

Titel der Arbeit:
»Energie- und Infrastrukturinvestitionen
unter Unsicherheit –
Eine modelltheoretische Untersuchung von Realoptionen«

Schriftliche Promotionsleistung
zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor rerum politicarum

vorgelegt und angenommen
an der Fakultät für Wirtschaftswissenschaft
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Verfasser: Dipl.-Ing. Gordon Briest
Geburtsdatum und -ort: 25.06.1993, Magdeburg
Arbeit eingereicht am: 05.07.2022

Gutachter der schriftlichen Promotionsleistung:
Univ.-Prof. Dr. habil. Elmar Lukas
Univ.-Prof. Dr. habil. Sascha H. Mölls

Datum der Disputation: 19.04.2023

Inhaltsübersicht

Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	XI
Symbolverzeichnis	XIII
1 Einleitung	1
2 Ökonomische Grundlagen	9
3 Modelltheoretische Grundlagen	39
4 Infrastrukturprojekte mit unsicheren Einnahmen, Investitionsausgaben und Bauzeiten	61
5 Investition in Projekte mit operativer Flexibilität unter Mean-Reversion	99
6 Schlussbetrachtung	147
A Anhang zu Kapitel 3	151
B Anhang zu Kapitel 4	155
C Anhang zu Kapitel 5	163
Literaturverzeichnis	167

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	XI
Symbolverzeichnis	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Zielsetzung	4
1.2 Aufbau der Arbeit	6
2 Ökonomische Grundlagen	9
2.1 Allgemeine Grundlagen und Auszug aus der Investitionstheorie	9
2.1.1 Ökonomische Zielsetzung (des Unternehmens)	10
2.1.2 Das klassische Kapitalwertkalkül	14
2.2 Kurzeinführung Realoptionen	19
2.2.1 Realoptionsarten im Überblick	22
2.2.2 Die Aufschuboption - Ein erster Eindruck	24
2.2.3 Der Zusammenhang von Investitionsneigung und Unsicherheit .	32
2.2.4 Entwicklung des Realoptionsansatzes in der Praxis	34
3 Modelltheoretische Grundlagen	39
3.1 Stochastische Prozesse	40
3.1.1 Wiener-Prozess	40
3.1.2 Itô-Prozesse	42
3.1.2.1 Geometrisch Brownsche Bewegung	43

3.1.2.2	Ornstein-Uhlenbeck Prozess	44
3.1.3	Das Lemma von Itô	45
3.2	Dynamische Programmierung und Investitionsentscheidungen	46
3.2.1	Optimal Stopping	48
3.2.2	Die Aufschuboption - Das kanonische Realloptionsmodell	50
3.3	Betrachtung häufiger Annahmen in Realloptionsmodellen	55
4	Infrastrukturprojekte mit unsicheren Einnahmen, Investitionsausgaben und Bauzeiten	61
4.1	Empirische Befunde zu Infrastrukturprojekten	62
4.2	Modellansätze in der Realloptionsliteratur	65
4.2.1	Das Modell von McDonald & Siegel (1986)	71
4.2.2	Das Modell von Danielova & Sarkar (2011)	73
4.2.3	Das Modell von Sarkar & Zhang (2015)	75
4.2.4	Das Modell von Briest & Lukas (2018)	78
4.3	Modellbildung	79
4.4	Analyse der Entscheidungssituation	87
4.4.1	Einfluss unsicherer Realisationszeit	87
4.4.2	Einfluss unsicherer Einnahmen und Investitionsausgaben	90
4.4.3	Einfluss von Subventionen und Steuern	93
4.5	Abschließende Bemerkung	96
5	Investition in Projekte mit operativer Flexibilität unter Mean-Reversion	99
5.1	Bedeutung von Energieinfrastruktur	100
5.1.1	Kurzüberblick zu Strommärkten und Herausforderungen im Netzbetrieb	102
5.1.2	Flexibilitätsoptionen	106
5.2	Realloptionsliteratur im Bereich Energie	109
5.2.1	Konventionelle Kraftwerke	109
5.2.2	Erneuerbare Energien	112
5.2.3	Das Modell von Dixit & Pindyck (1994, Kapitel 6.2)	117
5.2.4	Das Modell von Briest et al. (2022)	119
5.2.5	Einordnung und Abgrenzung des Modells aus Abschnitt 5.3	122
5.3	Modellbildung	126
5.3.1	Projektwert mit operativer Flexibilität	129

5.3.2	Wert der Investitionsentscheidung	135
5.4	Numerische Analyse der Investitionsentscheidung	138
5.4.1	Einfluss der Preisunsicherheit	138
5.4.2	Einfluss des Mean-Reversion Level	140
5.4.3	Einfluss der Mean-Reversion Geschwindigkeit	142
5.4.4	Einfluss der Diskontrate	143
5.5	Abschließende Bemerkung	145
6	Schlussbetrachtung	147
A	Anhang zu Kapitel 3	151
A.1	Varianz des Wiener Inkrements	151
A.2	Korrelation zwischen Wiener Inkrementen	152
A.3	Erwartungswert der geometrisch Brownschen Bewegung	152
A.4	Erwartungswert Ornstein-Uhlenbeck Prozess	153
B	Anhang zu Kapitel 4	155
B.1	Stochastische Entwicklung der versunkenen Investitionsausgaben . . .	155
B.2	Entwicklung des Projektwerts	155
B.3	Entwicklung der partiellen Differentialgleichung für die Investitionsoption	156
B.4	Homogenität des Entscheidungsproblems	157
B.5	Entwicklung der erwarteten Realisationszeit	160
C	Anhang zu Kapitel 5	163
C.1	Anwendung von Itô's-Lemma für den Ornstein-Uhlenbeck Prozess . . .	163
C.2	Transformation zu inhomogener Weber-Gleichung	164
	Literaturverzeichnis	167

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1	Struktur der Dissertationsschrift.	8
Abbildung 2.1	Erweiterter Kapitalwert bzw. Realoptionswert.	21
Abbildung 2.2	Entscheidungssituation Aufschuboption.	29
Abbildung 3.1	Simulation stochastischer Prozesse.	42
Abbildung 4.1	Visualisierung des Modellaufbaus.	82
Abbildung 4.2	Optionswert und Payoff im Basisfall.	87
Abbildung 4.3	Einfluss erwartete Realisationszeit auf y^*	89
Abbildung 4.4	Einfluss der Unsicherheit über Investitionsausgaben σ_I	90
Abbildung 4.5	Einfluss der Driftrate der Investitionsausgaben α_I	92
Abbildung 4.6	Einfluss der Subvention s	95
Abbildung 5.1	Zieltrias der Energiewirtschaft.	101
Abbildung 5.2	Stündliche historische Spotpreise für Strom.	103
Abbildung 5.3	Einflussfaktoren Strompreis.	104
Abbildung 5.4	Projektwert mit und ohne operative Flexibilität.	135
Abbildung 5.5	Wert der Investitionsmöglichkeit und Projektwert mit operativer Flexibilität.	138
Abbildung 5.6	Einfluss von Unsicherheit σ , Mean-Reversion Geschwindigkeit η und Mean-Reversion Level \bar{x} auf den Investitionsschwellenwert x^*	139
Abbildung 5.7	Einfluss der Diskontrate r auf den Investitionsschwellenwert x^*	144
Abbildung B.1	Homogenität des Entscheidungsproblems.	158

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1	Förderung des Ausbaus von Wasserstoff.	3
Tabelle 2.1	Gängige Realloptionsarten.	24
Tabelle 2.2	Ausgangsparameter.	25
Tabelle 2.3	Zeitliche Entwicklung ausgewählter Methoden zur Investitionsplanung in der Praxis.	35
Tabelle 4.1	Empirische Studien zu Ausgaben- und Bauzeitüberschreitung für ausgewählte Infrastruktur.	64
Tabelle 4.2	Einordnung von Realloptionsliteratur in wirtschaftliche Infrastruktur.	68
Tabelle 4.3	Einordnung des Modells in verwandte Realloptionsliteratur.	70

Abkürzungsverzeichnis

Abb. Abbildung

CAPM Capital Asset Pricing Model

DCF Discounted Cash Flow

Dgl. Differentialgleichung

EEG Erneuerbare Energien Gesetz

FEI Financial Executives Institute

GAAP Generally Accepted Accounting Principles

GARCH Generalized Autoregressive Conditional Heteroscedasticity

GBM geometrisch Brownsche Bewegung

Gl. Gleichung

Gln. Gleichungen

HGB Handelsgesetzbuch

IFRS International Financial Reporting Standards

Mio. Millionen

Mrd. Milliarden

NPV Net Present Value

NYMEX New York Mercantile Exchange

OU Ornstein-Uhlenbeck

Tab. Tabelle

WACC Weighted Average Cost of Capital

Symbolverzeichnis

$a(x, t)$	Driftrate
A	Koeffizient
A_t	Auszahlung bzw. Cash-Outflow
B	Koeffizient
BW	Barwert
$b(x, t)$	Varianzrate
c	Operative Kosten
C	Konstante, Koeffizient
CF_t	Cash-Flow
$D_v(\cdot)$	Parabolische Zylinderfunktion
E_t	Einzahlung bzw. Cash-Inflow
EK	Eigenkapital
$f(\cdot)$	Transformiertes Bewertungsfunktional, inhomogene Weber-Gleichung
$F(\cdot)$	Wert der Investitionsmöglichkeit, Optionswert
FK	Fremdkapital
$g(\cdot)$	Transformiertes Bewertungsfunktional, Weber-Gleichung
$G(\cdot)$	Nettovorteil Staat
GK	Gesamtkapital

I	Investitionsausgaben
I^*	Optimaler Schwellenwert der Investitionsausgaben
\hat{I}	Initiale Investitionsausgaben
k	Kostenniveau
KW_0	Kapitalwert
L_t	Liquidationserlös
m	Markup
n	Anzahl, Menge
p, p', p^*	Eintrittswahrscheinlichkeit
P, P_H, P_L	Preise
r	Risikoneutrale bzw. risikolose Diskontiertrate
r_{FK}	Fremdkapitalkosten
r_m	Marktverzinsung
R	Erlöse
R^*	Optimaler Schwellenwert Erlöse
\bar{R}	Effektives Mean-Reversion Level der Erlöse
s	Subvention
t	Zeit, Zeitpunkt, Zeitindex
t_m	Erwartete Bauzeit
t'	Optimale Stoppzeit
T	Endzeitpunkt
$T(.)$	Steuereinnahmen Staat
u	Steuervariable, Steuerung, Integrand

$V(\cdot)$	Projektwert
V^*	Optimaler Projektschwellenwert
w	Operative Kosten
$w(\cdot)$	Weber-Gleichung
W_t	Wiener Prozess
x_t	Stochastische Erfolgsgröße
x^*	Optimaler Schwellenwert Erfolgsgröße
x_g	Staatlich adjustierter optimaler Schwellenwert Erfolgsgröße
x_{KW}	Schwellenwert Kapitalwertmethode
X	Transformierte Erfolgsgröße
\bar{x}	Mean-Reversion Level
\bar{X}	Mean-Reversion Level
y	Verhältnis aus Erfolgsgröße und Investitionsausgaben
y_g	Staatlich adjustiertes Verhältnis aus Erfolgsgröße und Investitionsausgaben
y^*	Optimaler Schwellenwert des Verhältnisses aus Erfolgsgröße und Investitionsausgaben
z	Transformierte Erfolgsgröße
z_c	Operativer Kostenschwellenwert Transformierte Erfolgsgröße
z^*	Optimaler Schwellenwert der transformierten Erfolgsgröße
α	Driftrate
β	CAPM Beta-Faktor
$\beta_{1,2}$	Nullstellen fundamentale quadratische Gleichung

$\Gamma(\cdot)$	Gamma-Funktion
Δ	Differenz, Änderung
ϵ_t	Standardnormalverteilte Zufallszahl
η	Geschwindigkeit der Mean-Reversion
θ	Anteil Investitionstranche an gesamten Investitionsausgaben
λ	Marktpreis des Risikos
ν	Verhältnis risikoneutrale Diskontrate und Mean-Reversion Geschwindigkeit
π	Profitstrom, Profit
ρ	Diskontiertrate, Korrelationskoeffizient
$\rho_{x,y}$	Korrelationskoeffizient zw. Größen x und y
σ	Volatilität bzw. Standardabweichung
$\sigma_{x,y}$	Kovarianz zw. Größen x und y
$\bar{\sigma}$	Transformierte Größe
τ	Steuersatz, Stoppzeit
τ^*	Optimale Stoppzeit
Φ	Portfolio aus Asset und Option
χ	Exponent Mean-Reversion Modelle
Ω	Abbruchwert bzw. innerer Wert
$\mathbb{C}ov$	Kovarianz
\mathbb{E}_x	Erwartungswert bedingt auf Zustand x
\mathbb{E}^P	Erwartungswert unter realem Maß P
\mathbb{E}^Q	Erwartungswert unter risikoneutralem Maß Q

\inf	Infimum
\max	Maximum
Var	Varianz
\mathcal{N}	Normalverteilung
\mathcal{Q}	Fundamentale quadratische Gleichung

1 Einleitung

Infrastruktur stellt das Fundament für die materielle und immaterielle Versorgung dar. Die Bedeutung von Infrastruktur wird dabei besonders deutlich, wenn ein kurzer Blick in die Weltgeschichte geworfen wird. Oft war die Infrastruktur das „Zünglein an der Waage“, wenn es darum ging, eine überlegene wirtschaftliche Position einzunehmen. Aus unzähligen Beispielen der Vergangenheit sollen hier zwei genannt sein: Nach Walter (2006, S. 119 ff.) hatte Antwerpen seinen Status als Weltmetropole im Spätmittelalter bis zur frühen Neuzeit nicht zuletzt seinen infrastrukturellen Vorteilen zu verdanken. So war Antwerpen ein wichtiger Knoten für die damals eingerichtete Ordinari-Post und damit integraler Bestandteil eines wirtschaftlich bedeutenden Kommunikationsnetzes, welches den Norden mit dem Mittelmeerraum verband. Auch seine Großraumlage im Brabanter Hinterland sowie seine moderne und liberale Einstellung zu Stapel-, Makler- und Zollrechten (seine „weiche“ Infrastruktur) ließen Antwerpen zum zentralen Begegnungsraum für bilateralen Handel auf der Nord-Süd und Ost-West Achse werden (Walter, 2006, S. 119 ff.). Ein ähnliches Bild zeichnet England in der Zeit des Merkantilismus. Sowohl an Land als auch auf dem Wasser war England nach Walter (2006, S. 156 ff.) im globalen Vergleich führend im Ausbau von Verkehrsinfrastruktur. So wurden 204 Konzessionen zwischen 1660 und 1749 erteilt, um Flüsse, Häfen sowie Chaussees auszubauen und so wurde zwischen 1750 und 1820 das schiffbare Wasserstraßennetz von 1.600 km auf 6.600 km mehr als vervierfacht. Nicht zuletzt war die Infrastruktur für Englands komparative Handelsvorteile und schließlich den Aufstieg zur Weltmacht ausschlaggebend (Walter, 2006, S. 157 ff.).

Heutige Entwicklungen zeigen ebenfalls die Bedeutung von Infrastruktur. So hat bspw. das durch China in 2013 vorgestellte „One Belt, One Road“-Projekt, welches im Allgemeinen einfach als „Neue Seidenstraße“ bezeichnet wird, Auswirkungen von globaler Tragweite. Das Projekt gliedert sich unter Beteiligung vieler verschiedener Akteure (Länder, Privatwirtschaft etc.) aus Afrika, Asien und Europa in eine Initiative zur

maritimen Seidenstraße (engl. Maritime Silk Road Initiative) und einen Seidenstraßen-Wirtschaftsgürtel (engl. Silk Road Economic Belt). Damit geht nicht nur der Bau von umfangreicher und kapitalintensiver physischer Infrastruktur, wie z. B. von Häfen, Straßen, Schienen und Pipelines einher, sondern auch die Entwicklung von „weicher“ Infrastruktur, wie (Frei-)Handels- und Investitionsabkommen (Blanchard & Flint, 2017). Die Neue Seidenstraße hat dabei enorme wirtschaftliche und geopolitische Auswirkungen auf die beteiligten und nicht unmittelbar beteiligten Akteure.

Auch auf nationaler Ebene zeigt sich die Bedeutung von Infrastruktur. Damit Deutschland seine Klimaziele, welche im Rahmen des Pariser Abkommens in 2015 von zuvor 2,0 °C auf ein Ziellevel von 1,5 °C weiter verschärft wurden, erreichen kann, wurde die nationale Wasserstoffstrategie ins Leben gerufen (BMWi, 2020). Hier soll insbesondere grüner Wasserstoff, der aus rein erneuerbaren Energien erzeugt wird, im Industrieland Deutschland zum Einsatz kommen.¹ Vor allem in Industrien, die nur schwer zu elektrifizieren sind bzw. elektrische Substitution zulassen, wie der Langstreckentransport auf Straßen, Wasserstraßen und Weltmeeren, sowie die Schwerindustrie, spielt grüner Wasserstoff eine Rolle. Ganz zu schweigen von der Bedeutung grünen Wasserstoffs als kohlenstofffreie Alternative zu seiner fossil erzeugten Variante für die Herstellung von Chemikalien und Kraftstoffen (van Renssen, 2020). Auch hier ist eine funktionierende (Wasserstoff-)Infrastruktur ausschlaggebend, damit sich neue Märkte und Geschäftsfelder entwickeln und Wettbewerbsvorteile am Technologiestandort Deutschland gesichert werden können. Die Bedeutung von Wasserstoff und der damit nötigen Infrastruktur wird dabei besonders aus der Summe in Höhe von 12,51 Mrd. € an nationaler Förderung ab 2016 aus Tab. 1.1 deutlich.

Aus den Ausführungen zuvor wird klar: Egal ob damals, gegenwärtig oder zukünftig, egal ob national oder global; Infrastruktur war, ist und wird überall stets integral für Wohlstand sein. Andernfalls, wie sonst hätte der menschliche Einfallsreichtum bzw. Innovationsdrang Basisinnovationen, ausgehend von der ersten bis zur fünften Industriellen Revolution, welche seit Beginn der 2000er-Jahre anläuft, hervorbringen können, wenn nicht der notwendige Nährboden in Form von Infrastruktur gegeben

¹van Renssen (2020) beschreibt auch die anderen „Farben“ des Wasserstoffs. Unter „grauem“ Wasserstoff wird jener verstanden, der aus Erdgas gewonnen und wo im Rahmen des Prozesses CO₂ freigesetzt wird. „Blauer“ Wasserstoff wird ebenfalls aus Erdgas hergestellt, jedoch wird das CO₂ im Rahmen des Carbon Capture and Storage aufgefangen und nicht freigesetzt. Zuletzt wird „türkiser“ Wasserstoff unterschieden, welcher aus der thermischen Spaltung von Erdgas entsteht. Der hier miterzeugte Kohlenstoff ist fest und gelangt somit nicht in die Atmosphäre.

Tabelle 1.1: Förderung für die nationale Wasserstoffstrategie in Deutschland (BMWi, 2020).

Periode	Programmbeschreibung	Mio. €
2006 - 2016	Nationales Innovationsprogramm H ₂ - und Brennstoffzellentechnologie	700
2016 - 2026	Nationales Innovationsprogramm H ₂ - und Brennstoffzellentechnologie	1.400
2020 - 2023	Anwendungsorientierte Grundlagenforschung zu grünem H ₂ im Energie- und Klimafonds	310
2020 - 2023	Anwendungsnahe Energieforschung zu H ₂ -Technologien	200
2020 - 2023	Technologie- und Innovationstransfer im Rahmen der „Reallabore der Energiewende“	600
2020 - 2023	Investitionen in Technologien und großtechnische Anlagen der Industrie mit H ₂ zur Dekarbonisierung von Verfahren im Nationalen Dekarbonisierungsprogramm	1.000
2020 - (2030?)	Zukunftspaket für Markthochlauf von H ₂ -Technologien in Deutschland	7.000
2020 - (2030?)	Zukunftspaket für internationale Partnerschaften	2.000
Ab 2016		Σ 12.510

gewesen wäre? Wie sonst wäre der Weg, ausgehend von der Nutzung der Dampftechnik in der Ersten, über die Wissenschaftsindustrien (Motor, Elektrotechnik, Chemie etc.) in der Zweiten, den Prozessinnovationen in der Dritten, der Kommunikationsrevolution in der Vierten, sowie den gentechnischen und biochemischen Innovationen in der zur Zeit Fünften Industriellen Revolution möglich gewesen (Walter, 2006, S. 181)?² Wie sonst konnte sich COVID-19 (engl. Coronavirus Disease 2019) weltweit so schnell ausbreiten und wie sonst konnte so zügig ein Impfstoff entwickelt und verteilt werden? Wie sonst kann das „Netzwerk aus Netzen“, das Internet, mit seinen über Tier-1 Internet Service Provider (ISP), Content-Provider, Internet Exchange Points, regionale ISP und Zugangs-ISP vernetzten Endsystemen funktionieren (Kurose & Ross, 2014, S. 52 ff.)? So wichtig Infrastruktur ist, so wichtig ist die vorgelagerte (Investitions-)Entscheidung überhaupt Infrastruktur zu realisieren. Unabhängig von der Größe der zu realisieren-

²Ein interessante Darstellung von „Global Shrinkage“ und der innovationsgetriebenen Annäherung der Menschheit an die Einsteinsche Geschwindigkeit, der Lichtgeschwindigkeit, im Zeitablauf ist in Walter (2006, S. 212, Abb. 32) zu finden. Die Welt schrumpft in der menschlichen Wahrnehmung durch Innovationen in Bezug auf Antriebe und Kommunikationstechnik mehr und mehr. Durch jene Innovationen wird das „[...] Gefühl räumlicher Nähe und Dichte im weltweiten Gefüge.“ Walter (2006, S. 211) vermittelt.

den Infrastruktur stellt sich dabei stets die Frage nach der richtigen, der optimalen Allokation von Kapitalressourcen. Dass eine solche Investitionsplanung hochkomplex ist, steht außer Frage, stellt doch die Investition in Infrastruktur stets eine Investition unter Unsicherheit dar. Jedoch hat der Einsatz von etablierten Methoden zur Investitionsplanung in der Praxis gezeigt, dass den daraus resultierenden Planungsergebnissen nur bedingt getraut werden darf. Kombiniert man „[...] the large cost overruns and benefit shortfalls with the fact that business cases, cost–benefit analyses, and social and environmental impact assessments are typically at the core of planning and decision making for megaprojects and we see that such analyses can generally not be trusted.³ For example, for rail projects, an average cost overrun of 44.7% combines with an average demand shortfall of 51.4%, and for roads, an average cost overrun of 20.4% combines with a 50-50 risk that demand is also incorrect by more than 20%.“ Flyvbjerg (2014, S. 10).⁴

Entsprechend offensichtlich liegt das Problem dabei im Unvermögen der verwendeten Methoden zur Investitionsplanung begründet, wesentlichen Eigenschaftsdimensionen von Infrastruktur gerecht zu werden. So kann stellvertretend für Infrastruktur aus Beiträgen in Kostka & Fiedler (2016b, z. B. App. 3.1 & App. 4.1) anhand der Elbphilharmonie Hamburg und des Flughafens Berlin Brandenburg entnommen werden, dass (durchaus üppige) zeitliche Handlungsspielräume in Bezug auf die Investitionsentscheidung gegeben sind. Ebenfalls ist davon auszugehen, dass die Investitionsausgaben größtenteils versunken bzw. irreversibel sind. Gepaart mit der Tatsache von (multiplen) Unsicherheiten in Bezug auf bewertungsrelevante Größen, wie z. B. der erwarteten Nachfrage oder den operativen Kosten, müssen entsprechend Bewertungsmethoden zum Einsatz kommen, die alle diese Eigenschaftsdimensionen berücksichtigen können.

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Wie aus den vorangegangenen Ausführungen deutlich wurde, ist Infrastruktur nicht nur essentiell sondern aus investitionsplanerischer Sicht auch hochkomplex. Aus-

³Mit Megaprojekten sind große Infrastrukturprojekte mit Investitionsausgaben von mehr als 1 Mrd. USD gemeint.

⁴Hierzu werden in Kapitel 4 detailliertere empirische Befunde herausgearbeitet. Diese zeichnen für alle Bereiche von wirtschaftlicher Infrastruktur durchweg ein ähnliches Bild.

schlaggebend sind die Eigenschaftsdimensionen von Infrastruktur, wie irreversible Investitionsausgaben, unsichere Erfolgsgrößen sowie Handlungsspielräume, wie z. B. in Bezug auf den Investitionszeitpunkt selbst oder aber was den Betrieb der Infrastruktur angeht. Häufige ökonomischen Fehlplanungen aus der Praxis im Bereich Infrastruktur indizieren dabei, dass herkömmlich eingesetzte Methoden zur Investitionsplanung, wie Business Cases, Kosten-Nutzen-Analysen sowie Sozial- und Umweltverträglichkeitsprüfungen allein regelmäßig ungenügend sind. Jedoch gibt es durchaus Bewertungsverfahren, die in der Lage sind, den aufgeführten Eigenschaftsdimensionen gerecht zu werden und auch Aspekte aus den genannten etablierten Methoden zu integrieren. Eines dieser Verfahren ist die Realoptionsmethode, die, gemessen an den in etwas mehr als drei Dekaden erfolgten Veröffentlichungen in der Fachliteratur, durchaus als vergleichsweise „junge“ Methodik zur Investitionsplanung eingeordnet werden kann. Sie kann zusätzlich bzw. ergänzend zu den etablierten Methoden Einsatz finden und helfen, Fehlplanungen zu reduzieren.

Den immanenten Eigenschaftsdimensionen von Infrastrukturinvestitionen geschuldet, sollen im Rahmen dieser Arbeit die Einsatzmöglichkeiten der Realoptionsmethodik aufgezeigt werden. Es wird sich dabei der Thematik möglichst auf einem gewissen Abstraktionslevel modelltheoretisch angenähert, um über die entwickelten Entscheidungsmodelle Entscheidungsunterstützung zu liefern und Investitionsverhalten zu untersuchen. Dies bietet den Vorteil, dass sich die entwickelten Modelle ebenfalls auf andere Probleme der Investitionsplanung übertragen und sich dabei auch problemlos für einen spezifischen Anwendungsfall im Bereich Infrastruktur konkretisieren und „zuschneiden“ lassen. Gleichzeitig soll die einschlägige Realoptionsliteratur, die ebenfalls deutlich auf die Eignung der Realoptionsmethode für infrastrukturelle Bewertungsfragen hinweist, in ihrer evolutorischen Linie verdichtet und erweitert werden. Hierbei soll nicht nur auf Modellansätze der Realoptionsliteratur für konkrete Infrastrukturinvestitionen rekurriert werden, sondern es sollen auch im Modellaufbau geeignete Modellansätze aus anderen Strängen der Realoptionsliteratur entlehnt und am Beispiel von Infrastrukturinvestitionen adoptiert werden.

Ziel der Arbeit ist, jeweils mit Fokus auf bestimmte Eigenschaftsdimensionen von Infrastruktur, zwei komplexe Investitionsentscheidungssituationen modelltheoretisch zu erfassen und zu untersuchen. Im ersten Modell sollen dazu die allgemeinen Eigenschaftsdimensionen, wie unsichere Investitionsausgaben während der Bauphase, unsichere Bauzeiten sowie unsicheren Einnahmen nach Fertigstellung eines Infra-

strukturprojekts erfasst werden. Auch sollen darüber hinaus die zeitliche Dispersion der Investitionsausgaben sowie subventionspolitische Stellschrauben des Staates in Form von Steuern und direkten Subventionen der Investitionsausgaben Berücksichtigung finden. Schließlich wird die Investitionsentscheidung in eine solche geartete Infrastruktur untersucht. Im zweiten Modell soll, motiviert durch Flexibilität im Betrieb energiewirtschaftlicher Infrastruktur, operative Projektflexibilität in die initiale Investitionsentscheidung integriert werden. Insbesondere soll dabei die Zustandsgröße direkt durch einen Ornstein-Uhlenbeck Prozess getrieben sein.

In Konsequenz sollen durch beide Modelle neue Erkenntnisse in Bezug auf das Investitionsverhalten abgeleitet und entsprechend Entscheidungsunterstützung sowohl allgemein als auch spezifisch im Fall von Infrastrukturinvestitionen geliefert werden. Die beiden im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Modelle sind in der Literatur bis dato nicht existent und sollen abschließend auch dazu dienen, die Realloptionsliteratur um Modelle mit den vorgestellten Eigenschaftskombinationen zu erweitern. Durch die entwickelten Modelle sollen insbesondere neue Anknüpfungspunkte für zukünftige Weiterentwicklungen erzeugt werden.

1.2 Aufbau der Arbeit

Im Hinblick auf die in Unterabschnitt 1.1 aufgestellten Ziele wurde die Arbeit modular aufgebaut. Jedes Kapitel kann dabei sowohl als in sich abgeschlossen betrachtet werden als auch die Summe aller Kapitel als „kohärentes Ganzes“. Dies bietet den Vorteil eine möglichst breite Leserschaft mit unterschiedlichen Graden an Vorwissen ansprechen zu können. Eine kurze strukturelle Übersicht der Arbeit ist in Abbildung 1.1 zu finden.

Zunächst wird im folgenden Kapitel 2 ein kurzer Auszug aus der Investitionstheorie vorgestellt, wobei insbesondere die Zielsetzung eines privatwirtschaftlichen Unternehmens und, damit verbunden, die sowohl akademisch als auch praktisch etablierte Kapitalwertmethode beschrieben wird. Die Letztere als bedeutende „Zutat“ auffassend, werden aufbauend erste formale Aspekte der Realloptionsmethode erörtert. Hierbei werden gängige Realloptionen klassifiziert sowie ein erster Eindruck der häufig anzutreffenden Aufschuboption mittels risikoneutraler Bepreisung im Binomialmodell gegeben. Anschließend adressiert eine empirische Untersuchung den Zusammenhang zwischen Investitionsneigung und Unsicherheit. Das Kapitel schließt mit einer Betrachtung der Entwick-

lung der praktischen Relevanz des Realloptionsansatzes.

Kapitel 3 gibt einen anwendungsorientierten Überblick zu den „Bausteinen“ von Realloptionsmodellen. Ausgangspunkt sind die stochastischen Prozesse, die als Zustandsgröße und damit unsichere Werttreiber der Realloptionsmodelle fungieren. Insbesondere wird auf die geometrisch Brownsche Bewegung sowie den Ornstein-Uhlenbeck Prozess eingegangen. Anschließend werden die dynamische Programmierung als Bewertungsverfahren eingeführt und das kanonische Realloptionsmodell vorgestellt, über welches der erste Eindruck aus Kapitel 2 modelltheoretisch fundiert wird. Zuletzt erfolgt eine kurze Betrachtung von Modellannahmen, welche häufig in Modellen der Realloptionsliteratur anzutreffen sind.

Nach Aufbau dieses Fundaments aus ökonomischer Theorie und mathematischen Werkzeugen erfolgt eine erste Anwendung der Realloptionsmethode in Bezug auf allgemeine Eigenschaftsdimensionen von Infrastruktur in Kapitel 4. Motiviert durch empirische Befunde werden die Eigenschaftsdimensionen in Form von unsicheren Einnahmen, unsicheren Investitionsausgaben sowie unsicheren Bauzeiten empirisch identifiziert. Nach anschließender Literaturrecherche erfolgt, erweitert um die Dimensionen der zeitlichen Dispersion von Investitionsausgaben sowie staatlichen Subventionen in Form von direkten Subventionen und Steuererleichterungen, die Bildung des Investitionsentscheidungsmodells. Zuletzt werden anhand einer numerischen Studie die Investitionsneigung untersucht sowie Handlungsempfehlungen für Investor und Staat abgeleitet.

Während in Kapitel 4 allgemeine Eigenschaften von Infrastruktur modelltheoretisch erfasst werden, fokussiert sich Kapitel 5 auf Realloptionsmodelle im Bereich von Energieinfrastruktur. Nach Herausstellen der Bedeutung von Energieinfrastruktur sowie einer Modellrecherche in der einschlägigen Realloptionsliteratur erfolgt die Modellbildung. Motiviert durch inhärente operative Flexibilität im Bereich von Energieinfrastruktur wird ein Entscheidungsmodell erarbeitet. Das Entscheidungsmodell erfasst dabei sowohl die operative Flexibilität im Projekt als auch die Flexibilität in der initialen Investitionsentscheidung. Wie zuvor in Kapitel 4 und konsistent mit der einschlägigen Realloptionsliteratur erfolgt eine numerische Analyse der Entscheidungssituation sowie die Untersuchung der Investitionsneigung. Zuletzt schließt die Arbeit mit einer Schlussbetrachtung in Kapitel 6.

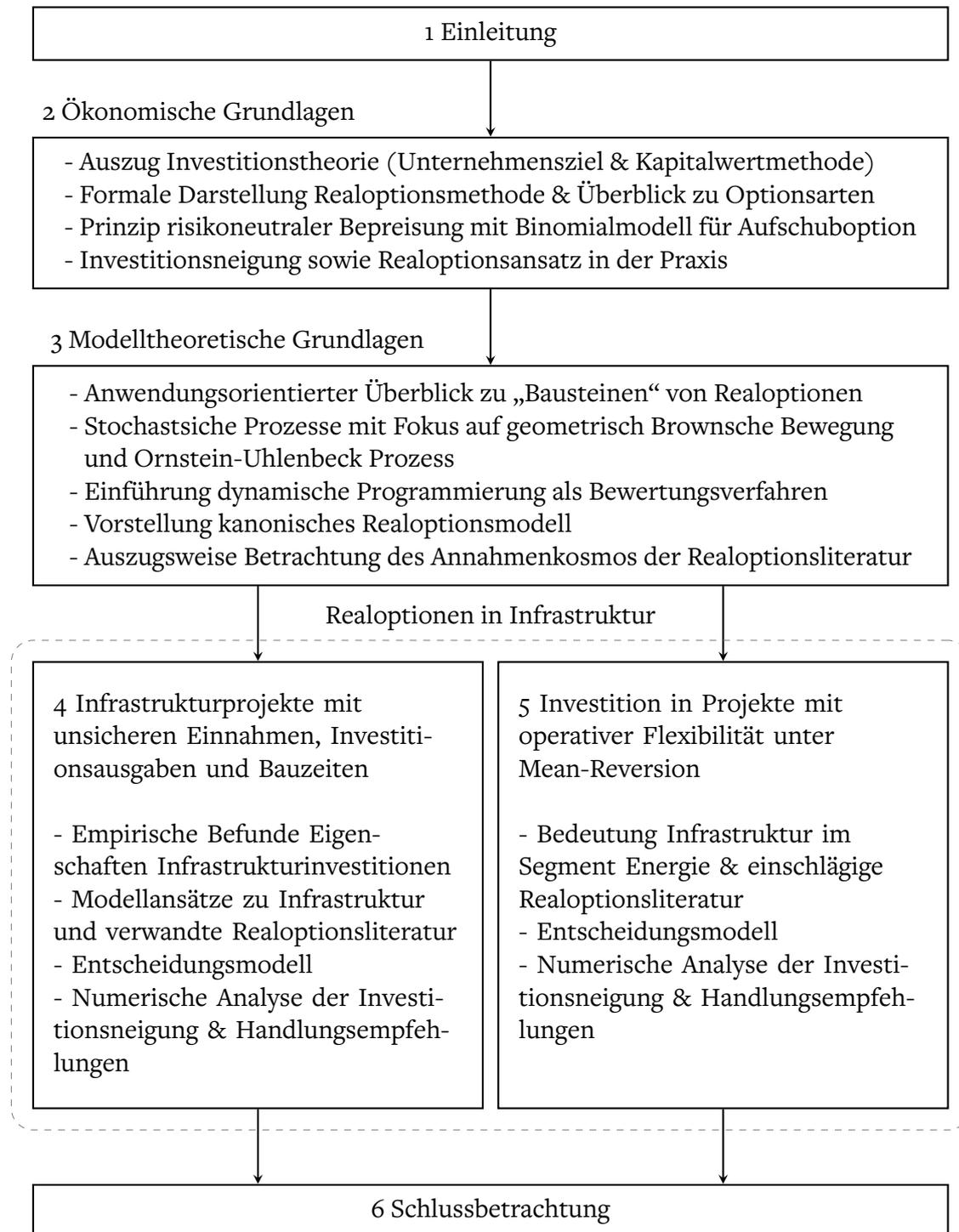


Abbildung 1.1: Struktur der Dissertationsschrift.

2 Ökonomische Grundlagen

Ziel dieses Kapitels besteht darin, die Grundlagen für die Realoptionsbewertung zu zeigen. Ein hoher Detailgrad wird dabei vermieden, um den Fokus auf den wesentlichen Konzepten zu behalten. Begonnen wird dazu in Abschnitt 2.1. Hier werden in stark reduzierter Form ausgewählte ökonomische Konzepte und Methoden, u. a. aus der Investitionstheorie, vorgestellt. Dazu erfolgt zunächst die Erarbeitung des Unternehmensziels eines privatwirtschaftlich organisierten Unternehmens. Dieses Ziel zu Grunde legend, wird anschließend auf eine bedeutende Bewertungsmethodik aus der Investitionsrechnung eingegangen: Die Kapitalwertmethode. Im Anschluss folgt in Abschnitt 2.2 eine knappe Einführung in die Realoptionslogik. Neben einem formalen Umriss der Realoptionmethode wird ein Überblick zu verschiedenen Optionsarten gegeben. Anschließend wird ein zentrales Bewertungsprinzip, die risikoneutrale Bewertung, am Beispiel der Aufschuboption erläutert. Zum Abschluss des Kapitels wird der Begriff der Investitionsneigung untersucht sowie ein Überblick zur praktischen Relevanz des Realoptionsansatzes gegeben.

2.1 Allgemeine Grundlagen und Auszug aus der Investitionstheorie

Neoklassische Bewertungsverfahren aus dem Bereich der Investitionstheorie bzw. Investitionsrechnung lassen sich grob in statische Verfahren, wie z. B. die Kosten-, Gewinn- und Rentabilitätsvergleichsrechnung sowie die Amortisationsrechnung, und dynamische Verfahren, wie die Kapitalwert-, Annuitäten- und interne Zinsfußmethode, einteilen (Wöhe & Döring, 2010, S. 531 ff.). Weiter umfasst die Investitionsrechnung z. B. auch die (klassischen) Investitionsentscheidungen unter Unsicherheit, sowie

Investitionsprogrammentscheidungen – Entscheidungen über die Allokation von verschiedenen Finanzierungsmitteln zu verschiedenen Investitionsmöglichkeiten – unter Sicherheit sowie unter Unsicherheit (Busse von Colbe et al., 2018, Kap. 5 - 7).

Während die Investitionsrechnung an sich einen umfangreichen „Methodenkasten“ für die Untersuchung vielschichtiger Investitionsentscheidungsprobleme bietet, soll sich nachfolgend lediglich auf einige allgemeine ökonomische Grundlagen sowie die Kapitalwertmethode fokussiert werden. Letztere fungiert durchaus als „Zutat“ für die Entwicklung der Realoptionsmethode. Dazu wird im nachfolgenden Unterabschnitt 2.1.1 die ökonomische Zielsetzung eines privatwirtschaftlichen Unternehmens entwickelt. Diese ist insofern von Bedeutung, als dass sie im Rahmen der im späteren Verlauf der Arbeit entwickelten Modelle implizit vorausgesetzt wird. Anschließend wird in Unterabschnitt 2.1.2 die klassische Kapitalwertmethode vorgestellt, die wiederum im Abschnitt 2.2 im Rahmen der Kurzeinführung zu Realoptionen Anwendung findet.

