwenden. Beide Arbeiten unterstellen implizit eine geometrisch Brownsche Bewegung für die Preisdynamik.

Auch in der Praxis sind darüber hinaus keine alternativen Bewertungsansätze verbreitet. Die vorletzte Seite des in Abschnitt 3.3 diskutierten Interviewleitfadens enthält die offene Frage, welche Methoden die befragten Experten kennen würden, um Derivate auf Emissionszertifikate zu bewerten. Von den 25 Experten wurde neun Mal die Black/Scholes-Formel als Antwort genannt. Auf den Black/Scholes-Preis würde dann eine grob geschätzte Prämie aufgeschlagen werden, unabhängig davon, ob die Annahmen dieser Bewertungsmethode erfüllt seien oder nicht. Die anderen kannten entweder keine geeignete Methode oder betonten, dass dies im Moment noch eine große Diskussion sei.

Parallel zur vorliegenden Arbeit entstanden dann im Jahr 2006 die Arbeiten von Borak et al. (2006), Daskalakis, Psychoyios und Markellos (2006) und Fehr und Hinz (2006), die alle die Bewertung von CO₂-Derivaten entweder zum Inhalt haben oder zumindest ansprechen.

Borak et al. (2006) untersuchen die Bewertung von Forwards und Futures mit Laufzeiten bis zum Jahr 2012. Dazu verwenden sie den auf Commoditymärkten üblichen Convenience-Yield-Ansatz.¹ Sie unterscheiden dabei formal nicht zwischen erster und zweiter Handelsperiode. Für die erste Handelsperiode finden sie nur geringe, teilweise nicht signifikant von null verschiedene Convenience-Yields. Für Terminkontrakte mit Enddatum in der zweiten Handelsperiode finden sie signifikant von null verschiedene und deutlich positive Convenience-Yields. Während die gefundenen Ergebnisse für die erste Handelsperiode durch die ökonomische und empirische Analyse in Abschnitt 5.2 gestützt werden, erscheint für die zweite Handelsperiode

¹Vgl. zum Convenience-Yield-Ansatz z. B. Geman (2005), S. 35ff. Für eine Diskussion des Convenience-Yield-Ansatzes im EU EHS siehe auch Abschnitt 5.2.1.

die Interpretation der Differenz von Spot- und Terminpreisen als Convenience-Yield fraglich. Eine Convenience-Yield wird üblicherweise mit einem zusätzlichen Nutzen (gegebenenfalls auch Schaden) des Underlyings im Vergleich zum Terminkontrakt begründet. Ein EUA der 1. Handelsperiode hat allerdings für die 2. Handelsperiode überhaupt keinen Nutzen mehr. So lag z. B. der Schlusskurs eines EUAs am 31. Januar 2007 an der EEX bei EUR 2,28. Zur gleichen Zeit lag der Schlusskurs des Futures 2008 an der ICE/ECX bei EUR 15,30. Das spricht eher für eine vollständige Abkopplung der Preise als für eine Convenience-Yield.

Ähnlich zur vorliegenden Arbeit nutzen auch Daskalakis, Psychoyios und Markellos (2006) die risikoneutrale Bewertung für CO₂-Derivate. Als zu Grunde liegenden Spotpreisprozess schlagen sie einen Sprungdiffusionsprozess vor. Für die erste Handelsperiode ist diese Bewertungsmethode somit äquivalent zur hier vorgeschlagenen Bewertungsmethode bei Nutzung des in Abschnitt 4.4.3 kalibrierten JD-Prozesses. Allerdings nutzen Daskalakis, Psychoyios und Markellos (2006) auch für die Bewertung von Optionen mit Laufzeiten bis in die zweite Handelsperiode hinein die aus dem Spotpreis geschätzten Parameter. Stattdessen wird nachfolgend in Abschnitt 5.3 argumentiert, warum die Parameter für die Bewertung solcher Optionen besser aus Terminpreisen für die zweite Handelsperiode geschätzt werden sollten.

Fehr und Hinz (2006) leiten aus ihrem Gleichgewichtsmodell einen stochastischen Prozess für CO₂-Preise ab. Ihr Modell ist zwar nicht zur Bewertung von derivativen Instrumenten gedacht, insbesondere da es nicht an Marktpreise für EUAs kalibriert werden kann. Die Autoren diskutieren aber prinzipiell den Erwartungswert und die Sensitivität der Auszahlung einer europäischen CO₂-Kaufoption basierend auf dem abgeleiteten Preisprozess. Auf Grund der sich aus ihrem Modell ergebenden Preisobergrenze für CO₂-Preise hat auch die mögliche Auszahlung der Option eine klare Obergrenze.

5.2 Bewertung von linearen CO₂-Derivaten

Die Frage nach der korrekten Bewertung von Forwards und Futures ist einerseits interessant für Unternehmen, die den Terminhandel im EU EHS in ihre Risikomanagementsysteme integrieren möchten. Andererseits kommt der Frage nach dem Zusammenhang von Spot- und Terminpreisen auch für die Bewertung komplexerer

Derivate auf EUAs große Bedeutung zu. Dies gilt insbesondere für Derivate mit Laufzeiten in die kommende Handelsperiode hinein. Für diese existiert zwar kein gehandeltes Underlying im Spotmarkt, wohl aber werden Terminkontrakte mit Laufzeiten über die Handelsperiodengrenze hinaus liquide an Börsen gehandelt. Ist nun die generelle Beziehung zwischen Spot- und Terminmarkt bekannt, können diese Terminkontrakte möglicherweise dazu genutzt werden, komplexere Derivate für die kommende Handelsperiode zu duplizieren und damit auch zu bewerten.

5.2.1 Zusammenhang von Spot- und Terminmarkt

Wegen der bis auf eventuelle Kontoführungsgebühren verlustfreien Lagerbarkeit von EUAs ist innerhalb der ersten Handelsperiode der einzig sinnvolle Grund dafür, dass sich diskontierte Terminpreise von Spotpreisen unterscheiden, eine mögliche Convenience-Yield von EUAs. Wären bei einer Convenience-Yield von null die Spotpreise unter den diskontierten Terminpreisen, so wäre mit Hilfe des Kaufs von EUAs auf Kredit und des gleichzeitigen Abschlusses einer Leerverkaufsposition in einem Terminkontrakt ein risikoloser Gewinn möglich.² Wären Spotpreise höher als diskontierte Terminpreise, so würde man äquivalent EUAs im Spotmarkt verkaufen und gleichzeitig die Gegenposition im Terminmarkt eingehen, was wiederum einen risikolosen Gewinn zur Folge hätte. Zu beachten ist dabei allerdings, dass letztgenannte Möglichkeit den Besitz von EUAs voraussetzt, da im jungen EU EHS institutionalisierte Leerverkaufsmöglichkeiten im Spotmarkt noch nicht existieren. Somit können nur CO₂-regulierte Unternehmen mit zugeteilten EUAs dies ausnutzen.

Die Frage stellt sich, welcher Vorteil aus dem Halten von Emissionszertifikaten gegenüber dem Eingehen einer äquivalenten Forward- oder Futuresposition eine positive Convenience-Yield verursachen könnte. Für Terminkontrakte, die vor dem nächsten verpflichtenden Einreichungstermin für EUAs enden, ist kein Nachteil gegenüber im Bestand gehaltenen EUAs zu erkennen. Enden sie nach dem nächsten Einreichungstermin, so haben sie den Nachteil, dass sie nicht zur Erfüllung der regulatorischen Pflichten genutzt werden können. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass CO₂-regulierten Unternehmen das Borrowing von EUAs um ein Jahr offen steht, falls sie einen temporären Engpass an EUAs haben. Nur wenn die Position

²Dieses Vorgehen ist gemeinhin als „Long Arbitrage“ bekannt, die Gegenposition davon als „Short Arbitrage“.

eines Unternehmens in einem Terminkontrakt, der nach dem nächsten Einreichungstermin endet, größer als die Möglichkeit zum Borrowing ist, stellt dies eine reale Einschränkung dar. Das mögliche maximale Leerverkaufsvolumen eines Unternehmens ist somit auf die Höhe der jährlichen Zuteilung beschränkt. Ein möglicher weiterer Grund für eine positive Convenience-Yield könnte darin bestehen, dass Unternehmen nicht an die zuverlässige Lieferung von Terminkontrakten glauben. Dies sollte jedoch für börsengehandelte Futures in einem effizienten Markt keine Rolle spielen. Ein weiterer Nutzen des Haltens von EUAs ist nicht erkennbar.

Die nachfolgend getestete Hypothese ist, dass die diskutierten Gründe für eine mögliche Convenience-Yield vernachlässigbar sind und der Zusammenhang von Spot- und Terminpreisen durch den Cost-of-Carry-Zusammenhang beschrieben werden kann.³ Ohne Convenience-Yield und Lagerkosten entsprechen die Cost-of-Carry-Kosten gerade dem risikolosen Zinssatz. Die vermutete Beziehung zwischen Spot- und Terminpreisen von EUAs in der 1. Handelsperiode des EU EHS lautet somit

$$F_t(T) = e^{r(T-t)} S_t, \quad (5.1)$$

wobei $F_t(T)$ zum Zeitpunkt t den Preis eines Terminkontrakts auf ein EUA mit Lieferdatum T bezeichnet. S_t steht für den Spotpreis eines EUAs zum Zeitpunkt t , während r den aktuellen risikolosen Zinssatz beschreibt.

Somit können nun aus beobachteten Spotpreisen und dem entsprechenden risikolosen Zinssatz nach Gleichung (5.1) theoretische Terminpreise berechnet und diese mit beobachteten Preisen von börsengehandelten Futures verglichen werden.⁴ Der Zusammenhang zwischen Spot- und Terminpreisen kann äquivalent auch in Form von Renditen ausgedrückt werden. Es sei

$$y_t(T) = \frac{1}{T-t} \ln \left[\frac{F_t(T)}{S_t} \right], \quad (5.2)$$

wobei $y_t(T)$ die implizit aus Spot- und Terminpreis bestimmte Rendite von t nach T beschreibt. Diese Rendite sollte gleich dem für diese Zeitperiode gültigen risikolosen Zinssatz r sein.

³Vgl. Uhrig-Homburg und Wagner (2007). Mit Cost-of-Carry werden üblicherweise die Bestandshaltekosten bezeichnet.

⁴Wie bereits in Abschnitt 4.4.1 begründet, wird erneut der Unterschied zwischen Forwards und Futures vernachlässigt.

5.2.2 Datengrundlage

Für die nachfolgenden empirischen Tests des Zusammenhangs von Spot- und Terminpreisen werden Preisdaten der liquidesten Börsen für EUAs und EUA-Futures, also der Powernext bzw. der ICE/ECX, verwendet. Ideal wäre die Verwendung von Innertagesdaten mit genauen Informationen, zu welchen Uhrzeiten die Transaktionen stattgefunden haben, um Spot- und Terminpreise exakt abzugleichen. Transaktionsdaten zeigen allerdings, dass selbst für die beiden liquidesten Börsen, die Powernext und die ICE/ECX, zumindest zu Beginn viele Tage ein Handelsvolumen von null aufgewiesen haben. So lag für diese beiden Börsen von Juni 2005 bis Juni 2006 der Anteil an Tagen, an denen es zumindest an einer der Börsen keinen Handel gab, bei etwa 20%.⁵ In solch einer Situation ist es wenig sinnvoll zu versuchen, Spot- und Terminpreise innertäglich abzugleichen. Stattdessen werden nachfolgend tägliche Schlusskurse verwendet. Die empirischen Tests umfassen den Zeitraum vom 24. Juni 2005 bis zum 15. November 2006.⁶

Für die Tests werden Futures mit Laufzeiten bis Dezember 2006 und Dezember 2007 verwendet.⁷ Zusätzlich wird auch der Future mit einer Laufzeit bis Dezember 2008 in die Analyse mit aufgenommen, um den Bruch zwischen den beiden Handelsperioden des EU EHS zu demonstrieren. Da es vor 2008 auf Grund der Banking-Restriktionen für diesen Future kein gehandeltes Underlying gibt, ist auch die Gültigkeit der postulierten Spot-Terminpreisbeziehung nach den Gleichungen (5.1) und (5.2) nicht zu vermuten. Zur Berechnung der risikolosen Zinssätze werden bis zu einer Laufzeit von einem Jahr erneut EURIBOR-Sätze und für größere Laufzeiten EuroSwap-Sätze verwendet.

Einen ersten Eindruck über den tatsächlichen Zusammenhang gibt Abbildung 5.1, welche theoretisch nach Gleichung (5.1) aus Spotpreisen und Zinssätzen berechnete Terminpreise und beobachtete Preise für Futures mit einer Laufzeit bis Dezember des Jahres 2006 einander gegenüberstellt. Die Übereinstimmung der beiden Zeitreihen

⁵Quelle: Volumendaten von Bloomberg.

⁶Der Grund, warum nicht wie bei der Kalibrierung der stochastischen Prozesse Daten bis einschließlich Dezember 2006 verwendet werden, liegt darin, dass der Future 2006 im Dezember 2006 fällig wurde und auf Grund der hohen Tick Size von EUR 0,05 und der geringen Restlaufzeit keine aussagekräftigen Tests mehr möglich sind. Bei nur wenigen Tagen Restlaufzeit sind die theoretischen Zinsunterschiede von Spot- und Terminpreis kleiner als diese Tick Size.

⁷Der Future mit Laufzeit Ende 2005 wurde nicht analysiert, da die Zeitreihe zu kurz für statistisch relevante Aussagen ist und darüber hinaus zu Beginn das Handelsvolumen sehr gering war.

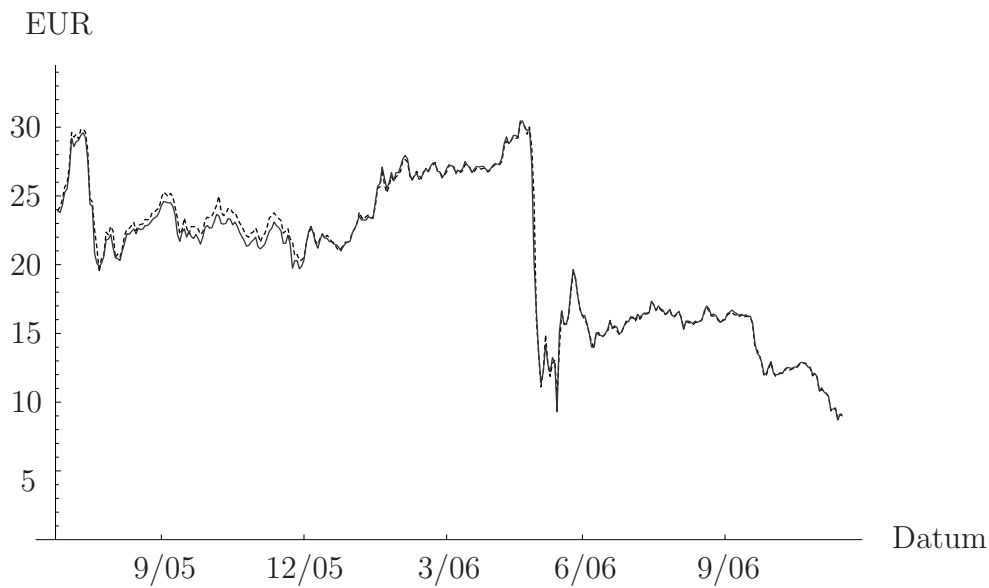


Abbildung 5.1: Theoretischer Terminpreis 2006 versus beobachteter Futurespreis. Die durchgezogene Linie zeigt beobachtete Preise für den Future 2006 von der ICE/ECX mit Lieferdatum 18. Dezember 2006. Die gestrichelte Linie repräsentiert den theoretischen Terminpreis, wenn Preise von EUAs an der Powernext mit dem risikolosen Zinssatz entsprechend Gleichung (5.1) aufgezinst werden.

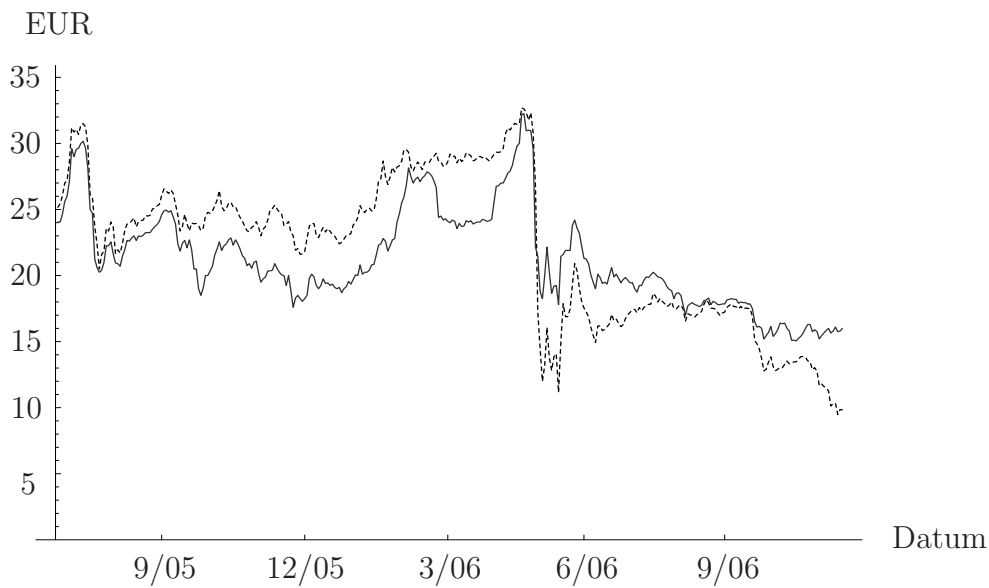


Abbildung 5.2: Theoretischer Terminpreis 2008 versus beobachteter Futurespreis. Die durchgezogene Linie zeigt beobachtete Preise für den Future 2008 von der ICE/ECX mit Lieferdatum 15. Dezember 2008. Die gestrichelte Linie repräsentiert den theoretischen Terminpreis, wenn Preise von EUAs an der Powernext mit dem risikolosen Zinssatz entsprechend Gleichung (5.1) aufgezinst werden.

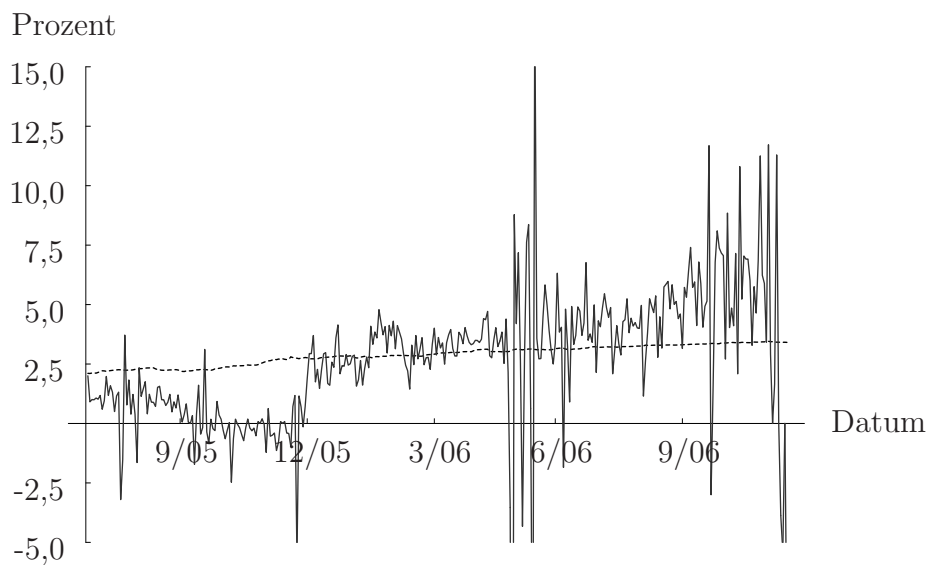


Abbildung 5.3: Implizite Rendite aus EUA und Future 2006 versus beobachteter Zinssatz. Die durchgezogene Linie zeigt die nach Gleichung (5.2) aus EUA (Powernext) und Future 2006 (ICE/ECX, Lieferung 18. Dezember 2006) berechnete Rendite. Die gestrichelte Linie repräsentiert entsprechend der Laufzeit den beobachteten risikolosen Zinssatz.

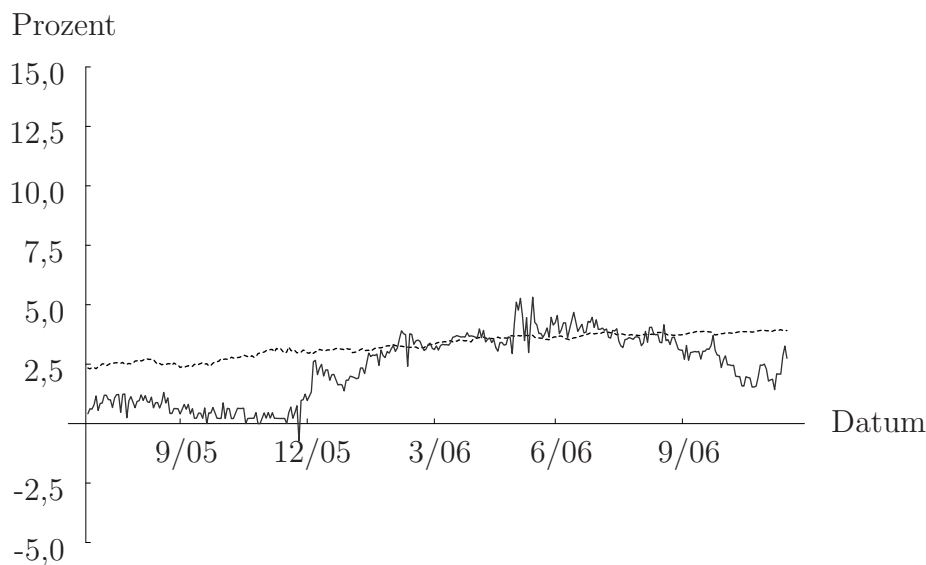


Abbildung 5.4: Implizite Rendite aus Future 2006 und Future 2007 versus beobachteter Zinssatz. Die durchgezogene Linie zeigt die nach Gleichung (5.2) aus EUA-Future 2006 und Future 2007 (beide ICE/ECX, Lieferung jeweils Dezember) berechnete Rendite. Die gestrichelte Linie repräsentiert entsprechend der Laufzeit den beobachteten risikolosen Zinssatz.

ist offensichtlich sehr hoch, insbesondere für die zweite Hälfte der Beobachtungsperiode ist ein Unterschied kaum noch zu erkennen. Anders stellt sich der Sachverhalt in Abbildung 5.2 dar, die theoretische Terminpreise und beobachtete Preise für Futures mit Laufzeit bis Dezember des Jahres 2008 vergleicht. Wie vermutet ist der Cost-of-Carry-Ansatz offensichtlich nicht in die zweite Handelsperiode hinein gültig.

