

HUMBOLDT - UNIVERSITÄT ZU BERLIN
Wirtschafts- und Sozialwissenschaften an der
Landwirtschaftlich - Gärtnerischen Fakultät

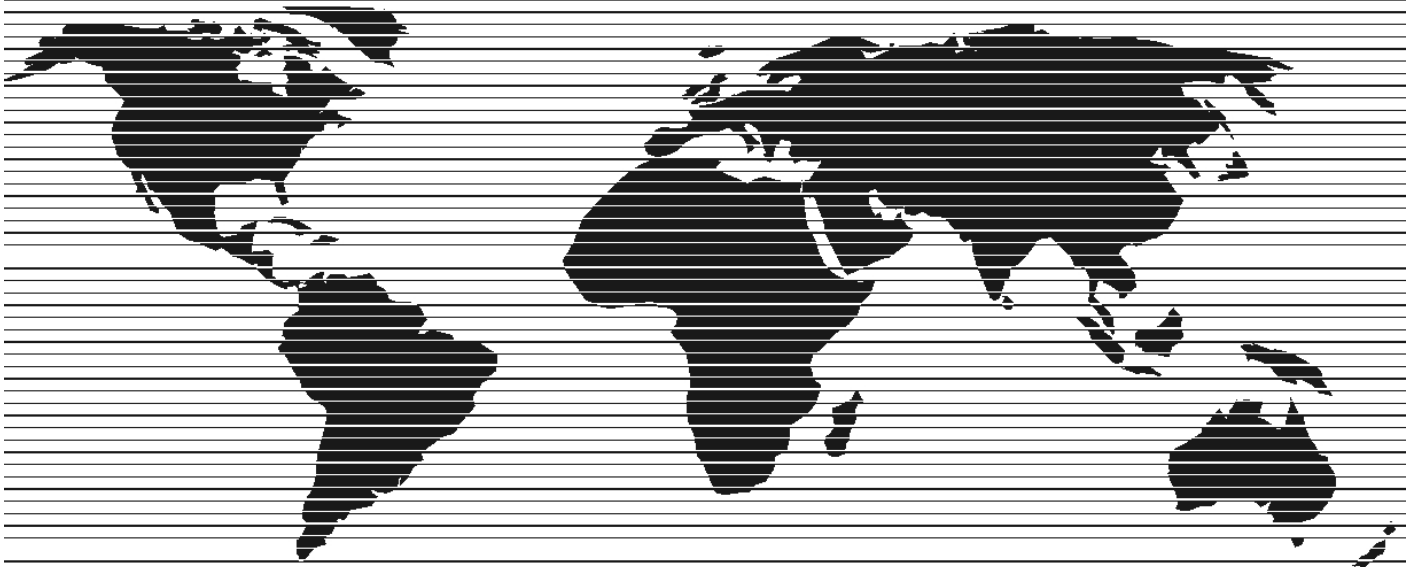


Nr. 67/2003

Odening, Martin
Mußhoff, Oliver
Hüttel, Silke

Empirische Validierung
von Realoptionsmodellen

WORKING PAPER



Luisenstraße 56, D - 10099 Berlin (Mitte), Germany
tel. +(49)-30- 2093 6517; fax: +(49)-30- 2093 6542

Empirische Validierung von Realloptionsmodellen

Martin Odening, Oliver Mußhoff und Silke Hüttel, Humboldt-Universität zu Berlin

1 Einleitung

Spätestens seit Erscheinen des viel zitierten Buches „Investment under Uncertainty“ von Dixit und Pindyck (1994) erfährt die neue Investitionstheorie (synonym: Realloptionstheorie) große Aufmerksamkeit. Neben theoretischen Weiterentwicklungen und Verfeinerungen wird die Realloptionstheorie in zahlreichen Publikationen auf die verschiedensten Fragestellungen angewendet. Einen Überblick über diese Anwendungen geben Pinches (1998) sowie Schwartz und Trigeorgis (2001). Neben neuartigen Problemstellungen werden auch alte Fragen im Lichte der Realloptionstheorie neu betrachtet, beispielsweise die Frage, warum Bodenpreise meistens deutlich höher sind als kapitalisierte Pachtpreise (Turvey 2002). Die neue Investitionstheorie ist zunächst eine normative Theorie, in dem Sinne, dass sie Aussagen über gewinnmaximale Investitionsstrategien unter Unsicherheit trifft. So ist auch die überwiegende Mehrzahl aller Anwendungen normativer Natur. Allerdings wird häufig auf das der neuen Investitionstheorie innewohnende Potenzial zur Erklärung tatsächlichen Investitions- und Desinvestitionsverhaltens hingewiesen. Dixit (1992, S. 109) tut dies mit den Worten: „This view of investment can be summarized as a theory of optimal inertia or a benevolent tyranny of the status quo.“ Dessen ungeachtet sind Untersuchungen, die den Erklärungsgehalt der neuen Investitionstheorie empirisch überprüfen wollen, relativ selten. Das Ziel dieses Beitrages besteht darin, die Schwierigkeiten zu verdeutlichen, die mit einer empirischen Validierung von Realloptionsmodellen verbunden sind. Darüber hinaus soll ein Überblick über bislang zu dieser Thematik vorliegende Arbeiten gegeben werden. Aus der Menge empirischer Realloptionsmodelle wird ein Ansatz herausgegriffen und näher auf seine Eignung zum Nachweis von Optionseffekten bei Investitionsentscheidungen hin untersucht. Der Beitrag ist wie folgt aufgebaut. Im nächsten Abschnitt 2 werden kurz die Kernaussagen der traditionellen und der neuen Investitionstheorie vergleichend gegenübergestellt, um Hypothesen abzuleiten, die als Grundlage für die Formulierung ökonometrischer Modelle dienen können. Abschnitt 3 systematisiert existierende ökonometrische Realloptionsmodelle. In Abschnitt 4 wird das von Richards und Patterson (1998) verwendete Modell ausführlicher beschrieben. Mit Hilfe von Simulationsrechnungen wird untersucht, unter welchen Bedingungen dieses Modell in der Lage ist, optionsbedingte Hysterese, d.h. Anpassungsverzögerungen bei Investitions- und Desinvestitionsentscheidungen, empirisch zu belegen. Der Beitrag endet mit Schlussfolgerungen über Möglichkeiten und Grenzen des empirischen Nachweises optionsbedingter Hysterese (Abschnitt 5).

2 Theoretische Modelle und Hypothesen zum Investitionsverhalten

In diesem Abschnitt sollen einige Modelle dargestellt werden, die Aussagen zum optimalen Investitionsverhalten von Unternehmen machen. Aus diesen (normativen) Modellen lassen sich Hypothesen bezüglich des tatsächlichen, empirisch beobachtbaren Investitionsverhaltens ableiten, die Ansatzpunkte für statistische Tests in ökonometrischen Modellen bieten. Die hier vorgenommene Darstellung ist angesichts der Fülle von Modellvarianten zwangsläufig unvollständig. Die Auswahl erfolgt unter dem Aspekt, einerseits Modelle mit sich widersprechenden Hypothesen zu beschreiben. Andererseits sollen unterschiedliche theoretische Ansätze genannt werden, die dasselbe empirisch beobachtbare Phänomen auf alternative Weise erklären.

2.1 Die klassische Investitionstheorie

Unter klassischer Investitionstheorie sollen hier Modelle verstanden werden, die entweder deterministisch oder statisch sind, d.h. die nicht den optimalen Investitionszeitpunkt bestimmen, sondern eine Ja-Nein-Entscheidung zugrunde legen. Der Einfachheit halber werden folgende Annahmen getroffen. Es wird eine Investition mit einer Anfangsauszahlung I betrachtet, die völlig irreversibel ist, d.h. einen Restwert von Null aufweist. Die Investition unterliegt keiner Abschreibung, d.h. sie hat eine unendlich lange Nutzungsdauer. Mit der Investition lässt sich ein Güterstrom vom Umfang 1 erzeugen. Es fallen keine variablen Kosten an. Damit entspricht der operative Gewinn dem Produktpreis P , der sich wie folgt im Zeitablauf entwickelt:

$$dP = \alpha \cdot P \cdot dt \Rightarrow P(t) = P(0) \cdot e^{\alpha t} \quad (1)$$

Dabei kennzeichnet α die Driftrate der Preise. Für den Barwert der Investitionsrückflüsse $V(P)$ gilt dann $V = P/(r - \alpha)$, wobei $r > \alpha$ einen Zinssatz darstellt.

Der klassische Kapitalwert

Das klassische Kapitalwertkriterium, auch als Marshallian Trigger bezeichnet, geht von sicheren Erwartungen aus und gibt an, unter welchen Bedingungen jetzt oder nie investiert werden sollte. Dies ist der Fall, wenn die diskontierten Investitionsrückflüsse die anfänglichen Investitionsausgaben überschreiten, d.h. für den Marshallschen Trigger V^M bzw. P^M gilt:

$$V^M = I \Rightarrow P^M = (r - \alpha) \cdot I \quad (2)$$

r ist in unter der Annahme von Sicherheit als risikoloser Zinssatz zu verstehen.

Man beachte, dass nach erfolgter Investition die gewinnmaximale Strategie darin besteht, weiter zu produzieren, solange $P > 0$ ist. Mit anderen Worten, bereits im einfachsten Modell mit Irreversibilität ist Hysterese zu erwarten.

Ein deterministisches Modell mit variablem Investitionszeitpunkt

Mit Einführung von Flexibilität in Form eines variablen Investitionszeitpunktes (die Investitionsdurchführung kann unendlich lange hinausgezögert werden) sind mit der Investitionsentscheidung möglicherweise Opportunitätskosten verbunden, und es kann ggf. lohnend sein zu warten. In diesem Fall stellt sich das Entscheidungsproblem wie folgt dar:

$$\max_t \left(\frac{P(0) \cdot e^{\alpha t}}{r - \alpha} - I \right) \cdot e^{-rt} \quad (3)$$

Für $\alpha > r$ existiert kein endlicher Investitionszeitpunkt, während für $\alpha \leq 0$ sofort investiert wird, falls $V(0) > I$. Dies entspricht der zuvor betrachteten Situation. Für den Fall $0 < \alpha < r$ gilt der Jorgensonische Trigger V^J bzw. P^J :

$$V^J = \frac{r}{r - \alpha} \cdot I \Rightarrow P^J = r \cdot I \quad (4)$$

Offensichtlich wird später investiert als dem klassischen Kapitalwert zufolge. Der optimale Investitionszeitpunkt t^{*J} kann folgendermaßen bestimmt werden:

$$t^{*J} = \max \left\{ 0, \frac{1}{\alpha} \cdot \ln \left[\frac{r \cdot I}{(r - \alpha) \cdot V} \right] \right\} \quad (5)$$

Statische Investitionsmodelle mit Unsicherheit

Die Preisdynamik wird in diesem Fall durch einen stochastischen Prozess abgebildet. Es könnte sich z.B. um einen geometrischen Brown'schen Prozess handeln:

$$dP = \alpha \cdot P \cdot dt + \sigma \cdot P \cdot dz \quad (6)$$

Dabei beschreibt σ die Standardabweichung und dz einen Wiener Prozess. Geht man davon aus, dass die Investoren risikoavers sind, ist dies im Entscheidungskalkül zu berücksichtigen. Dies kann dadurch erfolgen, dass anstelle des risikolosen Zinssatzes r der risikoadjustierte Zinssatz $\mu > r$ bei der Diskontierung künftiger, unsicherer Investitionsrückflüsse verwendet wird. Der Marshall'sche Trigger (2) wird dann zu

$$V^C = I \Rightarrow P^C = (\mu - \alpha) \cdot I \quad (7)$$

Offensichtlich steigt die zur Durchführung geforderte Rentabilität der Investition im Vergleich zu einer Situation ohne Risiko an. Bei Vorliegen eines Kapitalmarktgleichgewichts lässt sich der risikoadjustierte Zinssatz, der auch als geforderte Rendite interpretiert werden kann, durch die Capital-Asset-Pricing-Modell (CAPM) Renditegleichung bestimmen:

$$\mu = r + \gamma \cdot \rho \cdot \sigma \quad (8)$$

Die Höhe des Risikozuschlages hängt ab von dem Marktpreis des Risikos γ , der Volatilität σ des Investitionsprojektes sowie seiner Korrelation ρ mit dem Marktportfolio.