2.1.1 Ökonomische Zielsetzung (des Unternehmens)

Im allgemeinen Sprachgebrauch wird „ökonomisch“ oft mit Effizienz und Sparsamkeit assoziiert. So hat eine Ausdauersportlerin einen „ökonomischen Laufstil“, wenn sie die zur Fortbewegung notwendige Energie möglichst effizient einsetzt. Je nach Zielsetzung kann die Läuferin bspw. eine gewisse Pace mit minimalem Energieaufwand anstreben (Minimumprinzip) oder aber versuchen, „alles aus sich rauszuholen“ und mit ihrer gegebenen körperlichen Ausstattung die größtmögliche Pace zu laufen (Maximumprinzip).¹ Natürlich kann die Läuferin auch einfach bestrebt sein, das Verhältnis zwischen zurückgelegter Strecke und der eingesetzten Energie im Rahmen eines Trainingsintervalls zu optimieren (Optimumprinzip). Das hier beschriebene ökonomische Prinzip, das auch als Wirtschaftlichkeitsprinzip bezeichnet wird (Domschke & Scholl, 2008, S. 3), als optimales Verhältnis zwischen Ertrag (Output) und Aufwand (Input) lässt sich in praktisch allen Lebenslagen finden und ist in der traditionellen Betriebswirtschaftslehre

¹Die Pace beschreibt die Zeit pro gelaufenen Kilometer. Eine Pace von 4:00 min/km korrespondiert mit einer Geschwindigkeit von 15 km/h. 5 km würden damit in 20 min zurückgelegt.

von zentraler Bedeutung (Wöhe & Döring, 2010, S. 34).² Das ökonomische Prinzip leitet sich dabei aus dem Vernunft- bzw. Rationalitätsprinzip ab (Vahs & Schäfer-Kunz, 2007, S. 11 ff.) und soll nachfolgend als Basis dienen, von der aus die ökonomische Zielsetzung eines Unternehmens ergründet wird.³

Zunächst entfaltet das ökonomische Prinzip immer dann seine Relevanz, wenn knappe Ressourcen auf menschliche Bedürfnisse treffen. Da letztere praktisch unendlich groß sind (Kirchgässner, 2008, S. 11 Fußnote 4), entsteht aus dieser Diskrepanz ein Allokationsproblem, welchem wiederum durch zielgerichtetes, rationales, Handeln – ein Handeln im Einklang mit dem ökonomischen Prinzip – durch die Wirtschaftssubjekte begegnet wird. Das ökonomische Prinzip stellt damit eine Richtschnur dar,

²Das ökonomische Prinzip stellt die disziplinspezifische Perspektive dar, von der aus der Betrieb im Rahmen der Betriebswirtschaftslehre betrachtet wird, um Erkenntnisse über das Wirtschaften im Betrieb abzuleiten (Wöhe & Döring, 2010, S. 33). Dieser Blickwinkel wird im Rahmen der Betriebswirtschaftslehre als gegeben angenommen, wobei sein eigentlicher evolutorischer Ursprung unklar bleibt (siehe z. B. Diederich (1989, S. 79 ff.), Vahs & Schäfer-Kunz (2007, S. 11 ff.), Domschke & Scholl (2008, S. 3 ff.), Wöhe & Döring (2010, S. 33 ff.), Schierenbeck & Wöhle (2012, S. 5 ff.), Thommen & Achleitner (2009, S. 119 ff.) sowie Straub (2012, S. 36 ff.)). Zunächst lässt sich festhalten: Das ökonomische Prinzip ist nicht ausschließlich dem Menschen vorbehalten. Auch in der Tierwelt ist es eine unumgängliche Leitmaxime und wird in ökologischen Theorien entsprechender Forschungszweige zwar nicht als Bezeichnung, jedoch analog verwendet. So wird sich häufig auf die Optimalität des tierischen Entscheidungs- bzw. (Nahrungs-)Wahlverhaltens konzentriert; traditionell unter der Annahme, dass Tiere unter evolutionärem Druck ihre Energiezufuhr und Fortpflanzungschancen optimieren (Kalenscher & van Wingerden, 2011). Die Analogie zwischen Mensch und Tier ist hier offensichtlich: Inputs bzw. knappe Mittel (Produktionsfaktoren), wie z. B. Kapital, Arbeit und Rohstoffe – im Falle eines Tieres auf der Jagd die Energiereserven – sind so einzusetzen, dass die Differenz zum Output bzw. Erlös – Energiegehalt der Beute – möglichst groß wird (Reiß, 2007, S. 331). Vor diesem Hintergrund bekommt das ökonomische Prinzip vielmehr den Charakter eines universellen, evolutorischen Erbes, das erhalten geblieben ist. Das „tool-making animal“, der Mensch, wie ihn Benjamin Franklin (1706-1790) treffend beschrieb (Jockenhövel, 2010, S. 461), tritt in Teilen seines bewussten und unbewussten Verhaltens lediglich eben jenes Erbe an, sodass der Ursprung des ökonomischen Prinzips durchaus im Ursprung des Lebens selbst gesehen werden könnte.

³Das Rationalitätsprinzip beschreibt die Annahme, dass Menschen rational bzw. vernunftgetrieben, handeln, wenn sie sich zwischen ihnen zur Verfügung stehenden Alternativen entscheiden. Dabei ist es im Prinzip unerheblich, ob es sich um soziale, politische, juristische oder ökonomische Entscheidungssituationen handelt (Kirchgässner, 2008, S. 1 ff.).

an der sich das rationale Handeln der Wirtschaftssubjekte ausrichten kann.⁴ Wäre die so beschriebene Diskrepanz zwischen Ressourcen auf der einen und den menschlichen Bedürfnissen auf der anderen Seite nicht vorhanden, so würden hieraus kein Entscheidungsproblem über den bestmöglichen Einsatz von Ressourcen zur Bedürfnisbefriedigung entstehen, womit das ökonomische Prinzip redundant wäre.

Die Befriedigung der Bedürfnisse an sich findet durch Konsum statt, wobei dieser als Ziel der Produktion jene maßgebend treibt (Tuttle, 1901). Ultimativ begründet sind die so entstehenden wirtschaftlichen Prozesse durch „[...] the care of mankind for its own well-being, which, undistributed by the incursion of altruistic motives, is the ultimate motive-force of all economic action.“ (von Böhm-Bawerk & Leonard, 1891, S. 379). Aus dem Zusammenwirken von Konsum und Produktion resultiert ein ökonomisches System dessen Wirtschaftssubjekte die Rolle von Konsumenten und Produzenten einnehmen. Das Zusammenspiel der Wirtschaftssubjekte wird dabei im Rahmen von mikroökonomischer Konsum- und Produktionstheorie untersucht (Kirchgässner, 2008, S. 59 ff.). Während in Ersterer die Nutzenmaximierung als Ziel des Konsumenten angenommen wird, ergibt sich die Annahme der Gewinnmaximierung als Pendant für das Unternehmen in Zweiterer (Pindyck & Rubinfeld, 2015, S. 212 ff. & S. 387 ff.).

Sowohl die Nutzen- als auch die Gewinnmaximierung stehen dabei im Einklang mit dem oben aufgeführten ökonomischen Prinzip und implizieren rationales Verhalten im Sinne der Wahl der "Besten" unter möglichen Handlungsalternativen. So wählt ein Konsument, der mit einem knappen Budget konfrontiert ist, die Zusammensetzung seines Warenkorb in einer Weise aus, die seine Befriedigung maximiert. Ein Unternehmen entscheidet sich unter Einsatz seines beschränkten Investitionsbudgets für diejenige Investitionsalternative, die den meisten Wert stiftet. Die Verbindung zwischen beiden Zielen, und damit das rationale Verhalten von Konsumenten sowie von Produzenten bzw. Unternehmen, wird dabei deutlich, wenn das Konzept des Nutzens an eine Menge von monetären Gütern gekoppelt wird. So handelt ein Wirtschaftssubjekt rational,

⁴An dieser Stelle sei anzumerken, dass das ökonomische Prinzip sowie die Eigenschaft der Rationalität der Wirtschaftssubjekte stets Annahmen darstellen. So setzt die, z. B. im Rahmen der mikroökonomischen Produktionstheorie angenommene, Zielsetzung der (langfristigen) Gewinnmaximierung ebenfalls die Annahme über rationales Verhalten des Unternehmens bzw. des Managements sowie entsprechendes Verhalten im Einklang mit dem ökonomischen Prinzip voraus. Die Annahme der Gewinnmaximierung – sowie in Konsequenz ebenfalls die Annahme über Rationalität und das ökonomische Prinzip – ist jedoch nicht unumstritten. In Bezug auf die Gewinnmaximierung weisen jedoch Pindyck & Rubinfeld (2015, S. 387) darauf hin, dass "[...] damit das Verhalten der Unternehmen mit angemessener Genauigkeit vorhergesagt werden kann und unnötige analytische Komplikationen vermieden werden."

wenn es seinen Nutzen bzw. synonym die Menge an monetärem Gut maximiert (Welling, 2013, S. 10).

Ausgehend vom zuvor beschriebenen ökonomischen Prinzip und dem damit verbundenen rationalen Verhalten, lässt sich die Bedeutung der Gewinnmaximierung, insbesondere in der langen Frist, für das Unternehmen herausstellen. Sie wird als Verhaltensmaxime und damit als ökonomische Zielsetzung des Unternehmens angenommen und entfaltet damit Relevanz für die Investitionstheorie bzw. Investitionsrechnung sowie für die dort abgeleiteten Handlungsempfehlungen. Die Annahme der (langfristigen) Gewinnmaximierung als Leitmaxime von Unternehmen ist jedoch nicht unumstritten (Pindyck & Rubinfeld, 2015, S. 387). Auch andere Ziele, wie z. B. Imageverbesserung, Erhöhung des Umsatzes, Existenzsicherung, Liquidität, Zugewinn von Marktanteilen sowie soziale und ökologische Ziele, können verfolgt werden (Lorscheid, 1998, S. 17 ff.). Jedoch ist es unwahrscheinlich, dass privatwirtschaftliche Unternehmen, die nicht zumindest annähernd gewinnmaximierendes Verhalten anstreben, langfristig am Markt bestehen können, „[...] unabhängig davon, was ihre Führungskräfte darüber hinaus zu tun scheinen.“ (Pindyck & Rubinfeld, 2015, S. 388). Zudem ist das Gewinnstreben keine „Erfindung“ der Neuzeit. So ist das Gewinnstreben unter Kaufmännern schon bereits 1458 durch den Kaufmann Benedetto Cotruglie dokumentiert: „Mercatura, or trade, is an art, or rather a discipline, practised between qualified persons, governed by the law and concerned with all things marketable, for the maintenance of the human race, but also in the hope of financial gain.“ (Cotrugli, 2017, S. 31).

Basierend auf der (anscheinend) langen Historie des Gewinnstrebens sowie durch wettbewerbliche Argumente lässt sich festhalten: Das Ziel der Gewinnmaximierung stellt die bedeutendste Zielsetzung eines (privatwirtschaftlichen) Unternehmens dar (Reiß, 2007, S. 331; Pindyck & Rubinfeld, 2015, S. 387 ff.). Vor diesem Hintergrund wird in nachfolgenden Betrachtungen jene Zielsetzung stets impliziert, wenn das Verhalten von bzw. Entscheidungsregeln für Unternehmen abgeleitet werden.

Die Zielsetzung der langfristigen Gewinnmaximierung ist dabei synonym zum Ziel der Kapitalwertmaximierung im Rahmen der Kapitalwertmethode (Busse von Colbe et al., 2018, S. 64 ff.). Letztere ist Gegenstand des nachfolgenden Unterabschnitts 2.1.2. Die Kapitalwertmethode an sich ist dabei ein bedeutendes Kalkül der Investitionsrechnung, denn „Zur Maximierung des Wertes des gesamten Unternehmens sollten Manager Entscheidungen treffen, die den Kapitalwert maximieren.“ Berk & DeMarzo (2016, S. 95). So lässt sich bspw. als Entscheidungsregel unter sich gegenseitig ausschließenden

Investitionsprojekten die Wahl desjenigen ableiten, welches den höchsten Kapitalwert – Prinzip der Kapitalwertmaximierung – aufweist.

2.1.2 Das klassische Kapitalwertkalkül

Das klassische Kapitalwertkalkül bzw. die Kapitalwertmethode, die auch synonym zur angelsächsischen Discounted Cashflow Method (DCF) oder der deutschen Ertragswertmethode verstanden werden kann, hat sich als Bewertungskalkül etabliert (Lorson et al., 2014). Ihre Bedeutung wird schon allein dadurch deutlich, dass sie als Methode im Rahmen von Rechnungslegungsstandards, wie nach HGB, US-GAAP oder IFRS, implizit und explizit zu finden ist und somit im Ergebnis wertmäßigen Einfluss auf Bilanzpositionen hat. So beschreibt bspw. § 255 Abs. 4 Satz 2 HGB: „Soweit kein aktiver Markt besteht, anhand dessen sich der Marktpreis ermitteln lässt, ist der beizulegende Zeitwert mit Hilfe allgemein anerkannter Bewertungsmethoden zu bestimmen.“ Eine solche anerkannte Bewertungsmethode zur Ermittlung des beizulegenden Zeitwerts, welcher auch als Stichtagszeitwert oder Fair Value bezeichnet wird, ist dabei die Kapitalwertmethode (Gleich et al., 2008).

Aufgrund der Berücksichtigung des Zeitwerts des Geldes zählt das Kapitalwertkalkül zu den Verfahren der dynamischen Investitionsrechnung.⁵ Es kann neben der Bewertung auch als Mittel zur Entscheidungsfindung dienen. Es sollte vor dem Hintergrund des ökonomischen Prinzips, insbesondere für die Bewertung der Vorteilhaftigkeit von Investitionsentscheidungen, eingesetzt werden, wenn der Entscheider, wie z. B. ein Manager, den Wert des Unternehmens maximieren möchte (Berk & DeMarzo, 2016, S. 220).

Bevor genauer auf das Kalkül eingegangen wird, ist es zunächst sinnvoll, einige Begriffe im (deutschen) betriebswirtschaftlichen Sprachgebrauch abzugrenzen. Im wesentlichen werden die vier Begriffspaare Einzahlungen/Auszahlungen, Einnahmen/Ausgaben, Erträge/Aufwendungen sowie Erlöse/Kosten unterschieden (Wöhe & Döring, 2010, S. 695 ff.). Während die letzten beiden Begriffspaare eindeutig mit jeweils dem Jahresabschluss und der innerbetrieblichen Produktions- und Absatzplanung assoziiert werden,

⁵Die Klassifikation als „dynamisch“ kann durchaus irreführend sein. Sie bezieht sich lediglich auf die Tatsache, dass die dynamischen Verfahren zur Investitionsrechnung, im direkten Vergleich zu den statischen Verfahren, den Zeitwert des Geldes berücksichtigen. Demnach ist „dynamisch“ hier nicht gleichbedeutend mit „Aktivität des Entscheiders“.

findet häufig keine Unterscheidung der ersten beiden Begriffspaare statt (Zantow et al., 2016, S. 23). Streng genommen sind Ein- und Auszahlungen, welche die Veränderung von Geldmitteln und damit tatsächliche Mittelzuflüsse und Mittelabflüsse darstellen, eine Teilmenge der Einnahmen und Ausgaben.⁶ Letztere umfassen zusätzlich zu den Zahlungsströmen auch die Veränderungen in Forderungen und Verbindlichkeiten (Wöhe & Döring, 2010, S. 697). Da jedoch diese scharfe Abgrenzung in der Praxis generell sowie in der Theorie häufig durch Abstraktion von Kreditvorgängen unterlassen wird (Zantow et al., 2016, S. 23), wird in den nachfolgenden Abschnitten und Kapiteln an einigen Stellen ebenfalls keine scharfe Trennung erfolgen.⁷ Beide Begriffspaare werden jeweils als finanzwirtschaftliche Stromgrößen im Sinne von Mittelzuflüssen und Mittelabflüssen bzw. Cashflows aufgefasst. Gleiches soll auch für die letzten beiden Begriffspaare gelten, da insbesondere in der einschlägigen, englischsprachigen (Realoptions-)Literatur keine eindeutige Übersetzung möglich ist bzw. die Modelle teilweise betriebswirtschaftliche Größen modellieren, die keinen reinen „Cashflow-Charakter“ aufweisen.⁸ Nach erfolgter Begriffseinordnung kann das Prinzip des Kapitalwertkalküls ergründet werden. Dies soll sowohl zeitdiskret als auch zeitstetig erfolgen. Bevor mit der zeitdiskreten Kapitalwertmethode begonnen wird, kann der Kern der Methode – der Zeitwert des Geldes – festgehalten werden. Dieses zentrale Prinzip ist analog zu einer physikalischen Einheitenbetrachtung. Wird bspw. die Investition in ein Projekt betrachtet, welches im Zeitablauf Cashflows generiert, so haben diese augenscheinlich zunächst dieselbe Währungseinheit, wie z. B. den €. Jedoch wäre ein direkter Vergleich der Cashflows fatal. Cashflows entfalten Ertragskraft sowie unterschiedlichen Konsumnutzen als auch unterschiedliche Kaufkraft zu verschiedenen Zeitpunkten (Park & Sharp-Bette, 1990, S. 39), sodass die zeitliche Komponente nicht vernachlässigbar ist. Demnach muss bei Cashflows in einer zukünftigen Periode t der Zeitpunkt Teil der Einheit sein, z. B. „€ in t “. Entsprechend muss, bevor ein Vergleich zwischen zeitlich verschobenen Cashflows erfolgen kann, jeder Cashflow auf die selbe Einheit umgerechnet werden. Der Bezugszeitpunkt ist dabei beliebig wählbar, jedoch wird häufig die Gegenwart oder der Endzeit-

⁶Für Ein- und Auszahlungen wird häufig auch einfach aus dem Englischen der Begriff des Cashflow verwendet, wobei negative Cashflows Aus- und positive Cashflows Einzahlungen darstellen.

⁷Es sei festzuhalten, dass in der englischsprachigen Realoptionsliteratur, die in späteren Kapiteln systematisiert wird, im Grunde alle Begriffspaare verwendet werden. Eine Trennung der Begriffspaare findet nicht statt.

⁸Abhängig von der Zielsetzung der betrachteten Studie ist dies als unproblematisch einzustufen. Die gefundenen allgemeinen Effekte in der einschlägigen Realoptionsliteratur würden sich qualitativ bei einer detaillierten (korrekten) Betrachtung auf Cashflow-Ebene in der Regel nicht ändern.

punkt als Bezugspunkt verwendet.⁹

Für die Umrechnung kommt der Kalkulationszins ρ zum Einsatz. In einer zeitdiskreten Betrachtung kann damit über den Aufzinsungsfaktor $(1 + \rho)^t$ bspw. ein gegenwärtiger Cashflow in die Zukunft auf- und ein Cashflow in t mit dem Abzinsungsfaktor $1/(1 + \rho)^t$ in die Gegenwart abgezinst werden (Berk & DeMarzo, 2016, S. 114 ff.).¹⁰ Sowohl der Aufzinsungs- als auch der Abzinsungsfaktor lassen sich dabei als intertemporale Wechselkurse interpretieren. Ausgehend von einem gegenwärtigen Cashflow ist $(1 + \rho)^t$ damit nichts anderes als bspw. „ x € in t pro 1 € heute“. Ebenfalls ist die Interpretation als Preis und damit als Opportunitätskosten möglich. Wäre z. B. eine Investition nötig, um überhaupt Zugang zum Projektcashflow zu bekommen, so ließen sich die Investitionsausgaben alternativ mit $(1 + \rho)^t$ aufzinsen. Das gleiche Prinzip greift ebenfalls für später erwirtschaftete Cashflows. Wird das aktive Projekt der verzinsten Kapitalanlage vorgezogen, so sind die Opportunitätskosten durch Auf- und Abzinsungsfaktor gegeben und damit durch den Zins ρ in der Betrachtung enthalten. Operationalisiert über verschiedene diskrete Zeitpunkte ergeben diese Überlegungen den Kapital- bzw. Barwert BW

$$BW = \sum_{t=0}^T \frac{E_t - A_t}{(1 + \rho)^t} + \frac{L_T}{(1 + \rho)^T}. \quad (2.1)$$

Hierbei beschreibt $E_t - A_t$ den Saldo aus Ein- und Auszahlungen, T gibt den Endzeitpunkt an und L_T ist der Liquidationserlös. Wird nicht explizit zwischen Ein- und Auszahlungen unterschieden, lässt sich der Zahlungssaldo einfach als Cashflow $CF_t = E_t - A_t$ bezeichnen, wobei $CF_t \stackrel{\leq}{\geq} 0$. Entsprechend kann für eine Normalinvestition, bei der zu Beginn Investitionsausgaben $I = A_0$ anfallen und keine Einzahlung $E_0 = 0$ vorhanden sind, auch

$$\begin{aligned} KW_0 &= -I + \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1 + \rho)^t} + \frac{L_T}{(1 + \rho)^T} \\ &= -I + V \end{aligned} \quad (2.2)$$

als Nettokapitalwert formuliert werden (Blohm et al., 2012, S. 47 ff.). Nach Gl. 2.2 müssen aus Sicht eines Investors demnach Investitionsausgaben I aufgewendet werden, um im Gegenzug ein Projekt V zu erhalten, welches Cashflows CF_t generiert und sich ggf.

⁹Werden Cashflows in die Gegenwart diskontiert, wird vom Barwert gesprochen. Der Wert ist damit äquivalent zum Bargeld zu verstehen. Im Falle des Endzeitpunkts als Bezugspunkt, wird der Begriff des Endwerts verwendet.

¹⁰Der Einfachheit halber wird hier eine konstante Verzinsung ρ angenommen. Die gleichen Überlegungen lassen sich ebenfalls für ein Zinsstruktur ρ_t durchführen.

in T zum Wert L_T liquidieren lässt. Die Investition in ein solches Projekt V ist daher immer dann sinnvoll, wenn $V > I$ und somit $KW_0 > 0$. Damit lässt sich sofort die Entscheidungsregel eines Investors ableiten: Es sollte in alle Projekte investiert werden, die $KW_0 > 0$ aufweisen. Sollten sich die Investitionsprojekte gegenseitig ausschließen, ist entsprechend jenes zu wählen, dessen $KW_0 > 0$ maximal ist (Berk & DeMarzo, 2016, S. 229 ff.).

Während die vorhergehenden Überlegungen für Cashflows entwickelt worden sind, die zu diskreten Zeitpunkten anfallen, können äquivalente Überlegungen zeitstetig erfolgen. Zunächst muss dafür die diskrete Diskontrate ρ in eine stetige Diskontrate umgerechnet werden, sodass sich die zeitstetige Verzinsung $\rho' = \ln(1 + \rho)$ ergibt. Anschließend muss der Cashflow nicht zeitpunktbezogen sondern als kontinuierlicher Strom betrachtet werden. Für die Normalinvestition mit $L_T = 0$ lässt sich so

$$\begin{aligned} KW_0 &= -I + \int_0^T CF_t e^{-\rho' t} dt \\ &= -I + V \end{aligned} \tag{2.3}$$

festhalten (Park & Sharp-Bette, 1990, S. 59 ff.). Im nachfolgenden Kapitel wird insbesondere die zeitstetige Variante angewendet, da diese sich aus modelltheoretischer Perspektive im Rahmen dieser Arbeit besser eignet, um Investitionsentscheidungssituationen abzubilden. Ebenfalls findet keine explizite Umrechnung zwischen zeitstetiger und zeitdiskreter Verzinsung statt. Vielmehr wird am jeweils behandelten Beispiel von sich aus deutlich, ob die Verzinsung als diskret oder zeitstetig angenommen wird.

Nachdem die Grundzüge der Kapitalwertmethode verdeutlicht wurden, soll zuletzt auf den Aspekt der Unsicherheit in Form von Risiko eingegangen werden. Diesem Umstand muss Rechnung getragen werden, da die aus einer Projektinvestition erwarteten Cashflows häufig mit Risiko behaftet sind. Der Begriff des Risikos ist dabei mit Eintrittswahrscheinlichkeiten verbunden, die sich sowohl subjektiv als auch objektiv bestimmen lassen (Bieg et al., 2015, S. 186).

Während unter Sicherheit entsprechend mit einem risikolosen Kalkulationszins $\rho = r$ gearbeitet wird, ist bei risikobehafteten Cashflows das Risiko über einen risikoadjustierten Kalkulationszins berücksichtigt. Unter der Annahme, dass Risiken besser vermieden werden, erfolgt die Berücksichtigung des Risikos über einen Aufschlag der risikolosen Verzinsungen um eine Risikoprämie (Pindyck & Rubinfeld, 2015, S. 769 ff.). Entsprechend erwartet ein Investor eine Kompensation für die Übernahme von Risiken. Ein

etabliertes Modell, welches in diesem Zusammenhang häufig Anwendung findet, ist das Capital Asset Pricing Modell (CAPM)

$$\rho = r + \beta(r_m - r). \quad (2.4)$$

Hierbei ist r_m die erwartete Rendite bei Allokation von Kapital am Kapitalmarkt im Marktportfolio. Der Betafaktor $\beta = \rho_{i,m}\sigma_i/\sigma_m = \sigma_{i,m}/\sigma_m^2$ stellt das Risikomaß dar, das basierend auf den Renditevolatilitäten eines Assets σ_i und des Marktportfolios σ_m sowie Maßen für die statistische Abhängigkeit zwischen Asset und Marktportfolio, wie Korrelation $\rho_{i,m}$ und Kovarianz $\sigma_{i,m}$, ermittelt werden kann (Berk & DeMarzo, 2016, S. 389 ff.). Die Interpretation des Betafaktors wird dabei aus Gl. 2.4 deutlich. So beschreibt β die Sensitivität des Kalkulationszinses, der erwarteten Rendite, ρ bei einer Veränderung der Überrendite bzw. Markttrisikoprämie $r_m - r$.¹¹

Um den so ermittelten risikoadjustierten Kalkulationszins ρ nun in Gln. 2.2 und 2.3 zur Barwertermittlung risikobehafteter Projektcashflows einsetzen zu können, sind zwei Voraussetzungen zu erfüllen: Zunächst wird ein marktgehandeltes Unternehmen bzw. eine "Peer Group" von marktgehandelten Unternehmen benötigt, um das durch die unsicheren Cashflows erzeugte Risiko des zu bewertenden Projekts zu emulieren (Hull, 2015, S. 964). Entsprechend ist eine Alternative zum Projekt nötig, die das gleiche Risiko wie das Projekt aufweist und über Marktdaten einen Schluss auf den Preis für äquivalent risikobehaftetes Kapital und damit die Kapitalkosten zulässt. Die zweite Voraussetzung bezieht sich auf die Kapitalstruktur. Da ρ aus Gl. 2.4 auf Basis von marktgehandeltem Eigenkapital, wie z. B. Aktien, basiert, impliziert die Diskontierung mit ρ , dass auch das Projekt aus Eigenmitteln finanziert ist. Sollte dies nicht der Fall sein, kann ρ im Sinne der gewichteten durchschnittlichen Kapitalkosten (engl. Weighted Average Cost of Capital (WACC)) bestimmt werden (Park & Sharp-Bette, 1990, S. 181). Dabei fungiert der über das CAPM ermittelte Kapitalkostensatz als Komponente der WACC, die sich

¹¹ $\partial\rho/\partial r_m = \beta$ ist damit nichts anderes als die Veränderung von ρ in x % bei Änderung der Rendite des Marktportfolios um 1 %. Ebenfalls lässt sich der Marktpreis des Risikos λ über

$$\lambda \equiv \frac{\rho - r}{\sigma_i} = \frac{\rho_{i,m}}{\sigma_m} (r_m - r)$$

ableiten. Der Marktpreis des Risikos kann bspw. im Rahmen der risikoneutralen Bewertung eingesetzt werden (Hull, 2015, S. 964 ff.). So können stochastische Prozesse unter Berücksichtigung von λ , z. B. im Falle der geometrisch Brownschen Bewegung durch Korrektur der Driftrate um λ , in die risikoneutrale "Welt" überführt werden. Auf letztere wird u. a. im nachfolgenden Unterabschnitt 2.2.2 formal eingegangen.

über

$$\rho_{wacc} = \frac{EK}{GK}\rho + \frac{FK}{GK}(1 - \tau)r_{FK} \quad (2.5)$$

bestimmen lassen (Bieg et al., 2015, S. 298 ff.). Hierbei ist EK/GK der vorzugsweise zu Marktpreisen bewerte Eigenkapitalanteil, der als Verhältnis von Eigen- zu Gesamtkapital ermittelt wird. FK/GK beschreibt entsprechend den verbleibenden (marktbewerteten) Fremdkapitalanteil. τ ist der unternehmensspezifische Steuersatz und r_{FK} sind die Fremdkapitalkosten, die z. B. basierend auf emittierten Anleihen oder anderen Verbindlichkeiten, wie Krediten, bestimmt wurden. Entsprechend kann die risikobehaftete Projektbewertung bei Beteiligung von Fremdkapital in der Finanzierung mit einem Kalkulationszins nach Gl. 2.5 erfolgen (Berk & DeMarzo, 2016, S. 628 ff.).

Basierend auf den zuvor beschriebenen Grundlagen, erfolgt im nachfolgenden Abschnitt 2.2 eine Kurzeinführung in die Realloptionsmethode. Unter anderem wird hier auch die Bedeutung der Kapitalwertmethode als essentieller Teil der Realloptionsmethode herausgearbeitet.

2.2 Kurzeinführung Realloptionen

Angenommen, die Geschäftsführerin einer Firma für erneuerbare Energien steht vor der Entscheidung 1.000.000 € für eine neue Biogasanlage auszugeben. Sie denkt an ihre Studienzeit und erinnert sich an die Kapitalwertmethode, die für diese Art von Entscheidungsproblem ein geeignetes Mittel zur Entscheidungsunterstützung darstellt (Wöhe & Döring, 2010, S. 541). Ganz wie sie es gelernt hat, beginnt sie damit, die jährlichen Einzahlungen der Anlage für zukünftig verkauften Strom zu schätzen. Ebenso schätzt sie auf jährlicher Basis die Auszahlungen für den operativen Betrieb der Anlage. Anschließend ermittelt sie die Kapitalkosten und diskontiert die jährlichen Salden aus Ein- und Auszahlungen in die Gegenwart, um dem Zeitwert des Geldes gerecht zu werden. So kommt sie auf einen Barwert der Anlage in Höhe von 1.000.001 €. Nach Abzug des Kaufpreises von 1.000.000 € ermittelt sie einen Nettobarwert der Anlage von 1 €. Sie weiß, dass die Kapitalwertmethode den Kauf empfiehlt, da der Kapitalwert größer als Null ist. Aber Sie kauft die Anlage nicht, denn ihre Intuition sagt ihr, dass der marginale Mehrwert von 1 € zu gering ist, um den Kauf zu rechtfertigen. Woran liegt das?

Die Ursache dafür liegt in den Eigenschaften realer Investitionsentscheidungen begrün-

det, denn diese erfolgen unter Unsicherheit, sind größtenteils irreversibel und verfügen häufig über mehr oder weniger stark ausgeprägte Handlungsspielräume, insbesondere solche, mit der Entscheidung warten zu können (Dixit & Pindyck, 1994, S. 6 ff.). So können sich im obigen Beispiel die tatsächlichen Ein- und Auszahlungen schon allein durch einen temporären technischen Ausfall der Anlage stark von den geschätzten Ein- und Auszahlungen unterscheiden. Auch ließe sich der bei einem Kauf der Anlage bezahlte Preis im Falle eines Weiterverkaufs in den meisten Fällen nicht wieder erzielen, sodass die Anschaffungsausgaben nach erfolgter Investition größtenteils versunken sind (Akerlof, 1970; Dixit & Pindyck, 1994, S. 8). Im Übrigen muss die Geschäftsführerin die Entscheidung nicht sofort fällen. Sie kann warten und dadurch eventuell neue Informationen über bewertungsrelevante Parameter einholen. Diese Eigenschaften erzeugen eine zusätzliche Wertkomponente: Den Flexibilitätswert (Trigeorgis, 1993). Dieser bleibt bei der naiven Anwendung der Kapitalwertmethode unberücksichtigt, wird jedoch bei einem extrem formulierten Beispiel, wie dem obigen, intuitiv wahrgenommen (McDonald, 2000).¹² Daher muss der Kapitalwert für die richtige Anwendung erweitert werden (Trigeorgis, 2001):

$$KW_0^{erweitert} = KW_0 + Flexwert. \quad (2.6)$$

Während die Ermittlung des KW_0 gemäß Unterabschnitt 2.1.2 erfolgen kann, stellt sich die Frage, wie der Flexwert zu bestimmen ist, oder eher, ob $KW_0^{erweitert}$ nicht direkt ermittelt werden kann. Hier schafft eine Veränderung des Blickwinkels auf das Entscheidungsproblem Abhilfe. So wie es Myers (1977) als erster beschreibt, erlauben reale Investitionsentscheidungen, eine Analogie zu Finanzoptionen herzustellen und können treffenderweise als Realoptionen bezeichnet werden.¹³ Die nachfolgende Abb. 2.1 ver-

¹²Die naive Kapitalwertmethode weist einige, oft missachtete, implizite Annahmen bezüglich der Eigenschaften der zugrundeliegenden Investitionsmöglichkeit auf. Es wird entweder angenommen, dass die Investition reversibel oder eine irreversible „Jetzt-oder-Nie“-Investition ist (Dixit & Pindyck, 1994, S. 6; Copeland & Antikarov, 2003, S. 112; Trigeorgis, 1993). In beiden Fällen wären für eine Entscheidung entsprechend entweder die Unsicherheit oder der zeitliche Handlungsspielraum irrelevant. Es gäbe keinen Flexibilitätswert auf den bei der Entscheidung verzichtet werden müsste und daher keine zusätzlichen Opportunitätskosten, die bei der Bewertung zu berücksichtigen wären. Im Umkehrschluss müssen entsprechend Irreversibilität der Investitionsausgaben sowie die Möglichkeit, in der Zukunft zu investieren, als direkte Alternative zum instantanen Investieren, gegeben sein, damit solche Opportunitätskosten bewertungsrelevant werden (Dixit & Pindyck, 1994, S. 28).

¹³Finanzoptionen werden generell in Calls und Puts (Kauf- und Verkaufsoptionen) unterteilt. Sie geben dem Inhaber entsprechend das Recht, einen Basiswert, z. B. eine Aktie, zu einem bestimmten Zeitpunkt oder innerhalb eines Zeitraums zu kaufen oder zu verkaufen, stellen jedoch keine Verpflichtung dar. Darf die Option nur zu einem Verfallszeitpunkt ausgeübt werden, so wird von einer Option europäischen Typs gesprochen. Darf die Option hingegen beliebig zwischen Erwerb und Verfall ausgeübt werden, wird von einer amerikanischen Option gesprochen (Hull, 2015, S. 276 ff.).

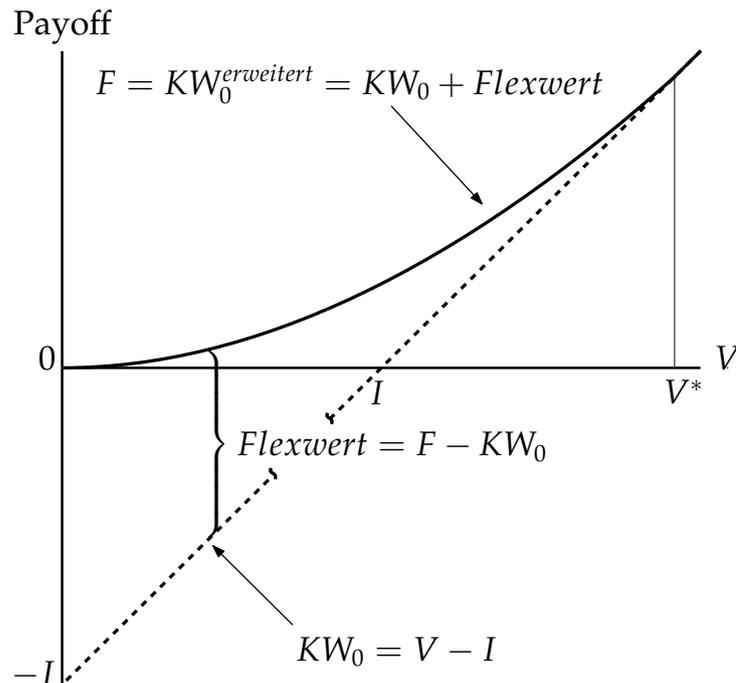


Abbildung 2.1: Darstellung des erweiterten Kapital- bzw. Realloptionswerts mit V als Projektwert, I als irreversible Investitionsausgaben und F als Optionswert einer Investitionsoption. V^* stellt den optimalen Investitionsschwellenwert der Option dar. Hier ist der Flexibilitätswert null und der Optionswert geht in den naiven Kapitalwert über.

deutlich dies. So kann der Kauf der Biogasanlage im obigen Beispiel als Call Option amerikanischen Typs uminterpretiert werden: Den Basiswert des Calls F stellt der Barwert der Anlage V dar und der Basispreis ist über die Anschaffungsausgaben I definiert. Über diesen Ansatz können $KW_0^{erweitert}$ direkt als Wert der Realoption F und entsprechend der Flexwert indirekt über

$$Flexwert = F - KW_0 \quad (2.7)$$

als Residuum ermittelt werden. Es wird deutlich, dass die Flexibilität den Optionsinhaber vor schlechten Realisationen in V schützt. Entwickelt sich das Projekt nachteilig, erleidet gar einen „Totalschaden“ mit $V = 0$, so dämpft die Option diesen ökonomischen Schaden über den Flexibilitätswert. Neben der Schutzfunktion ermöglicht die Option dem Inhaber jedoch, auch an positiven Entwicklungen in V über ihren Wertzuwachs zu partizipieren. Schlussendlich, wenn der Projektwert ausreichend hoch ist, nämlich für $V \geq V^*$, wobei V^* den Ausübungsschwellenwert darstellt, und sich damit der Fle-

xibilitätswert auflöst, wird der Optionsinhaber die Option mit Zahlung und damit die Investition von I ausüben und das aktive Projekt der Warteposition vorziehen.¹⁴

Um den Wert von Realloptionen ermitteln und damit reale Investitionsmöglichkeiten bewerten zu können, müssen sowohl Techniken aus der klassischen Investitionsrechnung als auch die Optionspreistheorie eingesetzt werden (Hull, 2015, S. 964). Die dazu nötige theoretische Basis wird in späteren Abschnitten dieses Grundlagenkapitels dargestellt. Bevor dies geschieht, gibt der nachfolgende Unterabschnitt 2.2.1 zunächst einen allgemeinen Überblick zu gängigen Realloptionsarten. Anschließend wird, passend zum obigen Beispiel, in Unterabschnitt 2.2.2 kurz die allgemeine Aufschuboption bzw. Investitionsoption näher betrachtet. Es folgt in Unterabschnitt 2.2.3 die Betrachtung des in der Realloptionsliteratur häufig untersuchten Zusammenhangs zwischen Investitionsneigung und Unsicherheit. Zuletzt werden in Unterabschnitt 2.2.4 die zeitliche Entwicklung sowie die zukünftigen Aussichten des Realloptionsansatzes in der Praxis betrachtet.

2.2.1 Realloptionsarten im Überblick

Die Anwendung des Realloptionsansatzes setzt in erster Linie voraus, dass Realloptionen auch als solche erkannt werden. Wie wichtig es ist, sich mit den gängigsten Realloptionsarten vertraut zu machen, zeigt ein Negativ-Beispiel aus der Versicherungswirtschaft, das bei Copeland & Keenan (1998) nachzulesen ist: In den 1960er Jahren warben amerikanische Lebensversicherer intensiv um neue Kunden aus geburtenstarken Jahrgängen. Oft integrierten sie ein besonderes Leistungsmerkmal in die Lebensversicherungspolice, nämlich das Recht für den Versicherungsnehmer, einen Kredit in Höhe des Rückkaufswerts mit einer festen Verzinsung von knapp 8 % aufzunehmen. Der marktübliche Zins betrug zu der Zeit zwischen 3 - 4 %, sodass dieses Recht eher unwichtig erschien. Es entpuppte sich jedoch Anfang der 1980er-Jahre als Fallstrick, als die Zinsen zweistellig wurden. Die Babyboomer waren durch ihr Recht plötzlich in der Lage, günstig bei den Lebensversicherern zu leihen und zu einem höheren Zins am Markt anzulegen. Anders formuliert, übten die Versicherungsnehmer ihre Call Optionen aus, was viele Lebens-

¹⁴In der Regel ist das Aufrechterhalten der Option, das Verharren in der Warteposition, mit Kosten verbunden. Diese Kosten stellen Opportunitätskosten aus entgangenen Projektcashflows dar, denn solange die Option aufrecht erhalten wird, hat der Optionsinhaber keinen Zugang zu den Projektcashflows. Der Zugang zu diesen Cashflows wird erst bei Investition und damit Ausübung der Option möglich.

versicherer an den Rand einer Insolvenz führte und dies nur, weil sie sich nicht bewusst waren, welchen zusätzlichen Flexibilitätswert sie in ihre eigenen Policen integriert und mit dem Verkauf dieser an die Versicherungsnehmer abgegeben hatten.

Analog zum obigen Beispiel können reale Investitionsprojekte mit einer Vielzahl von verschiedenen Realloptionen einhergehen. Diese können dabei natürlichen Ursprungs sein, wie z. B. beim einfachen Verzögern und Verlagern der Entscheidung in die Zukunft, oder lassen sich erst durch zusätzliche Ausgaben realisieren, wie z. B. bei der Vergrößerung von Produktionskapazitäten (Trigeorgis, 1993). Ob Realloptionen klar identifiziert werden können, wie stark sie ausgeprägt sind und wie groß die entsprechende Wertrelevanz ist, hängt dabei von den Merkmalen des Investitionsprojekts ab.

So eignen sich insbesondere Projekte mit hohen (größtenteils irreversiblen) Investitionsausgaben bei zugleich unsicheren zukünftigen Erfolgsaussichten für die Anwendung von Realloptionen (Mun, 2002, S. 100), wie bspw. Projekte aus der Energiewirtschaft, der Baubranche oder Rohstoffgewinnung. Zudem müssen die Projekte über eine klar definierbare Struktur verfügen. Auch braucht es möglichst eindeutige Quellen für Unsicherheit und plausibel quantifizierbare Bewertungsparameter (Triantis, 2005). Sind die beschriebenen Rahmenbedingungen vorhanden, so lassen sich die gängigsten Realloptionen, wie Aufschub-, Time-to-Build-, Skalierungs-, Abbruch-, Wechsel- und Wachstumsoptionen, unterscheiden, klar identifizieren und bewerten. Tab. 2.1 gibt dazu einen Überblick, wobei neben den charakteristischen Eigenschaften auch relevante Anwendungsfelder für die jeweiligen Realloptionen beschrieben werden.