Abbildungen 5.3 und 5.4 vergleichen risikolose Zinssätze mit impliziten Renditen, die nach Gleichung (5.2) berechnet wurden. Während Abbildung 5.3 Renditen aus EUA und Future 2006 zeigt, präsentiert Abbildung 5.4 implizite Renditen, die direkt aus dem Future 2006 und dem Future 2007 ohne Nutzung von Spotpreisen berechnet wurden. In dieser Darstellung werden die Abweichungen von der theoretischen Gleichgewichtsbeziehung zwischen EUA-Preisen und Terminpreisen wesentlich deutlicher. Diese Abweichungen sollen nun auf statistische Relevanz hin untersucht werden.

5.2.3 Empirischer Test des Cost-of-Carry-Zusammenhangs

Gemäß Gleichung (5.1) sei der Unterschied zwischen beobachtetem und theoretischem Terminpreis als Gleichgewichtsfehler

$$\nu_t = F_t(T) - e^{r(T-t)} S_t \quad (5.3)$$

definiert. Analog sei nach Gleichung (5.2) der Unterschied zwischen impliziter Rendite und risikolosem Zinssatz als Gleichgewichtsfehler

$$\omega_t = \frac{1}{T-t} \ln \left[\frac{F_t(T)}{S_t} \right] - r \quad (5.4)$$

definiert. Bei Gültigkeit der Hypothese des Cost-of-Carry-Zusammenhangs sollten sowohl ν_t als auch ω_t konstant und null sein. In einem jungen Markt wie dem EU EHS kann es allerdings sein, dass Informationen im Spot- und Terminmarkt mit unterschiedlicher Geschwindigkeit verarbeitet werden. Die Gleichgewichtsfehler können dann temporär von null abweichen, sollten allerdings immer wieder zu null zurück tendieren, also Mean-Reversion zeigen. Dies wird mit den bereits erwähnten

ADF- und PP-Tests getestet.⁸ Getestet wird sowohl mit als auch ohne Berücksichtigung einer Konstanten in der Regressionsgleichung der Einheitswurzeltests. Obwohl sowohl ν_t als auch ω_t stationär mit Durchschnitt null sein sollten, könnte ein von null verschiedener Durchschnitt empirisch auch bei Gültigkeit des Cost-of-Carry-Zusammenhangs z. B. dann auftreten, wenn die verwendeten EURIBOR- bzw. EuroSwap-Zinssätze nicht exakt den für die Marktteilnehmer im EU EHS relevanten Zinssätzen entsprechen.

Tabelle 5.1 gibt einen kurzen Überblick über die für die Berechnung der Gleichgewichtsfehler verwendeten Zeitreihen und ihrer Abkürzungen. Zudem werden Mittelwert und Standardabweichung der jeweiligen Zeitreihe mit angegeben. Tabelle 5.2 präsentiert Ergebnisse der Einheitswurzeltests für die gesamte Zeitperiode von Juni 2005 bis November 2006, während Tabelle 5.3 die Ergebnisse der gleichen Tests für eine verkürzte Zeitperiode von Dezember 2005 bis November 2006 zeigt. Der Grund für die Tests auf der verkürzten Zeitperiode besteht darin, dass im Dezember 2005 zum ersten Mal Futures fällig wurden. Wie insbesondere in den Abbildungen 5.3 und 5.4 erkennbar, sind nach diesem Datum die Abweichungen von beobachteten und theoretischen Terminpreisen deutlich geringer geworden. Gründe hierfür werden nach der Besprechung der Ergebnisse der statistischen Analyse diskutiert werden.

In Tabelle 5.2 sind die Ergebnisse nicht eindeutig. Für alle getesteten Kombinationen von Spotpreisen mit Preisen für Futures 2006 und Futures 2007 (F06/TF06, F07/TF07, Y06/I06 und Y07/I07) wird die Hypothese einer Einheitswurzel klar abgelehnt, wie an den größtenteils signifikanten Statistiken erkennbar. Für diese Kombinationen kann der Gleichgewichtsfehler somit als stationär angesehen werden. Für die verbleibenden getesteten Kombinationen sind insbesondere bei Berücksichtigung eines von null verschiedenen Mittelwerts viele Statistiken nicht mehr signifikant. Wie Tabelle 5.3 zeigt, wird das Bild deutlich klarer, wenn nur Preise ab Dezember 2005 berücksichtigt werden. Die Ergebnisse unterstützen nun eindeutig die Hypothese, nach der die Gleichgewichtsfehler innerhalb einer Periode stationär um null sein sollten. Bis auf Kombinationen von EUA und Future 2008 (F08/TF08, Y08/I08)

⁸Neben den einfachen ADF- und PP-Tests existieren auch fortgeschrittenere Verfahren, die z. B. auf Trends oder strukturelle Brüche in den Daten testen können. Hier ist allerdings lediglich von Interesse, ob die Gleichgewichtsfehler stationär um null herum sind, wofür die ADF- und PP-Tests genügen. Vgl. generell zu methodischen Problemen beim Testen des Zusammenhangs von Spot- und Terminmärkten z. B. Brenner und Kroner (1995) und Theissen (2005).

Tabelle 5.1: Beschreibung der Zeitreihen für die Tests des Zusammenhangs von Spot- und Terminmarkt.

Name	Beschreibung	Mittelwert	Stand.-Abw.
<u>Beobachteter Futurespreis</u>		<u>EUR</u>	
F06	ICE/ECX Future, Laufzeitende 18.12.2006	20,47	5,37
F07	ICE/ECX Future, Laufzeitende 17.12.2007	20,95	5,46
F08	ICE/ECX Future, Laufzeitende 15.12.2008	21,04	3,69
<u>Theoretischer Terminpreis</u>		<u>EUR</u>	
TF06	Termin 2006, berechnet aus Powernext Spotpreis	20,64	5,46
TF07	Termin 2007, berechnet aus Powernext Spotpreis	21,30	5,59
TF0607	Termin 2007, berechnet aus ICE/ECX Future 2006	21,14	5,50
TF08	Termin 2008, berechnet aus Powernext Spotpreis	21,21	6,45
<u>Implizite Rendite</u>		<u>Prozent</u>	
Y06	Rendite aus Spotpreis und Future 2006	2,62	3,30
Y07	Rendite aus Spotpreis und Future 2007	2,40	1,74
Y0607	Rendite aus Future 2006 und Future 2007	2,37	1,40
Y08	Rendite aus Spotpreis und Future 2008	7,76	17,00
<u>Beobachteter Zinssatz</u>		<u>Prozent</u>	
I06	Spotzinssatz entsprechend Future 2006	2,88	0,40
I07	Spotzinssatz entsprechend Future 2007	3,17	0,50
I0607	Terminzinssatz entsprechend Zeitperiode zwischen Laufzeitende Future 2006 und Future 2007	3,29	0,49
I08	Spotzinssatz entsprechend Future 2008	3,35	0,52

Theoretische Terminpreise werden mit Hilfe von Gleichung (5.1) aus beobachteten Spot- bzw. Futurespreisen für EUAs sowie beobachteten Zinssätzen berechnet. Ebenso werden implizite Renditen mit Hilfe von Gleichung (5.2) berechnet. Renditen sind auf annualisierter Basis angegeben. Spot- und Terminzinssätze werden aus der beobachteten Zinskurve entsprechend der Laufzeit der jeweiligen Futures berechnet und ebenso auf annualisierter Basis angegeben.

Tabelle 5.2: Einheitswurzeltests für Gleichgewichtsfehler Spot- versus Terminpreis – Zeitraum 06/2005 - 11/2006.

Zeitreihen für Berechnung	Einheitswurzeltests ohne Berücksichtigung Konstante					
	AIK	ADF t	PP Zt	LB	ADF t	PP Zt
F06, TF06	4	-3,15***	-10,39***	9	-1,87*	-12,11***
F07, TF07	5	-1,91*	-6,15***	9	1,46	-6,97***
F07, TF0607	2	-1,62*	-2,03**	2	-1,62*	-2,03**
F08, TF08	2	-0,37	-0,46	12	-0,96	-0,63
Y06, I06	10	-2,13**	-16,61***	9	-1,87*	-16,24***
Y07, I07	10	-1,14	-10,80***	9	-0,95	-10,39***
Y0607, I0607	5	-1,18	-1,86*	2	-1,55	-2,02**
Y08, I08	0	3,17	3,17	0	3,17	3,17
Zeitreihen für Berechnung	Einheitswurzeltests mit Berücksichtigung Konstante					
	AIK	ADF $t\mu$	PP $Zt\mu$	LB	ADF $t\mu$	PP $Zt\mu$
F06, TF06	4	-3,45***	-11,39***	9	-1,95	-13,14***
F07, TF07	5	-2,11	-7,74***	9	-1,46	-8,81***
F07, TF0607	2	-1,72	-2,42	2	-1,72	-2,42
F08, TF08	1	-0,18	-0,42	12	-0,85	-0,55
Y06, I06	10	-2,18	-16,66***	9	-1,93	-16,29***
Y07, I07	10	-1,48	-12,95***	9	-1,27	-12,50***
Y0607, I0607	5	-1,43	-2,51	2	-1,89	-2,64*
Y08, I08	0	2,77	2,77	0	2,77	2,77

*, **, *** bedeutet Ablehnung der Nullhypothese einer Einheitswurzel auf dem 10, 5, 1 Prozentniveau. ADF $t/t\mu$ bzw. PP $Zt/Zt\mu$ bezeichnen die t -Statistiken der ADF- bzw. PP-Einheitswurzeltests mit/ohne Berücksichtigung einer Konstanten in der Regressionsgleichung. AIK gibt an, bis zu welcher Zeitdifferenz nach dem Akaike Informationskriterium Autokorrelationen berücksichtigt werden. Gleiches gilt für LB, wobei hier das Kriterium für die aufzunehmenden Zeitdifferenzen die Insignifikanz der LB-Teststatistik für $H=20$ Lags auf dem 10%-Niveau ist.

Tabelle 5.3: Einheitswurzeltests für Gleichgewichtsfehler Spot- versus Terminpreis – Zeitraum 12/2005 - 11/2006.

Zeitreihen für Berechnung	Einheitswurzeltests ohne Berücksichtigung Konstante					
	AIK	ADF t	PP Zt	LB	ADF t	PP Zt
F06, TF06	0	-13,43***	-13,43***	9	-3,65***	-13,47***
F07, TF07	0	-12,45***	-12,45***	9	-2,92***	-12,93***
F07, TF0607	3	-2,34**	-3,98***	1	-3,59***	-4,12***
F08, TF08	1	-0,21	-0,35	14	-0,70	-0,58
Y06, I06	13	-2,59***	-14,60***	9	-2,04**	-14,12***
Y07, I07	10	-1,39	-14,05***	9	-1,01	-13,79***
Y0607, I0607	4	-1,44	-3,08***	2	-2,37***	-3,10***
Y08, I08	0	2,74	2,74	0	2,74	2,74
Zeitreihen für Berechnung	Einheitswurzeltests mit Berücksichtigung Konstante					
	AIK	ADF $t\mu$	PP $Zt\mu$	LB	ADF $t\mu$	PP $Zt\mu$
F06, TF06	0	-13,47***	-13,47***	9	-3,75***	-13,49***
F07, TF07	0	-12,49***	-12,49***	4	-4,95***	-12,52***
F07, TF0607	3	-2,52***	-4,49***	1	-3,82	-4,37***
F08, TF08	1	-0,45	-0,56	14	-0,80	-0,72
Y06, I06	13	-2,76*	-14,43***	9	-2,06	-14,14***
Y07, I07	10	-1,48	-14,12***	9	-1,12	-13,86***
Y0607, I0607	4	-1,67	-3,42**	2	-2,53	-3,41**
Y08, I08	0	2,11	2,11	0	2,11	2,11

*, **, *** bedeutet Ablehnung der Nullhypothese einer Einheitswurzel auf dem 10, 5, 1 Prozentniveau. ADF $t/t\mu$ bzw. PP $Zt/Zt\mu$ bezeichnen die t -Statistiken der ADF- bzw. PP-Einheitswurzeltests mit/ohne Berücksichtigung einer Konstanten in der Regressionsgleichung. AIK gibt an, bis zu welcher Zeitdifferenz nach dem Akaike Informationskriterium Autokorrelationen berücksichtigt werden. Gleiches gilt für LB, wobei hier das Kriterium für die aufzunehmenden Zeitdifferenzen die Insignifikanz der LB-Teststatistik für $H=20$ Lags auf dem 10%-Niveau ist.

sind nun die meisten Statistiken signifikant.⁹ Zumindest seit Dezember 2005 scheinen somit Spot- und Terminpreise einer klaren und nur vom risikolosen Zinssatz abhängigen Gleichgewichtsbeziehung zu genügen. Wie erwartet gilt dies nicht für Spotpreise und Preise des Futures 2008.

Die Testergebnisse für die Kombinationen F07/TF0607 und Y0607/I0607, die nur die Beziehung zwischen Preisen von Futures verschiedener Laufzeit beschreiben, unterscheiden sich von den Testergebnissen der Kombinationen, die den Spotpreis enthalten. Tatsächlich wird in Tabelle 5.2 die Stationaritätshypothese für erstere eher nicht unterstützt und wie Tabelle 5.3 zeigt, sind selbst nach Dezember 2005 die Teststatistiken zwar signifikant, allerdings doch deutlich niedriger als für Kombinationen, die den Spotpreis enthalten. Der Grund hierfür wird nach einem Vergleich der Abbildungen 5.3 und 5.4 klar. Die Abweichungen vom postulierten Gleichgewicht sind wesentlich weniger volatil, wenn an Stelle von Spot- und Futurespreisen (Abbildung 5.3) Preise für Futures unterschiedlicher Laufzeit miteinander verglichen werden (Abbildung 5.4). Somit ist selbst bei kleinen Abweichungen die Wahrscheinlichkeit einer Zurückweisung der Stationaritätsannahme statistisch gesehen viel größer.

Ein möglicher Grund für diese geringere Volatilität könnte darin bestehen, dass der Future 2006 wesentlich liquider als der Future 2007 gehandelt wurde. Zumindest zu Beginn der Zeitreihen gab es Tage, an denen es für den Future 2007 kein Handelsvolumen gab. Damit wäre der angegebene Preis für den Future 2007 kein realer Preis, sondern die Börse könnte diesen Preis z. B. durch einfaches Aufzinsen des Futures 2006 ermittelt haben. Allerdings war der Future 2007 immer noch liquider als börsengehandelte Emissionszertifikate selbst. Ein wahrscheinlicherer Grund für die volatileren Abweichungen von der Gleichgewichtsbeziehung bei Spot- und Futurespreisen liegt daher in unterschiedlichen Handelszeitpunkten sowie möglicherweise unterschiedlichen Transaktionskostenstrukturen auf Spot- und Terminmärkten begründet. Dadurch können Schlusskurse divergieren. Im Ergebnis sind wahrscheinlich die statistischen Tests, die nur auf Futurespreisen basieren, am verlässlichsten.

Die Stationaritätstests haben gezeigt, dass die nach Gleichungen (5.3) und (5.4) bestimmten Gleichgewichtsfehler innerhalb der aktuellen Handelsperiode immer wieder zu null zurück tendieren. In einem reifen Markt würde man allerdings darüber hinaus

⁹In einigen Fällen ist der PP-Test signifikant, der ADF-Test jedoch nicht. Ein Grund für die Unterschiede kann z. B. Heteroskedastizität in den Daten sein. Im Gegensatz zum ADF-Test korrigiert der PP-Test um Heteroskedastizität.

erwarten, dass Spot- und Terminpreise auch auf täglicher Basis im Gleichgewicht sind und sich nicht für mehrere Tage davon entfernen. Um dies zu testen, könnte man versucht sein, die ersten Differenzen aus beobachtetem Futurespreis und theoretischem Terminpreis bzw. aus impliziter Rendite und Zinssatz zu regressieren. Die zuvor festgestellte Stationarität der Gleichgewichtsfehler bedeutet aber nichts anderes, als dass die Variablen, mit denen die Gleichgewichtsfehler berechnet wurden, kointegrierte Prozesse sind. Aus ökonomischer Sicht besteht somit die Gefahr einer Scheinkorrelation. Nach Engle und Granger (1987) kann eine valide Regression zweier kointegrierter Variablen v_t und ψ_t in Fehlerkorrekturform

$$v_t - v_{t-1} = \beta_0 + \beta_1(\psi_t - \psi_{t-1}) + \beta_2(v_{t-1} - \psi_{t-1}) + \tilde{\varepsilon}_t \quad (5.5)$$

durchgeführt werden, wobei mit $\tilde{\varepsilon}_t$ normalverteilte Residuen bezeichnet seien. Würde der langfristige Zusammenhang $\beta_2(v_{t-1} - \psi_{t-1})$ in obiger Gleichung fehlen, wäre die Regression fehlspezifiziert. Bei einer Regression von beobachtetem Futurespreis und theoretischem Terminpreis bzw. impliziter Rendite und Zinssatz ist die Nullhypothese $(\beta_0, \beta_1, \beta_2) = (0, 1, -1)$. Wird weiter angenommen, dass $\beta_1 = -\beta_2$ kann die Regression weiter vereinfacht werden zu

$$v_t - v_{t-1} = \beta_0 + \beta_1(\psi_t - v_{t-1}) + \tilde{\varepsilon}_t. \quad (5.6)$$

Die Nullhypothese ist nun $(\beta_0, \beta_1) = (0, 1)$. In dieser vereinfachten Form wird Gleichung (5.6) in der Literatur häufig bei kointegrierten Variablen eingesetzt, z. B. beim Testen der rationalen Erwartungshypothese für Zinssätze oder der Hypothese erwartungstreuer Terminpreise.¹⁰ Gleichung (5.6) wird nun für die gleichen Kombinationen von Preisen und Renditen geschätzt wie auch schon für die Stationaritätsanalyse.¹¹ Tabelle 5.4 zeigt geschätzte Parameter und t -Statistiken. Aus der Stationaritätsanalyse ist bereits bekannt, dass in den Residuen Autokorrelationen vorhanden sind. Zusätzlich könnten die Residuen heteroskedastische Züge aufweisen. Dies ist im vorliegenden Fall besonders relevant, da die Restlaufzeit der getesteten Futures im Zeitablauf abnimmt. Somit sollte auch die Volatilität der Basis, also die

¹⁰Eine Diskussion von Voraussetzungen und potenziellen Nachteilen dieses Tests findet sich z. B. in Hakkio und Rush (1989).

¹¹Alle getesteten Zeitreihen sind integriert von der Ordnung eins, das heißt ihre ersten Differenzen sind stationär (Stationaritätstests sind hier nicht gezeigt). Dies ist Voraussetzung dafür, dass Variablen kointegriert von der Ordnung eins sein können.

Tabelle 5.4: Kurzfristige Dynamik Spot- versus Terminpreis ohne Korrektur um Heteroskedastizität und Autokorrelation.

06/05 - 11/06 Zeitreihen (v_t, ψ_t)	Mittel	β_0	t -Stat. $\beta_0 = 0$	β_1	t -Stat. $\beta_1 = 1$
F06, TF06	20,47, 20,64	-0,15	-6,30***	0,94	-1,89*
F07, TF07	20,95, 21,30	-0,27	-8,21***	0,73	-7,73***
F07, TF0607	20,95, 21,14	-0,18	-15,09***	0,93	-5,25***
F08, TF08	21,04, 21,21	-0,02	-0,60	-0,03	-96,57***
Y06, I06	2,62, 2,88	-0,21	0,17	0,77	-4,28***
Y07, I07	2,40, 3,17	-0,37	-4,80***	0,48	-11,15***
Y0607, I0607	2,37, 3,29	-0,05	-2,01**	0,07	-49,00***
Y08, I08	7,76, 3,35	0,14	1,26	-0,02	-152,56***
12/05 - 11/06 Zeitreihen (v_t, ψ_t)	Mittel	β_0	t -Stat. $\beta_0 = 0$	β_1	t -Stat. $\beta_1 = 1$
F06, TF06	19,37, 19,34	0,02	0,65	0,997	-0,79
F07, TF07	20,00, 20,03	-0,04	-1,47	0,997	-0,73
F07, TF0607	20,00, 20,06	-0,06	-6,68***	1,0002	0,18
F08, TF08	20,48, 19,71	-0,36	-1,71*	0,61	-15,21***
Y06, I06	3,66, 3,11	0,70	2,90***	0,89	-1,50
Y07, I07	3,29, 3,45	-0,24	-2,18**	1,05	1,10
Y0607, I0607	3,18, 3,56	-0,84	-11,38***	1,29	7,90***
Y08, I08	11,27, 3,63	10,22	9,41***	-0,38	-8,68***

*, **, *** bedeutet Ablehnung auf dem 10, 5, 1 Prozentniveau. Parameter sind entsprechend Gleichung (5.6) geschätzt.

Tabelle 5.5: Um Heteroskedastizität und Autokorrelation bereinigte *t*-Statistiken für kurzfristige Dynamik Spot- versus Terminpreis.

06/05 - 11/06						
Zeitreihen (v_t, ψ_t)	AIK	<i>t</i> -Statistik		LB	<i>t</i> -Statistik	
		$\beta_0 = 0$	$\beta_1 = 1$		$\beta_0 = 0$	$\beta_1 = 1$
F06, TF06	4	-3,78***	-0,70	9	-3,06***	-0,70
F07, TF07	5	-4,24***	-2,52**	9	-3,80***	-2,30**
F07, TF0607	2	-9,37***	-2,94***	2	-9,37***	-2,94***
F08, TF08	1	-0,54	-92,95***	12	-0,47	-67,29***
Y06, I06	10	-0,89	-1,71*	9	-0,92	-1,80*
Y07, I07	10	-2,76***	-3,18***	9	-2,83***	-3,29***
Y0607, I0607	5	-2,84***	-57,53***	2	-2,54**	-55,08***
Y08, I08	0	1,63	-69,48***	0	1,63	-69,48***
12/05 - 11/06						
Zeitreihen (v_t, ψ_t)	AIK	<i>t</i> -Statistik		LB	<i>t</i> -Statistik	
		$\beta_0 = 0$	$\beta_1 = 1$		$\beta_0 = 0$	$\beta_1 = 1$
F06, TF06	0	0,65	-0,79	9	0,41	-0,61
F07, TF07	0	-1,19	-0,75	4	-0,94	-0,55
F07, TF0607	3	-3,66***	0,13	1	-4,94***	0,18
F08, TF08	1	-1,39	-10,74***	14	-0,56	-4,73***
Y06, I06	13	2,67***	-1,76*	9	2,79***	-1,71*
Y07, I07	10	-1,42	0,99	9	-1,48	1,01
Y0607, I0607	4	-5,21***	4,37***	2	-6,57***	5,41***
Y08, I08	0	7,28***	-5,67***	0	7,28***	-5,67***

*, **, *** bedeutet Ablehnung auf dem 10, 5, 1 Prozentniveau. Die um Heteroskedastizität und Autokorrelation bereinigten Kovarianzmatrizen sind nach Newey und West (1987) geschätzt. Die Anzahl der berücksichtigten Zeitdifferenzen für die Korrektur wurde entsprechend den gleichen Kriterien wie für die Einheitswurzeltests (AIK, LB) gewählt (siehe Tabellen 5.2 und 5.3). Parameter sind entsprechend Gleichung (5.6) geschätzt.

