

Energieeinsparung, Markthemmnisse und optimales Timing*

Von Peter Kreuzberg**

1. Einleitung und Problemstellung

Das im Rahmen praktischer Investitionsentscheidungen nach wie vor dominierende Kriterium zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Investitionsprojekten ist der Kapitalwert, definiert als Differenz zwischen dem Barwert zukünftig erwarteter Einzahlungsüberschüsse und den Anschaffungsauszahlungen zum gegenwärtigen Zeitpunkt. Als Kalkulationsszinsfuß fungieren dabei die Kapitalkosten, deren risikoangepaßte Ermittlung z. B. mit Hilfe des Capital Asset Pricing Models erfolgen kann. Wenn der Kapitalwert eines Investitionsprojekts positiv ist, gilt es als rentabel.

Das Kapitalwertkriterium hat den Nachteil, daß es keinen hinlänglichen Aufschluß über die optimale Wahl des Zeitpunktes der Projektrealisation liefert. „The fact that a project has a positive NPV (Net Present Value) does not mean that it is best undertaken now. It might be even more valuable if undertaken in the future . . . Thus any project has two mutually exclusive alternatives: Do it now, or wait and invest later“ (*Brealey/Myers*, 1991, S. 107). Dieses Problem interessiert freilich nur unter drei Bedingungen.¹ Erstens: Das Projekt ist irreversibel. Seine Kosten sind deshalb nach der Installation nicht mehr durch Umwidmung oder Veräußerung des Projekts „zurückzuholen“, wenn sich die Marktbedingungen auf unerwartet ungünstige Weise entwickeln. Dem Investor entstehen in diesem Fall Vermögensverluste in Höhe der Anschaffungsauszahlungen des Investments. Zweitens: Die Investition erlaubt einen zeitlichen Aufschub, ist also keine „Jetzt oder Nie-Entscheidung“ zwischen sofortiger Realisation oder endgültigem Verzicht. Drittens: Der Investor darf damit rechnen, im Rahmen der Wartezeit „dauerhaft projektrelevante Informationen“ zu gewinnen, durch die er das Risiko vermindern kann, daß sich das Projekt nach seinem nunmehr zu beschließenden Beginn als Fehlschlag erweist. Zu einer Reduktion von Unsi-

* Verantwortlicher Herausgeber / editor in charge: H. L.

** Für wertvolle Hinweise danke ich einem anonymen Gutachter.

¹ Vgl. McDonald/Siegel (1985), Pindyck (1991), Dixit/Pindyck (1994).

cherheit im Zeitablauf kann es beispielsweise kommen, wenn sich die den Cash Flow bestimmenden Preise im Laufe der Wartezeit auf einem für den Investor günstigeren Niveau stabilisieren.

Investitionen in die Vermeidung konventioneller Energieträger sind im allgemeinen hochspezifisch und haben damit weitgehend irreversiblen Charakter. Wenn sich nach ihrer Installation die Energiepreise auf einem unerwartet geringen Niveau fortbewegen, entstehen dem Investor deshalb erhebliche Vermögensverluste, da er die Anlagen aufgrund ihrer Anpassung an die spezifischen Bedingungen seines Betriebes schon aus technischen Gründen nicht ohne weiteres verkaufen kann, um seine Verluste zu begrenzen. Aber auch wenn dies technisch möglich wäre, ließe sich kein angemessener Erlös erzielen, da der Wert der Anlagen angesichts der nun geringen Energiepreise für potentielle Käufer kaum größer wäre als für den Investor selbst. Damit ist die erste Bedingung erfüllt. Fraglich bleibt damit vor allem die Möglichkeit des zeitlichen Aufschubs (Bedingung 2). Diese dürfte vor allem dann bestehen, wenn die Einsparmaßnahme bei ihrer Realisation nicht in nennenswertem Maße von Synergien profitiert, die beim Neubau oder im Rahmen von Instandhaltungsarbeiten an einem Primärprojekt realisiert werden können, dessen Ausführungszeitpunkt von der Energieeinsparung unabhängig ist. Wo erhebliche Synergien bestehen, kann der zeitliche Aufschub das Einsparprojekt allerdings weitgehend wertlos machen. Besonders deutlich wird dies z. B. bei Maßnahmen zur Wärmedämmung von Gebäuden. Wenn die Wärmedämmung nicht bei der Neuerrichtung oder im Zuge von Investitionen für die Instandhaltung durchgeführt wird, sind die Kosten nachträglicher Installation oftmals prohibitiv². Ob und inwieweit auch die dritte Bedingung erfüllt ist, hängt wesentlich vom stochastischen Prozess des Preises einzusparender Energieträger ab. Die späteren Ausführungen werden zeigen, daß ein als empirisch gehaltvoll zu erachtender Prozess für den Heizöl- bzw. Gaspreis tatsächlich die Möglichkeit zur Risikoreduktion durch Abwarten bietet.

Welch erhebliche Bedeutung dem Wert der durch das Abwarten vermittelten Flexibilität gegebenenfalls beizumessen ist, wird im folgenden an einem als typisch erachteten Beispiel industrieller Prozessoptimierung zur Einsparung von Erdgas verdeutlicht. Im Einklang mit den Resultaten der modernen Investitionstheorie unter Unsicherheit ergeben sich dabei „Hurdle Rates“, die die Kapitalkosten der Projekte um ein Vielfaches übersteigen.

Insbesondere im Bereich der Energieeinsparung gilt der Verzicht auf die Durchführung von anhand des Kapitalwertes als wirtschaftlich erscheinenden Projekten als Indiz für schwerwiegende Funktionsstörungen marktmäßiger Koordination³. Es wird sich zeigen, daß diese Einschätzung einer

² Vgl. z. B. Born u. a. (1995, S. 106 ff).

deutlichen Relativierung in Bezug auf Projekte bedarf, deren zeitlicher Aufschub aufgrund der genannten Bedingungen einen hohen ökonomischen Wert besitzt. Wird dieser Wert als Opportunitätskosten der sofortigen Projektrealisation im Investitionskalkül mitberücksichtigt, erscheint die sofortige Durchführung der betroffenen Projekte trotz ihres positiven Kapitalwerts in vielen Fällen nämlich nicht länger als sinnvoll⁴.

Das betrachtete Beispielprojekt ist Bestandteil eines umfangreichen, von Bressler u. a. (1993) erarbeiteten Wärmenutzungskonzeptes „für eine bestehende Autolackierhalle und zentrale Wärmeerzeugung eines Automobilwerkes“. Es handelt sich um die nachträgliche Umrüstung gasbetriebener Lacktrockner. An *einer* ausgewählten Anlage werden hierdurch Einsparungen in Höhe von 75 MWh/a erzielt. Die Anschaffungskosten I belaufen sich auf 10.000 DM. Die Kosten für Wartung und Instandhaltung C betragen 300 DM/a. Die Nutzungsdauer T der der Einsparmaßnahme wird auf 15 Jahre veranschlagt.