2.2 Das Standard-Realoptionsmodell

Realoptionsmodelle verbinden die drei bereits angesprochenen Aspekte Unsicherheit, Irreversibilität und Handlungsflexibilität von Investitionsentscheidungen in einem dynamischen Optimierungsansatz. Flexibilität kann sich beziehen auf den Investitionszeitpunkt, auf die Möglichkeit des Verkaufes oder der Nutzungsumwidmung sowie auf Expansion oder Kontraktion des Investitionsobjektes. Im Folgenden wird eine einfache (isolierte) Verzögerungsoption (Call-Option) bei völliger Irreversibilität der Investition betrachtet, um die Vergleichbarkeit mit den zuvor beschriebenen Modellen zu wahren. Die Option sei exklusiv in dem Sinne, dass sie Wettbewerbern nicht offensteht. Folglich ist der Preis P exogen, und es treten keine Rückkoppelungseffekte auf. Die Nutzungsdauer der Investition ist unendlich, und die Investitionsentscheidung kann beliebig lange aufgeschoben werden. Es fallen keine variablen Produktionskosten an. Gefragt wird nach dem Wert $F(P)$ dieser Option. Weiterhin ist der Investitionstrigger P^* von Interesse, der angibt, bei welchem Preis die Investitionsoption ausgeübt werden sollte. Für die stochastische Entwicklung von P wird weiterhin ein geometrischer Brownscher Prozess gemäß (6) angenommen. Die Bellmansche Funktionalgleichung für dieses Problem lautet:

$$r \cdot F \cdot dt = E(dF) \quad (9)$$

Durch die üblichen Standardschritte zur Lösung des durch (9) beschriebenen Optimal-Stopping-Problems erhält man für den Optionswert:

$$F(V) = A \cdot V^\beta \quad (10)$$

und für den Investitionstrigger:

$$V^* = \frac{\beta}{\beta-1} \cdot I \text{ bzw. } P^* = \frac{\beta}{\beta-1} \cdot (\mu - \alpha) \cdot I \quad (11)$$

$$\text{mit } A = \frac{(\beta-1)}{\beta^\beta \cdot I^{\beta-1}} \quad (12)$$

$$\text{und } \beta = \frac{1}{2} - \frac{r - (\mu - \alpha)}{\sigma^2} + \sqrt{\left(\frac{r - (\mu - \alpha)}{\sigma^2} - \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{2r}{\sigma^2}} > 1 \quad (13)$$

Im Hinblick auf eine ökonometrische Prüfung von Realoptionsmodellen lassen sich damit folgende Feststellungen treffen:

H1: Der Realoptionstrigger P^* ist höher als der deterministische Marshallsche Trigger P^M , sofern tatsächlich Unsicherheit, Irreversibilität und Flexibilität vorliegen. Das bedeutet, es lassen sich Konstellationen beobachten, in denen sich der Produktpreis über den Kosten $(r - \alpha) \cdot I$ bewegt, ohne unmittelbar eine Investition auszulösen.

H2: Der Realoptionstrigger P^* ist auch höher als der Marshallsche Trigger P^C , der sich bei Berücksichtigung von Unsicherheit ergibt. Das bedeutet, es lassen sich Konstellationen beo-

bachten, in denen sich der Produktpreis über den Kosten $(\mu - \alpha) \cdot I$ bewegt, ohne unmittelbar eine Investition auszulösen.

H3: Der Realloptionstrigger P^* ist ebenfalls größer als der Jorgensonische Trigger P^J . Dies wird deutlich, wenn man für P^* schreibt:

$$P^* = r \cdot I + \frac{1}{2} \cdot \sigma^2 \cdot \beta \cdot I \quad (14)$$

Das bedeutet, es lassen sich Konstellationen beobachten, in denen sich der Produktpreis über den Kosten $r \cdot I$ bewegt, ohne unmittelbar eine Investition auszulösen.

H4: Die Zeitdauer bis zur Ausübung der Investitionsoption ist im Realloptionsmodell am längsten, da diese mit zunehmendem Trigger steigt. So beträgt die erwartete First-Passage-Time t^* für den geometrischen Brown'schen Prozess ausgehend von einem Preis P_0 :

$$E(t^*) = \frac{\ln(P^*) - \ln(P_0)}{\alpha - 0.5 \cdot \sigma^2} \quad (15)$$

H5: Der Wert der Investitionsoption $F(V)$ ist höher als der klassische Kapitalwert $V - I$. Das impliziert, dass Optionsprämien beobachtbar sein müssten, etwa die Bereitschaft für die Investitionsmöglichkeit zu zahlen, obwohl sie „aus dem Geld“ ist, d.h. einen negativen Kapitalwert aufweist.

Der Vergleich der verschiedenen Modelle macht deutlich, dass optionsbedingte Verzögerungen bei Investitionsentscheidungen prinzipiell von solchen zu unterscheiden sind, die auf die partiellen Faktoren „Unsicherheit“ und „Flexibilität“ zurückzuführen sind. Inwieweit es gelingt, die verschiedenen Effekte in ökonometrischen Modellen zu separieren, ist eine andere Frage.

Einen weiteren Ansatzpunkt für Hypothesentests bietet eine komparativ statische Analyse. Definiert man $\delta = \mu - \alpha$ lassen sich folgende Wirkungsrichtungen der Modellparameter auf den Investitionstrigger ableiten:

$$H6: \frac{\partial P^*}{\partial \delta} > 0 \text{ und} \quad (16)$$

$$H7: \frac{\partial P^*}{\partial \sigma} > 0 \quad (17)$$

In der Literatur wird insbesondere auf den Zusammenhang zwischen Investitionstrigger und Volatilität abgestellt, der in diesem Modell positiv ist. Dass dieser Zusammenhang unter bestimmten Annahmen auch umgekehrt sein kann, wird weiter unten gezeigt. An dieser Stelle soll nur der Hinweis erfolgen, dass sich die Investitionszurückhaltung mit steigender Varianz auch im CAPM erhöhen kann, wie aus (8) deutlich wird. Die Intensität des Zusammenhangs wird allerdings abgeschwächt, wenn die Korrelation zwischen den Rückflüssen der Investition und dem Marktportfolio gering ist. Das bedeutet, der Kausalzusammenhang zwischen Unsicherheit und Investitionstrigger ist mehrdeutig, sofern nicht nachgewiesen werden kann,

dass (bei Gültigkeit des CAPM) die Investition und das Marktportfolio unkorreliert oder die Investoren risikoneutral sind.

An dieser Stelle sei auf eine mögliche Überinterpretation des oben beschriebenen Realloptionsmodells hingewiesen. Aus der Erkenntnis, dass der korrekte Investitionstrigger mit zunehmender Unsicherheit steigt, kann nicht ohne weiteres geschlussfolgert werden, dass in Phasen zunehmender Unsicherheit tatsächlich später oder in geringerem Umfang investiert wird. Ob und wann investiert wird, hängt davon ab, wann der aktuelle Preis den Investitionstrigger erreicht, und mit zunehmender Volatilität steigt c.p die Wahrscheinlichkeit, dass der stochastische Prozess (6) ein bestimmtes Level erreicht. Welcher Effekt einer Volatilitäts-erhöhung – erhöhter Trigger oder höhere Wahrscheinlichkeit, einen gegebenen Trigger zu erreichen – überwiegt, kann nur unter Hinzuziehung weiterer Annahmen geklärt werden (siehe unten).

2.3 Relaxation von Annahmen im Standard-Realloptionenmodell

Das zuvor beschriebene Standard-Realloptionsmodell weist eine Vielzahl vereinfachender und unrealistischer Annahmen auf, und es ist zu fragen, ob die aufgezeigten Implikationen Bestand haben, wenn diese Annahmen aufgehoben werden. Im Folgenden soll dies beispielhaft und in qualitativer Weise diskutiert werden.

Endliche Laufzeit der Investitionsoption

Aus der Optionspreistheorie ist bekannt, dass der Zeitwert mit kürzer werdender Restlaufzeit sinkt. Für den Investitionstrigger als Funktion der Zeit, d.h. die Exercise Frontier ergibt sich ebenfalls ein fallender Verlauf. Solange noch Flexibilität besteht, haben die o.g. qualitativen Aussagen Gültigkeit; der Optionseffekt wird allerdings abgeschwächt.

Abschreibung

Die Auswirkung einer endlichen Nutzungsdauer des Investitionsobjektes, d.h. von Abschreibung, hängt von der Entscheidungssituation ab. Wird eine einmalige Investition betrachtet, erhöht sich der Trigger. Der Effekt geht allerdings auf eine Erhöhung der „klassischen“ Investitionskosten zurück; das Investitionsmultiple, d.h. der optionsspezifische Teil des Triggers bleibt unverändert. Anders ist die Situation, wenn die Möglichkeit zur Reinvestition besteht. Die Investition ist dann bei Vorliegen von Abschreibung als weniger irreversibel anzusehen, und der auf Irreversibilität beruhende Optionseffekt daher weniger ausgeprägt. Dennoch behalten die o.g. qualitativen Aussagen Gültigkeit.

Andere stochastische Prozesse

Der geometrische Brown'sche Prozess (6) kann als Standardannahme in der Literatur zu Investitionen unter Unsicherheit betrachtet werden. Während dieser Prozess für die Preise von

Kapitalmarkttitle als plausibel angesehen werden kann, trifft dies für die Preise der Underlyings von Realoptionen nicht notwendiger ebenfalls zu. Vielmehr ist zu erwarten, dass sich die Preise von Commodities (z.B. Öl, landwirtschaftliche Produkte) langfristig an den Grenzkosten der Produktion orientieren und nicht beliebig driften, wie dies von Random Walks unterstellt wird. Aus diesem Grund werden zur Modellierung von Realoptionen alternativ auch Mean-Reverting-Prozesse herangezogen, bei denen die Zufallsvariable nach einem Zufallsschock mehr oder weniger schnell wieder zu ihrem langfristigen Gleichgewichtswert zurückstrebt. ODENING et al. (2003) zeigen, dass der Optionseffekt bei Verwendung eines Mean-Reverting-Prozesses zum Teil deutlich abgeschwächt werden kann. Dessen ungeachtet bleiben die rein qualitativen Aussagen H1-H7 aber bestehen.

