Einfluß von Unsicherheit und Flexibilität auf den Wert von Kraftwerksinvestitionen – Reale Optionen in der Elektrizitätswirtschaft ⋆

Matthias Hundt *, Derk J. Swider und Alfred Voß

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, Heßbrühlstraße 49 a, 70565 Stuttgart

Zusammenfassung

Dieses Arbeitspapier gibt einen Überblick über Bewertungsverfahren von Investitionen unter Unsicherheit. Der Schwerpunkt gilt der aus der Finanzmathematik abgeleiteten Realoptionstheorie und ihrer Anwendung auf Investitionen in Kraftwerke zur Erzeugung von Elektrizität. Es wird deutlich, daß die marktbasierte, risikoneutrale Investitionsbewertung der Realoptionstheorie zu Schwierigkeiten bei der Anwendung auf technische Anlagen wie einem Kraftwerk führt. Dies liegt im Wesentlichen in der derzeitigen Gestalt des deutschen Strommarktes begründet, der der Forderung der Realoptionstheorie nach einem vollständigen, arbitragefreien Markt nicht gerecht wird. Gerade bei langfristigen Investitionsplanungen ergeben sich weitere Probleme durch restriktive Annahmen bei der Wahl des Zufallsprozesses der unsicheren Größen. Ein von den ursprünglichen optionspreistheoretischen Ansätzen losgelöster Begriff der realen Optionen kann dieses Dilemma überwinden.

1 Einleitung

Die Bewertung von Investitionsprojekten erfolgt üblicherweise mit Hilfe der Bestimmung des auf einen Zeitpunkt bezogenen Kapitalwertes in Abhängigkeit eines Kalkulationszinssatzes. Diese Vorgehensweise hat sich, ausgehend

⋆ Arbeitspapier im Rahmen der Forschungsinitiative Kraftwerke des 21. Jahrhunderts (KW21), Arbeitsprojekt „Kriterien für Kraftwerksentscheidungen im liberalisierten Markt“. Gefördert durch die Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg.
* Tel.: 0711 685-87853, Fax: 0711 685-87873
E-Mail-Adresse: hundt@ier.uni-stuttgart.de (Matthias Hundt).

25.06.2006

von Arbeiten Fishers [1], nicht grundlegend verändert – das Interesse der Forschung galt während der letzten Jahrzehnte der jeweils geeignet erscheinenden Bestimmung des Kalkulationszinssatzes und der zukünftigen Zahlungsströme.

Der Kalkulationszinssatz, oft auch Diskontierungsfaktor genannt, ist im vollkommenen und vollständigen Kapitalmarkt der Einheitszinssatz. Die Berücksichtigung unvollkommener, unvollständiger Kapitalmärkte oder unsicherer Erwartungen führte zu erweiterten Methoden der Ermittlung eines angepaßten Diskontierungsfaktors. Stellvertretend seien hier das „Capital Budgeting“ [2], das „Capital Asset Pricing Model“ (CAPM) [3, 4, 5, 6, 7] oder die „Arbitrage Pricing Theory“ (APT) [8] erwähnt.

Um unsichere Zahlungsströme und flexible Investitionsentscheidungen im Rahmen der Kapitalwertmethode untersuchen zu können, sind Instrumente wie die Sensitivitätsanalyse, die Monte-Carlo-Simulation [9] oder die Anwendung der stochastischen bzw. stochastisch-dynamischen Programmierung [10] bekannt, vgl. auch [11, S. 95–114]. Letztere schien lange Zeit die einzig geeignete Methode zur Bewertung von Investitionen unter der besonderen Berücksichtigung von Unsicherheit, Flexibilität, Irreversibilität und Marktwertorientierung zu sein. Allerdings beantworten weder die Monte-Carlo-Simulation, noch die stochastisch-dynamische Programmierung die problematische Frage nach dem geeigneten exogenen Diskontierungsfaktor. Die Wahl des risikoangepaßten Diskontierungsfaktors des CAPM würde hier zu einer doppelten Berücksichtigung der explizit erfaßten Unsicherheiten führen, während ein einheitlicher risikoloser Kalkulationszinssatz der unrealistischen Annahme unterläge, das systematische (nicht-diversifizierbare) Risiko verändere sich während des Planungshorizontes nicht [12].

Seit den Arbeiten von Black und Scholes [13], Merton [14] und Rubinstein [15] hat sich die Optionspreistheorie zur Bewertung abhängiger Vermögensgegenstände etabliert und zu einer Ausbildung von liquiden Optionsmärkten geführt. Optionspreismodelle, in der anglo-amerikanischen Literatur besser bekannt als „Contingent Claims Analysis“, können auf tatsächliche Investitionsprojekte übertragen werden [16, 17]. Die wesentlichen Vergleichspunkte zwischen einer Kaufoption auf eine Aktie und einer Realoption als einem Recht, eine Investition zu tätigen, bestehen in der vorhandenen *Flexibilität* der Inanspruchnahme, der *Unsicherheit* wertbestimmender Faktoren und der *Irreversibilität* der Ausübung. Der wesentliche Unterschied zur stochastischen Optimierung ist die risikoneutrale Verknüpfung am Kapitalmarkt bewerteter Vermögensgegenstände und den Zahlungsströmen des zu tätigenden Investitionsprojektes, die eine Ermittlung des Barwertes der Realoption durch Diskontierung mit dem *risikofreien* Zins erlauben [18, S. 634], vgl. auch [11, S. 120].

Zu den ersten Anwendungsmöglichkeiten der Theorie der Realoptionen gehörte die Bewertung von Projekten zur Exploration natürlicher Ressourcen – vor allem der Erdölförderung – da der Erdölpreis als wesentliches Risiko der Investition bereits durch funktionierende Märkte abgebildet wurde [19, 20]. Vor allem seit der Liberalisierung der Stromwirtschaft in Europa und der Herausbildung von Finanzmärkten für Elektrizität oder gar CO_2-Zertifikate rückt die Bewertung von Kraftwerksprojekten zunehmend in den Fokus der Realoptionstheorie.

Der übrige Teil dieses Artikels gliedert sich wie folgt: Abschnitt 2 verdeutlicht an einem Beispiel das methodische Vorgehen der Optionspreistheorie zur Bewertung eines Investitionsprojektes. Abschnitt 3 diskutiert die wesentlichen Annahmen der Realoptionstheorie im Kontext der Elektrizitätswirtschaft. Der erweiterte Begriff der *realen Optionen* in Abschnitt 4 bietet darauf aufbauend Möglichkeiten an, die im engen Rahmen der Realoptionstheorie auftretenden Schwierigkeiten der Übertragbarkeit und Operationalisierbarkeit zu überwinden. Abschnitt 5 beendet das Arbeitspapier mit Schlußfolgerungen.

2 Anwendung der Optionspreistheorie zur Bewertung eines Investitionsprojektes

Ausgehend von einem Beitrag von McDonald und Siegel [21] und dessen Diskussion in [11, S. 136 ff.] und [22, S. 203 f.] sei hier beispielhaft dargestellt, wie die Optionspreistheorie der Finanzmathematik auf reale Investitionsgüter übertragen werden kann. Tabelle 1 stellt hierzu die wesentlichen Parameter einer Kaufoption auf eine Aktie und die jeweiligen Entsprechungen bei einer Realoption dar.