Differenz zwischen Spot- und Futurespreisen, im Zeitablauf abnehmen und schließlich im Extremfall sogar gegen null gehen, da bei Fälligkeit der Futurespreis gleich dem Spotpreis sein muss. Tabelle 5.5 zeigt daher um Autokorrelation und Heteroskedastizität bereinigte t -Statistiken, wobei die Kovarianzmatrizen nach Newey und West (1987) geschätzt wurden.

Bei Betrachtung der vollständigen Zeitperiode von Juni 2005 bis November 2006 sind die Ergebnisse erneut nicht eindeutig. Obwohl einige β_1 -Koeffizienten nahe eins liegen, sind sie trotzdem auf dem 1%-Niveau signifikant von eins verschieden. Ab Dezember 2005 scheint jedoch auch die Kurzfrisdynamik für Spot- und Terminpreise dem Cost-of-Carry-Zusammenhang zu genügen. Die meisten β_1 -Koeffizienten liegen nicht nur nahe eins, sondern sind auch nicht signifikant davon verschieden. Dies gilt wiederum erwartungsgemäß nicht für Kombinationen mit dem Future 2008. Für die Kombination Y08/I08 haben die β_1 -Koeffizienten sogar das falsche Vorzeichen. Tabelle 5.5 zeigt jedoch noch eine weitere Auffälligkeit. Entgegen der Hypothese werden für die Tests der Renditekombinationen Y06/I06 und Y0607/I0607 auch noch nach Dezember 2005 von eins signifikant verschiedene β_1 -Koeffizienten angezeigt. Für die Kombination Y07/I07 genauso wie für alle Testkombinationen von absoluten Preisen (F06/TF06, F07/TF07 und F07/TF0607) gilt das nicht. Eine mögliche Erklärung hierfür ist die relativ hohe Tick Size von Futures an der ICE/ECX von EUR 0,05. Im Oktober/November 2006 lagen die Spotpreise bei ca. EUR 10. Für Futures mit einer Restlaufzeit von einem Monat müsste somit der Zinssatz um ca. 600 Basispunkte steigen, um ein Ansteigen des Spotpreises um EUR 0,05 zu induzieren. Von der kurzen Restlaufzeit sind gerade die Renditekombinationen Y06/I06 und Y0607/I0607 betroffen, die beide den Future 2006 enthalten. Diese Tatsache könnte die kurzfristigen Dynamiken überlagern.

5.2.4 Preisführerschaft Spot- versus Terminmarkt

Im Mittel gilt zwar der Cost-of-Carry-Ansatz für die Beziehung von Spot- und Terminpreisen, kurzfristig können allerdings temporäre Abweichungen auftreten. Wie bereits erwähnt, kann ein Grund für die temporären Abweichungen die unterschiedliche Verarbeitungsgeschwindigkeit von neuen Informationen auf Spot- und Terminmärkten sein. Um die Frage zu beantworten, ob Spot- oder Terminmärkte den Preisfindungsprozess anführen und welcher Markt verlässlichere Preissignale liefert,

werden Preise von der liquidesten Börse für EUAs, der Powernext, mit Preisen für den liquidesten börsengehandelten Futureskontrakt, den Future 2006 der ICE/ECX, verglichen. Generell sind die Handelsvolumina für EUA-Futures deutlich höher als für EUAs selbst. Dies ist in vielen Finanz- und Commoditymärkten der Fall und ein erstes Indiz dafür, dass der Terminmarkt den Preisfindungsprozess anführt.

Um die Frage nach der Preisführerschaft zu beantworten, sei nachfolgend der in der Literatur üblichen Vorgehensweise gefolgt und ein vektorielles Fehlerkorrekturmodell an Spot- und Futurespreise angepasst.¹² Üblicherweise werden Spot- und Terminpreise in reifen Märkten mit einer sehr hohen Datenfrequenz getestet. So verwendet z. B. Theissen (2005) Preisdaten mit Intervallgrößen von 15 Sekunden. Gerade in noch jungen Märkten wie dem EU EHS kann allerdings eine Preisführerschaft oft auch auf täglicher Basis festgestellt werden, wie z. B. Kavussanos und Nomikos (2003) für den Terminmarkt im Frachtgeschäft zeigen.

Beobachtete logarithmierte Preise für EUAs sowie logarithmierte Futurespreise seien mit s_t und s_t^F bezeichnet. Mit $\hat{s}_t = (s_t, s_t^F)$ sei das vektorielle Fehlerkorrekturmodell (VECM – Vector Error Correction Model) der Ordnung l definiert als

$$\Delta \hat{s}_t = \bar{\alpha} + \Pi \hat{s}_{t-1} + \sum_{i=1}^{l-1} \Phi_i \Delta \hat{s}_{t-i} + \bar{\varepsilon}_t. \quad (5.7)$$

Sowohl Π als auch Φ_i sind dabei 2x2 Koeffizientenmatrizen und $\bar{\alpha}$ ein Vektor mit Konstanten. Die Residuen $\bar{\varepsilon}_t$ werden als normalverteilt angenommen. Problematisch hierbei ist, dass die Kointegrationsbeziehung zwischen Spot- und Terminpreisen im Zeitablauf auch aus theoretischer Sicht variiert. Dies liegt daran, dass sich Spot- und Terminpreise nach Gleichung (5.1) auf Grund des Zinseffekts unterscheiden, bei kleiner werdender Restlaufzeit allerdings annähern und zum Fälligkeitstermin identisch sein müssen. Zwei Möglichkeiten, diese Problematik zu umgehen, sind die Verwendung von aufgezinnten Spotpreisen oder die Verwendung eines zeitabhängigen Kointegrationsvektors. Nachfolgend wird das VECM mit aufgezinnten Spotpreisen und beobachteten Terminpreisen geschätzt. Ein Fehlerkorrekturmodell ist notwendig, da bereits gezeigt wurde, dass aufgezinnte Spotpreise und beobachtete Terminpreise im EU EHS kointegriert sind.¹³

¹²Vgl. z. B. Kavussanos und Nomikos (2003) und Theissen (2005).

¹³Ohne Kointegration könnten auch einfachere Modelle, wie z. B. vektorielle ARIMA-Modelle, verwendet werden. Zum Konzept der Kointegration vgl. z. B. Engle und Granger (1987).

\hat{s}'_t sei somit durch $\tilde{s}'_t = (s_t^{TF}, s_t^F)$ ersetzt, wobei für $s_t^{TF} = e^{r(T-t)}s_t$ gelte, r den risikolosen Zinssatz und $(T-t)$ die Restlaufzeit des Futures bezeichnet. s_t^{TF} entspricht somit dem theoretisch korrekten Terminpreis.

Die Anzahl der in das VECM aufzunehmenden logarithmischen verzögerten Renditen $\Delta\tilde{s}_{t-i} = \tilde{s}_{t-i} - \tilde{s}_{t-i-1}$ sei mit $k = l - 1$ bezeichnet. Wird nun angenommen, dass theoretische Terminpreise s_t^{TF} im langfristigen Gleichgewicht den beobachteten Futurespreisen s_t^F entsprechen, kann der Kointegrationsvektor für \tilde{s}'_t mit $\bar{\theta}' = (1, -1)$ definiert werden und das VECM nach Gleichung (5.7) weist einen Kointegrationsrang von eins auf. Mit $\bar{\delta}' = (\delta^{TF}, \delta^F)$ kann Π somit als $\Pi = \bar{\delta}\bar{\theta}'$ dargestellt werden.¹⁴

Mit $\Phi_i = \begin{pmatrix} \beta_i^{TF} & \gamma_i^{TF} \\ \gamma_i^F & \beta_i^F \end{pmatrix}$ kann Gleichung (5.7) ausmultipliziert werden zu

$$\Delta s_t^{TF} = \alpha^{TF} + \sum_{i=1}^k \beta_i^{TF} \Delta s_{t-i}^{TF} + \sum_{i=1}^k \gamma_i^{TF} \Delta s_{t-i}^F + \delta^{TF}(s_{t-1}^{TF} - s_{t-1}^F) + \varepsilon_t^{TF} \quad (5.8)$$

$$\Delta s_t^F = \alpha^F + \sum_{i=1}^k \beta_i^F \Delta s_{t-i}^F + \sum_{i=1}^k \gamma_i^F \Delta s_{t-i}^{TF} + \delta^F(s_{t-1}^{TF} - s_{t-1}^F) + \varepsilon_t^F.$$

Letztere Formulierung hat den Vorteil, dass mittels der einfachen Kleinste-Quadrate-Methode sowohl konsistente als auch effiziente Koeffizientenschätzwerte folgen.¹⁵ Tabelle 5.6 präsentiert Schätzergebnisse für Gleichung (5.8), wobei $k = 5$ verzögerte Renditen berücksichtigt wurden.¹⁶ Bezüglich der Autokorrelationen in den Residuen deuten die Informationskriterien von Akaike und Bayes darauf hin, dass mehr als fünf verzögerte Renditen notwendig sein könnten. Daher werden in Tabelle 5.7 auch Schätzergebnisse für $k = 20$ verzögerte Renditen präsentiert. Qualitativ sind die Ergebnisse ähnlich, weshalb nur der Fall für $k = 5$ ausführlich diskutiert wird. Die Tabellen 5.6 und 5.7 zeigen im oberen Teil Koeffizientenschätzwerte und Signifikanzen für das VECM sowie im unteren Teil zusätzliche Statistiken, welche helfen, den Anteil am Preisfindungsprozess von Spot- und Terminmarkt zu beurteilen. Der getestete Zeitraum umfasst erneut den 24. Juni 2005 bis zum 15. November 2006.

Die unabhängigen Variablen haben wesentlich mehr Erklärungskraft für die Renditen aus theoretischen Terminpreisen als für die Futuresrenditen. Dies zeigt sich in

¹⁴Vgl. Engle und Granger (1987), S. 255f.

¹⁵Vgl. z. B. Kavussanos und Nomikos (2003). Die geschätzten Kovarianzmatrizen für die Koeffizienten müssen allerdings noch um Autokorrelation und Heteroskedastizität korrigiert werden. Die Korrektur wird nach Newey und West (1987) durchgeführt.

¹⁶Im EU EHS sind 5 Handelstage pro Woche üblich.

Tabelle 5.6: Schätzergebnisse für vektorielles Fehlerkorrekturmodell mit 5 Zeitdifferenzen.

Theoretischer Terminpreis – Δs_t^{TF}		Beobachteter Futurespreis – Δs_t^F	
α^{TF}	-0,01	α^F	-0,04
δ^{TF}	-0,15	δ^F	-0,03
β_1^{TF}	-0,88 ***	γ_1^F	-0,21
β_2^{TF}	-0,94 ***	γ_2^F	-0,39
β_3^{TF}	-1,00 ***	γ_3^F	-0,53 **
β_4^{TF}	-0,57 ***	γ_4^F	-0,23
β_5^{TF}	-0,09	γ_5^F	-0,02
γ_1^{TF}	1,15 ***	β_1^F	0,45
γ_2^{TF}	0,93 ***	β_2^F	0,32
γ_3^{TF}	1,12 ***	β_3^F	0,68 **
γ_4^{TF}	0,67 ***	β_4^F	0,31
γ_5^{TF}	0,07	β_5^F	-0,07
R^2	0,45	R^2	0,16
F-Stat.	18,70 ***	F-Stat.	2,01 *
CFW	-0,27	CFW	1,27

*, **, *** bedeutet Signifikanz auf dem 10, 5, 1 Prozentniveau. Die Tabelle zeigt geschätzte Koeffizienten aus dem vektoriellen Fehlerkorrekturmodell nach Gleichung (5.8). Die Kovarianzmatrizen sind konsistent nach Newey und West (1987) geschätzt. Neben dem Bestimmtheitsmaß R^2 werden zwei weitere Maße für die Preisführerschaft präsentiert. Die F-Statistik testet die Nullhypothese, dass die Koeffizienten für die verzögerten Differenzen des jeweils anderen Marktes gemeinsam null sind. CFW steht für Common Factor Weight. Bei der Schätzung des Modells wurden 5 verzögerte Differenzen berücksichtigt. Der getestete Zeitraum umfasst den 24. Juni 2005 bis zum 15. November 2006.

Tabelle 5.7: Schätzergebnisse für vektorielles Fehlerkorrekturmodell mit 20 Zeitdifferenzen.

Theoretischer Terminpreis – Δs_t^{TF}		Beobachteter Futurespreis – Δs_t^F	
α^{TF}	-0,02	α^F	-0,04
δ^{TF}	-0,06	δ^F	0,01
β_1^{TF}	-0,99 ***	γ_1^F	-0,27
β_2^{TF}	-1,31 ***	γ_2^F	-0,77 **
β_3^{TF}	-1,25 ***	γ_3^F	-0,74 ***
β_4^{TF}	-0,88 **	γ_4^F	-0,44 *
β_5^{TF}	-0,48 *	γ_5^F	-0,23
γ_1^{TF}	1,34 ***	β_1^F	0,58 **
γ_2^{TF}	1,16 ***	β_2^F	0,53
γ_3^{TF}	1,52 ***	β_3^F	1,04 ***
γ_4^{TF}	0,91 **	β_4^F	0,48 **
γ_5^{TF}	0,41	β_5^F	0,11
R^2	0,67	R^2	0,45
F-Stat.	13,06 ***	F-Stat.	6,24 ***
CFW	0,18	CFW	0,82

*, **, *** bedeutet Signifikanz auf dem 10, 5, 1 Prozentniveau. Die Tabelle zeigt geschätzte Koeffizienten aus dem vektoriellem Fehlerkorrekturmodell nach Gleichung (5.8). Die Kovarianzmatrizen sind konsistent nach Newey und West (1987) geschätzt. Neben dem Bestimmtheitsmaß R^2 werden zwei weitere Maße für die Preisführerschaft präsentiert. Die F-Statistik testet die Nullhypothese, dass die Koeffizienten für die verzögerten Differenzen des jeweils anderen Marktes gemeinsam null sind. CFW steht für Common Factor Weight. Bei der Schätzung des Modells wurden 20 verzögerte Differenzen berücksichtigt. Der getestete Zeitraum umfasst den 24. Juni 2005 bis zum 15. November 2006.

einem Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,45 für die abhängige Variable Δs_t^{TF} im Vergleich zu einem R^2 von lediglich 0,16 für Δs_t^F . Dies spricht dafür, dass der Terminmarkt neue Preisinformationen schneller verarbeitet als der Spotmarkt. Mittels eines F-Tests auf gemeinsame Signifikanz kann geprüft werden, ob die vom Spotmarkt abgeleiteten verzögerte Renditen Einfluss auf Futuresrenditen haben und umgekehrt. Auch hier zeigt sich, dass die Koeffizienten aus dem Terminmarkt wesentlich mehr Erklärungskraft aufweisen als die aus dem Spotmarkt abgeleiteten Koeffizienten, wie an einem F-Wert von 18,70 für Δs_t^{TF} im Vergleich zu 2,01 für Δs_t^F erkennbar. Ein drittes Maß ist das so genannte Common Factor Weight (CFW), welches als direktes Maß für den Beitrag zur Preisführerschaft interpretiert werden kann.¹⁷ Es ist definiert als

$$CFW^{TF} = \frac{\delta^F}{\delta^F - \delta^{TF}}, \quad CFW^F = \frac{-\delta^{TF}}{\delta^F - \delta^{TF}}. \quad (5.9)$$

Die Koeffizienten δ^{TF} und δ^F des Fehlerkorrekturterms ($s_{t-1}^{TF} - s_{t-1}^F$) aus Gleichung (5.8) bestimmen den permanenten Einfluss der Änderung einer der Variablen auf das ganze System. Nach Gleichung (5.9) bedeutet ein CFW von 1, dass ausschließlich dieser Markt zur Preisfindung beiträgt. Ein CFW von 0,5 bedeutet, dass beide Märkte gleich zur Preisfindung beitragen.¹⁸ Tabelle 5.6 zeigt, dass für den Terminmarkt (Δs_t^F) das CFW über 1 liegt, während es für den Spotmarkt (Δs_t^{TF}) unter 1 liegt. Der Grund wird nach einem Blick auf die Fehlerkorrekturkoeffizienten δ^{TF} und δ^F klar. Wenn der vergangene beobachtete Futurespreis über dem theoretischen Terminpreis liegt, also $(s_{t-1}^{TF} - s_{t-1}^F) < 0$, so ist zu erwarten, dass die aktuelle Rendite des beobachteten Futurespreis s_{t-1}^F negativ und die Rendite des theoretischen Terminpreises s_{t-1}^{TF} positiv ist. Damit würde das Gleichgewicht wiederhergestellt. Dies würde ein positives δ^F und ein negatives δ^{TF} bedeuten. Tatsächlich ist der Koeffizient δ^F mit -0,03 negativ. Im Ergebnis muss δ^{TF} mit -0,15 noch negativer sein, um dies zu kompensieren. Der Spotmarkt bewegt sich somit in die falsche Richtung und der Terminmarkt muss entsprechend überkompensieren. Tabelle 5.7 zeigt, dass auch für $k = 20$ berücksichtigte verzögerte Renditen die Ergebnisse qualitativ gleich sind. Lediglich die $CFWs$ sind jetzt beide positiv, zeigen aber immer noch eindeutig in Richtung Terminmarkt.

¹⁷Vgl. z. B. Theissen (2005).

¹⁸Eine formale Begründung für das Maß CFW findet sich z. B. in Theissen (2002).

Alle diskutierten Maße zeigen klar an, dass im EU EHS wie auch in vielen anderen Finanz- und Commoditymärkten der Termin- im Vergleich zum Spotmarkt den Preisfindungsprozess anführt. Neben der höheren Liquidität ist ein weiterer möglicher Grund für die Preisführerschaft, dass Unternehmen ohne eigene EUAs nur über den Terminmarkt Short-Positionen eingehen können. Unternehmen, die zeitnah verlässliche Preissignale suchen, sollten sich immer zuerst am Terminmarkt orientieren.

5.2.5 Fazit: Bewertung von linearen CO₂-Derivaten

Obwohl das EU EHS noch relativ jung ist und darüber hinaus Transaktionskosten eine sofortige Anpassung von Spot- und Terminpreisen erschweren, sprechen die empirischen Tests eine überraschend klare Sprache. Der Terminmarkt scheint bereits gut zu funktionieren und die Indizien sprechen dafür, dass der Cost-of-Carry-Zusammenhang nach den Gleichungen (5.1) und (5.2) die Beziehungen zwischen Spot- und Terminpreisen hinreichend gut beschreibt. Selbst während der sehr volatilen Marktphase April/Mai 2006 blieb die Gleichgewichtsbeziehung prinzipiell stabil, auch wenn die Schwankungen größer waren.

Im Gegensatz dazu können Terminpreise für die 2. Handelsperiode ab 2008 nicht allein durch den Zinssatz und den momentanen Spotpreis erklärt werden. Zu Beginn des EU EHS waren die Preise für beide Handelsperioden zwar noch sehr stark korreliert, wie z. B. in Abbildung 5.2 zu sehen. Je näher das Jahr 2008 rückt, desto besser werden allerdings die Informationen zur 2. Handelsperiode und desto unabhängiger bewegt sich der Futurespreis 2008 vom EUA-Preis selbst. Allerdings sollte die Beziehung von Futures untereinander, bei denen beide eine Fälligkeit in der nächsten Handelsperiode besitzen, wiederum durch den Zinssatz erklärt werden können. Denn zwischen z. B. einem Future 2008 und einem Future 2009 muss die No-Arbitrage-Beziehung erneut gelten, da sie sich auf dasselbe (noch nicht gehandelte) Underlying beziehen und dieses von 2008 nach 2009 auch wieder gelagert werden kann.

Wie aus den Abbildungen 5.3 und 5.4 erkennbar, gab es vor Ende 2005 offensichtlich Arbitragemöglichkeiten im EU EHS, die nach Fälligkeit der ersten Futures im Dezember 2005 wieder verschwanden. Wer könnte davon profitiert haben? Vor Dezember 2005 war der beobachtete Futurespreis unter dem theoretisch aus dem Spotpreis berechneten Terminpreis. Ein Verkauf von EUAs bei gleichzeitigem Eingehen einer

entsprechenden Position auf dem Terminmarkt sowie zwischenzeitlicher Investition des Verkaufserlöses zum risikolosen Zinssatz hätte einen risikolosen Gewinn zur Folge gehabt. Um dies durchzuführen, hätte man allerdings EUAs im Bestand gebraucht, womit nur CO₂-regulierten Unternehmen diese Option offen stand. Dies könnte eine Erklärung dafür sein, warum die Arbitragemöglichkeit so lange Bestand hatte. Vielen CO₂-regulierten Unternehmen fehlte das Know-how oder das Vertrauen zu Terminmärkten. Möglicherweise fingen sie erst dann an, daran zu glauben, dass der Terminmarkt funktioniert und für börsengehandelte Futures kein Lieferrisiko besteht, als die ersten Futures fällig und die zu Grunde liegenden EUAs tatsächlich geliefert wurden. Daraufhin verschwand die Arbitragemöglichkeit.

Abbildungen 5.3 und 5.4 deuten auch an, dass sich der Gleichgewichtsfehler Ende 2006 wieder von null zu entfernen scheint.¹⁹ Einerseits kann das wiederum am noch unreifen Markt liegen, andererseits könnte hier auch die bereits erwähnte hohe Tick Size von EUR 0,05 eine Rolle spielen. Dies gilt insbesondere für den Future 2006, da dieser nur noch wenige Wochen von seiner Fälligkeit entfernt war. Die Abweichungen in Abbildung 5.3 zwischen theoretischem Terminpreis 2006 und beobachtetem Futurespreis 2006 am Ende des Jahres 2006 entsprechen in ihrer absoluten Größe ungefähr der Tick Size. Dies mag ein Grund sein, warum im März 2007 die Tick Size für Futures der ICE/ECX von EUR 0,05 auf EUR 0,01 gesenkt wurde.²⁰

5.3 Bewertung von nichtlinearen CO₂-Derivaten

Die korrekte Bewertung von nichtlinearen CO₂-Derivaten ist nicht nur für Teilnehmer am OTC- und Börsenhandel von CO₂-Optionen wichtig. Ein Bewertungsmodell ist darüber hinaus notwendig, um Optionalitäten richtig einschätzen zu können, die z. B. in CO₂-Vermeidungsprojekten oder beim Bau von Kraftwerken vorhanden sind. Im Gegensatz zu Forwards und Futures waren für nichtlineare CO₂-Derivate nach dem Stand von Ende 2006 allerdings noch keine Preisdaten verfügbar, die eine empirische Überprüfung von potenziellen Bewertungsmodellen ermöglichen würden. Daher soll nachfolgend zunächst diskutiert werden, wie nichtlineare CO₂-Derivate theoretisch bewertet werden können. Am Beispiel von europäischen Kaufoptionen

¹⁹Auf Grund der geringen Restlaufzeit des Futures 2006 ist dieser Effekt in Abbildung 5.1 nicht zu erkennen.

