

**JET-SET**



## **Die Einführung von Emissionshandelssystemen als sozial-ökologischer Transformationsprozess**

### **Joint Emissions Trading as a Socio-Ecological Transformation**

Anwendung der Realoptionstheorie zur Bewertung von  
Vermeidungsmaßnahmen im Rahmen des Emissionshandels

Marcus Stronzik



**Arbeitspapier IIIb/05**



**JET-SET** 

ist ein Verbundvorhaben im Rahmen der  
BMBF-Förderinitiative „Sozial-ökologische Forschung“



**SÖF**  **Sozial-  
ökologische  
Forschung**



## JET-SET

# Die Einführung von Emissionshandelssystemen als sozial-ökologischer Transformationsprozess

## Joint Emissions Trading as a Socio-Ecological Transformation

Wissenschaftszentrum  
Nordrhein-Westfalen  
Institut Arbeit  
und Technik



Kulturwissenschaftliches  
Institut  
Wuppertal Institut für  
Klima, Umwelt, Energie

Dr. Ralf Schüle (*Koordination*)  
 Dipl. Vw. Christiane Beuermann  
 Dipl. Umw. Wiss. Bernd Brouns  
 Dipl. Soz. Tilman Santarius  
 Wolfgang Sterk, M.A.  
 Dipl. Geogr. Renate Duckat  
 Marcel Braun, M.A.  
 Dr. Hermann E. Ott  
 Prof. Dr. Joseph Alcamo  
 Dr. Janina Onigkeit  
 Dipl. Vw. Niels Anger  
 Prof. Dr. Christoph Böhringer  
 Dr. Ulf Moslener  
 Dipl. Wi.-Ing. Marcus Stronzik  
 Dipl. Wi.-Ing. Marion Hitzeroth  
 Dr. Irmgard Schultz  
 Dr. Immanuel Stiess  
 Dipl. Ing. Markus Duscha  
 Dipl.-Ing. Hans Hertle

[ralf.schuele@wupperinst.org](mailto:ralf.schuele@wupperinst.org)  
[christiane.beuermann@wupperinst.org](mailto:christiane.beuermann@wupperinst.org)  
[bernd.brouns@wupperinst.org](mailto:bernd.brouns@wupperinst.org)  
[tilman.santarius@wupperinst.org](mailto:tilman.santarius@wupperinst.org)  
[wolfgang.sterk@wupperinst.org](mailto:wolfgang.sterk@wupperinst.org)  
[renate.duckat@wupperinst.org](mailto:renate.duckat@wupperinst.org)  
[marcel.braun@wupperinst.org](mailto:marcel.braun@wupperinst.org)  
[hermann.ott@wupperinst.org](mailto:hermann.ott@wupperinst.org)  
[alcamo@usf.uni-kassel.de](mailto:alcamo@usf.uni-kassel.de)  
[onigkeit@usf.uni-kassel.de](mailto:onigkeit@usf.uni-kassel.de)  
[anger@zew.de](mailto:anger@zew.de)  
[boehringer@zew.de](mailto:boehringer@zew.de)  
[moslener@zew.de](mailto:moslener@zew.de)  
[stronzik@zew.de](mailto:stronzik@zew.de)  
 (jetzt: [m.stronzik@wik.org](mailto:m.stronzik@wik.org))  
[hitzeroth@zew.de](mailto:hitzeroth@zew.de)  
[schultz@isoe.de](mailto:schultz@isoe.de)  
[stiess@isoe.de](mailto:stiess@isoe.de)  
[duscha@ifeu.de](mailto:duscha@ifeu.de)  
[hertle@ifeu.de](mailto:hertle@ifeu.de)



Wuppertal, März 2006

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b><i>EINLEITUNG</i></b> .....	<b>6</b>
<b>1.1</b>	<b>Problemstellung</b> .....	<b>6</b>
<b>1.2</b>	<b>Methodik</b> .....	<b>8</b>
<b>1.3</b>	<b>Stand der Forschung</b> .....	<b>11</b>
<b>1.4</b>	<b>Ziele, Arbeitshypothesen und Aufbau der Arbeit</b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b><i>INVESTITION UNTER UNSICHERHEIT</i></b> .....	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>Entscheidungskalküle</b> .....	<b>16</b>
2.1.1	Erwartungsnutzen .....	16
2.1.2	Kapitalwertmethode.....	18
2.1.3	Kritik an der Kapitalwertmethode .....	19
<b>2.2</b>	<b>Investition als Option</b> .....	<b>20</b>
2.2.1	Grundidee und Voraussetzungen für die Anwendbarkeit der Realoptionstheorie .....	20
2.2.2	Grundlagen der Realoptionstheorie .....	21
2.2.3	Verschiedene Arten von Realoptionen .....	25
<b>2.3</b>	<b>Emissionshandel und Realoptionen</b> .....	<b>26</b>
<b>3</b>	<b><i>BEWERTUNG VON VERMEIDUNGSOPTIONEN MITTELS REALOPTIONEN</i></b> .....	<b>28</b>
<b>3.1</b>	<b>Bestimmung grundlegender Optionsparameter</b> .....	<b>28</b>
3.1.1	Dividend Yield .....	28
3.1.2	Volatilität.....	29
<b>3.2</b>	<b>Investition in ein Gaskraftwerk</b> .....	<b>32</b>
<b>3.3</b>	<b>Investition in ein effizientes Kohlekraftwerk</b> .....	<b>33</b>
<b>3.4</b>	<b>Investition in erneuerbare Energien</b> .....	<b>35</b>
<b>4</b>	<b><i>FAZIT</i></b> .....	<b>38</b>
<b>Annex 1:</b>	<b>Preisentwicklung und Volatilität im EU-Emissionsmarkt vor 2005</b> .....	<b>39</b>
<b>Annex 2:</b>	<b>Preisentwicklung und Volatilität im US SO<sub>2</sub>-Markt</b> .....	<b>40</b>
<b>5</b>	<b><i>LITERATURVERZEICHNIS</i></b> .....	<b>41</b>

# Das Forschungsprojekt JET-SET

## Ausgangsproblem

Die Unterzeichnung des Kyoto-Protokolls im Jahre 1997 markiert für die Entwicklung und Umsetzung der Klimapolitik in der Europäischen Union und in der Bundesrepublik Deutschland einen wichtigen Meilenstein: Seit diesem Zeitpunkt kommt der Konkretisierung und Einführung sog. flexibler Mechanismen – und hier insbesondere dem Handel mit Zertifikaten für Treibhausgasemissionen (kurz: Emissionshandel) zwischen den Industriestaaten – eine herausragende Rolle zu. Mit der Entwicklung von Emissionshandelssystemen (EHS) wird der in Europa bislang vorwiegend ordnungsrechtlich ausgerichteten Umweltpolitik ein marktwirtschaftliches Instrumentarium hinzugefügt, das in seiner Ausgestaltung auf nationaler Ebene neue gesellschaftliche Chancen und Risiken birgt. Über das Ausmaß der ökologischen, wirtschaftlichen, institutionellen und sozialen Folgewirkungen besteht jedoch weiterhin ein großer Informations- und Forschungsbedarf – und dies, obwohl hierzu bereits eine Reihe wirtschafts- bzw. politikwissenschaftlicher Studien vorliegen. Darüber hinaus besteht sowohl für die sog. 1. Kyoto-Verpflichtungsperiode zwischen 2008 und 2012 als auch für die Phase ab dem Jahre 2012 ein großes Informationsdefizit über die sektorale und geographische Weiterentwicklung des europäischen Emissionshandelssystems.

Das vom BMBF geförderte Projekt „Emissionshandel als ein sozial-ökologischer Transformationsprozess“ (**JET-SET** – **J**oint **E**missions **T**radin**G** as a **S**ocio-**E**cological **T**ransformation) befasst sich mit einer Analyse der Folgewirkungen der Implementierung des Emissionshandels in der EU und in Deutschland.

## Zielsetzungen des Gesamtvorhabens

Dem Verbundvorhaben liegt die übergeordnete **Hypothese** zugrunde, dass die Einführung eines europäischen Emissionshandelssystems weit reichende sozial-ökologische Transformations- und Lernprozesse auslöst, die u.a.

- das institutionelle Setting klimapolitischer Maßnahmen auf europäischer und nationalstaatlicher Ebene verändern,
- die Entscheidungsrationitäten und das Marktverhalten von Unternehmen maßgeblich beeinflussen,
- sich auf den öffentlichen Diskurs über – und die öffentliche Wahrnehmung von – (inter-)nationaler Klimapolitik auswirken und die sich schließlich
- auf die Gestaltung der gesellschaftlichen Naturverhältnisse auswirken.

In dieser Hinsicht lässt sich die Einführung eines europäischen Emissionshandelssystems als ein Transformationsprozess begreifen, der gleichermaßen soziale und ökologische Dimensionen in ihren Wechselwirkungen umfasst.

Die **Zielsetzungen** des Verbundvorhabens liegen

- in der wissenschaftlichen Begleitung der Einführung eines EHS in der EU und der Bundesrepublik Deutschland,
- in einer integrierten Abschätzung und Bewertung ausgewählter (zu erwartender) ökonomischer, ökologischer und sozialer Folgewirkungen eines EHS,
- in der Formulierung von Empfehlungen für die Ausgestaltung eines künftigen EHS und schließlich in einer
- konzeptionellen und theoretischen Einbettung der Forschungsergebnisse in die interdisziplinäre Nachhaltigkeitsforschung.

## Aufbau des Gesamtvorhabens

In der **Struktur des Gesamtvorhabens** spiegeln sich ein *analytisches* und ein *praktisch-politisches Element* sozial-ökologischer Transformationen durch die Einführung eines europäischen Emissionshandelssystems wider:

Eine **erste Projektphase** befasst sich in analytischer Perspektive mit den sich gegenwärtig abzeichnenden, durch ein europäisches EHS ausgelösten Transformationsprozessen. Entsprechend der Zielsetzungen befassen sich die Basisprojekte (BP) 1-4

- mit Transformationen der institutionellen Rahmenbedingungen im Bereich der europäischen Klimapolitik (BP 1),
- mit der Veränderung von Unternehmensstrategien (BP 2),
- mit der Veränderung von Diskursen und öffentlicher Wahrnehmung von Klimapolitik (BP 3)
- und mit Landnutzungsänderungen am Beispiel von Energiepflanzen (BP 4).

Weitere Bausteine liegen in der Entwicklung einer integrierten Forschungsperspektive für das Gesamtprojekt bzw. in der Sondierung von Gender-Aspekten internationaler Klimapolitik.

Die **zweite Projektphase** befasst sich mit den Potenzialen und Risiken einer Vernetzung des EU-Emissionshandelssystems mit anderen entstehenden Emissionshandelssystemen in Nicht-EU-Staaten und unternimmt eine integrierte Abschätzung und Bewertung dieser möglichen strategischen Verknüpfung von Systemen. Dabei werden folgende Fragestellungen bearbeitet.

- (1) Welche Länder planen momentan den Aufbau eines nationalen CO<sub>2</sub>-Emissionshandelssystems? In welchen zeitlichen Dimensionen werden diese nationale Handelssysteme aufgebaut?
- (2) Welche ökonomischen Wirkungen (Kosten, Zertifikatepreis) lösen verschiedene Alternativen („storylines“) der Verknüpfung des EU-Systems mit anderen nationalen Systemen aus?
- (3) Können anspruchsvolle Emissionsreduktionsziele mit Hilfe der Verknüpfung von Emissionshandelssystemen für die Phase nach 2012 erreicht werden?
- (4) Welche institutionellen und prozeduralen Anforderungen müssen erfüllt sein, um potentielle Verknüpfungen verschiedener Emissionshandelssysteme zu ermöglichen?

Die Fragestellungen werden in vier Querschnittsprojekten behandelt:

- Querschnittsprojekt 1: Modelle und Politikscenarien von Vernetzungen
- Querschnittsprojekt 2: Beiträge zu ökologischen Stabilisierungszielen
- Querschnittsprojekt 3: Ökonomische und ökologische Wirkungen
- Querschnittsprojekt 4: Institutionelle und prozedurale Rahmenbedingungen

## Rolle dieses Arbeitspapiers im Gesamtvorhaben

Dieses Paper wurde im Rahmen des JET-SET Basisprojekts 2 „Risiko und Marktmacht“ erstellt und befasst sich mit dem Teilbereich „Risiko“. Das Projekt geht davon aus, dass alternative Bewertungsverfahren von Investitionsrisiken mit der Einführung eines Emissionshandelssystems regenerative und dezentrale Energieträger günstiger als klassische Verfahren bewerten. Um dem Ergebnis vorzugreifen: Diese Hypothese kann im Rahmen dieses Papers nicht verifiziert werden, die Kapitalwertmethode erzielt ähnliche Bewertungsergebnisse wie die Bewertung von Realoptionen.

# 1 Einleitung

Anfang 2005 startete in Europa der Handel mit Emissionsrechten für Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>). Damit hat ein bisher in der Wissenschaft diskutiertes Instrument Eingang in die praktische Umweltpolitik gefunden. Mehrere tausend Anlagen, die CO<sub>2</sub> ausstoßen, sind betroffen, wodurch sich die Rahmenbedingungen für viele Unternehmen ändern. War der Ausstoß von CO<sub>2</sub> bisher weitestgehend unreguliert, so müssen die Unternehmen zukünftig eine Obergrenze an erlaubten Emissionen einhalten. Dies hat zur Folge, dass Entscheidungen über Investitionen in die verschiedensten Vermeidungsmaßnahmen zu treffen sind. Sollen die knappen Finanzmittel eines Energieversorgungsunternehmens beispielsweise in den Neubau eines effizienteren Gaskraftwerks fließen oder eher in den Bau einer Windkraftanlage? Diese Fragestellungen sind für die Unternehmen prinzipiell nicht neu. Die Entscheidung über Investitionen gehört zur täglichen Praxis. Allerdings sind viele Entscheider mit den durch den Emissionshandel gesetzten Rahmenbedingungen nicht vertraut. Dabei sind Investitionen wichtige Determinanten für die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen. Von den getroffenen Entscheidungen sowie dem Erfolg der Investition hängt der zukünftige Wert des Unternehmens ab. Im Rahmen dieser Arbeit wird anhand von Beispielen untersucht, wie Investitionen in Maßnahmen zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen bewertet werden sollten. Aufgrund seiner exponierten Stellung im Rahmen des Emissionshandels in der Europäischen Union (EU) liegt der Fokus dabei auf Maßnahmen im Energiesektor.

## 1.1 Problemstellung

In Deutschland bzw. Europa war in der Umweltpolitik im Hinblick auf Umweltschutz in der industriellen Produktion bisher das Ordnungsrecht (command and control) vorherrschendes Prinzip. In diesem Kontext werden in der Regel genaue technische Vorgaben gemacht, die von den Unternehmen umzusetzen sind, um die Betriebsgenehmigung für eine von ihnen betriebene Anlage zu erhalten. Den Unternehmen verbleiben kaum Wahlmöglichkeiten bei der Entscheidung über die Investition in die geforderte Umwelttechnologie. Darüber hinaus gab es in Deutschland für den Industriesektor freiwillige Selbstverpflichtungen, die in der Regel relative Minderungsziele enthielten.

Im Rahmen des Emissionshandels wird ein grundlegend anderer Regulierungsansatz verfolgt. Den Unternehmen wird nur eine gewisse Menge an Emissionen für den Betrieb ihrer Anlagen insgesamt vorgegeben. Die Einhaltung dieser erlaubten Emissionsmenge bleibt den Unternehmen überlassen. Die Wahl, in welche Vermeidungsalternative investiert werden soll, um das vorgegebene Reduktionsziel zu erreichen, liegt allein in der Entscheidungsgewalt der Unternehmen. Den Stromerzeugungsunternehmen stehen dabei eine ganze Bandbreite von Mög-

lichkeiten zur Verfügung. Der Third Assessment Report des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) führt beispielsweise folgende Punkte an (IPCC 2001, S. 235):<sup>1</sup>

- Effizientere Nutzung fossiler Brennstoffe (z.B. durch Kraftwärmekopplung);
- Wechsel zu kohlenstoffärmeren Brennstoffen (z.B. von Kohle zu Gas);
- Dekarbonisierung der Rauchgase oder des Brennstoffes selbst (z.B. Herstellung von Wasserstoff zur Nutzung in Brennstoffzellen);
- Ausbau der regenerativen Energien (z.B. Windkraftanlagen)

Ferner müssen die Anlagenbetreiber die Reduktionsmaßnahmen auch nicht selbst durchführen. Sie können die benötigten fehlenden Emissionsrechte auch am Markt erwerben, ohne eigene Vermeidungsanstrengungen vorzunehmen. Die Entscheidung richtet sich dabei am Marktpreis für das Emissionsrecht<sup>2</sup> aus. Ist es günstiger, selbst zu vermeiden, werden entsprechende Investitionen vorgenommen. Andernfalls werden die Zertifikate erworben. Dies ermöglicht den Unternehmen auch, über den optimalen Zeitpunkt einer eventuellen Investition zu entscheiden. Der Emissionshandel gewährt den betroffenen Akteuren somit ein hohes Maß an Wahlfreiheiten bzw. Handlungsoptionen.