Partielle Irreversibilität und Realoptionskomplexe

Partielle Irreversibilität bedeutet, dass für die betrachtete Investition ein positiver Wiederveräußerungswert besteht. Das bedeutet, dass mit der Durchführung der Investition eine Put-Option erworben wird. Diese macht sofortiges Investieren im Vergleich zu völliger Irreversibilität attraktiver. Die qualitativen Aussagen H1-H7 bleiben aber bestehen, solange nicht völlige Reversibilität gegeben ist.

Dennoch lassen sich Situationen konstruieren, in denen ein Vorziehen einer Investition aus optionstheoretischer Sicht vorzüglich ist, d.h. es sollte bereits investiert werden, wenn der „klassische“ Kapitalwert der Investition negativ ist. Dies ist etwa dann der Fall, wenn sich bei Durchführung einer Investition weitere Investitionsoptionen erschließen und die frühere Investition wertvolle Hinweise bzgl. zukünftiger Rückflüsse liefert (Roberts und Weitzman 1981). Abel et al. (1996) betrachten weiterhin eine Situation, in der ein Unternehmen neben einer Wiederveräußerungsmöglichkeit für zuvor investiertes Kapital (Put Option) auch eine Expansionsoption besitzt (Call Option). Während der Wiederveräußerungswert unter dem Anschaffungspreis liegt (costly reversibility) ist die Kapazitätserweiterung zu einem späteren Zeitpunkt teurer als in der Gegenwart (costly expandability). Bei diesem Szenario sind Parameterkonstellationen möglich, bei denen das Option-Value-Multiple *kleiner* ist als 1, d.h. das Unternehmen ist bereit mehr zu investieren, als es gemäß dem klassischen Kapitalwertkriterium der Fall wäre. Dies ist gegeben, wenn der Wert der (marginalen) Put Option den Wert der (marginalen) Call Option übersteigt. Das bedeutet, dass die Aussagen H1-H4 dann keine Gültigkeit mehr haben.

Wettbewerb

Die Auswirkungen, die Wettbewerb auf den Wert von Realoptionen und den Investitionstrigger hat, sind situationsabhängig und können an dieser Stelle nur grob dargestellt werden. Im Fall vollkommenen Wettbewerbs und sektorbezogener (im Gegensatz zu ideosynkratischer) Unsicherheit, stellt sich aufgrund der Nichtexklusivität der meisten Investitionen die Frage nach der Übertragbarkeit und Relevanz des Optionskonzeptes. In der Tat zeigt Leahy (1993),

dass bei Vorliegen von Unsicherheit und Irreversibilität die Zero-Profit-Bedingung erfüllt ist, m.a.W. der Optionswert Null ist. Insofern bietet der Optionswert bei vollkommenem Wettbewerb keinen Ansatzpunkt für empirische Tests. Dessen unbeschadet weist der Investitionstrigger P^* exakt dieselbe Struktur auf wie bei Exklusivität der Option, wengleich aus anderen Gründen. Der Wert des Wartens geht hier nicht auf Opportunitätskosten zurück, die durch das Ausüben der Option entstehen, sondern vielmehr auf die Tatsache, dass der Trigger P^* eine Preisobergrenze darstellt. Wettbewerbsbedingte Marktzutritte führen zu einer Preisreduktion, so dass die Preiserwartung $E(P)$ geringer ist als P^* . Warten stellt sicher, dass die durchschnittlichen Kapitalkosten gedeckt werden und verhindert einen zu hohen Kapitalbestand in Phasen unterdurchschnittlicher Preise. Im Ergebnis behalten die Aussagen H1-H4 sowie H6 und H7 Gültigkeit, es mag jedoch irritierend erscheinen, weiterhin von *optionsbedingter* Investitionsverzögerung zu sprechen.

Bei unvollkommenem Wettbewerb stellt sich die Situation anders dar. Ausgehend von der vollkommenen Exklusivität der Realoption modelliert Trigeorgis (1996) den Marktzutritt von Wettbewerbern exogen als Reduktion des Barwertes der betrachteten Investition. Dies entspricht aus Sicht des Optionshalters formal einer Dividendenzahlung und hat dieselbe Wirkung: Optionswert und Investitionstrigger verringern sich. Der Vorteil des Verzögerns ist im Vergleich zu der Situation ohne Wettbewerb kleiner, da Gewinne durch Wettbewerber erodiert werden, und es kann vorteilhaft sein, dem durch vorzeitige Ausübung der Option entgegenzuwirken. Die Erkenntnis, dass zunehmender Wettbewerb, ausgedrückt als zunehmende Markteintrittswahrscheinlichkeit, Optionswerte und Trigger senkt, bietet eine Möglichkeit, zwischen Optionseffekten und Risikoaversion als Ursache für Investitionsverzögerung zu unterscheiden. Während bei Realoptionsmodellen der Zusammenhang zwischen Unsicherheit und Trigger mit zunehmendem Wettbewerb abgeschwächt wird, ist der Einfluss von Unsicherheit in Modellen, die auf Risikoaversion als Erklärungsansatz abstellen, nicht von der Intensität des Wettbewerbs abhängig (vgl. Bulan et al. 2002 und die dort zitierte Literatur).

2.4 Adjustment-Cost-Modelle

Adjustment-Cost-Modelle bilden neben den Realoptionsmodellen eine zweite wichtige Modellklasse, die Unsicherheit und Irreversibilität bei Investitionsentscheidungen zusammenführt. Grundlegende Arbeiten gehen auf Hartman (1976), Abel (1983) sowie Abel und Eberly (1994) zurück. Beide Modellklassen weisen enge Bezüge auf und kommen unter bestimmten Annahmen zu identischen Ergebnissen (siehe Abel et al. 1996, Caballero 1997). Dixit und Pindyck (1994, S. 381 ff.) zeigen, dass Realoptionsmodelle als speziell formulierte Adjustment-Cost-Modelle interpretiert werden können. Aus beiden Modellklassen können aber auch sich widersprechende Aussagen insbesondere zum Zusammenhang zwischen Unsicherheit und Investitionsverhalten abgeleitet werden. Das liegt daran, dass die Modelle in ihren jeweils „typischen“ Formulierungen auf unterschiedlichen Annahmen bezüglich der Variierbarkeit des Kapitalbestandes und der zugrundeliegenden Produktionsfunktion basieren. Um

diesen Sachverhalt zu verdeutlichen, wird im Folgenden ein „typisches“ stochastisches Adjustment-Cost-Modell beschrieben.

Betrachtet wird ein risikoneutrales Unternehmen, das entsprechend einer Cobb-Douglas-Produktionsfunktion einen Output y produziert:

$$y = A \cdot L^l \cdot K^{1-l} \quad (18)$$

Darin bedeuten L , K und A Arbeit, Kapital bzw. einen Technologieparameter. l ist der Arbeitsanteil. Das Unternehmen ist Mengenanpasser auf einem vollkommenen Markt und sieht sich einer vollkommen elastischen Nachfrage gegenüber. Für die Einordnung der Ergebnisse ist zu beachten, dass es sich hier um die individuelle Nachfrage und nicht um die Marktnachfrage handelt. Der Preis P je Produkteinheit y folgt einem geometrischen Brown'schen Prozess. Der mit der Produktion verbundene maximale Gewinn π ist dann wie folgt definiert:

$$\pi = \max(P \cdot y - w \cdot L) \quad (19)$$

wobei w den Lohn bezeichnet.

Mit der Anpassung des Kapitalstocks, $I = dK$, des Unternehmens sind folgende Kosten $C(I)$ verbunden:

$$C(I) = \begin{cases} a + b_1 \cdot I + \frac{1}{2} \cdot I^2, & I > 0 \\ 0, & I = 0 \\ a + b_2 \cdot I + \frac{1}{2} \cdot I^2, & I < 0 \end{cases} \quad (20)$$

a sind fixe Anpassungskosten, die unabhängig vom Investitionsumfang sind. b_1 und b_2 sind die Preise pro Einheit gekauftes bzw. verkauftes Kapital. Irreversibilität impliziert $b_1 > b_2 > 0$. Darüber hinaus fallen konvexe Anpassungskosten an. Gesucht wird eine optimale dynamische Investitionsstrategie. Dazu maximiert das Unternehmen den Barwert V seiner künftigen Erträge, wobei r als Diskontierungsrate verwendet wird:

$$V = \max_I \int_0^{\infty} E(\pi(K(t), P(t)) - C(I(t))) \cdot e^{-rt} dt \quad (21)$$

Die Bellman-Gleichung für dieses Problem lautet

$$r \cdot V = \max_I \left(\pi(K, P) - C(I) + \frac{1}{dt} \cdot E(dV) \right) \quad (22)$$

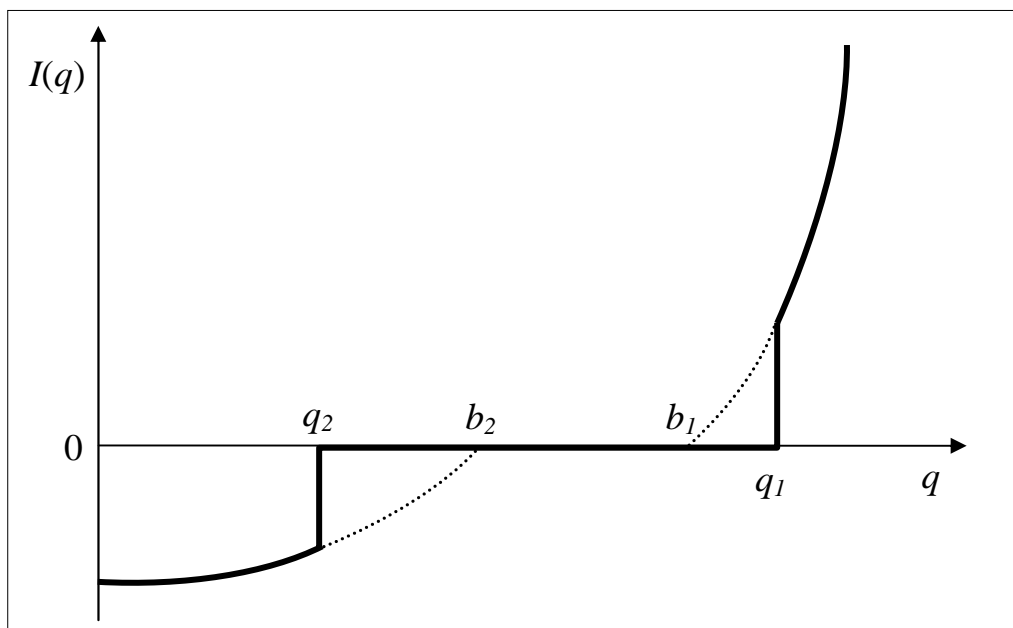
Nach Durchführung der üblichen Optimierungsschritte und unter Verwendung der Definition $q = dV/dK$ als Wertgrenzproduktivität des Kapitals lässt sich die optimale Investitionsstrategie wie folgt charakterisieren (Abel und Eberly 1994):

$$I^* = \begin{cases} q - b_1 & , \quad q > q_1 \\ 0 & , \quad q_2 \leq q \leq q_1 \\ -|q - b_2| & , \quad q < q_2 \end{cases} \quad (23)$$

mit $q_1 = b_1 + \sqrt{2a}$ und $q_2 = b_2 - \sqrt{2a}$

Abbildung 1 stellt den Zusammenhang zwischen der Wertgrenzproduktivität q und dem optimalen Investitionsvolumen dar. Es wird deutlich, dass es wie im Realoptionsmodell einen „Range of Inaction“ gibt, d.h. einen Bereich, in dem keine Anpassung der Kapitalausstattung stattfindet. Voraussetzung dafür sind Unterschiede zwischen dem Kaufpreis und dem Wiederveräußerungspreis von Kapital, d.h. Irreversibilität oder das Vorhandensein von Fixkosten bei der Änderung der Kapitalausstattung, die unabhängig vom Investitionsvolumen sind. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit den oben getroffenen Aussagen H1-H4; die Voraussetzungen die zu Hysterese führen können, sind sogar noch allgemeiner.