2. Das Modell zur Wertermittlung der „Real Option“

In der modernen Theorie der (Real-)Investitionen unter Unsicherheit (Dixit/Pindyck, 1994) wird der Wert von Projekten, die die drei eingangs genannten Bedingungen erfüllen, als Wert einer amerikanischen Kaufoption (Call Option) auf die zugrundeliegende Realinvestition (Underlying) ermittelt. Die Anschaffungsauszahlungen des Projekts repräsentieren dabei den Basispreis der Option, der durch die Ausübung der Option (Realisation des Projekts) aufgrund der bestehenden Irreversibilität (Bedingung 1) unwiderrbringlich verloren geht. Im Unterschied zu Financial Call Options ist dabei in vielen Fällen die Annahme einer unbefristeten Laufzeit der Option realistisch. Nach einem bekannten Ergebnis werden Call Optionen auf ein dividendenloses Underlying niemals vor Fälligkeit ausgeübt⁵. Für die „Real Option“ ohne Laufzeitbegrenzung bedeutet das: die zugrundeliegende Realinvestition würde niemals durchgeführt (Ausübung der Option), wenn sie tatsächlich den Charakter eines dividendenlosen Wertpapiers hätte. Davon ist aber nicht auszugehen, weil sie nach ihrer Realisation periodenweise einen

³ Vgl. Leprich, 1991, S. A-9., Seifried (1992, S. 24ff) und Herppich (1993, S. 48ff) zu Hemmnissen rationeller Energienutzung. Eine Erläuterung der Hemmnisproblematik aus ordnungstheoretischer Sicht findet sich bei Kreuzberg/Schulz (1995, S. I.B-11ff).

⁴ Eine echte Funktionsstörung wäre dagegen auf der Seite politischer Entscheidungsträger zu sehen, die sich bei der preisgeleiteten Internalisierung der Kosten konventioneller Energiebereitstellung zurückhalten und auf diese Weise verhindern, daß Einsparpotentiale entdeckt und erschlossen werden.

⁵ Vgl. z. B. Hull (1993, S. 158ff).

Cash Flow als Dividende erbringt. Aus diesem Grunde ist auch bei „Real Options“ mit unendlicher Laufzeit die Möglichkeit vorzeitiger Ausübung zu berücksichtigen.

Notation

P	Preis des einzusparenden Energieträgers ⁶
P^*	Kritischer Preis, zu dem die Projektrealisation empfohlen wird
μ	Instantaneous drift rate der Geometrischen Brown'schen Bewegung
σ	Instantaneous variance der Geometrischen Brown'schen Bewegung
$dz = \epsilon \cdot \sqrt{dt}$	Wiener Prozess
C	Periodenfixe Kosten des Projekts
I	Anschaffungsauszahlungen
T	Nutzungsdauer des Projekts
k	Kapitalkosten der Energieeinsparung ⁷
r	Risikoloser Zinsfuß
V	Wert des Einsparprojekts inklusive Wiederholungsoptionen zum Zeitpunkt der (erstmaligen) Realisation
F	Wert der Option auf Realisation des Einsparprojekts
A, B	Konstanten im Lösungsansatz der Differentialgleichung für V
D	Konstante im Lösungsansatz der Differentialgleichung für F Wurzeln der charakteristischen Gleichung für V und F

Es ist bekannt, daß der Wert einer Option mit begrenzter Laufzeit zum Zeitpunkt der Fälligkeit dem Wert des Underlyings abzüglich des Basispreises der Option entspricht. Daß eine Realinvestition keinen zeitlichen Aufschub erlaubt (Bedingung 2 ist nicht erfüllt), bedeutet demgemäß: die Option auf Realisation des Investments ist befristet und verfällt zum gegenwärtigen Zeitpunkt, so daß der Optionswert dem Kapitalwert entspricht. Ist dieser positiv, sollte das Projekt durchgeführt werden.

Bei der Wertermittlung der Option auf das Einsparprojekt wird im folgenden lediglich die Unsicherheit bezüglich des Gaspreises berücksichtigt, die für Projekte von der Art des betrachteten Beispiels das bedeutsamste

⁶ Da die einzusparende Energiemenge auf Eins normiert wird, entspricht P dem operativen Erlös.

⁷ Die risikoangepaßten Kapitalkosten werden in der Tradition des CAPM als Funktion des systematischen Risikos der Energieeinsparung bestimmt. Unter der Annahme, daß die einzusparenden Energiemengen lediglich mit unsystematischen Risiken behaftet sind, gründet das systematische Risiko der Energieeinsparung ausschließlich auf dem Preisrisiko des einzusparenden Energieträgers.

Risiko darstellen dürfte. Es läge nahe, neben diesem Risiko auch die durch den technischen Fortschritt bedingte Unsicherheit bezüglich der zukünftigen Investitionskosten zu berücksichtigen. Allerdings erschiene mir die Annahme als wenig realistisch, daß der technische Fortschritt für die vergleichsweise einfach strukturierten Einsparmaßnahmen ähnliche Veränderungen erwarten läßt, wie sie beispielsweise für die Nutzung der Sonnen- und Windenergie prognostiziert werden⁸. Die Annahme, der technische Fortschritt hätte auch hier der Tendenz nach eine nennenswerte Verminderung der zukünftigen Investitionskosten zur Folge, würde – vielleicht entgegen einer ersten Intuition – den Wert des Abwartens zukünftiger Entwicklungen allerdings unweigerlich erhöhen⁹. Die im folgenden getroffene Annahme real konstanter Investitionskosten ist daher im schlimmsten Fall mit einer Unterschätzung des Wertes der durch Abwarten vermittelten Flexibilität verbunden. Insofern würde die Bedeutung von Timing Problemen für die Investitionsrechnung durch die Berücksichtigung des technischen Fortschritts nicht relativiert, sondern zusätzlich unterstrichen.

Der Gaspreis wird als Geometrische Brown'sche Bewegung modelliert, die wie folgt definiert ist

$$(1) \quad dP_t = \mu \cdot P_t \cdot dt + \sigma \cdot P_t \cdot dz, \quad dz = \epsilon \cdot \sqrt{dt}, \quad \epsilon \text{IIN}(0, \sigma^2)$$

Aufgrund der sogenannten Anlegbarkeit ist der Gaspreis an den Preis für Heizöl gebunden, der auf Quartalsbasis für die beabsichtigten Zwecke hinreichend verläßlich als Geometrischer Random Walk beschrieben werden kann (Kreuzberg, 1996a). Panas (1991) bestätigt die Unit Root-Hypothese bezüglich der Rotterdamer Spotpreise für Gasöl (Leichtes Heizöl und Diesel) auf Monatsbasis, kommt allerdings zu dem Ergebnis, daß die Preisrenditen auf Monatsbasis nicht normalverteilt sind. Nach Kirchgässner/Kübler (1992) und Kirchgässner/Weber (1994) sind die deutschen Preise für leichtes Heizöl im wesentlichen durch die Entwicklung auf dem Rotterdamer Spotmarkt und die auf Mineralölprodukte erhobenen Steuern bestimmt. „Veränderungen dieser Preise und Steuern werden schnell und vollständig an die deutschen Verbraucher weitergegeben; spätestens nach einem Monat sind die Anpassungen vollzogen“ (Kirchgässner/Weber, 1994, S. 401).

⁸ Vgl. DIW/ISI (1991).