²⁰Vgl. ICE Futures (2007).

wird dann auf Basis der im vorigen Kapitel kalibrierten Prozesse gezeigt, welche Größenordnung das Modellrisiko bei der Bewertung annehmen kann.

5.3.1 Risikoneutrale Bewertung

Aus Bewertungssicht ist die Situation in der 1. Handelsperiode vergleichbar zum Aktienmarkt. EUAs werden kontinuierlich gehandelt und sind verlustfrei lagerbar. Vor ihrer Einreichung fallen keine Zahlungen an, am ähnlichsten sind sie also den dividendenlosen Aktien. Investoren können durch den Kauf von EUAs jederzeit Long-Positionen eingehen. Institutionalisierte Leerverkaufsmöglichkeiten gibt es momentan zwar noch nicht, neben dem Verkauf von EUAs aus dem Bestand können Short-Positionen allerdings auch über den bereits existierenden Terminhandel eingenommen werden. Basierend auf der Diskussion der Markteffizienz und dem bereits gut funktionierenden Terminmarkt sei weiter angenommen, dass das EU EHS arbitragefrei ist. Werden EUA-Preise nur von einer Risikoquelle beeinflusst, ist der Markt vollständig und Derivate auf EUAs können durch eine dynamische Handelsstrategie dupliziert werden, wobei das Duplikationsportfolio aus EUA und risikolosem Instrument gebildet wird. Die Existenz eines eindeutigen risikoneutralen Wahrscheinlichkeitsmaßes ist gewährleistet.²¹ Bei mehr als einer Risikoquelle existiert auf Grund der Arbitragefreiheit zwar immer noch mindestens ein risikoneutrales Wahrscheinlichkeitsmaß, dieses ist aber nicht länger eindeutig. Die 1. Handelsperiode erfüllt somit die notwendigen Voraussetzungen für die Anwendung des Standardrahmens der risikoneutralen Bewertung. Die Bewertung von CO₂-Derivaten erfolgt relativ zum Wert der EUAs, es müssen lediglich die unter dem realen Maß in Abschnitt 4.4.3 kalibrierten Prozesse für EUA-Preise in ein risikoneutrales Maß überführt werden.

Für nichtlineare Derivate auf EUAs mit Fälligkeit in der 2. Handelsperiode erscheint die Bewertung auf den ersten Blick schwieriger, da entsprechende EUAs noch nicht gehandelt werden. Eine Bewertung relativ zu EUAs scheidet somit aus. Allerdings werden für die 2. Handelsperiode bereits relativ liquide Forwards und Futures auf EUAs gehandelt. Wie folgendes Gedankenexperiment zeigt, kann die Bewertung somit analog zur 1. Handelsperiode erfolgen, mit dem Unterschied, dass die Bewertung relativ zum Terminpreis erfolgt: Eine europäische Kaufoption wird auf die physische

²¹Von weiteren Marktfraktionen, wie z. B. Transaktionskosten und Steuern, wird hier abgesehen. Eine ausführliche Einführung zu risikoneutralen Bewertungsmethoden bietet z. B. Neftci (2000).

Lieferung eines EUAs im Dezember des Jahres 2008 geschrieben. Statt dieser Option sei eine alternative Kaufoption auf ein Portfolio betrachtet, welches zum einen aus einem Terminkontrakt auf ein EUA mit physischer Lieferung und der gleichen Laufzeit wie die Option besteht und zum anderen eine risikolose Geldanlage beinhaltet, die nach Berücksichtigung des Zinseffektes am Fälligkeitstag der Option eine Rückzahlung in Höhe des heutigen Terminpreises liefert. Ein Investor muss indifferent zwischen diesen zwei Kaufoptionen sein, da das Ergebnis in allen Umweltzuständen identisch ist. Für die 2. Handelsperiode kann das Duplikationsportfolio also aus einem Terminkontrakt auf EUAs und dem risikolosen Instrument gebildet werden.

Ein Terminkontrakt mit der gewünschten Laufzeit kann immer aus den am Markt gehandelten Terminkontrakten für die 2. Handelsperiode synthetisch erzeugt werden. Der Wert des Portfolios aus Terminkontrakt und risikoloser Geldanlage ist der diskontierte Terminpreis und wurde in Abschnitt 4.4.4 als synthetischer Spotpreis bezeichnet. Da dieses Portfolio gehandelt und lagerbar ist, gelten bezüglich der risikoneutralen Bewertungsmethode die gleichen Aussagen wie für die 1. Handelsperiode und auch in diesem Fall können die unter dem realen Maß in Abschnitt 4.4.4 kalibrierten Prozesse ins risikoneutrale Maß überführt werden, um Derivate auf EUAs für die 2. Handelsperiode zu bewerten.²²

5.3.2 Überführung der Prozesse ins risikoneutrale Maß

Um nachfolgend Optionen bewerten zu können, werden zunächst die risikoneutralen Versionen der in Abschnitt 4.4 kalibrierten möglichen CO₂-Preisprozesse vorgestellt. Für die Diskussion der Optionsbewertung wird die erste Handelsperiode nicht mehr betrachtet. Die wenigen von der ICE/ECX veröffentlichten Optionsgeschäfte zeigen, dass von Oktober 2006 bis Ende Januar 2007 dort 15 Optionen gehandelt wurden, von denen 13 eine Laufzeit bis in die zweite Handelsperiode hinein hatten.²³

²²Ist das Underlying eines Derivats ein Terminkontrakt, wie z. B. für die in der Tabelle 3.6 beschriebenen Optionen, ist es sinnvoll, direkt die Dynamik des Terminpreises zur Bewertung des Derivats heranzuziehen. Da der synthetische Spotpreis gerade als mit dem risikolosen Zinssatz diskontierter Terminpreis definiert ist, unterscheiden sich die Dynamiken von synthetischem Spotpreis und Terminpreis allerdings lediglich proportional zum Zinsfaktor.

²³Vgl. „<http://www.europeanclimateexchange.com>“. Die 15 Handelsgeschäfte umfassen auch Verträge mit OTC-Clearing (von den 15 Handelsgeschäften waren nur bei drei Optionen Strikepreis und Optionsprämie angegeben). Zudem wurden im Januar 2007 an der ICE/ECX bereits mehr Futureskontrakte für die zweite Handelsperiode als für die erste Handelsperiode gehandelt, vgl. European Climate Exchange (2007a).

Die geometrisch Brownsche Bewegung hat nur eine Risikoquelle. Bei Annahme dieses Prozesses kann der betrachtete Markt aus synthetischem Spotpreis und risikolosem Instrument daher als vollständig angesehen werden und die Eindeutigkeit des risikoneutralen Wahrscheinlichkeitsmaßes ist gegeben. Die risikoneutrale Formulierung der geometrisch Brownschen Bewegung unter diesen Voraussetzungen ist definiert als

$$ds_t = \left(r - \frac{1}{2}\sigma^2\right)dt + \sigma dW_t. \quad (5.10)$$

Ebenso wie die geometrisch Brownsche Bewegung hat auch der Heston-GARCH-Prozess nur eine Risikoquelle und demzufolge ebenfalls ein eindeutig bestimmtes risikoneutrales Maß. Wie in Heston und Nandi (2000) gezeigt, hat die risikoneutrale Version des HG-Prozesses die gleiche Form wie unter dem realen Maß (siehe Gleichung (4.34)), wobei $\hat{\lambda}$ durch $-0,5$ und γ durch $\gamma + \hat{\lambda} + 0,5$ ersetzt werden muss. Sowohl für den JD- als auch den RS-Prozess existieren neben dem Diffusionsrisiko weitere Risikoquellen. Im Fall des JD-Prozesses sind sowohl Zeitpunkt als auch Höhe von Sprüngen unsicher, im Fall des RS-Prozesses sind die Regimewechsel nicht vorhersehbar. In beiden Fällen ist der Markt nicht vollständig, da nicht für alle diese Risiken gehandelte Underlyings existieren. Als Konsequenz ist das risikoneutrale Maß nicht eindeutig. Um ein risikoneutrales Maß auszuwählen, sei gemäß Merton (1976) für den JD-Prozess die Risikoprämie für das Sprungrisiko mit null angenommen.²⁴ Daraus folgt für den Prozess unter dem risikoneutralen Maß

$$ds_t = \left(r - \frac{1}{2}\sigma^2 - m\lambda\right)dt + \sigma dW_t + Y_t dN_t, \quad (5.11)$$

wobei

$$m = E_t \left[e^{Y_t} - 1 \right] = e^{\mu_2 + \frac{1}{2}\delta^2} - 1.$$

Der Term $m\lambda$ wird benötigt, um die durch die Sprungkomponente induzierte Drift zu kompensieren. Diese Annahme bezüglich der Risikoprämie für das Sprungrisiko hat den Vorteil, dass geschlossene Lösungen für europäische Optionen bekannt sind. Entsprechend sei auch die Risikoprämie für die unvorhersehbaren Wechsel der Re-

²⁴Das heißt, dass sowohl für den Sprungzeitpunkt als auch für die Sprunghöhe Risikoprämien von null angenommen werden.

gimes mit null angenommen. Eine weitere Annahme ist bezüglich der Driftparameter in den beiden Regimes des Prozesses erforderlich, da unter dem risikoneutralen Maß die erwartete Drift dem risikolosen Zinssatz entsprechen muss. Es sei Gleichung (4.35) für den RS-Prozess neu formuliert als

$$s_t = s_{t-1} + \tilde{\mu}_t + \tilde{\sigma}_t \varepsilon_t, \quad (5.12)$$

wobei

$$\tilde{\mu}_t = (\tilde{\mu}_1 - \frac{1}{2}\tilde{\sigma}_1^2) + (\tilde{\mu}_2 - \frac{1}{2}\tilde{\sigma}_2^2)\tilde{R}_t,$$

$$\tilde{\sigma}_t = \sqrt{\tilde{\sigma}_1^2 + \tilde{\sigma}_2^2\tilde{R}_t},$$

$$\tilde{R}_t = R_t - 1, \quad R_t \in \{1, 2\}.$$

Damit Gleichungen (4.35) und (5.12) identisch sind, muss gelten

$$\tilde{\mu}_1 = \hat{\mu}_1 + \frac{1}{2}\sigma_1^2, \quad \tilde{\mu}_2 = (\hat{\mu}_2 + \frac{1}{2}\sigma_2^2) - \tilde{\mu}_1,$$

$$\tilde{\sigma}_1 = \sigma_1, \quad \tilde{\sigma}_2 = \sqrt{\sigma_2^2 - \sigma_1^2}.$$

Wie in Chourdakis und Elias (2001) gezeigt, genügt es in diesem Fall für die risikoneutrale Bewertung, $\tilde{\mu}_1$ durch

$$\tilde{\mu}_1^* = r - \frac{1}{\tau} \ln \left[\sum_{\zeta=0}^{\tau} e^{\zeta \tilde{\mu}_2} \Pr [Z_{t,\tau} = \zeta] \right] \quad (5.13)$$

zu ersetzen. Dabei sei mit τ die Laufzeit des zu bewertenden Derivats bezeichnet und mit $Z_{t,\tau}$ die Aufenthaltsdauer im Regime $R_t = 2$, was der Summe von \tilde{R}_t über die Laufzeit τ entspricht. $\Pr[Z_{t,\tau} = \zeta]$ bezeichne die Wahrscheinlichkeit, dass die Aufenthaltsdauer $Z_{t,\tau}$ gleich ζ ist. Die übrigen Parameter ändern sich nicht. Das Ergebnis dieser Transformation ist, dass die erwartete Rendite gemäß dem RS-Prozess über die Laufzeit des Derivats gleich dem risikolosen Zinssatz ist. Es sind auch andere risikoneutrale Varianten denkbar, allerdings hat diese Version den Vorteil, dass eine geschlossene Lösung für den Wert europäischer Optionen existiert und zudem die generelle Dynamik des RS-Prozesses, also unterschiedliche Drift und Volatilität in den Regimes, auch unter dem risikoneutralen Maß erhalten bleibt.

Mit den in diesem Abschnitt vorgestellten risikoneutralen Varianten der Prozesse und den in Tabelle 4.12 gezeigten Parameterschätzern lassen sich nun prinzipiell alle Derivate auf EUAs für die zweite Handelsperiode bewerten. Abbildung 5.5 zeigt für die diskutierten Prozessvarianten beispielhaft bedingte Wahrscheinlichkeitsdichten unter dem risikoneutralen Maß. Die Dichten beziehen sich auf 3 Monate in der Zukunft liegende Preise, wenn der heutige Preis mit EUR 20 angenommen wird. Die Dichtefunktionen unterscheiden sich sichtbar für die kalibrierten Prozesse GBB (dicke durchgezogene schwarze Linie), JD (durchgezogene graue Linie), HG (dünne durchgezogene schwarze Linie) und RS (dünne gestrichelte Linie). Wie erwähnt sind für den JD- und RS-Prozess auch andere Annahmen bezüglich der risikoneutralen Maße möglich.²⁵ Um die Auswirkungen zu demonstrieren, zeigt Abbildung 5.5 zwei weitere Dichtefunktionen. Die gestrichelte graue Linie zeigt die Dichte für den JD-Prozess, wenn angenommen wird, dass die Risikoprämie für das Sprungrisiko nicht null ist.²⁶ Die dünne gepunktete Linie zeigt die Dichte für den RS-Prozess, wenn unter dem risikoneutralen Maß die Drift in beiden Regimes einfach gleich dem risikolosen Zinssatz gesetzt wird.

Da offensichtlich die Dichtefunktionen teilweise deutlich divergieren, werden sich als Folge auch eventuelle Optionspreise unterscheiden. Um ein Gefühl für die Größenordnung dieses Effekts zu bekommen, werden nachfolgend theoretische Optionspreise genauer betrachtet.

5.3.3 Bewertung am Beispiel von europäischen Kaufoptionen

Nachfolgend sollen die Bewertungsunterschiede anhand von europäischen Kaufoptionen demonstriert werden. Prinzipiell können alle potenziellen CO₂-Derivate bewertet werden, indem unter dem risikoneutralen Maß der Erwartungswert gebildet und mit dem risikolosen Zinssatz diskontiert wird. Dies kann z. B. über eine Monte-

²⁵Ohne liquide gehandelte Optionen oder ähnliche Derivate lassen sich keine Annahmen bezüglich der risikoneutralen Maße falsifizieren. Auf anderen Märkten, wie z. B. dem Aktienmarkt, existieren allerdings genügend gehandelte Optionen, um ausführliche Studien zu Risikoprämien zu ermöglichen. So zeigen z. B. Andersen und Andreasen (2000), Pan (2002) und Eraker (2004), dass für den S&P 500 Index signifikante Risikoprämien nicht nur für das Diffusionsrisiko, sondern auch für Sprungrisiken oder stochastische Volatilität existieren.

²⁶In diesem Beispiel wird die Sprungintensität unter dem risikoneutralen Maß um 20% gegenüber dem realen Maß erhöht.

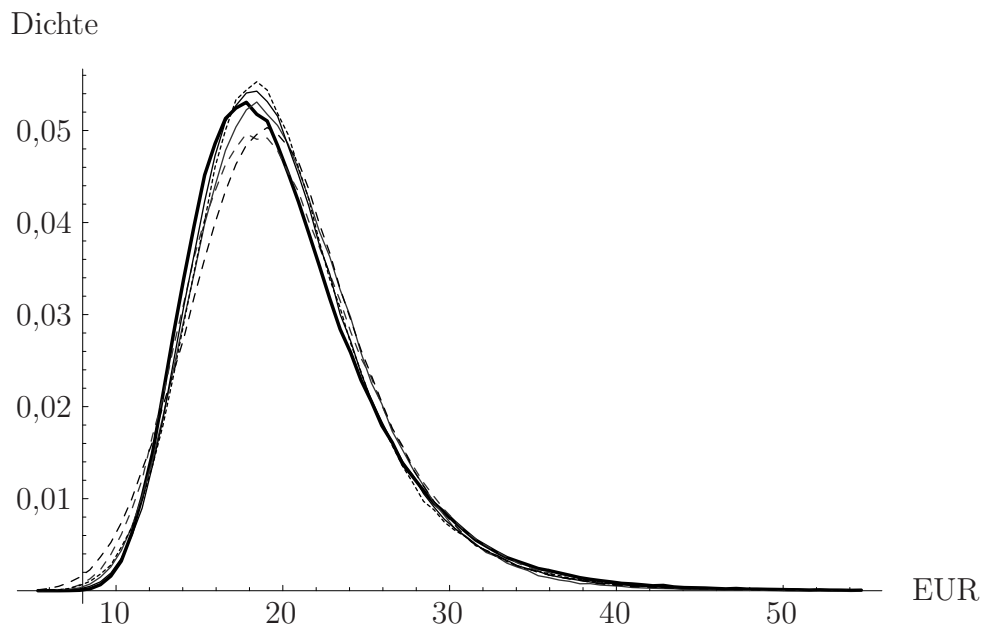


Abbildung 5.5: Beispiel für bedingte Wahrscheinlichkeitsdichten unter dem risikoneutralen Maß für die 2. Handelsperiode. Die Abbildung zeigt risikoneutrale bedingte Wahrscheinlichkeitsdichten für verschiedene Preisprozesse nach der Kalibrierung an synthetische Spotpreise der zweiten Handelsperiode (für Parameterwerte siehe Tabelle 4.12). Das gezeigte Beispiel illustriert die Dichtefunktion für Preise 3 Monate in der Zukunft unter der Annahme, dass der heutige Preis bei EUR 20 liegt. Zur Erzeugung der Dichtefunktionen wurde eine Monte-Carlo-Simulation mit 500.000 Pfaden durchgeführt. Dicke durchgezogene schwarze Linie: GBB, graue durchgezogene/gestrichelte Linie: JD I/II, dünne durchgezogene schwarze Linie: HG, dünne gestrichelte/gedoppelte schwarze Linie: RS I/II. Der Zusatz I/II bezieht sich auf unterschiedliche Annahmen bezüglich des Übergangs vom realen ins risikoneutrale Maß (siehe Beschreibung im Text).

Carlo-Simulation geschehen. Für die vier im Rahmen der zweiten Handelsperiode diskutierten Prozesse GBB, JD, HG und RS sind auch geschlossene Lösungen für europäische Optionen bekannt.²⁷

Soweit nicht anders erwähnt, werden nachfolgend die Parameterwerte Tabelle 4.12 entnommen und in die vorgestellten risikoneutralen Varianten der stochastischen Prozesse eingesetzt. Für den HG-Prozess ist zudem ein Startwert für die aktuelle Volatilität $\sqrt{h_t}$ erforderlich. Dieser wird jeweils gleich der langfristigen Volatilität des HG-Prozesses $\theta = 0,03229$ gesetzt. Der Effekt der aktuellen Volatilität $\sqrt{h_t}$ auf

²⁷Vgl. Black und Scholes (1973) für die GBB, Merton (1976) für den JD-, Heston und Nandi (2000) für den HG- und Chourdakis und Elias (2001) für den RS-Prozess. Erneut werden die Risikoprämien für das Sprungrisiko im JD-Prozess mit null angenommen und die risikoneutrale Version des RS-Prozesses nach Chourdakis und Elias (2001) verwendet.

den Optionspreis nimmt mit zunehmender Laufzeit der Option ab. Im Fall des RS-Prozesses hängt der Wert der Option zudem davon ab, in welchem Regime sich der Markt aktuell befindet. Für die Bewertung der Option können allerdings auch Wahrscheinlichkeiten dafür angegeben werden, in welchem Regime sich der Markt gerade befindet. Demzufolge wird nachfolgend die Wahrscheinlichkeit dafür, im ruhigen Regime 1 zu sein, gleich der langfristigen Aufenthaltswahrscheinlichkeit $\pi_1 = 86,8$ Prozent gesetzt. Auch der Effekt dieser Annahme nimmt mit zunehmender Laufzeit der Option ab.

Um einen Eindruck der Bedeutung der Wahl des stochastischen Prozesses zu erhalten, zeigt Tabelle 5.8 beispielhaft Preise für europäische Kaufoptionen, die mit Hilfe der in diesem Abschnitt diskutierten risikoneutralen Bewertungsmethode berechnet wurden. Der aktuelle CO₂-Preis wird dabei mit EUR 20 angenommen. Für jeden der Prozesse GBB, JD, HG und RS wird eine Auswahl an Strikepreisen und Laufzeiten präsentiert. Laufzeiten von 1 - 3 Monaten und 1 - 3 Jahren wurden gewählt, um den an der ICE/ECX seit Oktober 2006 gehandelten Optionen zu ähneln.

Offensichtlich unterscheiden sich die Optionspreise je nach Strikepreis und Laufzeit teilweise deutlich, abhängig vom angenommenen Preisprozess. In diesem Beispiel ist der Wert für den JD-Prozess in der Regel am kleinsten und entweder für die GBB oder den RS-Prozess am größten. Die beiden Prozesse JD und RS sind aber gerade die beiden Prozesse, für die unter den getesteten Prozessen die Anpassungsgüte am höchsten war. So liegen z. B. Werte für eine Kaufoption am Geld mit einem Strikepreis von EUR 20 und einer Laufzeit von 3 Monaten zwischen EUR 2,07 und EUR 2,17. Das ist eine Differenz von ungefähr 5 Prozent. Somit sehen sich Marktteilnehmer im EU EHS, die mit Optionen handeln, beträchtlichen Unsicherheiten bei der Bewertung von CO₂-Derivaten ausgesetzt. Eine interessante Botschaft aus Tabelle 5.8 ist allerdings, dass gerade für europäische Optionen, die nahe am Geld sind und Laufzeiten von einigen Monaten haben, die Optionswerte bei Annahme einer geometrisch Brownschen Bewegung sich nicht stärker von den Werten bei Annahme eines JD-, HG- oder RS-Prozesses unterscheiden, als wenn letztgenannte untereinander verglichen werden. Dies rechtfertigt teilweise den in der Praxis häufig beobachteten Einsatz der einfachen Black/Scholes-Formel mit Annahme einer geometrisch Brownschen Bewegung. Nachfolgend soll das Modellrisiko bei der Bewertung von CO₂-Derivaten näher analysiert werden.

Tabelle 5.8: Theoretische Preise für europäische Kaufoptionen – 2. Handelsperiode.