Abbildung 1: Optimale Investitionsstrategie im Adjustment-Cost-Modell



Ein in der Literatur viel diskutierter Unterschied zwischen Realoptionsmodellen und Adjustment-Cost-Modellen betrifft den Zusammenhang zwischen optimalem Investitionsumfang und Unsicherheit. Während im Standard-Realoptionsmodellen ein negativer Zusammenhang vorliegt, zeigen Caballero (1991) sowie Abel und Eberly (1994), dass zunehmende Unsicherheit im Standard-Adjustment-Cost-Modell zu einer Zunahme des optimalen Investitionsvolumens führt, d.h. $dI/d\sigma > 0$. Voraussetzung dafür sind konstante Skalenerträge und vollkommener Wettbewerb, was eine unendlich elastische individuelle Nachfrage impliziert. Unter diesen Annahmen ist die Wertgrenzproduktivität eine konvexe Funktion des Kapitaleinsatzes, und auf Grund der Jensen'schen Ungleichung erhöht eine Zunahme der Variabilität der

Schocks die Wertgrenzproduktivität des Kapitals. Ist der Verlauf der Wertgrenzproduktivität dagegen konkav, ergibt sich der gegenteilige Effekt.

Will man also Einklang mit Aussage H6 herstellen, müssen Bedingungen formuliert werden, die die Konkavität der Wertgrenzproduktivität zur Folge haben. Hierfür sind verschiedene Vorschläge unterbreitet worden: Erstens, man unterstellt abnehmende Skalenerträge in der Produktionsfunktion (18) (Caballero 1991). Zweitens, man nimmt unvollkommenen Wettbewerb an (Caballero 1991). Das bedeutet, dass die individuelle Nachfragefunktion nicht länger unendlich elastisch ist, sondern eine negative Steigung aufweist. Drittens, man geht zu einer Marktbeobachtung über und ersetzt P durch eine inverse sektorale Nachfragefunktion $P = D(y) \cdot X$ mit X als aggregiertem (sektorweiten) Nachfrageschock (Pindyck 1993, Abel und Eberly 1994).

3 Überblick über empirische Modelle zum Investitionsverhalten

Der vorangegangene Abschnitt hat einige grundsätzliche Probleme deutlich gemacht, die eine empirische Validierung von Realloptionsmodellen erschweren (vgl. auch Dixit und Pindyck 1994, S. 421 f.):

1. Ein und dasselbe beobachtete Phänomen kann durch verschiedene Modelle erklärt werden. Dies gilt insbesondere für das, was als „Hysterese“ „Inertia“ oder „Reluctance to Invest“ bezeichnet wird. Will man den spezifischen Beitrag von Realloptionen auf das Investitionsverhalten quantifizieren, ist es daher wichtig, das richtige Referenzsystem zu wählen, bzw. genau zu formulieren, worin die Alternativhypothese besteht. Es ist beispielsweise nicht ausreichend, zu zeigen, dass Investitionen, die in Phasen steigender Preise getätigt wurden, bei fallenden Preisen nicht rückgängig gemacht werden, denn dies ergibt sich bereits durch das alleinige Vorhandensein von Irreversibilität. Ebenso wenig ist es ausreichend, nachzuweisen, dass ein Überschreiten des Marschall'schen Investitionstriggers nicht zu einer Investitionsaktivität führt, denn diese kann auch durch Risikoaversion begründet sein. Es müsste folglich ein risikobereinigter Investitionstrigger als Referenzsystem gewählt werden.
2. Ein und dieselbe Modellklasse kann in Abhängigkeit von den jeweils zugrunde gelegten Prämissen zu unterschiedlichen Hypothesen führen. Wie bereits ausgeführt, kann sich beispielsweise in bestimmten Situationen ein negatives Investment-Multiple ergeben. Weiterhin entfallen bei vollkommener Konkurrenz und sektorbezogener Unsicherheit Optionsprämien, die über den inneren Wert einer Investition hinausgehen. Daraus folgt, dass deutlich zu machen ist, in welcher Modellwelt man sich gerade bewegt und welcher Satz von Prämissen im Einzelfall validiert werden soll. Eine Falsifikation der Hypothese kann somit auch nicht als Argument gegen die Relevanz der gesamten Modellklasse, sondern nur gegen eine spezielle Ausprägung herangezogen werden.
3. Erschwerend kommt hinzu, dass sich Größen, auf die sich Aussagen der Realloptionstheorie beziehen und an denen Hypothesentests festgemacht werden könnten, empirisch nicht beobachtbar sind. Dies trifft insbesondere für den Investitionstrigger bzw. das Investment-

Multiple zu. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, nach geeigneten Proxy-Variablen zu suchen. Denkbare Kandidaten, beispielsweise tatsächlich realisierte Investitionen, weisen den Nachteil auf, dass diesbezüglich weniger eindeutige Hypothesen abgeleitet werden können. Man denke etwa an den Zusammenhang zwischen Unsicherheit und Investitionsvolumen.

4. Ein weiterer Problembereich betrifft die zur Verfügung stehenden Daten. Bei der Verwendung aggregierter Daten ist zu befürchten, dass markante einzelbetriebliche Effekte, wie z.B. der Wechsel von Inaktivität zu Aktivität, durch Aggregation verwischt werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass nicht alle Unternehmen denselben Investitionstrigger aufweisen. Deswegen werden einige Unternehmen früher als andere reagieren, und es entsteht scheinbar der Eindruck einer gleichmäßigen Anpassung, obwohl sie sich auf einzelbetrieblicher Ebene sprunghaft vollzieht. Bei der Verwendung einzelbetrieblicher Daten ist zu berücksichtigen, dass sowohl die Investitionstrigger als auch die tatsächlichen Investitionsentscheidungen durch eine Vielzahl weiterer z.T. betriebsindividueller Faktoren beeinflusst werden. Die Erklärung des Investitionsverhaltens setzt somit die Kenntnis dieser Variablen voraus. Daraus ergeben sich hohe Datenerfordernisse.
5. Ein eher technisches Problem betrifft die Nichtlinearität zwischen den zu erklärenden Variablen und den Erklärungsgrößen (siehe z.B. (11) und (13)). Bei der Verwendung der üblichen linearen Schätzfunktionen sind daher Approximationsfehler möglich.

Der folgende Abschnitt vermittelt einen systematisierenden, allerdings unvollständigen Literaturüberblick über ökonometrische Modelle zu irreversiblen Investitionen (siehe Tabelle 1). Dabei wird beispielhaft dargestellt, wie in der Literatur mit den zuvor genannten Problemen umgegangen wird.

Ein erstes Unterscheidungsmerkmal betrifft die theoretische Grundlage, auf der das ökonometrische Modell aufbaut und die Stringenz, mit der es aus dem theoretischen Modell abgeleitet wird. Die Mehrzahl der in Tabelle 1 aufgeführten Modelle nimmt explizit auf die Realoptionstheorie Bezug. Die Modelle von Böhm et al. (1999) sowie Pietola und Myers (2000) basieren dagegen auf einem Adjustment-Cost-Ansatz. Letztere leiten Faktornachfragefunktionen ab, die dynamischen Optimalitätsbedingungen genügen. Dieses Vorgehen führt zu einem vergleichsweise strukturierten Modell. Andere Autoren spezifizieren dem gegenüber ökonometrische Modelle in „reduzierter Form“. Dabei werden endogene und exogene Variablen in mehr oder weniger lockerem Bezug zur Realoptionstheorie in einer Schätzgleichung miteinander verknüpft. Beispiele für diese Art der Modellbildung sind die Arbeiten von Leahy und Whited (1996) sowie Böhm et al. (1999). Hier wird die Investitionsrate als lineare Funktion der Kapitalproduktivität und verschiedener Unsicherheitsmaße erklärt.

Bemerkenswert ist die Vielfalt der Modelle hinsichtlich der zu erklärenden Variablen. Eine grundsätzliche Unterscheidung bezieht sich darauf, ob

- a) unmittelbare Ergebnisse von (Des)Investitionsentscheidungen erklärt werden oder
- b) ob eher indirekt auf Produkt- oder Faktorpreise und deren Abweichung von klassischen Arbitragebedingungen abgestellt wird.