⁹ Ein vergleichsweise komfortables Modell zur gleichzeitigen Berücksichtigung der Unsicherheit bezüglich der Anschaffungskosten liefern Dixit/Pindyck (1994, S. 207). Das Modell wird auch von Hasset/Metcalf (1992) verwendet. Es basiert auf der Annahme, daß I ebenso wie P einem Geometrischen Random Walk folgt. Die betrachteten Projekte haben dabei allerdings eine unbegrenzte Laufzeit. Auswirkungen des technischen Fortschritts auf die Investitionskosten können hier in Form von entsprechenden Driftraten des Geometrischen Random Walks berücksichtigt werden. Siehe auch Pindyck (1993) zur Modellierung von Kostenrisiken.

Die Möglichkeit zur Reduktion von Unsicherheit im Zeitablauf besteht im Fall der Geometrischen Brown'schen Bewegung deshalb, weil jede Preisänderung eine dauerhafte, im Zeitablauf nicht verblässende Wirkung auf zukünftige Preisniveaus ausübt. Ist einmal ein hohes Niveau erreicht, sichert die Normalverteilung der Preisänderungen, daß ein externer Preisverfall in naher Zukunft vergleichsweise unwahrscheinlich ist.

Gegen diese Modellierung des Gaspreises könnte unter anderem eingewendet werden, daß sie keine diskreten Preissprünge zuläßt, die beispielsweise mit der politischen Entscheidung für eine CO₂-Steuer gegebenenfalls verbunden wären. Dem müßte man zustimmen, wenn es einen Grund für die Annahme gäbe, daß eine solche Steuer bereits bei ihrer Einführung so stark dosiert wäre, daß sie als „Poisson-Sprung“ das Erscheinungsbild der Geometrischen Brown'schen Bewegung grundlegend verändern würde. Mit Blick auf die in der energiepolitischen Diskussion derzeit relevanten Vorschläge für eine solche oder ähnliche Steuer erschiene mir diese Annahme allerdings als wenig sinnvoll. Die Vermutung liegt näher, daß eine energiepreiswirksame Umweltsteuer zunächst moderat und im Zeitablauf zunehmend stärker dosiert würde¹⁰. Eine solche Entwicklung läßt sich näherungsweise durch die Annahme einer positiven Preisdrift berücksichtigen. Im Gegensatz zur durch den technischen Fortschritt begründeten negativen Drift der Anschaffungsauszahlungen vermindert die Chance auf umweltpolitisch bedingte Niveauerhöhungen der Energiepreise den Wert der durch das Abwarten vermittelten Flexibilität.

Das Einsparprojekt stellt ein Projekt mit endlicher Laufzeit T dar. Unterstellt man realistischerweise, daß es sich bei der Option auf seine Realisation um eine „Perpetual Option“ handelt, so verfügt das Unternehmen über die Möglichkeit zur Projektwiederholung. Die Ermittlung des Optionswerts erfolgt unter diesen Umständen in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird der Wert V eines zu beginnenden Projekts *inklusive seiner Wiederholungsoptionen* ermittelt. Den zweiten Schritt bildet die Berechnung des Wertes F der Option auf die tatsächliche Realisation dieses Projekts inklusive seiner Wiederholungsoptionen. Dabei wird unterstellt, daß die Laufzeit der Optionen im Unterschied zur Laufzeit des installierten Projekts nicht befristet ist. Die Optionswertermittlung ähnelt dem von *Pindyck* (1991, S. 1128ff) und *Dixit/Pindyck* (1994, S. 186ff) behandelten Fall eines unendlichen Projekts mit periodenfixen Kosten und der Option, die Produktion vorübergehend einzustellen, wenn die Deckungsbeiträge ein negatives Vorzeichen annehmen¹¹. P wird im folgenden in DM pro eingesparter, als zeitlich konstant angenommener Menge Gas gemessen.

¹⁰ So z. B. der Vorschlag der EU-Kommission von 1992 für eine Richtlinie zur Einführung einer CO₂-/Energie-Steuer.

¹¹ Vgl. ebenfalls McDonald/Siegel, 1986.

Die Bestimmung von V und F erfolgt jeweils in der Tradition von *Black/Scholes* (1973) nach dem Hedgingprinzip¹². Aus einem Projekt inklusive Wiederholungsoptionen mit dem Wert V (bzw. einer Option auf dieses Projekt mit dem Wert F) und einer bestimmten Anzahl $n = \partial V / \partial P$ (bzw. $n = \partial F / \partial P$) verkaufter MWh Gas, die im Rahmen des Projekts eingespart werden könnten, wird ein Portfolio gebildet, das unter der Annahme einer stetigen Anpassung von n an Änderungen des Gaspreises P im Zeitablauf risikolos bleibt¹³. Aufgrund von No-Arbitrage verzinst sich das Portfolio wie eine risikolose Anlage.

Für Wartung und Instandhaltung der Einsparmaßnahme entstehen periodenfixe Kosten C . Unter der Annahme, daß das Unternehmen über keine Option auf vorübergehende Stilllegung für den Fall negativer Deckungsbeiträge verfügt, ist C ebenso irreversibel wie die Anschaffungsauszahlungen I und daher – kapitalisiert mit dem risikolosen Zinsfuß – zu diesen hinzuzurechnen. Im konkreten Beispiel hat C einen so geringen Stellenwert, daß Optionen auf vorübergehende Stilllegung im Falle negativer Deckungsbeiträge zu aus heutiger Sicht realistischen Energiepreisen von überaus geringem Wert wären. Mit ihrer Vernachlässigung ist daher kein nennenswerter Fehler verbunden.

Die Wertentwicklung des zu beginnenden Projekts inklusive Wiederholungsoptionen wird durch folgende deterministische Differentialgleichung beschrieben:

$$(2) \quad \frac{1}{2} \cdot \sigma^2 \cdot P^2 \cdot \frac{\partial^2 V}{\partial P^2} + (r - (k - \mu)) \cdot P \cdot \frac{\partial V}{\partial P} - r \cdot V + (P - C) = 0.$$

Die nicht homogene Komponente $P - C$ entspricht dem Deckungsbeitrag, den der Inhaber des Projekts (inklusive Wiederholungsoption) erzielt. Darin unterscheidet er sich vom Inhaber der Option auf den Beginn des Projekts. Für deren Wertentwicklung gilt entsprechend

$$(3) \quad \frac{1}{2} \cdot \sigma^2 \cdot P^2 \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial P^2} + (r - (k - \mu)) \cdot P \cdot \frac{\partial F}{\partial P} - r \cdot F = 0.$$

¹² Mit Hilfe der im Anhang befindlichen Erläuterungen lassen sich die folgenden Resultate nachrechnen. Sie wurden in Anlehnung an Dixit/Pindyck (1994) entwickelt.

¹³ Da der Energiepreis den Kapitalwert der Einsparinvestition bestimmt, wäre es auch möglich, n' Einheiten des gesamten Investments anstelle von n Einheiten des einzusparenden Energieträgers ins Hedgeportfolio aufzunehmen. Die Wahl des Energieträgers erleichtert allerdings die graphische Illustration des Timing Problems.