Tabelle 2.1: Gängige Realloptionsarten abgewandelt nach Trigeorgis (2001, S. 104 ff.) mit eigenen Ergänzungen.

Realloptionsart	Merkmale
Aufschuboption (Option to Defer/ Option to Invest)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Das Management hat die Möglichkeit, mit der Investition zu warten. Dadurch hat es mehr Zeit, neue Informationen über die Profitabilität des Projekts einzuholen. ○ Besonders relevant für Industrien mit Abbau natürlicher Ressourcen, in der Immobilienentwicklung, der Landwirtschaft, Papierindustrie und Energiewirtschaft.
Time-to-Build Option	<ul style="list-style-type: none"> ○ Das Projekt hat eine lange Bauzeit. Die Investitionen erfolgen stufenweise, wodurch bei negativen Veränderungen bewertungsrelevanter Parameter das Projekt z. B. abgebrochen oder zeitweise ausgesetzt werden kann. ○ Relevant für: Industrien mit intensiver F&E (z. B. Pharmazie), kapitalintensive Projekte mit langer Bauzeit (z. B. in der Baubranche und der Energiewirtschaft) sowie Start-Ups.
Skalierungsoption (Option to Alter Operating Scale)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Je nach Marktlage kann das Unternehmen seinen operativen Output verkleinern oder vergrößern bzw. diesen in Extremfällen sogar zeitweise stilllegen und später wieder aufnehmen. ○ Relevant für Industrien im Abbau natürlicher Ressourcen, zyklische Industrien, Modebranche, Konsumgüter und gewerbliche Immobilien.
Abbruchoption (Option to Abandon)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Verschlechtert sich die Marktlage, kann das Management ein Projekt dauerhaft abbrechen und weiterveräußern. ○ Relevant für: Kapitalintensive Industrien (z. B. Airlines, Eisenbahnen), Finanzdienstleistungen und Einführung neuer Produkte in unsichere Märkte.
Wechseloption (Option to Switch)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Ändern sich Preis oder Nachfrage, so kann das Management darauf reagieren, indem es den Produktoutput verändert oder alternativ den selben Output beibehält, aber dafür andere Inputs verwendet. ○ Wechsel von Outputs bietet sich an für: Alle Güter, die in kleinen Chargen produziert werden oder einer volatilen Nachfrage unterliegen (z. B. Unterhaltungselektronik, Spielzeug, Spezialpapier, Maschinenteile, Autos). ○ Wechsel von Inputs bietet sich an für: Alle rohstoffabhängigen Anlagen (z. B. Öl, Gas, Strom), Chemieindustrie und Saatgut.
Wachstumsoption (Growth Option)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Frühe Investitionen eröffnen nachgelagerte, zukünftige Wachstumsoptionen. ○ Relevant für: Alle Infrastruktur-basierten oder strategischen Industrien, Hightech, F&E, Industrien mit multiplen Produktgenerationen (z. B. IT, Pharmazie).
Optionsbündel	<ul style="list-style-type: none"> ○ Reale Projekte weisen oft mehr als nur eine der oben aufgeführten Optionsarten auf. Aufgrund von möglichen Interaktionen zwischen den Optionen kann der kombinierte Optionswert von der Summe der Optionswerte abweichen.

2.2.2 Die Aufschuboption - Ein erster Eindruck

Um sich einen ersten Eindruck über die grundlegende Funktionsweise der Realloptionslogik zu verschaffen, soll nachfolgend die Aufschuboption bzw. Option to Invest unter

Tabelle 2.2: Ausgangsparameter in Anlehnung an McDonald (2006).

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Risikoloser Zins	r	6,00	% p.a.
Marktrendite	r_m	10,00	% p.a.
Betafaktor Projekt	β	1,25	
Anzahl Perioden	T	1,00	Jahr(e)
Cashflow in T (hoch)	CF_u	51,36	€
Cashflow in T (niedrig)	CF_d	31,15	€
Investitionsausgaben	I	35,00	€
Wahrscheinlichkeit CF_u	p	0,57	
Wahrscheinlichkeit CF_d	$1 - p$	0,43	

stark vereinfachten Rahmenbedingungen analysiert werden. Anhand eines an McDonald (2006) angelehnten Zahlenbeispiels, wird zunächst die Verbindung zwischen der Kapitalwertmethode und der risikoneutralen Bepreisung aufgezeigt.¹⁵ In den ersten nachfolgenden Absätzen werden dazu zunächst wesentliche Gedanken aus McDonald (2006) übernommen, wobei auf eine separate Ausweisung dieser verzichtet wird. Hierbei wird auch die Bedeutung der Kapitalwertmethode als integraler Bestandteil der risikoneutralen Bepreisung herausgearbeitet. Anschließend erfolgt die Verknüpfung der Kapitalwertmit der Realloptionslogik. Ebenfalls wird eine erste (einfache) Realloptionsbewertung am Zahlenbeispiel vorgenommen. Dazu werden nachfolgend die in Tab. 2.2 zusammengefassten Parameter benutzt.

Ausgangspunkt soll das folgende Bewertungsproblem sein: Es existiert zum Zeitpunkt $t = 0$ die Möglichkeit, in ein Projekt $V_0 = V$ zu investieren. Dazu müssen irreversible Investitionsausgaben I aufgewendet werden. Es sei angenommen, dass das Projekt kein am Markt gehandelter Vermögensgegenstand ist, sodass sich kein direkter Marktwert beobachten lässt. Entsprechend muss die Bewertung, basierend auf ökonomischen Fundamentaldaten, erfolgen. Eine Analyse dieser Daten soll ergeben haben, dass zum Zeitpunkt T mit einer Wahrscheinlichkeit p und einem hohen Einmal-Cashflow CF_u sowie mit einer Wahrscheinlichkeit $1 - p$ und einem niedrigen Einmal-Cashflow CF_d gerechnet werden kann. Ferner soll das Projektbeta β anhand eines am Markt gehandelten Unternehmens mit einer ähnlichen Risikostruktur ermittelt werden können. Die Diskontrate ρ wird über das Capital Asset Pricing Modell (CAPM) ermittelt, sodass sich

¹⁵Die nachfolgenden Ausführungen stellen generell eine Kombination der Ausführungen aus Dixit & Pindyck (1994, Kap. 2 und 4), Park & Sharp-Bette (1990, Kap.9) sowie Hull (2015, Kap. 13) dar.

$\rho = r + \beta(r_m - r) = 11\% \text{ p.a.}$ ergibt.¹⁶

Für die Bewertung des Projekts und der Vorteilhaftigkeit der Investitionsmöglichkeit kann die Kapitalwertmethode eingesetzt werden. So lässt sich Projektwert V_0 über

$$V_0 = \frac{pCF_u + (1-p)CF_d}{(1+\rho)^T} = 38,44\text{€} \quad (2.8)$$

bestimmen, wobei $\mathbb{E}^P[CF] = pCF_u + (1-p)CF_d = 42,67\text{€}$ im Ergebnis der Erwartungswertbildung ermittelt wird. Für den Nettokapitalwert ergibt sich

$$V_0 - I = 3,44\text{€}. \quad (2.9)$$

Über die zuvor angewandte Kapitalwertlogik konnte dem Projekt, ausgehend von der Informationslage zum gegenwärtigen Zeitpunkt, ein dem Marktpreis äquivalenter Wert V_0 zugewiesen werden.

An dieser Stelle lässt sich eine weitere Überlegung anknüpfen – angenommen, es würde heute ein Vertrag geschlossen, mit dem dieses Projekt in Periode T verbindlich realisiert werden müsste. Zu welchem zukünftigen Preis V_1^F wäre ein Investor bereit, sich zu verpflichten? Die Antwort lässt sich finden, indem der Marktwert des Projekts mit Hilfe des risikolosen Zinses in die zukünftige Periode aufgezinst wird. Der Verbindlichkeit geschuldet, muss der zukünftige Wert risikolos sein, sodass sich ausgehend vom heutigen Wert V_0

$$V_1^F = (1+r)^T V_0 = 40,75\text{€} \quad (2.10)$$

ergibt.¹⁷

Wird Gl. 2.8 genauer betrachtet, so lässt sich mit $T = 1$ nach Umstellen u. a. auch V_1^F wiederfinden

$$\begin{aligned} V_0(1+\rho) &= pCF_u + (1-p)CF_d \\ \Leftrightarrow V_0(1+r) + V_0\beta(r_m - r) &= pCF_u + (1-p)CF_d \\ \Leftrightarrow V_1^F &= pCF_u + (1-p)CF_d - V_0\beta(r_m - r) \\ \Leftrightarrow V_0 &= \frac{pCF_u + (1-p)CF_d - V_0\beta(r_m - r)}{1+r} \end{aligned} \quad (2.11)$$

¹⁶Durch Einsatz des CAPM wird ρ als erwartete Verzinsung eines (alternativen) Projekts mit äquivalentem Risiko verwendet.

¹⁷ V_1^F ist vergleichbar mit den Finanzterminkontrakten Forwards/Futures.

$$\Leftrightarrow V_0 = \frac{V_1^F}{1+r}. \quad (2.12)$$

Die Gln. 2.11 und 2.12 lassen dabei erste Interpretationen zu. So stellt der Forwardpreis des Projekts V_1^F aus Gl. 2.11 nichts anderes dar, als den erwarteten zukünftigen Wert des Projekts $V_0(1+\rho)^1$ vermindert um eine Risikoprämie $V_0\beta(r_m - r) = 1,92 \text{ €}$.¹⁸ Wäre der Forwardpreis bereits gegeben, wie dies auf Forwardmärkten für Rohstoffe, wie Erdgas, Öl uvm. der Fall ist, so ließe sich der Marktwert des Projekts V_0 problemlos durch Diskontierung des Forwardpreises aus Gl. 2.12 mittels risikoloser Verzinsung r ermitteln. An dieser Stelle kann der Schlußschluss zu einem wesentlichen Konzept der Realloptionsbewertung – der risikoneutralen Bepreisung – erfolgen, denn hierfür haben die selben impliziten Annahmen der zuvor aufgeführten Überlegungen volle Gültigkeit. So wurde der erwartete Cashflow, basierend auf einer angenommenen Wahrscheinlichkeitsverteilung, ermittelt und eine geeignete Diskontrate ρ in Relation zu einem am Markt gehandelten Projekt/Unternehmen mit vergleichbarem Risiko bestimmt. Anders als zuvor lässt sich der Projektwert V_0 ebenfalls mittels risikoneutraler Bepreisung ermitteln

$$V_0 = \frac{p^*CF_u + (1-p^*)CF_d}{(1+r)^T}. \quad (2.13)$$

Dabei werden zur Erwartungswertbildung $\mathbb{E}^Q[CF] = p^*CF_u + (1-p^*)CF_d$ risikoneutrale Wahrscheinlichkeiten p^* für einen hohen und $1-p^*$ für einen niedrigen Cashflow verwendet.¹⁹ Da der risikolose Zins für die Diskontierung verwendet wird, impliziert dies, dass der risikoneutral erwartete Cashflow bereits um die Risikoprämie bereinigt ist und damit identisch zu V_1^F sein muss. Mit dem Wissen, dass V_0 bei Fehlen von Marktpreisen im Rahmen der Kapitalwertmethode definiert ist und damit auch

¹⁸Ein Investor wäre hier indifferent, wenn er sich zwischen dem risikobehafteten Wert $V_0(1+\rho)^1$ und dem risikolosen Forwardpreis des Projekts V_1^F entscheiden müsste. Der Forwardpreis stellt entsprechend ein Sicherheitsäquivalent dar (Park & Sharp-Bette, 1990, S. 372).

¹⁹Aus der Erwartungswertbildung im Rahmen der risikoneutralen Bewertung wird der Wechsel des Wahrscheinlichkeitsmaßes deutlich (Ewald & Taub, 2020). Während in der realen Welt im hier benutzten Beispiel aus McDonald (2006) der Erwartungswert $\mathbb{E}^P[CF] = pCF_u + (1-p)CF_d$ unter Maß P gebildet und zur Diskontierung ρ genutzt wird, kann in der risikoneutralen Welt die Erwartungswertbildung mit Hilfe eines äquivalenten Maßes Q über $\mathbb{E}^Q[CF] = p^*CF_u + (1-p^*)CF_d$ erfolgen, wobei hier dann entsprechend zur Diskontierung der risikolose bzw. risikoneutrale Zins r zum Einsatz kommt. Da sich über beide Welten der selbe Wert V_0 ermitteln lässt, wird zwangswise auch in der risikoneutralen Welt über den Maßwechsel dem Risiko der realen Welt Rechnung getragen (Ewald & Taub, 2020).

$V_1^F = V_0(1 + r)$, können die risikoneutralen Wahrscheinlichkeiten über

$$p^*CF_u + (1 - p^*)CF_d = V_1^F \quad (2.14)$$

ermittelt werden. Der so ermittelte erwartete Cashflow ist damit identisch zum Sicherheitsäquivalent V_1^F . Mit

$$p^* = \frac{V_1^F - CF_d}{CF_u - CF_d} = 0,4749 \quad (2.15)$$

ergibt sich aus Gl. 2.13 ebenfalls $V_0 = 38,44$ €. Es fällt auf, dass neben den Cashflows CF_u und CF_d für die risikoneutrale Bepreisung V_1^F und damit V_0 verwendet werden muss, um überhaupt auf p^* schließen zu können. Hieraus wird deutlich, dass die Kapitalwertmethode einen integralen Bestandteil für die risikoneutrale Bepreisung darstellt. Entsprechend sind die Annahmen bei Einsatz der Kapitalwertmethode mindestens genau so restriktiv wie für die risikoneutrale Bepreisung. Da im hier vorgestellten Beispiel annahmegemäß kein Marktwert heute oder in der Zukunft zu beobachten war, würden ohne die Kapitalwertmethode keine Werte für V_0 und V_1^F existieren. Umgekehrt wird hieraus auch deutlich, dass wenn Marktpreise am Spot- und/oder Forwardmarkt beobachtbar sind, der Markt nichts anderes als selbst eine Kapitalwertbewertung vorgenommen hat. Nun soll das Konzept der risikoneutralen Bepreisung im Rahmen der (Real-)Optionsbewertung aufgezeigt und eine erste Bewertung der Aufschuboption am Zahlenbeispiel vorgenommen werden.²⁰ Dazu soll die Entscheiderin einen Handlungsspielraum haben. Entweder wird sofort in das Projekt investiert oder es wird bis Periode T gewartet und dann entschieden, ob investiert werden soll. Die Entscheidungssituation ist in Abb. 2.2 zusammengefasst. Aus Abb. 2.2 wird der Binomialbaumcharakter der Entscheidungssituation deutlich. Tatsächlich wurde das Beispiel extra so gewählt, um möglichst anschaulich die Realoptionslogik zu verdeutlichen. Analog dazu ist bspw. in Hull (2015, Kap. 13) die Entwicklung der Binomialbäume mittels risikoneutraler Bepreisung für Finanzoptionen zu finden. Das in Hull (2015, Kap. 13) beschriebene Binomialbaummodell basiert dabei auf dem Modell von Cox et al. (1979). Dort wird der unsichere Verlauf des Akti-

²⁰Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass die Überlegungen in den Absätzen zuvor in wesentlichen Zügen auf McDonald (2006) basieren.

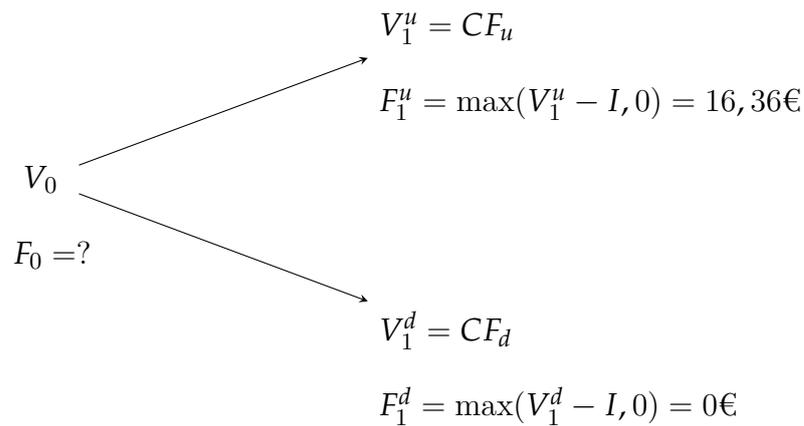


Abbildung 2.2: Entscheidungssituation im Falle der einperiodigen Aufschuboption.

enkurses über einen rekombinierenden Binomialbaum nachgebildet.²¹ Anstelle von Finanzoptionen wenden Dixit & Pindyck (1994, Kap. 2) die gleiche Logik in einem ähnlich einfachen Beispiel, wie dem in diesem Abschnitt entwickelten, für Realoptionen an, wobei anstelle eines Aktienkurses sich der Cashflow oder Projektwert, wie in Abb. 2.2, von Periode zu Periode entwickelt.

Abb. 2.2 zeigt bereits intuitiv den Wert der Handlungsflexibilität. Sollte sich die Entscheiderin entschließen sofort zu investieren und damit $V_0 - I$ zu realisieren, kann sie diese Entscheidung lediglich auf dem Erwartungswert der zukünftig unsicheren Cashflows CF_u und CF_d fundieren. Welcher von beiden tatsächlich in der nächsten Periode eintritt, ist unsicher. Wartet sie hingegen, kann sie diese Unsicherheit auflösen.²² Hier entscheidet sie sich immer für die Investition, sobald $V_1 > I$, und dagegen für Fälle in denen $V_1 \leq I$. Dass diese Flexibilität einen Wert besitzt, ist unstrittig. Die Realoptionsmethode kann verwendet werden, um diesem Wert über die Bestimmung von F_0 gerecht zu werden.

²¹Ausgehend von einem Knoten in einer Periode kann der Aktienkurs dabei immer entweder steigen oder fallen. So entstehen ausgehend von Periode 0 mit einem Knoten in der darauffolgenden Periode 1 zwei Knoten, wie dies in Abb. 2.2 analog für den Einmal-Cashflow und damit Projektwert deutlich wird. Anschließend folgen Periode 2 mit drei, Periode 3 mit vier Knoten usw. Abhängig vom Typ der Option und der Anzahl der verwendeten Perioden wird anschließend, mit den Knoten in der letzten Periode beginnend, der Optionswert an jedem Knoten bestimmt, bis schließlich der Optionswert in Periode 0 gefunden ist.

²²Die Unsicherheit wird in diesem einfachen Beispiel komplett aufgelöst. Nach der Periode $T = 1$ gibt es keine Investitionsmöglichkeit mehr, sodass in $T = 1$ die Aufschuboption ausläuft. Entsprechend muss in $T = 1$ die Entscheidung zwangsläufig basierend auf der Kapitalwertmethode erfolgen.

Nun soll analog zu Gl. 2.13 die risikoneutrale Bepreisung für F_0 erfolgen, sodass

$$F_0 = \frac{p'F_1^u + (1 - p')F_1^d}{(1 + r)^T}, \quad (2.16)$$

wobei p' und $1 - p'$ risikoneutrale Wahrscheinlichkeiten darstellen. Dazu wird zunächst ein Portfolio $\Phi_0 = F_0 - nV_0$ betrachtet.²³ Dieses Portfolio setzt sich zum einen aus der Aufschuboption F_0 in der Long-Position und zum anderen aus n Anteilen des Projekts V_0 , welche leerverkauft werden, zusammen.²⁴ Nun soll n so gewählt werden, dass in $T = 1$ unabhängig davon, ob V_1^u oder V_1^d realisiert wird, das Portfolio immer den gleichen Wert hat, sodass $\Phi_1^u = \Phi_1^d$. Das gesuchte n muss daher

$$n = \frac{F_1^u - F_1^d}{V_1^u - V_1^d}, \quad (2.17)$$

erfüllen.²⁵ Da das Portfolio durch Wahl eines solchen n risikolos wird, müssen sowohl Φ_1^u als auch Φ_1^d , diskontiert mit dem risikolosen Zins r , genau dem Wert des Portfolios heute entsprechen, sodass $\Phi_0 = \Phi_1^u/(1 + r)^T = \Phi_1^d/(1 + r)^T$. Wird bspw. dem Weg $\Phi_0 = \Phi_1^u/(1 + r)^T$ gefolgt, lässt sich nach Umstellen und Einsetzen von n gemäß Gl. 2.17

$$p' = \frac{V_0(1 + r)^T - V_1^d}{V_1^u - V_1^d} \quad (2.18)$$

²³Das Beispiel funktioniert analog zur Bewertung von Finanzoptionen, wie in Hull (2015, Kap. 13), wenn V_0 , V_1^u und V_1^d nicht als Projektwerte, sondern als Aktienkurse interpretiert werden.

²⁴Im Rahmen der Optionsterminologie wird die Long-Position dem Käufer und die Short-Position dem Verkäufer des Optionskontrakts zugewiesen (Hull, 2015, S. 35). Der Begriff des Leerverkaufs, auch als „Shorting“ oder „Short Selling“ bezeichnet, beschreibt den Verkauf von geliehenen Vermögenswerten (Hull, 2015, S. 146).

²⁵ n ergibt sich aus $F_1^u - nV_1^u = F_1^d - nV_1^d$.

finden.²⁶ Somit ergibt sich für den Wert der Aufschuboption

$$F_0 = 7,33\text{€} \quad (2.19)$$

Das ermittelte p' aus Gl. 2.18 ist dabei identisch zu p^* aus Gl. 2.15. Damit lassen sich nun gleich zwei Kreise schließen. Zunächst konnte im Vergleich zu den Überlegungen vom Beginn des Unterabschnitts 2.2.2 gezeigt werden, dass die risikoneutrale Bepreisung ebenfalls zur Bewertung von Realoptionen eingesetzt werden kann. Ein solche Art der Bewertung wird in der englischsprachigen Literatur auch als Contingent Claims Valuation bezeichnet. Unter Einsatz der risikoneutralen Wahrscheinlichkeiten $p^* = p'$ lässt sich die Erwartungswertbildung vornehmen, um den Forwardpreis bzw. den Wert des Sicherheitsäquivalents zu ermitteln, welcher dann lediglich in die vorhergehende Periode mit dem risikolosen Zins diskontiert werden muss.²⁷ Da die Kapitalwertmethode bereits einen integralen Bestandteil der risikoneutralen Bepreisung darstellt, ist sie zwangsweise auch essentiell für die Realoptionsbewertung.²⁸

Der zweite Kreis schließt sich nicht nur auf das in diesem Abschnitt untersuchte Entscheidungsproblem bezogen, sondern ebenfalls auf die Ausführungen zu Beginn in Abschnitt 2.2. So wurde bereits dort in Gl. 2.7 eine erste Idee des Flexibilitätswerts eingeführt. Dieser lässt sich nun einfach als Differenz $F_0 - (V_0 - I) = 3,89\text{€}$ bestimmen.

²⁶Es gilt

$$\begin{aligned} \Phi_0 &= \frac{1}{(1+r)^T} \left(F_1^u + n \left(V_0(1+r)^T - V_1^u \right) \right) \\ \Leftrightarrow \Phi_0 &= \frac{1}{(1+r)^T} \left(F_1^u \frac{V_0(1+r)^T - V_1^d}{V_1^u - V_1^d} - F_1^d \frac{V_0(1+r)^T - V_1^u}{V_1^u - V_1^d} \right) \\ \Leftrightarrow \Phi_0 &= \frac{1}{(1+r)^T} \left(F_1^u \frac{V_0(1+r)^T - V_1^d}{V_1^u - V_1^d} + F_1^d \left(1 - \frac{V_0(1+r)^T - V_1^d}{V_1^u - V_1^d} \right) \right). \end{aligned}$$

In Hull (2015, S. 359) und Cox et al. (1979) ergeben sich äquivalente risikoneutrale Wahrscheinlichkeiten mit jeweils $p^* = (\exp(r\Delta t) - d)/(u - d)$ und $p^* = (r - d)/(u - d)$. Hierbei sind $u > 1$ und $d < 1$ und der Aktienkurs S_0 , der sowohl im Zähler als auch im Nenner stehen würde, kann herausgekürzt werden.

²⁷Die Bewertung mittels Contingent Claims ist nicht nur auf Problemstellungen mit diskreten Perioden und diskreten Zuständen des Basiswerts, wie z. B. eines Aktienkurses oder Projektwerts anwendbar, sondern wird häufig im Rahmen einer zeitstetigen Modellierung der Entscheidungssituation mithilfe von stochastischen Prozessen eingesetzt.

²⁸Dieser Argumentation folgend, müssen Stimmen, welche die Annahmen bei Einsatz der Realoptionsmethode als „unrealistisch“ beanstanden, zurückgewiesen werden. Wie gezeigt, unterliegt die Kapitalwertmethode mindestens genau so restriktiven Annahmen wie die Realoptionsmethode (McDonald, 2006).

Würde sich die Entscheiderin entschließen, sofort zu investieren, muss sie die Opportunitätskosten in Höhe des Flexibilitätswerts zusätzlich zu den Investitionsausgaben in ihr Kalkül mit einbeziehen. Aus ökonomischer Sicht sollte sich die Entscheiderin für ein wertmaximierendes Verhalten entscheiden und sich mit $7,33\text{€} > 3,89\text{€}$ dazu entschließen, ihre Aufschuboption aufrecht zu halten und bis zur nächsten Periode mit ihrer Entscheidung zu warten.

Zuletzt sei darauf hingewiesen, dass die Ausführungen einen vollständigen und vollkommenen Kapitalmarkt voraussetzen. Da diese Annahmen auch in abgeschwächter Form nicht immer gegeben sind, kann auch auf eine andere Methode zur Bewertung von Realoptionen – auf die dynamische Programmierung – zurückgegriffen werden. Diesem Ansatz wird in den nächsten Teilen dieser Arbeit gefolgt, sodass auf weitere Ausführungen zum Contingent Claims Ansatz verzichtet wird.

2.2.3 Der Zusammenhang von Investitionsneigung und Unsicherheit

In den vorhergehenden Unterabschnitten wurde deutlich, dass die Realoptionsmethode als Bewertungskalkül unter Unsicherheit prädestiniert ist. In der einschlägigen Literatur wird die Methodik dabei neben der Bewertung von Investitionsmöglichkeiten häufig benutzt, um das Investitionsverhalten unter Unsicherheit zu beschreiben. Unter der Annahme von rationalen Entscheidern, wie z. B. von rationalen Investoren oder einer rationalen Führungsriege eines Unternehmens, welche die Realoptionsmethode überhaupt für ihre Entscheidungsunterstützung einsetzen, wird oft ein negativer Zusammenhang zwischen Investitionsneigung und Unsicherheit postuliert (McDonald & Siegel, 1986; Dixit & Pindyck, 1994, S. 153; Dangl, 1999; Hagspiel et al., 2016; Lukas et al., 2017). Demnach bewirkt eine Erhöhung der Unsicherheit eine Verringerung der Investitionsneigung. Nachfolgend soll untersucht werden, ob sich dieser Zusammenhang nicht nur um das Zentrum der Realoptionsliteratur, sondern auch im erweiterten Literaturkreis stützen, und, ob sich Investitionsverhalten über die Realoptionsmethode beschreiben lässt.

Ein erstes Argument liefert McDonald (2006). Belegt durch Studien beschreibt er zunächst, dass die Realoptionslogik im Denken von Entscheidungsträgern, wie z. B. von

Managern, verankert sein und sich damit auch in ihrem Verhalten widerspiegeln muss.²⁹ Dies liegt in der Optimalität der Realoptionsmethode begründet. Würden sich Manager nachhaltig suboptimal verhalten und damit z. B. wertvolle Flexibilitätskomponenten in ihrer Entscheidung unbeachtet lassen, so würden Marktkräfte entsprechend gegen diese Entscheider wirken (McDonald, 2006). In Konsequenz würden Unternehmen mit solchen Entscheidern in langer Frist nicht überleben können. Dieser Optimalitätsaspekt besagt jedoch nicht, dass die Entscheider auch direkt die Realoptionsmethode einsetzen müssen, um sich optimal zu verhalten. Ein solches Verhalten kann auch im Zeitablauf entwickelt worden sein, indem Unternehmen ausgehend von ihren in der Vergangenheit realisierten Projekten gelernt und entsprechende „Faustregeln“ in der Bewertung abgeleitet haben. Solche „Faustregeln“ beschreibt Dixit (1992) als Mindestverzinsung bzw. Hurdle Rates. So kann in der Praxis beobachtet werden, dass Unternehmen erst investieren, wenn das betrachtete Projekt die von ihnen (willkürlich) geforderte Mindestverzinsung überschreitet. Die geforderte Mindestverzinsung kann dabei das Drei- bis Vierfache der Kapitalkosten betragen (Dixit, 1992). Die augenscheinliche Willkür beim Festlegen einer solchen Mindestverzinsung hat jedoch System. McDonald (2000) zeigt, dass Entscheidungskriterien, basierend auf solchen festgelegten Mindestverzinsungen, nahe an das optimale Verhalten gemäß Realoptionsmethode herankommen. Demnach wird sich in der Praxis durchaus approximativ optimal verhalten. Ein solches praxisoptimales Verhalten über geforderte Mindestverzinsungen ließe sich auch als implizite Realoptionsmethode verstehen. In einer jüngeren Studie finden auch Fleten et al. (2016) ein starkes Indiz dafür, dass die Realoptionsmethode genutzt werden kann, um Investorenverhalten zu beschreiben. In einer Befragung zu 214 Wasserkraftprojekten in Norwegen können sie analog zu Dixit (1992) oder McDonald (2000) feststellen, dass hier die Realoptionsmethode nicht direkt in der Projektbewertung verwendet wird, das Verhalten der Investoren jedoch im Einklang mit der Realoptionslogik steht.

Während im Ergebnis der Realoptionslogik i. d. R. ein negativer Effekt von Unsicherheit auf die Investitionsneigung beobachtet wird, gibt es durchaus Modellansätze, die einen positiven Effekt finden. Stellvertretend finden bspw. sowohl Abel (1983) als auch Hartman (1972) einen positiven Einfluss von Unsicherheit auf Investitionen. Dieser positive Zusammenhang findet empirisch kaum Rückhalt. Vielmehr lassen sich empirische Indizien für den negativen Effekt gemäß Realoptionslogik herausstellen (Kepp & Män-

²⁹Dies sollte stark von den zugrundeliegenden Investitionsprojekten abhängen. Sollten diese Projekte nicht die Eigenschaftsdimensionen von Realoptionen teilen, bräuhete sich entsprechend auch nicht im Sinne einer Realoptionslogik verhalten zu werden.

nasoo, 2021). So untersucht Kellogg (2014) bspw. den Einfluss von Unsicherheit auf die Investitionsneigung in der Ölindustrie. Aus dem Vergleich von Daten zu Ölbohrungen und Marktdaten der New York Mercantile Exchange (NYMEX) zu Optionen und Futures mit den Ergebnissen eines Realoptionsmodells liefert Kellogg (2014, S. 1732) „[...] micro-empirical support for the frequent use of real options models in economic research.“ Im Ergebnis seiner Untersuchung findet er eine Verringerung der Bohraktivität mit zunehmender Unsicherheit. Auch stimmt der Umfang der Verringerung der Bohraktivität mit den Modellvorhersagen überein. Der negative Zusammenhang zwischen Investitionsneigung und Unsicherheit wird empirisch auch von Bulan (2005) bestätigt, jedoch nicht im Bereich der Ölindustrie, sondern für das US-amerikanische verarbeitende Gewerbe. Weitere Bestätigung lässt sich auch für italienische Unternehmen im verarbeitenden Gewerbe durch Guiso & Parigi (1999) und das verarbeitende Gewerbe des Vereinigten Königreichs durch Price (1995) finden.

Abschließend lässt sich festhalten: Die Realoptionsmethode kann sinnvoll zum Einsatz kommen, wenn das Investitionsverhalten unter Unsicherheit beschrieben werden soll. Es gibt empirische Indizien dafür, dass der in Realoptionslogik gefundene negative Zusammenhang zwischen Investitionsneigung und Unsicherheit besteht. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit der Realoptionsliteratur gefolgt und in späteren Kapiteln in der Untersuchung des Investitionsverhaltens auf die Standardmaße zur Investitionsneigung aus der Realoptionsliteratur zurückgegriffen.³⁰

2.2.4 Entwicklung des Realoptionsansatzes in der Praxis

McDonald & Siegel (1985), Brennan & Schwartz (1985) sowie McDonald & Siegel (1986) legten Mitte der 1980er-Jahre mit ihren optionsbasierten Modellen zur Bewertung von realen Investitionsprojekten den Grundstein für einen üppigen Literaturkorpus, der sich in den nachfolgenden etwas mehr als drei Dekaden entwickelt hat. Während der Realoptionsansatz gerade in der Anfangszeit durch zahlreiche akademische Veröffentlichungen schnell an Fahrt gewann (Baker et al., 2011), diffundierte der Ansatz erst mit deutlicher

³⁰Die Investitionsneigung wird häufig über den Ausübezeitpunkt der Realoption gemessen. Dieser Ausübezeitpunkt korrespondiert dabei mit einem Level der Zustandsgröße, wie z. B. von Erlösen. In der Realoptionsliteratur wird dieses Level als Schwellenwert benutzt, um das Investitionsverhalten zu beschreiben. Der negative Zusammenhang zwischen Investition und Unsicherheit bedeutet demnach, dass mit zunehmender Unsicherheit der Schwellenwert steigt und damit später investiert wird. Dies wiederum wird als Verringerung der Investitionsneigung interpretiert.

Verzögerung in die Praxis. So begannen Praktiker, dem Realloptionsansatz erst Anfang der 2000er-Jahre Aufmerksamkeit zu schenken (Triantis & Borison, 2001). Diese lange Latenzzeit zwischen Einführung einer Methode bis hin zum ersten praktischen Einsatz ist nicht neu. Sie kann ebenso bei anderen Methoden zur Investitionsplanung beobachtet werden. Es ist daher sinnvoll, die zeitliche Entwicklung von Realoptionen im Kontext von weit vorher entstandenen Methoden, wie dem internen Zinsfuß oder der Barwertmethode, zu betrachten.

Vor diesem Hintergrund sind in Tab. 2.3 einige häufig zitierte Studien zu Methoden

Studie	n	Beschreibung	Amortisation	Interner Zinsfuß	Barwert	Realoptionen
			In % der Befragten			
Schall et al. (1978)	103	Unternehmen Compustat	74	65	56	k.A.
Pike (1988)	100	Britische Unternehmen	92	75	68	k.A.
Pike (1996)	100	Britische Unternehmen	94	81	74	k.A.
Graham & Harvey (2001)	392	Fortune 500, Mitglieder FEI	57	76	75	27
Brounen et al. (2004)	313	Europäische Unternehmen	57	76	75	27
Truong et al. (2008)	356	Australische Unternehmen	90	81	94	32

n - Anzahl der auswertbaren Antworten der Unternehmen
FEI - Financial Executives Institute

Tabelle 2.3: Zeitliche Entwicklung ausgewählter Methoden zur Investitionsplanung in der Praxis.

der Investitionsplanung in der Unternehmenspraxis zusammengefasst.³¹ Die gezeigten Studien stellen nur einen Ausschnitt dar und können lediglich als Indikator für die zeitliche Entwicklung der Ansätze im Allgemeinen und des Realoptionsansatzes im Speziellen dienen, denn unterschiedliche Zielsetzung, Zielgruppen, Zeitpunkte sowie Methodik und Aufbau der Studien erlauben keinen direkten Vergleich ohne Gefahr zu laufen, Widersprüche zu erzeugen (Rigopoulos, 2015).³² Frühe Studien in den 1960er- und 1970er-Jahren zeigen generell, dass insbesondere die Amortisation als Kriterium von Praktikern stark gegenüber der internen Zinsfuß- und Barwertmethode bevorzugt wurde (Ryan & Ryan, 2002), trotz ihrer bekannten und akademisch wiederholt adressierten Schwächen. Erst allmählich fanden Verfahren wie die interne Zinsfuß- und Barwertmethode Akzeptanz. Jedoch fokussierte sich die Praxis auch hier zunächst auf das vergleichsweise schwächere Verfahren, den internen Zinsfuß (Graham & Harvey, 2002). Schließlich hat die Barwertmethode mehrere Dekaden an Zeit benötigt (Triantis, 2005), um sich in der Praxis zu etablieren, was sich entsprechend in Tab. 2.3 widerspiegelt. Es ist zudem zu erkennen, dass die Methoden einander nicht direkt ablösen, sondern vielmehr von Praktikern in Ergänzung zu einander verwendet werden (McDonald, 2006).

Ein ähnliches Bild lässt sich auch für die Entwicklung des Realoptionsansatzes zeichnen. Während optimistische Meinungen, wie Copeland & Antikarov (2003, S. vi), eine schnelle praktische Adoption des Realoptionsansatzes und gar eine Ablösung der Kapitalwertmethode vorhersagen, ist eine moderatere Aussicht sinnvoller.³³ Der Realoptionsansatz

³¹In vielen Studien wurden auch weitere Methoden zur Investitionsplanung auf praktische Verwendung untersucht, wie z. B. die Sensitivitätsanalyse, Hurdle Rates, Multiplikatoren etc.

³²Eine ausführlichere Darstellung von Studien zur Investitionsplanung findet sich in Rigopoulos (2015). Auch Ryan & Ryan (2002) geben einen guten Überblick. Solche Studien fokussieren sich auf die Befragungen von Unternehmen aus verschiedenen Branchen bzgl. der eingesetzten Kalküle zur Entscheidungsfindung. Die Ergebnisse sollten stets kritisch betrachtet werden. Die Aussage, dass x % der befragten Unternehmen die Realoptionsmethode einsetzen, lässt nicht zwangsweise auf die Popularität der Methode schließen. Wie in Unterabschnitt 2.2.1 ausgeführt, müssen Bewertungsobjekte gewisse Eigenschaftsdimensionen aufweisen, damit sich die Realoptionsmethode überhaupt als Bewertungskalkül eignet. Entsprechend könnte x % auch einfach uminterpretiert werden, sodass 1-x % der Unternehmen einfach keine Investitionsprojekte haben, für die die Realoptionsmethode eingesetzt werden müsste. Zudem kann, wie in Unterabschnitt 2.2.3 ausgeführt, der Einsatz von geforderten Mindestverzinsungen im Rahmen der Amortisationsrechnung, des internen Zinsfußes und Barwerts auch bereits den Einsatz einer impliziten Realoptionsmethode darstellen. Dies lässt sich jedoch nicht weiter überprüfen.

³³Auch in anderen Forschungsdisziplinen ist eine anfängliche (Über-)Euphorie keine Ausnahme. Etwa im Bereich der künstlichen Intelligenz proklamierten führende Experten bereits Anfang der 1970er-Jahre, dass die Forschung kurz vor dem Durchbruch steht und dass Maschinen in der folgenden Dekade bereits mit der Intelligenz eines Durchschnittsmenschen ausgestattet werden können (Chollet, 2018, S. 12).

stellt keine Ablösung der Barwertmethode dar, sondern benötigt diese als zentralen Input (Trigeorgis, 1993). Vielmehr ist der Ansatz als evolutorische und zu anderen Methoden koexistente Weiterentwicklung zu sehen (Baker et al., 2011). Wie Tab. 2.3 zeigt, ist analog zum Barwert eine gewisse Trägheit in der Adoption zu erkennen. So haben Anfang der 2000er-Jahre etwas mehr als ein Viertel der befragten Unternehmen angegeben, Realoptionen zu verwenden. Nachfolgende Studien unterstützen diese Ergebnisse und indizieren eine zunehmende Adoption (Triantis, 2005; Rigopoulos, 2015). Dies ist auch zukünftig zu erwarten, denn aktuelle sozio-ökonomische Veränderungen, hervorgerufen durch Makrotrends wie Globalisierung, Digitalisierung und Klimawandel (European Commission, 2018) und damit einhergehende strukturelle Veränderungen in den verschiedenen Industriezweigen, erzeugen neue Momente, welche die Sicherung von langfristigen Wettbewerbsvorteilen stark erschweren. Gerade in Bereichen mit hohen (irreversiblen) Investitionsausgaben, wie bspw. der Energiewirtschaft, IT und Pharmazie, reichen traditionelle Methoden allein nicht aus und eine verbesserte Entscheidungsfindung unter Einsatz von Realoptionen wird zunehmend nötig (Triantis & Borison, 2001; Triantis, 2005).

3 Modelltheoretische Grundlagen

Mathematische Modelle dienen einer quantitativen Beschreibung von Naturphänomenen. Wie gut oder schlecht ein Modell ist, hängt von seinem Nutzen für den spezifischen Anwendungsfall ab und lässt sich durch pragmatische Eigenschaften wie Aussagekraft, Realitätsnähe, Reproduzierbarkeit und Eleganz charakterisieren (Taylor & Karlin, 1998, S. 1). Die in dieser Arbeit untersuchten Energie- und Infrastrukturinvestitionen unter Unsicherheit werden mathematisch modelliert, weshalb es entsprechend sinnvoll ist, sich zunächst mit den mathematischen Werkzeugen und Konzepten vertraut zu machen, um die Realloptionsmodelle und Modellerweiterungen in den nachfolgenden Kapiteln besser nachvollziehen und einordnen zu können.