Beispiele für die erstgenannte Kategorie sind die Arbeiten von Böhm et al (1999), Leahy und Whited (1996) sowie Pietola und Myers (2000), in denen Investitionsraten bzw. Investitionsumfänge geschätzt werden. Bulan et al. (2002) sowie Hurn und Wright (1994) stellen auf die Zeitdauer zwischen Erwerb und Ausübung einer Realoption ab, die mit zunehmender Unsicherheit steigen sollte. Tufano und Moel (2002) betrachten den Nutzungszustand von Produktionsanlagen (Goldminen) und analysieren, wovon die Wahrscheinlichkeit für das Stilllegen und die Inbetriebnahme dieser Anlagen, d.h. das Ausüben einer Switch-Use-Option, abhängt. In die zweite Kategorie fallen die Arbeiten von Quigg (1993) sowie Richards und Patterson (1998). Quigg prüft, ob die Marktpreise für Bauland über den inneren Wert hinausgehende Optionsprämien enthalten. Das Modell von Richards und Patterson, das in Abschnitt 4 ausführlich beschrieben und angewendet wird, testet, ob (zufallsbehaftete) sektorale Lohndifferenzen zu bestimmten Zeitpunkten die (irreversiblen) Mobilitätskosten überschreiten, die mit einem intersektoralen Arbeitsplatzwechsels verbunden sind. Ist dies der Fall, so wird auf das Vorhandensein von optionsbedingter Hysterese geschlossen. Auch das Modell von Caballero und Pindyck (1996) setzt nicht unmittelbar an Investitionsentscheidungen, sondern an Marktergebnissen an. Ziel ist die Schätzung der Wertgrenzproduktivität, die Investitionen auslöst. Bei dieser Anwendung ist interessant, wie das Problem der Nichtbeobachtbarkeit von Investitionstriggern umgangen wurde. Es wird der Umstand ausgenutzt, das gemäß Realoptionstheorie in einem vollkommenen Wettbewerbsmarkt mit homogenen Produzenten eine konstante Reflecting Barrier für den Marktpreis existiert, die gleichzeitig eine Markteintrittsschwelle, m.a.W. den Investitionstrigger, darstellt. Da in der Realität keine einheitliche Preisobergrenze zu beobachten ist, approximieren Caballero und Pindyck diesen Wert durch verschiedene (willkürlich gegriffene) Preisquantile. In fast allen Modellen spielt der Zusammenhang zwischen Investitionen bzw. Investitionstrigger oder Optionswerten und der Volatilität eine entscheidende Rolle. Dementsprechend findet man in allen Modellen auf der Right-Hand-Side (RHS) der Schätzgleichungen eine Variable für die Höhe der Unsicherheit, wobei diese stetig oder diskret variieren kann. Allerdings wird der Mehrdeutigkeit dieses Zusammenhangs nur in wenigen Arbeiten Rechnung getragen. Leahy und Whited (1996) versuchen den Einfluss von Volatilität (im Sinne von Gesamtrisiko) und der Kovarianz mit dem Marktportfolio (systematisches Risiko) zu differenzieren, um zwischen Risikoaversion und optionsbedingter Hysterese zu unterscheiden. Bulan et al. (2002) lösen die Mehrdeutigkeit, indem sie gleichzeitig den Einfluss der Wettbewerbsintensität betrachten. Sie argumentieren, dass bei optionsbedingter Hysterese Wechselwirkungen zwischen Unsicherheit und Wettbewerb zu erwarten sind, bei risikoaversionsbedingter Hysterese dagegen nicht.

In den in Tabelle 1 dargestellten Anwendungen kommen sowohl einzelbetriebliche als auch aggregierte Daten zur Anwendung. Häufig handelt es sich um Paneldaten. In jedem Fall werden Zeitreihen benötigt, um Varianzen zu schätzen, und eine Querschnittsbetrachtung (z.B. zwischen Branchen) erlaubt, den Einfluss unterschiedlich hoher Unsicherheit deutlich zu machen.

Tabelle 1: Synopse zu empirischen Realoptionsmodellen

Autoren	Anwendungen	Daten	zu erklärende Variable	Ergebnis
Böhm et al. (1999)	Investitionsverhalten von Industrieunternehmen	Paneldaten börsennotierter Unternehmen	Investitionsrate	Unsicherheit hat für sich genommen einen positiven Effekt auf die Investitionsrate; erst unvollkommener Wettbewerb führt zu einer negativen Beziehung.
Bulan et al. (2002)	Investitionen im Wohnungsbau	individuelle Bauprojekte	Timelag zwischen Erschließung und Baubeginn	positiver Zusammenhang zwischen Unsicherheit und Timelag; Abschwächung des Effektes mit zunehmendem Wettbewerb
Caballero & Pindyck (1996)	Kapitalproduktivität im produzierenden Gewerbe	Zeitreihen aggregierter Daten verschiedener Branchen	investitionsauslösende Kapitalproduktivität	positiver Zusammenhang zwischen Unsicherheit und Investitionstrigger
Hurn & Wright (1994)	Erschließung von Ölfeldern	individuelle Ölfelder	Timelag zwischen Entdeckung und Nutzung einer Ölquelle	kein signifikanter Zusammenhang zwischen Ölpreisvolatilität und Timelag
Leahy & Whited (1996)	Investitionen im produzierenden Gewerbe	Einzelbetriebliche Paneldaten	Investitionsrate	optionsbedingter negativer Zusammenhang zwischen Unsicherheit und Investitionen
Pietola & Myers (2000)	Faktoranpassungen in der finnischen Schweineproduktion	unbalancierte einzelbetriebliche Paneldaten	Umfänge von Investitionen und Desinvestitionen	asymmetrische Anpassungskosten; zunehmende Unsicherheit verringert die Anpassungsvorgänge
Quigg (1993)	Preisbildung bei Bauland	Daten individueller Landkäufe	Marktpreise für Bauland	Preise beinhalten Optionsprämien
Richards & Greene (2000)	Sortenwechsel im Weinbau	Zeitreihen aggregierte Preis- und Ertragsdaten	Veränderung von Anbauumfängen verschiedener Weinsorten	Hysterese und positive Optionswerte sind nachweisbar
Richards & Patterson (1998)	intersektorale Mobilität landwirtschaftlicher Arbeitskräfte	Zeitreihen regionaler Arbeitslöhne	Lohndifferenz	optionsbedingte Hysterese nachweisbar
Moel & Tufano (2002)	Stilllegung und Inbetriebnahme von Goldminen	Paneldaten einzelner Minen	Nutzungszustand der Mine	optionsbedingte Hysterese nachweisbar

4 Anwendung eines speziellen ökonometrischen Modells zum Nachweis optionsbedingter Hysterese

In diesem Abschnitt wird ein spezielles ökonometrisches Modell zum Nachweis optionsbedingter Hysterese – mehr oder weniger willkürlich – ausgewählt und ausführlicher beschrieben. Dabei handelt es sich um das von Richards und Patterson (1998) entwickelte Modell, das zur Erklärung von (scheinbaren) Ungleichgewichten auf landwirtschaftlichen Arbeitsmärkten herangezogen wurde. Von diesem speziellen Anwendungskontext wird hier allerdings abstrahiert. Beispielhaft sollen die Funktionsweise, aber auch die Möglichkeiten und Grenzen der empirischen Validierung von Realoptionsmodellen aufgezeigt werden.

4.1 Modellbeschreibung

Die Formulierung des empirischen Modells geht von der Überlegung aus, dass im neoklassischen Modell bei vollkommenem Wettbewerb Investitionen induziert werden, wenn der Produktpreis die traditionellen Vollkosten, d.h. den verrenteten Anschaffungspreis zuzüglich der variablen Produktionskosten, überschreitet und umgekehrt eine Desinvestition (Produktionsaufgabe) erfolgt, wenn der Produktpreis die variablen Kosten zuzüglich des verrenteten Liquidationserlöses unterschreitet. Treten Abweichungen von diesem Gleichgewicht auf, derart, dass Preise ober- bzw. unterhalb der so definierten Marktz- und –austrittsschwelle zu beobachten sind, kann dies neben Marktunvollkommenheiten auch auf die Existenz von (Quasi-)Optionswerten zurückzuführen sein. Letzteres erscheint besonders plausibel, wenn das Ausmaß der Divergenz von Variablen abhängt, die auch die Höhe des Optionswertes bzw. des Investment-Multiple bestimmen, wie etwa die Driftrate und die Volatilität des stochastischen Prozesses. Entsprechend lassen sich drei Marktsituationen unterscheiden:

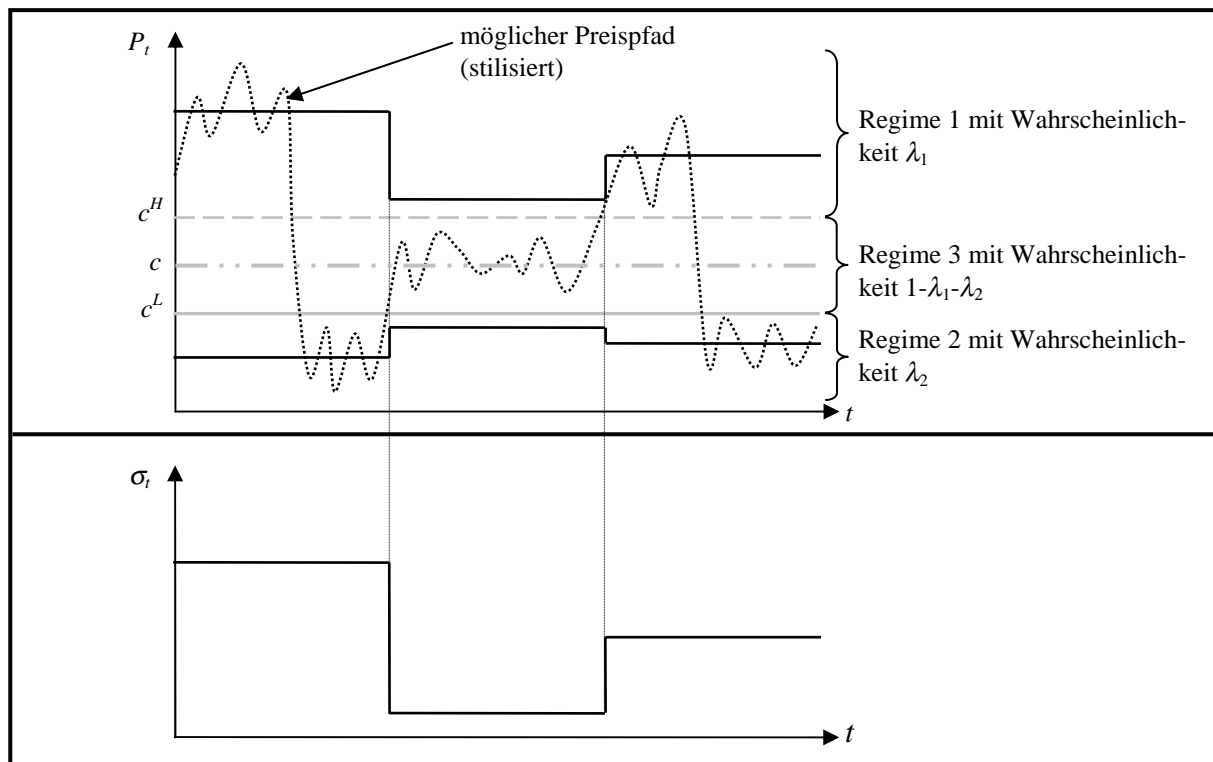
$$P_t = \begin{cases} c_t^H(I) + o^H(\sigma_t, \alpha_t) & \text{mit Wahrscheinlichkeit } \lambda_1 & (24a) \\ c_t^L(L) - o^L(\sigma_t, \alpha_t) & \text{mit Wahrscheinlichkeit } \lambda_2 & (24b) \\ c_t & \text{mit Wahrscheinlichkeit } 1 - \lambda_1 - \lambda_2 & (24c) \end{cases}$$

mit $c_t = c + v_t$, $c_t^H(I) = c^H + v_t + u_t$, $c_t^L(L) = c^L + v_t - u_t$

(24c) beschreibt eine Situation, in der sich der Preis an den durchschnittlichen Produktionskosten orientiert, die durch eine Konstante c und eine Zufallsvariablen v_t abgebildet werden. v_t ist normalverteilt mit Mittelwert 0 und Varianz σ_v^2 . Dieses Regime ist mit der klassischen Investitionstheorie verträglich. (24a) und (24b) beschreiben dagegen Konstellationen, in denen der Preis die Marshall'schen Ein- und Austrittsgrenzen über- bzw. unterschreitet, d.h. Situationen, die es gemäß traditioneller Investitionstheorie nicht geben sollte. In diesen beiden Fällen wird der Preis über eine Stochastic-Frontier geschätzt. Er setzt sich zusammen aus den (konstanten) traditionellen Preisober- bzw. –untergrenzen c^H und c^L sowie einem optionsbedingten Zuschlag o_t^H bzw. o_t^L , der von den Parametern des geometrischen Brown'schen Prozesses α_t

und σ_t abhängig ist. Zu diesem deterministischen Teil der Frontier kommen ein Störterm v_t sowie eine halbnormalverteilten Zufallsvariable u_t hinzu, die unabhängig von v_t normalverteilt ist mit Varianz σ_u^2 . u_t soll systematische Über- bzw. Unterschreitungen der traditionellen Preisgrenzen berücksichtigen, die nicht auf das Vorhandensein von Optionswerten zurückzuführen sind. Damit können z.B. Marktunvollkommenheiten oder andere, Hysterese bedingende Faktoren gemeint sein. Es sei angemerkt, dass der den Triggerpreis bestimmende geometrische Brown'sche Prozess (6) unmittelbar in das zu schätzende Modell (24) einfließt. Graphisch lassen sich die Regime in (24) wie in Abbildung 2 gezeigt darstellen.