Wie im Anhang ausführlicher erläutert, rühren die auf den ersten Blick befremdenden Terme $(k - \mu) \cdot P \cdot \frac{\partial V}{\partial P}$ und $(k - \mu) \cdot P \cdot \frac{\partial F}{\partial P}$ von den „Dividendenzahlungen“, die der Verkäufer des Gases periodenweise an dessen Käufer leisten muß. Der Käufer erwartet, daß sein Investment in Gas mindestens dessen risikoangepaßte Kapitalkosten k erwirtschaftet. Den Anteil an k , den er nicht in Form eines Preiswachstums mit der Rate μ erhält, verlangt er periodenweise als ausgleichendes Entgelt vom Verkäufer des Gases¹⁴.

Nach Einsetzen der jeweiligen Lösungsansätze $V(P) = A \cdot P^\gamma$ bzw. $V(P) = B \cdot P^\gamma$ für Gleichung (2) und $F(P) = D \cdot P^\gamma$ für Gleichung (3) und ihrer ersten beiden Ableitungen entwickelt sich hieraus die in beiden Fällen identische charakteristische Gleichung

$$(4) \quad \gamma^2 + \left(\frac{2}{\sigma^2} \cdot \left(r - (k - \mu) - \frac{\sigma^2}{2} \right) \right) \cdot \gamma - \frac{2}{\sigma^2} \cdot r = 0.$$

Unter der Annahme $k - \mu > 0$ gilt für die Nullstellen: $\gamma_1 > 1$, $\gamma_2 < 0$ (Dixit/Pindyck, 1994, S. 143). Um zu verhindern, daß $V(P)$ und $F(P)$ „explodieren“, ist $A_2 = B_1 = D_2 = 0$ zu setzen. Der Investor wird die Wiederholungsoptionen immer wieder ausüben, wenn P das kritische Niveau P^* überschreitet. Bleibt P dagegen unterhalb von P^* , wird er die Wiederholung auf einen späteren Zeitpunkt verschieben, zu dem der Preis auf ein entsprechend günstiges Niveau zurückgefunden hat. Als Gesamtlösung für $V(P)$ erhält man

$$(5) \quad V(P) = \begin{cases} A_1 \cdot P^{\gamma_1} + \frac{P}{k - \mu} \cdot \left(1 - \frac{1}{e^{(k-\mu)Z}} \right) - \frac{C}{r} \cdot \left(1 - \frac{1}{e^{rT}} \right), & \text{für } 0 < P < P^* \\ B_2 \cdot P^{\gamma_2} + \frac{P}{k - \mu} - \frac{C}{r} - \frac{I}{r_{\text{per } T}}, & \text{für } P \geq P^* \end{cases}$$

Die Partikulärlösung für $P < P^*$ entspricht dem Barwert der Cash Flows des endlichen Projekts mit der Laufzeit T . Im Fall $P < P^*$ besteht dieser Barwert aus der kapitalisierten ewigen Rente P abzüglich der kapitalisierten, nach Ablauf einzelner Projekte immer wieder neu aufzuwendenden Investitionskosten I . Da diese Kosten als deterministische Variable angenommen werden, sind sie mit dem risikolosen Zinsfuß zu diskontieren und es gilt: $\sum_{t=1}^{\infty} \frac{I}{(1+r)^{t \cdot T}} = \sum_{t=1}^{\infty} \frac{I}{(1+r_{\text{per } T})^t} = \frac{I}{r_{\text{per } T}}$. Je stärker P sich der Null nähert, desto unwahrscheinlicher wird es, daß die Wiederholungsoptionen jemals „ins Geld“ kommen. Damit konvergiert auch deren Wert gegen Null, $V(P) - I$ nähert sich entsprechend dem Kapitalwert der Cash Flows des

¹⁴ Vgl. hierzu Dixit/Pindyck (1994, S. 149 f)

endlichen, nicht wiederholten Projekts. Im umgekehrten Fall einer Konvergenz von P gegen unendlich verliert die Option auf Wiederholungsverzicht ihren Wert, da ungünstige Preise immer unwahrscheinlicher werden. $V(P) - I$ konvergiert unter diesen Umständen gegen den Kapitalwert der Cash Flows des unendlich oft wiederholten Projekts¹⁵.

Für $F(P)$ gilt analog

$$(6) \quad F(P) = \begin{cases} D_1 \cdot P^n, & 0 < P < P^* \\ V(P) - I, & P \geq P^* \end{cases}$$

An der Stelle P^* wird die Option ausgeübt. Die Flexibilität ist für $P > P^*$ ohne Wert, so daß der Optionswert F hier dem Wert des Projektes inklusive seiner Wiederholungsmöglichkeiten $V - I$ entspricht.

Zur simultanen Bestimmung der vier Konstanten A_1 , B_2 , D_1 und P^* werden vier Randbedingungen benötigt. Dabei handelt es sich um „zwei mal zwei“ Bedingungen des „Value Matching“ und „Smooth Pasting“. Für Gleichung (5) haben sie die Form

$$(7) \quad V(P^*|P \rightarrow P^*) - I = V(P^*|P^* \leftarrow P) - I$$

$$(8) \quad \frac{\partial V}{\partial P}(P^*|P \rightarrow P^*) = \frac{\partial V}{\partial P}(P^*|P^* \leftarrow P)$$

Für Gleichung (6) lauten sie

$$(9) \quad F(P^*) = V(P^*) - I$$

$$(10) \quad \frac{\partial F}{\partial P}(P^*) = \frac{\partial V}{\partial P}(P^*)$$

Als Lösung von (7) und (8) in und erhält man

$$(11) \quad A_1 = -\frac{1 - \gamma_2}{\gamma_1 - \gamma_2} \cdot \frac{(P^*)^{1-\gamma_1}}{k - \mu} \cdot \left(1 - \frac{1}{e^{(k-\mu) \cdot T}}\right) - \frac{1}{\gamma_1 - \gamma_2} \cdot (P^*)^{-\gamma_1} \cdot \frac{I}{r_{\text{per } T}}$$

$$(12) \quad B_2 = -\frac{1 - \gamma_1}{\gamma_1 - \gamma_2} \cdot \frac{(P^*)^{1-\gamma_2}}{k - \mu} \cdot \left(1 - \frac{1}{e^{(k-\mu) \cdot T}}\right) - \frac{1}{\gamma_1 - \gamma_2} \cdot (P^*)^{-\gamma_2} \cdot \frac{I}{r_{\text{per } T}}$$

¹⁵ In Abbildung 1 ist zu erkennen, daß die Konvergenz erst zu sehr hohen Preisen „erreicht“ wird.

Die Bestimmung von P^* erfolgt im Zusammenhang mit der Option auf Realisation des Projekts. Diese Option besteht sowohl vor der erstmaligen Durchführung als auch nach der Beendigung des ersten und aller weiteren Projekte. Durch Wahl von $V(P) = V(P|P^* \leftarrow P)$ in Gleichung (9) bzw. (10) und Substitution von B_2 gemäß seiner Bestimmungsgleichung (12) folgt nach Eliminierung von D_1 und einigen Umformungen der kritische Preis¹⁶

$$P^* = \frac{\gamma_1}{\gamma_1 - \gamma_2} \cdot (k - \mu) \cdot \frac{\left(1 - \frac{\gamma_1}{\gamma_1 - \gamma_2} \cdot \frac{1}{e^{rT}}\right) \cdot \frac{c}{r} + \left(1 - \frac{\gamma_2}{\gamma_1 - \gamma_2} \cdot \frac{1}{r_{\text{per } T}}\right) \cdot I}{1 - \frac{\gamma_1 - 1}{\gamma_1 - \gamma_2} \cdot \frac{1}{e^{(k-\mu)T}}}$$

Für $T \rightarrow \infty$ konvergiert diese Lösung gegen den für Projekte mit unendlicher Laufzeit zu ermittelnden kritischen Preis ($r_{\text{per } T} \xrightarrow{T \rightarrow \infty} \infty$). Anhand von lassen sich schließlich auch A_1 , B_2 und D_1 berechnen.