In dieser Arbeit soll der verwendete mathematische Rahmen lediglich bedarfsorientiert beschrieben werden. In diesem Sinne stellen die in diesem Kapitel vorgestellten mathematischen Werkzeuge, Methoden und Konzepte lediglich das „mathematische Frontend“ dar, während auf die Wiedergabe eines sehr detailreichen „mathematischen Backends“ für eine bessere Nachvollziehbarkeit durch ein breites Publikum verzichtet wird.¹ Die nachfolgenden Abschnitte gliedern sich dabei wie folgt: Zunächst werden in Abschnitt 3.1 stochastische Prozesse näher beschrieben. Hierbei wird insbesondere auch auf die beiden Itô-Prozesse geometrisch Brownsche Bewegung (GBM) und Ornstein-Uhlenbeck (OU) eingegangen.² Im darauffolgenden Abschnitt 3.2 wird sich mit der dynamischen Programmierung – als die im Rahmen dieser Arbeit als dominant verwendeten Bewertungsmethode – auseinandergesetzt. Zuletzt erfolgt in Abschnitt 3.3 eine knappe kritische Betrachtung der häufig in der Realloptionsliteratur anzutreffenden

¹Analog wird in den nachfolgenden Kapiteln vorgegangen. Für eine detaillierte Abhandlung zu den hier vorgestellten Konzepten sei beispielhaft auf die folgenden Werke verwiesen: Feichtinger & Hartl (1986), Malliaris & Brock (1999), Taylor & Karlin (1998), Neftci (2000), Shreve (2004), Peskir & Shiryaev (2006), Øksendal (2010) und Bensoussan (2018).

²Das Kürzel GBM für die geometrisch Brownsche Bewegung ist aus dem Englischen „geometric Brownian Motion“ entlehnt.

Annahmen.

3.1 Stochastische Prozesse

Stochastisch bedeutet, dass etwas vom Zufall abhängt. So schwanken beispielsweise Werte von Messgrößen in den verschiedensten Wissenschaftsbereichen zufällig trotz gleicher Versuchsbedingungen. Auch ökonomische Größen, wie Aktienkurse, Rohstoffpreise oder Erfolgsgrößen eines Projekts, können im Zeitablauf zufällig schwanken. All diese Größen besitzen zumindest in Teilen eine stochastische Komponente und können daher als Zufallsgröße oder Zufallsvariable bezeichnet werden (Nickel et al., 1981, S. 290). Ein stochastischer Prozess setzt sich aus Zufallsvariablen zusammen, unterscheidet sich jedoch von der einzelnen Zufallsgröße durch seinen Zustandsraum, den Indexparameter (meistens die Zeit t) und mögliche Abhängigkeitsbeziehungen zwischen den indexierten Zufallsgrößen.³ Generell lässt sich zwischen stochastischen Prozessen mit diskretem sowie stetigem Indexparameter unterscheiden. Auch der Zustandsraum – die Werte die der stochastische Prozess annehmen kann – kann diskret oder aber stetig sein (Karlin & Taylor, 1975, S. 26 ff.). Nachfolgend werden ausschließlich stochastische Prozesse mit einem stetigen reellwertigen Zustandsraum, sowie zeitstetigem Index betrachtet.

3.1.1 Wiener-Prozess

Der Wiener-Prozess W_t , auch unter der Bezeichnung Brownsche Bewegung bekannt, ist ein zeitstetiger stochastischer Prozess. Er bildet einen Grundbaustein für viele stochastische Modelle und wird insbesondere dann verwendet, wenn sich eine Zufallsvariable

³Der stochastische Prozess als Wahrscheinlichkeitsmodell zur Modellierung einer beobachteten Zeitreihe muss von dieser unterschieden werden. Die beobachtete Zeitreihe kann als mögliche Realisation verstanden werden, die aus dem Wahrscheinlichkeitsmodell, dem stochastischen Prozess, generiert werden könnte (Box et al., 2016, S. 6).

stetig und nicht sprunghaft verändert (Neftci, 2000, S. 176). Das Inkrement des Wiener-Prozesses, die Veränderung zwischen zwei Zeitpunkten also, lässt sich für einen infinitesimal kleinen Zeitschritt dt in Differentialschreibweise über

$$dW_t = \epsilon_t \sqrt{dt} \quad (3.1)$$

beschreiben, wobei der Wiener-Prozess per Konvention bei null startet, sodass $W_0 = 0$ (Malliaris & Brock, 1999, S. 36). Hierbei ist $\epsilon_t \sim \mathcal{N}(0, 1)$ eine standardnormalverteilte Zufallszahl mit Erwartungswert null und einer Varianz von eins. Der Erwartungswert des Inkrements dW_t ergibt sich damit als $\mathbb{E}[dW_t] = 0$ und die Varianz lässt sich, unter Berücksichtigung von $\text{Var}[\epsilon_t] = \mathbb{E}[\epsilon_t^2] - (\mathbb{E}[\epsilon_t])^2 = 1$, als $\text{Var}[dW_t] = dt$ ermitteln.⁴ Der Wiener-Prozess zeichnet sich zudem dadurch aus, dass ϵ_t und ϵ_s seriell unkorreliert sind für $s \neq t$ (Dixit & Pindyck, 1994, S. 65, Shreve, 2004, S. 94 ff., Hull, 2015, S. 384 ff.). Dadurch sind auch die Inkremente des Wiener-Prozesses für nicht überlappende Zeiträume unabhängig. Zuletzt besitzt der Wiener-Prozess die Markov-Eigenschaft. Durch diese ist für die Prognose der zukünftigen Entwicklung – für die Erwartungswertbildung – einer solchen Zufallsvariablen nur ihr aktueller Wert nötig. Ihr vergangener Verlauf hingegen spielt für ihre zukünftige Wahrscheinlichkeitsverteilung keine Rolle (Hull, 2015, S. 382). Zur Veranschaulichung sind drei mögliche Pfade des Wiener-Prozesses in Abb. 3.1 a) dargestellt.

⁴Siehe Anhang A.1 für den hier implizit angewendeten Verschiebungssatz. Die Korrelation zwischen Wiener Inkrementen ist in Anhang A.2 zu finden.

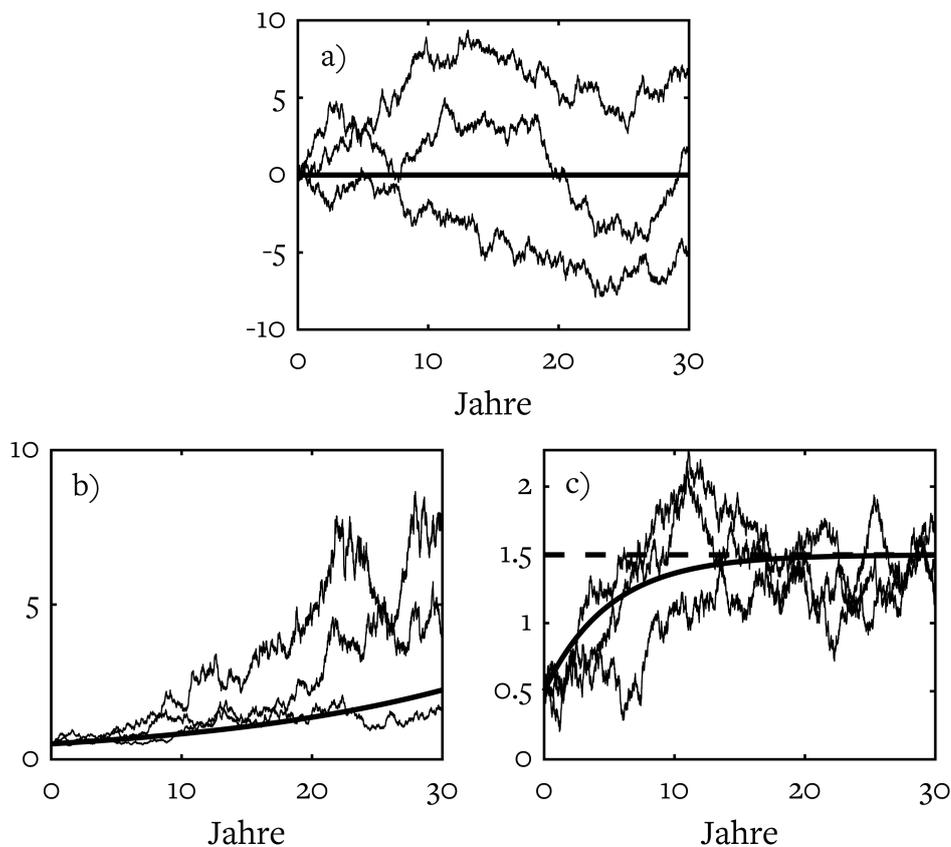


Abbildung 3.1: Simulation von a) Wiener Prozess, b) geometrisch Brownsche Bewegung sowie c) Ornstein-Uhlenbeck Prozess. Für b) und c) sind $\sigma = 0,20$ sowie $x_0 = 0,50$ als Startwert verwendet worden. Zusätzlich ist in b) $\alpha = 0,05$ gesetzt. In c) sind $\eta = 0,20$ sowie $\bar{x} = 1,5$. Die fetten durchgehenden Kurven stellen die Erwartungswerte dar. Die fett gestrichelte Kurve in c) ist das Mean-Reversion Level \bar{x} .

3.1.2 Itô-Prozesse

Für ökonomische Anwendungen reicht es selten aus, die zeitliche Entwicklung einer Zufallsvariablen als reinen Wiener-Prozess zu modellieren. Es ist daher sinnvoll, den Wiener-Prozess um zusätzliche Komponenten zu erweitern. Eine Möglichkeit dafür stellen die Itô-Prozesse dar, welche u. a. stark in finanzmathematischen Modellen der Derivatebewertung vertreten sind. Generell lassen sich solche stochastischen Prozesse mit

der Form

$$dx_t = a(x, t)dt + b(x, t)dW_t \quad (3.2)$$

beschreiben. Hier stellt der erste Term der rechten Seite den zeitlichen Einfluss der Driftrate $a(x, t)$ auf die Zufallsvariable x_t dar (Hull, 2015, S. 388). Dieser Term kann über $\mathbb{E}[dx_t] = a(x, t)dt$ auch als deterministische bzw. erwartete Komponente verstanden werden und gibt das „Soll“ des Prozesses an. Tatsächlich weichen „Soll“ und „Ist“ häufig ab. Die dafür verantwortliche Unsicherheit wird im zweiten Term durch das Wiener-Inkrement induziert. Sein zeitlicher Einfluss auf x_t , und damit die stochastische Abweichung vom „Soll“, wird in seiner Höhe durch die Varianzrate $b(x, t)$ moderiert (Hull, 2015, S. 388).

3.1.2.1 Geometrisch Brownsche Bewegung

Eine spezielle Form des Itô-Prozesses aus Gl. 3.2 ist die geometrisch Brownsche Bewegung (GBM). Die GBM zeichnet sich dabei durch $a(x, t) = \alpha x$ und $b(x, t) = \sigma x$ aus (Øksendal, 2010, S. 65 ff.), sodass sich für diese folgende stochastische Dgl. ergibt:

$$dx_t = \alpha x_t dt + \sigma x_t dW_t. \quad (3.3)$$

Es ist deutlich, dass sowohl die Drift α als auch die Volatilität σ konstant und damit unabhängig von der Zeit sind. Dies vereinfacht nicht nur die Erwartungswertbildung, sondern erlaubt auch eine Lösung der stochastischen Dgl. 3.3 (Kupfer, 2020, S. 97). Entsprechend lässt sich der Erwartungswert eines solchen stochastischen Prozesses, ausgehend von einem gegenwärtig beobachteten Wert $x_0 = x$, mit

$$\mathbb{E}_x[x_t] = xe^{\alpha t} \quad (3.4)$$

angeben.⁵ Die Lösung für die stochastische Dgl. 3.3 ergibt (Wilmott, 2013, S. 132)

$$x_t = xe^{(\alpha - \frac{1}{2}\sigma^2)t + \sigma W_t}. \quad (3.5)$$

⁵Eine mögliche Herleitung dazu ist in Anhang A.3 zu finden.

Aus Gl. 3.5 wird deutlich, dass die GBM keine negativen Werte annehmen kann.⁶ Abschließend sind drei mögliche Pfade der GBM in Abb. 3.1 b) dargestellt.

3.1.2.2 Ornstein-Uhlenbeck Prozess

Neben dem zuvor beschriebenen Itô-Prozess ist ein weiterer stochastischer Prozess im Rahmen dieser Arbeit von Bedeutung: Der Ornstein-Uhlenbeck (OU) Prozess. Dieser lässt sich mit $\chi = \bar{x} = 0$ über

$$dx_t = \eta(\bar{x} - x_t)dt + \sigma x_t^\chi dW_t \quad (3.6)$$

beschreiben. Für $\chi = 0$ und $\bar{x} > 0$ ist Gl. 3.6 auch als Vasicek-Modell und für $\chi = \frac{1}{2}$ und $\bar{x} > 0$ als Cox-Ingersoll-Ross Prozess bekannt (Seydel, 2017, S. 47). Hierbei stellt η die Mean-Reversion Geschwindigkeit dar, \bar{x} ist das Mean-Reversion Level, um welches der Prozess schwankt, und σ beschreibt die Volatilität. Tatsächlich wird häufig nicht zwischen dem Vasicek-Modell und dem OU Prozess unterschieden, sodass der Prozess mit $\chi = 0$ erweitert um eine zusätzliche Drift mit $\bar{x} > 0$ auch einfach als OU Prozess bezeichnet und über

$$dx_t = \eta(\bar{x} - x_t)dt + \sigma dW_t \quad (3.7)$$

beschrieben wird. Nachfolgend wird hier ebenfalls nicht unterschieden. Analog zur GBM ist auch der OU Prozess ein Itô-Prozess aus Gl. 3.2, jedoch mit Drift $a(x, t) = \eta(\bar{x} - x_t)$ und $b(x, t) = \sigma$. Anders als die GBM kann die stochastische Größe x_t auch Werte kleiner null annehmen. Wie zuvor lässt sich hier der Erwartungswert ausgehend vom gegenwärtigen Wert $x_0 = x$ mit

$$\mathbb{E}_x[x(t)] = (x - \bar{x})e^{-\eta t} + \bar{x} \quad (3.8)$$

bestimmen.⁷ Ebenfalls lässt sich eine geschlossene Lösung angeben (Mamon, 2004)

$$x(t) = (x - \bar{x})e^{-\eta t} + \bar{x} + \int_0^t \sigma e^{\eta u} dW_u. \quad (3.9)$$

Abschließend ist auch der OU Prozess in drei Ausprägungen in Abb. 3.1 c) dargestellt.

⁶Diese Eigenschaft lässt sich häufig auch bei Vermögenswerten des Kapitalmarkts, wie z. B. den Aktienkursen, wiederfinden.

⁷Eine mögliche Herleitung des Erwartungswerts ist in Anhang A.4 zu finden

3.1.3 Das Lemma von Itô

Basierend auf stochastischen Zustandsgrößen, die beispielsweise einem der zuvor beschriebenen stochastischen Prozesse folgen, stellt sich die Frage, wie sich von jenen abgeleitete Größen verhalten. Solche Größen können beispielsweise Derivate wie Finanz- oder Realoptionen sein, deren Wert sich aus der stochastischen Entwicklung von Aktienkursen bzw. Projektwerten, zukünftigen Cashflows etc. ableitet. Ausgehend von einem allgemeinen Itô-Prozess für eine stochastische Größe x_t aus Gl. 3.2 lässt sich allgemein die Entwicklung einer abgeleiteten Größe $F(x, t)$, welche zumindest zweifach in x und einfach in t differenzierbar sein muss, bei der Anwendung von Itôs-Lemma ermitteln (Hull, 2015, S. 394 ff.):

$$dF(x, t) = \left(\frac{1}{2} b^2(x, t) \frac{\partial^2 F(x, t)}{\partial x^2} + a(x, t) \frac{\partial F(x, t)}{\partial x} + \frac{\partial F(x, t)}{\partial t} \right) dt + b(x, t) \frac{\partial F(x, t)}{\partial x} dW_t. \quad (3.10)$$

Gl. 3.10 wird dabei als Lemma von Itô in seiner expandierten Form bezeichnet.⁸ Entsprechend ergibt sich für ein Funktional, beispielsweise eine perpetuelle Investitionsoption $F(x)$, deren stochastische Entwicklung durch eine GBM aus Gl. 3.3 getrieben wird, mit $a(x, t) = \alpha x$ und $b(x, t) = \sigma x$

$$dF(x) = \left(\frac{1}{2} \sigma^2 x^2 F''(x) + \alpha x F'(x) \right) dt + \sigma x F'(x) dW_t. \quad (3.11)$$

Die erwartete Änderung $\mathbb{E}[dF(x)]$ ist dabei mit

$$\mathbb{E}[dF(x)] = \left(\frac{1}{2} \sigma^2 x^2 F''(x) + \alpha x F'(x) \right) dt \quad (3.12)$$

⁸Gl. 3.10 ist die expandierte Form von

$$dF(x, t) = \frac{\partial F(x, t)}{\partial t} dt + \frac{\partial F(x, t)}{\partial x} dx + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 F(x, t)}{\partial x^2} (dx)^2.$$

Für $(dx)^2$ ergibt sich

$$(dx)^2 = b^2(x, t) dt,$$

da Terme höherer Ordnung in dt , wie $a^2(x, t)(dt)^2$ und $2a(x, t)b(x, t)(dt)^{3/2}$, schneller gegen null konvergieren wenn dt infinitesimal klein wird (Dixit & Pindyck, 1994, S. 80). Entsprechend brauchen diese Terme nicht weiter berücksichtigt werden.

⁹Da die Option hier zeitlich unbeschränkt ist, spielt die Zeitkomponente keine Rolle mehr, sodass $F(x)$. Zudem wird in der Literatur für den Fall einer univariaten Funktion $F(x)$ deren erste und zweite Ableitung mit $F'(x)$ sowie $F''(x)$ notiert.

zu bestimmen. Analog lässt sich Itô's-Lemma in Situationen anwenden, in welchen der stochastische Werttreiber x_t über den OU Prozess aus Gl. 3.7 beschrieben ist. Hier ergeben sich für das Beispiel der perpetuellen Investitionsoption für die stochastische Dgl. $dF(x)$, mit $a(x, t) = \eta(\bar{x} - x)$ sowie $b(x, t) = \sigma$

$$dF(x) = \left(\frac{1}{2} \sigma^2 F''(x) + \eta(\bar{x} - x) F'(x) \right) dt + \sigma F'(x) dW_t, \quad (3.13)$$

und den Erwartungswert $\mathbb{E}[dF(x)]$

$$\mathbb{E}[dF(x)] = \left(\frac{1}{2} \sigma^2 F''(x) + \eta(\bar{x} - x) F'(x) \right) dt. \quad (3.14)$$

3.2 Dynamische Programmierung und Investitionsentscheidungen

Die dynamische Programmierung ist ein nützliches Verfahren, wenn es darum geht, systematisch die optimale Kombination in einer Abfolge von zusammenhängenden Entscheidungen zu finden (Hillier & Lieberman, 2002, S. 533). Der Vorteil des Ansatzes besteht darin, dass ein komplexes, mehrstufiges Ausgangsproblem in eine Sequenz von einfacheren Problemen umgewandelt wird. Dabei ist festzuhalten, dass sich die dynamische Programmierung weniger auf ein bestimmtes Problem beschränkt, sondern vielmehr einen allgemeinen Ansatz zur Problemlösung darstellt, wobei die mathematische Formulierung auf das (geeignete) Problem zugeschnitten werden muss (Bradley et al., 1977, S. 320).¹⁰ Hierbei folgt der Ansatz dem vom Begründer der dynamischen Programmierung, Richard Bellman, treffend formulierten Optimalitätsprinzip:

„An optimal policy has the property that whatever the initial state and initial decision are, the remaining decisions must constitute an optimal policy with regard to the state resulting from the first decision.“

– Bellman (1972, S. 83)

¹⁰Bei dem zitierten Werk handelt es sich um die online verfügbare, neu gesetzte Version. Aufgrund der neu gesetzten Schriftzeilen kann die zitierte Seite von der äquivalenten Seite in der gedruckten Version abweichen.

Dieses Prinzip lässt sich anhand eines einfachen Arguments aus Cormen et al. (2009, S. 378 ff.) verdeutlichen. Betrachtet werden soll ein ungewichtetes kürzeste Wege Problem $A \xrightarrow{p} B$ mit Punkten $A \neq B$ und Pfad p . Ferner soll ein Punkt X zwischen A und B existieren, sodass $A \xrightarrow{p_1} X \xrightarrow{p_2} B$. Angenommen p ist der kürzeste Weg, dann folgt daraus, dass auch p_1 für Teilproblem $A \xrightarrow{p_1} X$ und p_2 für Teilproblem $X \xrightarrow{p_2} B$ die kürzesten Wege und damit optimal sein müssen. Wäre p_1 keine optimale Teillösung und würde damit eine bessere Alternative p'_1 existieren, dann kann p bereits in erster Instanz nicht der kürzeste Pfad sein, was der zuvor getroffenen Annahme widerspricht. Demnach setzt sich die optimale Lösung zu einem (geeigneten) Problem aus optimalen Lösungen für die zugehörigen Teilprobleme zusammen bzw. beinhaltet diese.¹¹

Um das beschriebene Optimalitätsprinzip der dynamischen Programmierung anzuwenden, wird i. d. R. mittels Rückwärtsinduktion gearbeitet. Demnach wird von einer finalen Stufe T ausgehend, wo T z. B. den finalen Zeitpunkt darstellt, das betrachtete Problem rückwärts für die Stufen $T - t$ mit $t = 0, 1, 2, \dots, T$ über die jeweils einstufigen Subprobleme gelöst (Bradley et al., 1977, S. 328). Diese Vorgehensweise spiegelt sich in der Bellman Gleichung wieder. Aus Dixit & Pindyck (1994, S. 101) lässt sich diese in einer für ökonomische Problemstellungen geeigneten Form¹²

$$F(x) = \max_u \left(\pi(x, u) + \frac{1}{1+r} \mathbb{E}_{x,u}[F(x')] \right) \quad (3.15)$$

darstellen. Hier beschreiben $\pi(x, u)$ den instantanen Profitzufluss, $\frac{1}{1+r}$ die periodenadjustierte Diskontierung und $\mathbb{E}_{x,u}[F(x')]$ ein Wertfunktional. Letzteres, auch als Fortführungswert bezeichnet, ist bedingt auf Zustand x und die gewählte Steuerung u und subsumiert den Wert aller nachgelagerten Entscheidungen in sich.

¹¹Cormen et al. (2009, S. 378 ff.) weisen jedoch auch auf die zwei Schlüsselemente für die Anwendung der dynamischen Programmierung hin: Es müssen eine optimale Substruktur sowie überlappende Subprobleme vorliegen. Eine optimale Substruktur bedeutet, dass eine optimale Lösung zu einem Problem bereits alle optimalen Lösungen zu den dazugehörigen Teilproblemen in sich trägt. Am Beispiel des kürzeste Wege Problems wird dies bereits aus der Argumentationsstruktur über die Optimalität des Weges p deutlich. Überlappende Subprobleme bedeutet, dass immer die gleichen Subprobleme rekursiv gelöst werden, ohne dass stets komplett neue Subprobleme erzeugt werden. Während man analog zum kürzeste Wege Problem durchaus geneigt sein könnte, anzunehmen, dass sich die dynamische Programmierung z. B. auch auf das längste Wege Problem anwenden lässt, ist dies aufgrund der hier fehlenden optimalen Substruktur nicht möglich.

¹²Hier wird neben dem unbegrenzten Zeithorizont implizit auch angenommen, dass die Profitfunktion $\pi(x, u) = \pi_t(x, u)$, der Diskontsatz $r = r_t$ sowie die Übergangswahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion $\Phi(x'|x, u) = \Phi_t(x'|x, u)$ in der Erwartungswertbildung zeitunabhängig sind, was in vielen ökonomischen Anwendungen zutrifft oder angenommen wird Dixit & Pindyck (1994, S. 101).

In Gl. 3.15 sind die Zustände $x = x_t$ und $x' = x_{t+1}$ bereits in einer allgemeinen Schreibweise formuliert. Entsprechend ist die in Gl. 3.15 verwendete Bellman-Gleichung für einen unendlichen Zeithorizont mit $T \rightarrow \infty$ formuliert, da ausschließlich solche Problemstellungen in späteren Kapiteln modelliert werden. Durch den unendlichen Zeithorizont wird das Problem zeitunabhängig, sodass die Wertfunktion $F(x_t) = F_t(x_t)$ und damit der Zeitindex überflüssig wird. Demnach ist die Wertfunktion hier an sich stationär, jedoch ändert sich der Funktionswert für verschiedene Zustände x . Der Begriff der Wertfunktion (engl. Value Function) ist dabei der Interpretation im ökonomischen Kontext geschuldet (Bensoussan, 2018, S. 225).

Gl. 3.15 zeigt dabei deutlich das Optimalitätsprinzip und den rekursiven Charakter der dynamischen Programmierung: Egal welcher aktuelle Zustand x vorliegt und welche Steuerentscheidung u zu Beginn getroffen werden, die nachgelagerten Entscheidungen sind ausgehend von x und u über $\mathbb{E}_{x,u}[F(x')]$ optimal abgestimmt. Dabei rekuriert $F(x)$ auf Problem $\mathbb{E}_{x,u}[F(x')]$ der nachgelagerten Stufe (Hillier & Lieberman, 2002, S. 540). Im Rahmen dieser Arbeit wird insbesondere eine zeitstetige Modellierung der Entscheidungssituationen in späteren Kapiteln vorgenommen. Vor diesem Hintergrund ist es sinnvoll, Gl. 3.15 in Anlehnung an Dixit & Pindyck (1994, S. 104 ff.) allgemein zu verketten. Dies gelingt, indem zunächst jede Stufe mit einer Länge Δt betrachtet wird, sodass

$$F(x, t) = \max_u \left(\pi(x, u, t) \Delta t + \frac{1}{1 + r \Delta t} \mathbb{E}_{x,u}[F(x', t + \Delta t)] \right).$$

Durch Umstellen und mit $\Delta F = F(x', t + \Delta t) - F(x, t)$ ergibt sich daraus für $\Delta t \rightarrow 0$

$$rF(x, t) = \max_u \left(\pi(x, u, t) + \frac{1}{dt} \mathbb{E}[dF] \right). \quad (3.16)$$

Hierbei ist zu beachten, dass $\pi(x, u, t)$ nun vielmehr einen kontinuierlichen Profitfluss darstellt. Analog dazu stellt $rF(x, t)$ einen kontinuierlichen Wertzufluss dar und r damit eine kontinuierliche Verzinsung. Analog zu Gl. 3.15 lässt sich auch hier für $T \rightarrow \infty$ die Zeitabhängigkeit eliminieren.

3.2.1 Optimal Stopping

Als bestimmte Problemklasse in Bezug auf die dynamische Programmierung können die optimalen Stoppprobleme herausgegriffen werden. Hier muss zu jedem Zeitpunkt die

binäre Entscheidung getroffen werden, ob ein Prozess zeitlich fortgeführt oder gestoppt wird, sodass die Bellman-Gleichung die Form

$$F(x) = \max \left(\Omega(x), \pi(x) + \frac{1}{1+r} \mathbb{E}_x[F(x')] \right) \quad (3.17)$$

annimmt (Dixit & Pindyck, 1994, S. 103).¹³ Gl. 3.17 lässt sich vor einem investitionsplanerischen Hintergrund einfach interpretieren: $\Omega(x)$ stellt den Wert der sofortigen Investition bzw. den Nettokapitalwert dar, wohingegen $\pi(x) + \frac{1}{1+r} \mathbb{E}_x[F(x')]$ den Wert des z. B. Aufschubs der Investition darstellt. Da der Entscheidungsprozess sofort abgebrochen wird, sobald $\Omega(x) \geq \pi(x) + \frac{1}{1+r} \mathbb{E}_x[F(x')]$, wird für $\Omega(x)$ auch der Begriff des Abbruchwerts (engl. Termination Payoff) verwendet. Im Umkehrschluss kann für $\pi(x) + \frac{1}{1+r} \mathbb{E}_x[F(x')]$ wie zuvor der Begriff des Fortführungswerts (engl. Continuation Value) benutzt werden.

Das in Gl. 3.17 formulierte Stoppproblem hat für die im Rahmen dieser Arbeit als GBM und OU Prozess modellierten Zustandsgrößen einen eindeutigen Schwellenwert x^* (Peskir & Shiryaev, 2006, Kap. IV 10. & VII 25.; Dixit & Pindyck, 1994, S. 104 & Kap. 4 App. B). Dieser trennt Stopp- und Fortführungsregion voneinander. Demnach kann Gl. 3.17, z. B. für den Fall einer Investitionsmöglichkeit, intuitiv umformuliert werden¹⁴

$$F(x) = \begin{cases} \pi(x) + \frac{1}{1+r} \mathbb{E}_x[F(x')], & \text{für } x < x^* \\ \Omega(x), & \text{für } x^* \leq x. \end{cases} \quad (3.18)$$

Wenn $x \geq x^*$, wird das betrachtete Problem gestoppt und der Entscheider investiert. Netto bekommt er im Gegenzug für seine Investitionsausgaben den Abbruchwert $\Omega(x)$.¹⁵ Ist $x < x^*$, wird das Problem aufrecht erhalten und der Entscheider bekommt den Fortführungswert. Schlussendlich lässt sich Gl. 3.18 unter Verstetigung der Zeit mittels Gl. 3.16 für den Fall eines unendlichen Zeithorizonts formulieren

$$F(x) = \begin{cases} \frac{1}{r} \left(\pi(x) + \frac{1}{dt} \mathbb{E}[dF] \right), & \text{für } x < x^* \\ \Omega(x), & \text{für } x^* \leq x. \end{cases} \quad (3.19)$$

¹³Das Problem $\max_{\mu}(\cdot)$ der Wahl einer Steuerung μ , lässt sich hier auf das einfache Maximum von sich ausschließenden Alternativen überführen.

¹⁴An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die entwickelten Gln. 3.17 und 3.19 für die Aufschuboption bzw. Option to Invest formuliert sind.

¹⁵Die Investitionsausgaben I sind bereits Teil des Abbruchwerts. Wenn der Entscheider zu einem z. B. Erlöslevel x^* investiert, um einen Projektwert $V(x)$ zu erhalten, bleiben ihm netto $\Omega(x) = V(x) - I$.

3.2.2 Die Aufschuboption - Das kanonische Realloptionsmodell

Das kanonische Realloptionsmodell ist eine Vereinfachung des von McDonald & Siegel (1985) vorgestellten Modells und ist in Teilen bereits dort beschrieben. Es soll an dieser Stelle essenzielle Bestandteile der Realloptionslogik bzw. von Investitionsentscheidungen unter Unsicherheit verdeutlichen.

Je nach Sichtweise lässt sich das kanonische Realloptionsmodell mit der Investition in einen unsicheren Projektwert V , selbst beschrieben durch eine GBM, darstellen, sodass die Investitionsmöglichkeit $F(V)$ betrachtet wird. Jedoch lässt es sich auch über eine vorgelagerte Modellierungstiefe direkt mit unsicheren Erlösen x , die durch eine GBM beschrieben werden, entwickeln, sodass der Wert Investitionsmöglichkeit $F(x)$ direkt von x getrieben wird. Während die erste genannte Variante in Dixit & Pindyck (1994, Kap. 5) zu finden ist, wird die zweite Variante in Dixit & Pindyck (1994, Kap. 6) beschrieben. Nachfolgend wird die zweite Variante in Anlehnung an Dixit & Pindyck (1994, Kap. 6) entwickelt. Für die Behandlung des kanonischen Realloptionsmodells sei an dieser Stelle auch auf Kupfer (2020, S. 112 ff.) verwiesen.

Es soll die folgende Entscheidungssituation betrachtet werden: Ein Unternehmen hat die Möglichkeit, in ein perpetuelles Projekt $V(x)$ zu investieren, dessen Erlöse x_t einer GBM der Form

$$dx_t = \alpha x_t dt + \sigma x_t dW_t \quad (3.20)$$

folgen. Wie bereits in vorangegangenen Abschnitten formuliert, stellen α die Drift und σ , als Maß für Unsicherheit, die Volatilität dar. Ferner sollen die Investitionsmöglichkeit zeitlich unbegrenzt und die Investitionsausgaben I irreversibel sein.¹⁶ Zudem soll das Unternehmen die Investitionsentscheidung aufschieben können, risikoneutral sein und die risikolose Diskontrate r benutzen.¹⁷ Auch operative Kosten sollen an dieser Stelle unbeachtet bleiben, sodass der Erlös im Sinne eines positiven Cashflows interpretiert werden kann.

Basierend auf der beschriebenen Entscheidungssituation wird zunächst der erwartete

¹⁶McDonald & Siegel (1986) weisen bereits darauf hin, dass diese Annahme durch z. B. die Erweiterung der GBM in Gl. 3.20 durch eine Sprungkomponente mit „Sudden Death“ Charakter erweitert werden könnte. In diesem Fall wäre die Investitionsmöglichkeit zwar immer noch zeitlich unbegrenzt, jedoch würde nach endlicher Zeit ein Sprung auftreten, der die Erlöse x_t auf null setzt, und damit implizit eine unsichere Endzeit für die Investitionszeit bewirkt.

¹⁷Während in den Ausführungen zur dynamischen Programmierung zuvor r eine beliebige, den Präferenzen des Entscheiders entsprechende Verzinsung darstellt, wird durch die Annahme der Risikoneutralität r gleich der risikolosen Verzinsung gesetzt.

Projektwert $V(x)$ konditional auf einen betrachteten Anfangszustand $x = x_0$ ermittelt

$$V(x) = \mathbb{E}_x \left[\int_0^\infty x_t e^{-rt} dt \right] = \frac{x}{r - \alpha}, \quad (3.21)$$

wobei implizit $r > \alpha$ angenommen wird.¹⁸ Das hier beschriebene Entscheidungsproblem kann nun als Stoppproblem im Sinne von Unterabschnitt 3.2.1 interpretieren werden. Es stellt sich aus Sicht des Unternehmens die Frage, wann es seine Warteposition verlassen soll, um für $x \geq x^*$ sofort zu investieren und den Abbruchwert $\Omega(x) = V(x) - I$ zu erhalten. Demnach kann der Wert der Investitionsmöglichkeit über Gl. 3.19 treffend formuliert werden:¹⁹

$$F(x) = \begin{cases} \frac{1}{r} \mathbb{E}[dF], & \text{für } x < x^* \\ V(x) - I, & \text{für } x^* \leq x. \end{cases} \quad (3.22)$$

Hierbei wurde $\pi(x) = 0$ gesetzt, da das Unternehmen erst bei Zahlung von I Zugang zum Erlösstrom x erhält und somit innerhalb der Fortführungsregion keine Zahlungen anfallen. Für die vollständige Beschreibung der Entscheidungssituation fehlt nun lediglich das Wertfunktional $F(x)$ für $x < x^*$, das oft als Aufschuboption (engl. Option to Defer oder äquivalent Option to Invest) bezeichnet wird. Unter Anwendung von Itô's-Lemma auf $\mathbb{E}[dF]$ in $rF(x)dt = \mathbb{E}[dF]$ ergibt sich nach Umstellen die homogene gewöhnliche Dgl.²⁰

$$\frac{1}{2} \sigma^2 x^2 F''(x) + \alpha x F'(x) - rF(x) = 0 \text{ für } x < x^*. \quad (3.23)$$

Über die generelle Form der Ansatzfunktion $F(x) = Ax^\beta$ ergibt sich durch Einsetzen in Dgl. 3.23 für die Nullstellen $\beta_{1,2}$ der resultierenden fundamentalen quadratischen Gleichung $Q = 1/2\sigma^2\beta(\beta - 1) + \alpha\beta - r = 0$

$$\beta_{1,2} = \frac{1}{2} - \frac{\alpha}{\sigma^2} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{\sigma^2}\right)^2 + \frac{2r}{\sigma^2}}. \quad (3.24)$$

Der Optionswert ergibt sich nun als $F(x) = A_1 x^{\beta_1} + A_2 x^{\beta_2}$, wobei $\beta_1 > 1$ und $\beta_2 < 0$. Um den Optionswert im Bereich $x < x^*$ zu finden, sind neben einer Gleichung für

¹⁸Siehe auch Anhang B.2 für die Herleitung des Projektwerts $V(x)$.

¹⁹Auch an dieser Stelle soll nochmals der Hinweis erfolgen, dass die Verzinsung r beliebig vom Entscheider gewählt werden kann. Sie entspricht nur aufgrund der Annahme von Risikoneutralität hier der risikolosen Verzinsung.

²⁰Siehe auch Anhang B.3.

x^* zwei weitere Gleichungen für die Konstanten A_1 und A_2 nötig. Damit das daraus resultierende Gleichungssystem eindeutig bestimmt ist, werden drei Randbedingungen benötigt:

$$F(x^*) = V(x^*) - I = \frac{x^*}{r - \alpha} - I, \quad (3.25)$$

$$F'(x^*) = V'(x^*) = \frac{1}{r - \alpha}, \quad (3.26)$$

$$F(x = 0) = 0. \quad (3.27)$$

Die erste Bedingung wird als „Value Matching“ bezeichnet. Sie stellt sicher, dass die Wertfunktion $F(x)$ am Übergang zwischen den beiden Bereichen des Stoppens und des Fortführens identisch ist. Die zweite Bedingung ist die „Smooth Pasting“-Bedingung. Diese stellt die Optimalität der Lösung sicher.²¹ Zuletzt stellt Gl. 3.27 sicher, dass die Option nach unten wertmäßig beschränkt ist, sodass wegen $\beta_2 < 0$ automatisch $A_2 = 0$ gesetzt werden muss. Mit $A_2 = 0$ wird aus Gl. 3.25 direkt ersichtlich, dass $A_1 = \left(\frac{x^*}{r - \alpha} - I\right)x^{*\beta_1}$. Schlussendlich ergibt sich der optimale Investitionsschwellenwert x^* zu

$$x^* = \frac{\beta_1}{\beta_1 - 1}(r - \alpha)I \quad (3.28)$$

und damit für die Investitionsmöglichkeit aus Gl. 3.22

$$F(x) = \begin{cases} \left(\frac{x^*}{r - \alpha} - I\right)\left(\frac{x}{x^*}\right)^{\beta_1}, & \text{für } x < x^* \\ \frac{x}{r - \alpha} - I, & \text{für } x^* \leq x. \end{cases} \quad (3.29)$$

Die final ermittelte Gl. 3.29 verkörpert den Kern der Realloptionslogik: Die Option schützt auf der einen Seite vor schlechten Erlösentwicklungen während, sie auf der anderen Seite dem Unternehmen ermöglicht, von positiven Erlösentwicklungen zu profitieren.²² Dabei speist sich der Wert insbesondere durch die Berücksichtigung von zukünftigen aktiven Handlungsspielräumen. Während das Unternehmen seine Entscheidung, sofort zu investieren, nur auf Erwartungen über die zukünftige Erlösentwicklung basieren kann, besteht durch die Flexibilität zu Warten, die Möglichkeit

²¹Für die Behandlung von Value Matching und Smooth Pasting sei auf die ausführliche Darstellung in Dixit & Pindyck (1994, Kap. 4 & Kap. 5) verwiesen.

²²Ist bspw. im schlechtesten Fall der Erlös $x = 0$, so ist $F(0) = 0$. Würde hingegen der Kapitalwert betrachtet, so würde der Totalverlust mit $-I$ realisiert.

Unsicherheit aufzulösen und auf eingetretene Eventualitäten zu reagieren (Dixit & Pindyck, 1994, S. 98).²³ Wäre das Warten kostenlos, so würde es sich nie lohnen, die Warteposition zu verlassen und damit $x^* \rightarrow \infty$. Tatsächlich entstehen dem Unternehmen in der Warteposition Kosten. Diese Kosten sind die entgangenen Erlöse, die das Unternehmen im aktiven Projekt haben könnte. Diese Opportunitätskosten sind u. a. dafür ausschlaggebend, dass ein endlicher Schwellenwert x^* existiert und die Option überhaupt ausgeübt wird.²⁴

Im früheren Abschnitt 2.6 wurde bereits der Wert der Handlungsflexibilität bzw. der Flexibilitätswert formal eingeführt. Nun lässt er sich im Rahmen des kanonischen Realoptionsmodells für $x < x^*$ konkret über

$$\text{Flexwert} = \left(\frac{x^*}{r - \alpha} - I \right) \left(\frac{x}{x^*} \right)^{\beta_1} - \left(\frac{x}{r - \alpha} - I \right) \quad (3.31)$$

beschreiben. Der Flexibilitätswert erreicht bei $x = 0$ sein Maximum und schützt das Unternehmen vor dem Totalverlust I für ein komplett fehlgeschlagenes Projekt. Hier wird $\text{Flexwert} = I$ und es resultiert damit ein Optionswert $F(x = 0) = 0$. Der Flexibilitätswert verringert sich dabei stetig, bis für ausreichend große $x \geq x^*$ schließlich $\text{Flexwert} = 0$ und das aktive Projekt der Warteposition vorgezogen wird.