Abbildung 2: Preisregimes



In Abbildung 2 (obere Bildhälfte) sind die Grenzen der einzelnen Regime in Abhängigkeit von der Standardabweichung der Preise (untere Bildhälfte) dargestellt. Der exemplarische Preispfad bewegt sich offensichtlich im zweiten Drittel innerhalb des Regimes 3, im ersten und fünften Sechstel im Regime 1 und im zweiten und sechsten Sechstel im Regime 2.

Die drei Regimes in (24) treten mit den Wahrscheinlichkeiten λ_1 , λ_2 sowie $1 - \lambda_1 - \lambda_2$ auf und bilden ein Switching-Regression-Modell mit unbekanntem Separationsindikator (Greene 1998). Die Likelihood-Funktion für dieses Modell lautet (vgl. Richards und Patterson 1998 sowie Sexton et al. 1991):

$$L = \prod_{t=1}^T (\lambda_1 \cdot f_t^1 + \lambda_2 \cdot f_t^2 + (1 - \lambda_1 - \lambda_2) \cdot f_t^3) \quad (25)$$

Dabei sind die Dichtefunktionen f_t^1 , f_t^2 und f_t^3 wie folgt definiert:

$$f_t^1 = \frac{2}{S} \cdot \phi\left(\frac{Z_t^1}{S}\right) \cdot \left(1 - \Phi\left(\frac{-Z_t^1 \cdot \frac{\sigma_u}{\sigma_v}}{S}\right)\right) \quad (26a)$$

$$f_t^2 = \frac{2}{S} \cdot \phi\left(\frac{Z_t^2}{S}\right) \cdot \left(1 - \Phi\left(\frac{Z_t^2 \cdot \frac{\sigma_u}{\sigma_v}}{S}\right)\right) \quad (26b)$$

$$f_t^3 = \frac{2}{\sigma_v} \cdot \phi\left(\frac{Z_t^3}{\sigma_v}\right) \quad (26c)$$

$$\begin{aligned} \text{mit } Z_t^1 &= P_t - (c^H + o_1^H \cdot \sigma_t^2 + o_2^H \cdot \alpha_t) \\ Z_t^2 &= P_t - (c^L - o_1^L \cdot \sigma_t^2 - o_2^L \cdot \alpha_t) \\ Z_t^3 &= P_t - c \\ S &= (\sigma_u^2 + \sigma_v^2)^{0,5} \end{aligned}$$

ϕ und Φ kennzeichnen die Dichtefunktion bzw. Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung.

Die unbekannt Parameter c , c^H , c^L , o_1^H , o_2^H , o_1^L , o_2^L , σ_v , σ_u sowie λ_1 und λ_2 können durch Maximierung der Likelihoodfunktion (25) bestimmt werden. Sind λ_1 , λ_2 und σ_u signifikant von Null verschieden, stützt dies die Hypothese, dass es (phasenweise) Marktfraktionen gibt, die Preise zur Folge haben, die über (unter) der klassischen Investitionsschwelle (Desinvestitionsschwelle) liegen.

Die Modellierung der optionsbedingten Zuschläge o^H und o^L ist aus mehreren Gründen problematisch. Zum einen werden sie nicht entsprechend (11) als Vielfaches (Multiple) der traditionellen Trigger formuliert, sondern als additive Größe. Darüber hinaus ist es nicht möglich, die nichtlinearen Beziehungen zwischen dem Investment-Multiple und seinen Determinanten in einer Schätzgleichung darzustellen. Vielmehr wird der optionsbedingte Zuschlag als lineare Funktion der Varianz und der Driftrate approximiert, d.h. $o(\sigma, \alpha) = o_1 \cdot \sigma_t + o_2 \cdot \alpha_t$. Simulationsrechnungen von Hüttel (2003) zeigen, dass der Zusammenhang zwischen Investment Multiple und der Varianz der Investitionsrückflüsse phasenweise nur schlecht durch eine lineare Funktion approximiert werden kann. Dagegen ist der Zusammenhang zwischen dem Investment Multiple und der Standardabweichung annähernd linear. Aus diesem Grund wird die Standardabweichung anstelle der Varianz als Regressor verwendet. Weiterhin ist anzumerken, dass die Schätzung der unbekannt Parameter o_1 und o_2 voraussetzt, dass σ und α als Erklärungsgrößen zeitabhängig variieren. Das bedeutet, der eigentlichen Schätzung der in (24) enthaltenen Modellparameter ist u.U. eine Schätzung der Preisdynamik mit einem Modell voranzustellen, das zeitabhängige Varianzen und Trends aufweist. Sowohl in der An-

wendung von Richards und Patterson (1998) als auch in den nachfolgenden Simulationsexperimenten wird von einer konstanten Driftrate ausgegangen. Damit ist der Einfluss dieser Größe nicht von den Konstanten c^H bzw. c^L unterscheidbar, und o_2^H sowie o_2^L sind nicht identifizierbar.

4.2 Simulationsexperimente zur Untersuchung der Modelleigenschaften

Um die Eigenschaften des vorgestellten Switching-Regression-Modells besser zu verstehen, werden Simulationsrechnungen mit fiktiven Daten durchgeführt. Es wird ein vollkommener Wettbewerbsmarkt angenommen, auf dem eine Vielzahl homogener Anbieter ein Gut produzieren. Die Nachfrage entwickelt sich gemäß eines geometrischen Brown'schen Prozesses. Es herrscht freier Marktzutritt. Investitionen sind mit Kosten 17 verbunden, die teilweise irreversibel sind. Desinvestitionen setzen liquide Mittel in Höhe von 10.20 (= 60 % der Investitionskosten) frei. Die Investitions- und Desinvestitionstrigger, die nach Maßgabe der Realoptionstheorie gelten, sind bekannt (siehe Dixit und Pindyck 1994, S. 218). Weiterhin ist bekannt, dass unter den gewählten Annahmen die Preisdynamik einem gestutzten geometrischen Brown'schen Prozess entspricht, wobei der Investitionstrigger und der Desinvestitionstrigger jeweils eine Reflecting Barrier dieses Prozesses darstellen. Dieses Set-Up ist konsistent zu demjenigen, für das das Modell entwickelt wurde. Der Vorteil der gewählten Vorgehensweise besteht darin, dass Kenntnis über das Vorliegen und die Höhe der Optionseffekte sowie über alle zu schätzenden Modellparameter besteht.

Kurz zusammengefasst ergibt sich folgender Ablauf für die Simulationsexperimente:

1. Exogene Vorgabe einer zeitveränderlichen Standardabweichung σ_t für einen Zeitraum von 100 Perioden und $\Delta t = 1$. Die Standardabweichung ist nicht notwendigerweise zu jedem Zeitpunkt unterschiedlich.
2. Ableitung von P_t^H und P_t^L unter Verwendung der Standardabweichungen. Dies erfolgt gemäß (11) bzw. entsprechend des in DIXIT und PINDYCK (1994 S. 218) angegebenen Gleichungssystems. Dabei wird $r = 6\%$ gesetzt.
3. Simulation von Preispfaden in diskreter Zeit gemäß (vgl. MÜBHOFF et al. 2003):

$$P_{t+1} = \left\{ \begin{array}{l} P_t \cdot e^{\left[\frac{\alpha - \sigma^2}{2} + \sigma_t \cdot \varepsilon_{t+1} \right]}, \text{ wenn } P_t \cdot e^\alpha < P_t^H \wedge P_t \cdot e^\alpha > P_t^L \\ P_t^H \cdot e^{\left[\frac{\sigma^2}{2} + \sigma_t \cdot \varepsilon_{t+1} \right]}, \text{ wenn } P_t \cdot e^\alpha \geq P_t^H \\ P_t^L \cdot e^{\left[\frac{-\sigma^2}{2} + \sigma_t \cdot \varepsilon_{t+1} \right]}, \text{ sonst} \end{array} \right. \quad (27)$$

ε beschreibt dabei eine standardnormalverteilte Zufallszahl. Zu dem Preis, der sich gemäß eines gestutzten geometrischen Brown'schen Prozesses entwickelt, werden ein normalverteilter Störterm v_t und ein halbnormalverteilter Störterm u_t entsprechend (24) addiert.

4. Durchführung der Maximum-Likelihood-Schätzung. Als Dateninput dienen (neben der Konstanten) die jeweils 100 Beobachtungswerte umfassenden Zeitreihen für die Preise (Regressand) und die Standardabweichung der Preise (Regressor). Mittels Genetischem Algorithmus (vgl. Mußhoff und Hirschauer 2003) wird die die Likelihood-Funktion (25) maximierende Kombination der Koeffizienten c , c^H , c^L , o^H , o^L , λ_1 , λ_2 , σ_v und σ_u bestimmt. Bei der Initialisierung und heuristischen Variation dieser Koeffizienten werden folgende Restriktionen eingehalten:

$$\lambda_1, \lambda_2 \geq 0, \lambda_1 + \lambda_2 \leq 1 \tag{28}$$

$$c^L \leq c \leq c^H$$

5. 200 malige Wiederholung der Schritte 3 und 4. Aus den resultierenden 200 Schätzwerten können anschließend Standardfehler und empirische t-Werte für die jeweiligen Koeffizienten bestimmt werden. Der kritische t-Wert beträgt bei 5 % Irrtumswahrscheinlichkeit 1.66. Durch den Vergleich der Signifikanztests mit den tatsächlichen Parameterwerten ist eine Validierung des Schätzmodells möglich.