Die Preise für Zertifikate sind dabei – wie bei allen marktgängigen Gütern – Schwankungen unterworfen bedingt durch Änderungen in den Nachfrage- und Angebotsbedingungen (Investition unter Unsicherheit). Da der Emissionshandel den Unternehmen Flexibilität bei ihren Anpassungsentscheidungen gewährt, können die Anlagenbetreiber auf die volatilen Preise reagieren. Damit ändert sich die Entscheidungssituation gegenüber dem bisher in der Umweltpolitik verbreiteten command and control-Ansatz grundlegend. Die Investitionsentscheidung stellt sich in der Regel nicht mehr als isolierte ‚Einmalentscheidung‘ dar. Vielmehr kann über aktives Management auf Marktänderungen reagiert und eine getroffene Entscheidung revidiert bzw. angepasst werden. Einige Vermeidungsmaßnahmen beinhalten dabei eine höhere Flexibilität, um auf Änderungen reagieren zu können, als andere. In einer solchen Situation kommt der adäquaten Bewertung der eben beschriebenen Handlungsspielräume eine erhöhte Bedeutung zu, um die verschiedenen zur Auswahl stehenden Vermeidungsalternativen vergleichen zu können und somit die Gefahr von Fehlinvestitionen zu reduzieren. Im folgenden soll die Bedeutung von Handlungsspielräumen bei der Bewertung von Investitionen an einem einfachen Beispiel verdeutlicht werden.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Der Third Assessment Report führt als fünfte Möglichkeit noch den vermehrten Ausbau von Atomenergie an. Während in vielen Ländern diese Option tatsächlich verfolgt wird (siehe z.B. Frankreich), hat die derzeitige Bundesregierung den Ausstieg aus der Kernenergie beschlossen. Daher wird diese Variante in dieser Arbeit nicht näher verfolgt. Ebenso führt der Assessment Report Maßnahmen zu Energieeinsparung und Energieeffizienz auf. Auch diese spielt in diesem Kontext keine Rolle.

<sup>2</sup> Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die Begriffe Emissionsrecht und Zertifikat synonym verwendet. Ein Zertifikat verbrieft das Recht, eine bestimmte Menge (in der Regel eine Tonne) des Gases zu emittieren.

<sup>3</sup> Das folgende Beispiel ist ein idealtypisches Beispiel.

## 1.2 Methodik

### *Investitionsentscheidungen auf Basis der Kapitalwertmethode*

Die Wichtigkeit der verwendeten Methode zur Bewertung von Investitionen bei Vorliegen von Handlungsspielräumen soll anhand der einfachen, aber in der Praxis sowie der Wissenschaft noch vorherrschenden Kapitalwertmethode (KWM) kurz angerissen werden.

Das Management eines Energieversorgungsunternehmens habe sich entschieden, in ein neues Kraftwerk zu investieren. Zur Auswahl stehen zwei Kohlekraftwerke (siehe Tabelle 1). Beide Varianten unterscheiden sich lediglich darin, dass Alternative zwei eine etwas höhere Anfangsinvestition erfordert. Demgegenüber besteht bei dieser Variante die Möglichkeit einer Zufeuerung von Biomasse (20%). In diesem Fall wird der Brenner zu 80% mit Kohle und zu 20% mit Biomasse befeuert.<sup>4</sup> Die Entscheidung für die Option der Biomassezufeuerung zieht allerdings die Notwendigkeit einer zusätzlichen Investition nach sich, um den Brenner entsprechend nachzurüsten. Diese Wahlmöglichkeit besteht bei der unter Alternative 1 verwendeten Technologie nicht.

**Tabelle 1:** Einfaches Beispiel für eine Investitionsentscheidung

	<b>Alternative 1</b>	<b>Alternative 2</b>
Brennstoff	Kohle	Kohle
Anfangsinvestition [Mio. Euro]	200	220
Brennstoffkosten [Mio. Euro]	100	100
CO <sub>2</sub> -Emissionen [Mio. t]	40	40
Flexibilität	keine	20% Biomasse Zufeuerung
Zusatzinvestition [Mio. Euro]		42

Für die durch die Verbrennung entstehenden Emissionen muss der Anlagenbetreiber Emissionszertifikate kaufen.<sup>5</sup> Werden beide Varianten mit Kohle betrieben, entstehen jeweils Emissionen in Höhe von 40 Millionen Tonnen. Bei der Wahl der Zufeuerung werden 20% dieser Emissionen eingespart, 8 Millionen Tonnen.<sup>6</sup>

Es sei angenommen, dass der Anlagenbetreiber risikoneutral ist und der Betrachtungszeitraum zwei Perioden umfasst:

- in Periode  $t = 0$  fallen die Kapitalkosten an, um das Kraftwerk zu bauen,

<sup>4</sup> Aus Vereinfachungsgründen wird angenommen, dass der Preis für beide Brennstoffe identisch ist.

<sup>5</sup> Von der Problematik der Anfangszuteilung wird an dieser Stelle abstrahiert.

<sup>6</sup> Biomasse wird in diesem Beispiel als CO<sub>2</sub>-freier Brennstoff angesehen, da die durch die Verbrennung ausgestoßenen Emissionen vorher beim Aufbau der Biomasse gebunden wurden.



- in Periode  $t = 1$  sind die Kosten für Brennstoff und  $\text{CO}_2$ -Emissionen als Pauschalsumme zu entrichten. In diese Periode fallen auch die Investitionskosten für die Brennernachrüstung, falls sich das Unternehmen für diese Option entscheidet.

Alle Größen der Investitionsentscheidung seien sicher bis auf den Preis für die Emissionszertifikate. Es sei angenommen, dass er jeweils mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% in Periode  $t = 1$  entweder 5 Euro/ $t_{\text{CO}_2}$  oder 20 Euro/ $t_{\text{CO}_2}$  beträgt. Da Risikoneutralität unterstellt wurde, sind die Erwartungswerte der zukünftigen Cashflows – unabhängig von deren Risikostruktur – mit dem risikofreien Zinssatz zu diskontieren; dieser sei 10%.<sup>7</sup>

#### *Entscheidung ohne Handlungsspielraum*

Vorerst sei die Möglichkeit der Zufeuerung von Biomasse vernachlässigt. Es wird nur die Kostenseite betrachtet. Eventuelle Erträge aus dem Betrieb der Anlagen (z.B. Stromabsatz) bleiben unberücksichtigt. Die entsprechenden Kapitalwerte (net present values, NPV) ergeben sich als:

$$NPV(\text{Alternative1}) = 200 + \frac{100 + 40 \times (0,5 \times 5 + 0,5 \times 20)}{1 + 0,1} = 745 \text{ Mio. Euro}$$

$$NPV(\text{Alternative2}) = 220 + \frac{100 + 40 \times (0,5 \times 5 + 0,5 \times 20)}{1 + 0,1} = 765 \text{ Mio. Euro}$$

Das Unternehmen sollte sich daher für die erste Alternative als Investition entscheiden, was bei der vorliegenden Entscheidungssituation nicht weiter verwunderlich ist.

#### *Entscheidung mit Handlungsspielraum*

Die Situation ändert sich, wenn der Handlungsspielraum bei Alternative 2 mit in die Bewertung einbezogen wird. Bei dieser Variante kann sich das Unternehmen in  $t = 1$  abhängig von der Entwicklung der Zertifikatspreise für die Zufeuerung von Biomasse entscheiden. Nimmt der Preis in  $t = 1$  den höheren Wert an, lohnt sich die Brennernachrüstung. Das Unternehmen muss zwar 42 Millionen Euro investieren, spart aber im Gegenzug einen Teil der Zertifikatekosten in Höhe von 160 Millionen Euro durch die Nutzung der  $\text{CO}_2$ -freien Biomasse. Im Fall des geringeren Preises in  $t = 1$  übersteigen die Investitionskosten für die Nachrüstung die eingesparten Kosten für  $\text{CO}_2$ . Das Unternehmen wird mithin nicht diese Möglichkeit wählen.

<sup>7</sup> Ein risikoneutraler Entscheidungsträger ist indifferent, ob er einen unsicheren Cashflow in  $t$  erhält oder den entsprechenden Erwartungswert. Da Erwartungswerte sicher sind, ist als Diskontrate der risikofreie Zins zu verwenden.

Während sich bei Alternative 1 nichts ändert, muss das Kalkül bei Alternative 2 an die Flexibilität bei der Investitionsentscheidung angepasst werden. Der Kapitalwert der Investitionskosten beträgt:

$$NPV'(Alternative2) = 220 + \frac{100 + (0,5 \times 40 \times 5 + 0,5 \times (32 \times 20 + 42))}{1 + 0,1} = 712 \text{ Mio. Euro.}$$

Durch die Existenz des Handlungsspielraumes erweist sich nun die Alternative 2 als die vorteilhaftere. Bei dieser Variante kann das Unternehmen hinsichtlich der Ausnutzung der Option abwarten, wie sich der Preis für die Emissionsrechte entwickelt und dann situationsbedingt über die Brennernachrüstung entscheiden. Dieser Flexibilität misst der Entscheidungsträger einen gewissen Wert bei, der sich als Differenz der beiden Kapitalwerte für Alternative 2 ergibt, 745 Mio. Euro – 712 Mio. Euro = 33 Mio. Euro. Das Unternehmen kann sich bei dieser Variante optional für die Brennernachrüstung entscheiden, weshalb auch von einem zusätzlichen Optionswert gesprochen werden kann.

Das Beispiel hat die Wichtigkeit verdeutlicht, Handlungsspielräume bei Investitionsentscheidungen explizit zu bewerten. Dies bezeichnet Kensinger (1987, S. 32) auch als „Valuing active management“. Bei der einfachen Kapitalwertmethode, die im Fall der Entscheidung ohne Handlungsspielräume verwendet wurde, können diese nicht berücksichtigt werden, da sie eine „Jetzt oder nie“-Entscheidung abbildet.<sup>8</sup> Die Bewertung im zweiten Fall erfolgte mittels der dynamisierten Variante der Kapitalwertmethode, in der Regel eher unter dem Begriff Entscheidungsbaumverfahren bekannt. Die entscheidende Frage ist, ob dadurch der Wert der Flexibilität einer Investition problemadäquat erfasst wird. Dies möge eine einfache Überlegung veranschaulichen. Der gegenwärtige Preis für das Emissionsrecht in der Periode  $t = 0$  sei 8 Euro. In diesem Fall kann der durch die (dynamische) Kapitalwertmethode erhaltene Wert der Flexibilität nicht mehr dem „wahren“ Marktwert entsprechen, da bei der Entscheidungssituation keine Risikoneutralität mehr besteht, die im Beispiel unterstellt wurde. Im gegenwärtigen Marktpreis müssten die Informationen über die zukünftige Marktentwicklung der Emissionsrechte enthalten sein. Der gegenwärtige Preis müsste dem diskontierten Erwartungswert der zukünftigen Marktpreise entsprechen. Allerdings gilt

$$8 \neq \frac{(0,5 \times 20 + 0,5 \times 5)}{1 + 0,1}.$$

Das Fazit lautet somit: Die einfache Kapitalwertmethode erfasst gar nicht die Handlungsspielräume und das Entscheidungsbaumverfahren führt in der Regel zu „verfälschten“ Ergebnissen. Das Problem bei beiden Verfahren liegt dabei in der Bestimmung der Diskontrate bzw. den Eintrittswahrscheinlichkeiten der zukünftigen Ereignisse. Trigeorgis (1995, S. 9) bemerkt dazu: „The failure of traditional DCF (Discounted Cash Flow, Anmerkung des Verf.) methods

<sup>8</sup> Die Kapitalwertmethode wurde ursprünglich für die Bewertung von festverzinslichen Wertpapieren entwickelt, bei denen es keine Wahlmöglichkeiten gibt (Trigeorgis 1995, S. 7). Eine eingehendere Auseinandersetzung mit den Problemen der herkömmlichen Bewertungsmethoden erfolgt in Kapitel 3. An dieser Stelle wird die Thematik nur kurz angerissen, um die Wahl der Realoptionstheorie als Bewertungsmethode zu motivieren.

to channel resources appropriately derives mainly from their inability to properly recognize the value of active management in adapting to changing market conditions or to properly capture strategic value". Dixit/Pindyck (1994, S. 136) formulieren es etwas pointierter: „... the simple NPV (Net Present Value, Anmerkung des Verf.) rule is not just wrong, it is often very wrong“.

Gerade bei der Flexibilität, die der Emissionshandel gewährt, ist es jedoch von hoher Bedeutung, ein geeignetes Verfahren zur Evaluierung der verschiedenen zur Verfügung stehenden Vermeidungsalternativen zu verwenden, das die Wahlfreiheiten adäquat bewertet, um Fehlinvestitionen zu vermeiden und den Unternehmenswert langfristig zu erhalten bzw. zu steigern. Diese Möglichkeit bietet die Realoptionstheorie, die die Schwächen der traditionellen Methoden überwindet, indem sie Bewertungsverfahren aus der Finanzmarktökonomie auf Investitionsentscheidungen überträgt. Investitionen werden als Investitionsmöglichkeiten (Realoptionen) aufgefasst. Die Bewertung basiert analog der Bepreisung von Finanzoptionen auf einem am Markt gehandelten Gut.<sup>9</sup> Dadurch werden die Probleme bei der Wahl der Diskontrate bzw. den Eintrittswahrscheinlichkeiten umgangen, indem Marktdaten zur Bewertung herangezogen werden. Während bei den herkömmlichen Verfahren häufig subjektive Einschätzungen zur Bestimmung der entscheidungsrelevanten Einflussgrößen verwendet werden, wird bei der Realoptionstheorie darauf komplett verzichtet. Beim Emissionshandel bietet sich als der Bewertung zugrunde liegende „Aktie“ das Emissionszertifikat an, dessen Preisverlauf am Markt beobachtet werden kann.

In dieser Arbeit wird daher die Realoptionstheorie auf Investitionsentscheidungen zur Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen angewendet.

### 1.3 Stand der Forschung

Über den Emissionshandel gibt es in der Zwischenzeit eine fast nicht mehr überschaubare Anzahl von Studien und Veröffentlichungen. Die überwiegende Anzahl der Analysen fokussiert sich dabei auf die Effizienzeigenschaft des Emissionshandels. Generell gilt der Emissionshandel als ein Instrument, das das vorgegebene ökologische Ziel (Reduktionsziel) zu minimalen Kosten erreicht (Kosteneffizienz). Erstmals formal nachgewiesen hat dies Montgomery (1972), der ferner herausfand, dass unter den Annahmen der vollkommenen Konkurrenz die Effizienzeigenschaft unabhängig von der Anfangszuteilung ist. In der Folge gab es eine Reihe theoretisch-analytischer Papiere, die jeweils bestimmte idealisierte Annahmen der vollkommenen Konkurrenz aufgaben, um die Implikationen für die Effizienzeigenschaft abzuleiten (Partialmodelle).

Stavins (1995) hat nachgewiesen, dass bei Berücksichtigung von Transaktionskosten<sup>10</sup> das Ergebnis von Montgomery nicht allgemeingültig ist. Generell führen Kosten, die mit einem

<sup>9</sup> Die Grundlagen der Realoptionstheorie werden in Kapitel 2.2 noch ausführlich erläutert.

<sup>10</sup> In der Zwischenzeit gibt es auch eine Reihe von Studien über die Abschätzung der Höhe der beim Emissionshandel unter verschiedensten Ausgestaltungsvarianten anfallenden Transaktionskosten. Bei-

Austausch von Emissionsrechten verbunden sind, zu geringeren Handelsvolumina und höheren Vermeidungskosten als im Fall ohne Transaktionskosten. Sie wirken daher effizienzmindernd. Bei nicht konstanten marginalen Transaktionskosten hat darüber hinaus die Anfangszuteilung der Rechte einen Einfluss auf die Effizienzeigenschaft des Zertifikatehandels. Montero (1997) hat die Betrachtung um den Faktor Unsicherheit hinsichtlich der Anerkennung eines Transfers von Emissionsrechten (regulatorische Unsicherheit) erweitert. Nur wenn diese Annahmewahrscheinlichkeit exogen ist, bleiben die Aussagen von Stavins unverändert. Kann der Investor hingegen die Wahrscheinlichkeit beeinflussen, lassen sich keine generellen Schlüsse mehr ableiten. Die Ergebnisse hängen von den funktionalen Formen der Grenzvermeidungskosten und der Wahrscheinlichkeit ab. Ferner wurde die Annahme stetiger Vermeidungskostenverläufe aufgehoben und diskrete Vermeidungstechnologien eingeführt, die in diesem Kontext einen größeren Einfluss auf die Effizienzeigenschaft haben als Transaktionskosten oder Unsicherheit.