Auch der Vergleich mit dem „naiven“ Schwellenwert der Nettokapitalwertmethode ist

²³Siehe auch Unterabschnitt 2.2.2. Zudem wird der Wert zu Warten auch über Jensens Ungleichung deutlich. So ist analog zu McDonald & Siegel (1985) der Payoff der hier betrachteten Option to Invest $\max(V(x_t) - I, 0)$ konvex, sodass

$$\mathbb{E}_0[\max(V(x_t) - I, 0)] \geq \max(\mathbb{E}_0[V(x_t)] - I, 0). \quad (3.30)$$

Entsprechend kann die Entscheidung, sofort zu investieren, nur über den erwarteten sofortigen Pay-off, den Nettokapitalwert bzw. den inneren Wert $\mathbb{E}_0[V(x_t)] - I$ im Vergleich zur Nullreferenz erfolgen (das herkömmliche Kapitalwertkriterium; „Investiere, wenn $\mathbb{E}_0[V(x_t)] - I \geq 0$ “). Durch das hier fehlende Maximum in der Erwartungswertbildung selbst, welches die eigentliche Handlungsflexibilität des Optionsinhabers widerspiegelt, fußt die Entscheidung auf allen wahrscheinlichkeitsgewichteten Eventualitäten (alle möglichen Werte von $V(x_t)$). Tatsächlich würden jedoch nicht alle diese Eventualitäten realisiert, wenn der Entscheider die Möglichkeit zu Warten hat und somit einen Teil der Unsicherheit auflösen kann. Die Beschneidung um die unvorteilhaften Eventualitäten ist in $\mathbb{E}_0[\max(V(x_t) - I, 0)]$ enthalten. Für den Fall der kostenlosen Aufrechterhaltung der Option wäre $\mathbb{E}_0[\max(V(x_t) - I, 0)] > \max(\mathbb{E}_0[V(x_t)] - I, 0)$, sodass nie ausgeübt würde.

²⁴In Analogie zu Finanzoptionen kann die hier beschriebene Situation auch als amerikanische Call Option auf eine Dividenden zahlende Aktie interpretiert werden. Während die Call Option lediglich erlaubt, die Aktie zu erwerben, ermöglicht sie keinen Zugang zu den Dividenden. Erst der Besitz der Aktie selbst ermöglicht dies. Die Dividenden sind demnach die Opportunitätskosten, die für die Aufrechterhaltung der Option und damit Warteposition entstehen. Entsprechend kann es auch bei amerikanischen Call Optionen auf Aktien optimal sein, diese vorzeitig auszuüben (Hull, 2015, S. 319 & 430 ff.).

sinnvoll. Dieser ergibt sich aus $\frac{x_{KW}}{r-\alpha} - I \stackrel{!}{=} 0$ mit

$$x_{KW} = (r - \alpha)I. \quad (3.32)$$

Da $\frac{\beta_1}{\beta_1-1} > 1$ für im Rahmen ökonomischer Anwendungen sinnvolle Parameterkonstellationen, ergibt sich automatisch $x^* > x_{KW}$. Damit ist die naive Anwendung der Entscheidungslogik der Nettokapitalwertmethode mit suboptimalem Verhalten verbunden. Richtig wäre, den Kapitalwert um den Flexibilitätswert zu erweitern (Trigeorgis, 2001). Demnach muss bei sofortiger Investition nicht nur I gezahlt, sondern auch der Flexibilitätswert im Sinne von Opportunitätskosten berücksichtigt werden, sodass sich effektive irreversible Investitionskosten von $I + \text{Flexwert}$ ergeben. Demnach ist $\frac{x'_{KW}}{r-\alpha} - (I + \text{Flexwert}(x^*)) \stackrel{!}{=} \frac{x^*}{r-\alpha} - I$ das korrekte Kriterium, welches jedoch Kenntnis des Flexibilitätswerts voraussetzt. Hieraus ergibt sich schließlich

$$x'_{KW} = x^*. \quad (3.33)$$

Der Vollständigkeit halber soll an dieser Stelle zuletzt auf andere Schreibweisen des in Gl. 3.22 formulierten Stoppproblems eingegangen werden. So lässt sich der Wert der Aufschuboption auch über folgende Stopp- und Maximierungsprobleme formulieren (siehe auch McDonald & Siegel (1986), Dixit & Pindyck (1994, S. 137), Peskir & Shiryaev (2006, S. 375 ff.) sowie Guerra et al. (2018)):

$$F(x) = \sup_{\tau} \mathbb{E}_x \left[\int_{\tau}^{\infty} x_t e^{-rt} dt - I e^{-r\tau} \right] \quad (3.34)$$

$$= \max_{x_{t'}} \mathbb{E}_x \left[\left(\frac{x_{t'}}{r-\alpha} - I \right) e^{-rt'} \right] \quad (3.35)$$

In Gl. 3.34 wird das Supremum dabei über alle Stoppzeiten τ der GBM für x aus Gl. 3.20 gebildet. Die optimale Stoppzeit ist dabei über $\tau^* = \inf\{t \geq 0 : x^* \leq x\}$ definiert (Lukas & Thiergart, 2019). Gl. 3.34 lässt sich in ein Free Boundary Problem überführen, in welchem, korrespondierend zu einer optimalen Stoppzeit τ^* , nach einem optimalen Schwellenwert x^* gesucht wird. Dies soll an dieser Stelle nicht im Detail aufgezeigt werden.²⁵ Vielmehr soll der Fokus auf Gl. 3.35 liegen.

Gl. 3.35 kann unter Einsatz des in Gl. 3.29 ermittelten Optionswerts für $x < x^*$ dazu ge-

²⁵Für den interessierten Leser sei auf Peskir & Shiryaev (2006, S. 375 ff.) verwiesen.

nutzt werden, den stochastischen Diskontfaktor, im Gegensatz zu z. B. Dixit & Pindyck (1994, Kap. 9 Anhang), intuitiv und weniger technisch zu entwickeln. Gl. 3.35 ist dabei analog zu Gl. 2 $\mathbb{E}_0[(V_{t'} - I)e^{-rt'}]$ aus McDonald & Siegel (1986) aufgebaut. Da wie zuvor die Option zeitlich nicht beschränkt ist, kann es nur einen konstanten Schwellenwert x^* geben, sodass Gl. 3.35 umformuliert werden kann

$$\begin{aligned} F(x) &= \max_{x_{t'}} \left(\frac{x_{t'}}{r - \alpha} - I \right) \mathbb{E}_x \left[e^{-rt'} \right] \\ &= \left(\frac{x^*}{r - \alpha} - I \right) \mathbb{E}_x \left[e^{-rt'} \right]. \end{aligned} \quad (3.36)$$

Abschließend ergibt ein Koeffizientenvergleich von Gl. 3.36 mit Gl. 3.29 im Bereich $x < x^*$ für den stochastischen Diskontfaktor

$$\mathbb{E}_x \left[e^{-rt'} \right] = \left(\frac{x}{x^*} \right)^{\beta_1}. \quad (3.37)$$

Der stochastische Diskontfaktor gibt dabei dem Optionswert in Gl. 3.29 folgende Interpretation: Der Wert der Aufschuboption ist der wahrscheinlichkeitsgewichtete diskontierte Payoff bei optimaler Ausübung.

3.3 Betrachtung häufiger Annahmen in Realoptionsmodellen

Die in der Realoptionsliteratur vorgestellten Modelle zeichnen sich durch eine Vielzahl von Annahmen aus, mit denen sich vorab vertraut gemacht werden muss, um die Ergebnisse besser einordnen zu können. Einige dieser Annahmen sollen nachfolgend näher betrachtet werden. Ausgangspunkt soll hierzu zunächst der generelle Bewertungsansatz sein; nämlich zum einen der kapitalmarktorientierte Ansatz der bedingten Ansprüche (engl. Contingent Claims) sowie andererseits der Ansatz der dynamischen Programmierung. Während die Funktionsweise des Ersteren bereits in Unterabschnitt 2.2.2 grundlegend skizziert wurde, ist der Zweitere im Rahmen des Abschnitts 3.2 dieses Kapitels entwickelt worden. In beiden Fällen wurden dazu jeweils Ausführungen zum Annahmenkosmos möglichst begrenzt, um die Methodik an sich in den Vordergrund zu stellen.

Um in Unterabschnitt 2.2.2 die Optionsbewertung vornehmen zu können, werden in erster Linie vollkommene sowie vollständige Kapitalmärkte vorausgesetzt und damit generell bei Anwendung der Methodik, egal ob zeitdiskret mittels Binomialbaumlogik im Cox et al. (1979) Modell oder zeitstetig wie im Nobelpreis-prämierten Black & Scholes (1973) Modell, implizit angenommen.²⁶ Durch die Annahme solcher Kapitalmärkte kann es für jedes Asset, wie z. B. Derivate wie Optionen oder Futures, nur einen „richtigen“ Preis geben – Gesetz des Einheitspreises (Laux, 2006, S. 121). Jeder Marktteilnehmer verfügt über sämtliche Informationen, was wiederum bei homogenen Erwartungen aller Marktteilnehmer und der Möglichkeit, jeden Zahlungsstrom zu replizieren, zwangsläufig zur Arbitragefreiheit führt.²⁷ Entsprechend impliziert die Bewertung mittels Contingent Claims eine arbitragefreie Bepreisung (Hull, 2015, S. 372).

Am konkreten Beispiel in Unterabschnitt 2.2.2 wurde dabei auch in vereinfachter Weise der Maßwechsel von einem realen Wahrscheinlichkeitsmaß hin zu einem risikoneutralen Wahrscheinlichkeitsmaß gezeigt. Dadurch konnte die Bewertung aus der realen Welt mit realen Wahrscheinlichkeiten und risikoadjustierten Diskontsätzen in eine risikoneutrale Welt mit risikolosen Diskontsätzen überführt werden, was den Kern der risikoneutralen Bepreisung darstellt. Es ist jedoch festzuhalten, dass ein solcher Maßwechsel nur dann eindeutig ist, wenn die Kapitalmärkte vollkommen und vollständig bzw. arbitragefrei sind (Ewald et al., 2017). Nur so ist auch der ermittelte (Options-)Preis eindeutig (Laux, 2006, S. 130 ff.).

Während der Contingent Claims Ansatz sich historisch aus Forschungssträngen um die Bewertung von Finanzoptionen herum entwickelt hat, wurde dieser Ansatz, und damit seine impliziten Kapitalmarktannahmen, über den Analogiegedanken auch auf die Bewertung von Realoptionen übertragen. Jedoch muss die Annahme solcher Kapitalmärkte regelmäßig infrage gestellt werden; insbesondere wenn es um reale Investitionsvorhaben geht (Willershausen, 2008, S. 26). Solche realen Investitionsvor-

²⁶Willershausen (2008, S. 24) beschreibt die Eigenschaften solcher Kapitalmärkte. So zeichnen sich vollkommene Kapitalmärkte im Wesentlichen durch rationale Marktteilnehmer, vollständige Konkurrenz, einheitliche Marktzinsen, Abwesenheit von Kosten für Transaktionen, Informationsbeschaffung sowie von Steuern und durch homogene Erwartungen in Bezug auf das Risiko bzw. die Wahrscheinlichkeitsverteilungen von bewertungsrelevanten Marktgrößen aus. Unter Vollständigkeit der Kapitalmärkte wird die Möglichkeit verstanden, dass jeder Zahlungsanspruch repliziert werden kann.

²⁷Das in Unterabschnitt 2.2.2 als risikolos konstruierte Portfolio aus Asset und Option erzielt die risikolose Verzinsung nur in Abwesenheit von Arbitragemöglichkeiten (Hull, 2015, S. 372). Wäre aufgrund von Arbitragemöglichkeiten effektiv ein höherer Wert des Portfolios realisierbar, so würde die risikolose Verzinsung überstiegen.

haben (mit Handlungsspielräumen) – Realooptionen – sind häufig nicht marktgehandelt (Welling et al., 2015). Liegen also unvollständige und unvollkommene Kapitalmärkte vor, so lässt sich am Beispiel der Option ihr Payoff nicht mehr eindeutig über ein Portfolio von Wertpapieren replizieren. Entsprechend greift das Arbitrageargument nicht mehr und es lässt sich lediglich eine Preisspanne ermitteln (El Karoui & Quenez, 1995).

Wenn sich also die Kapitalmärkte, um die Preisambiguität zu vermeiden, nicht zumindest als annähernd vollkommen und vollständig annehmen lassen, sodass „[...] spanning [Replikation bzw. der Contingent Claims Ansatz] does not hold, dynamic programming can still be used to maximize the present value of the firm’s expected flow of profits, using an arbitrary discount rate. (Note that in such cases there is no theory for determining the discount rate; the CAPM, for example would not hold.)“ Pindyck (1988, S. 973). Als Alternative zum Contingent Claims Ansatz ist die dynamische Programmierung und damit die Bellman-Gleichung entsprechend häufig als Teil des Lösungskonzepts in der Realoptionsliteratur anzutreffen, denn oft lassen die untersuchten Problemstellungen die Annahme von vollkommenen und vollständigen Kapitalmärkten nicht zu.²⁸

Während beim Einsatz der dynamischen Programmierung die Lösung eindeutig ist, unterliegt dieser Ansatz einer willkürlichen Diskontierung, wie Pindyck (1988) herausstellt. Entsprechend lässt sich zwar die eindeutige Bewertung vornehmen, jedoch stellt sich anschließend stets die Frage, ob der „richtige“ Wert ermittelt wurde. Insbesondere die Wahl der Diskontiertrate ist problematisch, da diese zwangsweise von den Präferenzen des Entscheiders, z. B. eines Unternehmens, getrieben ist (Welling et al., 2015).²⁹ Ein in der Literatur häufig gewählter Ausweg ist die Annahme von Risikoneutralität³⁰ und der Diskontierung mit dem risikolosen Zins. Hier wäre die bereits in Unterabschnitt 2.2.2 beschriebene Risikoprämie gleich null, sodass die realen und risikoneutralen Wahrscheinlichkeiten übereinstimmen, denn in einer „[...] world with risk-neutral investors, the present value of an uncertain cash flow is equal to the expectation of the cash flow discounted by the risk-free interest rate.“ McDonald &

²⁸Tatsächlich wird in der einschlägigen Realoptionsliteratur häufig nicht weiter ausgeführt, warum der Ansatz der dynamischen Programmierung gewählt wird. Jedoch lässt sich aus der Wahl der dynamischen Programmierung als Ansatz implizit ableiten, dass bei den untersuchten Problemen keine sinnvolle Annahme von vollkommenen und vollständigen Kapitalmärkten getroffen werden kann.

²⁹Wang (2010) beschreibt u. a. die Integration von Risikopräferenzen über Nutzenfunktionen und die anschließende Nutzenmaximierung. Während ein solcher Ansatz generell geeignet ist, um dem Problem der unvollkommenen und unvollständigen Kapitalmärkte Herr zu werden, muss seine Praktikabilität im realen Anwendungsfall infrage gestellt werden.

³⁰Siehe auch Hull (2009, S. 289 - 290) über die Annahme der Risikoneutralität.

Siegel (1985, S. 334).³¹

Trotz der zuvor aufgeführten konzeptionellen Schwächen beider Ansätze führen sie aus finanzmathematischer Sicht zu nahezu identischen Differentialgleichungen. Aus pragmatischer Sicht sind die generierten qualitativen Ergebnisse identisch (Pindyck, 1988; Bensoussan & Chevalier-Roignant, 2019). Die Relevanz der Wahl des Bewertungsansatzes tritt entsprechend dann in den Vordergrund, wenn eine konkrete, entscheidungsrelevante realwirtschaftliche Bewertung in der Praxis vorgenommen wird.³²

Neben der Wahl eines geeigneten Bewertungsansatzes spielt auch die Wahl über die Beschreibung der stochastischen Zustandsgröße eine wichtige Rolle.³³ Oft kommen in einschlägigen Realoptionsmodellen in der Literatur Itô-Prozesse mit konstantem Drift und konstanter Volatilität zum Einsatz. Insbesondere die GBM wird als Zustandsgröße für die stochastische Modellierung von Projektwerten oder granulareren bewertungsrelevanten Größen, wie Preisen, eingesetzt. Sind Rohstoffe involviert, werden Modelle mit Mean-Reversion, wie der OU Prozess, benutzt (Ozorio et al., 2012) und häufig mit der GBM kombiniert. Insbesondere die Kombination aus Mean-Reversion Modellen zur Erfassung der kurzfristigen Abweichung vom Mean-Reversion Level über OU-Prozesse, sowie die Modellierung des Mean-Reversion Level selbst über eine GBM scheinen Rohstoffzeitreihen regelmäßig hinreichend zu beschreiben (Pindyck, 2001). Jedoch muss die Wahl stets kritisch betrachtet werden, denn aus den Modellen abgeleitete Handlungsempfehlungen werden durch den gewählten stochastischen Prozess teils stark beeinflusst. So kann sich der in der Realoptionsliteratur als negativ postulierte Zusammenhang zwischen Investitionsneigung und Unsicherheit schon bereits durch

³¹In Unterabschnitt 2.2.2 wäre $p = p^*$. Entsprechend ist die Erwartungswertbildung $\mathbb{E}^P[\cdot]$ unter realem Maß P identisch zur Erwartungswertbildung $\mathbb{E}^Q[\cdot]$ unter risikoneutralem Maß Q .

³²Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Modelle dienen, trotz ihrer quantitativen numerischen Studien, der Ableitung von qualitativen Aussagen. Entsprechend wäre der gewählte Ansatz unerheblich, da die gleichen Ergebnisse abgeleitet werden können. Nichtsdestotrotz wurde der Fokus auf die dynamische Programmierung gelegt, da die Annahme von vollständigen und vollkommenen Kapitalmärkten in puncto realwirtschaftlicher Investitionsentscheidungen in Infrastruktur als kritisch gesehen werden kann.

³³Auf diesen Punkt wird nochmals in Unterabschnitt 5.2.5 im Rahmen der Einordnung des in dieser Arbeit entwickelten Modells genauer eingegangen. Entsprechend werden die Ausführungen aus Redundanzgesichtspunkten hier eingeschränkt.

die Prozesswahl umkehren (Briest et al., 2022).³⁴

Zuletzt soll kurz auf die häufig als konstant und zeitinvariant angenommenen Modellparameter eingegangen werden. So sind in der Realloptionsliteratur neben Itô-Prozessen mit konstanter Drift und konstanter Volatilität regelmäßig auch zeitunabhängige Diskontsätze und zeitunabhängige (Übergangs-)Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen gegeben (Dixit & Pindyck, 1994, S. 101). Auch die betrachtete Option selbst wird hierbei häufig als zeitlich unbeschränkt betrachtet. Durch all diese Annahmen lassen sich in der Realloptionsliteratur häufig analytisch lösbare und damit nachvollziehbare Modelle entwickeln, die insbesondere unter Einsatz der GBM vergleichsweise einfache Lösungen erlauben (Fleten et al., 2007). Dass diese Annahmen im Abgleich mit der Praxis nicht immer belastbar sind, steht außer Frage. So führen bereits Volatilitätscluster in einer Zeitreihe, z. B. die wöchentlichen Log-Renditen des S&P500, dazu, dass die Volatilität nicht mehr als konstant angenommen werden kann (Box et al., 2016, S. 361 ff.). Entsprechend könnte ein GARCH-Modell zur funktionalen Beschreibung der Volatilität zum Einsatz kommen, was ebenfalls in Form einer zeitabhängigen Volatilität im stochastischen Prozess zu berücksichtigen ist.³⁵ Die damit verbundene erhöhte Realitätsnähe erhöht in Konsequenz die Modellkomplexität und erschwert die Nachvollziehbarkeit. Sie ist jedoch nicht zwangsweise mit einem erhöhten Erkenntnisgewinn in Bezug auf qualitative Aussagen gleichzusetzen. Entsprechend lässt sich an dieser Stelle das Parsimonitätsprinzip aus der Disziplin der Zeitreihenanalyse auch für die Realloptionsmodellbildung adoptieren (Box et al., 2016, S. 15), welches, analog zu „Ockhams Rasiermesser“, eine kleinst mögliche Menge an Modellparametern fordert, um eine Zeitreihe hinreichend zu beschreiben.

Abschließend lässt sich festhalten, dass in der Realloptionsliteratur der Annahmenkosmos stets vor dem Hintergrund der untersuchten Problemstellung betrachtet werden muss. Insbesondere wenn qualitative Aussagen abgeleitet werden, sind die häufig verwendeten Annahmen in der Literatur als weniger problematisch einzustufen. Auch im Falle von konkreten Bewertungen in der Praxis können die Ergebnisse aus der Realloptionsanalyse als belastbar eingeordnet werden (Quigg, 1993), auch wenn

³⁴Die „Investment-Uncertainty Relationship“ beschreibt in der Realloptionsliteratur die Abnahme der Investitionsneigung mit zunehmender Unsicherheit. Nicht nur Briest et al. (2022) finden hier durch Wahl eines exponentiellen OU Prozesses eine prozessbedingte Umkehr des Zusammenhangs. Auch in dem in Kapitel 5 entwickelten Modell kehrt sich bei der Wahl des reinen OU Prozesses als Zustandsgröße dieser Zusammenhang um.

³⁵GARCH steht für Generalized Autoregressive Conditional Heteroscedasticity.

sie je nach eingesetztem Bewertungsansatz, z. B. im Falle von unvollkommenen und unvollständigen Märkten, den Anschein von Willkür bekommen können.³⁶

³⁶An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass die Annahmen bei Einsatz der Kapitalwertmethode zumindest genau so restriktiv sind, wie bei der Realoptionsmethode (McDonald, 2006).

4 Infrastrukturprojekte mit unsicheren Einnahmen, Investitionsausgaben und Bauzeiten

Viele Infrastrukturprojekte zeichnen sich aus investitionsplanerischer Sicht durch drei wichtige Eigenschaften aus, welche für die Anwendung der Realoptionsanalyse von Bedeutung sind: Sie weisen unsichere Investitionsausgaben während der Bauphase auf, besitzen unsichere Bauzeiten und erzielen ihre unsicheren Einnahmen erst nach Fertigstellung. Zudem sind die Investitionsausgaben über die Bauphase verteilt und hochgradig versunken bzw. irreversibel. Dieses hohe Maß an Komplexität erschwert für potentielle Anbieter von Infrastruktur, wie private Investoren, Kommunen und Länder, fundierte Investitionsentscheidungen zu treffen. Vor diesem Hintergrund ist es wichtig zu verstehen, wie die genannten Eigenschaften Entscheidungen in Infrastruktur zu investieren beeinflussen. Einen Beitrag zu diesem Verständnis liefert das in diesem Kapitel entwickelte Entscheidungsmodell, indem es die Entscheidungssituation unter Berücksichtigung von Realoptionen modelltheoretisch abbildet.

Zusätzlich zur reinen Investitionsentscheidung und dem damit verbundenen Timing sind insbesondere Kommunen und Länder bestrebt, ihre Verschuldung zu limitieren. Sie haben dadurch ein verstärktes Interesse, private Investoren für Infrastrukturprojekte zu gewinnen und damit die notwendigen Investitionen an diese auszulagern. Anhand des entwickelten Modells sollen daher auch die Möglichkeiten des Staates analysiert werden, wie dieser mit den gängigen Stellschrauben in Form von Subventionen und Steuererleichterungen möglichst viele private Investitionen gewinnen kann, ohne dabei selbst zu viel Wert abzugeben.

Kapitel 4 gliedert sich dazu wie folgt: Zu Beginn wird in Abschnitt 4.1 ein Einblick in die empirische Literatur zu Infrastrukturprojekten gegeben. Anschließend gibt Abschnitt 4.2

einen Kurzüberblick über die Realloptionsliteratur im Bereich Infrastruktur und mögliche Modellierungsansätze im Rahmen der Problemstellung. In Abschnitt 4.3 wird das entwickelte Modell vorgestellt, dessen Ergebnisse in Abschnitt 4.4 im Rahmen einer numerischen Studie untersucht werden. In Abschnitt 4.5 erfolgt eine kurze abschließende Bemerkung.

4.1 Empirische Befunde zu Infrastrukturprojekten

Dass Infrastruktur im Allgemeinen essenziell für die soziale Entwicklung und das Wirtschaftswachstum eines Landes ist (Beckers et al., 2013), ist unumstritten. Dies spiegelt sich insbesondere in der langfristigen Produktionselastizität von 0,07 bis 0,10 wieder (Calderón et al., 2015).¹ Demnach bewirkt ein Anstieg im Infrastrukturvermögen um 10 % einen Anstieg des Bruttoinlandsprodukts von 0,7 % bis zu 1 %. Trotz dieser Relevanz haben Infrastrukturprojekte in Deutschland gegenwärtig zu teils hitzigen öffentlichen Debatten geführt. Maßgeblichen Anteil daran haben Negativ-Beispiele wie der Bahnhof Stuttgart 21, der Flughafen Berlin Brandenburg oder die Elbphilharmonie in Hamburg. Im Grundtenor des Unmuts werden dabei stets zu lange Bauzeiten sowie Mittelverschwendung durch einen starken Anstieg der anfänglich geplanten Investitionsausgaben angeführt (Kostka & Anzinger, 2016a, S. 15).

Auch in der empirischen Literatur spiegelt sich dieser Umstand wieder. So beschreibt Flyvbjerg (2014), dass neun von zehn Megaprojekte ihre Planausgaben überschreiten; nicht selten um 50 % und mehr.² Flyvbjerg (2014) hält dabei fest, dass keine Verbesserung im Zeitablauf und geografischen Kontext stattgefunden hat, was durch internationale Beispiele wie die dänische Storebælt Brücke mit 50 %, den Dublin Port Tunnel mit 160 %, den Denver International Airport mit 200 %, das Opernhaus Sydney mit 1.400 % und den Suez Kanal mit 1.900 % Überschreitung der Planausgaben, um einige zu nennen, verdeutlicht wird (Flyvbjerg, 2014). Ein ähnliches Bild zeichnen auch andere Studien. In Tab. 4.1 sind dazu stellvertretend für wirtschaftliche Infrastruktur die zwei Segmente

¹Die Produktionselastizität berechnet sich als $\epsilon = \frac{\partial Y}{Y} / \frac{\partial K}{K}$ mit Y als BIP und K als Infrastrukturvermögen (siehe Pindyck & Rubinfeld (2015, S. 65 ff.) für die generelle Berechnung von Elastizitäten).

²Mit Megaprojekte sind Projekte mit Investitionsausgaben von 1 Mrd. USD und mehr gemeint. Aus technischer Sicht müsste eher der Begriff Gigaprojekte angewendet werden. Dieser konnte sich jedoch im Sprachgebrauch nicht durchsetzen.

Verkehr und Energie zusammengefasst.³

Cantarelli et al. (2012) untersuchen die Entwicklung der Planausgaben für Verkehrsinfrastruktur wie Straßen, Schienen sowie Tunnel und Brücken („fixe Verbindungen“). Sie zeigen, dass es im Durchschnitt in diesem Segment zur Überschreitung der Planausgaben kommt. Sovacool et al. (2014) und Ansar et al. (2014) fokussieren sich in ihren Studien auf das Segment Energie. Auch sie zeigen, dass für Atomkraftwerke, thermische Kraftwerke, Windkraft, Übertragungsnetzinfrastruktur sowie für hydroelektrische Dämme durchschnittlich teils erhebliche Überschreitungen der Planausgaben festzustellen sind. Einzig bei Solaranlagen ist keine Überschreitung der Planausgaben festzustellen. Kostka & Anzinger (2016b, S. 150) führen dies auf Lerneffekte zurück. Während diese bei Solaranlagen im Zeitablauf positiv waren, konnten entweder keine oder im Fall von Atomkraftwerken sogar negative Lerneffekte festgestellt werden. Zusätzlich wurde in den Studien im Segment Energie die durchschnittliche Überschreitung der geplanten Bauzeit untersucht. Auch hier zeigt sich, mit Ausnahme von Solaranlagen, eine teils deutliche Überschreitung.

Nachdem für die Bauphase von Infrastrukturprojekten empirisch ein starkes Indiz für erhebliche Unsicherheiten in den zwei bedeutenden Komponenten: Geplante Bauzeit und Planausgaben gegeben ist, muss weiter die Betriebsphase betrachtet werden. Sie schließt sich an die Bauphase an und ist maßgeblich für den Erfolg oder Misserfolg des Projekts. Neben den Betriebskosten spielen dabei die Einnahmen eine zentrale Rolle. Während es durchaus Infrastrukturprojekte mit planbaren und teils konstanten Einnahmen gibt (Möglich & Raebel, 2014), ist es sinnvoller, von unsicheren Einnahmen auszugehen. Dies lässt sich stellvertretend am Beispiel von Mautstraßen zeigen. So blieb beim Warnowtunnel, der ersten Public Private Partnership in Deutschland, das tatsächliche Verkehrsaufgebot 65 % unter der Vorhersage, was sich stark negativ auf die Wirtschaftlichkeit des Projekts auswirkte (Kostka & Anzinger, 2016a, S. 29). Als weiteres Beispiel kann die Mautstraße A1 zwischen Hamburg und Bremen aufgeführt werden. Hier liegen die Einnahmen aus der Lkw-Maut hinter den Erwartungen zurück, sodass die ökonomische Lebensfähigkeit des Projekts bedroht ist (Briest & Lukas, 2018). Neben zahlreichen

³Neben Verkehr und Energie setzt sich die wirtschaftliche Infrastruktur weiter aus Telekommunikation, Versorgung sowie Infrastruktur im weiteren Sinne zusammen. Sie ist von sozialer Infrastruktur abzugrenzen. Diese lässt sich in die Segmente Bildung, Gesundheit, Kultur und Sicherheit einteilen (Möglich & Raebel, 2014). Eine ausführlichere Systematisierung von wirtschaftlicher Infrastruktur vor dem Hintergrund von Realoptionen erfolgt in Anlehnung an Briest & Lukas (2018) in Abschnitt 4.2. Für einen Überblick zu Ausgabenüberschreitungen in den anderen Segmenten als Verkehr und Energie sei auf Kostka & Fiedler (2016a, S. 5) verwiesen.

Tabelle 4.1: Empirische Studien zur Überschreitung von geplanten Investitionsausgaben und Bauzeiten bei Infrastrukturprojekten aus den Bereichen Verkehr und Energie abgewandelt nach Kostka & Fiedler (2016a, S. 5) und Kostka & Anzinger (2016b, S. 150). Die Angaben für Verkehr sind aus Cantarelli et al. (2012) und die Angaben für Energie aus Sovacool et al. (2014) sowie Ansar et al. (2014) entnommen.

	Verkehr			Energie					
	Straßen	Fixe Verbindungen	Schienen	Atomkraft	Wärme­kraft	Windkraft	Solaranlagen	Übertragung/Transport	Hydroel. Dämme
Ø Überschreitung der geplanten Ausgaben %	20	33	34	117	13	8	1	8	96
Ø Überschreitung der geplanten Bauzeit %	n/a	n/a	n/a	64	10	10	0	8	44
Stichprobenumfang	537	74	195	180	36	35	39	50	245

weiteren Beispielen lassen sich mit den Schnellzugverbindungen Shinkansen und TGV auf der anderen Seite auch große Projekte nennen, die eine positive Entwicklung der Einnahmen verzeichnen konnten (Henn, 2015, S. 83 ff.). Entsprechend lassen sich auch für die Betriebsphase von Infrastrukturprojekten unsichere Einnahmen als Eigenschaft festhalten.

Nach diesen Beobachtungen stellt sich die Frage, warum Infrastrukturprojekte teils starke Abweichungen von „Soll“ und „Ist“ in Bauzeit, Investitionsausgaben und Erlösen aufweisen. Flyvbjerg (2014) führt dies auf die verwendeten Kernmethoden in der Planung, wie Business Cases, Kosten-Nutzen Analysen sowie Sozial- und Umweltverträglichkeitsprüfungen, zurück. Entsprechend kann diesen Methoden allein nicht vertraut werden.⁴ Hierbei sind die Unzulänglichkeiten der genannten Methoden und insbeson-

⁴Siehe auch Unterabschnitt 2.2.4. Die verwendeten Methoden sind nicht überflüssig, sie sollten jedoch um weitere Methoden, die der Unsicherheit ausreichend Rechnung tragen, erweitert werden.

dere der reinen Kapitalwertmethode nicht neu. Wie Dixit & Pindyck (1994, S. 4 ff.) und Trigeorgis (2001, S. 103 ff.) betonen, ist der Kapitalwert allein nicht geeignet, die realen Merkmale von Investitionsmöglichkeiten zu berücksichtigen. Die Mehrzahl der realen Investitionen (wie z. B. Infrastrukturinvestitionen) wird unter Unsicherheit getätigt, ist mit versunkenen Investitionsausgaben verbunden und bietet verschiedene Arten von (zeitlichen) Handlungsspielräumen. An dieser Stelle kann der Realloptionsansatz Abhilfe schaffen. Dieser ermöglicht die Berücksichtigung von Unsicherheiten in Bezug auf Bauzeit, Investitionsausgaben und Erlöse. Im nachfolgenden Abschnitt wird ein Überblick über die relevante Realloptionsliteratur und entsprechende Modellierungsansätze gegeben, welche die hier beschriebenen Problemdimensionen erfassen können.

4.2 Modellansätze in der Realloptionsliteratur

Myers (1977) erkannte als erster die Analogie zwischen realwirtschaftlichen Investitionsgelegenheiten und Finanzoptionen. In den späten 1970er Jahren initiierte er mit diesem Grundgedanken eine breite Literatur, die sich in den nachfolgenden Dekaden entwickelt hat. Neben vielen anderen Anwendungsbereichen wurde der Realloptionsansatz auch zur Bewertung von Investitionsmöglichkeiten in Infrastruktur verwendet. Da aus Sicht von Unternehmen insbesondere Investitionen in wirtschaftliche Infrastruktur interessant sind, ist einschlägige Realloptionsliteratur für einen kurzen Überblick vorab in Tab. 4.2 zusammengefasst. Hierbei ist die in Tab. 4.2 systematisierte Literatur lediglich als ein Ausschnitt und bei weitem nicht als vollständig anzusehen.

Aus Tab. 4.2 wird dabei zunächst deutlich, dass der Einsatz des Realloptionsansatzes flexibel ist und sich für eine Vielzahl von unterschiedlichen investitionsplanerischen Problemstellungen aus dem Bereich Infrastruktur eignet. Hierbei ist hervorzuheben, dass der Ansatz insbesondere stark im Segment Verkehr beim Untersuchungsobjekt „Straßen“ sowie im Segment Energie bei den Untersuchungsobjekten „Erneuerbare Energien“ und „Konventionelle Kraftwerke“ zum Einsatz kommt (in Bezug auf Energie siehe auch Trigeorgis & Tsekrekos (2018)). Bei Straßen erzeugen insbesondere Vertragsklauseln wie Verkehrsobergrenzen und Verkehrsuntergrenzen starke Optionscharakteristika, was die Realloptionsanalyse als Bewertungsmethode prädestiniert (Kupfer & Welling, 2018). Im Segment Energie hat sich der Fokus zuletzt stark in Richtung Erneuerbare En-

ergien verschoben (Kozlova, 2017).⁵

An dieser Stelle soll darauf verzichtet werden, einschlägige Realloptionsliteratur in Bezug auf die in Tab. 4.2 aufgeführten Untersuchungsobjekte im Detail auszuführen. Vielmehr soll nachfolgend der Fokus auf die in Unterabschnitt 4.1 entwickelten allgemeinen Eigenschaftsdimensionen: Unsichere Erlöse, unsichere Realisationszeiten sowie unsichere Investitionsausgaben gelegt werden.

Viele allgemeine Realloptionsmodelle, die sich u. a. auch für die Anwendung im Bereich Infrastruktur eignen, haben Teile der genannten Merkmale integriert. In der Mehrzahl der Modelle werden jedoch lediglich unsichere Erlöse oder unsichere Preise abgebildet (siehe z. B. Welling et al. (2015), Dixit & Pindyck (1994, Kap. 5 & 6), Lukas et al. (2017) sowie Lukas & Thiergart (2019)). Ebenfalls sind Modelle, wenn auch weniger häufig, mit unsicheren Investitionsausgaben zu finden (z. B. Briest & Lukas (2018)). Danach gibt es in diesen Modellen nur eine Quelle von Unsicherheit. Seltener sind sowohl unsichere Erlöse als auch unsichere Investitionsausgaben und damit zwei Quellen von Unsicherheit zu finden (siehe z. B. McDonald & Siegel (1986), Welling (2016), Schwartz & Moon (2001), Nishihara (2018) sowie Kauppinen et al. (2018)).⁶

So untersuchen McDonald & Siegel (1986) den Einfluss von unsicheren Projektwerten und unsicheren Investitionsausgaben auf die Investitionsentscheidung. Welling (2016) betrachtet Investitionsmöglichkeiten bei Projekten zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien, wobei die unsichere Entwicklung des Stromverkaufspreises und der Investitionsausgaben jeweils über eine GBM abgebildet werden. Schwartz & Moon (2001) erweitern ihre vorherige Arbeit Schwartz & Moon (2000) u. a. um den Aspekt der unsicheren Investitionsausgaben, sodass ihre Bewertung von Internetunternehmen mit zwei unsicheren Zustandsgrößen und damit unter realistischeren Annahmen erfolgt. Kauppinen et al. (2018) hingegen betrachten die Investitionsmöglichkeit in ein Infrastrukturprojekt, welches ein Unternehmen graduell entwickeln kann, wobei der Projektwert sowie der Barwert der operativen Kosten, im Gegensatz zu unsicheren Investitionsausgaben, jeweils über eine GBM abgebildet werden. Nishihara (2018) betrachtet ein Unternehmen, das in ein F&E-Projekt investieren kann. Nishihara (2018) wählt dabei

⁵Siehe Kapitel 5 für die modelltheoretische Anwendung des Realloptionsansatzes für Investitionen in Projekte mit operationaler Flexibilität unter Mean-Reversion, wie z. B. für Biogasanlagen.

⁶Es sei darauf hingewiesen, dass es durchaus eine Vielzahl von Arbeiten gibt, die mehrere Quellen von Unsicherheit berücksichtigen, wie z. B. Schwartz & Moon (2000) oder Näsäkkälä & Fleten (2005). Oft wird diese zusätzliche Unsicherheit in Form von stochastischen Driftraten oder Volatilitäten berücksichtigt. Schlussendlich materialisiert sich die Unsicherheit dann häufig in einer einzigen Erfolgsgröße wie Erlösen oder Preisen, während die Investitionsausgaben deterministisch bleiben.

einen interessanten Ansatz, bei dem er neben unsicheren Erlösen, die über eine GBM beschrieben werden, die Unsicherheit der Investitionsausgaben über deren Abhängigkeit von einer unsicheren F&E-Realisierungszeit induziert.

Die zuvor kurz systematisierte Literatur, mit Ausnahme von Kauppinen et al. (2018) und Nishihara (2018), hat einen gemeinsamen Nenner: Die vorgestellten Modelle gehen davon aus, dass das Unternehmen, nachdem es investiert, unmittelbar Zugang zu den Erlösen bekommt.⁷ Diese Annahme ist oft in der Realoptionsliteratur zu finden und kann durchaus in einer Reihe von praktischen Anwendungen als realistisch angesehen werden, insbesondere wenn die Realisationszeit des betrachteten Projekts ausreichend niedrig ist. Tatsächlich lässt sich dies vor dem Hintergrund von Infrastrukturprojekten hinterfragen. An dieser Stelle können Modelle, die eine Realisationszeit berücksichtigen, zum Einsatz kommen. In der englischsprachigen Literatur werden hierfür oft die Begriffe „Time-to-Build“, „Investment Lag“, „Implementation Lag“, „Gestation Period“ oder auch „Lead Time“ benutzt (siehe z. B. auch Briest et al. (2020) oder Sarkar & Zhang (2015)).