3. Kalkulation der Einsparmaßnahme

Die Kalkulation erfolgt auf Quartalsbasis. Im Einklang mit der traditionellen Wirtschaftlichkeitsrechnung unterstelle ich, daß sich Kapitalkosten des Einsparprojekts und risikoloser Zinsfuß real auf $k = 8\%$ und $r = 4\%$ p.a. belaufen. Die Standardabweichung der Preisrendite σ schätzt man anhand von historischen Quartalsdaten für den Preis von leichtem Heizöl (1971-1994) auf 0.126 per Quartal. Für die reale (*Quartals*-)Drift des Preises werden alternativ $\mu = 0$ und $\mu = 1.25\%$ (5% p.a.!) angenommen. Während die reale Konstanz im Einklang mit der historischen Preisentwicklung steht, repräsentiert die Unterstellung eines realen Preiswachstums von 5% p.a. ein aus aktueller Sicht als unrealistisch streng erscheinendes umweltpolitisches Szenario¹⁷. Seine Behandlung wird sich dennoch als didaktisch wertvoll erweisen. Zur realen Konstanz der Energiepreise resultiert die in Abbildung 1 dargestellte Wertentwicklung des Beispielprojekts in Abhängigkeit vom aktuellen Gaspreisniveau.

Der Wert des endlichen Projekts inklusive Wiederholungsoptionen (Projektwert $V - I$) ist eine in P_0 konvexe Funktion, die ihren Ursprung im Kapitalwert des nicht wiederholten Projekts für $P_0 = 0$ nimmt. Zu Preisen in der Nähe von Null ist die Wiederholungsoption praktisch wertlos, weil das

¹⁶ Im Gegensatz zum hier entwickelten Ansatz ist das von Pindyck (1991) und Dixit/Pindyck (1994) verwendete Modell für Optionen auf vorübergehende Stilllegung blockrekursiv. Durch die ersten beiden Randbedingungen werden die Koeffizienten A_1 und B_2 eindeutig bestimmt.

¹⁷ Zu dieser Wachstumsrate verdoppelt (verzehnfacht) sich der aktuelle Preis in ca. 14 (47) Jahren.

Projekt von dort aus nur mit einer überaus geringen Wahrscheinlichkeit „ins Geld“ kommt. Der Projektwert entspricht hier dem Kapitalwert des endlichen Projekts. Oberhalb des kritischen Preises P^* von ca. 32 DM/MWh ist der Wert der Option auf Projektrealisation (Optionswert F) mit dem Projektwert $V - I$ identisch. Bei steigenden Preisen konvergiert dieser Wert gegen den Kapitalwert des ständig wiederholten Projekts. Die Wahrscheinlichkeit eines Wiederholungsverzichts wird hier immer geringer, mit der Konsequenz, daß auch die Option auf Wiederholungsverzicht immer stärker an Bedeutung verliert. Der Wert der Flexibilität, mit der erstmaligen Realisation des Projekts bis zum Eintritt günstiger Preise zu warten, entspricht der Differenz zwischen Optionswert F und Projektwert $V - I$. Der Wert der Optionen auf Projektwiederholung wird durch die Differenz zwischen $V - I$ und dem Kapitalwert des Projekts ohne Wiederholung gemessen.

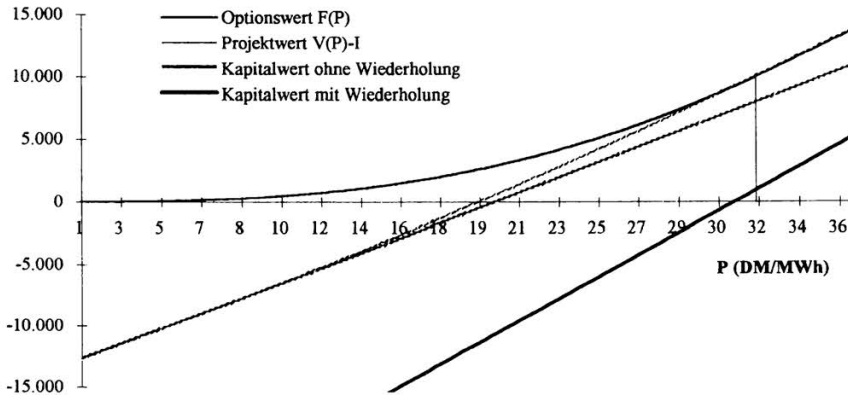


Abbildung 1: Projekt mit begrenzter Laufzeit und Wiederholungsoption

Abbildung 1 verdeutlicht (für $\mu = 0$) das bekannte Resultat, daß der Kapitalwert bei versunkenen Anschaffungskosten und der Möglichkeit eines zeitlichen Aufschubs keine vernünftige Antwort auf die Frage gibt, ob die Durchführung eines Investitionsprojekts zum gegenwärtigen Zeitpunkt sinnvoll ist. Das Vorzeichen des Kapitalwerts (des nicht wiederholten Projekts) wird bereits bei einem Gaspreis 20 DM/MWh positiv. Der Wert der Flexibilität – gemessen als Differenz zwischen F und $V - I$ – beträgt zu diesem Preis aber ca. 400 DM und signalisiert, daß die Durchführung der Wärmenutzung auf einen späteren Zeitpunkt verschoben werden sollte. Die Empfehlung zur Projektrealisation erfolgt erst ab einem Gaspreis von ca. 32 DM/MWh. Dieser (Arbeits-)Preis liegt über dem bei einem Jahresverbrauch

von 45.000 MWh Gas zur Zeit als realistisch anzunehmenden Niveau von 27.5 DM/MWh (vgl. VEA Erdgaspreisvergleich II/1994).