Eine Firma steht vor der Entscheidung, zu einem günstigen Zeitpunkt in ein bestimmtes Projekt zu investieren. Die Investitionskosten I seien bekannt und konstant während des Planungshorizontes. Für den Wert des Projektes V als Summe der unsicheren barwertigen Einzahlungsüberschüsse wird angenommen, daß er einer Geometrischen Brownschen Bewegung folgt:

$$dV = \alpha V dt + \sigma V dz, \tag{1}$$

mit der erwarteten Wachstumsrate α (Drift), der Standardabweichung σ und dz als dem Inkrement eines Wiener-Prozesses gemäß $dz = \epsilon_t \sqrt{dt}$. ϵ_t ist in diesem Zusammenhang eine normalverteilte Zufallsvariable mit einem Erwartungswert von Null und einer Standardabweichung von Eins. Seit Ende der fünfziger Jahre des 20. Jahrhunderts werden solche stochastischen Prozesse mit unabhängigen Zuwächsen, die jeweils lediglich vom Prozeßzustand im vorangegangenen Zeitpunkt abhängen (Markov-Eigenschaft) und einer identischen

Tabelle 1
Parameter der Kaufoption auf eine Aktie und einer Realoption

Symbol	Realoption	Kaufoption auf eine Aktie
-	Recht, die aus der Investition resultierenden Einzahlungsüberschüsse gegen Zahlung der Investitionssumme zu erwerben	Recht, eine Aktie gegen Zahlung der Optionsprämie zu erwerben
V	Bruttobarwert der Summe der erwarteten Einzahlungsüberschüsse aus dem Investitionsprojekt	(aktueller) Preis der Aktie
I	Investitionskosten	Basispreis bzw. Ausübungswert der Aktie
δ	Renditeausfall	Dividende
σ	Unsicherheit bezüglich des Kapitalwertes des Investitionsprojektes	Unsicherheit des Aktienpreises
r	Zinssatz für risikolose Anlage	Zinssatz für risikolose Anlage

Normalverteilung unterliegen, zur Abbildung von absoluten Kursveränderungen herangezogen [23, S. 157 ff.].

Die Unternehmung kennt lediglich den aktuellen Projektwert, kann jedoch Informationen gewinnen, indem sie die Investition verzögert und die sich einstellenden Projektwerte beobachtet und zugleich auf Auszahlungen verzichtet.

Die Investitionsmöglichkeit der Firma kann mit einer unbefristeten Kaufoption verglichen werden: es besteht das Recht, jedoch nicht die Verpflichtung, in ein Projekt mit zuvor festgelegten Investitionskosten zu investieren.

Der Wert der Investitionsmöglichkeit $F(V)$ erhöht sich bis zum Zeitpunkt der Durchführung ausschließlich bezüglich des Projektkapitalwertes. Den Investor interessiert eine Entscheidungsregel (kritischer Projektwert), die den Optionswert der Investition als Erwartungswert E des Kapitalwertes zum (unbekannten) zukünftigen Zeitpunkt T der Durchführung maximiert

$$F(V) = \max \mathrm{E}\left[(V_T - I)e^{-\mu T}\right],$$

wobei $e^{-\mu T}$ den Faktor für die kontinuierliche Abzinsung darstellt.

Die wesentliche Annahme aus der Optionspreistheorie ist nun die Forderung, daß die stochastischen Änderungen in V vollständig abgebildet werden durch ein existierendes (gehandeltes) Portfolio aus Vermögensgegenständen mit dem Preis x. Die Korrelation von V und x zum entsprechenden Marktportfolio ist

ρ_{Vm} bzw. ρ_{xm}, es gilt $\rho_{Vm} = \rho_{xm}$. Werfen die Vermögensgegenstände keine Dividenden ab, sondern ergibt sich der Ertrag ausschließlich durch den Kapitalzuwachs, entwickelt sich x gemäß

$$dx = \mu x dt + \sigma x dz.$$

Die risikoangepaßte Gleichgewichtsrendite μ des durchgeführten Investitionsprojektes berücksichtigt das systematische (nicht-diversifizierbare) Risiko desselben und berechnet sich laut CAPM als $\mu = r + \phi\sigma\rho_{xm}$. In diesem Zusammenhang ist r der risikolose Zinssatz und ϕ der Marktpreis des Risikos, vgl. [24, S. 194 ff.].

McDonald und Siegel [21] zeigen, daß die erwartete Wachstumsrate α des Projektwertes V kleiner als die risiko-angepaßte Verzinsung μ sein muß, d. h.

$$\delta = \mu - \alpha > 0. \tag{2}$$

δ repräsentiert somit denjenigen Anteil der geforderten risiko-angepaßten Verzinsung, der nicht durch den Kapitalzuwachs des Investitionsprojektes zustandekommt. Dieser Anteil kommt lediglich dem Besitzer des *realisierten* Projektes zugute, nicht aber dem Besitzer der Investitionsoption. Insofern kann δ als ein Maß für die Opportunitätskosten angesehen werden, die dem Investor dadurch entstehen, daß er die Verwirklichung des Projektes verzögert und stattdessen die Option zu investieren aufrechterhält. In diesem Sinn wird δ häufig als Renditeausfall („rate of return shortfall“) bezeichnet und repräsentiert dann z. B. entgangene Zahlungsströme, die das Projekt bei Durchführung der Investition generieren würde oder aber den immateriellen Gewinn, der durch den bloßen Besitz des Projektes entstehen könnte („convenience yield“), vgl. [12].

Der Optionswert der Investition wird nun bestimmt, indem jeweils seine Risiko- *und* Ertragseigenschaften durch ein Portfolio aus 1 € der risikolosen Anleihe und n Einheiten des korrelierten Vermögensgegenstandes abgebildet werden. Dieses Portfolio mit dem Wert von $(1+nx)$ € erbringt innerhalb des infinitesimal kleinen Zeitraumes dt einen Ertrag, der sich durch die sichere Rückzahlung rdt und dem stochastischen Kapitalertrag ndx berechnet als

$$rdt + n\mu x dt + n\sigma x dz.$$

Der auf den ursprünglichen Kapitaleinsatz $(1+nx)$ bezogene Ertrag des Portfolios beträgt demnach

$$\frac{r + n\mu x}{1 + nx} dt + \frac{\sigma n x}{1 + nx} dz. \tag{3}$$

Der stochastische Verlauf des Projektwertes in Gleichung (1) ist ein spezieller Itô-Prozeß, dessen Parameter eine Funktion der betrachteten Variablen und der Zeit sind gemäß

$$dV = a(V,t)dt + b(V,t)dz,$$

mit $a(V,t) = \alpha V$ und $b(V,t) = \sigma V$ [23, S. 165]. Itô's-Lemma [11, S. 79 ff.] bestimmt für eine Funktion $F(V,t)$, die sowohl von dem stochastischen Prozeß $V(t)$ als auch der Zeit abhängt, das totale Differential dF als

$$dF = \frac{\partial F}{\partial t}dt + \frac{\partial F}{\partial V}dV + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 F}{\partial V^2}(dV)^2.$$

Da jedoch in diesem Beispiel die Investitionsmöglichkeit der Firma als *unbefristete* Kaufoption angesehen wird, ist der Optionswert der Investition lediglich eine Funktion $F(V)$ in Abhängigkeit des stochastischen Projektwertes und das totale Differential dF vereinfacht sich unter Berücksichtigung der Parameter zu

$$dF = \left[\alpha V\frac{\partial F}{\partial V} + \frac{1}{2}\sigma^2 V^2\frac{\partial^2 F}{\partial V^2}\right]dt + \sigma V\frac{\partial F}{\partial V}dz.$$

Bezogen auf den Investitionswert $F(V)$ gilt analog:

$$\frac{dF}{F(V)} = \frac{\alpha V F_V(V) + \frac{1}{2}\sigma^2 V^2 F_{VV}(V)}{F(V)}dt + \frac{\sigma V F_V(V)}{F(V)}dz. \tag{4}$$

Die Differentialgleichung, deren Lösungsformel den Optionswert der Investition bis zum Zeitpunkt ihrer Durchführung bestimmt, kann nun aufgestellt werden, indem die Gleichungen (3) und (4) miteinander verglichen werden. Wenn das Portfolio aus Vermögensgegenständen das durch den Projektbesitz implizierte *Risiko* vollständig abbilden soll, müssen sich zunächst die beiden Wiener Prozesse und deren Vorfaktoren gleichen:

$$\frac{nx}{1+nx} = \frac{VF_V(V)}{F(V)}. \tag{5}$$

Damit der *Ertrag* des Investitionsprojektes im Sinne einer vollständigen Entsprechung dem Marktwert des Portfolios aus Vermögensgegenständen gleicht, muß bei identischem Risiko nun auch in jedem infinitesimal kurzen Zeitraum ein Gleichgewicht zwischen den beiden übrigen Termen in Gleichung (3) und (4) existieren:

$$\frac{\alpha V F_V(V) + \frac{1}{2}\sigma^2 V^2 F_{VV}(V)}{F(V)} = \frac{r + n\mu x}{1+nx}. \tag{6}$$

Dies entspricht der wesentlichen Annahme vollständiger, arbitragefreier Märkte: jedwede Preisunterschiede zwischen dem Projektwert der Investition und dem Portfolio aus Vermögensgegenständen würden zu einer sicheren Gewinnerzielung führen.