Laufzeit	Strike	6	16	18	20	22	24	34
1 Monat	GBB	14,01	4,12	2,45	1,24	0,53	0,19	0,00
	JD	14,01	4,12	2,42	1,17	0,46	0,16	0,00
	HG	14,01	4,13	2,43	1,18	0,47	0,16	0,00
	RS	14,01	4,19	2,49	1,19	0,45	0,15	0,00
2 Monate	GBB	14,03	4,36	2,88	1,76	1,01	0,54	0,01
	JD	14,03	4,34	2,82	1,68	0,92	0,47	0,00
	HG	14,03	4,36	2,84	1,69	0,93	0,48	0,01
	RS	14,03	4,44	2,92	1,74	0,94	0,47	0,01
3 Monate	GBB	14,04	4,61	3,23	2,17	1,40	0,87	0,06
	JD	14,04	4,57	3,16	2,07	1,29	0,78	0,04
	HG	14,04	4,59	3,18	2,09	1,31	0,79	0,05
	RS	14,04	4,69	3,28	2,17	1,35	0,81	0,05
1 Jahr	GBB	14,19	6,33	5,28	4,40	3,65	3,04	1,21
	JD	14,19	6,20	5,13	4,22	3,47	2,84	1,06
	HG	14,19	6,25	5,18	4,27	3,52	2,90	1,09
	RS	14,21	6,43	5,37	4,47	3,70	3,06	1,18
2 Jahre	GBB	14,48	7,90	7,01	6,24	5,56	4,97	2,91
	JD	14,46	7,71	6,80	6,01	5,31	4,71	2,65
	HG	14,47	7,78	6,87	6,08	5,39	4,79	2,72
	RS	14,53	8,02	7,13	6,35	5,66	5,05	2,94
3 Jahre	GBB	14,82	9,10	8,32	7,62	7,00	6,44	4,39
	JD	14,77	8,88	8,07	7,35	6,71	6,14	4,06
	HG	14,79	8,95	8,15	7,44	6,80	6,23	4,15
	RS	14,88	9,24	8,45	7,75	7,12	6,56	4,46

Die Optionspreise sind mittels risikoneutraler Bewertung berechnet, die Parameterwerte sind Tabelle 4.12 entnommen. Als Underlying wird das für die Bildung des synthetischen Spotpreises verwendete Portfolio für die zweite Handelsperiode angenommen (Future 2008 an der ICE/ECX plus eine risikolose Geldanlage in Höhe des diskontierten Futurespreises). Der aktuelle CO₂-Preis wird mit EUR 20 angenommen. Die Optionspreise sind auf 2 Nachkommastellen gerundet.

5.3.4 Modellrisiko bei der Bewertung

Der Begriff „Modellrisiko“ wird im Folgenden als Synonym dafür verstanden, dass nicht bestimmt werden kann, was der richtige Preis für ein derivatives Instrument oder ein Portfolio von Instrumenten ist, wenn verschiedene Modelle für Bewertungszwecke in Frage kommen. Normalerweise werden auf reifen Finanzmärkten stochastische Prozesse so an die Daten kalibriert, dass sie die Preise der am Markt gehandelten derivativen Instrumente abbilden können. Das Modellrisiko äußert sich dann darin, dass sich bei Verwendung verschiedener Prozesse auch unterschiedliche Preise für nicht bzw. sehr illiquide gehandelte Instrumente ergeben können. Im Fall des EU EHS sind bis auf Forwards und Futures auf EUAs bislang keine liquide gehandelten Derivate vorhanden. Die Beurteilung des Modellrisikos kann daher momentan nur auf Basis der an Spotpreise bzw. an diskontierte Terminpreise kalibrierten Prozesse erfolgen.

5.3.4.1 Definition des Modellrisikos

Um das Modellrisiko auch quantitativ beurteilen zu können, sei es als maximale Differenz von theoretischen Derivatepreisen bei Verwendung unterschiedlicher Bewertungsmodelle definiert. Dieser Ansatz wurde in einer kürzlich veröffentlichten Arbeit von Cont (2006) zu einem formalen Rahmen ausgebaut, der es ihm erlaubt, ein quantitatives Maß für das Modellrisiko zusammen mit anderen Risikomaßen in ein Risikomanagementsystem zu integrieren. Dazu wird das absolute Modellrisiko als

$$\mu_Q(X) = \underline{\pi}(X) - \overline{\pi}(X) \tag{5.14}$$

definiert, wobei

$$\overline{\pi}(X) = \sup_{q \in Q} E^q[X],$$

$$\underline{\pi}(X) = \inf_{q \in Q} E^q[X].$$

Q steht für die Menge der risikoneutralen Wahrscheinlichkeitsmaße q , die für die Bewertung von Derivaten in Frage kommen. X kann sowohl für die Auszahlungsfunktion eines einfachen derivativen Finanzinstruments als auch eines ganzen Portfolios

stehen. Das absolute Modellrisiko $\mu_Q(X)$ ist somit definiert als Differenz zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Wert der Position X nach Anwendung aller risikoneutralen Maße in Q .²⁸ Für ein Instrument, das bei der Bewertung keinem Modellrisiko ausgesetzt ist, gilt $\mu_Q(X) = 0$. Dies kann z. B. für Forwards und Futures auf EUAs angenommen werden.

Während in einem vollständigen und arbitragefreien Markt zu jedem angenommenen stochastischen Prozess für das Underlying genau ein risikoneutrales Maß existiert, kann es in unvollständigen Märkten theoretisch unendlich viele risikoneutrale Maße geben. Als Beispiel sei der bereits diskutierte einfache Jump-Diffusion-Prozess genannt, für den im EU EHS kein eindeutiges risikoneutrales Maß existiert. Das Modellrisikomaß gewinnt seine praktische Bedeutung also erst durch eine sorgfältige Vorauswahl in Frage kommender stochastischer Prozesse und zugehöriger risikoneutraler Maße und stellt eine Untergrenze für das Modellrisiko dar.²⁹

Interessanter als das absolute Modellrisiko ist in der Praxis allerdings eher die Frage, welchen Anteil am Wert eines Instruments oder Portfolios das Modellrisiko einnimmt. Daher definiert Cont (2006) weiter das relative Modellrisiko als

$$RM(X) = \frac{\mu_Q(X)}{\pi_m(X)}, \quad (5.15)$$

wobei

$$\pi_m(X) = E^{q_m}[X].$$

Für dieses Modellrisikomaß muss ein risikoneutrales Maß q_m als Benchmark ausgewählt werden. Dieses Maß kann typischerweise dem in einem Markt standardmäßig angewendeten Bewertungsmodell entsprechen und muss darüber hinaus die im Markt beobachteten Preise von gehandelten Derivaten reproduzieren können. Da das EU EHS ein noch sehr junger Markt mit vielen finanzmarkttechnisch unerfahrenen Teilnehmern ist und darüber hinaus Optionen bisher nur sporadisch und illiquide gehandelt wurden, sei für die Zwecke dieser Arbeit die geometrisch Brownsche Bewegung

²⁸Vgl. Cont (2006), S. 530.

²⁹Nach Cont (2006) setzt die Verwendung von Gleichung (5.14) zur Bestimmung des Modellrisikos voraus, dass alle in Q enthaltenen Maße q alle am Markt liquide gehandelten Derivate korrekt bewerten. Dies ist im vorliegenden Fall nicht relevant, da zur Zeit noch keine liquide gehandelten Derivate außer Forwards und Futures existieren.

als Benchmarkprozess gewählt. Obwohl dieser Prozess sicher nicht die höchste Anpassungsgüte aufweist, wird er häufig von Praktikern mangels besserer Kenntnis der Spotpreisdynamiken als erste Annäherung verwendet.

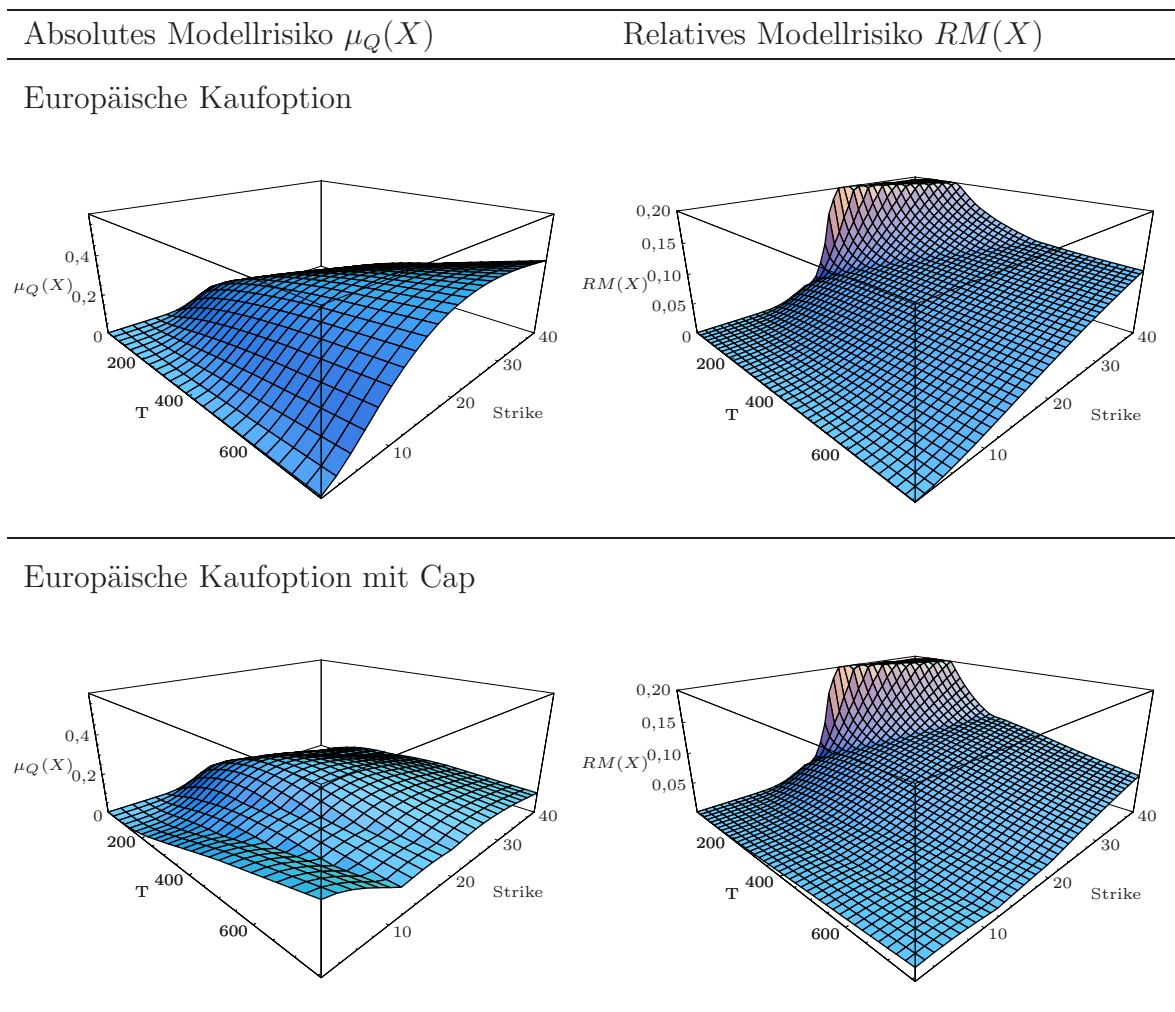
5.3.4.2 Analyse des Modellrisikos

Zur Berechnung des absoluten und relativen Modellrisikos werden nachfolgend die 4 diskutierten Prozesse GBB, JD, HG und RS verwendet. Bezüglich der risikoneutralen Maße für den JD- und RS-Prozess werden die Risikoprämien für das Sprungrisiko bzw. das Regime-Switching-Risiko erneut gleich null gesetzt. Q enthält somit vier risikoneutrale Wahrscheinlichkeitsmaße. Die erste Abbildung in der oberen Hälfte von Tabelle 5.9 zeigt das absolute Modellrisiko $\mu_Q(X)$ für eine einfache europäische Kaufoption, während die zweite Abbildung in der oberen Hälfte entsprechend das relative Modellrisiko $RM(X)$ zeigt. Als Underlying werden synthetische Spotpreise für die zweite Handelsperiode angenommen und demzufolge die Parameterwerte erneut Tabelle 4.12 entnommen. Der aktuelle CO₂-Preis sei EUR 20, womit die Abbildungen in Tabelle 5.9 auf genau den gleichen Annahmen wie die theoretischen Optionswerte aus Tabelle 5.8 basieren. Erneut werden Laufzeiten von einem Monat bis zu drei Jahren (21 - 756 Tage) betrachtet sowie Strikepreise von EUR 2 - 40.

Offensichtlich steigt das relative Modellrisiko mit zunehmendem Strikepreis an. Zudem steigt es für kurze Laufzeiten stark an, falls sich die Option am oder aus dem Geld befindet. Dies liegt vor allem daran, dass der Wert einer Kaufoption sehr klein ist, falls sich die Option nicht im Geld befindet. Kleine absolute Bewertungsabweichungen können dann große Auswirkungen auf das relative Modellrisiko $RM(X)$ haben.

Bei der Betrachtung der Achsen in Tabelle 5.9 fällt auf, dass für realistische Optionsausprägungen, also Laufzeiten von einigen Monaten und Optionen, die nahe am Geld sind, der Anteil des Modellrisikos $\mu_Q(X)$ am Wert der Option in der Größenordnung von bis zu ca. 10% liegt. Der Grund für die derartige Höhe des Modellrisikos liegt weniger in den Besonderheiten des EU EHS begründet, sondern vielmehr darin, dass keine liquide gehandelten CO₂-Derivate existieren, die eine bessere, implizite Schätzung der Prozessparameter erlauben. Es stellt sich die Frage, ob auf anderen Märkten das Modellrisiko ähnlich hoch wäre, wenn keine liquide gehandelten Derivate zur Kalibrierung zur Verfügung stehen würden. Um diese Frage zu beant-

Tabelle 5.9: Modellrisiko für europäische Kaufoption – mit/ohne Cap.



Die Parameterwerte zur Berechnung der Optionspreise sind Tabelle 4.12 entnommen (als Underlying wird der synthetische Spotpreis für die zweite Handelsperiode angenommen). Das absolute Modellrisiko beschreibt die Differenz zwischen dem größten und dem kleinsten Optionswert bei der Berechnung unter Annahme von GBB, JD-, HG- und RS-Prozess. Das relative Modellrisiko entspricht dem absoluten Modellrisiko geteilt durch den Optionswert bei Annahme einer GBB. Die obere Hälfte der Tabelle zeigt das Modellrisiko für eine europäische Kaufoption mit einer Laufzeit von 21 Tagen (1 Monat) bis zu 756 Tagen (3 Jahre) und Strikepreisen von EUR 2 - 40. Der aktuelle CO₂-Preis wird mit EUR 20 angenommen. Die untere Hälfte der Tabelle zeigt das Modellrisiko für die gleiche Option, allerdings mit einem zusätzlichen Cap bei EUR 60, welcher einer Short-Position in einer Kaufoption der gleichen Laufzeit und mit einem Strikepreis von EUR 60 entspricht. Für das relative Modellrisiko sind die Plots bei $RM(X) = 0,2$ abgeschnitten.

worten, seien die beiden Prozesse GBB und HG, für die im diskutierten Markt ein eindeutiges risikoneutrales Maß existiert, auf historische DAX-Kurse kalibriert und zur Berechnung des Modellrisikos verwendet. Für die Kalibrierung wird wiederum der Beobachtungszeitraum vom 22. April 2005 bis zum 15. Dezember 2006 verwendet. Tatsächlich ergeben sich ähnlich hohe Werte wie für das EU EHS, obwohl für den DAX nur zwei Prozesse für die Berechnung des Modellrisikos verwendet wurden. Als Beispiel sei erneut eine europäische Kaufoption auf den DAX am Geld mit einer Laufzeit von 3 Monaten betrachtet (Spotkurs = 6.500, Strikekurs = 6.500). Das Modellrisiko läge bei ca. 8 Prozent.

Die mögliche Höhe des Modellrisikos sollte den für das Risikomanagement im EU EHS verantwortlichen Personen bewusst sein, falls ein Handel mit Optionen erwünscht ist. Diese Unterschiede im Optionswert je nach verwendetem Preisprozess werden sich auch in unterschiedlichen Aussagen bezüglich optimalem Hedging niederschlagen. Abgesehen vom OTC- und Börsenhandel von Optionen hat das Modellrisiko allerdings auch Einfluss auf das Management von Projekten, die CO₂-Optionalitäten enthalten. Ein hohes Modellrisiko kann z. B. bei CO₂-Vermeidungsprojekten dazu führen, dass die Frage nach der Vorteilhaftigkeit einer Investition nicht eindeutig beantwortet werden kann. Eine zukünftige Reduzierung des Modellrisikos ist zu erwarten, wenn im Zuge einer zunehmenden Stabilisierung der regulatorischen und politischen Rahmenbedingungen die Liquidität im OTC- und Börsenhandel von Optionen ansteigt.

5.3.4.3 Strategien zur Verringerung des Modellrisikos

Die Frage stellt sich, ob durch die geeignete Wahl der Ausgestaltung von Derivaten das festgestellte Modellrisiko gezielt verringert werden kann. Dazu sei das Beispiel für die bedingten risikoneutralen Wahrscheinlichkeitsdichten der analysierten Prozesse in Abbildung 5.5 betrachtet. Die unterschiedlichen Optionswerte ergeben sich auf Grund der unterschiedlichen Formen dieser Dichten. Der größte relative Unterschied der Dichten untereinander wird in den jeweiligen Enden beobachtet. Daher kommen prinzipiell zwei verschiedene Strategien in Frage, um das relative Modellrisiko zu minimieren.

Die erste Strategie wäre, nur kleine Strikepreise zu wählen. Dadurch sind die Enden der Dichten nur für einen kleinen Anteil an der für die Berechnung des Options-

wertes benötigten Fläche unter der Dichtefunktion verantwortlich. Demzufolge ist das relative Modellrisiko gering, wenn die Option im Geld ist. In der Praxis ist aber eine Beschränkung auf Optionen, die im Geld sind, sicher nicht wünschenswert. Die alternative Strategie wäre, die Dichteverteilungen an den Enden abzuschneiden, um große relative Differenzen zu verringern. Dieser Effekt wird in der unteren Hälfte von Tabelle 5.9 demonstriert, die das absolute und relative Modellrisiko für den Fall zeigt, dass die europäische Kaufoption mit einem Cap bei EUR 60 versehen wird. Die Umsetzung des Caps erfolgt hier durch das Eingehen einer Short-Position in einer europäischen Kaufoption mit Strikepreis EUR 60. Tatsächlich ist erkennbar, dass sich das relative Modellrisiko $RM(X)$ für Optionen, die am oder aus dem Geld sind, verringert. Für sehr kurze Laufzeiten sind die absoluten Optionswerte allerdings sehr klein und daher hat für kurze Laufzeiten diese Strategie kaum Einfluss auf das relative Modellrisiko.

5.3.5 Fazit: Bewertung von nichtlinearen CO₂-Derivaten

Die Bewertung von nichtlinearen CO₂-Derivaten stellt aus methodischer Sicht die Marktteilnehmer im EU EHS nicht vor neue Herausforderungen, da für beide Handelsperioden die Voraussetzungen zur Anwendung der klassischen risikoneutralen Bewertungstheorie als gegeben angesehen werden können. Für die erste Handelsperiode können EUAs, für die zweite Handelsperiode EUA-Futures zur Bildung eines Duplikationsportfolios herangezogen werden. Allerdings haben die Marktteilnehmer wenig Möglichkeiten zu beurteilen, welches CO₂-Preismodell das bessere ist, solange die Preishistorie kurz ist und es am Markt keine liquide gehandelten Optionskontrakte gibt.

Bei der beispielhaften Bewertung von europäischen Kaufoptionen im EU EHS unter Nutzung der aus der empirischen Kalibrierung gewonnenen Parameterwerte für verschiedene Preisprozesse ist deutlich geworden, dass das Modellrisiko bei der Bewertung beträchtlich sein kann. Dies gilt insbesondere, wenn Optionen kurze Laufzeiten haben oder deutlich aus dem Geld sind. Im Fall des Handels mit europäischen Optionen im EU EHS kann daher die Empfehlung abgeleitet werden, auf zu kurze Laufzeiten zu verzichten und Optionen, die am oder aus dem Geld sind, mit einem Cap zu versehen und so das Modellrisiko bei der Bewertung zu minimieren.

Die ausführliche Analyse der CO₂-Preismodellierung und der Bewertung von CO₂-Derivaten hat auch gezeigt, dass sich bekannte Standardverfahren, wie z. B. Delta-Hedging, in der Theorie problemlos auf das Hedging von CO₂-Preis- und Volumenrisiken übertragen lassen. In der praktischen Umsetzung kann allerdings das Modellrisiko bei der Bewertung nichtlinearer CO₂-Derivate die Wirksamkeit von dynamischen Hedging-Strategien deutlich reduzieren. Dementsprechend sollten Risikomanager im EU EHS in jedem Fall ein quantitatives Maß für das Modellrisiko in ihren Systemen berücksichtigen.

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

Im Gegensatz zu Preisen auf herkömmlichen Finanz- und Commoditymärkten werden CO₂-Preise wesentlich stärker auch durch regulatorische und politische Unsicherheiten beeinflusst. Dies lässt eine Vorhersage von CO₂-Preisen basierend auf fundamentalen Faktoren kaum möglich erscheinen. Trotzdem haben sich bereits liquide Spot- und Terminmärkte im EU EHS herausgebildet. Die beiden Handelsperioden 2005 - 2007 und 2008 - 2012 sind dabei als eigene Märkte anzusehen, die unabhängige Preisbewegungen aufweisen können.

Da ein liquider Markt für CO₂-Emissionszertifikate existiert und diese darüber hinaus frei handel- und lagerbar sind, steht dem langfristigen Erfolg von CO₂-Derivaten nichts im Wege. Nach Futures wurden Ende 2006 auch erste börsengehandelte Optionen eingeführt. Die Expertenbefragung hat verdeutlicht, dass bei der Ausgestaltung solcher CO₂-Derivate insbesondere die Erfordernisse von CO₂-regulierten Unternehmen mit Hedging-Absichten ausschlaggebend sind. Demnach ist eine physische Lieferung des Emissionszertifikats zu empfehlen. Europäische Optionen erscheinen generell sinnvoller als amerikanische Optionen, da es auf Grund der im Vergleich z. B. zum Aktienmarkt höheren Unsicherheiten zu kurzfristigen Lieferengpässen von EUAs kommen kann. Dies setzt den Verkäufer einer amerikanischen Option nicht kalkulierbaren Risiken aus. Komplexere Instrumente sind im EU EHS zunächst nicht auf breiter Basis zu erwarten. Zum einen werden EUAs nur einmal im Jahr für die Erfüllung regulatorischer Vorschriften benötigt, zum anderen können die meisten Hedging-Bedürfnisse bereits mit einfachen Instrumenten, wie z. B. Forwards und Futures, abgedeckt werden.