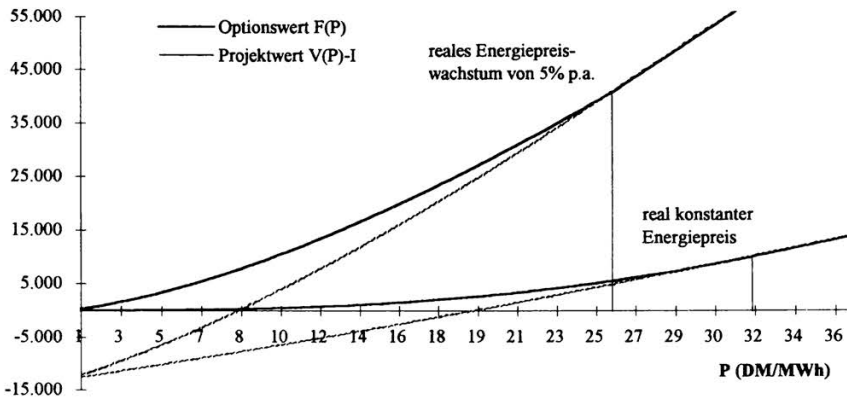


Abbildung 2: Steigende Energiepreise und Wert der Flexibilität

Unter Berücksichtigung des Wertes der Flexibilität berechnet man eine „Hurdle Rate“ von ca. 21% p.a. Daß sie die Kapitalkosten nahezu um das um dreifache übersteigt, bestätigt den hohen Stellenwert des Timing Problems. Erst im strengen umweltpolitischen Regime mit realen Energiepreiserhöhungen von 5% p.a. wird die Realisierung der Einsparinvestition empfohlen. Der kritische Gaspreis von 26 DM/MWh liegt hier gerade unter dem angenommenen Ausgangsniveau von 27.5 DM/MWh. Hieraus auf die Bedeutungslosigkeit der Flexibilität zu schließen ginge offenkundig fehl, da die Differenz zwischen der traditionellen Rentabilitätsschwelle (nunmehr 14 DM/MWh) und dem kritischen Gaspreis mit 26 DM/MWh eine nach wie vor erhebliche Größenordnung aufweist. Der kritische Zinsfuß von 22% p.a. liegt nur geringfügig unter der internen Verzinsung von 23.6% p.a.

Angesichts des überaus starken Preiswachstums mag dieses Resultat zunächst befremden. Es wird vor dem Hintergrund der Tatsache verständlich, daß hierdurch aus aktueller Sicht vor allem das Risiko in fernerer Zukunft durchzuführender Einsparmaßnahmen reduziert wird. Ein heute realisiertes Projekt ist insbesondere in den ersten Perioden immer noch von einer nicht unerheblichen Möglichkeit des Scheiterns betroffen. Im betrachteten Beispiel wird die Empfehlung zum Abwarten deshalb aus gutem Grunde nur knapp verfehlt. Die relative Risikolosigkeit späterer Investments schlägt sich demgegenüber in einem erheblichen Wert der Wiederholungsoptionen nieder. $(V - I) - KW_T$ beträgt immerhin 33.600 DM.

Tabelle
Options-, Kapital- und Projektwerte

Ausgangspreis: $P_0 = 27.5$ DM/MWh	$\mu = 0$	$4 \cdot \mu = 5\%$
Traditionelle Rentabilitätsschwelle*) in DM/MWh	20	14
Kritischer P^* in DM/MWh	32	26
Optionswert F	6.600	45.500
Projektwert $V - I$	6.200	45.500
Kapitalwert ohne Wiederholung KW_T	4.800	11.900
Kapitalwert mit Wiederholung KW_∞	- 3.600	44.400
Wert der Flexibilität, das endliche Projekt (nicht) zu wiederholen, $(V - I) - KW_T$	1.400	33.600
Wert der Flexibilität, mit der Projektrealisierung zu warten, $F - (V - I)$	400	0
Optionswertanteil der Flexibilität, mit der Projektrealisierung zu warten, $(F - (V - I))/F$	6%	0%
Kritischer Zins p.a.**)	21.0%	22.0%
Interner Zins p.a. (für $P_0 = 27.5$ DM/MWh)	16.9%	23.6%

*) Der Kapitalwert des nicht wiederholten Projekts hat den Wert Null.

***) Der zum kritischen Ölpreis korrespondierende Kapitalwert des endlichen Projekts hat den Wert Null

Wer Energiepreissteigerungen in der angenommenen Größenordnung für wenig wahrscheinlich hält, könnte sich zur Schlußfolgerung verleitet sehen, daß unserem Beispiel vergleichbare Maßnahmen zur Energieeinsparung auf absehbare Zeit keine Aussicht auf Realisierung haben. Diese Schlußfolgerung basiert allerdings auf der Unterstellung, daß die Bemessung der Kapitalkosten auf $k = 8\%$ p.a. ökonomisch vernünftig ist. Eine einfache Überlegung zeigt jedoch, daß die risikoadäquaten Kapitalkosten von öl- und gas-einsparenden Maßnahmen höchstwahrscheinlich unterhalb der risikolosen Verzinsung liegen.

In der Tradition des Capital Asset Pricing Models werden die risikoangepaßten Kapitalkosten k als Summe aus risikoloser Verzinsung r und einem Risikozuschlag bestimmt, der sich am Beitrag des Projektrisikos zum Risiko des wohldiversifizierten Portfolios der Kapitalgeber orientiert. Es ist bekannt, daß im Falle eines negativen Risikobeitrags aus diesem Risikozuschlag ein Risikoabschlag wird. Wie der Autor an anderer Stelle gezeigt hat (Kreuzberg 1996a, 1996b), wird das bewertungsrelevante Risiko zahlreicher öl- und gas-einsparender Projekte im wesentlichen durch das Energiepreisrisiko bestimmt. Dieses Risiko ist nicht vollständig diversifizierbar und des-

halb Bestandteil des Risikos wohldiversifizierter Portfolios – beispielsweise approximiert durch das Risiko des Deutschen Aktienindex DAX. Da die Rendite der Einsparprojekte positiv, die Rendite des DAX aber negativ mit der Wachstumsrate des Ölpreises korreliert ist, haben Einsparmaßnahmen den Charakter einer Versicherung gegen das DAX-Risiko. Diese Versicherungsleistung findet ihren formalen Ausdruck in einem negativen BETA-Faktor und ist bei der Bemessung der Kapitalkosten in Form eines Risikoabschlags vom Festzins zu prämiieren. Unter Vernachlässigung des durch periodenfixe Cash Flow-Komponenten bedingten operativen Hebels beträgt der (statistisch signifikante) BETA-Faktor ca. -0.4 . Für $r = 4\%$ und eine Überrendite des DAX von 4% resultieren damit Kapitalkosten von 2.4% p.a.

Im obigen Beispiel führt die Rechnung mit Kapitalkosten von 2.4% (bei einer Energiepreisdrift von $\mu = 0$) zu ähnlichen Ergebnissen wie die Annahme real überaus stark wachsender Energiepreise (5% p.a.). Der kritische Preis P^* , zu dem die Durchführung der Einsparmaßnahme empfohlen wird, sinkt von 32 auf 25 DM/MWh. Da die korrespondierende „Hurdle Rate“ von 14.8% p.a. nunmehr unter der internen Verzinsung von 16.9% liegt, wird die Durchführung der Einsparmaßnahme empfohlen.

4. Schlußbetrachtung

Die vorstehenden Betrachtungen bestätigen am Beispiel einer industriellen Einsparung von Gas den im Rahmen der modernen Investitionstheorie entwickelten Befund, daß der Kapitalwert als Kriterium für die Entscheidung über eine Investition zu falschen Schlußfolgerungen führen kann, wenn die Möglichkeit des Investment Timings einen positiven Wert hat. In Bezug auf die Einsparung von Heizöl und Erdgas ist hiervon in der Regel auszugehen, wenn die Projekte als Nach- oder Umrüstung bereits bestehender Produktionsanlagen erwogen werden können.