Aus Gleichung (2), (5) und (6) folgt nach Umformungen und Vereinfachungen die Eulersche Differentialgleichung

$$\frac{1}{2}\sigma^2 V^2 F_{VV}(V) + (r-\delta)VF_V(V) - rF(V) = 0. \tag{7}$$

Der Lösungsansatz dieser Differentialgleichung in (7) ist

$$F(V) = AV^{\beta_1} \tag{8}$$

und führt unter Berücksichtigung der Randbedingung

$$F(0) = 0$$

und den Nebenbedingungen

$$F(V^*) = V^* - I,$$

$$\left.\frac{dF}{dV}\right|_{V^*} = 1,$$

zum kritischen Projektwert, bei dem die Ausführung der Investition optimal ist:

$$V^* = \frac{\beta_1}{\beta_1 - 1} I. \tag{9}$$

Die Konstanten in Gleichung (8) bestimmen sich zu

$$A = \frac{(\beta_1 - 1)^{\beta_1 - 1}}{\beta_1^{\beta_1} I^{\beta_1 - 1}}, \tag{10}$$

$$\beta_1 = \frac{1}{2} - \frac{r - \delta}{\sigma^2} + \sqrt{\left(\frac{r - \delta}{\sigma^2} - \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{2r}{\sigma^2}}. \tag{11}$$

Gleichung (8) gilt für den Bereich $0 \leq V \leq V^*$ und bestimmt dort den Wert der Option, das Investitionsprojekt durchzuführen. Für $V > V^*$ macht die Unternehmung von der Möglichkeit zu investieren Gebrauch und erhält die Nettoauszahlung $V - I$.

Wäre entgegen der oben getroffenen Annahme der Renditeausfall δ gleich Null, würde die Investition beliebig lange verzögert: für $\delta = 0$ wird $\beta_1 = 1$ und der kritische Projektwert $V^* = \infty$. Im Grenzfall $\delta \to \infty$ wird $\beta_1 = \infty$ und $V^* = I$, d. h. es erfolgt eine Investition, sobald die Summe der barwertigen Einzahlungsüberschüsse den Investitionskosten entsprechen und es gelten die klassischen Regeln der Kapitalwertmethode.

Tabelle 2 zeigt die Parameter der Investitionsbewertung, den daraus resultierenden kritischen Projektwert und die Gleichung für den Optionswert der Investition bis zum Zeitpunkt der Durchführung für unterschiedliche Werte der Standardabweichung σ als Maß für die herrschende Unsicherheit. Der Wert der Investitionskosten I ist auf den Wert Eins normiert und der risikolose Zinssatz r sowie der Renditeausfall δ sind als 0,04 angenommen. Diese Zahlenwerte können bei spezifischen Investitionsprojekten erheblich variieren – Dixit und Pindyck bezeichnen die Annahmen daher als „begründet, jedoch nicht notwendigerweise repräsentativ“ [11, S. 153]. Die Spalte für $\sigma = 0$

Tabelle 2
Parameter der exemplarischen Investitionsbewertung für unterschiedliche Annahmen der herrschenden Unsicherheit

	$\sigma = 0$	$\sigma = 0,2$	$\sigma = 0,3$
I	1	1	1
r	0,04	0,04	0,04
δ	0,04	0,04	0,04
β_1	-	2	1,57
A	-	0,25	0,36
V^*	$I = 1$	$2 \cdot I = 2$	2,76
$F(V)$	$V - I$	$0,25 \cdot V^2$	$0,36 \cdot V^{1,57}$

entspricht der Investitionsentscheidung unter Sicherheit, d. h. der klassischen Regel des Kapitalwertverfahrens.

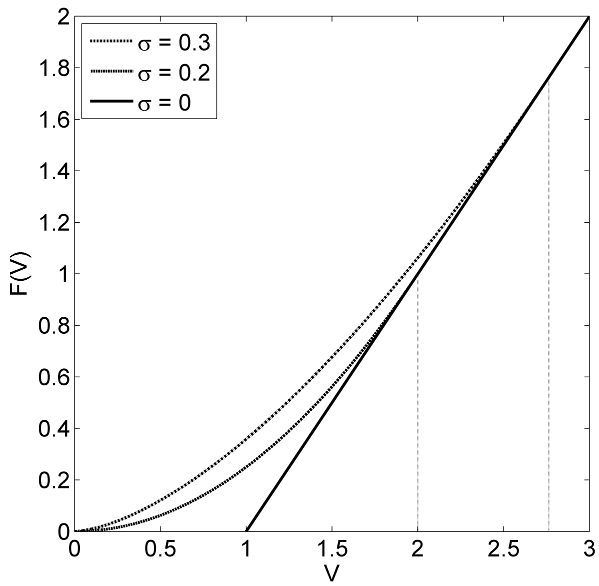

Abbildung 1. Optionswert der Investition

Abbildung 1 stellt den Verlauf des Optionswertes der Investition für die drei genannten Fälle dar. Es wird deutlich, daß die klassische Regel des Kapitalwertverfahrens – „investiere, sobald der Kapitalwert wenigstens positiv ist“ – zu deutlich falschen Ergebnissen führen kann: V muß unter den getroffenen Annahmen wenigstens den *zweifachen* Wert der Investitionsausgabe betragen, bevor die Unternehmung das Projekt bei einer Standardabweichung von $\sigma = 0,2$ durchführen sollte. Dagegen hätte das Kapitalwertverfahren die Durchführung der Investition bereits bei dem Projektwert $V^* = 1$ empfohlen, da hier die Schwelle zu einer positiven Summe der barwertigen Ein- und Auszahlungen liegt. Mit zunehmenden Werten für die Standardabweichung σ wächst der kritische Projektwert V^* und somit auch der Wert, das Investitionsprojekt zeitlich zu verschieben und führt so zu einer noch zurückhaltenderen Investitionsneigung.

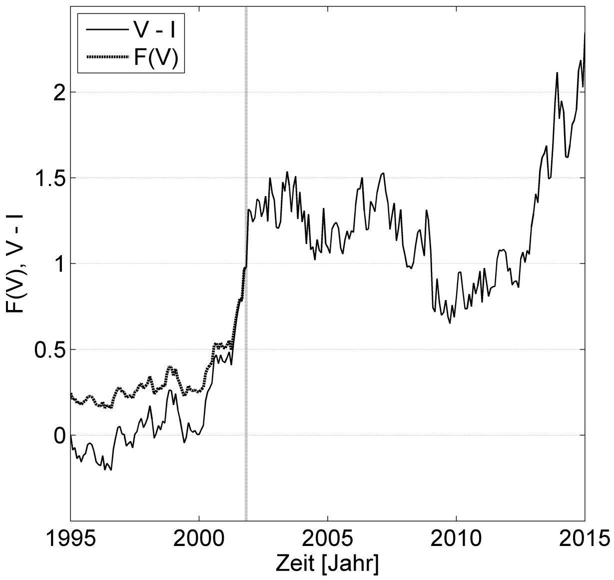

Abbildung 2. Möglicher Pfad für $F(V)$ und $V-I$

Abbildung 2 zeigt einen denkbaren Verlauf des Wertes für die Investitionsoption $F(V)$ und den Kapitalwert des Projektes $V_t - I$, angenommen, der ursprüngliche Projektwert betrage $V_0 = I = 1$, die risiko-angepaßte Verzinsung $\mu = 0,08$, der Renditeausfall $\delta = 0,04$ und die Wachstumsrate des Projektwertes somit $\alpha = 0,04$. Wie zuvor sei $r = 0,04$ und es gelte $\sigma = 0,2$. $F(V)$ bestimmt sich dann wie in Tabelle 2 abzulesen als $F(V) = \frac{1}{4}V^2$. $V_t - I$ folgt einem zeitdiskreten Random Walk mit Drift [23, S. 163] gemäß