Neben dem bei Montero beschriebenen Risikofaktor in Form des Verhaltens des Regulators (Genehmigung des Zertifikatetransfers) gibt es noch eine Reihe weiterer Unsicherheiten, denen sich die Akteure im Rahmen eines Emissionshandels gegenübersehen. So können Emissionen nicht mit Bestimmtheit vorhergesagt werden, da sie sowohl von dem Aktivitätsniveau des Unternehmens abhängen als auch von der Emissionsintensität (Godby et al. 1997, Hennesy/Roosen 1999 und Noll 2004)<sup>11</sup>. Eine weitere unsichere Größe für das regulierte Unternehmen ist der Preis der Zertifikate (Carlson/Sholtz 1994, Ben-David et al. 2000, Xepapadeas 2001, Zhao 2003 und Baldursson/von der Fehr 2004). Allen gemeinsam ist die Erkenntnis, dass ein risikoaverser Investor unter Unsicherheit ein geringeres Vermeidungsniveau wählt als unter Sicherheit und somit weniger Zertifikate auf dem Markt anbietet, was ein geringeres Handelsvolumen impliziert. Die Unternehmen verhalten sich bezüglich der Investition in effiziente Vermeidungstechnologien eher abwartend.<sup>12</sup>

Eine dritte Kategorie von Studien befasst sich mit den Auswirkungen von unvollkommenem Wettbewerb auf die Effizienz der Marktallokation. Die Diskussion konzentriert sich dabei auf zwei Problemstellungen. Zum einen geht es um die Ausnutzung von Marktmacht allein auf dem Zertifikatemarkt, um die eigenen finanziellen Lasten aus Vermeidungs- und Zertifikatekosten über eine Manipulation des Zertifikatepreises zu minimieren (Cost-Minimizing Manipulation) (Hahn 1984, Westkog 1996 und Hagem/Westkog 1998). Zum anderen wird die Möglichkeit betrachtet, die Wettbewerbsfähigkeit rivalisierender Unternehmen derselben Branche durch gezielte Beeinflussung deren Kosten zu schwächen bzw. Markteintrittsschranken aufzubauen, welche Neuemittenten am Marktzutritt hindern. Theoretisch kann strategisches Verhalten auf dem Zertifikatemarkt eine effektive Strategie sein, um den eigenen Marktanteil im Absatzmarkt zu vergrößern (Exclusionary Manipulation) (Misiolek/Elder

---

spielhaft seien hier Cason/Gangadharan 1998 und 2001, Gangadharan 2000, Woerdman 2001 und Betz 2003 angeführt.

<sup>11</sup> Bei einem Energieversorger hängen die jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen sowohl von der Stromproduktion als auch vom Kraftwerkseinsatz ab. Beide Größen sind ex ante unsicher. Zum einen schwankt die nachgefragte Strommenge (z.B. aufgrund von Wetterbedingungen) und zum anderen hängt der Kraftwerkseinsatz neben vielen anderen Determinanten vom Verhältnis der Brennstoffpreise ab.

<sup>12</sup> Dieses Ergebnis geht auf Sandmo (1971) zurück, der für den Fall eines allgemeinen Produzenten zeigt, dass unter Risikoaversion und Preisunsicherheit ein risikoaverses Unternehmen ein geringeres Produktionsniveau wählt als ein risikoneutrales.

1989, von der Fehr 1993 und Sartzetakis 1997).<sup>13</sup> In beiden Fällen wird ein Monopolist mehr Rechte halten als er eigentlich benötigen würde (Horten), was zu Ineffizienzen führt (Malik 2002 und Godby 2002).

Bei Montgomery geht es um die Kosteneffizienz des Instruments zu einem bestimmten Zeitpunkt. Durch den Handel mit Emissionsrechten kommt es zum Ausgleich der Grenzvermeidungskosten zwischen den beteiligten Akteuren. Können die Emittenten zusätzlich zur räumlichen Flexibilität die Zertifikate periodenübergreifend handeln, stellt sich die Frage nach dem optimalen Preispfad, wobei generell zwei Möglichkeiten der zeitlichen Übertragbarkeit gegeben sind. Zum einen können Zertifikate für den Gebrauch in späteren Perioden angespart werden (Banking). Zum anderen kann der Gebrauch der Rechte auch zeitlich vorgezogen werden (Borrowing). Aufbauend auf den Arbeiten von Tietenberg (1985) und Crownshaw/Kruse (1996), deren Modelle zeitdiskret sind, leitet Rubin (1996) mittels optimaler Kontrolltheorie den Preispfad für den zeitkontinuierlichen Fall her. Bei völliger zeitlicher Flexibilität – keine Beschränkung von Borrowing und Banking – folgt der Zertifikatspreis der Hotelling Regel, d.h. der Preis steigt mit dem Zins. Bei Einschränkung des Borrowing liegt die Wachstumsrate des Preispfades unter dem Zinssatz. Kling/Rubin (1997) zeigen, dass unter Einbeziehung der Schadensfunktion für Emissionen unbeschränkte zeitliche Flexibilität nicht sozial optimal ist, wenn die private und die soziale Diskontrate auseinanderfallen. In diesem Fall wird das soziale Optimum erreicht, wenn der Regulator anfangs die Gesamtmenge an Emissionsrechten für den gesamten Betrachtungshorizont korrekt festlegt und ein Austauschverhältnis für intertemporalen Handel bestimmt, das sich an den aktuellen, den abdiskontierten zukünftigen Grenzschaäden sowie der Abbaurate der Emissionen in der Atmosphäre orientiert (Leiby/Rubin 2001). Phaneuf/Requate (2002) erweitern die Analysen um den Aspekt der Unsicherheit und leiten daraus Aussagen zum Einfluss des Banking auf den Investitionsanreiz der Unternehmen ab. In den meisten betrachteten Fällen reduziert Banking den Anreiz und führt zu Investitionen unterhalb des sozial erwünschten Niveaus. Die Ergebnisse werden jedoch durch die Annahme getrieben, dass der Regulator in jeder Periode die optimale Menge an Emissionsrechten verteilt, was unter Sicherheit intertemporalen Handel obsolet erscheinen lässt. Während Phaneuf/Requate Unsicherheit hinsichtlich der Vermeidungskosten betrachten, untersucht Innes (2003) den Einfluss von Banking, wenn die Emissionsverläufe stochastisch sind. Im Gegensatz zu Phaneuf/Requate kommt Innes zum Ergebnis, dass Banking den Anreiz für Unternehmen erhöht, in effiziente Vermeidungstechnologien zu investieren.<sup>14</sup> Den speziellen Fall des amerikanischen Emissionshandelssystems für Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) (Acid Rain

<sup>13</sup> Bonus (1983) steht diesem Argument kritisch gegenüber. Strategisches Verhalten auf dem Zertifikatemarkt mit dem Ziel, konkurrierende Unternehmen auf dem Absatzmarkt auszuschalten, sei eine sehr teure und darüber hinaus zielungenaue Strategie, da alle verfügbaren Emissionsrechte aufgekauft werden müssten und damit auch die Emittenten anderer Absatzmärkte aus der Region gedrängt würden. Effizienter wäre es, Konkurrenten gezielt auf dem Absatzmarkt zu unterbieten. Die Gefahr des Missbrauchs von Marktmacht bestehe nur, wenn auf dem Zertifikatemarkt nur Emittenten desselben Absatzmarktes agieren.

<sup>14</sup> Der Grund für diese Unterschiede in den Ergebnissen liegt in den Betrachtungsweisen. Phaneuf/Requate modellieren Investitionen in Vermeidungstechnologien und Banking als Substitute hinsichtlich der Reduktionsvorgaben durch den Regulator mit der Folge, dass die Einführung von Banking den „Druck“ zu investieren abschwächt. Innes, hingegen, sieht Banking als risikomindernden Faktor für die Unternehmen an, wodurch ihre Investitionsbereitschaft steigt. Über die Möglichkeit des Banking wird das Risiko reduziert, aufgrund unvorhergesehen hoher Emissionen die Reduktionsvorgaben nicht einzuhalten und somit einer Sanktion (Strafzahlung) zu unterliegen.

Program) untersuchen Bailey (1998), Schennach (2000) sowie Ellerman/Montero (2002). Im Gegensatz zu den bisherigen Analysen ist dort nur Banking erlaubt. Ferner unterliegen die Reduktionsvorgaben für die Unternehmen einer zeitlichen Dynamik, d.h. sie werden zu bestimmten Zeitpunkten angepasst bzw. verschärft. Daraus folgt, dass in frühen Jahren Emissionsrechte angespart werden, um sie in späteren Perioden zu verwenden, bis zu einem bestimmten Zeitpunkt die Emissionsbank aufgebraucht sein wird. Solange die Emissionsbank gefüllt ist, steigt der Spotpreis der Zertifikate mit dem Zins – analog zu Ruby (1996). Ab dem Zeitpunkt, an dem die Emissionsbank leer ist, entspricht der Preis wieder den Grenzkosten. Die Möglichkeit des Banking hat somit eine glättende Wirkung auf den Verlauf der Emissionen und des Zertifikatepreises.

Die Effizienzeigenschaft wurde in der Zwischenzeit auch durch diverse quantitative Analysen untermauert. Für verschiedenste Annahmen und Szenarien wurde die Kostenvorteilhaftigkeit des Emissionshandels gegenüber nicht koordinierten Maßnahmen ausgewiesen.<sup>15</sup> Dabei ist generell zwischen Top-down- und Bottom-up-Ansätzen zu unterscheiden. Top-Down-Ansätze basieren in der Regel auf aggregierten gesamtgesellschaftlichen Wohlfahrtsmaßen (Änderungen des Bruttosozialproduktes) und unterstellen stetige Vermeidungskostenverläufe. Montero (1997) hat jedoch die Bedeutung von diskreten Vermeidungskostenverläufen für die Effizienzeigenschaft aufgezeigt. Technologiebasierte Bottom-up-Modelle bilden Vermeidungskosten als Stufenfunktionen ab. Allerdings liegt den Kostenschätzungen in der Regel das Kapitalwertkalkül zugrunde. Obige Ausführungen zur Bedeutung von Handlungsspielräumen haben jedoch gezeigt, dass dieses Entscheidungskalkül für Unternehmen im Rahmen des Emissionshandels aufgrund der inhärenten Flexibilität bei der Auswahl von Vermeidungsmaßnahmen eventuell zu kurz greift.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass in der Literatur der Fokus auf der Untersuchung der Effizienzeigenschaft des Emissionshandels lag. Studien, die explizit das Investitionsverhalten von Unternehmen im Rahmen eines Emissionshandels untersuchen, sind nur vereinzelt zu finden. So wenden Janssen (2001) und Springer (2003a und 2003b) die Portfoliotheorie auf die projektbasierten Mechanismen (Joint Implementation und Clean Development Mechanism) des Kyoto-Protokolls an. Während die Realloptionstheorie in anderen Bereichen bereits eine gewisse Verbreitung erfahren hat<sup>16</sup>, wurde sie im Rahmen des Emissionshandels, der eigentlich die Voraussetzungen exemplarisch erfüllt, nur selten angewendet. Bisherige Studien befassten sich vor allem mit dem Handel von SO<sub>2</sub>-Emissionen in den USA. In einer frühen Phase bereits vor dem eigentlichen Start des Acid Rain Programs im Jahr 1995 analysierten Chao/Wilson (1993), Herbelot (1994a und 1994b) sowie Edleson/Reinhardt (1995) das Emissionshandelssystem unter dem Blickpunkt der Realloptionstheorie. Erst neuerdings wurde dieser Analyserahmen wieder aufgegriffen durch Insley (2003) und Gupta/Maranas (2003). Allerdings ging es ausschließlich um die Bewertung von Vermeidungsmaßnahmen im Rahmen eines Handels von SO<sub>2</sub>-Emissionen. Bei CO<sub>2</sub> handelt es sich jedoch um einen um einen anderen Markt, zum anderen sind ganz andere Reduktionsmaßnahmen relevant, wenn es um die Vermeidung um CO<sub>2</sub> geht, obwohl der Kern der Akteure der gleiche ist,

<sup>15</sup> Für einen Überblick siehe z.B. IPCC (2001, S. 499ff.) sowie Springer (2003a).

<sup>16</sup> Beispielhaft seien hier die Energieerzeugung (siehe z.B. Frayer/Uludere 2001), die Erdölextraktion (siehe z.B. Meise 1998) und Projekte im Rahmen von Forschung und Entwicklung (siehe z.B. Bockemühl 2001) angeführt.



nämlich die Energieversorger mit ihrem Kraftwerkspark. Um diese Lücke in der Wissenschaft zu schließen, untersucht die vorliegende Studie ausgewählte CO<sub>2</sub>-Vermeidungsmaßnahmen in der Energiewirtschaft unter Anwendung der Realoptionstheorie. In diesem Kontext ist dem Verfasser bisher erst eine Veröffentlichung bekannt (de Jong/Walet 2004), die dieses Thema bisher aufgegriffen hat. Neben einem theoretischen Fehler<sup>17</sup> wird auch nur eine Warteoption für eine abstrakte Vermeidungsmaßnahme abgebildet. Diese Studie vermag darüber hinaus zu gehen, indem – neben der Vermeidung des theoretischen Fehlers – praxisnahe Vermeidungsmöglichkeiten identifiziert werden, denen zum Teil mehrere miteinander verbundene Optionen inhärent sind.

## 1.4 Ziele, Arbeitshypothesen und Aufbau der Arbeit

Die zentrale Fragestellung dieser Arbeit ist, ob und wenn ja wie sich das Entscheidungskalkül der Akteure im EU-Emissionshandel für CO<sub>2</sub> ändert, wenn Investitionen in Vermeidungsmaßnahmen als Realoptionen aufgefasst werden im Vergleich zur herkömmlichen Bewertungsweise mittels der Kapitalwertmethode. Dabei werden ausgewählte Reduktionsmaßnahmen in der Energiewirtschaft herausgegriffen und mit der Realoptionstheorie bewertet, die auf der Optionspreisbewertung aus der Finanzmarktökonomie fußt. Der Blick ist zum einen darauf gerichtet, ob – und wenn ja wie – sich die Kostenrelationen der verschiedenen Vermeidungsoptionen ändern. Zum anderen sollen die wesentlichen Entscheidungsparameter identifiziert und deren Einfluss evaluiert werden.

Aufgrund der bisher angestellten Überlegungen steht folgende Arbeitshypothese am Anfang der Betrachtungen:

Flexible Investitionen, d.h. Vermeidungsmaßnahmen mit mehreren inhärenten Optionen, werden durch die Bewertung mittels Realoptionen tendenziell besser abschneiden als unter der Kapitalwertmethode.

Der Rest der Arbeit gliedert sich in drei Kapitel. Im Anschluss an die Einleitung werden die Grundlagen der Realoptionstheorie überblicksartig dargestellt. Auf dieser Basis werden dann in Kapitel drei verschiedene Vermeidungsmöglichkeiten im Energiesektor bewertet, dies sind eine Investition in ein Gaskraftwerk, die Errichtung eines effizienten Kohlekraftwerkes sowie die Möglichkeit von Investitionen in erneuerbare Energien. Abschließend wird ein Fazit gezogen, inwiefern die Arbeitshypothese bestätigt werden konnte und sich die relativen Vorteile der betrachteten Alternativen durch die Verwendung der Realoptionstheorie ändern.

---

<sup>17</sup> Die Autoren gehen von einem Preisfad für das Underlying aus, der nicht der Bedingung der Arbitragefreiheit genügt, d.h. es werden keine willkürlichen Preissprünge, sondern kontinuierliche Preisentwicklungen vorausgesetzt.

## 2 Investition unter Unsicherheit

Einleitend werden kurz die ökonomischen Grundlagen von Investitionen unter Unsicherheit vorgestellt, die mit einer kritischen Würdigung des herkömmlichen Bewertungsansatzes der Kapitalwertmethode enden. In einem zweiten Abschnitt werden Investitionen als Optionen definiert und die Grundlagen der Realoptionstheorie gelegt, auf denen die numerischen Beispiele in Kapitel 3 aufbauen. Abschließend wird geprüft, inwieweit sich die Theorie der Realoptionen für die Anwendung auf den Emissionshandel eignet.