Vorab soll das Schätzmodell einer Validierung unterzogen werden. Dabei geht es zunächst darum, die technische Umsetzung des Schätzverfahrens zu prüfen. Zu diesem Zweck werden Preisdaten nicht gemäß der Schritte 2. und 3. generiert, sondern unmittelbar so, wie von dem ökonometrischen Modell unterstellt. Das bedeutet, dass ausgehend von einer zeitveränderlichen Standardabweichung σ_t und einem linearen Zusammenhang zwischen der Standardabweichung und den Triggerpreisen c^H und c^L die Preisdynamik gemäß (24) berechnet wird. Zu c , c^H und c^L werden ein normalverteilter Störterm v_t und ein halbnormalverteilter Störterm u_t addiert. Mit vorgegebenen Wahrscheinlichkeiten λ_1 , λ_2 und $1 - \lambda_1 - \lambda_2$ gilt entweder c_t , c_t^H oder c_t^L . Die Schätzwerte für diese Daten sind in Tabelle 2 dargestellt. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- **Block 1:** Alle ausgewiesenen Koeffizienten sind mit 5 % Irrtumswahrscheinlichkeit signifikant verschieden von Null, da der empirische t-Wert in allen Fällen deutlich größer als der kritische t-Wert in Höhe von 1.66 ist. Weiterhin stimmen die geschätzten Werte für die Koeffizienten mit den vorgegebenen Werten nahezu überein.
- **Block 2:** Hier wurde unterstellt, dass das „Exit-Regime“ nicht vorliegt, d.h. dass auf dem betrachteten Markt keine Desinvestitionen möglich sind. Wie die Modellrechnungen verdeutlichen, werden die Koeffizienten c^L , o^L und λ_2 in diesem Fall auch nicht als signifikant ausgewiesen.

Tabelle 2: Modellvalidierung

		c	c^H	c^L	o^H	o^L	λ_1	λ_2	σ_v	σ_u
Block 1	Vorgabe	8.000	10.000	6.000	20.000	20.000	0.330	0.330	1.000	0.600
	Schätzung ^a	7.929	10.138	5.782	19.858	19.872	0.343	0.326	0.974	0.816
	t-Wert	15.105	14.447	7.202	3.296	3.532	5.296	4.704	5.277	1.658
Block 2	Vorgabe	8.000	10.000	0	20.000	0	0.500	0	1.000	0.600
	Schätzung ^a	7.859	9.949	6.258	17.775	11.243	0.566	0.124	1.037	0.881
	t-Wert	4.175	10.241	1.513	2.700	0.741	2.819	0.693	2.206	1.627

^a Mittelwert aus 200 Schätzungen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Schätzverfahren als valide betrachtet werden kann, wenn die Daten tatsächlich dem unterstellten Regime folgen. Offen bleibt die Fähigkeit des Switching-Regression-Modells, optionsbedingte Hysterese zu identifizieren, wenn das Investitionsverhalten und die Marktpreise nicht durch (24), sondern durch ein Realoptionsmodell (z.B. (27) in Verbindung mit (11)) determiniert wird.

4.3 Ergebnisse und Diskussion

Im Basisszenario wird unterstellt, dass die Standardabweichung über jeweils 50 Perioden konstant ist, d.h. zwei Bereiche jeweils konstanter Standardabweichung vorliegen. Die Änderung des (erwarteten) Preisrisikos könnte durch einen Strukturbruch begründet werden, z.B. die EU-Osterweiterung oder Änderungen in der Ausgestaltung der Agrarpolitik. Des Weiteren wurde davon ausgegangen, dass in dem betrachteten Markt keine Desinvestitionen möglich sind. Dies könnte bspw. für den Schweinemarkt plausibel sein. Die Driftrate des geometrischen Brownschen Prozesses ist über den gesamten Betrachtungszeitraum konstant und beträgt 5 %.

In weiteren Szenarien werden einzelne Annahmen des Basisszenarios modifiziert, um zu prüfen, ob das Modell auch in anderen Situationen in der Lage ist, vorhandene optionsbedingte Hysterese zu identifizieren. Die Modifikationen betreffen die Driftrate des geometrischen Brown'schen Prozesses α , die Anzahl der Bereiche konstanter Standardabweichung sowie die Anzahl der berücksichtigten Regime. Tabelle 3 liefert eine Systematisierung der untersuchten Szenarien.

Tabelle 3: Übersicht der Szenarien

	Driftrate des geometrischen Brownschen Prozesses α	Anzahl der Bereiche konstanter Standardabweichung	Anzahl der berücksichtigten Regime
Szenario 1	5 %	2	2 Regime (ohne Exit)
Szenario 2	5 %	20	2 Regime (ohne Exit)
Szenario 3	0 %	2	2 Regime (ohne Exit)
Szenario 4	5 %	2	3 Regime
Szenario 5	0 %	2	3 Regime

In Tabelle 4 sind die Modellergebnisse der Szenarien 1 bis 4 dargestellt.

Tabelle 4: Modellergebnisse

		c	c^H	c^L	o^H	o^L	λ_1	λ_2	σ_v	σ_u
Szenario 1	Vorgabe	– ^b	0.707	0	4.352	0	0.673	0	0.100	0.060
	Schätzung ^a	0.609	0.688	0	2.792	0	0.485	0	0.230	0.161
	t-Wert	1.979	2.411	0	2.214	0	1.931	0	2.856	0.613
Szenario 2	Vorgabe	– ^b	0.707	0	4.352	0	0.852	0	0.100	0.060
	Schätzung ^a	0.679	0.859	0	2.090	0	0.647	0	0.211	0.119
	t-Wert	2.663	4.293	0	1.683	0	2.472	0	3.200	0.683
Szenario 3	Vorgabe	– ^b	0.820	0	5.688	0	0.270	0	0.100	0.060
	Schätzung ^a	0.250	0.318	0	1.621	0	0.346	0	0.140	0.830
	t-Wert	0.920	0.931	0	1.031	0	1.579	0	1.337	1.874
Szenario 4	Vorgabe	– ^b	0.625	0.294	3.989	0.166	0.762	0.049	0.100	0.060
	Schätzung ^a	0.714	0.793	0.504	2.479	2.555	0.461	0.169	0.206	0.060
	t-Wert	2.842	3.716	1.589	2.508	0.910	1.651	0.669	3.987	0.409
Szenario 5	Vorgabe	– ^b	0.916	0.533	4.126	0.600	0.307	0.329	0.100	0.060
	Schätzung ^a	0.714	0.782	0.568	2.867	1.250	0.295	0.262	0.203	0.215
	t-Wert	2.245	2.019	2.020	1.407	0.957	1.097	0.749	2.958	0.747

^a Mittelwert aus 200 Schätzungen.

^b Implizit unterstellt, aber keine exakte Angabe möglich.

Die Modellergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- **Szenario 1:** Abgesehen von σ_u werden alle tatsächlich von Null verschiedenen Koeffizienten mit 5 % Irrtumswahrscheinlichkeit auch durch das Schätzmodell als signifikant von Null verschieden ausgewiesen, d.h. die empirischen t-Werte sind jeweils größer als der kritische t-Wert in Höhe von 1.66. Mit anderen Worten: Es liegt optionsbedingte Hysterese vor, und das Modell zeigt sie korrekt an. Die Tatsache, dass σ_u nicht als signifikant ausgewiesen wird, deutet darauf hin, dass es dem Schätzmodell offensichtlich nicht gelingt, die Variabilität in einer Preiszeitreihe in die genannten Komponenten zu zerlegen¹.
- **Szenario 2:** Im zweiten Szenario wird die Zahl der Zeitpunkte erhöht, für die eine unterschiedliche Preisvolatilität σ_p vorliegt. Dieses Szenario könnte bei Vorliegen von GARCH-Effekten relevant sein, allerdings wird es an dieser Stelle eher schätztechnisch motiviert. Es ist zu fragen, ob durch eine höhere Variabilität des Regressors bessere Schätzergebnisse zu erzielen sind. Interessanterweise ist dies aber zumindest für o^H nicht der Fall: o^H ist „gerade noch“ signifikant verschieden von Null. Ansonsten ähneln die Ergebnisse dem des vorangegangenen Szenarios.
- **Szenario 3:** Im dritten Szenario wird die Driftrate des stochastischen Prozesses von 5 auf 0 Prozent verringert. Es fällt auf, dass o^H nun nicht mehr signifikant ist, das Schätzmo-

¹ Es sei angemerkt, dass das Switching-Regression-Modell in der zunächst von Sexton et al. (1991) entwickelten Form auf ein nicht-stochastisches Marktmodell angewendet wurde, in der Varianzen nicht als exogene Variablen enthalten sind. Diese Erweiterung wurde erst von Richards und Patterson (1998) im Zuge der Erklärung von Realoptionseffekten vorgenommen.

dell also keine Optionseffekte mehr anzeigt, obwohl sie weiter vorhanden sind. Eine mögliche Erklärung liegt darin, dass infolge der Verringerung der Driftrate weniger Beobachtungswerte in das Preisregime 1 fallen. Bemerkenswert ist weiterhin, dass auch der traditionelle Investitionstrigger c^H unterschätzt wird. Dafür erscheint andererseits σ_u signifikant von Null verschieden.

- **Szenario 4:** Im vierten Szenario wird eine Situation simuliert, in der Optionseffekte sowohl bei Investitionen als auch bei Desinvestitionen auftreten, d.h. alle drei Preisregime von (24) kommen nun tatsächlich vor. Offensichtlich ist das Schätzmodell mit dieser komplexeren Situation „überfordert“. Weder o^L noch λ_2 sind signifikant von Null verschieden. Hysterese bei Desinvestitionsentscheidungen kann somit nicht nachgewiesen werden. Ein Erklärungsansatz besteht darin, dass nur sehr wenige Beobachtungswerte in das Regime 2 fallen.
- **Szenario 5:** Das letzte Szenario verdeutlicht, dass Hysterese bei Desinvestitionsentscheidungen auch bei einer Driftrate von 0 Prozent nicht nachgewiesen werden kann, obgleich nahezu 33 Prozent der Beobachtungswerte in das zweite Regime fallen. Hinzu kommt, dass infolge des Absenkens der Driftrate auch für das Regime 1 keine signifikanten Werte mehr geschätzt werden.

Insgesamt lassen die Simulationsrechnungen das Schätzmodell als zu konservativ erscheinen, denn in verschiedenen Situationen wird Hysterese nicht erkannt, obwohl sie in den simulierten Daten reflektiert wird. Allerdings ist davon auszugehen, dass auch Situationen existieren, in denen das Schätzmodell „Fehler zweiter Art“ begeht, also Optionseffekte anzeigt, die auf andere Ursachen zurückzuführen sind. Insbesondere lässt die Konstruktion des Schätzmodells keinen eindeutigen Rückschluss auf die Wirkungsweise der Erklärungsgröße „Varianz“ zu. Ein positiver Zusammenhang zwischen dem Investitionstrigger und der Varianz kann, wie in Abschnitt 2 gezeigt, ebenso auf Risikoaversion als auch auf Optionseffekte zurückzuführen sein, sofern das Investitionsprojekt ein systematisches Risiko aufweist. Angenommen, es liegt Risikoaversion vor, aber es existiert kein Wert des Wartens und damit kein Optionseffekt, dann würde das Modell dennoch einen linearen Zusammenhang zwischen der Höhe der Standardabweichung und dem investitionsauslösenden Preisniveau schätzen können.