$$V_t - I = 1,0033 \cdot V_{t-1} + 0,0577 \cdot V_{t-1} \cdot \epsilon_t - 1,$$

wobei die Parameter für α und σ in monatliche Raten umgerechnet werden müssen. Die traditionelle Regel des Kapitalwertverfahrens würde zu einer umgehenden Investition auffordern, da schon im Jahr 1995 ein wenigstens positiver Kapitalwert vorliegt. Der Realoptionstheorie zufolge erscheint das Projekt tatsächlich erst nach einer Wartezeit von in diesem Beispiel fast sieben Jahren lukrativ, weil erst dann der kritische Projektwert $V^* = 2$ bzw. $V^* - I = 1$ erreicht wird. Der Erwartungswert und die Streuung dieser Wartezeit kann analytisch bestimmt werden, allerdings finden diese Werte keine besondere Beachtung in der Realoptionstheorie [11, S. 161]. Vielmehr geht es um die Bestimmung des kritischen Projektwertes, um eine Entscheidungsregel für die aktuelle Entscheidungssituation zu erhalten. Aus der klassischen Investitionsregel „jetzt oder nie“ wird in der Realoptionstheorie „jetzt oder vielleicht später“.

3 Realoptionstheorie im Kontext der Elektrizitätswirtschaft

Um die Anwendbarkeit der Realoptionstheorie auf die Bewertung von Kraftwerksinvestitionen zu untersuchen, werden die wesentlichen Annahmen der Optionspreistheorie im Kontext der Elektrizitätswirtschaft diskutiert.

Vollständiger Markt und Arbitragefreiheit. Die Bedingung, daß der (unsichere) Projektwert der zu bewertenden Investition über ein vergleichbares, am Kapitalmarkt gehandeltes Projekt oder Bündel aus Vermögenswerten bestimmt werden kann, ist *die* zentrale Forderung der Realoptionstheorie. Sie läßt sich letztlich auf die Annahme eines vollständigen Marktes und der Arbitragefreiheit zurückführen. Einige Autoren sind der Meinung, daß gerade nach der Liberalisierung des europäischen Strommarktes diese Bedingung tatsächlich unterstellt werden kann, da der Wert des jeweiligen Investitionsprojektes maßgeblich verknüpft sei mit demjenigen des eingesetzten Brennstoffes und des Strompreises, die ihrerseits an organisierten Börsen (objektiv) festgestellt würden, vgl. [12, 25]. Während für Rohstoffmärkte die Annahme eines liquiden und effizienten Marktes möglich scheint [19], weisen andere Autoren darauf hin, daß dieses für europäische Strommärkte (noch) nicht gilt. Trotz eines seit der Zusammenlegung der beiden deutschen Strombörsen Leipzig Power Exchange (LPX) und European Energy Exchange (EEX) im Juli 2002 stetig zunehmenden Handelsvolumens betrug der Anteil des deutschen Spotmarktumsatzes (Handelssystem SAPRI) im vergangenen Jahr 2005 mit 85,3 TWh lediglich knapp 14 % am gesamten Bruttostrombedarf [1] desselben Jahres. Offensichtlich handelt es sich beim deutschen Strommarkt also noch nicht um einen Markt, dessen Liquidität mit derjenigen anderer Rohstoff- oder Finanzmärkte vergleichbar wäre. Darüber hinaus kann derzeit in Deutschland eine oligopolistische Struktur des Strommarktes ausgemacht werden, die den vier größten Energieversorgungsunternehmen beträchtliche erzeugerseitige Marktmachtpotentiale erlaubt [26] und eine effiziente präferenzfreie Marktbewertung auf den Handelsplätzen für Elektrizität aufgrund eines möglichen strategischen Verhaltens in Frage stellt.

Itô-Prozesse zur Abbildung der unsicheren Werttreiber. Um die stochastischen Differentialgleichungen der Optionspreistheorie lösen zu können, bedarf es der Anwendung Itô’s-Lemma auf Itô-Prozesse, die der allgemeinen Vorschrift $dx = a(x,t)dt + b(x,t)dz$ genügen (siehe Abschnitt 2). Die Anwendung der Optionspreistheorie auf reale Investitionen ist also auf die Be-

[1] Vorläufige Angabe für 2005: 610,5 TWh.

rücksichtigung ganz bestimmter Zufallsprozesse beschränkt. Neben der Geometrischen Brown'schen Bewegung gehören der Ornstein-Uhlenbeck-Prozeß (Mean-Reverting Process) oder Jump-Diffusion Prozeß zu den häufig herangezogenen Varianten. Diese eingeschränkte (exogene) Vorgabe der unsicheren Faktoren kann die praktische Anwendbarkeit der Realoptionstheorie in hohem Maß in Frage stellen [27]. Zwar wird in der Literatur der Ornstein-Uhlenbeck-Prozeß häufig auch zur Abbildung der Strom- und Brennstoffpreise empfohlen [11, 28], allerdings geben gerade die stark volatilen Bewegungen der letzten anderthalb Jahre auf diesen Märkten Anlaß, die Unterstellung dieses Zufallsprozesses erneut zu untersuchen, vgl. Abbildung 3 und 4. Dies gilt ganz besonders deshalb, weil unangemessene Annahmen bei der Wahl des stochastischen Prozesses und dessen Parameter (s. u.) gravierende Auswirkungen auf den Optionswert der Investition haben können [29] und Investitionsplanungen über einen *langfristigen* Zeithorizont stattfinden. Das erweiterte stochastische Zwei-Faktor-Modell von Schwartz und Smith [30] zur Beschreibung der Rohstoffpreise auf Basis des Ornstein-Uhlenbeck-Prozesses ist mit dem Ziel entwickelt worden, eine realistischere Abbildung als die erwähnten Standardmodelle zu bieten und zugleich nicht zu komplex zu sein, um Eingang in eine optionspreistheoretische Bewertung zu finden. Varianten des Autoregressive-Conditional-Heteroskedasticity (ARCH) Ansatzes, die bereits zur Untersuchung von Elektrizitätspreisen empfohlen worden sind [31, 32, 33], versprechen eine bessere vorausschauende Prognose auf Basis historischer Daten, widersprechen jedoch der Annahme der Optionspreistheorie, daß die unsicheren Eingangsgrößen einem Itô-Prozeß zeitlich unabhängiger Zuwächse unterliegen.

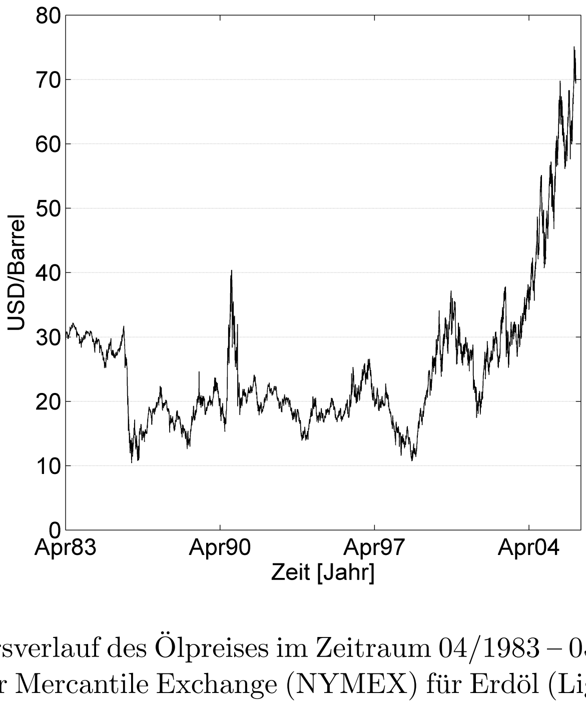

Abbildung 3. Kursverlauf des Ölpreises im Zeitraum 04/1983 – 05/2006. Terminpreise der New Yorker Mercantile Exchange (NYMEX) für Erdöl (Light-Sweet, Cushing, Oklahoma), [34]