### 2.1 Entscheidungskalküle

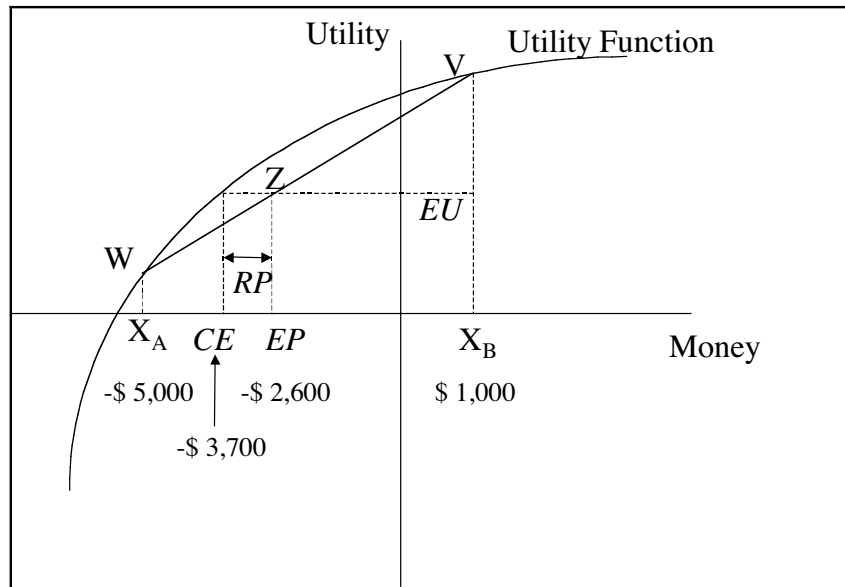
#### 2.1.1 Erwartungsnutzen

Investitionen sind durch einen gewissen zeitlichen Ablauf von Ein- und Auszahlungen gekennzeichnet. Dabei ist heute zu entscheiden, ob in ein bestimmtes Projekt investiert werden soll, wobei der Outcome häufig erst weit in der Zukunft liegt und somit einer gewissen Unsicherheit unterliegt. Unsicherheit liegt in diesem Kontext dann vor, wenn der Entscheidungsträger nicht über vollkommene Information verfügt, also sowohl den tatsächlichen Umweltzustand als auch die unter diesem Zustand durch eine Entscheidung erreichte Handlungskonsequenz kennt. Arrow (1985) bezeichnet Unsicherheit pointiert als „negative measure of information“. Unsicherheit bildet den entscheidungstheoretischen Oberbegriff für Risiko (der Entscheidungsträger kann eine Wahrscheinlichkeit der unsicheren Umweltzustände angeben) und Ungewissheit (eine solche Wahrscheinlichkeitsverteilung ist nicht bekannt) (Bamberg/ Coenenberg 1994). Die wissenschaftliche Literatur konzentriert sich überwiegend auf den Risikofall.

Das Basisprinzip in der Ökonomie zur Bewertung risikoreicher Situationen ist der sogenannte Erwartungsnutzen, häufig auch bezeichnet als Neumann-Morgenstern Nutzenfunktion (vgl. z.B. Kreps 1990, S. 72ff.). Die entscheidende Grundannahme ist das sogenannte Unabhängigkeitsaxiom. Es besagt mehr oder weniger, dass beim Vergleich zweier Risiken das relative Ranking dieser beiden Risiken unabhängig von weiteren Risiken ist. Abbildung 1 veranschaulicht das grundlegende Konzept.



**Abbildung 1:** Das Konzept des Erwartungsnutzens



Die Ereignisse A und B schließen sich gegenseitig aus und beschreiben umfassend die Entscheidungssituation. Ereignis A führt zu einem Verlust in Höhe von \$ 5.000 mit einer Wahrscheinlichkeit von 60%, während B mit einer Wahrscheinlichkeit von 40% zu einem Gewinn von \$ 1.000 führt. Der Wert des Risikos kann durch die Nutzenfunktion in Abbildung 1 verdeutlicht werden, wobei Risikoaversion unterstellt wird (mit dem Einkommen abnehmender Grenznutzen). Die jeweiligen Auszahlungen sind auf der x-Achse abgetragen, während der entsprechende Nutzen auf der y-Achse abgelesen werden kann.

Die erwartete Auszahlung EP (expected payoff) resultiert aus dem mit den Wahrscheinlichkeiten gewichteten Mittel der beiden Einzelereignisse (\$ -2.600). Der Erwartungsnutzen EU (expected utility) ergibt sich in ähnlicher Weise. Die beiden Punkte W und V auf der Nutzenfunktion korrespondieren mit den zugrunde liegenden Ereignissen A und B. Bezogen auf die x-Achse liegt Z gemäß dem Verhältnis der Wahrscheinlichkeiten der beiden Einzelereignisse zwischen W und V. Die x-Koordinate von Z entspricht somit EP. Die y-Koordinate gibt den Erwartungsnutzen von Z an. Aufgrund der Krümmung der Nutzenfunktion existiert ein Wert, das Sicherheitsäquivalent CE (certainty equivalent), wobei der Konsument (bzw. Investor) zwischen diesem Punkt und dem Punkt Z indifferent ist, da beide den gleichen Nutzen stiften. Er bewertet somit den sicheren Verlust von \$ 3.700 genauso wie die Situation in der er sich einem unsicheren Verlust von \$ 2.600 gegenüberstellt. Die Differenz zwischen EP und CE wird als Risikoprämie (RP) bezeichnet.

Je höher die Risikoaversion des Akteurs ist, desto stärker gekrümmt ist die Nutzenfunktion und desto höher ist die von ihm eingeforderte Risikoprämie. Diese Risikoprämie ist somit der

Geldwert, der einem Individuum angeboten werden muss, um es zur unsicheren Konsumenten- bzw. Investitionsentscheidung zu veranlassen.

## 2.1.2 Kapitalwertmethode

Die Betrachtungen zum Erwartungsnutzen sind rein statischer Natur, d.h. auf einen bestimmten Zeitpunkt bezogen. Investitionsentscheidungen hingegen zeichnen sich durch ihre Zeitkomponente aus. Die Zielfunktion eines Individuums beinhaltet nun die Maximierung seines Nutzens über die Zeit, was impliziert, dass Zahlungsströme verschiedener Zeitpunkte vergleichbar gemacht werden müssen. Dazu werden zukünftige Ein- bzw. Auszahlungen mittels der Diskontrate, die den Zeitwert des Geldes widerspiegelt, auf den Gegenwartszeitpunkt abgezinst. Entscheidungen in Unternehmen sollten jedoch soweit wie möglich unabhängig von individuellen Präferenzstrukturen und objektiv nachvollziehbar sein. Diese Bedingung erfüllt das Fisher-Theorem, das eine Bewertung unabhängig von individuellen Präferenzen ermöglicht. Unter diesen Annahmen sollte investiert werden, wenn die Summe der mit der risikolosen Diskontrate abgezinsten Einzahlungen die diskontierten Auszahlungen übersteigen bzw. der Kapitalwert (Net Present Value, NPV) positiv ist.

Die Kapitalwertmethode wurde allerdings ursprünglich für eine risikofreie Welt entwickelt. Um Unsicherheit zu berücksichtigen, sind daher entsprechende Anpassungen erforderlich, die den Kapitalwertansatz um die Gedanken des Erwartungsnutzens erweitern. Dabei geht es darum, eine entsprechende Risikoprämie zu bestimmen. Würde dem unter Abschnitt 3.1.1 dargelegten Ansatz gefolgt werden, entstünde das Problem, dass individuelle Risikoeinstellungen das Ergebnis beeinflussten. Das von Sharpe entwickelte Capital Asset Pricing (CAPM) basiert nicht auf diesen, sondern ermöglicht eine an Marktdaten orientierte Bewertung, indem eine Relation zwischen dem Risiko eines Wertes und der vom Investor erwarteten Rendite hergestellt wird. Es wird unterstellt, dass alle Erträge normalverteilt sind, so dass das Risiko durch die Varianz (bzw. Standardabweichung) der zugrunde liegenden Verteilung vollständig beschreibbar ist. Das Bewertungsproblem reduziert sich mithin zu einer Analyse von Mittelwerten und Varianzen. Ferner wird angenommen, dass alle Investoren die gleichen Erwartungen hinsichtlich der Mittelwerte, Varianzen und Kovarianzen aller relevanten Erträge haben. Unter diesen Bedingungen kann mittels Portfoliotheorie gezeigt werden, dass die erwartete (bzw. geforderte) Rendite einer Investition im Gleichgewicht folgender adjustierten Diskontrate entspricht:

$$(2-1) \quad r = r_f + (r_M - r_f)\beta, \text{ mit } \beta = \frac{\text{Cov}(r, r_M)}{\sigma_M^2}.$$

Nach dem skizzierten Modell sollte der erwartete Ertrag einer Investition bzw. eines anderweitigen Aktivums gleich dem risikolosen Zinssatz  $r_f$  plus einer gewissen Risikoprämie sein. Diese Risikoprämie setzt sich zusammen aus dem erwarteten Ertrag eines Portfolios aller am Markt gehandelten Güter ( $r_m$ ) sowie einem Parameter  $\beta$ , der angibt, inwieweit die Erträge des betrachteten Wertes mit denen des Marktportfolios korrelieren. Es sei noch angemerkt, dass

im Rahmen vom CAPM nur systematische Risiken betrachtet werden, d.h. Risiken die nicht diversifizierbar sind.<sup>18</sup>

Dieser risikoadjustierte Zinssatz wird danach verwendet, um die Zahlungsströme des Investitionsprojektes zu diskontieren. Als Entscheidungskriterium bleibt weiterhin ein positiver Kapitalwert erhalten.

### 2.1.3 Kritik an der Kapitalwertmethode

Die Kapitalwertmethode stellt das Entscheidungsproblem als „Jetzt oder Nie“-Entscheidung dar. Das Unternehmen muss die Investitionsmöglichkeit sofort nutzen oder aber für immer aufgeben. Die grundlegende Idee kapitalmarktorientierter Bewertungsverfahren besteht darin, den Wert eines hinsichtlich Cash Flow- und Risikostruktur vergleichbaren, am Kapitalmarkt gehandelten Assets zu ermitteln und der Bewertung zugrunde zu legen. Die Kapitalwertmethode zieht zu diesem Zweck eine Analogie zwischen Investitionsprojekten und festverzinslichen Wertpapieren. Sie betrachtet Unternehmen als passive Investoren, die unbesehen jeglicher Reaktionsmöglichkeit Umweltentwicklungen hinnehmen müssen, also symmetrisch von günstigen Entwicklungen profitieren und bei ungünstigen verlieren. Investitionsprojekte sind jedoch häufig durch Handlungsspielräume gekennzeichnet, die in einer Asymmetrie von Chancen und Risiken resultieren.<sup>19</sup> Die Kapitalwertmethode kann ihrer Konzeption nach diese Asymmetrie nicht erfassen und resultiert damit in einer tendenziellen Unterbewertung von Projekten, die Handlungsspielräume beinhalten.

Der zweite Kritikpunkt betrifft die Wahl des risikoadjustierten Zinssatzes und steht in engem Zusammenhang mit der Berücksichtigung von Handlungsspielräumen. Im CAPM wird ein konstanter Diskontierungssatz verwendet. Ist ein Projekt jedoch mit Handlungsspielräumen verbunden, so verändert sich auch dessen Risikostruktur im Zeitablauf. Die Verwendung eines konstanten Kalkulationszinsfußes ist in diesem Fall inkorrekt. Hinzu kommt, dass aufgrund des Zinsenszinseffektes die Risikoadjustierung geometrisch mit der Zeit wächst, wodurch kurzfristige Projekte mit relativ sicheren Rückflüssen langfristigen, durch hohe Unsicherheit gekennzeichneten Projekten vorgezogen werden.

---

<sup>18</sup> Systematische Risiken werden auch als Marktrisiken bezeichnet.

<sup>19</sup> Vgl. z.B. Meise (1998, S. 6ff.). Zur Veranschaulichung sei ein Investor unterstellt, der ein neues Kraftwerk bauen will. Nach Errichtung der Anlage hat der Unternehmer jederzeit die Möglichkeit, die Anlage still zu legen, wenn die Strompreise unter die variablen Stromgestehungskosten fallen. Er kann somit sein downside risk beschränken unter Beibehaltung des upside potentials. Diese asymmetrische Beeinflussung der Zahlungsströme durch aktives Management kann die Kapitalwertmethode nicht erfassen. Bei einer ex ante Evaluierung der geplanten Investition würde sie unterstellen, dass die Anlage auch unter diesen Bedingungen betrieben werden würde.

## 2.2 Investition als Option

### 2.2.1 Grundidee und Voraussetzungen für die Anwendbarkeit der Realoptionstheorie

Die durch aktives Management zu schaffenden und zu nutzenden Flexibilitäten und Wachstumspotenziale besitzen in der Regel Optionscharakter. Eine Option ist das Recht, aber nicht die Pflicht, einen Vermögensgegenstand, das sogenannte Basisobjekt oder Underlying (underlying asset), zu einem vorab bestimmten Preis, dem sogenannten Ausübungs- oder Basispreis (exercise price oder strike price), während (amerikanische Option) oder am Ende (europäische Option) eines festgelegten Zeitraumes, der sogenannten Laufzeit der Option oder Optionsfrist, zu erwerben (Kaufoption, call) oder zu veräußern (Verkaufsoption, put). Entsprechend haben Unternehmen das Recht, aber nicht die Pflicht, Investitionsgelegenheiten oder die mit realisierten Investitionsprojekten bzw. Vermögensgegenständen verbundenen Handlungsspielräume zu nutzen. Aufgrund der Tatsache, dass es sich hierbei um Optionen auf reale Vermögensobjekte und nicht auf Finanztitel handelt, wurde der Begriff Realoptionen (real options) geprägt, der erstmals von Meyers (1977) eingeführt wurde.

Investitionsprojekten inhärente Realoptionen, wie die Möglichkeit eines jederzeitigen Abbruchs oder der Projekterweiterung, werden durch entsprechende Planung und Gestaltung des Vorhabens geschaffen. Sie existieren nur dann, wenn eine Investitionsgelegenheit genutzt wird, und stehen lediglich dem Inhaber des realisierten Investitionsprojektes zur Verfügung. Es handelt sich folglich nicht um Möglichkeiten, die jedermann offen stehen und somit keinen Wert besitzen. Der Wert einer Investitionsmöglichkeit, mit der Handlungsspielräume verbunden sind, – nach Trigeorgis (1995, S. 122ff.) der erweiterte Kapitalwert – repräsentiert allgemein die Summe aus dem Barwert der Netto-Rückflüsse des vom Management nicht zu beeinflussenden Investitionsprojektes und dem Wert der dem Management offen stehenden Handlungsspielräume. Ersteres wird als passiver Kapitalwert bezeichnet und stellt den traditionellen Kapitalwert dar. Die Optionskomponente spiegelt hingegen den zusätzlichen Wert der vom Kapitalwert nicht berücksichtigten operativen und strategischen Handlungsspielräume wider.

Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Realoptionstheorie auf einen bestimmten Sachgegenstand sind folgende Bedingungen:

- Flexibilität: Bestünde ein Handlungszwang bzw. gäbe es keine Wahlmöglichkeiten, kann der Investor auch keine zusätzlichen Informationen generieren. In diesem Fall führen Bewertungen nach der Kapitalwertmethode zu korrekten Ergebnissen.
- Irreversibilität: Wird eine Option ausgeübt, ist sie irreversibel vernichtet. Eine Entsprechung bei den Realoptionen findet dieser Tatbestand in der Bedingung von mit der Investition verbundenen sunk costs. Erst das Vorliegen dieser versunkenen Kosten

führt bei der Wahrnehmung einer realen Option zu Opportunitätskosten. Andernfalls könnte die getroffene Entscheidung jederzeit rückgängig gemacht werden und würde somit dem Charakter einer Finanzoption zuwider laufen.

- Unsicherheit: Dieser letzte Punkt ist trivial, da es sich um Entscheidungsprobleme unter Unsicherheit handelt. Wie wir in den weiteren Ausführungen jedoch sehen werden, hat dieser Punkt der Unsicherheit einen entscheidenden Einfluss auf den Wert der Option (Optionsprämie).

## 2.2.2 Grundlagen der Realloptionstheorie

Die einfachste Form der Handlungsmöglichkeit bei Investitionen ist das Warten. Eine Investition kann, muss aber nicht umgesetzt werden. Der Investor kann den Beginn der Investition aufschieben und somit mit der Zeit neue Informationen gewinnen, im Fall des Emissionshandels z.B. wie sich der Zertifikatspreis entwickelt. Er würde sich in diesem Fall die Investitionsmöglichkeit offen halten (Halten der Option). Dieser Chance, Informationen zu gewinnen, misst er einen gewissen Wert bei, den Optionspreis. Investiert er hingegen, ist die Option und somit der Optionswert unwiederbringlich verloren. Diese Opportunitätskosten muss er bei seiner Investitionsentscheidung berücksichtigen, da er ansonsten eine falsche Wahl treffen würde. Bei der Realloptionstheorie geht es mithin genau darum, den Wert dieser Optionen, die durch die mit der Investitionsmöglichkeit verbundenen Handlungsspielräume bedingt sind, zu bestimmen. Die Methodik folgt dabei der von Finanzoptionen (siehe Tabelle 2).