Die Entwicklung und Diskussion des theoretischen CO₂-Preismodells hat gezeigt, dass der Bruch zwischen den Handelsperioden im EU EHS von 2007 nach 2008 auch in einem effizient funktionierenden Markt zu einem starken Anstieg der Preisvolatilität am Ende der ersten Handelsperiode führen kann. Bei der Diskussion des Modells ist zudem klar geworden, dass Mean-Reversion in CO₂-Preisen keine Rolle spielen kann. Dies konnte auch empirisch bestätigt werden. Für eine Kalibrierung an CO₂-Preisdaten sind fundamentale Gleichgewichtsmodelle allerdings nicht geeignet. Dies scheitert schon daran, dass die wohl wichtigste Größe, nämlich das CO₂-Emissionsvolumen, nicht auf täglicher Basis beobachtet werden kann. Stattdessen wurden stochastische Prozesse direkt an historische CO₂-Preisdaten kalibriert. Diese Analyse hat zwar ergeben, dass die geometrisch Brownsche Bewegung sicher nicht zur Modellierung ausreicht. Es konnte jedoch auch gezeigt werden, dass schon wenige, einfache Erweiterungen genügen, um akzeptable Resultate bei der Kalibrierung zu erzielen. Von den in der vorliegenden Arbeit untersuchten stochastischen Prozessen zeigen der Sprungdiffusionsprozess (JD-Prozess) und der einfache Diffusionsprozess mit zwei wechselnden Regimes (RS-Prozess) die höchste Anpassungsgüte. Beiden Prozessen gelingt es gut, die hohe beobachtete Kurtosis in den Renditen zu erklären.

Unabhängig von der Annahme bezüglich der zu Grunde liegenden Spotpreisdynamiken kann die Bewertung von linearen CO₂-Derivaten innerhalb einer Handelsperiode mit dem Cost-of-Carry-Ansatz erfolgen. Da die Lagerkosten von EUAs vernachlässigbar sind, entsprechen Spotpreise gerade diskontierten Terminpreisen. Temporäre Abweichungen sind auf Grund des noch jungen Marktstadiums des EU EHS allerdings möglich. Wie auch auf vielen anderen Märkten führt der Terminmarkt dabei den Preisfindungsprozess an.

Sowohl für die erste als auch die zweite Handelsperiode existieren entweder gehandelte und lagerbare Underlyings für CO₂-Derivate oder können aus Futures konstruiert werden. Das Bewertungsproblem für nichtlineare CO₂-Derivate reduziert sich daher auf die Auswahl des zu Grunde liegenden stochastischen Prozesses für CO₂-Preise sowie die Auswahl eines risikoneutralen Maßes, falls mehr als eine Risikoquelle angenommen wird. Aus der Literatur bekannte Standardverfahren für Hedging sind dann anwendbar. Ohne liquide gehandelte CO₂-Derivate verbleibt bei der Auswahl eines Prozesses allerdings immer ein Modellrisiko, das beträchtlich sein kann. Dies

wird auch das Hedging negativ beeinflussen und sollte im Risikomanagement explizit berücksichtigt werden.

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, soll diese Arbeit als Grundlagenforschung in einem jungen, aber sich mit hohem Tempo entwickelnden Markt verstanden werden. Die dargestellten Ergebnisse bilden einerseits die Basis, auf der zukünftige Studien zu den Dynamiken von CO₂-Emissionszertifikaten und deren Derivate aufbauen können. Sie zeigen aber andererseits auch ganz praktisch, dass Marktteilnehmer den CO₂-Handel durchaus mit vertretbarem Aufwand in ihr Risikomanagement integrieren können. Als Ausblick seien zwei interessante Themenbereiche genannt, deren Erforschung schon heute oder in naher Zukunft vielversprechend erscheint.

Erstens ist durch das verbindende Element der CO₂-Emissionszertifikate zu erwarten, dass die Korrelationen zwischen Preisen von Strom und von Energieträgern wie Kohle, Gas und Öl zunehmen werden. Eine gemeinsame Betrachtung der Modellierung der Preisdynamiken von Strom, Energieträgern und CO₂ erscheint dann sinnvoll. Zwar sind bisher nur geringe Korrelationen von CO₂ und Fuel-Spreads feststellbar. Dies kann sich aber schnell ändern, wenn die Politik sich entschließt, die Emissionsreduktionsziele deutlich zu verschärfen und Stromproduzenten dann tatsächlich mehr CO₂ aktiv vermeiden müssen. Ein bereits heute aktuelles Anwendungsbeispiel für diesen Themenbereich ist die explizite Berücksichtigung von CO₂-Preisen bei der Strompreismodellierung, da seit der Einführung des EU EHS der CO₂-Preis einer der wichtigsten Faktoren bei der Erklärung von Terminpreisen von Strom ist.

Wenn sich die Liquidität von Optionen auf CO₂-Emissionszertifikate ähnlich schnell entwickelt wie die Liquidität der Futures, so wird es schon sehr bald erste statistisch verwertbare Datensätze mit Optionspreisen geben. Als zweiter Themenbereich sei daher die Analyse dieser Optionspreise genannt. Aus der Optionspreisanalyse ließen sich einerseits in die Zukunft gerichtete Erwartungen der Marktteilnehmer bezüglich der CO₂-Preisdynamiken implizit ableiten. Andererseits könnten Aussagen über vom Markt geforderte Risikoprämien im CO₂-Handel abgeleitet werden.

Anhang A

Emissionsziele im Kyoto-Protokoll

Tabelle A.1: Emissionsziele und Emissionsvolumina im Kyoto-Protokoll.

Land	Emissionen		Emissions- begrenzung (% Basisjahr)
	1990 (Mio. t CO ₂ -Äquivalent)	2004	
Australien	506,9	533,5	108
Belgien	144,3	146,7	92
Bulgarien	88,4	45,4	92
Dänemark	71,0	67,3	92
Deutschland	1.198,0	979,3	92
Estland	43,5 *	21,3 *	92
Finnland	49,7	62,9	92
Frankreich	543,7	510,8	92
Griechenland	105,5	132,2	92
Großbritannien	779,1	663,4	92
Irland	55,7	68,4	92
Island	5,4	5,0	110
Italien	439,9	477,4	92
Japan	1.197,5	1.260,3	94
Kanada	517,1	838,9	94
Kroatien	16,7	13,1	95
Lettland	5,2	-3,2 **	92
Liechtenstein	0,2	0,2	92

* Ohne Berücksichtigung von Land- und Forstwirtschaft.

** Negativer Wert auf Grund der Berücksichtigung von Land- und Forstwirtschaft.

Tabelle A.1: Emissionsziele und Emissionsvolumina im Kyoto-Protokoll (Fortsetzung).

Land	Emissionen		Emissions- begrenzung (% Basisjahr)
	1990 (Mio. t CO ₂ -Äquivalent)	2004	
Litauen	50,9 *	20,2 *	92
Luxemburg	12,7 *	12,7 *	92
Monaco	0,1	0,1	92
Neuseeland	42,9	50,6	100
Niederlande	215,4	220,4	92
Norwegen	35,2	28,6	101
Österreich	67,0	74,7	92
Polen	458,9 *	388,1 *	94
Portugal	63,5	81,8	92
Rumänien	195,1	120,0	92
Russische Föderation	Ca. 3.011	(1999: 1.834)	100
Schweden	50,2	53,4	92
Schweiz	52,8 *	53,0 *	92
Slowakei	71,0	46,8	92
Slowenien	20,2 *	20,1 *	92
Spanien	264,1	397,4	92
Tschechische Republik	194,5	142,3	92
Ukraine	891,5	381,3	100
Ungarn	100,3	78,4	94
USA	5.198,6	6.294,3	93

* Ohne Berücksichtigung von Land- und Forstwirtschaft.

** Negativer Wert auf Grund der Berücksichtigung von Land- und Forstwirtschaft.

Die Tabelle zeigt die prozentuale Obergrenze für Treibhausgasemissionen gemessen am Basisjahr sowie tatsächliche Treibhausgasemissionen in CO₂-Äquivalenten (mit Berücksichtigung von Land- und Forstwirtschaft). Für das volumenmäßig stärkste Gas CO₂ ist das Basisjahr das Jahr 1990 (bis auf Bulgarien, Ungarn, Polen und Rumänien, die einen früheren Zeitraum zu Grunde legen), für die anderen Treibhausgase 1995. Quellen: United Nations (1992), United Nations (1998), „<http://unfccc.int>“ und „<http://unstats.un.org>“.

Anhang B

Berechnungen zum CO₂-Preismodell

B.1 Herleitung von $G(t)$

Wie in Abschnitt 4.3.1 eingeführt folge die Emissionsrate y_t

$$dy_t = \mu(t, y_t)dt + \sigma(t, y_t)dW_t. \quad (\text{B.1})$$

Insgesamt erwartete Emissionen folgen somit

$$x_t = - \int_0^t u_s ds + E \left[\int_0^T y_s ds | \mathcal{F}_t \right] = - \int_0^t u_s ds + \int_0^t y_s ds + E \left[\int_t^T y_s ds | \mathcal{F}_t \right]. \quad (\text{B.2})$$

Es sei nun beispielhaft die Herleitung von $G(t)$ für den stochastischen Teil des Prozesses x_t für den Fall gezeigt, dass y_t einer arithmetisch Brownschen Bewegung ohne Drift folge. Es sei $y_t = \sigma W_t$, so folgt für x_t

$$x_t = - \int_0^t u_s ds + \int_0^t \sigma W_s ds + E \left[\int_t^T \sigma W_s ds | \mathcal{F}_t \right]. \quad (\text{B.3})$$

Nach der Lösung des Erwartungsoperators ergibt sich


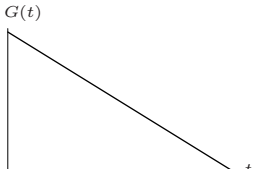
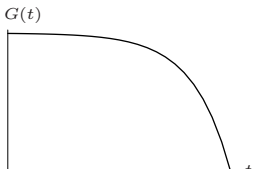
$$x_t = - \int_0^t u_s ds + \int_0^t \sigma W_s ds + \sigma(T-t)W_t. \quad (\text{B.4})$$

Die Anwendung von Itô's Lemma liefert schließlich

$$dx_t = -u_t dt + \sigma(T-t)dW_t \hat{=} -u_t dt + G(t)dW_t. \quad (\text{B.5})$$

Dieses Ergebnis kann auch auf sehr intuitive Weise erreicht werden. Die Emissionsrate y_t folge einer arithmetisch Brownschen Bewegung ohne Drift und erfahre zum Zeitpunkt t eine zufällige Änderung um s . Der Anstieg der insgesamt erwarteten Emissionen für die Restlaufzeit der Handelsperiode ist dann schlicht $s(T-t)$. Auf Grund ähnlicher Überlegungen können auch $G(t)$ für andere Prozesse abgeleitet werden. Tabelle B.1 zeigt die entsprechenden $G(t)$ für den Fall, dass y_t einem White-Noise-Prozess, der arithmetisch Brownschen Bewegung oder dem Ornstein-Uhlenbeck-Prozess folgt.

Tabelle B.1: $G(t)$ entsprechend verschiedener Prozesse für die Emissionsrate y_t .

Emissionsrate y_t	$G(t)$	Beispielplot für $G(t)$
White-Noise: $y_t = y_0 + \sigma \varepsilon_t$	σ	
Arithmetisch Brown: $y_t = y_0 + \sigma W_t$	$\sigma(T-t)$	
Ornstein-Uhlenbeck: $y_t = y_0 + \int_0^t \sigma e^{\kappa(s-t)} dW_s$	$\sigma \frac{1-e^{\kappa(t-T)}}{\kappa}$	

Die Tabelle zeigt Beispiele für die Funktion $G(t)$ abhängig vom gewählten Prozess für die CO₂-Emissionsrate y_t im theoretischen CO₂-Preismodell.

B.2 Lösung der charakteristischen Partialdifferentialgleichung

Zur Lösung der semilinearen parabolischen PDG

$$V^{(t)} = -\frac{1}{2}\sigma^2 V^{(xx)} - \frac{1}{2c}(V^{(x)})^2 \quad (\text{B.6})$$

können Verfahren genutzt werden, die von der aus der Physik stammenden Wärmeleitungsgleichung bekannt sind. Mit Hilfe der Cole-Hopf Transformation $V(t, x_t) = c\sigma^2 \ln(v)$ kann die Gleichung (B.6) in die lineare PDG zweiter Ordnung

$$v^{(t)} = -\frac{1}{2}\sigma^2 v^{(xx)} \quad (\text{B.7})$$

überführt werden. Nach der Transformation des Endwertproblems in ein Anfangswertproblem durch die Substitution $t = T - \hat{t}$ folgt die gewöhnliche Wärmeleitungsgleichung

$$v^{(\hat{t})} = \frac{1}{2}\sigma^2 v^{(xx)} \quad (\text{B.8})$$

mit der transformierten Randbedingung

$$v(0, x_0) = e^{\frac{\min[0, p(e_0 - x_0)]}{c\sigma^2}}. \quad (\text{B.9})$$

Für Gleichung (B.8) sind analytische Lösungsverfahren bekannt, die auch mit einer Minimum-Funktion in der Randbedingung zurechtkommen.¹ Es sei $v_0(x_0) = v(0, x_0)$ und $q = \frac{1}{2}\sigma^2$, dann kann die Lösung von $v(\hat{t}, x_{\hat{t}})$ als

$$v(\hat{t}, x_{\hat{t}}) = \frac{1}{\sqrt{4\pi q \hat{t}}} \int_{-\infty}^{\infty} v_0(x_0) e^{-\frac{(x_{\hat{t}} - x_0)^2}{4q\hat{t}}} dx_0 \quad (\text{B.10})$$

repräsentiert werden. Nach Lösung des Integrals und Rücktransformation von $v(\hat{t}, x_{\hat{t}})$ nach $V(t, x_t)$ folgt die analytische Lösung für $V(t, x_t)$ und $V^{(x)}$.

¹Vgl. z.B. Samarskii et al. (1995), S. 47f.

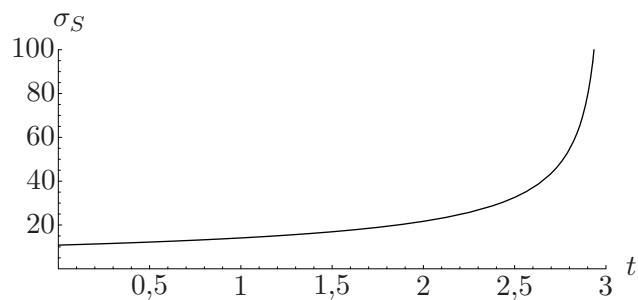
B.3 Volatilität von $S(t, x_t)$ in Abhängigkeit von $G(t)$

Die lokale Volatilität von $S(t, x_t)$ unterscheidet sich qualitativ nur geringfügig bei Annahme verschiedener Prozesse für die Emissionsrate y_t . Um dies zu demonstrieren, präsentiert Abbildung B.1 drei 2-dimensionale Plots für die lokale Volatilität σ_S abhängig von der Zeit t . Der Spotpreis $S(t, x_t)$ wird dabei konstant bei $S(0, x_0) = 27,46$ gehalten. Die Parameterwerte sind Tabelle 4.6 entnommen, für den Zinssatz gilt $r = 0$ und für den Ornstein-Uhlenbeck-Prozess gilt $\kappa = 2$. Die Plots sind bei $\sigma_S = 100$ abgeschnitten, da die lokale Volatilität für $t = T$ gegen unendlich geht.

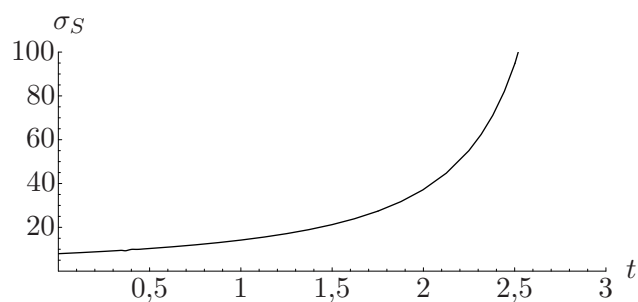
Offensichtlich resultieren alle drei angenommenen Prozesse für die Emissionsrate y_t in lokalen Volatilitäten für $S(t, x_t)$, die qualitativ in sehr ähnlicher Weise ansteigen. Die unterschiedliche Starthöhe für $t = 0$ entsteht dadurch, dass derselbe Parameterwert $\sigma = 500/\sqrt{T}$ für alle drei Prozesse verwendet wurde. Dies resultiert in unterschiedlichen Werten für $G(0)$.

Emissionsrate y_t Lokale Volatilität σ_S für $S(t, x_t) = S(0, x_0)$

White-Noise



Arithmetisch Brown



Ornstein-Uhlenbeck

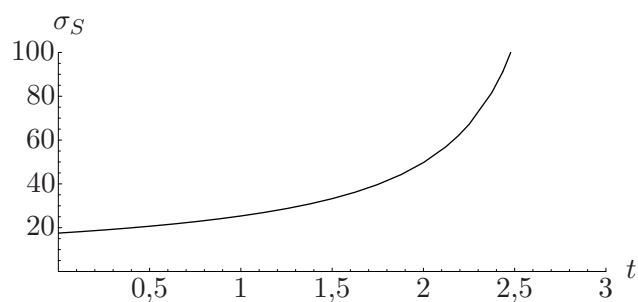


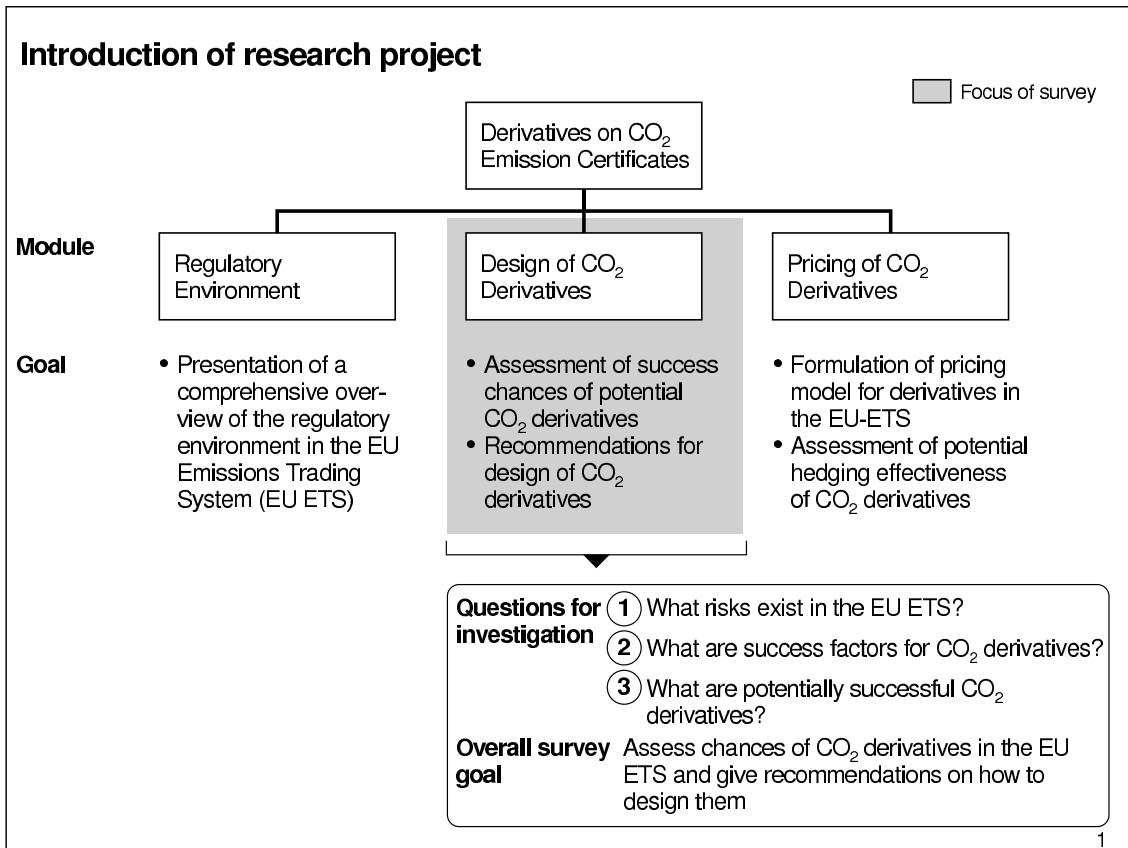
Abbildung B.1: Lokale Volatilität σ_S in Abhängigkeit vom Prozess der Emissionsrate. Die Abbildung zeigt die lokale Volatilität σ_S bei verschiedenen Annahmen für die Emissionsrate y_t abhängig von der Zeit t . Die Plots gelten für $S(t, x_t) = S(0, x_0)$. Der Mean-Reversion Parameter für den Ornstein-Uhlenbeck-Prozess ist $\kappa = 2$, die restlichen Parameterwerte entsprechen Tabelle 4.6.