Die Zurückhaltung von Investoren bei der Durchführung von anhand des Kapitalwerts als rentabel ausgewiesenen Projekten verliert unter diesen Umständen als Beleg für schwerwiegende Funktionsstörungen marktmäßiger Koordination deutlich an Gewicht. Wie sich erwies, müßten die Energiepreise im Unterschied zur historischen Entwicklung erhebliche positive Wachstumsraten aufweisen, um Einsparprojekte von der Art des betrachteten Beispiels in die Sphäre der Wirtschaftlichkeit zu heben.

Dieses Resultat gilt allerdings nur solange die Projekte mit traditionellen Kapitalkosten kalkuliert werden. Eine risikoangepaßte Wirtschaftlichkeitsrechnung in der Tradition des Capital Asset Pricing Models hätte zu berücksichtigen, daß öl- und gaseinsparende Investitionen aufgrund ihres

Portfolioversicherungseffekts Kapitalkosten aufweisen, die unterhalb der Verzinsung risikoloser Kapitalanlagen liegen. In dem als repräsentativ betrachteten Beispiel führt die Kalkulation mit risikoangepaßten Kapitalkosten unter der Annahme real konstanter Energiepreise zum selben Ergebnis wie die traditionelle Wirtschaftlichkeitsrechnung im strengen umweltpolitischen Regime.

Anhang

Der Wert der Option auf erstmalige Projektrealisation $F(P)$ wird in zwei Schritten jeweils nach dem Hedgingprinzip ermittelt. Im ersten Schritt erfolgt die Bestimmung des Wertes $V(P)$ eines gerade realisierten Projekts inklusive seiner Wiederholungsoptionen. $V(P) - I$ repräsentiert den inneren Wert der Option auf erstmalige Projektrealisation, deren Gesamtwert $F(P)$ im zweiten Schritt durch analoges Vorgehen zu bestimmen ist.

Ein umfassende, in der Tradition von Black/Scholes stehende Darstellung der Bewertung von „Real Options“ findet sich bei Dixit/Pindyck (1994). Der im Rahmen dieser Arbeit verwendete Ansatz ist zwar aus der Darstellung von Dixit/Pindyck entwickelt, dort jedoch nicht in seiner konkreten Form zu finden. Die folgenden Ausführungen erleichtern dem Leser deshalb die Kontrolle der vollzogenen Rechnungen. Der im Rahmen dieser Arbeit verwendete Ansatz unterscheidet sich in vier Punkten vom Black/Scholes-Modell. Erstens: Die interessierenden Optionen sind nicht europäisch, sondern amerikanisch, erlauben also eine vorzeitige Ausübung. Zweitens: Die Laufzeit der Optionen ist unbegrenzt. Drittens: Die betrachteten Realinvestitionen ähneln als Underlying der Optionen einer Aktie mit (konstanter) Dividendenrate. Viertens: Im Unterschied zur Aktie ist die Realinvestition ein Bündel aus installiertem Projekt und Wiederholungsoptionen. Hieraus erwächst die Notwendigkeit einer zweistufigen Bewertung.

1. Schritt: Bestimmung von $V(P)$

V bezeichnet den Wert eines Investitionsprojekts inklusive Wiederholungsoptionen zum Zeitpunkt seiner erstmaligen Realisation. Im Unterschied zum Inhaber einer Option auf dieses Projekt kann der Inhaber des Projekts zum Zeitpunkt seiner Installation damit rechnen, im nächsten Zeitintervall einen Cash Flow in Höhe von $(P - C) \cdot dt$ zu erzielen.

Das zu bildende Hedgeportfolio besteht aus einer Einheit des gekauften Projekts inklusive Wiederholungsoption mit dem Wert V und n Einheiten verkaufter MWh Gas mit dem Wert $n \cdot P$. Hierauf hat der Gasverkäufer an den Gaskäufer im Zeitablauf Dividenden $n \cdot (k - \mu) \cdot P$ pro Periode zu zahlen. Der Gaskäufer verlangt, daß sein Investment mindestens dessen risikoangepaßte Kapitalkosten k erwirtschaftet¹⁸. Einen Teil

¹⁸ Zur Erinnerung: Da das systematische Risiko von Energiesparprojekten durch das Energiepreissrisiko bestimmt wird, entsprechen die Kapitalkosten der Gaseinsparung den Kapitalkosten des Gasinvestments.

davon erhält er „automatisch“ durch das Wachstum des Gaspreises mit der Rate μ . Die verbleibende Differenz zu k zahlt ihm der Gasverkäufer als Dividende. Der Wert des dynamischen Hedgeportfolios beträgt als Bestandsgröße für $n = \partial V / \partial P$

$$W = V - \frac{\partial V}{\partial P} \cdot P$$

Als Wertänderung über das nächste sehr kurze Zeitintervall dt erhält man

$$dW = dV + (P - C) \cdot dt - \frac{\partial V}{\partial P} \cdot dP - (k - \mu) \cdot \frac{\partial V}{\partial P} \cdot P \cdot dt.$$

Hierbei handelt es sich um eine Stromgröße, die den Cash Flow $(P - C) \cdot dt$ für den Projektinhaber und die „Dividende“ $\partial V / \partial P \cdot (k - \mu) \cdot P \cdot dt$ an den Gaskäufer beinhaltet. $\partial V / \partial P$ bleibt innerhalb von dt konstant.

Angesichts der Tatsache, daß der Wert des Hedgeportfolios auch durch den Wert V eines Projekts zum Zeitpunkt seiner Realisation bestimmt wird, ist die Bedingung $\partial V / \partial t = 0$ auf den ersten Blick nicht selbstverständlich. Ist das Projekt tatsächlich installiert, weist es für $P < P^*$ aufgrund des implizierten Wiederholungsverzichts jedenfalls eine endliche Laufzeit auf. Sein Kapitalwert konvergiert $t \rightarrow T$ für gegen Null. Auch für $P > P^*$ ist der Wert dieses Projekts eine Funktion von t , da sich der Gegenwartwert zukünftiger wiederholungsbedingter Anschaffungsauszahlungen I im Zeitablauf verändert.

Da wir uns für den Wert des Projekts aber ausschließlich zum Zeitpunkt seiner Realisation interessieren – nur dieser Wert wird mit V bezeichnet –, bleibt $\partial V / \partial P = 0$ ebenso wie die $(P - C) \cdot dt$ für alle Zeitpunkte eine ökonomisch gehaltvolle Bedingung. V „wandert“ als Wert des Projekts, den es aktuell hätte, wenn es realisiert würde, in der Zeit bis zum Zeitpunkt der tatsächlichen Projektrealisation, der durch die Ausübung der Option F bestimmt wird. Aufgrund dieser „Wanderung in der Zeit“ bleiben zeitbedingte Wertänderungen ausgeschlossen. Wegen $\partial V / \partial t = 0$ gilt mit Ito's Lemma

$$dV = \frac{\partial V}{\partial P} \cdot dP + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 V}{\partial P^2} \cdot (dP)^2.$$

Durch Substitution von dP und dV in dW und unter Verwendung von $dt^2 \approx 0$, $dt \cdot dz \approx 0$ und $dz^2 \approx dt$ folgt entsprechend

$$dW = \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 V}{\partial P^2} \cdot \sigma^2 \cdot P^2 - \frac{\partial V}{\partial P} \cdot (k - \mu) \cdot P + (P - C) \right) \cdot dt.$$