**Tabelle 2:** Analogie zwischen Finanz- und Realloptionen

Optionsterminologie	Finanzoption (Aktie)	Realloption
Wert des Basisobjektes $S$	Aktienkurs	Bruttoprojektwert (Barwert des Brutto-Cash-Flows)
Ausübungspreis $X$	Ausübungspreis	Barwert der Investitionsausgaben
Laufzeit $T$	Laufzeit	Zeitspanne, in der Investitionsmöglichkeit offensteht
Volatilität $\sigma$	Standardabweichung des Aktienkurses	Standardabweichung des Bruttoprojektwerts
Risikoloser Zinssatz $r$	Risikoloser Zinssatz	Risikoloser Zinssatz
Dividenden $D$	Dividenden	Entgangene Brutto-Cash-Flows, Wettbewerbseffekte, Convenience yield

Analog den Finanzoptionen fußt die Bewertung der Option auf einen Basiswert (Underlying), dessen Preisentwicklung am Markt beobachtbar ist. Bei Aktienoptionen wäre dies die der Option zugrunde liegende Aktie. Bei Realloptionen ist dies eigentlich der Barwert der Brutto-Cash-Flows. Da diese jedoch selten direkt am Markt selbst gehandelt werden, muss auf Werte zurückgegriffen werden, deren Preisentwicklung am Markt beobachtbar ist und die möglichst

mit dem Cash Flow hoch korreliert sind (idealerweise perfekt korreliert). Wie bereits weiter oben ausgeführt, wird die Option durch die Durchführung der Investition ausgeübt. Schwierig gestaltet sich bei Realoptionen oftmals die Bestimmung der Laufzeit. Basieren die Handlungsmöglichkeiten auf zeitbefristeten Lizenzen, so ist deren Laufzeitende anzusetzen. Da dies jedoch selten der Fall ist, sind für die Laufzeit unternehmensinterne Entscheidungsprozesse sowie andere technisch-wirtschaftliche Rahmenbedingungen heranzuziehen, um einen für die betrachtete Investitionsmöglichkeit adäquate Bestimmung der Laufzeit vornehmen zu können. So ist es z.B. unrealistisch, dass Investitionen bis in die Unendlichkeit aufgeschoben werden. Das Management hat hier einen Zeitraum anzusetzen, in dem eine Umsetzung eines Projektes möglich erscheint. Während bei der Kapitalwertmethode das Risiko der Investition über das Beta bestimmt wird, wird bei Realoptionen die Volatilität des Underlyings herangezogen.<sup>20</sup>

Typisches Kennzeichen von Optionen ist somit die unsichere Wertentwicklung ihres Basisobjektes. Zur Modellierung dieser Unsicherheit werden verschiedene stochastische Prozesse verwendet. Die einfachste Beschreibung ist der sogenannte Wiener Prozess, bei dem die Preisentwicklung des Basisobjektes  $S$  über einen Zeitraum  $dt$  normalverteilt ist mit Mittelwert 0 und Varianz  $\alpha dt$ . Die einfachste und in der Optionsliteratur am häufigsten verwendete Generalisierung des Wiener Prozesses ist die Brownsche Bewegung, die durch folgende Gleichung gegeben ist:

$$(2-2) \quad dS = \alpha dt + \sigma dz,$$

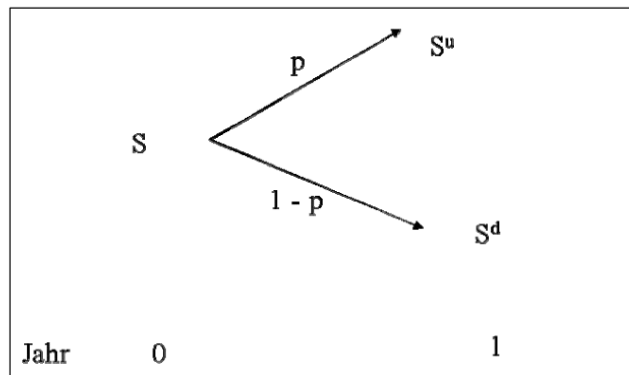
wobei  $dz$  einen Wiener Prozess darstellt,  $\alpha$  den Drift- oder Trendparameter und  $\sigma$  die Standardabweichung. Über jedes beliebige Zeitintervall  $dt$  ist die Veränderung der Basisvariablen  $dS$  normalverteilt mit Erwartungswert  $\alpha dt$  und Varianz  $\sigma^2 dt$ .

Gleichung (2-2) ist auch Ausgangspunkt der analytischen Bewertungen von Optionen. Stellvertretend sei hier nur auf Black/Scholes (1973) verwiesen. Diese Verfahren sind jedoch in ihrer Anwendbarkeit auf praktische Probleme oft limitiert, da bereits für relativ einfache Sachlagen oft keine geschlossenen Lösungen der Differentialgleichungen mehr vorhanden sind. So können die vorzeitigen Ausübungen amerikanischer Optionen mit Dividenden nicht mehr dargestellt werden (vgl. z.B. Bockemühl 2001, S. 135ff.). Gerade Realoptionen zeichnen sich jedoch in der Regel dadurch aus, dass sie während eines bestimmten Zeitraumes jederzeit und nicht erst am Laufzeitende ausgeübt werden können. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit auf ein approximatives und somit zeitdiskretes Verfahren nach Cox et al. (1979) zurückgegriffen.

---

<sup>20</sup> Die Besonderheit der Dividenden wird im nächsten Kapitel thematisiert.

Abbildung 2: Binomialbaum



Die Preisbewegung wird hier durch einen Binomialbaum approximiert (siehe Abbildung 2). Der Preis des Basisobjektes  $S$  steigt mit einer Wahrscheinlichkeit  $p$  auf den Wert  $S^u$  und fällt mit der entsprechenden Gegenwahrscheinlichkeit auf den Wert  $S^d$ . Um den Preisbaum vollständig beschreiben zu können, müssen die Wahrscheinlichkeit  $p$  für eine positive Preisänderung sowie die Höhe der Auf- und Abwärtsbewegung bestimmt werden.<sup>21</sup>

$$(2-3) \quad \begin{aligned} u &= e^{\sigma\sqrt{T/N}} \\ d &= 1/u \\ p &= \frac{e^{(r-\delta)T/N} - d}{u - d} \end{aligned}$$

Für den Preisbaum werden somit nur folgende Größen benötigt:

$\sigma$  : Volatilität

$T/N$ : Zeitintervall

$\delta$  : Dividendenrendite

Nach der Bestimmung der Baumparameter ist der entsprechende Preisbaum über den betrachteten Zeitraum aufzustellen. In einem dritten Schritt werden die Optionswerte zum Laufzeitende gemäß folgender Formel bestimmt:<sup>22</sup>

$$(2-4) \quad C = \max(S(T) - X, 0).$$

<sup>21</sup> Im einfachsten Fall wird dabei unterstellt, dass sich diese Parameter über den betrachteten Zeitraum nicht verändern.

<sup>22</sup> Es wird das Verfahren exemplarisch für eine Kaufoption dargestellt. Analoge Überlegungen ergeben sich für Verkaufsoptionen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde jedoch an dieser Stelle darauf verzichtet.

Der Wert einer Option am Laufzeitende T für die verschiedenen möglichen Preiszustände ergibt sich als Maximum aus dem inneren Wert der Option  $S-X$  und 0, wodurch die asymmetrische Auszahlungsstruktur einer Option deutlich wird. Eine Option kann im ungünstigen Fall, wenn der Preis des Underlyings  $S$  unter dem Ausübungspreis  $X$  liegt, wertlos verfallen gelassen werden, wodurch das downside risk beschränkt ist.

Der Baum wird nun rekursiv zum Ausgangszeitpunkt  $t=0$  gelöst. Dabei wird zu jedem Zeitpunkt in jedem Zustand der Wert der Option  $C_t$  bestimmt:

$$(2-5) \quad C_t = \max\left(\left(pC_{t+1}^u + (1-p)C_{t+1}^d\right)/e^{r\sqrt{T/N}}, S - X\right).$$

Der erste Teil der Klammer gibt den Wert wider, wenn es günstiger ist, die Option zu halten. Der zweite Term steht für die Ausübung der Option. Eine Ausübung lohnt nur, wenn der Ertrag über den Opportunitätskosten des Haltens der Option liegen, womit diese explizit in das Entscheidungskalkül einfließen. Nach Durchführung dieses vierstufigen Algorithmus erhält man den Wert der betrachteten Option im Zeitpunkt  $t=0$ .

Dieser eigentlich für die Bewertung von Finanzoptionen entwickelte Ansatz kann auf Realoptionen übertragen werden. Dazu ist es allerdings erforderlich, die Bestimmungsgrößen der Investition analog den für eine Finanzoption benötigten Daten zu interpretieren. Dies wird im Rahmen von Kapitel 3 bei jeder der drei betrachteten Vermeidungsalternativen erfolgen.

Abschließend sei noch kurz auf die Wirkungsweise der verschiedenen Optionsparameter eingegangen, die in Tabelle 3 zusammenfassend dargestellt sind.

**Tabelle 3:** Einfluss der Parameter auf den Optionswert

Zunahme des	$\Delta$ Optionswert	
	Call	Put
Preis des Underlyings	↑	↓
Ausübungspreis	↓	↑
Laufzeit	↑	↑
Volatilität	↑	↑
risikoloser Zins	↑	↑
Dividendenrendite	↓	↑

Der Preis des Underlyings, der Ausübungspreis und die Dividendenrendite haben jeweils eine gegensätzliche Wirkung auf Puts und Calls, was in den ersten beiden Fällen intuitiv ersichtlich ist. Hinsichtlich des Einflusses der Dividend Yield wird wiederum auf Kapitel 3 verwiesen. Die drei anderen Größen haben einen gleichgerichteten positiven Einfluss sowohl auf die Kaufoption als auch auf die Verkaufsoption. Ein höherer risikoloser Zins erhöht die Opportunitätskosten und somit auch den Wert der Option. Eine längere Laufzeit räumt dem Halter



einen längeren Zeitraum ein, von der Möglichkeit günstiger Kursentwicklungen des Basiswertes zu profitieren. Die Volatilität als Risikomaß beschreibt, wie sehr der Preis des Underlyings schwankt. Stark schwankende Preise erhöhen für den Halter der Option die Wahrscheinlichkeit, dass ein für ihn günstiger Fall für die Ausübung der Option eintritt, wodurch der Optionspreis ebenfalls steigt. Optionen auf sehr volatile Aktien haben in der Tat einen höheren Wert als vergleichbare Optionen auf weniger volatile Titel.

### 2.2.3 Verschiedene Arten von Realloptionen

Trigeorgis (1988, S. 149) unterscheidet sieben grundlegende Arten von Realloptionen, die in verschiedenen Ausprägungen immer wieder auftreten:

- Warteoption (Investitionsoption im engeren Sinne),
- Optionen auf schrittweise Investition,
- Abbruchoptionen,
- Erweiterungs- und Einschränkungsoptionen,
- Stilllegungs- und Wiedereröffnungsoptionen,
- Umstellungsoptionen und
- Wachstumsoptionen.

Im Rahmen dieser Studie sind jedoch nur die ersten beiden Ausprägungen von Interesse und werden daher hier näher erläutert.<sup>23</sup>

#### **Warteoption**

Sofern ein Unternehmen bei seiner Investitionsentscheidung unter Unsicherheit nicht vor der Wahl „jetzt oder nie“ steht, sondern eine zeitlang warten und zusätzliche Informationen darüber sammeln kann, wie sich die unsicheren Rückflüsse des Projekts in der Zukunft entwickeln, besitzt es unter der Voraussetzung, dass es nicht zur späteren Durchführung der Investition (vertraglich) verpflichtet ist, einen wertvollen Handlungsspielraum in Form einer Kaufoption auf das realisierte Investitionsprojekt. Diese Möglichkeit, eine Investition hinauszögern zu können und nur bei positiver Umweltentwicklung zu investieren, wird üblicherweise als Warteoption bezeichnet. Bei genauerer Betrachtung einer derartigen Investitionsoption wird deutlich, dass sie letztlich nichts anderes als das Recht darstellt, den Barwert der erwarteten Rückflüsse aus dem Investitionsprojekt sowie weitere damit einhergehende Optionen durch Zahlung des erforderlichen Investitionsbetrages zu kaufen, bevor die Investitionsgelegenheit erlischt. Sie entspricht folglich einer Kaufoption auf eine Aktie, wobei das realisierte Investitionsobjekt inklusive zusätzlicher Optionen das zugrunde liegende Vermögenobjekt darstellt, die Investitionszahlung dem Ausübungspreis entspricht und die Laufzeit der Option durch das strategische Fenster der Investitionsgelegenheit determiniert wird.

<sup>23</sup> Eine komplette Darstellung der sieben Optionsarten würde den Rahmen dieser Arbeit übersteigen, weshalb darauf verzichtet wird. Der interessierte Leser sei auf z.B. Bockemühl (2001, S. 29ff.) verwiesen.

## Option auf schrittweise Investition

Besteht eine Investition statt aus einer einzelnen Auszahlung aus einer Sequenz aufeinander aufbauender Auszahlungen zu verschiedenen Zeitpunkten, so wird von einer auf schrittweise Investition gesprochen (option on staged investment). Durch Vornahme von Teilinvestitionen in einer ersten Projektstufe erhält das Unternehmen eine Kaufoption auf die Durchführung der weiteren Projektstufen. Da die Durchführung des jeweils vorhergehenden Investitionsschritts Voraussetzung für die Ausübung der nachfolgenden Projektstufe ist, handelt es sich um eine sogenannte verbundene Kaufoption (compound call option). Eine Compound Option wird allgemein als eine Option definiert, deren Basisobjekt wiederum eine Option ist.

## 2.3 Emissionshandel und Realloptionen

Vor einer Anwendung der Realloptionstheorie soll noch kurz geprüft werden, inwiefern die Bedingungen des Emissionshandels die Voraussetzungen erfüllen.

### Flexibilität

Beim Emissionshandel wird den beteiligten Akteuren nur eine gewisse Emissionsobergrenze vorgegeben. Es bleibt den Unternehmen selbst überlassen, wie sie diese Vorgaben erfüllen. Dazu steht ihnen eine ganze Bandbreite möglicher Vermeidungsmaßnahmen zur Verfügung (siehe Kapitel 1). Die vorgelagerte Entscheidung ist, ob sie die Reduktion durch Investitionen in den eigenen Kraftwerkspark umsetzen oder Zertifikate zur Zielerreichung hinzukaufen sollen. Somit wird ihnen hinsichtlich der zeitlichen Planung ihrer eigenen Investitionen ein gewisser Handlungsspielraum eröffnet. Herkömmliche Auflagen in der Umweltregulierung machen hingegen klare Vorschriften hinsichtlich der zu verwendenden Technologie sowie des Zeitrahmens, bis zu dem eine entsprechende Maßnahme zu implementieren ist.

### Irreversibilität

Investitionen im Energiesektor beinhalten in der Regel hohe Investitionsvolumina und sind mit langen Laufzeiten verbunden. Ferner sind die Investitionen durch eine hohe Spezifität gekennzeichnet. Insbesondere der letzte Punkt wird bei der Beurteilung, ob irreversible Kosten entstehen übersehen. Hohe Fixkosten sowie lange Laufzeiten allein sind noch keine hinreichende Bedingung für sunk costs. Diese sind erst gegeben, wenn es keinen hinreichend funktionierenden Sekundärmarkt für die betrachteten Güter gibt. Wäre ein solcher vorhanden, ließen sich Investitionen – im Idealfall – kostenlos rückgängig machen. Im Fall der hier behandelten Investitionsgüter ist ein solcher Sekundärmarkt eher zu verneinen.

## Unsicherheit

Hierbei geht es um die zusätzlich durch den Emissionshandel hervorgerufenen Risiken. Zum einen ist dies eine regulatorische Unsicherheit über den zukünftigen Regelungsrahmen<sup>24</sup>, der hier aber nicht weiter betrachtet werden soll. Zum anderen ist dies der Preis für Emissionszertifikate. Dessen Volatilität wird noch im Rahmen des nächsten Kapitels näher analysiert. An dieser Stelle sei festgestellt, dass dieses Preisrisiko existent ist.

Es kann somit festgehalten werden, dass der Emissionshandel die Voraussetzungen für die Anwendbarkeit der Realoptionstheorie erfüllt.

---

<sup>24</sup> So weisen die nationalen Allokationspläne nur Zuteilungen für die Jahre 2005 bis 2007 für die einzelnen Anlagen aus. Der Zeitraum ab 2008 ist noch Spekulationen überlassen und bildet somit für Unternehmen einen relevanten Unsicherheitsfaktor hinsichtlich ihrer heutigen Investitionsentscheidungen.

### 3 Bewertung von Vermeidungsoptionen mittels Realoptionen

In einem ersten Schritt werden die beiden wichtigsten Eingangsparameter für die Analyse mittels der Realoptionstheorie näher beleuchtet, die Dividendenrendite sowie die Volatilität der Zertifikatepreise. Anschließend erfolgt die Bewertung der Vermeidungsoptionen:

- Gaskraftwerk,
- Effizientes Kohlekraftwerk und
- Erneuerbare Energien.