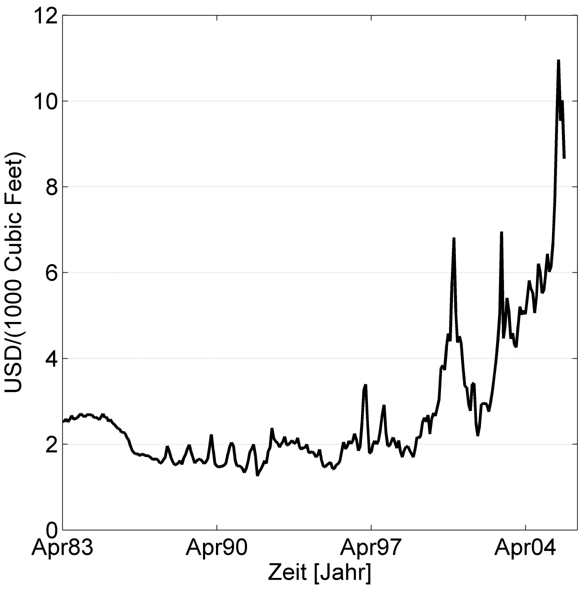

Abbildung 4. Kursverlauf des Gaspreises im Zeitraum 04/1983 – 02/2006. U.S. Abgabepreis der Erdgasproduzenten (Wellhead Price), [34]

Eigenständigkeit und Exklusivität der Realoption. Untersuchungen der Realoptionstheorie konzentrieren sich häufig auf *einzelne* Investitionsprojekte einer Unternehmung, die sich nicht gegenseitig in ihrem Wert oder der Durchführung beeinflussen. In der Realität kann diese Annahme nicht aufrechterhalten werden und es sollte der Versuch unternommen werden, diese Interaktionen bei der Bewertung zu berücksichtigen. Ansätze hierzu liefern zusammengesetzte Realoptionen („compound options"), die zum Beispiel berücksichtigen, daß die Existenz des einen Projektes die Realisierung des anderen erst ermöglicht [22]. Wesentlich schwieriger ist allerdings die Berücksichtigung wertbeeinflussender Abhängigkeiten: hierzu müßte der Betrag, um den sich der Cash Flow des Folgeprojektes ursächlich erhöht bzw. vermindert, bekannt sein, um bei der Bewertung des ersten Projektes bereits berücksichtigt werden zu können. Allerdings scheint genau dieser wertbeeinflussende Effekt bei der strategischen Planung eines einzelnen Kraftwerksbetreibers interessant zu sein, da der Bau großer Kraftwerke durchaus Einfluß auf die sich einstellende Preisstruktur auf dem Elektrizitätsmarkt und somit den Wert potentieller Folgeprojekte hat.
Aus der Optionspreistheorie abgeleitet ist die Annahme der Realoptionstheorie, die Investitionsmöglichkeit als *exklusives* Recht einer bestimmten Unternehmung zu betrachten. Handlungen der übrigen Mitbewerber innerhalb eines betrachteten Marktsegments hätten dieser Forderung zufolge keinerlei Einfluß auf den Optionswert der Investition. Im tatsächlichen Zusammenspiel mehrerer Akteure offenbaren Handlungen der Konkurrenz jedoch teilweise erheblichen Einfluß auf den Wert der Investition. Diese Effekte können innerhalb optionspreistheoretischen Betrachtungen („shared options") berücksichtigt werden, indem zum Beispiel die Verminderung des Marktpotentials durch die Aus-

übung einer Option als dividendenähnliche Auszahlung (Wertminderung des Basisinstrumentes) modelliert wird [12]. Die quantitative Bestimmung dieser Wertminderung muß sich jedoch an zusätzlichen Annahmen orientieren.

Fixierung und Bestimmung der Parameter der Realoption. Eng mit der zuvor genannten Annahme exklusiver Realoptionen ist das Problem verbunden, während eines Planungshorizontes Eingangsparameter der Betrachtung als konstant anzusehen. Sowohl der risikofreie Zinssatz, als auch der Gegenwartswert der Investitionsausgaben müssen nicht zwangsläufig unveränderlich sein. Auch hier gibt es die Möglichkeit der methodischen Anpassung, z. B. die Modellierung stochastischer Investitionsausgaben, die allerdings die Komplexität der Betrachtung wesentlich erhöht.
Generell scheint die konkrete Spezifikation der Optionsparameter eine große Herausforderung bei der Übertragung der Optionspreistheorie auf reale Investitionsprojekte zu sein. Ganz besonders gilt dies für die Parameter der Zufallsprozesse der unsicheren Betrachtungsgrößen, z. B. der Standardabweichung σ oder der Differenz aus erwarteter Rendite und Wachstumsrate δ („rate-of-return shortfall" oder „convenience yield"). Hierbei gibt es grundsätzlich drei verschiedene Vorgehensweisen: (i) Berechnung historischer Volatilitäten, (ii) Messung impliziter Standardabweichungen oder (iii) Simulation bzw. Schätzung, vgl. [25]. Im günstigsten Fall und unter der Voraussetzung, daß auf das Basisinstrument Optionen gehandelt werden, kann aus den sich einstellenden Preisen am jeweiligen Optionsmarkt die implizite Volatilität ermittelt werden [12]. Allerdings weist auch der Optionshandel auf Elektrizität an der deutschen EEX, der erst im November 2004 aufgenommen worden ist, ein bisher geringes Handelsvolumen auf und kann bislang kaum als Grundlage für die Messung impliziter Volatilitäten herangezogen werden. Deshalb sind zur Bestimmung geeigneter Parameter nach wie vor Verfahren wie z. B. die Maximum Likelihood Schätzung, das Kalman Filtering oder die Monte-Carlo-Simulation üblich. Grundsätzlich muß jedoch sichergestellt werden, daß der historisch betrachtete Zeitraum repräsentativ für den zukünftigen Bewertungszeitraum ist.

Wie bereits angedeutet, hat die Liberalisierung der Stromwirtschaft marktwertorientierte Investitionsbewertungsverfahren von Kraftwerksprojekten in enger Anlehnung an die Realoptionstheorie in den Fokus wissenschaftlichen Interesses gerückt und innerhalb der letzten Jahre zu einer Anzahl verschiedener Untersuchungen geführt. Diese unterscheiden sich im Wesentlichen in den zugrundegelegten Zufallsprozessen und den jeweils angewandten Lösungsverfahren.
Analytische Verfahren lösen die aufgestellten Differentialgleichungen in einem geschlossenen Weg und leiten für die spezielle Fragestellung eine Bewertungsformel her. Dieses Vorgehen ist beispielhaft in Abschnitt 2 dargestellt worden. Ausgehend von einer etwas einfacheren Formulierung der Differentialgleichungen [35] ergänzt Rothwell [36] die geschlossene Lösung des Problems um