In der einschlägigen Literatur wird die Realisierungszeit auf unterschiedliche Weise implementiert. Majd & Pindyck (1987) (siehe auch Dixit & Pindyck (1994, S. 328 ff.)) stellen hier eine der frühen Arbeiten in diesem Bereich dar. Majd & Pindyck (1987) untersuchen ein Unternehmen, das die Möglichkeit hat, in ein Projekt, z. B. ein Fabrikgebäude, zu investieren. Die Realisierungszeit führen Majd & Pindyck (1987) dabei über Investitionsausgaben ein, die graduell über eine feste Investitionsrate ausgegeben und damit aufgebraucht werden müssen, bevor das Unternehmen Erlöse aus dem Projekt erzielen kann. Die zugrundeliegende Option stellt dabei eine Verbundoption (engl. Compound Option) dar: Solange unaufgebrauchtes Investitionskapital vorhanden ist, hat das Unternehmen wiederkehrend die Option, einen weiteren inkrementellen Anteil des Kapitalstocks zu investieren und die Projektrealisierung voranzutreiben, sodass stets Optionen auf Optionen betrachtet werden (Sequenzielles Investieren). Da das Modell von Majd & Pindyck (1987) eine kostenlose Stilllegung und Wiederaufnahme des Projekts ermöglicht, ist die gesamte Realisierungszeit, welche die kürzeste Realisierungszeit übersteigt, unsicher. Letztere hat ihren Ursprung in der festen Investitionsrate. Kauppinen et al. (2018) adoptieren das Modell von Majd & Pindyck (1987) in seinen wesentlichen Zügen und erweitern dies um den zuvor beschriebenen unsicheren Barwert der operativen

⁷Auch hier wurde im vorhergehenden Absatz lediglich ein kleiner Auszug einer viel umfangreicheren Literatur herausgegriffen.

Tabelle 4.2: Einordnung von Realoptionsliteratur in wirtschaftliche Infrastruktur abgewandelt nach Briest & Lukas (2018).

Segment	Verkehr	Energie	Telekommunikation	Versorgung	Infrastruktur im weiteren Sinne
Objekt	<u>Straßen</u> Ashuri et al. (2012) Galera & Solino (2010) Garvin & Cheah (2004)	<u>Erneuerbare Energien</u> Briest et al. (2022) Welling (2016) Boomsma et al. (2012)	<u>Informationstech.</u> Angelou & Economides (2008) Funston (2006) Panayi & Trigeorgis (1998)	<u>Ver- & Entsorgung</u> Loubergé et al. (2002)	<u>Tanklager</u>
	<u>Flughäfen</u> Smit (2003)	<u>Konventionelle Kraftwerke</u> Wickart & Madlener (2007) Tseng & Lin (2007) Rohlf's & Madlener (2011)	<u>Mobilfunknetze</u> Tanguturi & Harmanziz (2006)	<u>Wasser</u> Marques et al. (2015b) Marques et al. (2015a)	<u>Gaslager</u> Thompson et al. (2009)
	<u>Schienen</u> Gao & Driouchi (2013)	<u>Leitungsnetze</u> Cartea & González-Pedraz (2012)	<u>Festnetze</u>	<u>Abwasser</u> Marzouk & Ali (2018)	<u>Unregulierte Kraftwerke</u>
	<u>Brücken</u> Grimes (2011)		<u>Satelliten</u> de Weck et al. (2003)		<u>Fährverbindungen</u>
	<u>Tunnel</u> Kupfer & Welling (2018)				
	<u>Seehäfen</u> Balliauw et al. (2019) Balliauw (2020)				

Kosten. Auch Briest et al. (2020) nutzen für die Modellierung einer F&E-Phase im Kern das Modell von Majd & Pindyck (1987), betrachten jedoch Erlöse, die einer Sprungdiffusion mit „Sudden Death“ Komponente folgen.⁸ Somit ist in Briest et al. (2020) die komplette Realisierungszeit unsicher. Der Vollständigkeit halber soll auch auf Milne & Whalley (2000) verwiesen werden, die das Modell von Majd & Pindyck (1987) um eine fehlende Optimalitätsbedingung ergänzen. Abschließend lässt sich festhalten, dass der Modellkern nach Majd & Pindyck (1987) den Nachteil fehlender analytischer Lösbarkeit hat und somit numerische Verfahren zum Einsatz kommen müssen.⁹

Anders als Majd & Pindyck (1987) integrieren Bar-Ilan & Strange (1996) die Realisierungszeit über eine Konstante in den Modellrahmen von Dixit (1989). Im Wesentlichen erfolgt dies durch eine Verzögerung der Projekteinnahmen, sodass bei Investition das Projekt erst nach der Realisierungszeit beginnt, Erlöse zu generieren. Ähnlich wie Bar-Ilan & Strange (1996) lässt auch Nishihara (2018) eine Verzögerung der Erlöse über konstante sowie stochastische Realisierungszeiten zu. Zuletzt ist eine weitere Art der Modellierung von Realisierungszeit durch Margsiri et al. (2008) sowie Sarkar & Zhang (2015) zu finden. Hier wird bei beiden eine Kopplung der Realisierungszeit an den unsicheren Erlösprozess vorgenommen. So muss sich der Erlösprozess, ausgehend von einem Startwert, bis zu einer fest vorgelegten Schwelle, entwickeln, wodurch die Realisierungszeit unsicher wird.

Nachdem geeignete Literatur in Bezug auf unsichere Erlöse, Investitionsausgaben und Realisationszeiten herausgearbeitet wurde, soll zuletzt kurz auf Modelle mit Bezug auf Subventionen und Steuererleichterungen eingegangen werden. Dies sind Modelle, die Einflussmöglichkeiten des Staates analysieren, um private Investitionen zu fördern. Pennings (2000) untersucht die optimale Besteuerung und Anreizgestaltung von Subventionen, um irreversible Investitionen zu stimulieren. Yu et al. (2007) betrachten die Auswirkungen von Subventionen und Steuererleichterungen auf ausländische Direktinvestitionen und können zeigen, dass Subventionen die Steuererleichterungen als Anreiz ausstechen. In einer Studie von Danielova & Sarkar (2011) können ähnliche Ergebnisse für den Fall von rein eigenfinanzierten Investitionen gefunden werden. Für den Fall, dass Fremdfinanzierung ermöglicht wird, finden Danielova & Sarkar (2011) ein optimales Verhältnis von Subventionen und Steuererleichterungen.

⁸Mit „Sudden Death“ ist hier gemeint, dass die Erlöse mit einmal erlöschen können und sich davon nicht mehr erholen. Sie verbleiben entsprechend bei einem Level von null.

⁹Milne & Whalley (2000) nutzen zur Lösung die Linienmethode, die ein gewisses Maß an „analytischer“ Lösung zulässt.

Tabelle 4.3: Einordnung des Modells aus Abschnitt 4.3 anhand von Modellkomponenten in verwandte Realloptionsliteratur.

	Investitionsausgaben	Zeitl. Dispersion d. Ausgaben	Bauzeit	Einnahmen	Steuern	Subventionen
McDonald & Siegel (1986)	✓ (stoch.)	×	×	✓ (stoch.)	×	×
Danielova & Sarkar (2011)	✓ (det.)	×	×	✓ (stoch.)	✓	✓
Sarkar & Zhang (2015)	✓ (det.)	✓	✓ (stoch.)	✓ (stoch.)	✓	×
Briest & Lukas (2018)	✓ (stoch.)	✓	✓ (stoch.)	✓ (det.)	×	×
Abschnitt 4.3	✓ (stoch.)	✓	✓ (stoch.)	✓ (stoch.)	✓	✓

stoch. - stochastisch
det. - deterministisch

Das im nachfolgenden Abschnitt 4.3 vorgestellte Modell integriert alle zuvor aufgezählten Eigenschaftsdimensionen von Infrastruktur. Die Einordnung des Modells kann dabei Tab. 4.3 entnommen werden. Das Modell aus Abschnitt 4.3 ist eng mit McDonald & Siegel (1986) verbunden (siehe auch Dixit & Pindyck (1994, Kap. 6)), da eine Investitionsmöglichkeit in Infrastruktur in Abhängigkeit von zwei stochastischen Zustandsvariablen wie Erlöse (und damit Projektwerte) und Investitionsausgaben modelliert wird. Auch besteht eine enge Verbindung mit Sarkar & Zhang (2015), deren Ansatz der unsicheren Realisierungszeit adoptiert wird. Darüber hinaus bezieht sich das Modell später auch auf Danielova & Sarkar (2011), da ebenfalls Investitionsanreize in Form von Sub-

ventionen und Steuererleichterungen untersucht werden. Zusätzlich ist das vorgestellte Modell auch mit Briest & Lukas (2018) verwandt, die unsichere Realisationszeiten abhängig von unsicheren Investitionsausgaben betrachteten.

Nachfolgend werden zentrale Modellierungsaspekte und Ergebnisse aus den in Tab. 4.3 vorgestellten Arbeiten zusammengefasst. Hierbei wird auf die in dieser Arbeit eingesetzte Notation zurückgegriffen, um dem Leser den Vergleich der Modelle zu erleichtern. Anschließend wird mit der Modellbildung in Abschnitt 4.3 fortgefahren.

4.2.1 Das Modell von McDonald & Siegel (1986)

McDonald & Siegel (1986) untersuchen Situationen, in denen der Entscheider die Möglichkeit hat, mit der Investition zu warten. Insbesondere fokussieren sie sich dabei auf Investitionen, die irreversibel sind. Während die Investition irreversibel ist, hingegen die Entscheidung zu warten reversibel, erzeugt die daraus entstehende Asymmetrie eine Entscheidungssituation, die durch einen einfachen Vergleich der Barwerte von erwarteten Investitionsausgaben und erwarteten (Überschuss-)Einnahmen – der Anwendung der Kapitalwertmethode – nicht korrekt erfasst wird. Vielmehr muss die Investition heute wertmäßig mit der Investition zu jedem zukünftig möglichen Zeitpunkt verglichen werden.

McDonald & Siegel (1986) bilden die formulierte Entscheidungssituation modelltheoretisch ab. Nachfolgend soll der Modellkern formal zusammengefasst werden, wobei auf die von McDonald & Siegel (1986) zusätzlich durchgeführten Modellerweiterungen verzichtet wird. Zunächst wird angenommen, dass ein Projektwert V_t ebenso wie die Investitionsausgaben I_t für dessen Realisierung einer GBM folgen¹⁰

$$dV_t = \alpha_V V_t dt + \sigma_V V_t dW_{t,V} \quad (4.1)$$

$$dI_t = \alpha_I I_t dt + \sigma_I I_t dW_{t,I}. \quad (4.2)$$

Hierbei sind α_V und α_I die Driftraten, σ_V und σ_I die Volatilitäten sowie $dW_{t,V}$ und $dW_{t,I}$ die, ggf. mit $-1 \leq \rho_{VI} \leq 1$ korrelierten, Wiener-Inkrementen von jeweils Projektwert und Investitionsausgaben. Für einen unendlichen Zeithorizont bzgl. des Investitions-

¹⁰Der Projektwert selbst ist der Barwert der zukünftig erwarteten Cashflows.

zeitpunkts, ist der erwartete Gegenwartswert des Payoffs

$$\mathbb{E}_{V,I}[(V_t - I_t)e^{-rt}] \quad (4.3)$$

mit r als Diskontsatz zu maximieren.¹¹ Hierbei wird der Erwartungswert ausgehend vom aktuellen Zustand mit $V = V_0$ und $I = I_0$ gebildet. Basierend auf Argumenten zur Homogenität des Entscheidungsproblems zeigen McDonald & Siegel (1986), dass sich das Entscheidungsproblem auf die Wahl eines optimalen Verhältnisses $y^* = V^*/I^*$ reduzieren lässt, zu dem investiert werden sollte. Dadurch kann die Maximierung des Payoffs über die Wahl eines $y' = V_{t'}/I_{t'}$ erfolgen, sodass

$$\max_{y'} (y' - 1) \mathbb{E}_{V,I} [I_{t'} e^{-rt'}]. \quad (4.4)$$

Schließlich ergibt sich für den optimalen Investitionsschwellenwert

$$y^* = \frac{\beta_1}{\beta_1 - 1} \quad (4.5)$$

und für den Wert der Investitionsmöglichkeit

$$F(V, I; y^*) = \begin{cases} (y^* - 1) I \left(\frac{V/I}{y^*} \right)^{\beta_1}, & \text{für } \frac{V}{I} < y^* \\ V - I, & \text{für } y^* \leq \frac{V}{I} \end{cases} \quad (4.6)$$

wobei

$$\beta_1 = \frac{1}{2} - \frac{\alpha_V - \alpha_I}{\sigma^2} + \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{\alpha_V - \alpha_I}{\sigma^2} \right)^2 + \frac{2(r - \alpha_I)}{\sigma^2}} \quad (4.7)$$

mit $\sigma^2 = \sigma_V^2 - 2\rho_{VI}\sigma_V\sigma_I + \sigma_I^2$ gegeben ist.

Im Ergebnis ihrer modelltheoretischen Untersuchung zeigen McDonald & Siegel (1986), dass unter realistischen Parametervariationen der Schaden aus der suboptimalen Anwendung der Barwertmethode – investiere sobald der Nettobarwert mindestens null ist – bis zu 20 % oder mehr gemessen am Projektwert ausmachen kann. Jedoch machen McDonald & Siegel (1986) auch darauf aufmerksam, dass ihre Ergebnisse am sinnvollsten vor dem Hintergrund zu interpretieren sind, wenn V und I Barwerte darstellen. Gera-

¹¹Durch einen unendlichen Zeithorizont hängt der optimale Ausübungszeitpunkt nicht von der Zeit ab.

de für die versunkenen Investitionsausgaben I kann dies hinterfragt werden.¹² Sofern sich I im Sinne von Preisen darstellt, sind Mean-Reversion Prozesse geeigneter. Diese bieten die Möglichkeit, eine Rückkehr der Zustandsvariablen in Richtung eines Levels im Marktgleichgewicht abzubilden. Zuletzt weisen McDonald & Siegel (1986) auch darauf hin, dass die Projektinvestitionen praktisch nicht zwangsweise „lumpy“, also „am Stück“, erfolgen. Insbesondere, wenn kleine Investitionstranchen zu Beginn der Projektrealisierung einen großen Grenzertrag haben, kann die Möglichkeit zu warten eine untergeordnete Rolle spielen, sodass für solche Projekte praktisch ein erhöhter Anreiz besteht, diese schneller zu realisieren, auch wenn sie ggf. später abgebrochen werden müssen.¹³

4.2.2 Das Modell von Danielova & Sarkar (2011)

Investitionstätigkeit von privaten Unternehmen hat einen deutlichen Einfluss auf das Wirtschaftswachstum eines Landes. Vor diesem Hintergrund untersuchen Danielova & Sarkar (2011) modelltheoretisch, wie Entscheider auf Regierungsebene möglichst optimal die Investitionstätigkeit von privaten Unternehmen stimulieren können. Dabei fokussieren sie sich auf die gängigen Anreizmechanismen in Form von Steuererleichterungen und Subventionen. In Abhängigkeit von der Finanzierung des Unternehmens ermitteln sie ein optimales Verhältnis zwischen den beiden Anreizen. Dabei bilden sie sowohl die Finanzierung komplett aus Eigenmitteln als auch die Finanzierung aus Fremdkapital ab. Nachfolgend werden im Hinblick auf die Modellbildung in Abschnitt 4.3 lediglich zentrale Ergebnisse der Modellierung in Bezug auf die vollständige Finanzierung aus eigenen Mitteln reproduziert.

Danielova & Sarkar (2011) beginnen ihre Modellierung zur Entscheidung über Unter-

¹²In Abschnitt 4.3 wird ein Ansatz über ein generelles Ausgabenniveau gewählt, an das die versunkenen Ausgaben gekoppelt werden. Hier lässt sich die Modellierung über eine GBM unter anderem mit inflationären Tendenzen im Zeitablauf rechtfertigen. Zusätzlich lässt sich I auch als Barwert eines Projekts aus Sicht einer beauftragten Baufirma interpretieren, welche (unsichere) Cashflows aus dem Bauprojekt im Zeitablauf erhält.

¹³Dies wird in Teilen auch aus der numerischen Studie in Unterabschnitt 4.4.1 für kleine $0 \leq \theta \leq 1$ und damit kleine initiale Investitionstranchen θI deutlich.

nehmensinvestitionen ausgehend von Erlösen x_t , die einer GBM folgen sollen¹⁴

$$dx_t = \alpha x_t dt + \sigma x_t dW_t. \quad (4.8)$$

Für ein vollständig mit Eigenkapital finanziertes Unternehmen ergibt sich unter Berücksichtigung eines effektiven Steuersatzes τ ein Projektwert¹⁵

$$V(x) = \mathbb{E}_x \left[\int_0^\infty (1 - \tau)x_t e^{-rt} dt \right] = (1 - \tau) \frac{x}{r - \alpha}. \quad (4.9)$$

Das Unternehmen soll die Möglichkeit haben, in das Investitionsprojekt mit Wert $V(x)$ zu investieren, wobei das Unternehmen die Investitionsentscheidung ohne Zeitbegrenzung aufschieben kann. Die dazu nötige Investition soll mit einem Anteil s subventioniert werden, sodass sich bei der Realisierung des Projekts effektive irreversible Investitionsausgaben in Höhe von $(1 - s)I$ ergeben. Der in der Realoptionsliteratur gängigen Bewertungsweise folgend, ermitteln Danielova & Sarkar (2011) einen optimalen Investitionsschwellenwert

$$x^* = \frac{\beta_1}{(\beta_1 - 1)} \frac{(1 - s)I(r - \alpha)}{(1 - \tau)}, \quad (4.10)$$

der das Timing des Unternehmens und damit seine Investitionsneigung kennzeichnet. Hierbei ist

$$\beta_1 = \frac{1}{2} - \frac{\alpha}{\sigma^2} + \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{\sigma^2}\right)^2 + \frac{2r}{\sigma^2}}. \quad (4.11)$$

Da x^* das optimale Erlöslevel darstellt, zu dem das Unternehmen seine Investition durchführt, kann seine Beeinflussung von Entscheidern auf Regierungsebene entsprechend ausgenutzt werden. Danielova & Sarkar (2011) legen dazu ein Ziellevel x_g von Seiten der Regierung fest, sodass sich die Subvention s über den effektiven Steuersatz τ ausdrücken lässt

$$s = 1 - \frac{\beta_1 - 1}{\beta_1} \frac{x_g(1 - \tau)}{I(r - \alpha)}. \quad (4.12)$$

¹⁴An dieser Stelle sei auf die sich in diesem Unterabschnitt und in nachfolgenden Abschnitten und Unterabschnitten wiederholende Notation hingewiesen, durch die jeweils ähnliche Erfolgsgrößen beschrieben werden. Es wird entsprechend verzichtet diese Erfolgsgrößen nochmals verbal aufzuschlüsseln.

¹⁵Danielova & Sarkar (2011) argumentieren, dass unabhängig davon, dass die Steuererleichterung direkt, z. B. durch Steuerferien und besonders niedrige Steuersätze, oder indirekt, z.B. durch beschleunigte Abschreibung von Vermögenswerten und Investitionsfreibeträge, sog. Investment Tax Credits, gewährt wird, die Auswirkung auf den effektiven Unternehmenssteuersatz die gleiche ist. Sie mindern diesen. Dies erleichtert die Modellbildungen insofern, als dass nur der effektive Unternehmenssteuersatz τ benötigt wird.

Für die Steuereinnahmen $T(x)$ des Staates ergibt sich¹⁶

$$T(x) = \frac{\tau x}{r - \alpha}, \quad (4.13)$$

sodass sich nach Abzug von gezahlten Subventionen sI ein Nettovorteil des Staates von

$$G(x_g) = \frac{\tau x_g}{r - \alpha} + \frac{\beta_1 - 1}{\beta} \frac{x_g(1 - \tau)}{(r - \alpha)} - I \quad (4.14)$$

ergibt. Da $\partial G(x_g)/\partial \tau > 0$ kann festgehalten werden, dass aus Sicht des Staates ein hoher effektiver Steuersatz wünschenswert ist. In Kombination mit dem Effekt, dass ein steigendes τ mit $\partial s/\partial \tau > 0$ größere Subventionen s erfordert, um ein Ziellevel x_g aufrecht zu erhalten, ergibt sich daraus ein dominierender Anreiz für die Subvention. Danielova & Sarkar (2011) bestätigen damit das Ergebnis der einschlägigen Literatur, dass im Fall der reinen Finanzierung durch Eigenkapital die Steuererleichterung von der Subvention als Anreiz dominiert wird. Hingen für den Fall einer möglichen Fremdfinanzierung, finden Danielova & Sarkar (2011) ein optimales Verhältnis von Subventionen und Steuererleichterungen, das hier nicht weiter betrachtet werden soll.¹⁷

4.2.3 Das Modell von Sarkar & Zhang (2015)

Sarkar & Zhang (2015) untersuchen Unternehmensinvestitionen unter Berücksichtigung von Realisations- bzw. Bauzeit. Neben der Implementierung einer stochastischen Realisationszeit integrieren sie zusätzlich eine zeitliche Verteilung der Investitionsausgaben

¹⁶Danielova & Sarkar (2011) spezifizieren hier nicht genauer den Zeitpunkt der Betrachtung. Die Angabe von $T(x) = \frac{\tau x}{r - \alpha}$ impliziert jedoch, dass hier das initiale Level, welches gerade beobachtet wird, auf $x = x_g$ gesetzt ist. Andernfalls muss der stochastische Diskontfaktor $(x/x_g)^{\beta_1}$ in den Steuereinnahmen $T(x)$ sowie im auf diesen aufbauenden Nettovorteil des Staates $G(x_g)$ berücksichtigt werden.

¹⁷Dieses Ergebnis von Danielova & Sarkar (2011) muss vor dem Hintergrund hinterfragt werden, als dass viel Fremdkapital über ein hohes Kuponlevel ausschließlich dazu führt, dass die Steuereinnahmen des Staates reduziert werden. Einsetzen von Gl. (29) in Gl. (28) aus Danielova & Sarkar (2011) ergibt in der dort verwendeten Notation

$$T(x) = \tau \left(\frac{(x - x_b(x/x_b)^{\gamma_2})}{r - \mu} - \frac{c}{r} (1 - (x/x_b)^{\gamma_2}) \right). \quad (4.15)$$

Da $\gamma_2 < 0$ und $x > x_b$, mit x_b als Schwellenwert für die Insolvenz des Unternehmens, ist $(x/x_b)^{\gamma_2} < 1$, sodass eine Erhöhung des Kuponlevels c die Steuereinnahmen des Staates $T(x)$ reduziert. Tatsächlich müssen auch die Fremdkapitalgeber auf ihre Kapitalerträge Steuern zahlen. Dies sollte sich entsprechend zusätzlich in $T(x)$ widerspiegeln.

in ihr Modell. Neben der Bewertung unter der Annahme einer reinen Finanzierung aus Eigenmitteln untersuchen sie insbesondere den Effekt einer Finanzierung unter Aufnahme von Fremdkapital. Wie auch bei der Kurzbeschreibung des Modells von Danielova & Sarkar (2011) sollen nachfolgend lediglich die wesentlichen Modellierungsaspekte im Hinblick auf eine reine Finanzierung aus Eigenmitteln wiedergegeben werden.

Zunächst nehmen Sarkar & Zhang (2015) an, dass die Cashflows x_t aus einem Investitionsprojekt einer GBM folgen

$$dx_t = \alpha x_t dt + \sigma x_t dW_t. \quad (4.16)$$

Das Unternehmen hat die zeitlich unbegrenzte Möglichkeit, in dieses Projekt zu investieren, wobei die Investition in zwei Investitionstranchen erfolgt. Das Unternehmen entscheidet sich, in das Projekt mit der ersten Tranche θI mit $0 \leq \theta \leq 1$ zu investieren, wenn ein Schwellenwertniveau von x^* erreicht wird. Hier wird die Warteoption zu Investieren optimal ausgeübt. Die Zahlung der zweiten, und damit finalen, Tranche $(1 - \theta)I$ erfolgt bei einem Schwellenwertlevel $m x^*$ mit $m > 1$. Während der Bauzeit wird angenommen, dass keine Zahlungen an das Unternehmen erfolgen. Durch diese Art der Modellierung implementieren Sarkar & Zhang (2015) eine stochastische Bauzeit, da sich der stochastische Cashflow Prozess von einem Level x^* zu einem Level $m x^*$ entwickeln muss, damit das Projekt abgeschlossen werden kann. Auch ermöglicht ihre Modellierung, Projektcharakteristika, wie vorgelagerte (θ groß), ausgewogen verteilte (θ um 50 %) und nachgelagerte Investitionsausgaben (θ klein), abzubilden. Da die Bauzeit in ihrem Modell stochastisch ist, kann diese lediglich als erwartete Bauzeit t_m angegeben werden

$$t_m = \frac{\ln m}{\alpha - \frac{1}{2}\sigma^2}. \quad (4.17)$$

Das Bewertungsfunktional ist bis zur Zahlung der ersten Tranche mit $F(x) = A_1 x^{\beta_1}$, zwischen den Tranchen eins und zwei mit $V_1(x) = B_1 x^{\beta_1}$ sowie nach Zahlung der zweiten Tranche als aktives Projekt mit $V_2(x) = (1 - \tau) \frac{x}{r - \alpha}$ definiert. Mit

$$\beta_1 = \frac{1}{2} - \frac{\alpha}{\sigma^2} + \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{\sigma^2}\right)^2 + \frac{2r}{\sigma^2}} \quad (4.18)$$

ergibt sich für die konstanten Koeffizienten A_1 und B_1 sowie für den optimalen Investitionsschwellenwert x^*

$$A_1 = \frac{(1 - \tau) (mx^*)^{1-\beta_1}}{(r - \alpha) \beta_1}, \quad (4.19)$$

$$B_1 = \left(\frac{(1 - \tau) mx^*}{r - \alpha} - (1 - \theta) I \right) (mx^*)^{-\beta_1}, \quad (4.20)$$

$$x^* = \frac{1 - \theta + \theta m^{\beta_1}}{m} \frac{\beta_1}{(\beta_1 - 1)} \frac{(r - \alpha) I}{(1 - \tau)}. \quad (4.21)$$

Im Ergebnis ihrer Studie halten Sarkar & Zhang (2015) fest, dass im Falle eines vollständig mit Eigenmitteln finanzierten Unternehmens der Investitionsschwellenwert über verschiedene Realisationszeiten (Sarkar & Zhang (2015) betrachten Realisationszeiten bis 12 Jahre) stark von der Größe der ersten Investitionstranche abhängt. Im Falle von vorgelagerten Investitionsausgaben, sinkt der Anreiz zu investieren über die Realisationszeit. Hingegen kann im Falle von ausgewogen verteilten Investitionsausgaben ein u-förmiger Verlauf festgestellt werden, nämlich ein erst steigender und dann fallender Investitionsanreiz. Für nachgelagerten Investitionsausgaben steigt der Investitionsanreiz.¹⁸

Im Falle der Finanzierung mit Fremdkapital untersuchen Sarkar & Zhang (2015) sowohl für eine exogen vorgegebene als auch für eine optimale Verschuldung die Auswirkung auf die Investitionsneigung.¹⁹ Für eine exogen vorgegebene Verschuldung kann sich der Effekt auf die Investitionsneigung vom Fall der reinen Eigenfinanzierung unterscheiden und ökonomisch signifikant sein. Generell steigt die Investitionsneigung, wenn die exogene Verschuldung gering ist, während sie mit einer hohen Verschuldung tendenziell eher fällt. Für den Fall einer optimalen Verschuldung lässt sich im Vergleich zur reinen Eigenfinanzierung festhalten, dass der Einfluss der Realisationszeit auf die Investitions-

¹⁸Das hier über x^* beschriebene Verhalten zum Investitionsanreiz wird dabei insbesondere aus $\frac{1-\theta+\theta m^{\beta_1}}{m}$ deutlich. So wird hier mit dem Extremfall $\theta = 1$, einer komplett vorgelagerten Investition, deutlich, dass sich die Triebkraft auf θm^{β_1-1} reduziert. Da $\beta_1 - 1 > 0$ muss mit steigender Realisationszeit $m > 1$ steigen, und somit x^* , was wiederum einen fallenden Investitionsanreiz anzeigt. Wird entsprechend $\theta \in (0, 1)$ gewählt, so können sich in Abhängigkeit der anderen Modellparameter die beschriebenen anderen Fälle einstellen. Im Extremfall $\theta = 0$ einer komplett nachgelagerten Investition, verbleibt $1/m$, womit x^* mit zunehmender Realisationszeit fällt und damit der Investitionsanreiz stets steigt.

¹⁹Die Verschuldung wird hier über Kupon Level dargestellt. Ein hoher Kupon korrespondiert mit einer hohen Verschuldung.

neigung verbessert wird.²⁰ Demnach steigt die Investitionsneigung oder wird weniger negativ durch die Realisationszeit für verschiedene Größen der ersten Investitionstranche beeinflusst.²¹

4.2.4 Das Modell von Briest & Lukas (2018)

Auch Briest & Lukas (2018) untersuchen Investitionen in Infrastruktur unter Berücksichtigung von unsicheren Realisierungszeiten. Während sie modelltheoretisch den Ansatz von Sarkar & Zhang (2015) adoptieren, unterscheidet sich ihre Modellierung darin, dass sie im Zeitablauf unsichere Investitionsausgaben anstelle von unsicheren Erlösen berücksichtigen. Demnach konzentrieren sich Briest & Lukas (2018) insbesondere auf Infrastrukturprojekte mit planbaren Erlösen.

Briest & Lukas (2018) nehmen zunächst an, dass ein Unternehmen eine perpetuale Investitionsoption in ein Infrastrukturprojekt besitzt, dessen Investitionsausgaben I_t einer GBM folgen

$$dI_t = \alpha I_t dt + \sigma I_t dW_t. \quad (4.22)$$

Analog zu Sarkar & Zhang (2015) (siehe Unterabschnitt 4.2.3) wird die erste Investitionstranche mit θI^* gezahlt und die zweite Investitionstranche mit $(1 - \theta)I^*/m$. Die Logik über die unsichere Realisationszeit wird dabei über ein optimales Ausgabenniveau I^* integriert, von dem aus der stochastische Ausgabenprozess ein Niveau I^*/m mit $m > 1$ erreichen muss. Auch im Modell von Briest & Lukas (2018) wird angenommen, dass während der Realisationszeit keine Einnahmen generiert werden. Die erwartete Realisationszeit t_m wird über

$$t_m = \frac{\ln m}{\frac{1}{2}\sigma^2 - \alpha} \quad (4.23)$$

angegeben. Mit $V_2(x) = x/r$ als deterministischen Projektwert der aktiven Infrastruktur ergeben sich für die verbleibenden Bewertungsvorschriften vor Zahlung der ersten

²⁰Sarkar & Zhang (2015) halten in Bezug auf die Finanzierung mit Fremdkapital auch fest, dass in der Praxis viele Unternehmen lange Zeit benötigen, um eine optimale Kapitalstruktur und damit optimale Verschuldung zu erreichen. Sie begründen dies mit vermutlich auftretenden Anpassungskosten, sodass die eigentliche Kapitalstruktur oft durchaus stark von der optimalen Kapitalstruktur abweichen kann. Im Gegensatz dazu wird in der einschlägigen Literatur oft einfach angenommen, dass ein Unternehmen, wenn es sich entscheidet zu investieren, auch die optimale Kapitalstruktur wählt. Vor diesem Hintergrund sind die Ergebnisse zu bewerten.

²¹Für eine komplette Beschreibung der Effekte sei auf Sarkar & Zhang (2015) verwiesen.

Tranche $F(I) = A_2 I^{\beta_2}$ und nach Zahlung der ersten, aber vor Zahlung der zweiten Tranche $V_1(I) = B_2 I^{\beta_2}$ ²²

$$A_2 = \left((\theta - 1)m^{\beta_2 - 1} - \theta \right) \frac{I^{*1 - \beta_2}}{\beta_2}, \quad (4.24)$$

$$B_2 = \left(\frac{x}{r} - \frac{(1 - \theta)I^*}{m} \right) \left(\frac{I^*}{m} \right)^{-\beta_2}, \quad (4.25)$$

$$I^* = \frac{xm^{\beta_2}}{r \left(1 - \frac{1}{\beta_2} \right) (\theta + (1 - \theta)m^{\beta_2 - 1})}, \quad (4.26)$$

wobei

$$\beta_2 = \frac{1}{2} - \frac{\alpha}{\sigma^2} - \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{\sigma^2} \right)^2 + \frac{2r}{\sigma^2}}. \quad (4.27)$$

Im Ergebnis ihrer Untersuchung, können Briest & Lukas (2018) die Ergebnisse von Sarkar & Zhang (2015) für den Fall eines rein eigenständig finanzierten Unternehmens bestätigen. So sinkt im Falle von vorgelagerten Investitionsausgaben auch hier der Anreiz zu investieren über die Realisationszeit. Sind Investitionsausgaben ausgewogen verteilt, kann ein umgekehrter u-förmiger Verlauf festgestellt werden, nämlich erst steigender und dann fallender Investitionsanreiz. Für den Fall von nachgelagerten Investitionsausgaben steigt die Investitionsneigung.²³

4.3 Modellbildung

Startpunkt für das in diesem Abschnitt vorgestellte Modell ist ein rationales, risikoneutrales Unternehmen, das ausschließlich durch Eigenmittel finanziert ist und Cashflows mit r diskontiert. Das Unternehmen verfügt über eine unbefristete Investitionsgelegenheit in ein Infrastrukturprojekt, die zukünftig zu jedem beliebigen Zeitpunkt realisierbar

²²Da im Modell von Briest & Lukas (2018) die Einnahmen x als konstant angenommen werden, ist der Projektwert $V_2(x)$ als ewige Rente gegeben.

²³Im Modell von Briest & Lukas (2018) ist zu beachten, dass der Investitionsschwellenwert in Form von Investitionsausgaben gegeben ist. Demnach muss die Interpretation umgekehrt zu einem Erlösschwellenwert erfolgen. Entsprechend bedeutet ein hoher Schwellenwert eine Erhöhung der Investitionsneigung, während ein niedriger Ausgabenschwellenwert eine Verringerung der Investitionsneigung darstellt.

ist. Mit dem Projekt sind typische, bei Investition primär versunkene, Ausgaben verbunden, wie beispielsweise Ausgaben für Arbeitskräfte, Konstruktion und Baumaterial. Diese Investitionsausgaben sollen im Zeitablauf unsicher sein, wobei die stochastische Entwicklung über ein Ausgabenniveau k_t abgebildet wird, welches einer GBM folgen soll

$$dk_t = \alpha_k k_t dt + \sigma_k k_t dW_{t,k}. \quad (4.28)$$

Der Parameter α_k beschreibt die Driftrate des Ausgabenniveaus, z. B. die generellen Veränderungsraten in Erzeuger- und Verbraucherpreisindizes, wohingegen $dW_{t,k}$ das Wiener Inkrement darstellt, welches um die Volatilität σ_k skaliert wird. Um die stochastische Entwicklung der gesamten versunkenen Investitionsausgaben I_t zu erhalten, wird eine feste Ausgangsschätzung dieser Ausgaben, nämlich \hat{I} , genutzt und mit dem Ausgabenniveau gekoppelt, sodass $I_t = \hat{I}k_t$. Unter Anwendung des Lemmas von Itô kann der stochastische Prozess für I_t wie folgt ausgedrückt werden:²⁴

$$dI_t = \alpha_I I_t dt + \sigma_I I_t dW_{t,I}. \quad (4.29)$$

Weiter wird angenommen, dass die steuerlich unbelasteten Einnahmen x_t mit den Investitionsausgaben I_t unkorreliert sind und ebenfalls über eine geometrisch Brownsche Bewegung beschrieben werden können²⁵

$$dx_t = \alpha_x x_t dt + \sigma_x x_t dW_{t,x}. \quad (4.30)$$

Nachdem zwei bedeutende Eigenschaften von Infrastrukturprojekten, nämlich unsichere Einnahmen und unsichere Investitionsausgaben, repräsentiert sind, muss die unsichere Bauzeit modelliert werden. In Kombination mit einer Modellierung der zeitlichen Dispersion der Realisierungsausgaben, soll dies in Anlehnung an Sarkar & Zhang (2015) erfolgen: Mit einem gegebenen Level von x_t und I_t steht das Unternehmen zu Beginn vor dem Problem zu entscheiden, wann es seine Investitionsmöglichkeit bzw. Investitionsoption $F(x, I)$ ausüben soll. Da das Unternehmen in dieser ersten Phase stets bestrebt sein wird, sich optimal zu verhalten, wird es seine Option zu einem optimalen bzw. wert-

²⁴Siehe Anhang B.1 für die Herleitung des Prozesses für I_t . Da \hat{I} eine Konstante ist, sind die Driftrate der versunkenen Investitionsausgaben α_I und die Driftrate des Ausgabenniveaus α_k identisch. Gleiches gilt für die Volatilität und das Wiener Inkrement, sodass auch $\sigma_I = \sigma_k$ und $dW_{t,I} = dW_{t,k}$.

²⁵Nachfolgend wird die Korrelation ρ_{xI} zwar berücksichtigt, jedoch in der numerischen Studie sowie zur Bestimmung der erwarteten Realisationszeit t_m auf null gesetzt.

maximalen Niveau ausüben, welches durch x^* und I^* charakterisiert ist. Sobald das Unternehmen seine Gelegenheit ergreift, wird eine irreversible Zahlung fällig, die als Bruchteil θI^* mit $0 \leq \theta \leq 1$ als zeitlichem Dispersionparameter erfolgt. Diese erste Zahlung kann zudem vom Staat mit einer anteiligen Subvention $0 \leq s \leq 1$ unterstützt werden, sodass sich eine effektive erste Investitionstranche von $(1 - s)\theta I^*$ ergibt. Sobald die erste Investitionstranche ausgelöst ist, beginnt die zweite Phase. In dieser Realisierungsphase wird der Wert des nicht realisierten Infrastrukturprojekts durch $V_1(x, I)$ angegeben und es besteht ausgehend vom ausgewählten Modellierungsansatz keine Möglichkeit mehr, das Projekt vorzeitig abubrechen.²⁶ Da das Infrastrukturprojekt während der Realisierung unvollständig ist, erzielt es keine Einnahmen. Das Projekt soll abgeschlossen sein, sobald die Erträge ein Niveau von mx^* mit $m > 1$ erreichen, wodurch die Zeit zwischen der Ausübung der Investitionsmöglichkeit und dem Abschluss des Infrastrukturprojekts stochastisch wird. Sobald mx^* erreicht ist, wird die verbleibende Investitionstranche $(1 - \theta)I^*$ fällig. Die dritte Phase startet und das Infrastrukturprojekt beginnt, Einnahmen zu generieren, wobei der Projektwert über $V_2(x)$ beschrieben wird.

An dieser Stelle sei bereits vorweggenommen, dass sich im nachfolgenden Modellaufbau ebenfalls die Logik aus McDonald & Siegel (1986) ergibt. Entsprechend kann das hier zuvor beschriebene zweidimensionale Problem in x_t und I_t auf ein eindimensionales Problem mit $y_t = x_t/I_t$ reduziert werden. Entsprechend ergibt sich für eine optimale Entscheidungspolitik ein Schwellenwert $y^* = x^*/I^*$ und die unsichere Realisierungszeit ist über die Entwicklung des stochastischen Prozesses y_t zwischen y^* und my^* definiert. Für ein besseres Verständnis des Modellaufbaus, wird dieser in Abb. 4.1 visualisiert.

Um die Bewertungsfunktionen für die drei beschriebenen Phasen, d. h. vor, während und nach der Realisierung, zu bestimmen, wird die Entscheidungssituation rückwärts betrachtet. Sobald das Projekt abgeschlossen ist, hängt der Wert des Projekts nur noch von der Entwicklung der steuerlich belasteten Einnahmen ab. Mit τ als effektivem Steu-

²⁶In der Praxis werden Infrastrukturprojekte durchaus trotz schlechter Entwicklungen während des Baus vollendet und nicht zwischenzeitlich abgebrochen. Gründe dafür können sein, dass einige Infrastrukturprojekte zu groß oder prestigeträchtig sind, um aufgegeben zu werden. Zusätzlich weisen Margsiri et al. (2008, Fußnote 8) darauf hin, dass diese Art der Modellierung im Vergleich zu herkömmlichen Modellen mit fixer Investitionsrate und fixer Bauzeit den Vorteil der Nachvollziehbarkeit hat. Basierend auf numerischer Analyse durch Margsiri et al. (2008, Fußnote 8), sind gleiche Ergebnisse wie mit den anderen Modellierungsansätzen zu erwarten, sodass die Annahme des Realisierungszwangs praktisch unkritisch ist, denn es können durchaus auch Beispiele erwähnt werden, in denen das Projekt abgebrochen wurde. So gibt Pindyck (1993, Fußnote 6) einige Beispiele von Kernkraftwerken, deren Bau nach Projektstart durch die Betreiber abgebrochen wurde. Siehe auch Sarkar & Zhang (2015, Fußnote 3).