Dabei wird jeweils kurz das Entscheidungsproblem dargestellt, um darauf aufbauend die Ergebnisse der Bewertung vorzustellen.<sup>25</sup>

#### 3.1 Bestimmung grundlegender Optionsparameter

##### 3.1.1 Dividend Yield

Zur Veranschaulichung des grundlegenden Problems sei wieder eine Analogie zu Aktienoptionen gezogen. Aktieninhaber erhalten in gewissen Zeitabständen Dividendenzahlungen, die sich in der Regel als sogenannter Dividendenabschlag nach den Hauptversammlungen der entsprechenden Aktiengesellschaft auch im Kurs der Aktie niederschlagen, d.h. es erfolgt ein Kursabschlag in Höhe der gezahlten Dividende. Während der Aktieninhaber aber als Ausgleich für diesen Kursabschlag die Dividende erhält, er mithin wertmäßig keiner Verschlechterung unterliegt, hat der Halter einer Kaufoption zwar das Recht, die Aktie zu einem späteren Zeitpunkt zu erwerben aber keinen Anspruch auf die in der Zwischenzeit gezahlten Dividenden. Da der Wert der Option dem Aktienkurs folgt, würde er insgesamt einen Wertverlust erleiden. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wird die Bewertung von Optionen entsprechend angepasst, indem der Optionswert um diese Dividendenrendite bereinigt wird. In der Bewertung werden quasi die über die Laufzeit der Option zu erwartenden Dividendenzahlungen vorweggenommen, indem ex ante ein gewisser Abschlag berücksichtigt wird. Es handelt sich also um Zahlungen, die dem Halter der Option während der Laufzeit verloren gehen. Diese sind als Opportunitätskosten zu veranschlagen. Bei Realoptionen werden zwar direkt

---

<sup>25</sup> Die Daten in den Beispielen basieren auf umfangreichen Recherchen und können nicht auf eine einzelne Quelle zurückgeführt werden. Sie werden vom Autor nach diversen Gesprächen mit Unternehmensvertretern als branchenüblich eingestuft.

keine Dividenden gezahlt, dennoch können Fälle auftreten, in denen dem potenziellen Investor Cash Flows entgehen, wenn er an seiner Option festhält, anstatt sie auszuüben. So kann das Aufschieben einer Investition damit verbunden sein, dass zwischenzeitlich Wettbewerber in den Markt eintreten, wodurch dem Unternehmen ursprünglich erwartete Marktanteile verlustig gehen. Im Rahmen von Warenterminmärkten findet die Dividendenrendite ihre Entsprechung in den Kosten der Lagerhaltung. Eine interessante Analogie zieht Herbelot (1992, S. 62) im Kontext des Emissionshandels. Er begründet die Berücksichtigung einer Dividendenrendite in Zertifikatmärkten mit der Gefahr des Hortens.

Da eine höhere Dividendenrendite die Wahrscheinlichkeit des vorzeitigen Ausübens bei Puts erhöht, während sie bei Calls sinkt, sind die Wirkungen auf diese beiden Optionsarten entgegengesetzt (siehe Tabelle 3).

Die Dividendenrendite lässt sich wie die im nächsten Abschnitt analysierte Volatilität aus Marktbeobachtungen ableiten. Grundlegende Annahme der Optionspreistheorie ist, dass keine Arbitragemöglichkeiten existieren. Mithin muss gelten, dass der Futurepreis  $F$  dem aufdiskontierten gegenwärtigen Spotpreis  $S(0)$  entspricht:

$$(3-1) \quad F = S(0)e^{(r-\delta)t}.$$

Entsprechen sich die tatsächlichen Werte unter Verwendung des risikolosen Zinssatzes  $r$ , muss  $S=0$  gelten. Meistens fallen beide Werte jedoch auseinander, was auf die Existenz einer Dividendenrendite schließen lässt.

Da im Rahmen dieser Studie keine entsprechenden Daten verfügbar waren, wurde auf das Mittel der Sensitivitätsanalyse zurückgegriffen, wobei die in der Literatur üblicherweise zu findende Spanne von 0 % bis 10 % angesetzt wurde. Für die Basisrechnung wurde die Dividendenrendite willkürlich auf 2 % gesetzt.

### 3.1.2 Volatilität

Die Volatilität dient dazu, um das Risiko der Investition abzubilden. Da der Projektwert mit der Preisbewegung des Underlyings korreliert, kann dessen Schwankungsbreite zur Bestimmung des Investitionsrisikos herangezogen werden. Die Volatilität kann empirisch aus der Preisentwicklung des Basiswertes gemäß Gleichung (3-2) ermittelt werden (vgl. Hull 2003, S. 239):

$$(3-2) \quad \hat{\sigma} = \frac{s}{\sqrt{\tau}} \text{ mit}$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^n (u_t - \bar{u})^2} \text{ und}$$

$$u_t = \ln\left(\frac{S_t}{S_{t-1}}\right);$$

n+1: Anzahl der Beobachtungen,

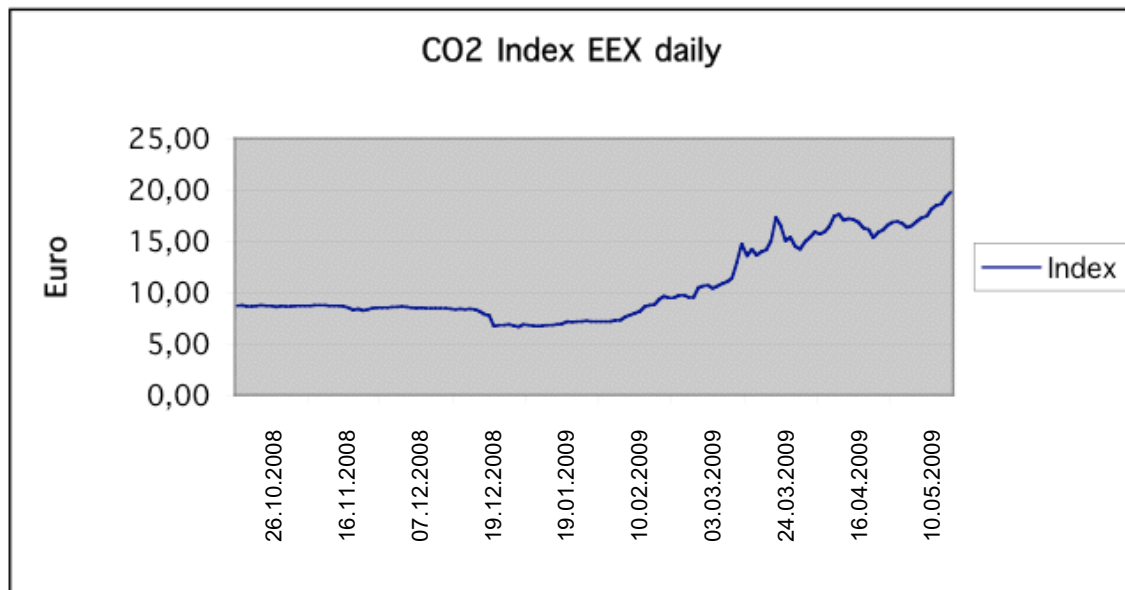
$S_t$ : Zertifikatepreis zum Zeitpunkt t,

t: Länge des betrachteten Zeitintervalls in Jahren.

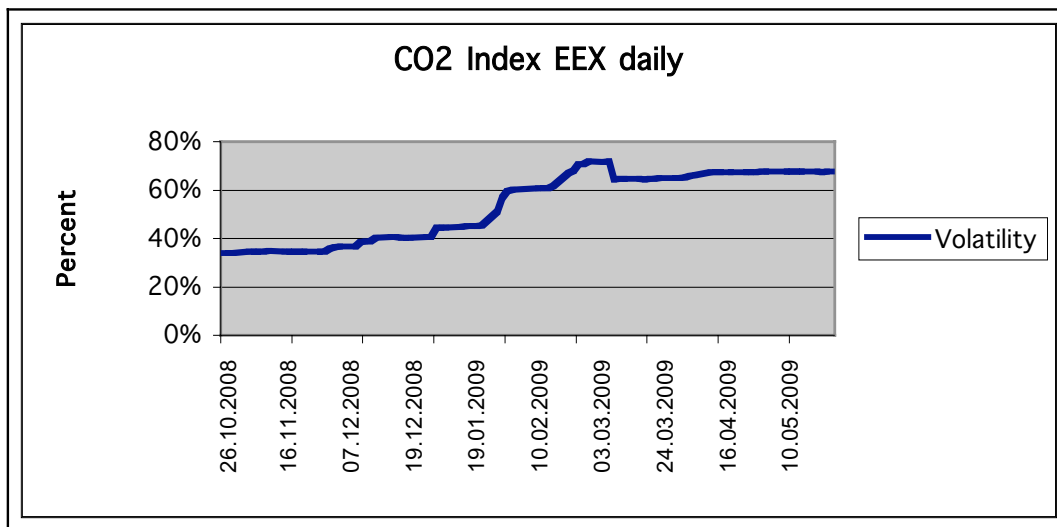
In einem ersten Schritt wird die logarithmierte Veränderungsrate der Zertifikatepreise  $S_t$  und  $S_{t-1}$  bestimmt. Danach werden die jeweiligen Standardabweichungen gemäß der mittleren Formel in (3-2) berechnet. Schlussendlich kann entsprechend des obersten Ausdrucks in (3-2) die Volatilität  $\hat{\sigma}$  für den Basiswert ermittelt werden.

Für das betrachtete Zeitintervall ist zu beachten, dass der Wiener Prozess eigentlich auf der Annahme beruht, dass die zukünftige Preisentwicklung unabhängig von der Vergangenheit ist. Eine strikte Befolgung würde jedoch eine empirische Herangehensweise unmöglich machen. Daher werden üblicherweise nicht zu weit in die Vergangenheit reichende Zeitreihen herangezogen, da Informationen, die sehr weit zurück liegen, keine Aussagekraft mehr hinsichtlich der Zukunft haben. Dieser Ansatz unterstellt, dass die in der näheren Vergangenheit beobachtete Preisentwicklung auch in der Zukunft ihre Gültigkeit behält. Hull (2003, S. 238) schlägt vor, Daten der letzten drei bis sechs Monate zu verwenden.

**Abbildung 3:** CO<sub>2</sub>-Preise für das EU-Emissionshandelssystem



Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Daten der EEX

Abbildung 4: Volatilität der CO<sub>2</sub>-Preise

Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Daten der EEX

Die EEX Leipzig veröffentlicht seit Ende Oktober 2004 Daten zu den Spotpreisen der im Rahmen des EU-Regimes gehandelten Emissionsrechte. Der Preisverlauf seit Beginn der Veröffentlichung ist in Abbildung 3 dargestellt. Während der Preis zunächst auf einem relativ niedrigen Niveau unter 10 Euro/Tonne CO<sub>2</sub> verharrte, steigt er seit Februar 2005 stetig an und liegt derzeit (Mai 2005) knapp unter 20 Euro. Die Volatilität wurde mittels eines gleitenden 3-Monats-Durchschnitts berechnet. Anfangs lagen die Preisschwankungen zwischen 30 und 40 %. Mit Beginn des Preisauftriebs hat konsequenterweise auch die Volatilität zugenommen auf ein Niveau knapp unter 70 % (siehe Abbildung 4).

Wie bei der Dividendenrendite wird auch für die Volatilität in den folgenden Berechnungen eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Als Basiswert wurde eine Volatilität von 40 % unterstellt. Dies deckt sich relativ gut mit den Analysen für das Pre-Trading im EU-Markt sowie für den Markt für SO<sub>2</sub>-Emissionen in den U.S.A.<sup>26</sup> Für Aktien gibt Hull (2003, S. 238) Volatilitäten von üblicherweise 20 % bis 50 % an.

Abschließend werden noch die in den folgenden Abschnitten unterstellten Finanzdaten zusammenfassend aufgelistet:

- Volatilität: 40 %,
- Dividendenrendite: 2 %,
- WACC (weighted average costs of capital): 15 %,
- Risikoloser Zins: 5 %,
- Anfänglicher CO<sub>2</sub>-Preis: 10 Euro/Tonne.

<sup>26</sup> Siehe Annex 1 und 2.

### 3.2 Investition in ein Gaskraftwerk

Als erste Vermeidungsalternative wird die Investition in ein neues Gaskraftwerk (400 MW mit einem Kapazitätsfaktor von 57%<sup>27</sup>) betrachtet, wobei unterstellt wird, dass dadurch Emissionen in älteren Kraftwerken, die eine durchschnittliche Emissionsintensität von 750 kg CO<sub>2</sub>/MWh aufweisen, verdrängt werden. Die erwartete Lebensdauer der Anlage beträgt 35 Jahre. Die Investitionskosten liegen bei 560 Euro/KW, die Betriebskosten bei 9 Euro/MW<sub>fuel</sub>.

Als einzige CO<sub>2</sub>-spezifische Handlungsoption bestehe die Möglichkeit, die Investition innerhalb eines strategischen Zeitfensters von 10 Jahren aufzuschieben. Die weiteren Spezifika der Option sind in Tabelle 4 aufgelistet.

**Tabelle 4:** Charakteristika der Warteoption beim Gaskraftwerk

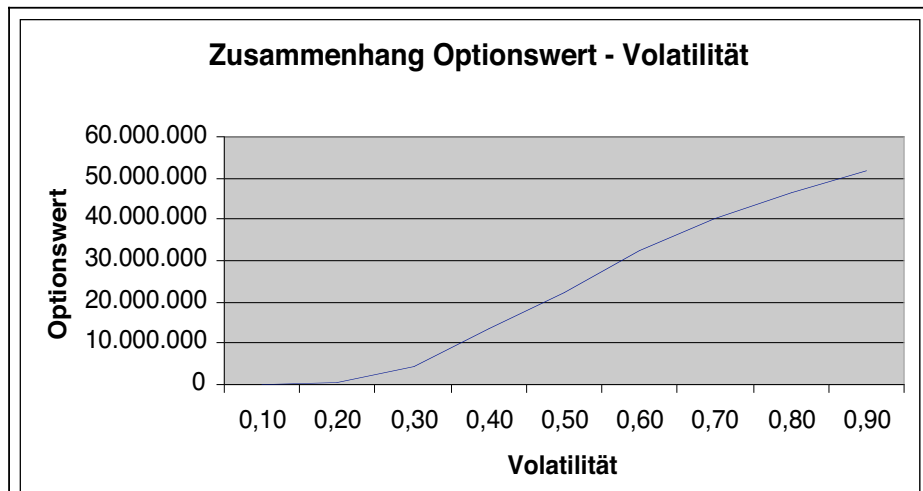
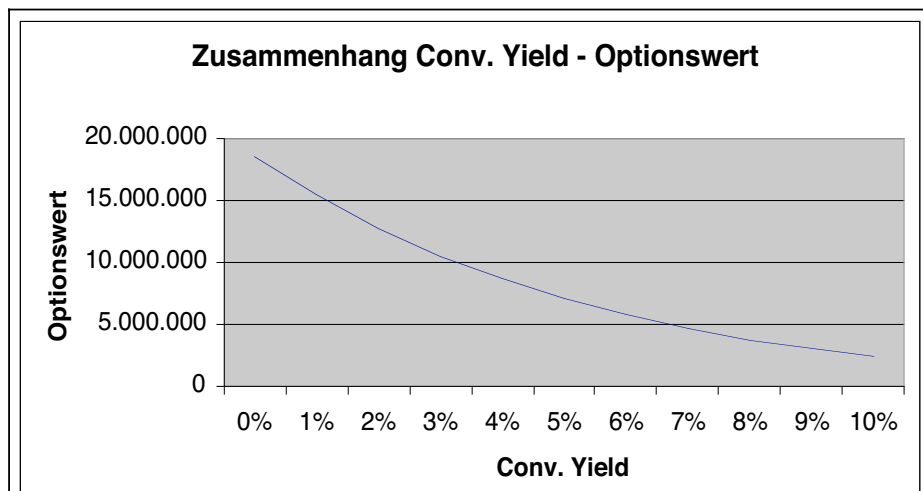
	<b>Module 1</b>
Option Type	American Call
Value of base project [Mio Euro]	65
strike price [Mio Euro]	224
Duration [Jahre]	10
Volatility	40%
conv. Yield	2%
risk free rate	5%
Passive NPV [Mio Euro]	-159,00
Abatement costs [Euro/ton CO <sub>2</sub> ]	3,83

Der passive Kapitalwert liegt bei rund -160 Mio. Euro und wird durch den zusätzlichen Optionswert der Warteoption in Höhe von 12,9 Mio. Euro nur unwesentlich beeinflusst. Die spezifischen Vermeidungskosten fallen nur geringfügig von 3,83 auf 3,52 Euro/t CO<sub>2</sub>.

Abbildungen 5 und 6 zeigen die beiden Sensitivitätsbetrachtungen für die Volatilität und die Dividendenrendite. Während der Optionswert mit der Volatilität relativ stark ansteigt, hat die convenience yield nur einen geringen Einfluss. Allerdings werden signifikante Optionswerte, die eventuell entscheidungsrelevant sind, erst bei sehr hohen Schwankungsbreiten (über 80%) erreicht.