eine Bewertung eines Fortgeschrittenen Siedewasserreaktors, indem er charakteristische lineare Kostenterme berücksichtigt, zeitabhängige Parameter aus historischen Daten schätzt und Netto-Erlöse simuliert. Die kritischen Investitionskosten liegen wesentlich unter den als derzeit üblich angenommenen – zusätzliche Maßnahmen zur Risikominderung scheinen daher notwendig, um Anreize für den Bau solcher Kraftwerke in den Vereinigten Staaten von Amerika zu schaffen. FLETEN und NÄSÄKKÄLÄ [37] erweitern den dargestellten Ansatz aus Abschnitt 3 um die Betrachtung des „spark spreads“ – der Differenz aus dem Strompreis und den Brennstoffkosten zur Stromerzeugung – und untersuchen den Wert einer Investition in ein Gaskraftwerk unter gleichzeitiger Berücksichtigung einer flexiblen Betriebsweise und möglicher Stillegung. Trotz eines komplexeren Zwei-Faktor-Modells für den stochastischen Verlauf des „spark spreads“ ist eine analytische Lösung möglich, allerdings unter Vernachlässigung von Anfahr- und Abfahrzeiten und -kosten und der Annahme einer unendlichen Kraftwerkslaufzeit. Unter dem „spark spread“ wird im Energiehandel eine Option auf die Preisdifferenz zwischen dem Brennstoffpreis als Kraftwerksinput und dem Strompreis verstanden.
Optionen, die jederzeit ausgeübt werden dürfen (Amerikanische Optionen) und eine endliche Laufzeit aufweisen, führen zu partiellen Differentialgleichungen, die mit geschlossenen Lösungsverfahren nicht bewertet werden können, vgl. [11, S. 396 ff.]. Deshalb nutzt MÜLLER [25] eine *analytische Approximation* [38, 39] zur Bewertung eines Kraftwerksprojektes unter sowohl unsicheren Investitionskosten als auch barwertigen Rückflüssen. Solche analytischen Verfahren bestimmen die Lösung der Differentialgleichung meist mit Hilfe polynomieller [40] oder quadratischer [41] Näherungen. Je detaillierter die optionspreistheoretische Investitionsbewertung erfolgen soll, umso häufiger ist eine numerische Diskretisierung des Zustandsraumes mit Hilfe von *Lattice-Ansätzen* erforderlich. Bekanntester Vertreter dieser Lösungsverfahren ist das Binomialmodell von COX ET AL. [42], das den stochastischen Prozeß des Basisinstrumentes als zeitdiskreten Prozeß mit genau zwei Folgezuständen beschreibt. Das Prinzip der risikoneutralen Bewertung wird hier aufrechterhalten, indem künstliche „risiko-neutrale“ Wahrscheinlichkeiten und Sprunggrößen für eine Aufwärts- bzw. Abwärtsbewegung innerhalb des Zustandsbaumes aus den Bedingungen für das erste und zweite Moment des zugrunde liegenden Zufallsprozesses und der zu lösenden Differentialgleichung abgeleitet werden. Eine Schwäche dieser Lattice-Ansätze ist häufig ihre nicht-stetige Approximation (die Näherung gilt nur im Grenzübergang), allerdings schätzen Anwender aus der Praxis den zusätzlichen Informationsgewinn durch eine transparente Darstellung der Entscheidungssituationen [12]. ABADIE und CHAMORRO [43] nutzen ein solches numerisches Verfahren, um eine Investition in ein Gas-und-Dampfturbinenkraftwerk (GuD) mit derjenigen in einen flexibel zu betreibenden GuD-Prozeß mit vorgeschalteter Brennstoffvergasung zu vergleichen. Obwohl es sich hier für optionspreistheoretische Ansätze um ein detailliertes Problem handelt, müssen einige vereinfachende Annahmen getroffen werden,

z. B. konstante Strompreise und variable Kosten während des betrachteten Zeitraumes oder Vernachlässigung von Bauzeiten.

4 Erweiterter Begriff der realen Optionen im Kontext der Elektrizitätswirtschaft

Bei genauer Betrachtung ist ein wesentlicher Nachteil der optionspreistheoretischen Investitionsbewertung die durch das angewandte Lösungsverfahren bedingte teilweise enorme Vereinfachung des zugrunde liegenden Projektes – abgesehen von womöglich nur unzureichend zutreffenden Kernannahmen der Realoptionstheorie (siehe Abschnitt 3). Diese Feststellung führt zwangsläufig zu der Frage, inwieweit *reale Optionen* als Möglichkeiten der Investition in physische Güter marktwertorientiert und dennoch angemessen detailliert bewertet werden können. Die Antwort hierauf ist die Rückkehr zur stochastischen bzw. stochastisch-dynamischen Programmierung – allerdings unter Inkaufnahme der Notwendigkeit, einen exogenen Zinssatz geeignet vorgeben zu müssen (vgl. Abschnitt 1). Smith und Nau [44] zeigen, daß Entscheidungsbaumanalysen durch die Maximierung des erwarteten Nutzens der Unternehmung theoretisch zu Investitionsbewertungen führen können, die mit denjenigen der Optionspreistheorie konsistent sind. Allerdings wirft die Bestimmung einer unternehmerischen Nutzenfunktion neue, ungleich bedeutendere Schwierigkeiten auf [22, S. 68]. Im Sinne einer praktischen Umsetzung bleibt daher das Problem der adäquaten Diskontierung bestehen.

Der Begriff „reale Optionen“ („real options“) repräsentiert dennoch auch die Bewertungsansätze der stochastischen Optimierung aufgrund seiner weitgefaßten Definition in der Fachliteratur, die sich – ausgehend von einer Diskussion bei Wang und Neufville [45] – in den folgenden vier Begriffsfestlegungen widerspiegeln soll.

- *„In a narrow sense, the real options approach is the extension of financial option theory to options on real (nonfinancial) assets.“* (nach Amram und Kulatilaka, [?])
- *„Similar to options on financial securities, real options involve discretionary decisions or rights, with no obligations, to acquire or exchange an asset for a specified alternative price.“* (nach Trigeorgis, [22, S. xi])
- *„Opportunities are* options *– rights but not obligations to take some action in the future.“* (nach Dixit und Pindyck, [46])
- *„In fact, it is possible to view almost any process that allows control as a process with a series of operational options. These operational options are often termed real options to emphasize that they involve real activities or real commodities, as opposed to purely financial commodities, as in the case, for instance, of stock options.“* (nach Luenberger, [?])

Amram und Kulatilaka deuten mit ihrer Definition die Methode realer Optionen als eine Erweiterung der finanzmathematischen Optionstheorie auf reale physische Güter. Allerdings weist ihre Formulierung bereits deutlich daraufhin, daß auch eine weitgefaßtere Auslegung des Realoptionsansatzes existieren kann. Eine solche findet sich bei Trigeorgis oder Dixit und Pindyck. Letztere sehen eine Option als Möglichkeit für eine zukünftige Handlung in einer Begriffsfestlegung, die die mögliche Analogie zur Finanzmathematik zunächst unberücksichtigt zu lassen scheint. Luenberger schließlich liefert die in diesem Kontext freieste Auslegung des Begriffs und bezeichnet reale Optionen als strategische Möglichkeiten, die reale Handlungen oder physische Wirtschaftsgüter betreffen.

Dieser freieren Auffassung folgend, existieren einige Arbeiten im Bereich der Elektrizitätswirtschaft, die sich auf Untersuchungen realer Optionen beziehen oder von einigen Annahmen der Realoptionstheorie anregen lassen und dennoch – in der Regel zur besseren Berücksichtigung technischer Interdependenzen, intertemporaler Effekte oder endogener wertbeeinflussender Faktoren – von der strikten optionspreistheoretischen Betrachtung abweichen.