Aufgrund der Risikolosigkeit des Hedgeportfolios und der angenommenen Arbitragefreiheit muß diese Wertänderung der risikolosen Verzinsung entsprechen, so daß

$$\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 V}{\partial P^2} \cdot \sigma^2 \cdot P^2 - \frac{\partial V}{\partial P} \cdot (k - \mu) \cdot P + (P - C) \right) \cdot dt = r \cdot \left(V - \frac{\partial V}{\partial P} \cdot P \right) \cdot dt.$$

Hieraus erhält man schließlich

$$\frac{1}{2} \cdot \sigma^2 \cdot P^2 - \frac{\partial^2 V}{\partial P^2} \cdot (r - (k - \mu)) \cdot P \cdot \frac{\partial V}{\partial P} - r \cdot V + (P - C) = 0.$$

2. Schritt: Bestimmung von $F(P)$

Die Bestimmung von $F(P)$ erfolgt völlig analog. Das Hedgeportfolio enthält anstelle des Projekts inklusive Wiederholungsoptionen (mit dem Wert V) nunmehr lediglich die Option auf erstmalige Projektrealisation (mit dem Wert F). Ein wichtiger Unterschied besteht darin, daß bei Wertänderungen des Portfolios nunmehr keine Zahlungen in Höhe von $(P - C) \cdot dt$ zu berücksichtigen sind, weil der Inhaber der Option im Gegensatz zum Inhaber des installierten Projekts (inklusive Wiederholungsoptionen) keinen Cash Flow empfängt. Für Wertänderungen des Hedgeportfolios gilt deshalb

$$dW = dF - \frac{\partial V}{\partial P} \cdot dP - (k - \mu) \cdot \frac{\partial F}{\partial P} \cdot P \cdot dt.$$

$\partial F / \partial t = 0$ gilt selbstverständlich, weil die Option keine Laufzeitbegrenzung aufweist.

Literaturverzeichnis

- Black, F. / Scholes, M.* (1973): The Pricing of Options and Corporate Liabilities. Journal of Political Economy 81, 637-659.
- Born, R. / Ebel, W. / Eicke-Hennig, W. / Feist, W. / Hinz, E. / Jäkel, M. / Loga, T.* (Institut für Wohnen und Umwelt) (1995): „Empirische Überprüfung der Möglichkeiten und Kosten, im Gebäudebestand und bei Neubauten Energie einzusparen und die Energieeffizienz zu steigern“, in: Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages (Hrsg.), Band 3 Energie, Studienprogramm Teilband I, Economica Verlag.
- Brealey, R. A. / Myers, S. C.* (1991): Principles of Corporate Finance. McGraw-Hill.
- Bressler, G.* (Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München) / *Kuhn, H. / Kuhn, S. / Leis, U. / Münzer, T.* (Münzer-Kuhn-Leis Ingenieuresellschaft) (1993): Betriebliche Wärmenutzungskonzepte als Instrument eines integrierten Umweltschutzes. Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit – Umwelt und Energie, Forschungsvorhaben 10407309 im Auftrag des Umweltbundesamtes.

Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW): Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI), 1991, Kostenaspekte erneuerbarer Energiequellen, Oldenbourg.

Dixit, A. K. / Pindyck, R. S. (1994): *Investment under Uncertainty*. Princeton University Press.

EU-Kommission (1992): Vorschlag für eine gemeinsame Richtlinie des Rates zur Einführung einer Steuer auf Kohlendioxidemissionen und Energie. KOM(92) 226 endg., Juni 1992.

Hasset, K. A. / Metcalf, G. E. (1992): *Energy Tax Credits and Residential Conservation Investment*. Working Paper No. 4020, National Bureau of Economic Research, Cambridge, Massachusetts.

Herppich, W. (1993): „Least-Cost Planning“ – Probleme und Lösungsansätze der Implementierung von Energiesparprogrammen, Idstein.

Kirchgässner, G. / Kübler, K. (1992): Symmetric or asymmetric price adjustments and domestic prices in the Federal Republic of Germany „ 1972-89. *Energy Economics*, July 1992, 171-185.

Kirchgässner, G. / Weber, R. (1994): Rotterdamer Preise und Steuern als hauptsächliche Bestimmungsfaktoren der deutschen Mineralölpreise – eine empirische Untersuchung für die Bundesrepublik Deutschland von 1980 bis 1990. *Zeitschrift für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften (ZWS)* 114, 379-404.

Kreuzberg, P. / Schulz, W. (1995): Zukünftiger, die Klimaschutzziele begünstigender Ordnungsrahmen insbesondere für die leitungsgebundenen Energieträger. Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages (Hrsg.), Studienprogramm, Band 3 Energie, Teilband II, Economica Verlag.

Kreuzberg, P. (1996a) *Energieeinsparung als Versicherung gegen Marktrisiken – eine kapitalmarkttheoretisch fundierte Wirtschaftlichkeitsrechnung*. Schriften des Energiewirtschaftlichen Instituts an der Universität Köln, Band 47.

– (1996b), *Saving Energy as Insurance against Market Risk*. Erscheint in: *Jahrbücher für Nationalökonomie und Statistik*.

Leprich, U. (1991): *Least-Cost Planning – Ein neues Planungs- und Regulierungskonzept für die Elektrizitätswirtschaft*. Öko-Institut Freiburg.

McDonald, R. / Siegel, D. (1985): *Investment and the Valuation of Firms when there is an Option to Shut Down*. *International Economic Review* 26(2), 331-349.

– (1986), *The Value of Waiting to Invest*. *The Quarterly Journal of Economics*, Nov. 1986, 707- 727.

Panas, E. (1991): *A Weak Form Evaluation of the Efficiency of the Rotterdam and Italian Oil Spot Markets*. *Energy Economics*, Jan. 1991, 27-32.

Pindyck, R. S. (1991): *Irreversibility, Uncertainty, and Investment*. *Journal of Economic Literature* XXIX, 1110-1148.

– (1993), *Investments of Uncertain Costs*. *Journal of Financial Economics* 34, 34-76.

Seifried, D. (1992): *Least Cost Planning – Der Weg zum Umbau unseres Energieversorgungssysteme*. Greenpeace Studie Energie, September 1992.

VEA (1995): *Mitteilungen des Bundesverbandes der Energie-Abnehmer. Erdgaspreisvergleich II/1994*.

Zusammenfassung

Die praktische Erschließung als wirtschaftlich vermuteter Potentiale der Energieeinsparung wird nach weit verbreiteter Auffassung oftmals durch sogenannte „Markthemmnisse“ verhindert. Die vorliegende Arbeit zeigt anhand eines insbesondere für öl- und gaseinsparende Projekte realistischen Modells, daß die Zurückhaltung der Investoren in einer Reihe praktisch bedeutsamer Fälle auf ein Problem optimalen Timings zurückgeführt werden kann.

Abstract

According to a widespread belief many energysaving investments are not realized because of market failure. In a model for oil- and gassaving projects it is shown that much of investors's reserve can be referred to a problem of optimal timing.

JEL-Klassifikation: G13, G31