Einen Ansatzpunkt, um zwischen options- und risikoaversionsbedingter Investitionszurückhaltung zu unterscheiden, bietet der Zusammenhang zwischen dem Desinvestitionstrigger und der Standardabweichung. Bei einer Desinvestitionsentscheidung wirken das Vorliegen von realen Optionen und Risikoaversion entgegengerichtet. Der Optionstheorie zufolge erhöht Unsicherheit die Desinvestitionszurückhaltung. Risikoaversion führt dagegen dazu, dass bereits oberhalb der traditionellen (deterministischen) Exit-Barrier desinvestiert wird, da die Investitionsrückflüsse unsicher und der Liquidationserlös sicher ist. Dies hat zur Folge, dass ein signifikant von Null verschiedenes o^L im Falle des Vorliegens von Risikoaversion ein negatives Vorzeichen aufweisen würde, während das Vorzeichen bei optionsbedingter Hysterese positiv wäre. Liegen beide Effekte gleichzeitig vor, werden sie sich zumindest teilweise

kompensieren, wodurch der statistische Nachweis erschwert wird. Sobald allerdings eine mit zunehmender Unsicherheit steigende Desinvestitionszurückhaltung festzustellen ist, kann auf das Vorliegen optionsbedingter Hysterese geschlossen werden. Es sollte jedoch in Erinnerung gebracht werden, dass sich eine simultane Schätzung von Entry- und Exit-Barrier mit diesem Modell als schwierig erwiesen hat.

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Der vorliegende Beitrag versucht, die Problematik des empirischen Nachweises von Optionseffekten im Zusammenhang mit Investitions- und Desinvestitionsentscheidungen zu erörtern. Zunächst wurden Erkenntnisse aufgeführt, die sich aus der neuen Investitionstheorie ableiten lassen und die prinzipiell Möglichkeiten für empirische Hypothesentests bieten. Dabei wurde zweierlei deutlich: erstens, lassen sich aufgrund der Vielzahl und der Komplexität der Modelle durch Variation der Prämissen unterschiedliche Aussagen über das optimale Investitionsverhalten ableiten. Man kann daher nicht die neue Investitionstheorie als solche, sondern nur spezifische Modelle auf ihren empirischen Aussagegehalt hin prüfen. Zweitens, lassen sich bereits aus traditionellen Investitionsmodellen investitionsaufschiebende Effekte ableiten. Realloptionsmodelle erfassen die simultane Wirkung von versunkenen Kosten, Unsicherheit und Verschiebbarkeit der (Des)Investitionsentscheidung. Die Zusammenführung der drei Aspekte hat eine Verstärkung der Effekte zur Folge; die Wirkungsrichtung ist aber dieselbe. Dieser Umstand erschwert eine Validierung von Realloptionsmodellen.

Im Anschluss an die Darstellung der theoretischen Grundlagen wurde ein kurzer Überblick über bereits existierende ökonometrische Modellansätze gegeben, um alternative Vorgehensweisen bei der Schätzung von Optionseffekten aufzuzeigen. Danach wurde ein spezielles Modell heraus gegriffen und näher untersucht. Der Grundgedanke des Modells zielt auf die Existenz von Preisen bzw. Renditen ab, deren Höhe im Widerspruch zu klassischen Gleichgewichtsbedingungen steht. Die durchgeführten Simulationsergebnisse haben deutlich gemacht, wie schwierig sich der Nachweis optionsbedingter Hysterese gestaltet. Selbst unter „Laborbedingungen“ mit fiktiven Daten gelingt der statistische Nachweis von Optionseffekten mit diesem Modell nur in wenigen Fällen. Unter Verwendung empirischer Daten dürfte das Ergebnis nicht besser ausfallen. Zum einen wurde hier die Standardabweichung vorgegeben und als Regressor fehlerfrei übernommen. Beim Rückgriff auf empirische Daten müsste die Standardabweichung erst geschätzt werden (z.B. als GARCH-Prozess). Dabei sind Schätzfehler unvermeidbar. Zum anderen sind in der Realität unter Umständen Modellannahmen verletzt, deren Gültigkeit in Simulationsexperimenten sichergestellt werden kann.

Eine Ursache für die eher unbefriedigenden Ergebnisse ist möglicherweise darin zu sehen, dass die Schätzgleichungen des ökonometrischen Modells nur in indirektem Zusammenhang zu dem zugrunde liegenden Realloptionsmodell stehen. Es handelt sich um ein Modell in „reduzierter Form“. Auf die grundsätzliche Problematik von Modellen in reduzierter Form im Zusammenhang mit Optimal-Stopping-Modellen hat bereits Provencher (1997) hingewiesen.

Er schlägt stattdessen in Anlehnung an Rust (1987) vor, die Parameter des strukturellen Modells direkt durch eine iterative Verknüpfung der Likelihood-Funktion mit dem zugrunde liegenden normativen Entscheidungsmodell zu schätzen. Inwieweit dieses Vorgehen auch im Kontext von Realoptionsmodellen Vorteile aufweist, bleibt weiteren Untersuchungen vorbehalten. Angesichts der vorliegenden Simulationsergebnisse mit einem Modell in reduzierter Form erscheint die Suche nach Alternativen erforderlich, auch wenn diese zu einer erhöhten Komplexität des Schätzmodells führen.

Literatur

- Abel, A. B. (1983): Optimal Investment under Uncertainty. *American Economic Review* 73: 228-233.
- Abel, A. B., Dixit, A. K., Eberly, J. C., Pindyck, R. S. (1996): Options, the Value of Capital, and Investment. *Quarterly Journal of Economics* 111: 753-777.
- Abel, A. B., Eberly, J., C. (1994): A Unified Model of Investment under Uncertainty. *American Economic Review* 84: 1369-1384.
- Boehm, H., Funke, M., Siegfried, N., A. (1999): Discovering the Link between Uncertainty and Investment – Microeconomic Evidence from Germany. Paper presented at the HWWA Workshop 1999, Hamburg.
- Bulan, L., Mayer, C., Somerville, C.T. (2002): Irreversible Investment, Real Options, and Competition: Evidence from Real Estate Development. Miemo.
- Caballero, R. J. (1997): Aggregate Investment. NBER Working Paper 6264, Cambridge.
- Caballero, R. J., Pindyck, R.S. (1996): Uncertainty, Investment, and Industry Evolution. *International Economic Review* 37: 641-662.
- Caballero, R. J., Engel, E. M. R. A., Haltiwanger, J. C. (1995): Plant-Level Adjustment and Aggregate Investment Dynamics. *Brookings Paper von Economic Activity* : 1-37.
- Caballero, R. J. (1991): On the Sign of the Investment-Uncertainty Relationship. *American Economic Review* 81: 279-288.
- Dixit, A. K. (1992): Investment and Hysteresis. *Journal of Economic Perspectives* 97: 107-132.
- Dixit, A. K., Pindyck, R. S. (1994): Investment under Uncertainty. Princeton.
- Hartman, R. (1976): Factor Demand with Output Price Uncertainty. *American Economic Review* 66: 675-682.
- Hurn, A. S., Wright, R. E. (1994): Geology or Economics? Testing Models of Irreversible Investments Using North Sea Oil Data. *The Economic Journal* 104: 363-371.
- Hüttel, S. (2003): Möglichkeiten und Grenzen des Nachweises optionsbedingter Hysterese mittels eines Switching-Regression-Modells. Diplomarbeit an der Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät, Humboldt-Universität zu Berlin.
- Laughton, D.G., Jacoby, H.D. (1995): The Effects of Reversion on Commodity Projects of Different Length. In: *Real Options in Capital Investments: Models, Strategies, and Applications*, L. Trigeorgis (ed.), Praeger Publisher, Westport, Connecticut, pp. 185 - 205.
- Leahy, J. V., Whited, T. M. (1996): The Effect of Uncertainty on Investment: Some Stylized Facts. *Journal of Money, Credit and Banking* 28: 64-83.
- Luh, Y. H., Stefanou, S. E. (1996): Estimating Dynamic Dual Models under Non-Static Expectations. *American Journal of Agricultural Economics* 78: 991-1003.
- Moel, A., Tufano, P. (2002): When are Real Options Exercised? An Empirical Study of Mine Closings. *Review of Financial Studies* 15: 33-64.
- Mußhoff, O., Hirschauer, N. (2003): MS-EXCEL-basierte Bewertung komplexer Optionen - Numerische Optionsbewertungsverfahren und Anwendungsmöglichkeiten der Optionspreistheorie auf Sachinvestitionen - (im Druck).
- Mußhoff, O., Hirschauer, N., Balmann, A., Odening, M. (2003): Is the Myopic Investor Right? Numerical Evidence for Systematic Overestimation of Investment Reluctance. Paper presented at the 7th Annual International Conference on Real Options: Theory Meets Practice, 09. - 12. Juli 2003 in Washington DC, USA.
- Odening, M., Mußhoff, O., Balmann, A. (2003): Investment Decisions in Hog Production - An Application of the Real Options Approach. *Agricultural Economics* (im Druck).
- Pietola, K. S., Myers, R. J. (2000): Investment under Uncertainty and Dynamic Adjustment in the Finnish Pork Industry. *American Journal of Agricultural Economics* 82: 956-967.

- Pinches, G. E.: Real Options: Developments and Applications. Quarterly Review of Economics and Finance 38 (Special Issue).
- Provencher, B. (1997): Structural versus Reduced-Form Estimation of Optimal Stopping Problems. American Journal of Agricultural Economics 79: 357-368.
- Quigg, L. (1993): Empirical Testing of Real Option-Pricing Models. Journal of Finance 48: 621-640.
- Richards, T. J., Green, G. (2000): Economic Hysteresis in Variety Selection: Why Grow no Wine before its Time? Paper presented at the XXIV IAAA Conference, Berlin.
- Richards, T. J., Patterson, P. M., (1998): Hysteresis and the Shortage of Agricultural Labor. American Journal of Agricultural Economics 80: 683-695.
- Roberts, K., Weitzman, M. (1981): Funding Criteria for Research, Development, and Exploration Projects. Econometrica 49: 1261-1288.
- Rust, J. (1987): Optimal Replacement of GMC Bus Engines: An Empirical Model of Harold Zurcher. Econometrica 55: 999-1033.
- Schwartz, E. S., Trigeorgis, L. (2001): Real Options and Investment under Uncertainty - Classical Readings and Recent Contributions. MIT Press, Cambridge.
- Sexton, R. J., Kling, C. L., Carman, H. F. (1991): Market Integration, Efficiency of Arbitrage and Imperfect Competition: Methodology and Application to U.S. Celery. American Journal of Agricultural Economics 73: 568-580.
- Turvey, C. (2002): Can Hysteresis and Real Options Explain the Farmland Valuation Puzzle? Working Paper 02/11. Department of Agricultural Economics and Business, University of Guelph, Ontario.
- Vande Kamp, P. R., Kaiser, H. (1999): Irreversibility in Advertising-Demand Response Functions: An Application to Milk. American Journal of Agricultural Economics 81: 385-396.

Die Autoren:

Martin Odening, Oliver Mußhoff und Silke Hüttel
 Fachgebiet Allgemeine Betriebslehre des Landbaus des
 Instituts für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaus der
 Humboldt-Universität zu Berlin
 Luisenstraße 56
 D - 10099 Berlin
 Tel. (49) - 30 - 2093 6487
 E-mail: m.odening@agrار.hu-berlin.de
<http://www.agrar.hu-berlin.de/wisola/fg/abl>