So entwickeln Gardner und Rogers [47] mit Hilfe der stochastischen Programmierung einen Modellansatz zur Kraftwerkskapazitätsplanung unter unsicherer Stromnachfrage und spezieller Berücksichtigung verschiedener Bauzeiten für die eingesetzten Technologien. Die Zielfunktion minimiert die Kosten bei Deckung der unsicheren Stromnachfrage. Ein Zahlenbeispiel illustriert, daß Kraftwerkstechnologien mit kurzen Bauzeiten (und hohen variablen Kosten), die bei traditioneller Einsatzplanung entsprechend der „merit order" vernachlässigt würden, unter Berücksichtigung der Bauzeitunterschiede wieder Teil des optimalen Einsatzes werden können. Die Autoren beziehen dabei ihre Arbeit ausdrücklich auf vorangegangene Arbeiten realer Optionen, betonen jedoch zugleich, einen besonderen Schwerpunkt auf das technische System legen zu wollen. Tseng und Barz [48] beschreiben ein Modell zur kurzfristigen Kraftwerkseinsatzplanung, das die Preisentwicklung der erzeugten Elektrizität und des umzuwandelnden Brennstoffes in Anlehnung an die Optionspreistheorie als Itô-Prozesse abbildet. Hier liegt ein besonderer Schwerpunkt auf der detaillierten Untersuchung der technischen Randbedingungen des Kraftwerksbetriebs, z. B. Anfahr- und Abfahrzeiten, Mindeststillstandszeiten und Mindestlaufzeiten oder veränderlicher Kraftwerkswirkungsgrade. Ein aufwendiger integrierter Ansatz aus Monte Carlo Simulation und dynamischer Programmierung bestimmt den (gewinnmaximierten) Wert einer Erzeugungstechnologie unter Annahme verschiedener technischer Randbedingungen. Die Vernachlässigung derselben kann zu einer deutlichen Überbewertung des Projektwertes führen. Zu diesem Ergebnis kommen ebenfalls Gardner und Zhuang [49], die eine ähnliche Fragestellung mit Hilfe eines Lattice-Ansatzes zur Abbildung der unsicheren Strom- und Brennstoffpreisentwicklung und dynamischer Programmierung untersuchen und auf diesem Weg auf die rechenintensive Koppelung mit der Monte Carlo Simulation verzichten. Ein Modell, das von optionspreistheoretischen Annahmen weiter losgelöst wurde, behandeln ROQUES ET AL. [50]. In einer detaillierten Berücksichtigung der technischen und monetären Parameter eines Kernkraftwerks und einer GuD-Anlage wird untersucht, inwiefern die Stromerzeugung aus Kernenergie eine Absicherung gegen volatile Strom-, Gas- und CO_2-Zertifikatepreise darstellen kann. Die unsicheren Preise gehen als Monte Carlo Simulationen auf Basis geschätzter Parameter in das Modell ein, um im Gegensatz zu optionspreistheoretischen Modellen realistische *langfristige* Zeiträume, die für Investitionsentscheidungen wesentlich sind, beurteilen zu können. Ein Ergebnis der Untersuchung ist, daß Investitionen in Kernenergie unter Annahme einer hohen geforderten Rendite von 10 % und einer derzeit beobachteten Korrelation zwischen Strom-, Gas- und CO_2-Zertifikatepreise zumindest aus einzelwirtschaftlicher Sicht nicht lukrativ erscheinen. Um im liberalisierten Markt einen technologisch diversifizierten Kraftwerksmix zur versorgungssicheren Stromerzeugung aufrechtzuerhalten, könnten deshalb politische Anreize notwendig sein. BOTTERUD [51] untersucht Investitionen in Grundlast- und Spitzenlastkraftwerke als reale Optionen, indem, angelehnt an die Optionspreistheorie, die Stromnachfrage als eine diskretisierte Brown'sche Bewegung im Modell dargestellt wird. Allerdings stellen sich die Strompreise *endogen* an einem modellierten Spotmarkt als Schnittpunkte linearer Stromangebots- und -nachfragekurven ein, die ihrerseits durch die unsichere Stromnachfrage und den zu optimierenden Zubau in Kraftwerkskapazität variieren. Diese modellendogene Ermittlung der Strompreise ermöglicht, den Einfluß kapazitätsintensiver Kraftwerksinvestitionen auf den Strompreis explizit zu berücksichtigen. Darüber hinaus erlaubt dieser Weg die Wirkung veränderlicher Preiselastizitäten der Stromnachfrage oder unterschiedlicher Strukturen des Marktes zu untersuchen. Dies können optionspreistheoretische Modelle ohne zusätzliche, kaum quantifizierbare Annahmen nicht leisten.

5 Schlußfolgerungen und Ausblick

Investitionen in neue Kraftwerke zur Stromerzeugung stellen kaum umkehrbare Entscheidungen dar, die innerhalb eines Planungshorizontes zeitlich verzögert werden können, um den unsicheren Einflüssen auf den Investitionswert, z. B. einer schwankenden Stromnachfrage oder volatilen Brennstoffpreisen, Rechnung zu tragen. Das in den vergangenen Jahren zunehmend favorisierte Investitionsbewertungsverfahren auf Basis der Realoptionstheorie verspricht eine präferenzfreie Marktbewertung, stellt seine Anwendung jedoch aufgrund restriktiver Annahmen und der erschwerten Abbildung komplexer Systeme selbst in Frage.

Für den Bereich der Elektrizitätswirtschaft hat diese Diskussion gezeigt, daß die Kernannahme der Realoptionstheorie – die Replizierbarkeit der Ertrags- und Risikoeigenschaften des zu untersuchenden Basisinstrumentes durch einen vollständigen Markt – zumindest bei der derzeitigen Struktur des deutschen Stromhandels nicht haltbar ist. Darüber hinaus führt die willkürliche Festlegung der unsicheren Eingangsgrößen auf Itô-Prozesse zu Schwierigkeiten bei langfristigen Prognosezeiträumen, wie sie für Investitionsbewertungen im Kraftwerksbereich unumgänglich sind. Technisch detailliertere Untersuchungen mit Hilfe der Realoptionstheorie sind kaum exakt abzubilden und verlangen vereinfachende Annahmen an anderer Stelle, um wenigstens Näherungslösungen zuzulassen. Deshalb beschränken sich die bisherigen Untersuchungen der Realoptionstheorie im Bereich der Elektrizitätswirtschaft auf einigermaßen vereinfachte Fragestellungen.

Aus diesen Gründen ist es empfehlenswert, die Bewertung von Kraftwerksinvestitionen auf Basis des erweiterten Begriffs realer Optionen durchzuführen. Hierzu hat sich die Anwendung der stochastischen Programmierung im Bereich der Elektrizitätswirtschaft, vor allem im Bereich der kurzfristigen Kraftwerkseinsatzplanung, bereits bewähren können. Die stochastische Programmierung erlaubt jedoch nicht nur die angemessene Berücksichtigung unsicherer Faktoren, wie zum Beispiel eine fluktuierende Stromnachfrage oder schwankende Brennstoffpreise. Vielmehr lassen sich mit ihrer Hilfe ebenso die für eine Kraftwerksinvestition typischen Eigenschaften eines flexiblen Investitionszeitpunktes oder irreversibler Kostenanteile und ihre Auswirkung auf den Wert der Investitionsmöglichkeit als Option untersuchen. Unter Zuhilfenahme aufwendigerer Prognoseverfahren, die sich zumindest für die Brennstoffpreise auch an Marktwerten orientieren sollten, kann eine realistische Bewertung, die sich an den konkreten Eigenschaften des Investitionsprojektes orientiert, gelingen.

Literatur

[1] Fisher, I.: *The rate of interest - its nature, determination and relation to economic phenomena.* New York : Macmillan, 1907

[2] Dean, J.: *Capital budgeting top-management policy on plant, equipment, and product development.* New York : Columbia University Press, 1951

[3] Sharpe, W. F.: Capital Asset Prices: A Theory of Market Equilibrium under Conditions of Risk. In: *The Journal of Finance* 19 (1964), Nr. 3, S. 425–442

[4] Lintner, J.: The Valuation of Risk Assets and the Selection of Risky Investments in Stock Portfolios and Capital Budgets. In: *The Review of Economics and Statistics* 47 (1965), Nr. 1, S. 13–37

[5] Lintner, J.: Security Prices, Risk, and Maximal Gains from Diversification. In: *The Journal of Finance* 20 (1965), Nr. 4, S. 587–615

[6] Mossin, J.: Equlibrium in a Capital Asset Market. In: *Econometrica* 34 (1966), Nr. 4, S. 768–783

[7] Fama, F.: Risk, Return and Equilibrium: Some Clarifying Comments. In: *The Journal of Finance* 23 (1968), Nr. 1, S. 29–40

[8] Ross, S. A.: The Arbitrage Theory of Capital Asset Pricing. In: *Journal of Economic Theory* 13 (1976), Nr. 3, S. 341–360

[9] Hertz, D. B.: Risk Analysis in Capital Investment. In: *Harvard Business Review* 42 (1964), Nr. 1, S. 95–106

[10] Bertsekas, D. P.: *Dynamic programming and optimal control*. Bd. 1. Belmont, Massachusetts (US) : Athena Scientific, 2005

[11] Dixit, A. K. ; Pindyck, R. S.: *Investment under Uncertainty*. Princeton, New Jersey : Princeton University Press, 1994