<sup>27</sup> Der Kapazitätsfaktor ist ein Maß für die Verfügbarkeit bzw. für den Wirkungsgrad der Anlage.



**Abbildung 5:** Einfluss der Volatilität – Gaskraftwerk**Abbildung 6:** Einfluss der Dividendenrendite – Gaskraftwerk

### 3.3 Investition in ein effizientes Kohlekraftwerk

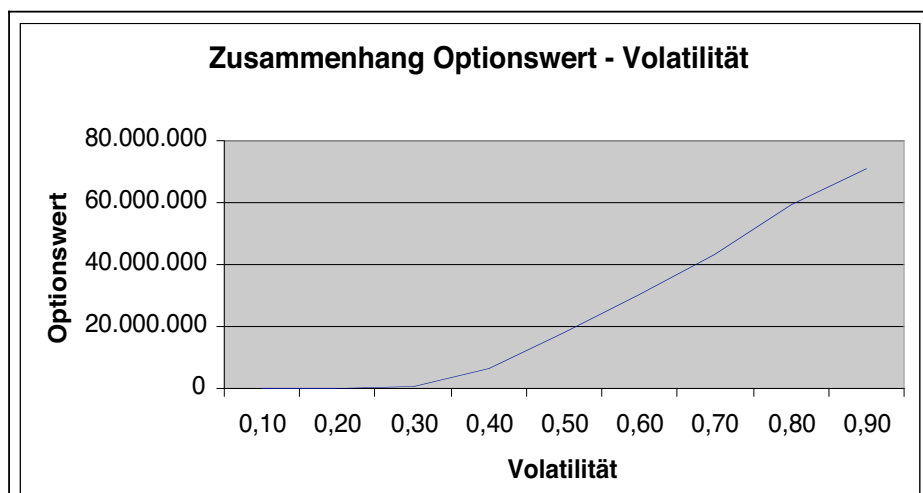
Bei der Entscheidungssituation wird unterstellt, dass ein veraltetes Braunkohlekraftwerk durch ein modernes Steinkohlekraftwerk (800 MW) ersetzt werden soll (Benchmark: 1053 kg CO<sub>2</sub>/MWh). Bei Investitionskosten von 1.000 Euro/kW betragen die Kosten für Betrieb und Erhaltung 5 Euro/MW<sub>fuel</sub>. Während die Lebensdauer wie beim Gaskraftwerk auf 35 Jahre gesetzt wurde, ist der Kapazitätsfaktor technisch bedingt deutlich niedriger und liegt bei 45%.

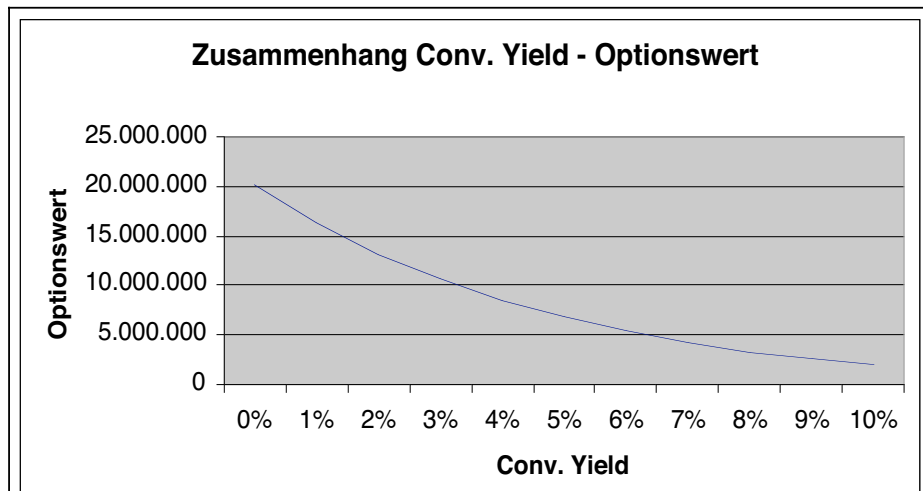
Als einzige Option stehe wiederum eine Warteoption mit einer Laufzeit von 10 Jahren zur Verfügung (siehe Tabelle 5).

**Tabelle 5:** Charakteristika der Warteoption beim Kohlekraftwerk

<b>Module 1</b>	
Option Type	American Call
Value of base project [Mio Euro]	125
strike price [Mio Euro]	800
Duration [Jahre]	10
Volatility	40%
conv. Yield	2%
risk free rate	5%
Passive NPV [Mio Euro]	-675,00
Abatement costs [Euro/ton CO <sub>2</sub> ]	9,43

Aufgrund der höheren installierten Leistung ist der Wert des Basisprojektes zwar in etwa doppelt so hoch wie beim Gaskraftwerk, dafür übersteigt der Ausübungspreis, also die Investitionskosten, den Gasfall um das 3,5-fache, wodurch sich ein passiver Kapitalwert ergibt, der deutlich negativer ausfällt. Somit ist es auch nicht verwunderlich, dass bei etwa gleich hohem Optionswert für den Basisfall (13,2 Mio. Euro) ein noch geringerer Einfluss auf die spezifischen Vermeidungskosten auszumachen ist. Sie reduzieren sich von 9,43 auf 9,25 Euro/t CO<sub>2</sub>. Das Bild ändert sich auch nicht, wenn die Werte variiert werden. In Relation zum passiven Kapitalwert kann auch bei hohen Volatilitäten kein entscheidungsrelevanter Einfluss des Handlungsspielraums ausgemacht werden. Allerdings ist wiederum ein stärkerer Einfluss der Volatilität in Relation zur Dividendenrendite zu beobachten (vg. Abbildungen 7 und 8).

**Abbildung 7:** Einfluss der Volatilität – Kohlekraftwerk

**Abbildung 8:** Einfluss der Dividendenrendite – Kohlekraftwerk

### 3.4 Investition in erneuerbare Energien

Als letzter praktischer Fall wird eine Investition in eine Windfarm betrachtet. Wie beim Gaskraftwerk wird der Benchmark der verdrängten Emissionen auf 750 kg CO<sub>2</sub>/MWh gesetzt, wobei von einer erwarteten Nutzungsdauer von 15 Jahren ausgegangen wird. Im Gegensatz zu den beiden fossilen Alternativen hat der Investor nun neben einer generellen Warteoption auch eine Option zur stufenweisen Errichtung des Windparks. Unterstellt werden dabei 3 Module mit jeweils 10 MW installierter Windturbinenleistung. Während allen drei Tranchen Betriebskosten in Höhe von 15 Euro/kW gemeinsam sind, unterscheiden sie sich hinsichtlich ihres Kapazitätsfaktors und der Investitionskosten. Die erste Tranche hat aufgrund von einmaligen Anschlusskosten für das gesamte Gebiet mit 1.200 Euro/kW etwas höhere anfängliche Investitionsausgaben als die anderen beiden Module (je 1.000 Euro/kW). Bedingt durch eine bessere Lage der Windenergiekonverter liegt der Kapazitätsfaktor hingegen mit 22% jeweils 1% über dem Faktor der beiden anderen Tranchen.<sup>28</sup>

Der Unternehmer hat nun die Möglichkeit, nach der Errichtung der ersten Tranche mit der Investition in das zweite und dritte Modul zu warten, um bessere Informationen zu gewinnen, wie sich der Preis für CO<sub>2</sub> zukünftig entwickelt. Insgesamt handelt sich folglich um eine verbundene Option, wobei er bei Ausübung der ersten Option (Investition in Modul 1) gleichzeitig mit dem Projektwert von der ersten Tranche die entsprechenden Optionswerte der anderen beiden erwirbt (siehe Tabelle 6).

<sup>28</sup> Ferner wird noch ein für alle gleicher Verfügbarkeitsfaktor von 90 % unterstellt (bedingt z.B. durch Wartungsarbeiten).

**Tabelle 6:** Charakteristika der Optionen bei der Windfarm

	<b>Module 1</b>	<b>Module 2</b>	<b>Module 3</b>
Option Type	American Call	American Call	American Call
Value of base project [Mio Euro]	4,07	3,89	3,7
strike price [Mio Euro]	12	10	10
Duration [Jahre]	10	15	20
Volatility	40%	40%	40%
conv. Yield	2%	2%	2%
risk free rate	5%	5%	5%
Passive NPV [Mio Euro]	-7,93	-6,11	-6,30
Abatement costs [Euro/ton CO <sub>2</sub> ]	40,61	32,81	35,49

Der passive Kapitalwert beläuft sich für die Gesamtinvestition auf minus 20,34 Mio. Euro, was hohe spezifische Vermeidungskosten (36,38 Euro/t CO<sub>2</sub>) zur Folge hat – ein erwartetes Resultat, da erneuerbare Energien üblicherweise am oberen Rand der Bandbreite der Vermeidungskosten angesiedelt sind.

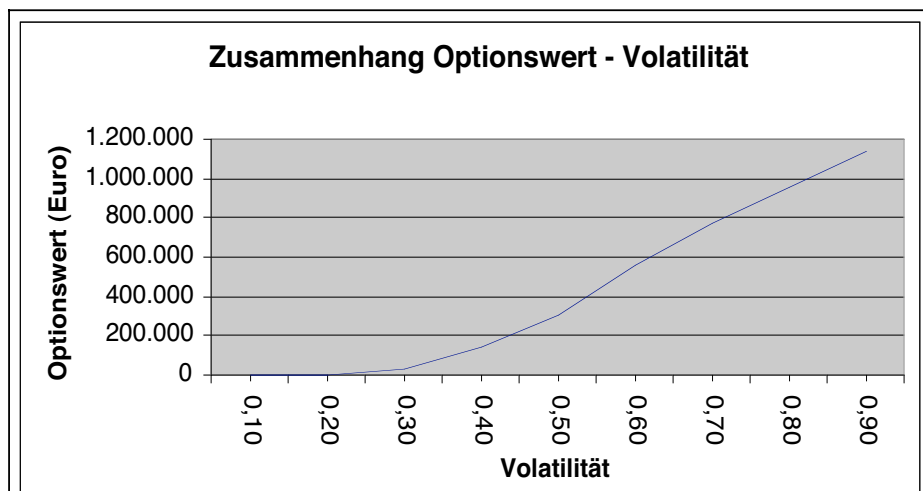
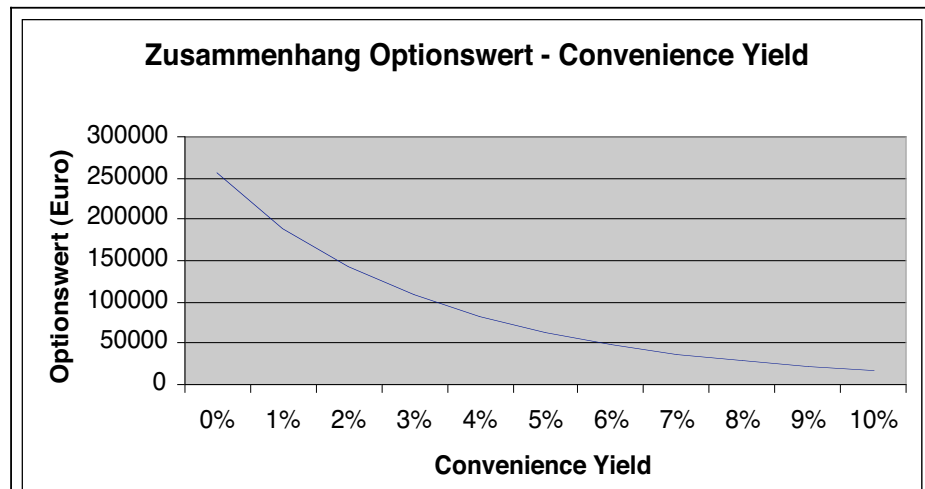
**Abbildung 9:** Einfluss der Volatilität – Windfarm

Abbildung 10: Einfluss der Dividendenrendite – Windfarm



Der Wert der Verbundoption liegt hingegen nur bei 143.000 Euro; somit macht der Optionswert weniger als 1 % vom Gesamtprojektwert aus, obwohl das Projekt eine deutlich höhere Flexibilität aufweist als die beiden fossilen Varianten, denen jeweils nur eine Warteoption inhärent war. Auch wesentlich höhere Volatilitäten und geringere Dividendenrenditen führen nicht zu entscheidend anderen Ergebnissen (siehe Abbildungen 9 und 10). Als mögliche Begründung kann angeführt werden, dass die Option aufgrund des hohen negativen Kapitalwertes sehr weit aus dem Geld (out of the money) ist. Zur Bestimmung, ob eine Option im Geld oder out of the money ist, kann auf Formel (2-4) zurückgegriffen werden. Der innere Wert einer Option gibt den Optionswert bei sofortiger Ausübung an. Liegt bei einer Kaufoption der Preis des Underlyings unterhalb des Ausübungspreises, ist die Option aus dem Geld. Im vorliegenden Fall liegen die spezifischen Vermeidungskosten mit rund 35 Euro weit über dem unterstellten anfänglichen Zertifikatspreis von 10 Euro, die Option ist folglich „far out of the money“. Der aktuelle Optionswert setzt sich allerdings aus innerem Wert und dem sogenannten Zeitwert zusammen, der die Chance der Wertsteigerung bis zum Verfallsdatum abbildet. Liegt der aktuelle Preis jedoch erheblich vom Ausübungspreis entfernt, so ist eine entsprechende Wertsteigerung, die die Option ins Geld bringt, eher unwahrscheinlich, was somit auch einen geringen Zeitwert bedingt. Diese Situation liegt im Fall der Windfarm vor.

Ist ein Projekt mit mehreren Realoptionen verbunden, so beeinflussen sich diese in der Regel gegenseitig (vgl. z.B. Meise 1998, S. 109ff.), d.h. der Wert der Summe der Einzeloptionen und der Wert der Verbundoption fallen auseinander. Dieser Effekt konnte im vorliegenden Beispiel nachgewiesen werden. Der Wert der Verbundoption liegt mit 143.000 Euro unter der Summe der Einzeloptionen (237.000 Euro) (negative Interaktion).

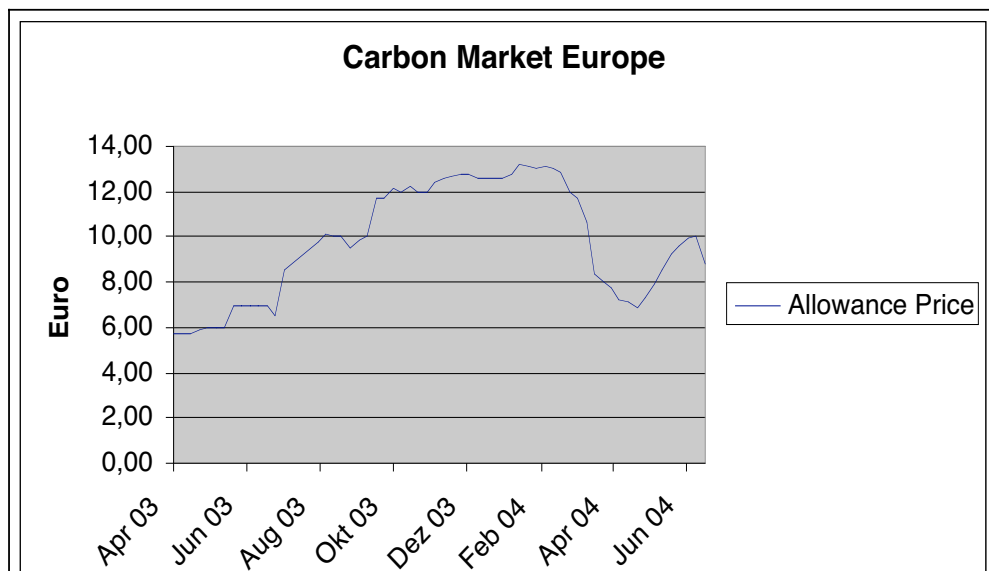
## 4 Fazit

Die eingangs formulierte Arbeitshypothese, dass sich die Bewertung von Vermeidungsmaßnahmen bei Anwendung der Realoptionstheorie anstelle der herkömmlichen Kapitalwertmethode verändert, konnte auf Basis der drei betrachteten Beispiele nicht bestätigt werden. Die Optionswerte sind in allen drei Fällen relativ niedrig, so dass sie keinen entscheidungsrelevanten Einfluss – z.B. auf die relative Vorteilhaftigkeit – besitzen. Es können zwei mögliche Gründe angeführt werden. Zum einen gewährt der Emissionshandel zwar den Akteuren grundsätzlich eine weit reichende Entscheidungsfreiheit bei der Wahl der Reduktionsmaßnahme. Diese Maßnahmen beinhalten selbst jedoch nur wenig CO<sub>2</sub>-spezifische Realoptionen. Die den Projekten inhärenten Optionen sind oft nicht durch den Preis für CO<sub>2</sub> getrieben. Zum anderen sind viele Maßnahmen „far out of the money“, so dass sie nur geringe Optionswerte aufweisen, obwohl teilweise erhebliche Flexibilitäten bestehen (Windfarm).