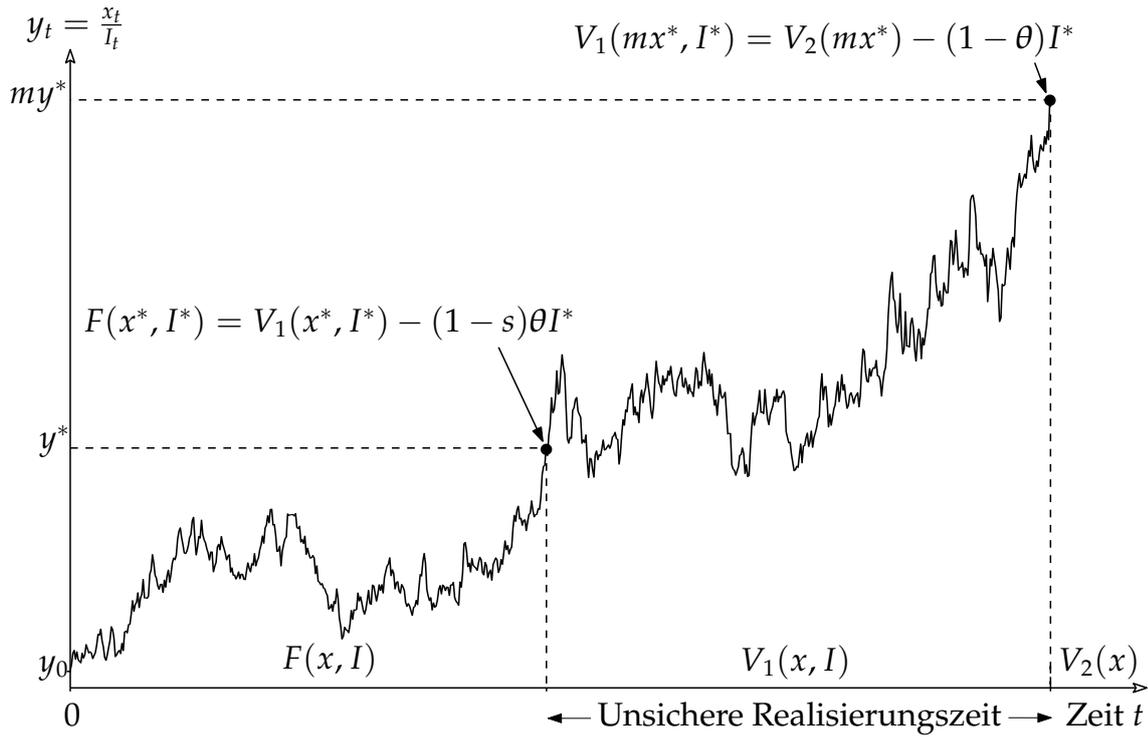


Abbildung 4.1: Visualisierung des Modellaufbaus für das Entscheidungsproblem.

ersatz ergibt sich für den erwarteten Projektwert $V_2(x)^{27}$

$$V_2(x) = \mathbb{E}_x \left[\int_0^\infty (1 - \tau)x_t e^{-rt} dt \right] = (1 - \tau) \frac{x}{r - \alpha_x}, \quad (4.31)$$

wobei die Erwartungen ausgehend von einem gegenwärtigen Erlösniveau $x_0 = x$ gebildet werden. Die beiden verbleibenden Bewertungsfunktionen $V_1(x, I)$ und $F(x, I)$ können ausgehend vom Ansatz der dynamischen Programmierung gefunden werden. Für $F(x, I)$ und $V_1(x, I)$ ergeben sich die folgenden Bellman-Gleichungen:²⁸

$$\mathbb{E}[dF(x, I)] = rF(x, I)dt, \quad (4.32)$$

$$\mathbb{E}[dV_1(x, I)] = rV_1(x, I)dt. \quad (4.33)$$

Diese Gleichungen stellen sicher, dass die erwartete Veränderung des Options- bzw. Projektwertes dem erwarteten, verzinsten Ertrag über einen infinitesimalen Zeitschritt ent-

²⁷Siehe Anhang B.2 für die Herleitung des Projektwerts.

²⁸Für den Bellman-Ansatz sei an dieser Stelle auf Abs. 3.2 verwiesen und für Ausführungen zum Projektwert während der Realisation auf Sarkar & Zhang (2015, Anhang A.1.2.).

spricht - eben jenem Ertrag, der einem risikoneutralen Entscheider genügt. Gln. 4.32 und 4.33 können unter Anwendung des Lemmas von Itô in partielle Differentialgleichungen überführt werden:²⁹

$$\frac{1}{2}\sigma_x^2 x^2 F_{xx} + \rho_{xI}\sigma_x\sigma_I x I F_{xI} + \frac{1}{2}\sigma_I^2 I^2 F_{II} + \alpha_x x F_x + \alpha_I I F_I - rF = 0, \quad (4.34)$$

wobei ρ_{xI} die Korrelation zwischen den beiden stochastischen Größen x_t und I_t angibt. Analog ergibt sich für $V_1(x, I)$ die partielle Differentialgleichung

$$\frac{1}{2}\sigma_x^2 x^2 V_{1,xx} + \rho_{xI}\sigma_x\sigma_I x I V_{1,xI} + \frac{1}{2}\sigma_I^2 I^2 V_{1,II} + \alpha_x x V_{1,x} + \alpha_I I V_{1,I} - rV_1 = 0. \quad (4.35)$$

Zur Lösung partieller Differentialgleichungen kommen oft numerische Methoden zum Einsatz. In dem vorliegenden Problem kann jedoch die Argumentation von McDonald & Siegel (1986) über die Homogenität der Entscheidungssituation adoptiert werden, sodass sich die Bewertungsfunktionale in den Formen $F(x, I) = If(y)$ und $V_1(x, I) = Iv(y)$ mit $y = \frac{x}{I}$ ergeben.³⁰ Durch Einsetzen letzterer in die partiellen Dgln. lassen sich dadurch Gln. 4.34 und 4.35 in gewöhnliche Differentialgleichungen überführen

$$\frac{1}{2}\sigma^2 y^2 f'' + (\alpha_x - \alpha_I) y f' - (r - \alpha_I) f = 0, \quad (4.36)$$

$$\frac{1}{2}\sigma^2 y^2 v'' + (\alpha_x - \alpha_I) y v' - (r - \alpha_I) v = 0, \quad (4.37)$$

mit Varianz $\sigma^2 = \sigma_x^2 - 2\rho_{xI}\sigma_x\sigma_I + \sigma_I^2$. Die Varianz zeigt deutlich, dass wenn sich x_t und I_t komplett gleichgerichtet bewegen ($\rho_{xI} = 1$), der Schwankungskorridor für den Quotienten y_t am kleinsten ist und je ungerichteter die Entwicklung beider Größen wird ($-1 \leq \rho < 1$), dieser ansteigt. Nun müssen Gl. 4.36 für $f(y)$ und die analoge Gl. 4.37 für $v(y)$ unter Berücksichtigung der folgenden Randbedingungen gelöst werden:³¹

$$f(0), v(0) = 0, \quad (4.39)$$

²⁹Siehe Anhang B.3 für die Anwendung von Itô's-Lemma auf Gl. 4.32. Analog kann für Gl. 4.33 vorgegangen werden. Zuletzt sei hierzu auch auf Sarkar & Zhang (2015, Anhang A.1.2.) verwiesen.

³⁰Siehe auch Dixit & Pindyck (1994, Kapitel 6). Zusätzlich wird das Argument über die Homogenität des Problems in Anhang B.4 entwickelt.

³¹Hierzu sei am Beispiel der Value Matching Bedingung 4.40 erwähnt, dass diese ausführlich aufgestellt, über

$$I^* f(y^*) = I^* v(y^*) - (1 - s)\theta I^* \quad (4.38)$$

beschrieben ist. Analog lassen sich die anderen Randbedingungen ebenfalls ausführlich aufstellen.

$$f(y^*) = v(y^*) - (1 - s)\theta, \quad (4.40)$$

$$\left. \frac{\partial f(y)}{\partial y} \right|_{y=y^*} = \frac{\partial v(y^*)}{\partial y^*}, \quad (4.41)$$

$$v(my^*) = \frac{(1 - \tau)my^*}{r - \alpha_x} - (1 - \theta). \quad (4.42)$$

Gln. 4.40 und 4.41 stellen die Value Matching und Smooth Pasting Bedingungen dar. Erstere stellt sicher, dass die Bewertungsfunktionale beim Übergang zwischen den ersten beiden Phasen wertmäßig übereinstimmen. Letztere sorgt für die Optimalität der Entscheidung. Da im Modell die Möglichkeit der Stilllegung unbeachtet bleiben soll, muss das Projekt fertiggestellt werden. Dadurch wird beim Übergang zwischen den Phasen zwei und drei nur die wertmäßige Übereinstimmung benötigt, die sich in Gl. 4.42 wieder spiegelt. Nun können die Lösungen für die Eulerschen Differentialgleichungen gefunden werden. Diese haben die Form $f(y) = A_1 y^{\beta_1} + A_2 y^{\beta_2}$ und $v(y) = B_1 y^{\beta_1} + B_2 y^{\beta_2}$, wobei sich $\beta_{1,2}$ als Wurzel der korrespondierenden fundamentalen quadratischen Gleichungen $Q = 1/2\sigma^2\beta(\beta - 1) + (\alpha_x - \alpha_I)\beta - (r - \alpha_I) = 0$ ergibt

$$\beta_1 = \frac{1}{2} - \frac{\alpha_x - \alpha_I}{\sigma^2} + \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{\alpha_x - \alpha_I}{\sigma^2}\right)^2 + \frac{2(r - \alpha_I)}{\sigma^2}}, \quad (4.43)$$

$$\beta_2 = \frac{1}{2} - \frac{\alpha_x - \alpha_I}{\sigma^2} - \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{\alpha_x - \alpha_I}{\sigma^2}\right)^2 + \frac{2(r - \alpha_I)}{\sigma^2}}. \quad (4.44)$$

Im Hinblick auf Gl. 4.39 in Kombination mit $\beta_2 < 0$ wird klar, dass die Koeffizienten A_2 und B_2 zu null zu wählen sind. Die verbleibenden Koeffizienten A_1 und B_1 müssen simultan mit dem optimalen Verhältnis y^* gefunden werden. Aus dem Gleichungssystem, repräsentiert durch Gln. 4.40 bis 4.42, ergibt sich:

$$A_1 = \frac{(1 - \tau)(my^*)^{1-\beta_1}}{(r - \alpha_x)\beta_1}, \quad (4.45)$$

$$B_1 = \left(\frac{(1 - \tau)my^*}{r - \alpha_x} - 1 + \theta \right) (my^*)^{-\beta_1}, \quad (4.46)$$

$$y^* = \frac{1 - \theta + (1 - s)\theta m^{\beta_1}}{m} \frac{\beta_1}{(\beta_1 - 1)} \frac{(r - \alpha_x)}{(1 - \tau)}. \quad (4.47)$$

und damit für den Wert der Option to Invest $F(x, I)$

$$F(x, I; y^*) = I \frac{(1 - \tau)}{(r - \alpha_x)} \frac{(m)^{1 - \beta_1} y^*}{\beta_1} \left(\frac{y}{y^*} \right)^{\beta_1}, \text{ für } \frac{x}{I} < y^* \quad (4.48)$$

sowie den Projektwert während der Realisierung $V_1(x, I)$

$$V_1(x, I; y^*) = I \left(\frac{(1 - \tau) m y^*}{r - \alpha_x} - 1 + \theta \right) \left(\frac{y}{m y^*} \right)^{\beta_1}, \text{ für } y^* \leq \frac{x}{I} < m y^*. \quad (4.49)$$

Um die Auswirkungen der drei bedeutenden Infrastrukturmerkmale auf die Investitionsentscheidung untersuchen zu können, wird zuletzt die erwartete Realisationszeit t_m benötigt. Diese lässt sich als erwartete Zeit bestimmen, die y_t benötigt, um sich zwischen y^* und $m y^*$ zu entwickeln. Für t_m ergibt sich³²

$$t_m = \frac{\ln m}{\alpha_x - \alpha_I + \sigma_x \sigma_I - \frac{1}{2}(\sigma_x^2 - \sigma_I^2)}. \quad (4.50)$$

Der in Gl. 4.47 dargestellte Schwellenwert y^* wird nachfolgend kurz validiert. Hierbei kann auf die zuvor in den Unterabschnitten 4.2.1 bis 4.2.4 vorgestellten Modelle rekurriert werden. Zunächst wird für $s = 0$ und ein konstantes I deutlich, dass sich mit $x^* = y^* I^*$ der in Sarkar & Zhang (2015) ermittelte Schwellenwert ergibt, welcher in Gl. 4.21 in dieser Arbeit reproduziert wurde. Für $m = 1$, $\theta = 1$ und ein konstantes I ergibt sich hingegen der Schwellenwert aus Danielova & Sarkar (2011) dargestellt in Gl. 4.10. Wird zusätzlich $s = 0$ und $\tau = 0$ gesetzt, ergibt sich mit $V^* = x^*/(r - \alpha_x)$ der Schwellenwert aus McDonald & Siegel (1986) in Gl. 4.5. Zuletzt kann eine strukturelle Ähnlichkeit mit dem Schwellenwert aus Briest & Lukas (2018) in Gl. 4.26 ermittelt werden. Ein direkter Vergleich ist hier nicht ohne Weiteres möglich. Vor diesem Hintergrund stellt das in diesem Unterabschnitt entwickelte Modell eine Weiterentwicklung bzw. Generalisierung der zuvor beschriebenen Ansätze dar.

Abschließend lassen sich die Bewertungsfunktionale grafisch darstellen. Dabei werden hier und in den nachfolgenden Unterabschnitten die Parameterwerte aus einschlägiger Realloptionsliteratur wie Sarkar & Zhang (2015), Danielova & Sarkar (2011), Welling (2016), Pindyck (1993) etc. als Referenz- bzw. Basisfall verwendet: $r = 0,07$, $\alpha_x = 0,04$, $\alpha_I = 0,02$, $\sigma_x = 0,10$, $\sigma_I = 0,10$, $\rho_{xI} = 0,00$, $\tau = 0,35$, $s = 0,00$, $\theta = 0,50$ und

³²Die Entwicklung der erwarteten Realisationszeit ist in Anhang B.5 zu finden.

$m = 1, 20$, wobei $m = 1, 20$ einer erwarteten Bauzeit von ca. 6 Jahren entspricht. Zusätzlich ist in Abb. 4.2 $I = 1$ fixiert worden. Entsprechend kann $I^* = I$ gesetzt und über y^* ein korrespondierendes x^* ermittelt werden.³³

In Abb. 4.2 ist deutlich der Charakter der Modellstruktur zu erkennen. Für $y < y^*$ liegt der Optionswert über dem Wert, der sich aus der direkten Investition in ein Projekt mit einer erwarteten Realisationszeit von ca. 6 Jahren ergibt. Entsprechend wäre es aus Sicht eines rationalen Entscheiders suboptimal „sofort“ zu investieren, denn zusätzlich zu der subventionierten ersten Investitionstranche $(1 - s)\theta I$ müssen ebenfalls die Opportunitätskosten ins Kalkül einbezogen werden, die aus der Aufgabe des Flexibilitätswerts erwachsen. Erst sobald y^* erreicht ist, wird es aus Sicht des Unternehmens optimal seine Warteposition zu verlassen und das Projekt zu realisieren.

Darüber hinaus wird auch der Vorteil aus der Modellierung über das Verhältnis von Erlösen zu irreversiblen Investitionsausgaben über $y = \frac{x}{I}$ deutlich. Für die Parametrisierung des Modells sind lediglich prozentuale Größen, wie Volatilitäten, Wachstumsraten, Steuersätze etc. nötig, jedoch keine konkreten Schätzungen von x und I .³⁴ Vielmehr kann das Modell flexibel für verschiedene I angewendet werden. Demnach kann jedes initiale I als optimales I^* aufgefasst werden, wo die korrespondierenden optimalen Erlöse $x^* = I^* y^*$ für eine optimale Handlungspolitik erfüllt sein müssen. Analog gilt die gleiche Logik auch umgekehrt. So dürfen für ein gegebenes aktuelles Erlöslevel $x = x^*$ die Investitionsausgaben $I^* = x^*/y^*$ nicht übersteigen, wenn sofort mit der Projektrealisierung begonnen werden soll.

³³Da y ein Verhältnis darstellt, ist es aus modelltheoretischer Sicht irrelevant, ob bspw. I fixiert wird und für x multiple Werte innerhalb eines Intervalls erzeugt werden um Werte $y = x/I$ abzuleiten. Entsprechend gleiche Verhältnisse lassen sich ebenfalls mit fixiertem x und variablen I sowie variablen x und variablen I erzeugen.

³⁴McDonald & Siegel (1986, Fußnoten 3 & 13) zeigen mögliche Wege auf, wie die Größen im Rahmen der Projektwertermittlung geschätzt werden können.

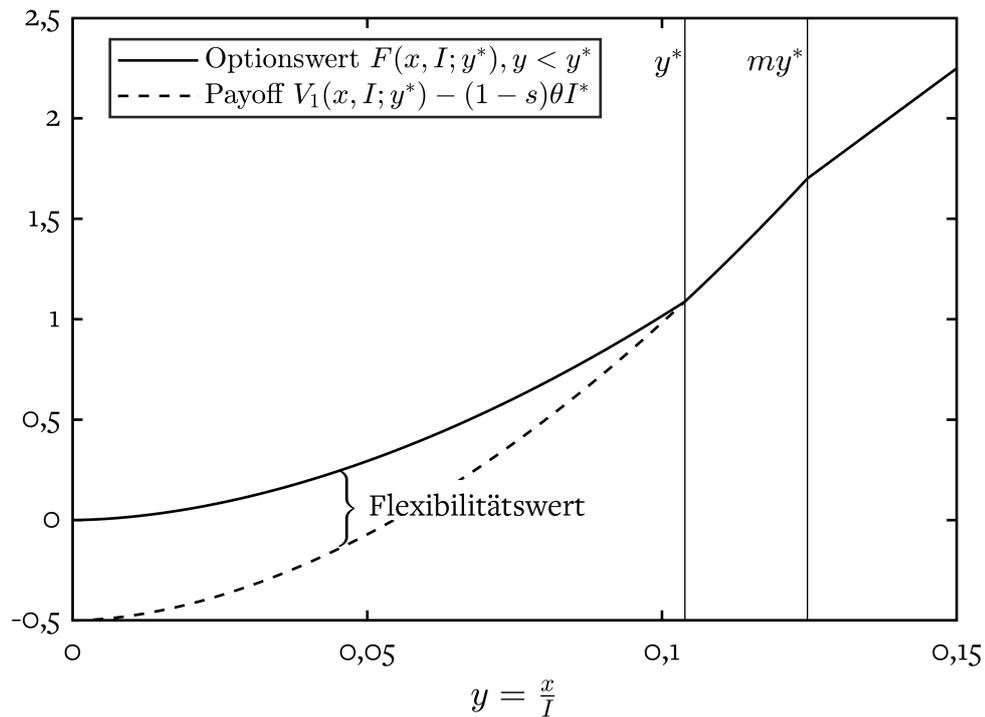


Abbildung 4.2: Darstellung von Optionswert und Payoff für den Basisfall.

4.4 Analyse der Entscheidungssituation

4.4.1 Einfluss unsicherer Realisationszeit

Der Einfluss der unsicheren Realisationszeit wird über die erwartete Realisationszeit t_m in Abb. 4.3 untersucht. Hier wird der Investitionsschwellenwert y^* nicht nur über t_m abgebildet sondern auch für ausgewählte Werte aus dem kompletten Intervall an möglichen Werten für die zeitliche Dispersion der versunkenen Investitionsausgaben $\theta \in [0, 1]$. Hierbei korrespondiert ein großes θ mit einer großen ersten Investitionstranche, während ein kleines θ eine entsprechend niedrigere erste Investitionstranche und damit größere zweite Investitionstranche darstellt.

Analog zu Sarkar & Zhang (2015) lassen sich auch im komplexeren Modelsetting aus Abschnitt 4.3 zwei grundlegende Effekte in Bezug auf t_m herausarbeiten: Der erste Effekt wirkt sich positiv auf die Investitionsneigung aus und resultiert aus der Verzögerung der

Ausgaben; der zweite Effekt hat eine negative Auswirkung auf y^* und wird durch die Verzögerung der Erträge verursacht.³⁵ Bei Projekten, die vollständig vorfinanziert sind, d. h. $\theta = 1$, gibt es keinen positiven Effekt. y^* steigt strikt mit t_m und senkt damit den Investitionsanreiz. Nur eine direkte Verringerung von t_m führt zu einem positiven Effekt. Dies ist auch für Projekte mit ausreichend hohen θ festzustellen. Demnach lässt sich festhalten, dass für Infrastrukturprojekte mit einer hohen Vorabbelastung in Form einer hohen ersten Investitionstranche die erwartete Bauzeit eine treibende Kraft in Bezug auf die Investitionsneigung darstellt. Wenn z. B. staatliche Bestrebungen existieren, solche Projekte voranzutreiben, ist es entsprechend sinnvoll, die erwartete Realisationszeit zu reduzieren. Dies kann bspw. durch den Abbau von bürokratischen Hürden erfolgen.³⁶ Ist die erste Investitionstranche aufgrund von θ niedrig genug, überwiegt zunächst der positive den negativen Effekt und y^* sinkt mit t_m , bis der Punkt erreicht ist, an dem der negative Effekt wieder dominiert. Für sehr niedrige θ bis zum Extremfall $\theta = 0$ überwiegt der positive Effekt bei praktischen t_m bis zu 12 Jahren eindeutig den negativen Effekt, so dass der Schwellenwert mit zunehmender t_m sinkt. Wenn aus staatlicher Sicht solche Projekte ausgebaut werden sollen, müssen andere Stimuli gefunden werden. Hier würde sich eine Reduktion der Realisierungszeit sogar negativ auf den Investitionsanreiz auswirken.

Zuletzt wird aus Gl. 4.50 deutlich, dass sich Unsicherheit in zwei verschiedenen Ausprägungen auf die erwartete Realisationszeit auswirkt. Je größer die Unsicherheit der Erlöse σ_x , desto größer t_m , solange $\sigma_x > \sigma_I$.³⁷ Auf der anderen Seite reduziert eine höhere Unsicherheit der Erlöse für $\sigma_x < \sigma_I$ sowie eine höhere Unsicherheit der irreversiblen Investitionsausgaben σ_I die erwartete Realisationszeit stets. Demnach wirkt sich

³⁵Für $r = 0,07$, $\alpha_x = 0,04$, $\alpha_I = 0,00$, $\sigma_x = 0,10$, $\sigma_I = 0,00$, $\rho_{xI} = 0,00$, $\tau = 0,35$ und $s = 0,00$ stimmen die ermittelten Schwellenwerte exakt mit Sarkar & Zhang (2015, Abb. 1) überein, wenn x^* über $y^* I^*$ mit $I^* = 20$ bestimmt wird.

³⁶Der Abbau der bürokratischen Hürden und damit die Beschleunigung des Projekts kann aus modelltheoretischer Sicht durch Einwirkung auf bzw. Reduzierung von Parameter m erfolgen.

³⁷ $\partial t_m / \partial \sigma_x$ sowie $\partial t_m / \partial \sigma_I$ lassen sich über die Quotientenregel $(1/u(x))' = -u'(x)/u^2(x)$ ermitteln. So ergeben sich:

$$\frac{\partial t_m}{\partial \sigma_x} = -\ln m \frac{\sigma_I - \sigma_x}{(\alpha_x - \alpha_I + \sigma_x \sigma_I - \frac{1}{2}(\sigma_x^2 - \sigma_I^2))^2} \quad (4.51)$$

$$\frac{\partial t_m}{\partial \sigma_I} = -\ln m \frac{\sigma_x + \sigma_I}{(\alpha_x - \alpha_I + \sigma_x \sigma_I - \frac{1}{2}(\sigma_x^2 - \sigma_I^2))^2} \quad (4.52)$$

Da der Nenner stets größer null ist und $\ln m > 0$ mit $m > 1$, ergibt sich das Vorzeichen der Ableitungen aus dem Zähler. Für $\partial t_m / \partial \sigma_x$ ergibt sich eine Erhöhung von t_m für $\sigma_x > \sigma_I$ und damit $\sigma_I - \sigma_x < 0$, wohingegen für $\partial t_m / \partial \sigma_I < 0$ gilt. Diese Überlegungen verstehen sich stets *ceteris paribus*.

Erlösunsicherheit partiell negativ und Unsicherheit über die Investitionsausgaben positiv auf t_m aus, was entsprechend in der zuvor beschriebenen Beeinflussung der Investitionsneigung für Projekte mit verschiedenen Dispersionen der Investitionsausgaben θ zu berücksichtigen ist. So ist aus staatlicher Sicht denkbar, bspw. die Erlösunsicherheit durch (Mindest-)Erlösgarantien zu verringern, was für Infrastrukturprojekte mit großen θ anreiztechnisch die gleiche Wirkung wie die Verringerung der erwarteten Bauzeit entfaltet.³⁸

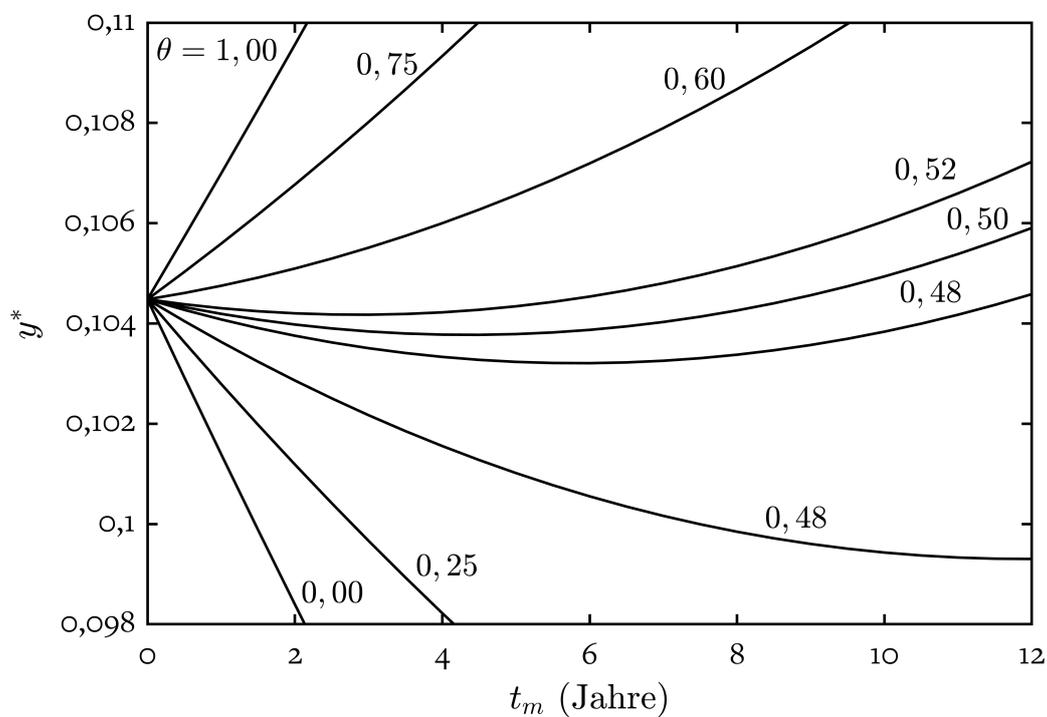


Abbildung 4.3: Kombiniertes Einfluss der erwarteten Realisationszeit t_m und der zeitlichen Dispersion der Investitionsausgaben θ auf den Investitionsschwellenwert y^* .

³⁸Jedoch muss an dieser Stelle auch beachtet werden, dass je nach vertraglicher Ausgestaltung solcher Garantien, auch neue bewertungsrelevante Optionscharakteristika integriert werden können (Kupfer & Welling, 2018). Entsprechend lässt sich diese Aussage nicht ohne eine modellhafte Integration vorab generalisieren.

4.4.2 Einfluss unsicherer Einnahmen und Investitionsausgaben

Wie eingangs ausgeführt, weisen Infrastrukturprojekte neben unsicheren Realisationszeiten auch unsichere Erträge sowie unsichere irreversible Investitionsausgaben auf. Da der Einfluss der Erlösunsicherheit und der Unsicherheit über die Investitionsausgaben auf die Investitionsneigung ähnlich ist, was bei $\rho_{xI} = 0,00$ über die gleichgerichtete Auswirkung von σ_x und σ_I in Gl. 4.47 auf die effektive Unsicherheit des Projekts $\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 - 2\rho_{xI}\sigma_x\sigma_I + \sigma_I^2}$ deutlich wird, soll nachfolgend lediglich der Effekt der Unsicherheit über die gesamten Investitionsausgaben σ_I grafisch in Abb. 4.4 dargestellt werden. Der Effekt von σ_x wird dabei kurz zusammengefasst.

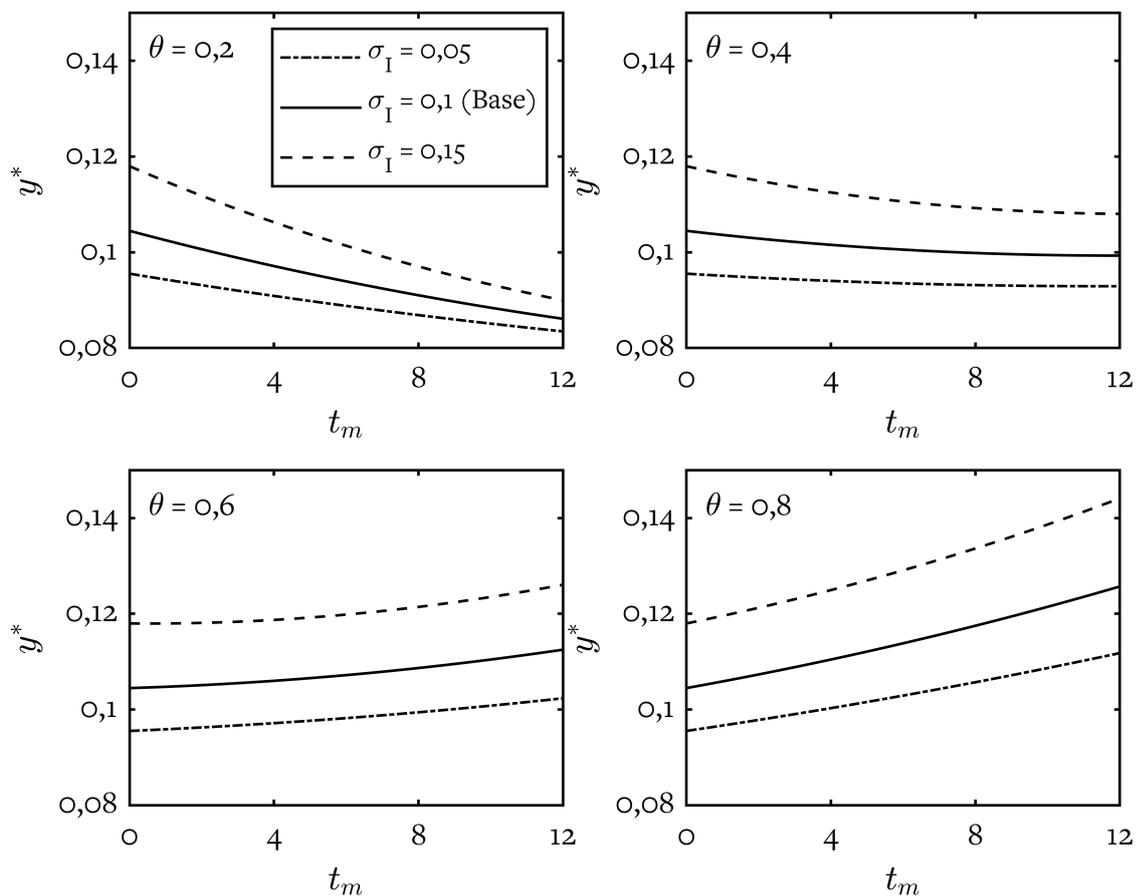


Abbildung 4.4: Einfluss der Unsicherheit der Investitionsausgaben σ_I für verschiedene θ in Abhängigkeit von der erwarteten Realisationszeit t_m auf den Investitionsschwellenwert y^* .

Für die Analyse wurden die relevanten Fälle für die Verteilung der Investitionsausgaben $\theta \in \{0.2, 0.4, 0.6, 0.8\}$ verwendet. In Anlehnung an Sarkar & Zhang (2015) ist die Verfügbarkeit von Studien, die sich systematisch mit der Analyse der Verteilung der Investitionsausgaben innerhalb der Projektrealisierungsphase auseinandersetzen, sehr beschränkt. Tatsächlich konnten Sarkar & Zhang (2015) nur eine Studie von Krainer (1968) finden, in welcher das Zeitprofil der Kapitalakkumulation in der Automobilbranche untersucht wurde. Vor dem Hintergrund von Infrastrukturprojekten erscheint es unwahrscheinlich, dass die Investitionsausgaben komplett vor- oder nachgelagert gezahlt werden. Entsprechend sind $\theta = 0.2$ und $\theta = 0.8$ auch bereits als extreme Werte zu interpretieren.

Zunächst zeigt Abb. 4.4, dass die Unsicherheit die beiden zuvor beschriebenen Basiseffekte nicht beeinflusst. Daher sind die Kurven streng abnehmend, u-förmig und zunehmend, je höher das Gewicht der ersten Investitionstranche θ wird. Abb. 4.4 zeigt zudem eine starke Auswirkung der Unsicherheit der gesamten Investitionsausgaben auf das allgemeine Schwellenniveau, d. h. je höher die Unsicherheit über die Investitionsausgaben, desto höher die finanzplanerischen Anforderungen an das Projekt und desto geringer der Investitionsanreiz y^* . Dieses Ergebnis ist im Hinblick auf die einschlägige Realloptionsliteratur Standard. Erklären lässt sich dieser Effekt damit, dass je höher die Gesamtunsicherheit σ ist, die durch ein hohes σ_I (ebenso wie ein hohes σ_x) gespeist wird, desto höher ist der Wert der Flexibilität und damit der Wert zu warten. Entsprechend wird die Warteposition erst später verlassen und damit ist das Verhalten, die Option unausgeübt zu lassen, für ein größeres Wertintervall von y optimal.³⁹

³⁹An dieser Stelle lässt sich ebenfalls der Effekt der Korrelation ρ_{xI} auf y^* zusammenfassen. Da eine positive Korrelation die effektive Gesamtunsicherheit σ reduziert, wirkt sie analog zu einer Reduktion in σ_x und σ_I . Durch $\rho_{xI} > 0$ wird y^* reduziert. Auf der anderen Seite bewirkt eine negative Korrelation eine Erhöhung von σ und damit eine Verringerung des Investitionsanreizes, denn wenn sich bspw. Investitionsausgaben I erhöhen verringern sich entsprechend tendenziell die Erlöse x . Eine Korrelation ungleich null erzeugt jedoch ebenfalls eine höhere Komplexität bei der Ermittlung der erwarteten Realisationszeit t_m . Dies soll an dieser Stelle nicht weiter berücksichtigt werden.

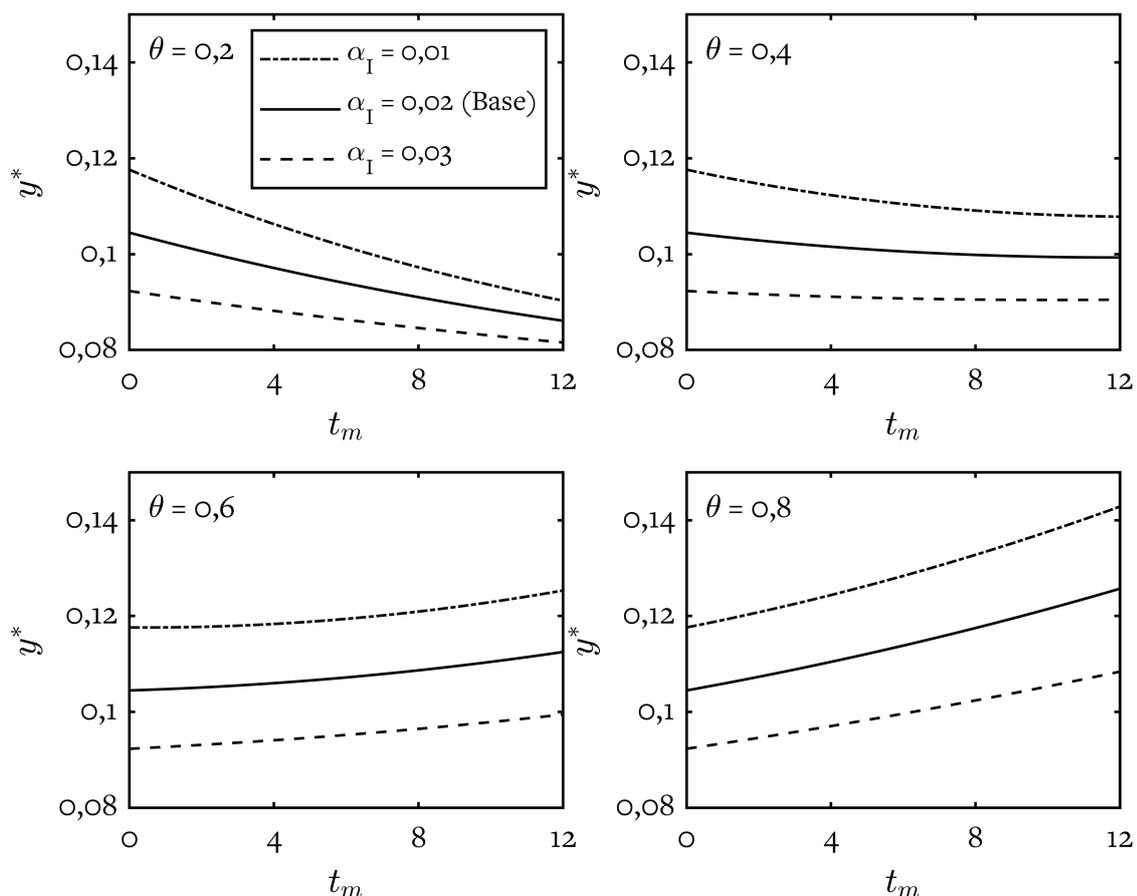


Abbildung 4.5: Einfluss der Driftrate der Investitionsausgaben α_I für verschiedene θ in Abhängigkeit von der erwarteten Realisationszeit t_m auf den Investitionsschwellenwert y^* .

Zuletzt soll die Auswirkung der Driftrate der Investitionsausgaben α_I auf den Schwellenwert y^* untersucht werden. Generell ist dabei denkbar, dass α_I sowohl positive als auch negative Werte annehmen kann. Hierbei kann sich α_I aufgrund des technischen Fortschritts bspw. verringern oder gar negativ und damit rückläufig sein oder sich aufgrund von schlechter Planungsqualität, schlechter makroökonomischer Entwicklung oder inflationärer Tendenzen erhöhen. Wie zuvor wird sich auch hier nur auf die komparative Analyse von α_I beschränkt, da sich die Logik für die Auswirkung von α_x automatisch daraus ableiten lässt.

Abb. 4.5 zeigt, dass eine Erhöhung der Driftrate – Investitionsausgaben wachsen in Erwartung stärker – zu einem niedrigeren Schwellenwert führt, während eine Verringerung der Drift – Ausgaben wachsen in Erwartung weniger stark – den Schwellenwert erhöht.

Dieses Ergebnis ist intuitiv. Der Wert der Handlungsflexibilität steigt, wenn ein Rückgang der Investitionsausgaben erwartet wird bzw. unter sonst gleichen Bedingungen die Investitionsausgaben weniger stark wachsen und umgekehrt. Dementsprechend lohnt es sich, für einen vglw. weniger starken Anstieg der Investitionsausgaben, aus Sicht des Investors, zu warten, da nur durch Warten tatsächlich davon profitiert werden kann. Außerdem verstärkt eine erwartete Verringerung in der Wachstumsrate der Investitionsausgaben die positive Wirkung der Ausgabenverzögerung, insbesondere bei geringer erster Investitionstranche (θ klein). Daher sinkt der Schwellenwert mit zunehmendem t_m stärker. Im Gegensatz dazu verringert ein verstärktes Wachstum der gesamten Investitionsausgaben den positiven Effekt der Ausgabenverzögerung, entsprechend ist der Wert zu warten und damit y^* kleiner.