[12] Hommel, U. ; Pritsch, G.: Marktorientierte Investitionsbewertung mit dem Realoptionsansatz: Ein Implementierungsleitfaden für die Praxis. In: *Finanzmarkt und Portfoliomanagement* 13 (1999), Nr. 2, S. 121–144

[13] Black, F. ; Scholes, M.: The Pricing of Options and Corporate Liabilities. In: *Journal of Political Economy* 81 (1973), Nr. 3, S. 637–654

[14] Merton, R. C.: Theory of Rational Option Pricing. In: *Bell Journal of Economics and Management Science* 4 (1973), Nr. 1, S. 141–183

[15] Rubinstein, M.: The Strong Case for the Generalized Logarithmic Utility Model as the Premier Model of Financial Markets. In: *The Journal of Finance* 31 (1976), Nr. 2, S. 551–571

[16] Myers, S. C.: Determinants of Corporate Borrowing. In: *Journal of Financial Economics* 5 (1977), Nr. 2, S. 147–175

[17] Ross, S. A.: A Simple Approach to the Valuation of Risky Streams. In: *The Journal of Business* 51 (1978), Nr. 3, S. 453–475

[18] Sick, G.: *Real Options*. Amsterdam : Elsevier, 1995 (Handbooks in Operations Research and Management Science: Finance)

[19] Brennan, M. J. ; Schwartz, E. S.: Evaluating Natural Resource Investments. In: *The Journal of Business* 58 (1985), Nr. 2, S. 135–157

[20] Paddock, J. L. ; Siegel, D. R. ; Smith, J. L.: Option Valuation of Claims on Real Assets: The Case of Offshore Petroleum Leases. In: *The Quarterly Journal of Economics* 103 (1988), Nr. 3, S. 479–508

[21] McDonald, R. ; Siegel, D.: The Value of Waiting to Invest. In: *The Quarterly Journal of Economics* 101 (1986), Nr. 4, S. 707–728

[22] Trigeorgis, L.: *Real options: Managerial flexibility and strategy in resource allocation*. Cambridge, Massachusetts : The MIT Press, 1997

[23] Rinne, H. ; Specht, K.: *Zeitreihen: Statistische Modellierung, Schätzung und Prognose*. München : Vahlen, 2002

[24] Sharpe, W. F. ; Alexander, G. J.: *Investments*. 4. Englewood Cliffs, New Jersey (US) : Prentice Hall, 1990

[25] Müller, D.: Investitionsentscheidungen in der Elektrizitätswirtschaft - eine betriebswirtschaftliche Analyse. In: *Zeitschrift für Energiewirtschaft* 29 (2005), Nr. 1, S. 65–76

[26] Ellersdorfer, I. ; Blesl, M. ; Fahl, U. ; Kessler, A.: Wettbewerb im liberalisierten europäischen Elektrizitätsmarkt – Analysen mit einem spieltheoretischen Modellansatz. In: *Zeitschrift für Energiewirtschaft* 28 (2004), Nr. 1, S. 3–18

[27] Lander, D. M. ; Pinches, G. E.: Challenges to the Practical Implementation of Modeling and Valuing Real Options. In: *The Quarterly Review of Economics and Finance* 38 (1998), Nr. Special Issue, S. 537–567

[28] Schwartz, E. S.: The Stochastic Behavior of Commodity Prices: Implications for Valuation and Hedging. In: *The Journal of Finance* 52 (1997), Nr. 3, S. 923–973

[29] Smith, J. E. ; McCardle, K. F.: Options in the Real World: Lessons Learned in Evaluating Oil and Gas Investments. In: *Operations Research* 47 (1999), Nr. 1, S. 1–15

[30] Schwartz, E. ; Smith, J. E.: Short-Term Variations and Long-Term Dynamics in Commodity Prices. In: *Management Science* 46 (2000), Nr. 7, S. 893–911

[31] Escribano, A. ; Pena, J. I. ; Villaplana, P.: Modeling Electricity Prices: International Evidence / Working Paper Economic Series, Nr. 02-27. Madrid, 2002. – Forschungsbericht

[32] Knittel, C. R. ; Roberts, M. R.: An empirical examination of restructured electricity prices. In: *Energy Economics* 2005 (2005), Nr. 27, S. 791– 817

[33] Swider, D.: Erweiterte ARMA-Ansätze zur Prognose von Spotmarktpreisen in Europa. In: *Zeitschrift für Energiewirtschaft* 30 (2006), Nr. 1, S. 31–42

[34] EIA: Official Energy Statistics from the U.S. Government. [online] <http://www.eia.doe.gov> / Energy Information Administration. Washington, DC (US), 2006. – Internetpräsenz

[35] Dixit, A.: Investment and Hysteresis. In: *The Journal of Economic Perspectives* 6 (1992), Nr. 1, S. 107–132

[36] Rothwell, G.: A Real Options Approach to Evaluating New Nuclear Power Plants. In: *The Energy Journal* 27 (2006), Nr. 1, S. 37–53

[37] Fleten, Stein-Erik ; Näsäkkälä, Erkka: Gas Fired Power Plants: Investment Timing, Operating Flexibility and Abandonment / Norwegian University of Science and Technology. Trondheim, 2004. – Working Paper

[38] Bjerksund, P. ; Stensland, G.: American Exchange Options and a Put-Call Transformation: A Note. In: *Journal of Business Finance & Accounting* 20 (1993), Nr. 5, S. 761–764

[39] Bjerksund, P. ; Stensland, G.: Closed-Form Approximation of American Options. In: *Scandinavian Journal of Management* 9 (1993), Nr. 1, S. 87–99

[40] Geske, R. ; Johnson, H. E.: The American Put Option Valued Analytically. In: *The Journal of Finance* 39 (1984), Nr. 5, S. 1511–1524

[41] Barone-Adesi, G. ; Whaley, R. E.: Efficient Analytic Approximation of American Option Values. In: *The Journal of Finance* 42 (1987), Nr.

2, S. 301–320
[42] Cox, J. C. ; Ross, S. A. ; Rubinstein, M.: Option Pricing: A Simplified Approach. In: *Journal of Financial Economics* 7 (1979), Nr. 3, S. 229–263
[43] Abadie, L. M. ; Chamorro, J. M.: Valuation of Energy Investments as Real Options: The case of an Integrated Gasification Combined Cycle Power Plant / Bilbao Bizkaia Kutxa. Bilbao, 2005. – Working Paper
[44] Smith, J. E. ; Nau, R. F.: Valuing Risky Projects: Option Pricing Theory and Decision Analysis. In: *Management Science* 41 (1995), Nr. 5, S. 795–816
[45] Wang, T. ; Neufville, R. de: Real Options „in" Projects / Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, Massachusetts (US), 2005. – Working Paper
[46] Dixit, A. K. ; Pindyck, R. S.: The Options Approach to Capital Investment. In: *Harvard Business Review* 73 (1995), Nr. 3, S. 105–115
[47] Gardner, D. T. ; Rogers, J. S.: Planning Electric Power Systems Under Demand Uncertainty with Different Technology Lead Times. In: *Management Science* 45 (1999), Nr. 10, S. 1289–1306
[48] Tseng, C. ; Barz, G.: Short-Term Generation Asset Valuation: A Real Options Approach. In: *Operations Research* 50 (2002), Nr. 2, S. 297–310
[49] Gardner, D. ; Zhuang, Y.: Valuation of Power Generation Assets: A Real Option Approach. In: *Algo Research Quarterly* 3 (2000), Nr. 3, S. 9–20
[50] Roques, F. A. ; Nuttall, W.J. ; Newbery, D. M. ; Neufville, R. de: Nuclear Power: a Hedge against Uncertain Gas and Carbon Prices? / University of Cambridge. Cambridge (GB), 2005. – Working Paper
[51] Botterud, A. ; Ilic, M. D. ; Wangensteen, I.: Optimal Investments in Power Generation Under Centralized and Decentralized Decision Making. In: *IEEE Transactions on Power Systems* 20 (2005), Nr. 1, S. 254–263