Hinsichtlich der Einflussparameter kann festgestellt werden, dass die Volatilität anscheinend einen größeren Einfluss auf die Ergebnisse ausübt als die Dividendenrendite.

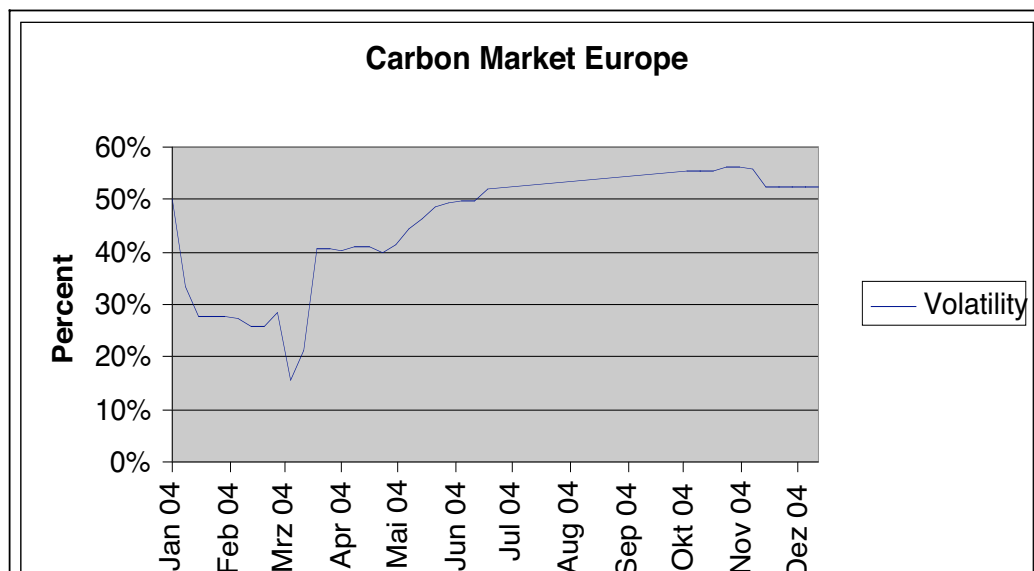
## Annex 1: Preisentwicklung und Volatilität im EU-Emissionsmarkt vor 2005

Abbildung A1-1: Preisentwicklung im EU-Emissionsmarkt vor 2005



Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Daten von Pointcarbon.

Abbildung A1-2: Volatilität im EU-Emissionsmarkt vor 2005

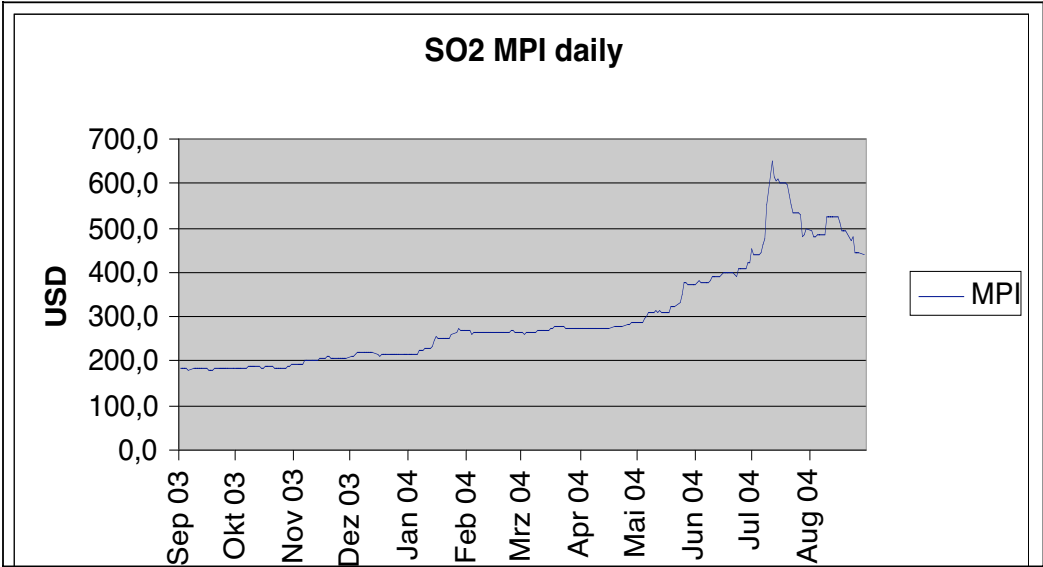


Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Daten von Pointcarbon.<sup>29</sup>

<sup>29</sup> Gleitender 3-Monats-Durchschnitt.

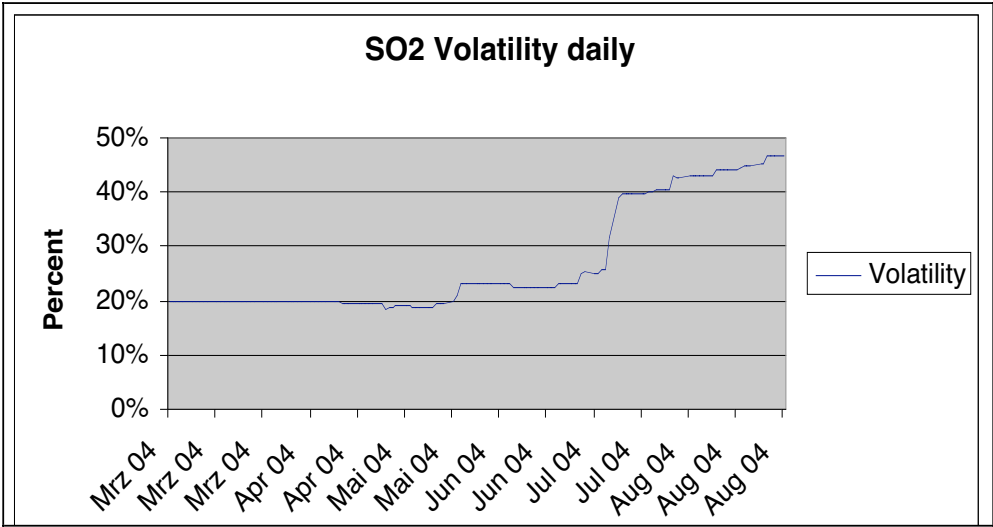
## Annex 2: Preisentwicklung und Volatilität im US SO<sub>2</sub>-Markt

Abbildung A2-1: Preisentwicklung im US SO<sub>2</sub>-Markt



Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Daten von Cantor Fitzgerald.

Abbildung A2-2: Volatilität im US SO<sub>2</sub>-Markt



Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Daten von Cantor Fitzgerald.<sup>30</sup>

<sup>30</sup> Gleitender 6-Monats-Durchschnitt.



## 5 Literaturverzeichnis

- Arrow, K.J. (1985): *Frontiers of Economics*, Oxford.
- Bailey, E.M. (1998): *Intertemporal Pricing of Sulfur Dioxide Allowances*, Working Paper MIT-CEEPR 1998-006, Massachusetts Institute of Technology, Center for Energy and Environmental Policy Research, Cambridge, MA.
- Baldursson, F.M./von der Fehr, N.-H. (2004): *Price Volatility and Risk Exposure: On Market-based Environmental Policy Instruments*. In: *Journal of Environmental Economics and Management* 48, S. 682-704.
- Bamberg, G./Coenenberg, A.G. (1994): *Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre*, München.
- Ben-David, S./Brookshire, D./Burness, S./Mc Kee, M./Schmidt, C. (2000): *Attitudes Towards Risk and Compliance in Emission Permit Markets*. In: *Land Economics* 76(4), S. 590-600.
- Betz, R. (2003): *Emissionshandel zur Bekämpfung des Treibhauseffektes: Der Einfluss der Ausgestaltung auf die Transaktionskosten – am Beispiel Deutschland*, Karlsruhe.
- Black, F./Scholes, M. (1973): *The Pricing of Options and Corporate Liabilities*. In: *Journal of Political Economy* 81, S. 637-659.
- Bockemühl, M. (2001): *Realoptionen und die Bewertung von Produktinnovationen*, Wiesbaden.
- Bonus, H. (1983): *Emissionslizenzen, Monopsen und die räumliche Abschottung von Arbeitsmärkten – Bemerkungen zu Sieberts Anmerkung*. In: *Zeitschrift für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften*, Bd. 103, Heft 1, S. 57-63.
- Carlson, D.A./Sholtz, A.M. (1994): *Designing Pollution Market Instruments: Cases of Uncertainty*. In: *Contemporary Economic Policy* 12, S. 114-125.
- Cason, T.N./Gangadharan, L. (1998): *An Experimental Study of Electronic Bulletin Board Trading for Emission Permits*. In: *Journal of Regulatory Economics* 14(1), S. 55-73.
- Cason, T.N./Gangadharan, L. (2001): *Transaction Costs in Tradable Permit Markets: An Experimental Study of Pollution Market Designs*, Working Paper, University of Melbourne, Melbourne.

- Chao, H.-P./Wilson, R. (1993): Option Value of Emission Allowances. In: *Journal of Regulatory Economics* 5, S. 233-249.
- Cox, J.C./Ross, S.A./Rubinstein, M. (1979): Option Pricing: A Simplified Approach. In: *Journal of Financial Economics* 7, S. 229-263.
- Cronshaw, M.B./Kruse, J.B. (1996): Regulated Firms in Pollution Permit Markets with Banking. In: *Journal of Regulatory Economics* 9(2), S. 179-189.
- De Jong, C./Walet, K. (2004): Emissions Trading and Investment Decisions. In: de Jong, C./Walet, K. (eds.), *A Guide to Emissions Trading: Risk Management and Business Implications*, London.
- Dixit, A.K./Pindyck, R.S. (1994): *Investment under Uncertainty*, Princeton.
- Edleson, M.E./Reinhardt, F.L. (1995): Investment in Pollution Compliance Options: The Case of Georgia Power. In: Trigeorgis, L. (ed.): *Real Options in Capital Investment*, London, S. 243-264.
- Ellerman, A.D./Montero, J.-P. (2002): *The Temporal Efficiency of SO<sub>2</sub> Emissions Trading*, Working Paper MIT-CEEPR 2002-003, Massachusetts Institute of Technology, Center for Energy and Environmental Policy Research, Cambridge, MA.
- Frayr, J./Uludere, N.Z. (2001): *What is it worth? Application of Real Options Theory to the Valuation of Generation Assets*, London.
- Gangadharan, L. (2000): Transaction Costs in Pollution Markets: An Empirical Study. In: *Land Economics* 76(4), S. 601-614.
- Godby, R. (2002): Market Power in Laboratory Emission Permit Markets. In: *Environmental and Resource Economics* 23, S. 279-318.
- Godby, W./Mestelman, S./Mueller, R./Welland, J.D. (1997): Emissions Trading with Shares and Coupons when Control over Discharges is Uncertain. In: *Journal of Environmental Economics and Management* 32, S. 359-381.
- Gupta, A./Maranas, C.D. (2003): Market-Based Pollution Abatement Strategies: Risk Management Using Emission Option Contracts. In: *Industrial & Engineering Chemistry Research* 42, S. 802-810.
- Hagem, C./Westkog, H. (1998): The Design of a Dynamic Tradeable Quota System under Market Imperfections. In: *Journal of Environmental Economics and Management* 36(1), S. 89-107.
- Hahn, R.W. (1984): Market Power and Transferable Property Rights. In: *Quarterly Journal of Economics* 99(4), S. 753-765.

- Hennessy, D.A./Roosen, J. (1999): Stochastic Pollution, Permits, and Merger Incentives. In: *Journal of Environmental Economics and Management* 37, S. 211-232.
- Herbelot, O. (1992): Option Valuation of Flexible Investments: the Case of Environmental Investments in the Electric Power Industry, Phd-Thesis, MIT.
- Herbelot, O. (1994a): Option Valuation of Flexible Investments: The Case of a Scrubber for Coal-Fired Power Plant, Working Paper 94-001, MIT.
- Herbelot, O. (1994b): Option Valuation of Flexible Instruments: The Case of a Coal Gasifier, Working Paper 94-002, MIT.
- Hull, J.C. (2003): *Options, Futures, and other Derivatives*, 5th Edition, New Jersey.
- IPCC [Intergovernmental Panel on Climate Change] (2001): *Climate Change 2001 – Mitigation, Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, U.K.
- Insley, M. (2003): On the options to invest in pollution control under a regime of tradable emissions allowances. In: *Canadian Journal of Economics* 4, S. 860-883.
- Innes, R. (2003): Stochastic Pollution, Costly Sanctions, and Optimality of Emission Permit Banking. In: *Journal of Environmental Economics and Management* 45, S. 546-568.
- Janssen, J. (2001): *Risk Management of Investments in Joint Implementation and Clean Development Mechanism Projects*, Bamberg.
- Kensinger, J.W. (1987): Adding the Value of Active Management into the Capital Budgeting Equation. In: *Midland Corporate Finance Journal*, 5(3), S. 31-42.
- Kreps, D.M. (1990): *Microeconomic Theory*, Harlow.
- Kling, C.L./Rubin, J. (1997): Bankable Permits for the Control of Environmental Pollution. In: *Journal of Public Economics* 64, S. 101-115.
- Leiby, P./Rubin, J. (2001): Intertemporal Permit Trading for the Control of Greenhouse Gas Emissions. In: *Environmental and Resource Economics* 19, S. 229-256.
- Malik, A.S. (2002): Further Results on Permit Markets with Market Power and Cheating. In: *Journal of Environmental Economics and Management* 44(3), S. 371-390.
- Meise, F. (1998): *Realoptionen als Investitionskalkül*, Oldenbourg.
- Misiolek, W.S./Elder, H.W. (1989): Exclusionary Manipulation of Markets for Pollution Rights. In: *Journal of Environmental Economics and Management* 16(2), S. 156-166.

- Montero, J.-P. (1997): Marketable Pollution Permits with Uncertainty and Transaction Costs. In: *Resource and Energy Economics* 20, S. 27-50.
- Montgomery, W.D. (1972): Markets in Licenses and Efficient Pollution Control Programs. In: *Journal of Economic Theory* 5(3), S. 395-418.
- Myers, S.C. (1977): Determinants of Corporate Borrowing. In: *Journal of Financial Economics* 2, S. 147-176.
- Noll, J. (2004): Certificate Purchase and Abatement Intensity when Pollution is Stochastic, Working Paper, University of Vienna, Wien.
- Phaneuf, D.J./Requate, T. (2002), Incentives for Investment in Advanced Pollution Abatement Technology in Emission Permit Markets with Banking. In: *Environmental and Resource Economics* 22, S. 369-390.
- Rubin, J. (1996): A Model of Intertemporal Emission Trading, Banking, and Borrowing. In: *Journal of Environmental Economics and Management* 31, S. 269-286.
- Sandmo, A. (1971): On the Theory of the Competitive Firm under Price Uncertainty. In: *American Economic Review* 61, S. 65-73.
- Sartzetakis, E.S. (1997): Raising Rivals' Costs Strategies via Emission Permit Markets. In: *Review of Industrial Organization* 12(5/6), S. 751-765.
- Schennach, S. (2000): The Economics of Pollution Permit Banking in the Context of Title IV of the 1990 Clean Air Act Amendments. In: *Journal of Environmental Economics and Management* 40(3), S. 189-210.
- Springer, U. (2003a): The market for tradable GHG permits under the Kyoto Protocol: a survey of model studies. In: *Energy Economics* 25(5), S. 527-551.
- Springer, U. (2003b): Portfolio Diversifikation of Investments in Climate Change Mitigation, Bamberg.
- Stavins, R.N. (1995): Transaction Costs and Tradeable Permits. In: *Journal of Environmental Economics and Management* 29, S. 133-148.
- Tietenberg, T. (1985): *Emission Trading, An Exercise in Reforming Pollution Policy, Resources for the Future*, Washington, D.C..
- Trigeorgis, L. (1988): A Conceptual Options Framework for Capital Budgeting. In: *Advances in Futures and Options Research: A Research Annual*, 3. Jahrgang, S. 145-167.
- Trigeorgis, L. (1995): *Real Options. Managerial Flexibility and Strategy in Resource Allocation*, Cambridge, MA.

- Von der Fehr, N.-H. (1993): Tradable Emission Rights and Strategic Interaction. In: Environmental and Resource Economics 3, S. 129-151.
- Westkog, H. (1996): Market Power in a System of Tradable CO<sub>2</sub> Quotas. In: The Energy Journal 17, S. 85-103.
- Woerdman, E. (2001): Emissions Trading and Transaction Costs: Analyzing the Flaws in the Discussion. In: Ecological Economics 38(2), S. 293-304.
- Xepapadeas, A. (2001): Environmental Policy and Firm Behavior: Abatement Investment and Location Decisions under Uncertainty and Irreversibility, Working Paper, University of Crete, Rethymno.
- Zhao, J. (2003): Irreversible Abatement Investment under Cost Uncertainties: Tradable Emission Permits and Emission Charges. In: Journal of Public Economics 87, S. 2765-2789.