Anhang C

Interviewleitfaden

Derivatives on CO₂ emission certificates in
the EU Emissions Trading System (EU ETS)

Expert survey – Interview guide
August/September 2005



Survey overview

Section	Overall goal	Subsections	No. of questions	Expected time
1 Assessment of risks in the EU ETS	Assess importance of factors influencing risks in the EU ETS	• Risks in the EU ETS	1	5 min
2 Assessment of success factors for CO₂ derivatives	Assess success factors for CO ₂ derivatives	<ul style="list-style-type: none"> • Risk related success factors • Market participant related success factors • Contract specific success factors 	5	20 - 25 min
3 Evaluation of potential CO₂ derivatives	Evaluate potential of success for specific CO ₂ derivatives	• Example evaluation of derivatives in the EU ETS	1	5 - 10 min
4 Open questions	Open discussion	-	5	5 - 10 min

2

Agenda

1 Assessment of risks in the EU ETS

- 2 Assessment of success factors for CO₂ derivatives
- 3 Evaluation of potential CO₂ derivatives
- 4 Open questions

3

Assessment of risks in the EU ETS (1/2)

Question 1.1:

Rate (1-7) each of the factors influencing price and individual volume risk which companies are facing in the EU ETS by marking the appropriate fields

- **Price risk** is defined as price fluctuation of EUAs (EU Allowances, i.e. the CO₂ emission certificates in the EU ETS)
- **Individual volume risk** is defined as unexpected change in demand of individual companies for EUAs
- **Play important role** meaning that when thinking of strategies regarding price/volume risk this factor has to be considered explicitly

Factors influencing risks in EU ETS	Price risk							Individual volume risk						
	Play no role		Play some role			Play important role		Play no role		Play some role			Play important role	
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
Regulatory uncertainties (uncertainty regarding further development of emission caps, NAPs* etc.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Political risks (price: e.g. political price targets, wars; volume: e.g. political ban on nuclear power)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Weather (e.g. unexpected hot summers, cold winters)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Economic growth (e.g. changes in power demand due to economic cycles)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

* National Allocation Plans

4

Assessment of risks in the EU ETS (2/2)

Factors influencing risks in EU ETS	Price risk							Individual volume risk						
	Play no role		Play some role			Play important role		Play no role		Play some role			Play important role	
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
Compliance Buying (i.e. price increases due to short term buying for compliance needs)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fuel prices/spreads (e.g. price induced change from coal to gas resulting in lower emissions)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technological development (e.g. development of cheaper abatement technologies)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technical risks (e.g. failed realization of emission reductions in individual companies)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Are there other important factors influencing price and individual volume risk?														
_____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
_____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<ul style="list-style-type: none"> • The remainder of the survey will focus on derivatives dealing with price risk 														

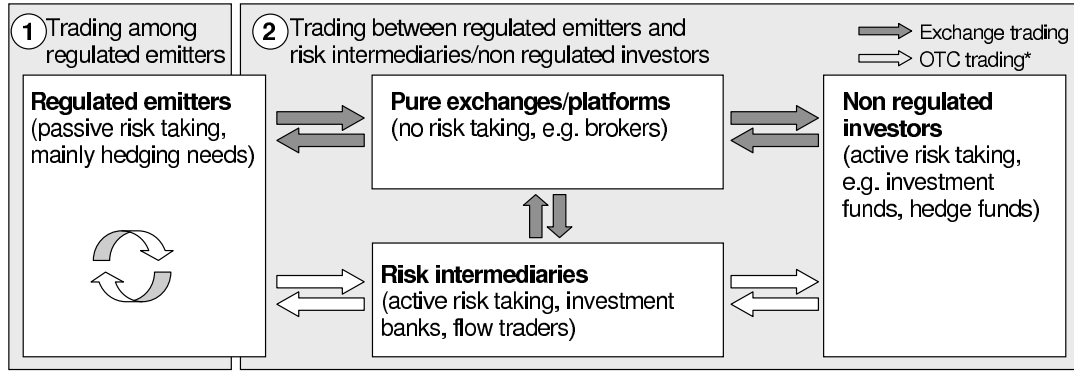
Agenda

-
- ① Assessment of risks in the EU ETS
 - ② **Assessment of success factors for CO₂ derivatives**
 - ③ Evaluation of potential CO₂ derivatives
 - ④ Open questions
-

Assessment of success factors for CO₂ derivatives (1/2)

- The goal of this second survey section is to assess several success factors for CO₂ derivatives; therefore the success factors are split up into two groups
 - Success factors the contract designer can not significantly influence. These success factors are prerequisites that the risks in the EU ETS can be traded at all
 - **Risk related success factors**
 - **Market participant related success factors**
 - Success factors the contract designer can easily influence. These success factors have to be fulfilled for a specific contract to be accepted/traded in the market place
 - **Contract specific success factors**
- To better understand the following questions please first have a look at the **simplified** model for potential trading of CO₂ certificates and derivatives within the EU ETS

Simplified model for trading of CO₂ certificates and derivatives within the EU ETS



* Over the counter trading

Assessment of success factors for CO₂ derivatives (2/2)

- **Question 2.1:** Because there might be different answers according to which type of market participant you are, please indicate below your perspective in the second column
 - You may also indicate more than one perspective
 - If you don't belong to one of the groups, please indicate your perspective/level of expertise in the last row

Type of market participant	Your perspective
• Pure exchanges/platforms (no risk taking, e.g. brokers)	<input type="checkbox"/>
• Regulated emitters (passive risk taking, mainly hedging needs)	<input type="checkbox"/>
• Non regulated investors (active risk taking, e.g. investment funds, hedge funds)	<input type="checkbox"/>
• Risk intermediaries (active risk taking, e.g. investment banks, flow traders)	<input type="checkbox"/>
• None of the above (e.g. general industry expert, academics)	<input type="checkbox"/> Your perspective/ level of expertise*:

* Only in case none of the perspectives above fit

Evaluation of risk related success factors in the EU ETS

Question 2.2:

- Rate (1-7) each of the **risk related success factors** for the tradability of **price risk** by marking the appropriate fields to evaluate its level of fulfillment (for definition of price risk see question 1.1)

Context

- The goal of this subsection is to evaluate whether important **risk related success factors** for the tradability of price risk within the EU ETS are satisfied
- The following questions focus only on **price risk**
- First you will be asked to what degree these factors are fulfilled, later you will be asked to evaluate their importance

Risk related success factors influencing tradability of price risk	Factor <i>not</i> fulfilled		Factor somewhat fulfilled			Factor fulfilled	
	1	2	3	4	5	6	7
Volatility (Is the volatility of the price risk high enough to play a significant role when looking at the overall industry production costs within the EU ETS?)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Transparency (Are the underlying risk factors* well understood? Can the impact of changes in the underlying risk factors on the price of EUAs be calculated?)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Quantifiability (Can the price risk be quantified? Can it be expressed in terms of EUR – e.g. as VaR?)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Liquidity in the spot market (Are there enough participants in the spot market? Is trading frequency in the spot market for CO ₂ emission certificates high enough to support derivatives?)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

* See question 1.1 for factors influencing price risk

9

Evaluation of market participant related success factors in the EU ETS

Question 2.3:

- Rate (1-7) each of the **market participant related success factors** for the tradability of **price risk** by marking the appropriate fields to evaluate its fulfillment (for definition of price risk see question 1.1)

Context

- The goal of this subsection is to evaluate whether important **market participant related success factors** for the tradability of price risk within the EU ETS are satisfied
- The following questions focus only on **price risk**
- First you will be asked to what degree these factors are fulfilled, later you will be asked to evaluate their importance

Market participant related success factors influencing tradability of price risk	Factor <i>not</i> fulfilled		Factor somewhat fulfilled			Factor fulfilled	
	1	2	3	4	5	6	7
Supply and demand among regulated emitters (Are there companies with differing compliance strategies, i.e. abatement vs. buying certificates? Are there differing evaluations of the risks?)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Supply and demand between regulated emitters and risk intermediaries/ non regulated investors (Are there diversification effects for investors from outside the EU ETS? Are regulated emitters willing to pay risk premiums to risk intermediaries?)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Risk attitude of regulated emitters (Are regulated emitters risk averse? Are there different risk attitudes among market participants (e.g. hedgers vs. speculators)?)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Risk management knowledge (Does the average regulated emitter understand the importance of risk management? Do they feel confident to use risk management techniques?)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

10

Relative importance of risk and market participant related success factors in the EU ETS

▪ **Question 2.4:**
 - Please evaluate the relative importance of the **risk and market participant related success factors** for the tradability of price risk by allocating percentage scores (100% in total)

Importance of risk vs. market participant related success factors for risk tradability (in percent)	Importance of success factors for risk tradability within main categories (risk and market participant related success factors) (in percent)
Risk related success factors	
<div style="border: 1px solid black; width: 50px; height: 50px; display: flex; align-items: center; justify-content: center; margin-bottom: 10px;"> % </div>	<ul style="list-style-type: none"> Volatility _____ % Transparency _____ % Quantifiability _____ % Spot liquidity _____ % <hr style="width: 100%;"/> <p style="text-align: right;">Σ = 100 %</p>
Market participant related success factors	
<div style="border: 1px solid black; width: 50px; height: 50px; display: flex; align-items: center; justify-content: center; margin-bottom: 10px;"> % </div>	<ul style="list-style-type: none"> Supply and demand among regulated emitters _____ % Supply and demand between regulated emitters and risk intermediaries/non regulated investors _____ % Risk attitude of regulated emitters _____ % Risk management knowledge _____ % <hr style="width: 100%;"/> <p style="text-align: right;">Σ = 100 %</p>
Σ = 100 %	

11

Evaluation of contract specific success factors for CO₂ derivatives (1/3)

▪ **Question 2.5:**
 - Please indicate for each of the following statements regarding design issues of potential CO₂ derivatives contracts your level of agreement (1-7)

▪ **Context**
 - The goal of this survey subsection is to evaluate important high level design issues for potential CO₂ derivative contracts influencing **contract specific success factors** (not looked at are lower level details like settlement, transactional costs and contract/tick size which are very specific to certain types of derivatives)

Contr. spec. success factor	Design issue	Statement (specific for <u>price risk</u>)	Disagree strongly		Neither agree nor disagree			Agree strongly	
			1	2	3	4	5	6	7
Hedging effectivity	Underlying	The CO ₂ certificate itself can be a good underlying*.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		A future/forward on CO ₂ certificates can be a good underlying.*	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		There is no existing simple product in the spot or futures market suitable as underlying for a derivative.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		If you believe there is no existing product as underlying for a derivative on price risk, what should it be?	_____						
Hedging effectivity	New risks	When dealing with regulated emitters, counterparty risk has to be considered.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		When dealing with risk intermediaries, counterparty risk has to be considered.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		The industry in the EU ETS is used to deal with counterparty risk (e.g. within accounts receivable management).	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		The liquidity of a potential derivative is more important than having a 100%-fitting hedge	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

* Current year vintage, regardless whether settlement is physical or not

12

Evaluation of contract specific success factors for CO₂ derivatives (2/3)

Contr. spec. success factor	Design issue	Statement (specific for price risk)	Disagree strongly		Neither agree nor disagree			Agree strongly	
			1	2	3	4	5	6	7
Hedging effectivity	Maturity	Derivatives may have a maturity of a maximum of 1 year (end date within same compliance year).	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		The maximum end date of a derivative must lie always within the current trading period (maximum maturity of 3 years in 2005, max. of 5 years in 2008*).	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		The maximum end date of a derivative should be 2012 (emission caps are only certain until 2012**).	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		There will be the need (and supply) to trade derivatives even for time horizons longer than 2012 (uncertain emission caps after 2012**).	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Tradability	Complexity	Only simple products like a plain vanilla future, option or swap will succeed in the market place.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		The more standardized the derivatives contract the better.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		There will also be success chances for more complex products (e.g. securitizations of certificates generated from pooled abatement projects).	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Tradability	Signaling	An aggressive marketing for the new derivative contracts is important to gain attention also from outside the group of regulated emitters.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		Price information on CO ₂ derivatives should be public.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

* First trading period from 2005 to 2007, second trading period from 2008 to 2012 ** From today's point of view

13

Evaluation of contract specific success factors for CO₂ derivatives (3/3)

Contr. spec. success factor	Design issue	Statement (specific for price risk)	Disagree strongly		Neither agree nor disagree			Agree strongly	
			1	2	3	4	5	6	7
Tradability	Trading platform	There will be enough demand for a standardized product to justify an exchange for CO ₂ derivatives.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		The OTC market will be liquid enough to prevent the development of exchanges on CO ₂ derivatives.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		Exchanges will offer more liquidity to CO ₂ derivatives contracts than the OTC market.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

What commodity markets could be used for cross hedging CO₂ price risk?

Power	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Weather	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Oil/Gas	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
_____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Are there other important design issues influencing the contract specific success factors **hedging effectivity** and **tradability**?
If so, please describe:

14

Agenda

-
- ① Assessment of risks in the EU ETS
 - ② Assessment of success factors for CO₂ derivatives
 - ③ **Evaluation of potential CO₂ derivatives**
 - ④ Open questions
-

15

Evaluation of potential CO₂ derivatives

- **Question 3.1:** On the following pages please rate (1-7) the **contract specific success factors** for each of the proposed examples by marking the appropriate fields and give a closing evaluation of your believe of the overall success chances of the specific example (refer to below for scaling explanations)

Success factor	Grade 1 – Worst	Grade 4 – Medium	Grade 7 – Optimum
Hedging effectivity	<ul style="list-style-type: none"> • Derivative not suitable for hedging targeted risk • New risks of contract will not be accepted by market participants or are not understood (e.g. counterparty risk, basis risk) 	<ul style="list-style-type: none"> • Some hedging potential but significant basis or counterparty risk 	<ul style="list-style-type: none"> • Derivative is close to “perfect hedge” for targeted risk (underlying and maturity) • New risks are minor or easily hedgeable (e.g. low counterparty risk due to exchanges)
Tradability	<ul style="list-style-type: none"> • There is not enough liquidity in the underlying market to support the derivative • Derivative too complex to be understood by customers 	<ul style="list-style-type: none"> • Market will accept derivative but still significant liquidity risks existing 	<ul style="list-style-type: none"> • Underlying market supplies enough liquidity • Derivative will be well understood by the market
Overall success chances	<ul style="list-style-type: none"> • Derivative will not be used within EU ETS 	<ul style="list-style-type: none"> • Derivative will be used within EU ETS with limited liquidity (bilateral, OTC) 	<ul style="list-style-type: none"> • Derivative will have high trading volume in EU ETS (OTC, exchanges)

16

Example evaluation (1/2)

Future on CO ₂ emission certificates		Evaluation						
		Worst		Medium			Optimum	
		1	2	3	4	5	6	7
• Trading platform:	Exchange	Success factors						
• Maturity:	End date < 2007	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Description:	Standard futures contract on CO ₂ emission certificates (EUAs*), physical delivery	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		Overall success chances						
		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		Comment:						

Call option on CO ₂ emission certificates		Evaluation						
		Worst		Medium			Optimum	
		1	2	3	4	5	6	7
• Trading platform:	OTC, Exchange	Success factors						
• Maturity:	End date < 2012	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Description:	Standard call option contract on CO ₂ emission certificates, financial settlement	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		Overall success chances						
		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		Comment:						

Vintage swap on CO ₂ emission certificates		Evaluation						
		Worst		Medium			Optimum	
		1	2	3	4	5	6	7
• Trading platform:	OTC, Exchange	Success factors						
• Maturity:	End date < 2012	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Description:	Obligation to exchange EUAs for differing compliance dates (e.g. exchange EUAs for compliance period 2005 - 2007 with EUAs for compliance period 2008 - 2012)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		Overall success chances						
		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		Comment:						

* EU Allowances, i.e. the CO₂ emission certificates in the EU ETS

17

Example evaluation (2/2)

Securitization of CO ₂ emission certificates from abatement projects		Evaluation						
		Worst		Medium			Optimum	
		1	2	3	4	5	6	7
• Trading platform:	Bilateral, OTC	Success factors						
• Maturity:	~5 years	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Description:	Purchase of a securitized share of a pool of abatement projects generating emission certificates that can be transformed into EUAs*	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		Overall success chances						
		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		Comment:						

Forward on a constructed EU-wide CO ₂ index		Evaluation						
		Worst		Medium			Optimum	
		1	2	3	4	5	6	7
• Trading platform:	OTC	Success factors						
• Maturity:	1-3 years	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Description:	Forward on an artificially created index that is closely related to CO ₂ emissions on the EU level (e.g. an activity index of industries participating in the EU ETS)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		Overall success chances						
		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		Comment:						

Quantity triggered call option on CO ₂ emission certificates		Evaluation						
		Worst		Medium			Optimum	
		1	2	3	4	5	6	7
• Trading platform:	OTC	Success factors						
• Maturity:	1-3 years	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Description:	Call option contract on CO ₂ emission certificates that can only be exercised, when a weather index (oil index etc.) exceeds a predefined value	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		Overall success chances						
		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		Comment:						

18

Agenda

-
- ① Assessment of risks in the EU ETS
 - ② Assessment of success factors for CO₂ derivatives
 - ③ Evaluation of potential CO₂ derivatives
 - ④ **Open questions**
-

19

Open questions (1/2)

In your own words, which derivative contracts might be successful in the EU ETS?

How do you think the liquidity will develop within the EU ETS (spot market, futures market, etc.)? Why?

How will individual companies deal with individual volume risks resulting from unexpected change in demand for EUAs*?

* EU Allowances, i.e. the CO₂ emission certificates in the EU ETS

20

Open questions (2/2)

What methods are known to you
to price derivatives in the EU ETS?

If you feel comfortable with pricing
models: what factors should be
incorporated into a pricing model
for derivatives in the EU ETS?

21

General comments

22

Literaturverzeichnis

- Albrecht, J., T. Verbeke und M. de Clercq, 2005, *Informational Efficiency of the US SO₂ Permit Market*, Environmental Modelling & Software 21, S. 1471–1478.
- Andersen, L. und J. Andreasen, 2000, *Jump-Diffusion Processes: Volatility Smile Fitting and Numerical Methods for Option Pricing*, Review of Derivatives Research 4, S. 231–262.
- Baldursson, F. M. und N.-H. M. von der Fehr, 2004, *Price Volatility and Risk Exposure: On Market-based Environmental Policy Instruments*, Journal of Environmental Economics and Management 48, S. 682–704.
- Banks, H. T. und K. Kunisch, 1989, *Estimation Techniques for Distributed Parameter Systems*, Birkhäuser, Boston.
- Barrieu, P. und N. El Karoui, 2002, *Optimal Design of Weather Derivatives*, ALGO Research Quarterly 5, S. 79–92.
- Barrieu, P. und N. El Karoui, 2004, *Optimal Derivatives Design under Dynamic Risk Measures*, A.M.S. Proceedings 351, Mathematics of Finance, Contemporary Mathematics.
- Bauer, C. und J. C. Zink, 2005, *Korrelation von Strompreisen und CO₂-Zertifikatpreisen*, Energiewirtschaftliche Tagesfragen 55, S. 574–577.
- Ben-David, S., D. Brookshire, S. Burness, M. McKee und C. Schmidt, 2000, *Attitudes toward Risk and Compliance in Emission Permit Markets*, Land Economics 74, S. 590–600.

- Bengochea-Marancho, A., F. Higón-Tamarit und I. Martínez-Zarzoso, 2001, *Economic Growth and CO₂ Emissions in the European Union*, Environmental and Resource Economics 19, S. 165–172.
- Benz, E. und S. Trück, 2006, *Modeling the Price Dynamics of CO₂ Emission Allowances*, Working Paper.
- Betz, R., K. Rogge und J. Schleich, 2005, *Flexible Instrumente im Klimaschutz – Emissionsrechtehandel, Clean Development Mechanism, Joint Implementation*, Umweltministerium Baden Württemberg, Stuttgart.
- Black, D. G., 1985, *Success and Failure of Futures Contracts: Theory and Empirical Evidence*, University Microfilms International, Ann Arbor.
- Black, F. und M. Scholes, 1973, *The Pricing of Options and Corporate Liabilities*, Journal of Political Economy 81, S. 637–654.
- Bogetoft, P. und H. B. Olesen, 2002, *Ten Rules of Thumb in Contract Design: Lessons from Danish Agriculture*, European Review of Agricultural Economics 29, S. 185–204.
- Böhringer, C., T. Hoffmann und C. Manrique-de-Lara-Peñate, 2006, *The Efficiency Costs of Separating Carbon Markets under the EU Emissions Trading Scheme: A Quantitative Assessment for Germany*, Energy Economics 28, S. 44–61.
- Böhringer, C. und A. Lange, 2005, *On the Design of Optimal Grandfathering Schemes for Emission Allowances*, European Economic Review 49, S. 2041–2055.
- Bolinger, M., R. Wiser und W. Golove, 2003, *Accounting for Fuel Price Risk: Using Forward Natural Gas Prices Instead of Gas Price Forecasts to Compare Renewable to Natural Gas-Fired Generation*, Working Paper LBNL-53587, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Bollen, N. P. B., T. Smith und R. E. Whaley, 2002, *Optimal Contract Design: For Whom?*, The Journal of Futures Markets 23, S. 719–750.
- Bollerslev, T., 1986, *Generalized Autoregressive Conditional Heteroscedasticity*, Journal of Econometrics 31, S. 307–327.

- Borak, S., W. Härdle, S. Trück und R. Weron, 2006, *Convenience Yields for CO₂ Emission Allowance Futures Contracts*, SFB 649 Discussion Paper 2006-076, Humboldt-University of Berlin.
- Brenner, R. J. und K. F. Kroner, 1995, *Arbitrage, Cointegration, and Testing the Unbiasedness Hypothesis in Financial Markets*, *The Journal of Financial and Quantitative Analysis* 30, S. 23–42.
- Brorsen, B. W. und N. F. Fofana, 2001, *Success and Failure of Agricultural Futures Contracts*, *Journal of Agribusiness* 19, S. 129–145.
- Brown, G. W. und K. B. Toft, 2002, *How Firms Should Hedge*, *The Review of Financial Studies* 15, S. 1283–1324.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2006, *Nationaler Allokationsplan 2008 - 2012 für die Bundesrepublik Deutschland*, 28. Juni 2006, Berlin.
- Bundestag, 2004, *Gesetz zur Umsetzung der Richtlinie 2003/87/EG über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Gemeinschaft*, *Bundesgesetzblatt*, Teil I, Nr. 35, S. 1578–1590.
- Burtraw, D., D. A. Evans, A. Krupnick, K. Palmer und R. Toth, 2005, *Economics of Pollution Trading for SO₂ and NO_x*, Discussion Paper 05-05, Resources for the Future, Washington DC.
- Capoor, K. und P. Ambrosi, 2006, *State and Trends of the Carbon Market 2006*, Report, Mai 2006, International Emissions Trading Association (IETA) and The World Bank.
- Cason, T. N. und L. Gangadharan, 2006, *Emissions Variability in Tradable Permit Markets with Imperfect Enforcement and Banking*, *Journal of Economic Behavior and Organization* 61, S. 199–216.
- Casti, J., 1980, *The Linear-Quadratic Control Problem: Some Recent Results and Outstanding Problems*, *SIAM Review* 22, S. 459–485.
- Chao, H.-P. und R. Wilson, 1993, *Option Value of Emission Allowances*, *Journal of Regulatory Economics* 5, S. 233–249.

- Chen, J. und P. R. Locke, 2004, *Splitting the S&P 500 Futures*, The Journal of Futures Markets 24, S. 1147–1163.
- Chicago Climate Futures Exchange, 2004, *The Sulfur Dioxide Emissions Allowance Trading Program: Market Architecture, Market Dynamics and Pricing*, Chicago Climate Exchange, Inc.
- Chourdakis, K. und T. Elias, 2001, *Option Pricing under Discrete-Time Regime Shifts in Stock Returns*, Working Paper, University of London, Queen Mary.
- Cont, R., 2006, *Model Uncertainty and Its Impact on the Pricing of Derivative Instruments*, Mathematical Finance 16, S. 519–547.
- Cox, J. C., S. A. Ross und M. Rubinstein, 1979, *Option Pricing: A Simplified Approach*, Journal of Financial Economics 7, S. 229–263.
- Cronshaw, M. B. und J. B. Kruse, 1996, *Regulated Firms in Pollution Permit Markets With Banking*, Journal of Regulatory Economics 9, S. 179–189.
- Cropper, M. L. und W. E. Oates, 1992, *Environmental Economics: A Survey*, Journal of Economic Literature 30, S. 675–740.
- Cuny, C. J., 1993, *The Role of Liquidity in Futures Market Innovations*, The Review of Financial Studies 6, S. 57–78.
- Cuny, C. J., 2006, *Why Derivatives on Derivatives? The Case of Spread Futures*, Journal of Financial Intermediation 15, S. 132–159.
- Daskalakis, G., D. Psychoyios und R. N. Markellos, 2006, *Modeling CO₂ Emission Allowance Prices and Derivatives: Evidence from the EEX*, Working Paper, Athens University of Economics and Business.
- Dawson, P., 2006a, *Emissions Trading: The Good, the Bad and the Ugly*, in: Kirkman, A.-M. (Hrsg.), Greenhouse Gas Market 2006, International Emissions Trading Association, Genf, S. 45–47.
- Dawson, P., 2006b, *Wider, Longer, Deeper: The EU ETS as the Template for International Emissions Trading Post-2012*, in: Kirkman, A.-M. (Hrsg.), Greenhouse Gas Market 2006, International Emissions Trading Association, Genf, S. 5–8.

- de Jong, C. und A. Oosterom, 2004, *Investing in Emissions: A Real Options Approach*, Working Paper, Rotterdam School of Management, Erasmus University Rotterdam.
- Dickey, D. A. und W. A. Fuller, 1979, *Distribution of the Estimators for Autoregressive Time Series With a Unit Root*, Journal of the American Statistical Association 74, S. 427–431.
- Diebold, F. X., T. A. Gunther und A. S. Tay, 1998, *Evaluating Density Forecasts with Applications to Financial Risk Management*, International Economic Review 39, S. 863–883.
- Dorflleitner, G., 2002, *Stetige versus diskrete Renditen: Überlegungen zur richtigen Verwendung beider Begriffe in Theorie und Praxis*, Kredit und Kapital 35, S. 216–241.
- Dorflleitner, G., 2003, *Why the Return Notion Matters*, International Journal of Theoretical and Applied Finance 6, S. 73–86.
- Dresig, T., 2000, *Handelbarkeit von Risiken – Erfolgsfaktoren von Verbriefungen und derivativen Finanzinstrumenten*, Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden.
- Duffie, D., 1995, *Financial Market Innovation and Security Design: An Introduction*, Journal of Economic Theory 65, S. 1–42.
- Duffie, D. und M. O. Jackson, 1989, *Optimal Innovation of Futures Contracts*, The Review of Financial Studies 2, S. 275–296.
- Dufour, C., 2006, *Overview of European National Allocation Plans*, Research Report No. 8, Caisse de Dépôts.
- Ehrhart, K.-M., C. Hoppe und R. Löschel, 2005, *Abuse of Emissions Trading Systems for Tacit Collusion*, Working Paper, Institute for Economic Theory and Operations Research, Universität Karlsruhe (TH).
- Ehrhart, K.-M., C. Hoppe, J. Schleich und S. Seifert, 2003, *Strategic Aspects of CO₂-Emissions Trading: Theoretical Concepts and Empirical Findings*, Energy and Environment 14, S. 579–597.

- Ellerman, D. und B. Buchner, 2006, *Over-Allocation or Abatement? A Preliminary Analysis of the EU ETS Based on the 2005 Emissions Data*, CEEPR Working Paper 06-016.
- Energy Risk, 2005, *ECX and Powernext Team Up on Carbon Trading*, Pressemitteilung, 24. Juni 2005, Paris/Amsterdam.
- Engle, R. F. und C. W. J. Granger, 1987, *Co-Integration and Error Correction: Representation, Estimation, and Testing*, *Econometrica* 55, S. 251–276.
- Enkvist, P.-A., T. Nauc ler und J. Rosander, 2007, *A Cost Curve for Greenhouse Gas Reduction*, *The McKinsey Quarterly* 1/2007, S. 35–45.
- Eraker, B., 2004, *Do Stock Prices and Volatility Jump? Reconciling Evidence from Spot and Option Prices*, *The Journal of Finance* 59, S. 1367–1403.
- Estrada-Oyuela, R., 2000, *A Commentary on the Kyoto Protocol*, in: Chichilnisky, G. und G. Heal (Hrsg.), *Environmental Markets – Equity and Efficiency*, Columbia University Press, New York, S. 247–254.
- European Climate Exchange, 2006a, *ECX and ICE Futures Announce Launch of Emissions Options – ECX and ICE Futures Set 13th October 2006 as Launch Date for Emissions Options*, Pressemitteilung, 25. September 2006, Amsterdam.
- European Climate Exchange, 2006b, *ECX, Powernext Out on Top in Exchange Battle*, Pressemitteilung (Point Carbon), 7. Februar 2006, Amsterdam.
- European Climate Exchange, 2007a, *ECX Market Update – January 2007*, Market Update, Amsterdam.
- European Climate Exchange, 2007b, *ECX Market Update – Year 2006*, Pressemitteilung, 9. Januar 2007, Amsterdam.
- European Climate Exchange, 2007c, *European Climate Exchange: Company Profile*, ECXTRA, 1. Januar 2007, Amsterdam.
- European Energy Exchange, 2005, *Emissionshandel an der EEX erfolgreich gestartet*, Pressemitteilung, 9. März 2005, European Energy Exchange, Leipzig.

- European Union, 2003, *Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council of 13 October 2003 Establishing a Scheme for Greenhouse Gas Emission Allowance Trading within the Community and Amending Council Directive 96/61/EC*, Official Journal of the European Union L275, S. 32–46.
- European Union, 2004, *Directive 2004/101/EC of the European Parliament and of the Council of 27 October 2004 Amending Directive 2003/87/EC Establishing a Scheme for Greenhouse Gas Emission Allowance Trading within the Community, in Respect of the Kyoto Protocol's Project Mechanisms*, Official Journal of the European Union L338, S. 18–23.
- European Union, 2006a, *Climate Change and the EU's Response*, Mitteilung MEMO/06/406, Brüssel.
- European Union, 2006b, *Errichtung eines globalen Kohlenstoffmarkts – Bericht nach Maßgabe von Artikel 30 der Richtlinie 2003/87/EG*, Mitteilung KOM(2006) 676, Brüssel.
- European Union, 2006c, *EU Emissions Trading Scheme Delivers First Verified Emissions Data for Installations*, Pressemitteilung IP/06/612, Brüssel.
- European Union, 2006d, *Klimawandel: Kommission legt Zeitplan für Überarbeitung des EU-Emissionshandelssystems ab 2013 fest*, Pressemitteilung IP/06/1548, Brüssel.
- Fama, E. F., 1970, *Efficient Capital Markets: A Review of Theory and Empirical Work*, The Journal of Finance 25, S. 383–417.
- Fama, E. F., 1991, *Efficient Capital Markets: II*, The Journal of Finance 46, S. 1575–1617.
- Fehle, F., 2006, *Too Many Options? Theory and Evidence on Option Exchange Design*, The Journal of Futures Markets 26, S. 533–570.
- Fehr, M. und J. Hinz, 2006, *A Quantitative Approach to Carbon Price Risk Modeling*, Working Paper, Institute for Operations Research, ETH Zentrum, Zürich.
- Franke, G., 2005, *What Can We Expect From the New Trade of CO₂-Allowances?*, in: Stiftung „Umwelt und Wohnen“ (Hrsg.), Environment – Economy – Education, Konstanz, S. 75–79.

- Frankfurter Allgemeine Zeitung, 2005, *Steigende Preise sind kein Indiz für Marktmacht*, Zeitungsbeitrag, 15. September 2006.
- Freund, J. E. und B. M. Perles, 1987, *A New Look at Quartiles of Ungrouped Data*, The American Statistician 41, S. 200–203.
- Geman, H., 2005, *Commodities and Commodity Derivatives*, John Wiley & Sons, Chichester.
- Genoese, A., F. Sensfuss, D. Möst und O. Rentz, 2007, *Auswirkungen des CO₂-Emissionshandels auf Strompreise – Eine agentenbasierte Analyse für den deutschen Spotmarkt*, Proceedings of the IEWT (Internationale Energiewirtschaftstagung), Wien, 2007.
- Godby, R. W., S. Mestelman, R. A. Muller und J. D. Welland, 1997, *Emissions Trading with Shares and Coupons when Control over Discharges Is Uncertain*, Journal of Environmental Economics and Management 32, S. 359–381.
- Graichen, P. und T. Requate, 2005, *Der steinige Weg von der Theorie in die Praxis des Emissionshandels: Die EU-Richtlinie zum CO₂-Emissionshandel und ihre nationale Umsetzung*, Perspektiven der Wirtschaftspolitik 6, S. 41–56.
- Großmann, C. und H.-G. Roos, 2005, *Numerische Behandlung partieller Differentialgleichungen*, 3. Auflage, Teubner Verlag, Wiesbaden.
- Hakkio, C. S. und M. Rush, 1989, *Market Efficiency and Cointegration: An Application to the Sterling and Deutschmark Exchange Markets*, Journal of International Money and Finance 8, S. 75–88.
- Hasselknippe, H. und K. Røine, 2006, *Carbon 2006*, Point Carbon, Kopenhagen.
- Heston, S. L. und S. Nandi, 2000, *A Closed-Form GARCH Option Valuation Model*, The Review of Financial Studies 13, S. 585–625.
- Heymann, E., 2007, *EU-Emissionshandel – Verteilungskämpfe werden härter*, Deutsche Bank Research, Aktuelle Themen 377, Frankfurt am Main.
- Holler, J. und M. Haberfellner, 2006, *Divergenz oder Konvergenz europäischer Großhandelsmärkte? Preisentwicklung am Spotmarkt*, Working Paper Nr. 17, Energie-Control, Wien.

- Honoré, P., 1998, *Pitfalls in Estimating Jump-Diffusion Models*, Working Paper, Centre for Analytical Finance – University of Athens.
- Hotelling, H., 1931, *The Economics of Exhaustible Resources*, *The Journal of Political Economy* 39, S. 137–175.
- Hull, J. C., 1998, *Introduction to Futures and Options Markets*, 3. Auflage, Prentice Hall, Upper Saddle River.
- ICE Futures, 2007, *Confirmation of the Amendment to the Regulations: Rule Y.4 in Relation to the Tick Size of ICE ECX CFI Futures and the Change to the Effective Date of the Amendment*, Circular 07/026 R03, London.
- Ingersoll, J. E., 1997, *Valuing Foreign Exchange Rate Derivatives with a Bounded Exchange Process*, *Review of Derivatives Research* 1, S. 159–181.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis – Summary for Policymakers*, Approved at the 10th Session of Working Group I of the IPCC, February 2007, Paris.
- Irlé, M., 2005, *Der Strom, aus dem die Zukunft ist*, *McK Wissen* 12, S. 45–52.
- Johnston, E. T. und J. J. McConnel, 1989, *Requiem for a Market: An Analysis of the Rise and Fall of Financial Futures Contracts*, *The Review of Financial Studies* 2, S. 1–23.
- Joskow, P. L., R. Schmalensee und E. M. Bailey, 1998, *The Market for Sulfur Dioxide Emissions*, *The American Economic Review* 88, S. 669–685.
- Kavussanos, M. G. und N. K. Nomikos, 2003, *Price Discovery, Causality and Forecasting in the Freight Futures Markets*, *Review of Derivatives Research* 6, S. 203–230.
- Klepper, G. und S. Peterson, 2006, *Marginal Abatement Cost Curves in General Equilibrium: The Influence of World Energy Prices*, *Resource and Energy Economics* 28, S. 1–23.
- Kosobud, R. F., H. Stokes, C. D. Tallarico und B. L. Scott, 2005, *Valuing Tradable Private Rights to Pollute the Public's Air*, *Review of Accounting and Finance* 4, S. 50–71.

- Kramer, A. E., 2007, *Gazprom Shifts its Weight to Carbon Trading*, International Herald Tribune, 24. April 2007.
- Kristiansen, T., R. Wolbers, T. Eikmans und F. Reffel, 2006, *Carbon Risk Management*, Conference Proceedings, 9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems KTH – 11.-15. Juni 2006, Stockholm.
- Kruger, J. und W.A. Pizer, 2004, *The EU Emissions Trading Directive: Opportunities and Potential Pitfalls*, Discussion Paper 04-24, Resources for the Future, Washington, D.C.
- Kumar, V., D. Aaker und G. S. Day, 2002, *Essentials of Marketing Research*, 2. Auflage, John Wiley & Sons, Chichester.
- Kurdas, C., 2005, *Is Emissions Trading the Next Hot Hedge Fund Strategy?*, Hedge-World's Inside Edge 4.
- Leiby, P. und J. Rubin, 2001, *Intertemporal Permit Trading for the Control of Greenhouse Gas Emissions*, Environmental and Resource Economics 19, S. 229–256.
- Levy, C., 2005, *Impact of Emission Trading on Power Prices: A Case Study from the European Emission Trading Scheme*, Working Paper, Université Paris Dauphine.
- Lewis, M. C., 2006, *EU Emissions Trading – Tough on Carbon, Tough on the Causes of Carbon*, Industry Bulletin, 30. November 2006, Deutsche Bank.
- Lo, A. W. und J. Wang, 1995, *Implementing Option Pricing Models When Asset Returns Are Predictable*, The Journal of Finance 50, S. 87–129.
- Maeda, A., 2001, *Domestic Greenhouse Gas Emissions Trading Markets: Forward Pricing and Banking Impacts*, Interim Report IR-01-048, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg.
- Maeda, A. und T. Tezuka, 2004, *Intertemporal Trading Strategy under Emissions Uncertainty*, Working Paper, 6th IAEE European Conference 2004: "Modeling in Energy Economics and Policy", 2./3. September 2004, Zürich.
- Mansanet-Bataller, M., Á. Pardo und E. Valor, 2006, *CO₂ Prices, Energy and Weather*, Working Paper, Facultad de Economía, University of Valencia.

- Merton, R. C., 1976, *Option Pricing When Underlying Stock Returns are Discontinuous*, Journal of Financial Economics 3, S. 125–144.
- Modigliani, F. und M. Miller, 1958, *The Cost of Capital, Corporate Finance, and the Theory of Investment*, American Economic Review 30, S. 261–297.
- Montgomery, W. D., 1972, *Markets in Licenses and Efficient Pollution Control Programs*, Journal of Economic Theory 5, S. 395–418.
- Nam, J., A. L. Tucker und J. Wei, 2002, *Minimizing VaR with Quantity-Triggered Options*, Working Paper, New York.
- Neftci, S. N., 2000, *An Introduction to the Mathematics of Financial Derivatives*, 2. Auflage, Academic Press, San Diego.
- Newey, W. K. und K. D. West, 1987, *A Simple, Positive Semi-Definite, Heteroscedasticity and Autocorrelation Consistent Covariance Matrix*, Econometrica 55, S. 703–708.
- Ockenfels, A., C. Gatzert und M. Peek, 2005, *Sind die Gesetze des Wettbewerbs auf dem Strommarkt außer Kraft gesetzt?*, Energiewirtschaftliche Tagesfragen 55, S. 4–11.
- Pan, J., 2002, *The Jump-Risk Premia Implicit in Options: Evidence from an Integrated Time-Series Study*, Journal of Financial Economics 63, S. 3–50.
- Paoletta, M. S. und L. Taschini, 2006, *An Econometric Analysis of Emission Trading Allowances*, Research Paper Series Number 0626, Swiss Finance Institute.
- Pennings, J. M. E. und R. M. Leuthold, 1999, *Commodity Futures Contract Viability: A Multidisciplinary Approach*, OFOR Paper Number 99-02, Office for Futures and Options Research, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Pennings, J. M. E. und R. M. Leuthold, 2001, *A Behavioral Approach Towards Futures Contract Usage*, Australian Economic Papers 40, S. 461–478.
- Pennings, J. M. E. und M. T. G. Meulenberg, 1999, *The Financial Industry's Challenge of Developing Commodity Derivatives*, OFOR Paper Number 99-01, Office for Futures and Options Research, University of Illinois at Urbana-Champaign.

- Perlwitz, H., D. Möst und O. Rentz, 2007, *Modellgestützte Analyse des europäischen Erdgas-, Strom- und CO₂-Zertifikatemarktes – Ausgewählte Szenarien mit dem PERSEUS-EEM*, 9. Symposium Energieinnovation, Dritte Energiekrise – Anforderungen an die Energieinnovation.
- Phillips, P. C. B., 1987, *Time Series Regression With a Unit Root*, *Econometrica* 55, S. 277–301.
- Rogge, K., J. Schleich und R. Betz, 2006, *An Early Assessment of National Allocation Plans for Phase 2 of EU Emission Trading*, Working Paper Sustainability and Innovation No. S1/2006, Fraunhofer Institute Systems and Innovation Research (Fraunhofer ISI) and Centre for Energy and Environmental Markets (CEEM) at the University of New South Wales (UNSW), Karlsruhe/Sydney.
- Røine, K., H. Hasselknippe, J. Buen, A. Eik, V. Zhezherin und E. Lokshall, 2006, *The Global Carbon Market in 2006 – An Overview of Prices and Volumes*, in: Kirkman, A.-M. (Hrsg.), *Greenhouse Gas Market 2006*, International Emissions Trading Association, Genf, S. 30–35.
- Rousse, O. und B. Sévi, 2005, *Behavioral Heterogeneity in the US Sulfur Dioxide Emissions Allowance Trading Program*, Working Paper, LASER-CREDEN, University of Montpellier.
- Rubin, J. D., 1996, *A Model of Intertemporal Emission Trading, Banking, and Borrowing*, *Journal of Environmental Economics and Management* 31, S. 269–286.
- Samarskii, A. A., V. A. Galaktinov, S. P. Kurdyumov und A. P. Mikhailov, 1995, *Blow-up in Quasilinear Parabolic Equations*, Walter de Gruyter, Berlin.
- Schennach, S. M., 2000, *The Economics of Pollution Permit Banking in the Context of Title IV of the 1990 Clean Air Amendments*, *Journal of Environmental Economics and Management* 40, S. 189–210.
- Schleich, J., K.-M. Ehrhart, C. Hoppe und S. Seifert, 2006, *Banning Banking in EU Emissions Trading?*, *Energy Policy* 34, S. 112–120.
- Seifert, J. und M. Uhrig-Homburg, 2006, *Modelling Jumps in Electricity Prices: Theory and Empirical Evidence*, Working Paper, Chair of Financial Engineering and Derivatives, Universität Karlsruhe (TH).

- Seifert, J., M. Uhrig-Homburg und M. W. Wagner, 2007, *Dynamic Behavior of CO₂ Spot Prices – Theory and Empirical Evidence*, Working Paper, Chair of Financial Engineering and Derivatives, Universität Karlsruhe (TH).
- Sethi, S. P. und G. L. Thompson, 2005, *Optimal Control Theory: Applications to Management Science and Economics*, 2. Auflage, Springer, New York.
- Sheeran, K. A., 2006, *Who Should Abate Carbon Emissions? A Note*, Environmental and Resource Economics 35, S. 89–98.
- Shefrin, H. und M. Statman, 1993, *Behavioral Aspects of the Design and Marketing of Financial Products*, Financial Management 22, S. 123–134.
- Sijm, J., K. Neuhoff und Y. Chen, 2006, *CO₂ Cost Pass Through and Windfall Profits in the Power Sector*, Working Papers CWPE 0639 and EPRG 0617.
- Sijm, J. P. M., S. J. A. Bakker, Y. Chen, H. W. Harmsen und W. Lise, 2005, *CO₂ Price Dynamics: The Implications of EU Emissions Trading for the Price of Electricity*, ECN-C--05-081, Energy research Centre of the Netherlands (ECN).
- Silber, W. L., 1981, *Innovation, Competition, and New Contract Design in Futures Markets*, The Journal of Futures Markets 1, S. 123–155.
- Silvestro, G. D. und T. Vargiolu, 2002, *Optimal Design of Derivatives in Illiquid Market: An Alternative Approach*, Working Paper, Università degli Studi di Padova.
- Springer, U., 2003, *The Market for Tradable GHG Permits under the Kyoto Protocol: A Survey of Model Studies*, Energy Economics 25, S. 527–551.
- Svendsen, G. T. und M. Vesterdal, 2002, *CO₂ Trade and Market Power in the EU Electricity Sector*, Working Paper 02-11, University of Aarhus.
- Tashjian, E., 1995, *Optimal Futures Contract Design*, The Quarterly Review of Economics and Finance 35, S. 153–162.
- Theissen, E., 2002, *Price Discovery in Floor and Screen Trading Systems*, Journal of Empirical Finance 9, S. 455–474.

- Theissen, E., 2005, *Price Discovery in Spot and Futures Markets: A Reconsideration*, Working Paper, University of Bonn.
- Tietenberg, T., 2003, *Environmental and Natural Resource Economics*, 6. Auflage, Addison Wesley, Boston.
- Tietenberg, T., 2006, *Emissions Trading – Principles and Practice*, 2. Auflage, Resources for the Future, Washington, DC.
- Tucker, M., 2001, *Trading Carbon Tradable Offsets Under Kyoto’s Clean Development Mechanism: The Economic Advantages to Buyers and Sellers of Using Call Options*, Ecological Economics 31, S. 173–182.
- Uhrig-Homburg, M. und M. W. Wagner, 2006, *Market Dynamics and Derivative Instruments in the EU Emissions Trading Scheme – An Early Market Perspective*, Working Paper, Chair of Financial Engineering and Derivatives, Universität Karlsruhe (TH).
- Uhrig-Homburg, M. und M. W. Wagner, 2007, *Forward Price Dynamics of CO₂ Emission Certificates – An Empirical Analysis*, Working Paper, Chair of Financial Engineering and Derivatives, Universität Karlsruhe (TH).
- umwelttechnik & ingenieure GmbH, 2005, *Branchenleitfaden – Maßnahmen zur CO₂-Emissionsminderung im Emissionshandel*, Projekt co₂ncept, 15. April 2005, Hannover.
- United Nations, 1992, *United Nations Framework Convention on Climate Change*, Rio de Janeiro.
- United Nations, 1998, *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*, Kyoto.
- van ’t Veld, K. und A. Plantinga, 2005, *Carbon Sequestration or Abatement? The Effect of Rising Carbon Prices on the Optimal Portfolio of Greenhouse-Gas Mitigation Strategies*, Journal of Environmental Economics and Management 50, S. 59–81.
- Veit, D. und A. Weidlich, 2005, *Softwareagenten simulieren Handel mit Emissionszertifikaten*, Dow Jones TradeNews Emissions 10/2005, S. 10–11.

- Viguiier, L. L., M. H. Babiker und J. M. Reilly, 2001, *Carbon Emissions and the Kyoto Commitment in the European Union*, Report No. 70, MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change.
- von Hirschhausen, C., H. Weigt und G. Zachmann, 2007, *Preisbildung und Marktmacht auf den Elektrizitätsmärkten in Deutschland: Grundlegende Mechanismen und empirische Evidenz*, Gutachten, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Public Sector Management, TU Dresden.
- Voss, G., 2003, *Klimapolitik und Emissionshandel – Die Ökonomie im vorsorgenden Klimaschutz*, Institut der deutschen Wirtschaft Köln.
- Weinhardt, C., C. v. Dinther, M. Grunenberg, K. Koltz, M. Kunzelmann, J. Mäkiö, I. Weber und H. Weltzien, 2006, *CAME-Toolsuite meet2trade – auf dem Weg zum Computer Aided Market Engineering*, Universitätsverlag Karlsruhe.
- Wezsäcker, C. C., 2005, *Warum die Strompreise steigen*, Energiewirtschaftliche Tagesfragen 55, S. 2–4.
- Wilkens, S. und J. Wimschulte, 2006, *Der Handel mit CO₂-Emissionsberechtigungen: Eine erste Bestandsaufnahme*, Finanz Betrieb 8, S. 394–406.