4.4.3 Einfluss von Subventionen und Steuern

Staatliche Anreize für private Investitionen in Infrastruktur können auf vielen Wegen geschaffen werden – zwei davon sind Subventionen und steuerliche Erleichterungen. Generell zielen solche Anreize darauf ab, das Verhalten von Unternehmen in Richtung einer (politischen) Zielsetzung zu beeinflussen und so z. B. den Klimaschutz oder den Wirtschaftsstandort zu stärken. Um Einfluss auf das Verhalten der Unternehmen auszuüben, wird in diesem Abschnitt das optimale Verhältnis y^* genutzt. Da y^* ein Maß für die Investitionsneigung darstellt, ist es sinnvoll eben jenes mit steuerlichen Erleichterungen und Subventionen in Richtung einer gewünschten Zielgröße y_G zu manipulieren. Modelltheoretisch soll dies wie bei Danielova & Sarkar (2011) erfolgen, indem $y^* = y_G$ gesetzt wird. Möchte der Staat private Investitionen auf ein Niveau y_G stimulieren, muss er für τ und s geeignete Werte wählen. Daher erfordert die Wahl eines bestimmten τ eine entsprechende Änderung in s , die sich aus Einsetzen von y_G in Gl. 4.47 und Freistellen nach s ergibt

$$s = 1 + m^{-\beta_1} \left(\frac{1}{\theta} - 1 \right) - \frac{m^{1-\beta_1}}{\theta} \frac{(1-\tau)(\beta_1-1)}{(r-\alpha_x)\beta_1} y_G. \quad (4.53)$$

Durch die Erhebung einer Steuer auf die Einnahmen erhält der Staat den erwarteten Wert der Steuereinnahmen je Geldeinheit privat investierten Kapitals sobald das Projekt beginnt, Einnahmen zu generieren. Anders als bei Danielova & Sarkar (2011) erhält der

Staat die Steuereinnahmen nicht sofort. Aufgrund der Realisationszeit muss der Staat seine erwarteten Steuereinnahmen unter Einsatz des stochastischen Diskontfaktors auf den Zeitpunkt des Projektstarts diskontieren. Demnach ist $T(y_G)$, unter der Prämisse, dass der Staat sofort den Anreiz bei $y = y_G$ entfalten möchte, unter Einsatz des stochastischen Diskontierfaktors wie folgt zu evaluieren:⁴⁰

$$T(y_G) = \frac{\tau m y_G}{r - \alpha_x} \left(\frac{1}{m} \right)^{\beta_1}. \quad (4.54)$$

Da der Staat zum Zeitpunkt y_G Subventionen gewährt, muss $T(y_G)$ um jene korrigiert werden, sodass sich Nettoeinnahmen je Geldeinheit investierten, privaten Kapitals aus Sicht des Staates zu

$$\Pi(y_G) = \frac{\tau m^{1-\beta_1} y_G}{r - \alpha_x} + m^{1-\beta_1} \frac{(1-\tau)(\beta_1-1)}{(r-\alpha_x)\beta_1} y_G - m^{-\beta_1} \left(\frac{1}{\theta} - 1 \right) - 1 \quad (4.55)$$

ergeben. Ebenso, wie sich das Unternehmen in seiner Entscheidung optimal verhalten möchte, so wird auch der Staat eine werttechnisch optimale Ausgestaltung von τ und s anstreben. Es gilt, $\Pi(y_G)$ zu maximieren. Da sich s in Gl. 4.53 über τ festlegen lässt, reicht die Differenzierung von $\Pi(y_G)$ hinsichtlich τ aus, um das Optimum zu bestimmen

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \tau} = \frac{m^{1-\beta_1} y_G}{r - \alpha_x} \left(\frac{1}{\beta_1} \right). \quad (4.56)$$

Aus Gl. 4.56 wird analog zu Danielova & Sarkar (2011) deutlich, dass $\partial \Pi / \partial \tau > 0$, sodass auch unter Berücksichtigung von Realisationszeit im Infrastrukturprojekt für den Fall der reinen Finanzierung aus Eigenmitteln, Steuern und Subventionen so hoch wie möglich zu wählen sind.⁴¹ Hierbei ist für den wertmaximierenden Staat eine hohe Steuer stets besser, als eine niedrige Steuer. In Konsequenz, mit $\partial s / \partial \tau > 0$, dominiert die Subvention als Anreiz die Steuererleichterungen.

Jedoch zeigt Gl. 4.56 auch, dass für große m und damit lange Realisationszeiten wegen $1 - \beta_1 < 0$ und $m > 1$ sich die Nettoeinnahmen des Staates je Geldeinheit investierten Kapitals im Vergleich zum Fall ohne Realisationszeit nur in geringerem Maße erhöhen, wenn die Steuer erhöht wird. Auch wenn die Subventionen die Steuererleichterungen dennoch als Anreiz ausstechen, wird der Effekt der Realisationszeit deutlich. Sie redu-

⁴⁰Der stochastische Diskontierfaktor ist hier mit $\left(\frac{y_G}{m y_G} \right)^{\beta_1}$ gegeben.

⁴¹Siehe auch Unterabschnitt 4.2.2.

ziert den Wert der Nettoeinnahmen des Staates und wirkt sich damit negativ auf den Staatshaushalt aus. In Konsequenz sollte eine Regierung bestrebt sein, z. B. mögliche bürokratische Hürden abzubauen, um über Parameter m die Realisationszeiten zu verringern und damit frühzeitig Zugang zu Steuereinnahmen zu erhalten. Diese Bestrebungen sind jedoch mit den Erkenntnissen aus Unterabschnitt 4.4.1 in Einklang zu bringen. Zuletzt soll die Auswirkung des dominierenden Investitionsanreizes, der Subventionen

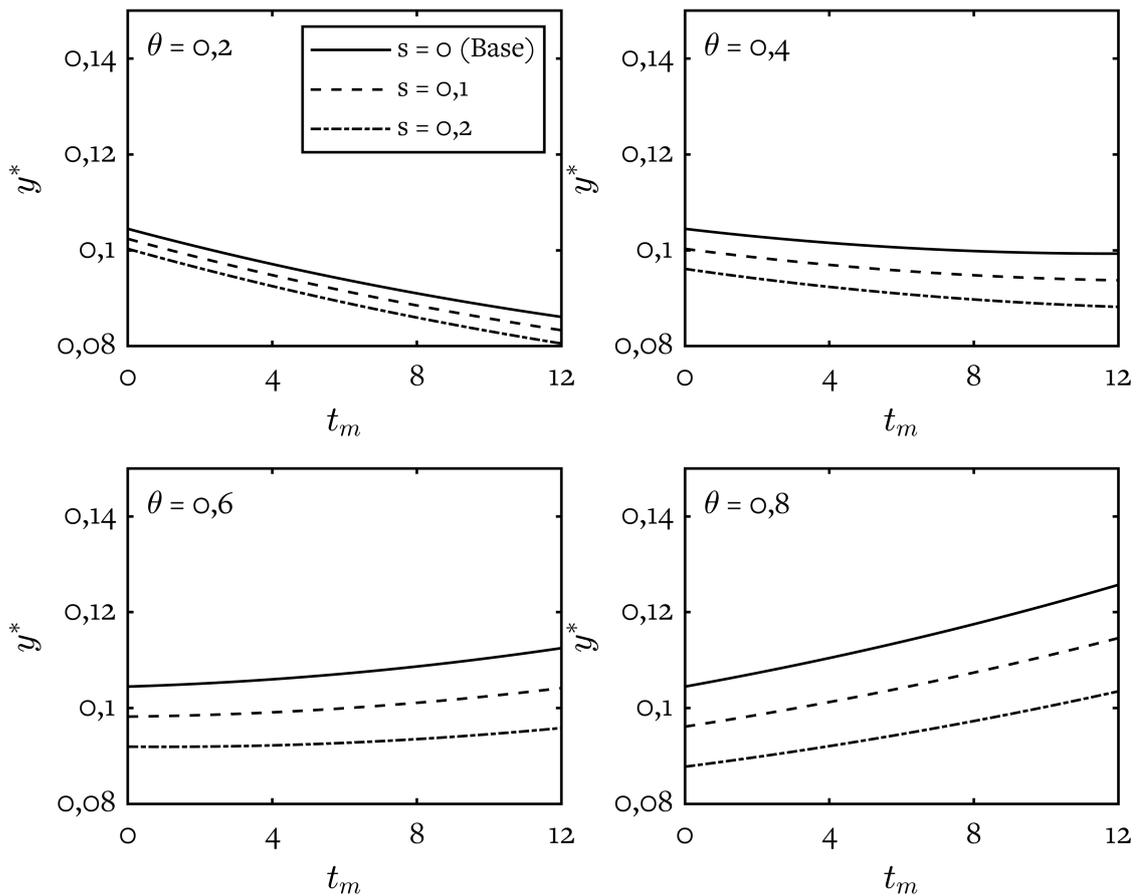


Abbildung 4.6: Einfluss der Subvention s für verschiedene θ in Abhängigkeit von der erwarteten Realisationszeit t_m auf den Investitionsschwellenwert y^* .

s , auf y^* in Abb. 4.6 untersucht werden. Der grundlegende Effekt ist eine Verringerung von y^* mit zunehmendem s und somit eine Erhöhung des Investitionsanreizes. Eine höhere Subvention senkt die effektiven versunkenen Investitionsausgaben und damit den Schwellenwert. Es wird deutlich, dass dieser Effekt bei einem niedrigen Gewicht der ersten Investitionstranche gering ist. Dies ist u. a. auf den Modellaufbau zurückzuführen, da hier lediglich eine Subvention der ersten Investitionstranche zugelassen wird. Der

Effekt von s auf y^* wird deutlich stärker, je höher θ . Dieser Effekt lässt sich erklären, wenn die effektiven Investitionsausgaben in Form des Barwerts betrachtet werden. Ein niedriges θ hat aufgrund des positiven Effekts der Ausgabenverzögerung niedrige Effektivausgaben im Sinne des Gegenwartswerts dieser zur Folge. Je höher θ , desto höher sind auch die Effektivausgaben, da ein Großteil sofort gezahlt werden muss und nicht durch eine zeitliche Verzögerung abdiskontiert werden kann. Entsprechend bewirkt die Verringerung der ersten Investitionstranche durch s in Konsequenz eine starke Verringerung der effektiven Investitionsausgaben aus Kapitalwertsicht und hat somit einen großen Einfluss auf Infrastrukturprojekte, die mit einer großen Ausgabenbelastung im Voraus realisiert werden müssen.

4.5 Abschließende Bemerkung

In diesem Kapitel werden Wege aufgezeigt, wie der Realloptionsansatz auf die Bewertung von Infrastrukturprojekten angewendet werden kann. Dabei sind drei wichtige Merkmale von Infrastrukturprojekten, wie unsichere Erträge, unsichere Investitionsausgaben sowie unsichere Realisierungszeiten, berücksichtigt worden. In der Literatur werden oft nur ein oder zwei dieser Merkmale erfasst, insbesondere unsichere Erträge werden selten in Kombination mit unsicheren Realisierungszeiten oder unsicheren Investitionsausgaben modelliert.

Es wird aufgezeigt, dass die Berücksichtigung aller drei Merkmale für Infrastrukturprojekte besonders wichtig ist, da sich die Vernachlässigung signifikant auf das optimale Verhalten eines (rationalen) Unternehmens auswirkt. Für Infrastrukturprojekte mit vorgelagerten Investitionsausgaben wird ein abnehmender Investitionsanreiz mit zunehmender erwarteter Realisationszeit festgestellt, wohingegen für Infrastrukturprojekte mit nachgelagerten Investitionsausgaben ein zunehmender Investitionsanreiz mit zunehmender erwarteter Realisationszeit festzuhalten ist. Für Infrastrukturprojekte mit ausgeglichenen Vorab- und nachgelagerten Investitionsausgaben kann sowohl ein steigender als auch fallender Investitionsanreiz mit erwarteter Realisationszeit gefunden werden. In Bezug auf Unsicherheit wird ein grundlegendes Ergebnis aus der Realloptionsliteratur bestätigt: Der Anreiz, in Infrastrukturprojekte zu investieren, ist umso geringer, je höher die Unsicherheit über die Investitionsausgaben und Erlöse und damit die Gesamtunsicherheit ist. Es wird *ceteris paribus* auch gezeigt, welchen Einfluss die Drift-

rate der Investitionsausgaben in Kombination mit der erwarteten Realisierungszeit hat. Ein Anstieg in der Driftrate der Investitionsausgaben erhöht den Anreiz, zu investieren, da das Warten hier in Erwartung mit höheren gesamten Investitionsausgaben gleichzusetzen ist. Auf der anderen Seite verringert eine niedrigere Driftrate der Investitionsausgaben den Investitionsanreiz, sodass die Investitionen länger aufgeschoben werden. Es wird zudem untersucht, wie Staaten Anreize für private Investitionen in Infrastrukturprojekte schaffen können. Hier kann zunächst festgehalten werden, dass trotz einer unsicheren Realisierungszeit Subventionen als Investitionsanreiz für ein Unternehmen mit Finanzierung aus Eigenmitteln gegenüber Steuersenkungen als Anreiz dominieren. Diese Erkenntnis deckt sich mit der einschlägigen Literatur, ist aber in Bezug auf die Realisierungszeit neu. Zudem kann ein starker Effekt von Subventionen als Investitionsanreiz für Infrastrukturprojekte mit hohen vorgelagerten Investitionsausgaben festgestellt werden.

Zuletzt lässt sich u. a. eine Limitation des Modells in Bezug auf die Finanzierungsmöglichkeiten feststellen. Im Hinblick auf manche Infrastrukturvolumina für Unternehmen aus der Praxis ist eindeutig auch die Aufnahme von Fremdkapital notwendig. Hier können weitere Forschungsarbeiten darauf abzielen, das in diesem Kapitel vorgestellte Modell um die Möglichkeit der Fremdfinanzierung zu erweitern. Wie aus der Literatur hervorgeht, könnte sich die Fremdfinanzierung im Hinblick auf ein optimales Verhältnis von effektivem Steuersatz und Subventionen, beeinflusst durch erwartete Realisationszeiten, auswirken und/oder das Potenzial für neue Erkenntnisse über die Auswirkungen der drei Merkmale von Infrastrukturprojekten bieten. Auch die Berücksichtigung der Möglichkeit der Kapazitätswahl von Infrastrukturprojekten kann interessant sein. Hier kann die Erweiterung des Modells, unter Rückgriff auf umfangreiche Realloptionsliteratur in Richtung der Frage nach dem „Wieviel“ investiert werden soll, erfolgen, sodass die geplante Infrastruktur gleichzeitig optimal dimensioniert wird. Zuletzt ist es auch denkbar, dass die teilweise realisierte Infrastruktur bereits Erträge abwirft, was zusätzlich in das Modell integriert werden könnte.

5 Investition in Projekte mit operativer Flexibilität unter Mean-Reversion

Im vorhergehenden Kapitel wurden Infrastrukturinvestitionen allgemein vor dem Hintergrund von drei wichtigen Eigenschaftsdimensionen, wie unsichere Einnahmen, unsichere Kosten während der Bauzeit sowie an sich unsichere Bauzeiten, analysiert. Dies soll in diesem Kapitel nicht weiter verfolgt werden. Vielmehr soll der Fokus auf Investitionsentscheidungen in Projekte mit operativer Flexibilität gelegt werden. Solche Projekte sind in einer Vielzahl von Wirtschaftsbereichen zu finden, jedoch offensichtlich im Bereich der Energieinfrastruktur ausgeprägt. Mit Eigenschaften, wie hohen irreversiblen Investitionsausgaben gekoppelt mit Handlungsspielräumen nicht nur bezüglich der Investitionsentscheidung an sich sondern auch im täglichen Betrieb – und damit projektinhärenter Flexibilität – erzeugen Projekte aus dem Bereich der Energieinfrastruktur Realoptionscharakteristika. Entsprechend sollen im Rahmen dieses Kapitels Möglichkeiten herausgearbeitet werden, wie sich die Realoptionsmethode in diesem Feld anwenden lässt.

Dazu wird in Abschnitt 5.1 zunächst die allgemeine Bedeutung von Energieinfrastruktur aufgezeigt. Zudem wird mit Fokus auf Strommärkte und -netze das Potenzial der Realoptionsanalyse als Bewertungsmethodik für (technische) Flexibilitätsoptionen herausgearbeitet. In Abschnitt 5.2 wird anschließend einschlägige Realoptionsliteratur aus dem Infrastruktursegment Energie systematisiert, sowie methodisch verwandte Literatur ohne direkten Bezug zum Thema Energie für das in diesem Kapitel vorgestellte Modell analysiert. In Abschnitt 5.3 erfolgt die Modellbildung. Das Modell berücksichtigt dabei nicht nur die allgemeine operative Projektflexibilität, die z. B. bei einer Investition in eine Biogasanlage zu finden ist, sondern ebenfalls die flexible Initialinvestition in ein solches Projekt. Zusätzlich erfolgt die Modellierung der Zustandsvariablen als Ornstein-Uhlenbeck Prozess. Anschließend werden die Ergebnisse des Modells im Rahmen einer

numerischen Studie in Abschnitt 5.4 untersucht. Zuletzt erfolgt in Abschnitt 5.5 eine kurze abschließende Bemerkung.

5.1 Bedeutung von Energieinfrastruktur

Im alltäglichen Leben – ob zu Hause oder am Arbeitsplatz – werden der Strom aus der Steckdose, klimatisierte Räume an heißen und geheizte Räume an kalten Tagen oder einfach das fließende Warmwasser aus dem Wasserhahn als gegeben hingenommen beziehungsweise (in entwickelten Ländern) als Lebensstandard unbewusst vorausgesetzt.¹ Wie wichtig Energieinfrastruktur tatsächlich ist, wird häufig immer erst dann offensichtlich, wenn sie nicht wie gewohnt funktioniert. So führte bspw. der Extremwinter im Februar 2021 im US Bundesstaat Texas zu Stromausfällen, die für einige der 10 Millionen betroffenen Texaner teils mehrere Tage anhielten (Busby et al., 2021). Der Dominoeffekt blieb nicht aus. Auch andere essentielle Bereiche, wie die Trinkwasseraufbereitung oder die medizinische Versorgung, waren unmittelbar durch die Stromausfälle betroffen, sodass alleine in Texas die Summe der wirtschaftlichen Schäden auf 130 Mrd. Dollar geschätzt wird (Busby et al., 2021).

Die Extremwetterereignisse, wie der beschriebene Winter in Texas oder andere, wie Hitzewellen, Dürren, Starkregen, Taifune und Waldbrände, deren Ursache im Klimawandel begründet ist, wirken sich stark auf eine funktionierende Energieinfrastruktur aus und erzeugen neue Herausforderungen in der Planung nationaler Energiesysteme (Jing et al., 2021). Vielmehr verdeutlichen sie die gesellschaftliche Abhängigkeit von einer störungsfreien Energieversorgung (Würfel, 2017, S. 19). Die Bedeutung von Energieinfrastruktur als „[...] large-scale technical systems which organise social life. They

¹Es konnte keine Studie gefunden werden, die sich direkt mit der Wahrnehmung einer funktionierenden Energieinfrastruktur auseinandersetzt. Es kann an dieser Stelle jedoch auf die Bedürfnispyramide nach Maslow zurückgegriffen werden. So beschreibt Maslow (1943, S. 394 - 395): „These basic goals [physiological, safety, love, esteem, and self-actualization] are related to each other, being arranged in a hierarchy of prepotency. [...] the most prepotent goal will monopolize consciousness and will tend of itself to organize the recruitment of the various capacities of the organism. The less prepotent needs are minimized, even forgotten or denied.“ Da in Industrie- bzw. entwickelten Ländern bereits ein hoher Lebensstandard mit i. d. R. erfüllten physiologischen und Sicherheitsbedürfnissen vorherrscht, kann davon ausgegangen werden, dass eine funktionierende Energieinfrastruktur nicht mehr bewusst wahrgenommen wird. Entsprechend führt das Fehlen – genau dann, wenn die Energieinfrastruktur ausfällt – eines in der Hierarchie vorgelagerten Bedürfnisses dazu, dass dieses ins Zentrum der Aufmerksamkeit rückt.



Abbildung 5.1: Zieltrias der Energiewirtschaft abgewandelt nach Schumacher & Würfel (2015, S. 10).

are the “central nervous systems” of economies“ (Bridge et al., 2018, S. 3) wird mehr als deutlich. Vor diesem Hintergrund kann eine wichtige Leitmaxime der Energiewirtschaft herausgestellt werden: Die Versorgungssicherheit. Erweitert um die Dimensionen der Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit leitet sich die Zieltrias der Energiewirtschaft in Abb. 5.1 ab. Die Ausrichtung der Zieltrias ist dabei eindeutig: Während Wirtschaftlichkeit die Bezahlbarkeit und die Versorgungssicherheit die energietechnische, aber auch politische, Dimension adressieren, bezieht sich Umweltverträglichkeit auf Nachhaltigkeit und Umweltschutz, da mit einer funktionierenden Energieversorgung zwangsweise Eingriffe in die Natur einhergehen (Schumacher & Würfel, 2015, S. 10 ff.). Analog zur Zielsetzung der Energiewirtschaft ergeben sich die Ziele der Energiepolitik. So ist auch diese stets darauf ausgerichtet, die Kosten möglichst gering zu halten, dabei die Versorgung zu gewährleisten und gleichzeitig die Umweltbelastung so gering wie möglich zu halten (Schmidt et al., 2019). Die Ziele stehen dabei in einem Zielkonflikt zueinander. Sowohl politisch als auch privatwirtschaftlich gilt es daher, die Ziele in einem ausgewogenen Verhältnis zueinander auszubalancieren.

Das Energiesystem eines jeden Landes stellt nicht nur technisch bzw. physisch ein komplexes System dar, sondern auch aus wirtschaftlicher Sicht. An der Wertschöpfungskette einer aktiven Energieinfrastruktur sind viele Akteure, wie Produzenten, Zwischenhändler, Netzbetreiber und Konsumenten, beteiligt. Die Akteure sind dabei auf vielfältigen, teils (global) miteinander verbundenen und teils regulierten physischen Märkten sowie Finanzmärkten, wie Gas-, Öl- und Strommärkten, aktiv. Durch die Struktur der Energiesysteme lassen sich viele Stellen identifizieren, an denen die Realoptionsmethode als Bewertungs- und Steuerungstool eingesetzt werden kann. Die im Rahmen dieses Kapitels untersuchte operative Flexibilität spielt dabei eine wichtige Rolle. Sie ist besonders im Strommarkt ausgeprägt, sodass nachfolgend in

Unterabschnitt 5.1.1 zunächst der Strommarkt kurz näher betrachtet wird und im Anschluss in Unterabschnitt 5.1.2 Flexibilitätsoptionen ergründet werden, die vor dem Hintergrund der Zieltrias eingesetzt werden können, um ein funktionierendes Stromnetz zu gewährleisten bzw. in seiner kontinuierlichen Funktionsweise zu schützen.

5.1.1 Kurzüberblick zu Strommärkten und Herausforderungen im Netzbetrieb

Mit der Liberalisierung der Strommärkte, die in Deutschland seit 1998 realisiert wurde, geht eine Abkehr von einer zuvor in Konsortialgebieten organisierten Versorgungsstruktur mit Energieversorgern als Monopolisten in der gesamten Wertschöpfungskette in Richtung einer (kosten-)effizienteren wettbewerblichen Marktstruktur einher (Schumacher & Würfel, 2015, S. 11 ff.). Die Liberalisierung des Strommarkts ist dabei kein exklusiv deutsches Phänomen. In vielen anderen Ländern fand ebenfalls eine Abkehr von Gebietsmonopolen statt (Würfel, 2017, S. 200). Die so entstandenen Strommärkte weisen dabei generell Einzel- und Großhandelskomponenten auf, sodass elektrischer Strom nicht nur zwischen Versorgungsunternehmen sondern auch zwischen Versorgungsunternehmen und Endkunden, den privaten, gewerblichen und industriellen Verbrauchern, gehandelt wird. Strommärkte weisen zudem starke wettbewerbliche aber auch regulatorisch fixierte Komponenten auf (FERC, 2020, S. 35).²

Ein zentrales Element auf Strommärkten ist der Strompreis, welcher beispielhaft als Spotpreis für den deutschen Strommarkt im 10-Jahres Zeitraum in Abb. 5.2 dargestellt ist. Strommärkte können teils deutlich unterschiedliche Strompreisverläufe aufweisen, sodass die Strompreiszeitreihe aus Abb. 5.2 für andere Strommärkte nicht repräsentativ sein muss. Während bspw. kontinentaleuropäische Strommärkte durchaus ähnliche Preisverläufe haben können, was ein Indiz für eine zunehmend physische Vernetzung durch Stromleitungen und damit Assimilation der entsprechenden Teilmärkte ist, kann der Strompreis auf physisch stärker entkoppelten Märkten, wie bspw. dem skandinavischen Markt, andere Verläufe annehmen (Würfel, 2017, S. 210). Die Strommärkte eint jedoch die Preisbildung über den Marktmechanismus, nämlich der Zusammenkunft von

²Die Preisbildung erfolgt demnach basierend auf dem Marktmechanismus oder aber reguliert auf Basis der Kosten zur Leistungserbringung, wie dies bei Übertragungsnetzbetreibern mit ihrer natürlichen Monopolstellung der Fall ist (Schumacher & Würfel, 2015, S. 14).

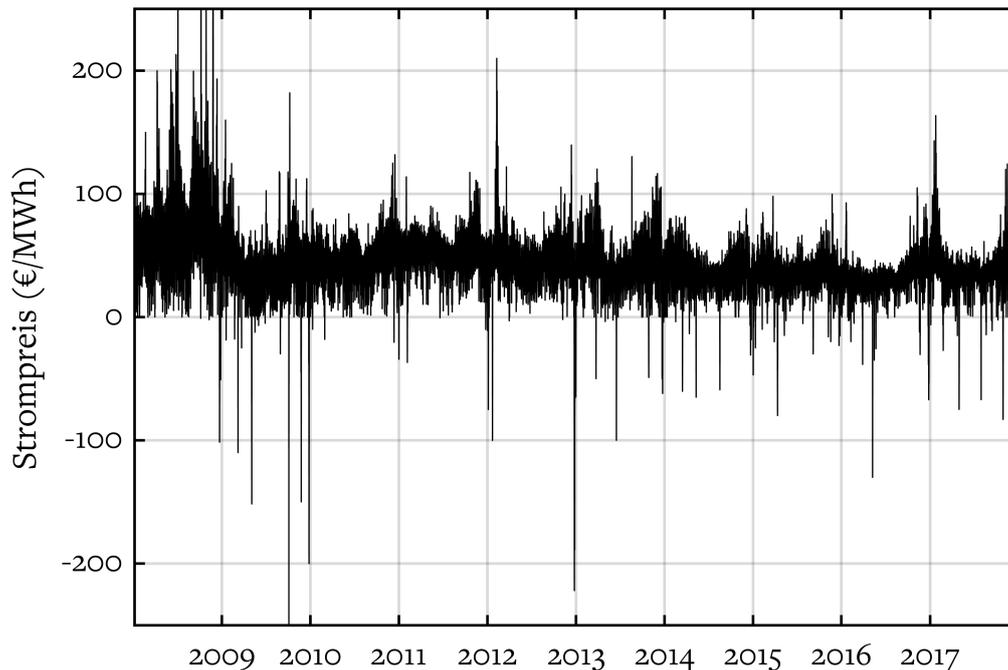


Abbildung 5.2: Stündliche historische Spotpreise für Strom in €/MWh (European Power Exchange (EPEX) Base Load, 01.01.2008 - 31.12.2017).

Stromangebot und Stromnachfrage (Schumacher & Würfel, 2015, S. 25). Im Gegensatz zu klassischen Rohstoffen, wie Erdgas, Erdöl oder landwirtschaftlichen Erzeugnissen, ist dabei die Angebots- und Nachfragedynamik an Strommärkten als „intensiver“ einzustufen. Dies liegt zum einen an begrenzten Speicherkapazitäten für elektrischen Strom (Hull, 2015, S. 947) und zum anderen an der begrenzten Flexibilität bei Lastwechseln, an Stromausfällen sowie an Einschränkungen bei der Erzeugung, um nur einige zu nennen (Fanone et al., 2013; Keles et al., 2012). Daher muss das Stromangebot zu jeder Zeit mit der Stromnachfrage übereinstimmen. In Konsequenz ist der Strompreis hochvolatil und weist Charakteristika, wie Saisonalitäten, Rückkehr zum Mittelwert – Mean-Reversion – sowie sowohl negative als auch positive Preisspitzen auf (Fanone et al., 2013), was augenscheinlich aus Abb. 5.2 deutlich hervorgeht.

Die Strompreischarakteristika sind das Resultat einer Vielzahl von preistreibenden Faktoren, welche in Abb. 5.3 systematisiert sind. Diese Faktoren wirken dabei nicht isoliert, sondern überlagern sich gegenseitig (Schumacher & Würfel, 2015, S. 26). Demnach sind eine Vielzahl von möglichen Konstellationen der Einflussfaktoren denkbar.

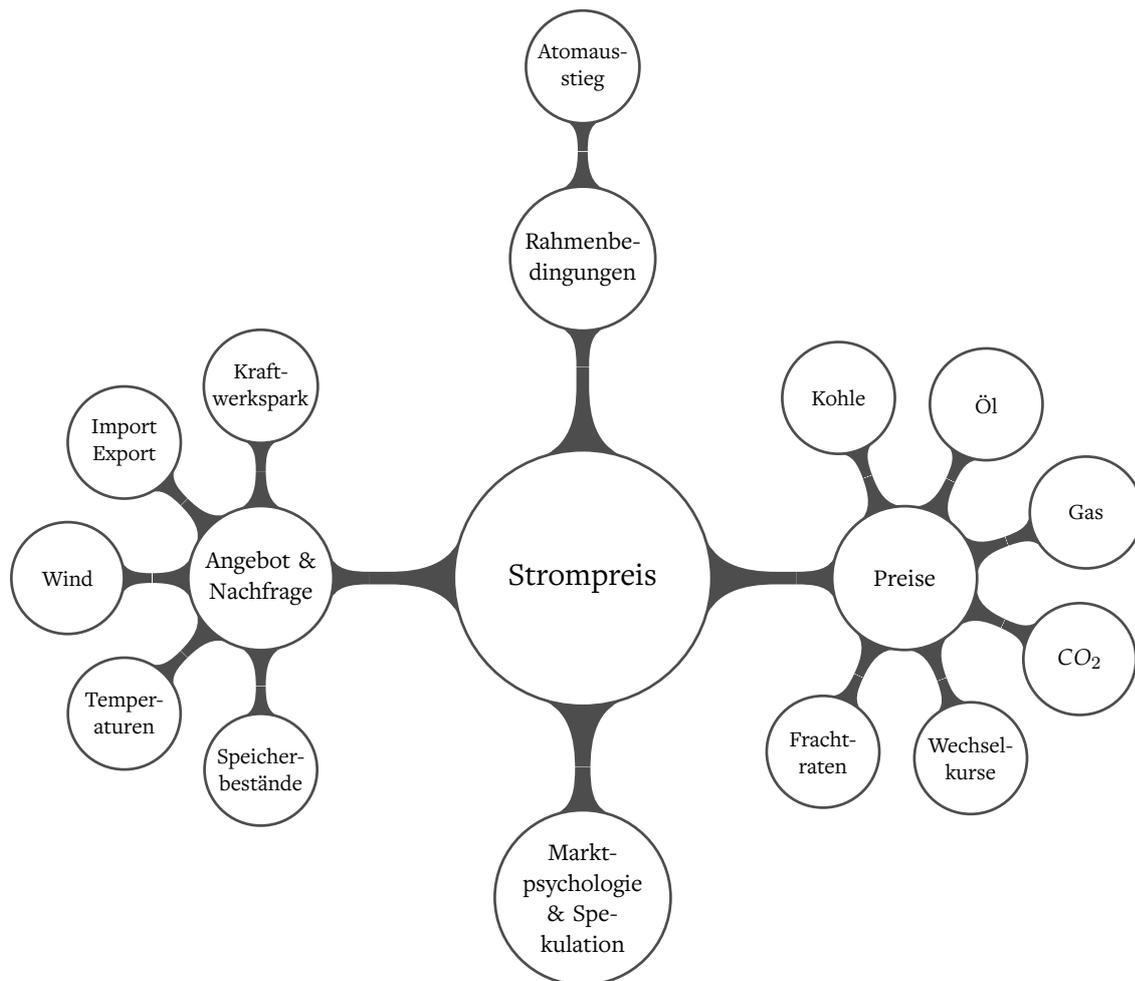


Abbildung 5.3: Einflussfaktoren auf den Strompreis abgewandelt nach Würfel (2017, S. 211).

Gepaart mit der Tatsache, dass diese Einflussfaktoren generell unsicher sind, erfordert dies ein anspruchsvolles Risikomanagement sowie komplexe Prognosemodelle. Vor diesem Hintergrund bestehen viele Bestrebungen, den Strompreis modelltheoretisch zu erfassen bzw. abzubilden.³

Exemplarisch sollen zwei Modellansätze herausgegriffen werden. Lucia & Schwartz (2002) schlagen Ein-Faktor- und Zwei-Faktor-Modelle für die Strompreise an der nordischen Strombörse vor. Während das Ein-Faktor-Modell die gesamte Preisbewegung

³Für eine ausführliche Systematisierung von Literatur und der verschiedenen Herangehensweisen in der Strompreismodellierung sei auf Weron (2014) verwiesen. Weron (2014, Abb. 6) gibt dabei einen allgemeinen Überblick. Da im Rahmen dieser Arbeit die modelltheoretische Abbildung einer Entscheidungssituation im Vordergrund steht, wird nachfolgend lediglich kurz auf eine ausgewählte Arbeit eingegangen, die in Weron (2014) als „Reduced-form“ klassifiziert werden kann.

über einen Mean-Reversion Prozess erfasst, unterscheidet das Zwei-Faktor-Modell zwischen kurzfristigen und langfristigen Preisschwankungen. Erstere werden wiederum als Mean-Reversion Prozess modelliert, während letztere z. B. über eine arithmetisch oder geometrisch Brownsche Bewegung erfasst werden. Die Modellierung des Strompreises über stochastische Prozesse zielt dabei weniger auf eine exakte stündliche Vorhersage ab. Sie soll vielmehr ein ausreichend realistisches Abbild schaffen, sodass eine möglichst effiziente Risikoanalyse sowie Derivatebepreisung möglich ist (Weron, 2014). Während die zwei zuvor beschriebenen Modelle in die Gruppe der Modelle mit reduzierter Form eingeordnet werden können, lassen sich darüber hinaus eine Vielzahl weiterer Ansätze, wie Modelle mit multiplen Agenten, Fundamentalmodele, statistische Modelle sowie Computational Intelligence Modelle unterscheiden (Weron, 2014).

Die zuvor beschriebenen ökonomischen Mechanismen sind für ihre Entfaltung generell an eine verlässliche physische Energieinfrastruktur gebunden. Ohne diese wäre der Handel von Strom an Spot- und Terminmärkten sowie die Stromversorgung nicht möglich. Vor diesem Hintergrund ist insbesondere die Versorgungssicherheit und damit Netzstabilität von Bedeutung. Die Gewährleistung jener stellt jedoch eine komplexe Herausforderung dar. So reagiert bspw. die Nachfrageseite nach Strom und damit die Last auf kurzfristige Preisänderungen nur unwesentlich. Demnach muss sich das Stromangebot stets auf die preisinelastische Stromnachfrage adjustieren (Keles et al., 2012). Der Grund für die Preisinelastizität der Nachfrage ist dabei offensichtlich: Insbesondere die privaten, aber auch teils die gewerblichen und industriellen Verbraucher bekommen oft keine Preissignale, auf die sie reagieren könnten (FERC, 2020, S. 41).⁴ Die Abschlagszahlung erfolgt oft pauschal einmal im Monat, sodass der Strom stets einfach dann nachgefragt wird, wenn er gerade benötigt wird, auch wenn sich diese Nachfrage bspw. zeitlich verschieben ließe.

Entsprechend müssen Stromproduzenten und Netzbetreiber durch fehlende Speichermöglichkeiten und fehlende reaktive Nachfrage stets selbst aktiv die Stromversorgung zu jeder Tageszeit und an jedem Ort im Stromnetz gewährleisten (FERC, 2020, S. 36). Ein aktives Stromangebot setzt jedoch einen angebotsseitigen Stromerzeugungspool voraus, der in der Lage ist, der Stromlast zu folgen. Dies wird mit der Zunahme in der intermittierenden Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, wie aus Photovoltaik und Wind, zusätzlich erschwert (Keles et al., 2012; Després et al., 2017; Pilpola & Lund, 2019; Mikkola & Lund, 2016). Um diesem Problem entgegenzuwirken, ist

⁴Große industrielle Verbraucher bekommen durchaus Preissignale (FERC, 2020, S. 41).

zusätzliche Flexibilität nicht nur auf der Angebotsseite und im Netzbetrieb sondern auch auf der Nachfrageseite nötig, um weiterhin die Netzstabilität und damit Integrität des Stromnetzes zu sichern (Papaefthymiou & Dragoon, 2016). Die dafür nötigen Flexibilitätsoptionen werden im nachfolgenden Unterabschnitt 5.1.2 kurz beleuchtet.

5.1.2 Flexibilitätsoptionen

Flexibilitätsoptionen können teilweise direkt aus dem Betrieb des Stromnetzes erwachsen, lassen sich jedoch in der Regel in drei Gruppen einteilen: flexible Stromerzeuger, flexible Stromverbraucher und Speichersysteme (Briest et al., 2022). Generell muss an dieser Stelle zwischen der ökonomischen Flexibilität im Sinne der Realoptionslogik und der physischen bzw. technischen Flexibilität der hier beschriebenen Flexibilitätsoptionen unterschieden werden. Die physische Flexibilität der Flexibilitätsoptionen ist dabei die Basis für ökonomisch bewertbare Handlungsspielräume aus Realoptionssicht. Die Bedeutung von Flexibilitätsoptionen nimmt insbesondere durch eine wachsende Stromerzeugung aus unsicheren erneuerbaren Energien, wie aus Windkraft und Photovoltaik, zu (Zöphel et al., 2018). So steigt durch die Flexibilitätsoptionen auch der ökonomische Wert der Handlungsspielräume, sodass sich neue Geschäftsmodelle und Betriebsstrategien für die jeweiligen Gruppen von Flexibilitätsoptionen ableiten lassen (Helms et al., 2016).

Das Ziel der Flexibilitätsoptionen lässt sich dabei direkt aus den drei Gruppen ableiten. Während flexible Stromerzeuger eine Flexibilisierung des Stromangebots adressieren, zielen flexible Verbraucher auf eine Flexibilisierung der Stromlast bzw. der Stromnachfrage ab. Speichersysteme können dabei sowohl zu Maßnahmen zur Flexibilisierung des Angebots als auch der Nachfrage gezählt werden.⁵

Zunächst wird auf die Flexibilisierung der Nachfrage eingegangen. Hier lassen sich die eingesetzten Maßnahmen unter dem Begriff des Demand Side Management zusammenfassen. Mit dem Demand Side Management wird dabei eine Glättung der Lastkurve angestrebt. Die Glättung kann bspw. erreicht werden, indem in Zeiten hoher Nachfrage und damit hoher Last die Nachfrage reduziert und ggf. auf Zeiten

⁵Der Bezug von zusätzlichem Strom aus einer Batterie bei hoher Nachfrage ist dabei offensichtlich. Jedoch ist auch der Batterieeinsatz als zusätzliche Last möglich. So kann in Zeiten von Stromüberangebot, z. B. durch übermäßige Stromproduktion aus Erneuerbaren Energien, welcher zu wenig unmittelbare Nachfrage gegenübersteht, die Batterie geladen werden.

mit geringer Last verschoben wird (Ioakimidis et al., 2018). Vor dem Hintergrund von erneuerbaren Energien wird die Flexibilität, die das Demand Side Management bietet, besonders deutlich. So kann in Zeiten hoher Einspeisung aus erneuerbaren Energien die Last in diesen Zeitraum verschoben werden (Ladwig, 2021, S. 155), wie z. B. das Laden von Elektrofahrzeugen (Després et al., 2017). Analog kann durch Verschiebung der Last in Zeiten überschüssiger Einspeisung aus erneuerbaren Energien zusätzliche Nachfrage und damit Laststeigerung angeregt werden. In beiden Fällen wird flexibel auf das unsichere Stromangebot aus erneuerbaren Energien reagiert. Zudem wird hieraus neben dem Aspekt der Glättung auch die Anpassung der Stromnachfrage an das Stromangebot deutlich (Ladwig, 2021, S. 155). Generell sind für einen erfolgreichen Einsatz von Demand Side Management nicht nur flexible Verbraucher sondern auch ausgereifte technische (Kommunikations-)Anwendungen nötig.

Elektrische Speichersysteme können, analog zum Demand Side Management, für die Erhöhung und Drosselung der Stromnachfrage zu einem Zeitpunkt eingesetzt werden. Ebenso ermöglichen sie, das Stromangebot zu steigern oder zu verringern. In diesen zwei Punkten konkurrieren elektrische Speichersysteme, wie Pumpspeicherkraftwerke, Lithium-Ionen Batterien, adiabatische Druckluftspeicher sowie Elektrofahrzeuge (Després et al., 2017), um nur einige zu nennen, direkt mit den anderen zwei Flexibilitätsoptionen (Galant et al., 2013, S. 248). Das Alleinstellungsmerkmal von elektrischen Speichersystemen besteht daher in ihrem offensichtlichen Vermögen, elektrischen Strom zu speichern. Das ökonomische Potenzial als Flexibilitätsoption entfalten solche Speichersysteme dabei immer dann, wenn die Residuallast zwischen Hoch- und Tiefphasen fluktuiert (Schreiber et al., 2021, S. 186).⁶

Zuletzt sollen lastfolgefähige, flexible, Stromerzeuger, wie thermische Grundlast-, Mittellast- und Spitzenlastkraftwerke, betrachtet werden. Zu Ersteren lassen sich Nuklear- und Kohlekraftwerke, zu Zweiteren Gaskombi-, Biomasse- und Solarthermiekraftwerke sowie zu letzteren Gasturbinenkraftwerke zählen (Alizadeh et al., 2016). Zusätzlich lassen sich hier auch Wasserkraftwerke aufführen, sodass sich die flexiblen Stromproduzenten sowohl aus konventionellen sowie erneuerbaren Stromerzeugern

⁶Als Residuallast wird die nachgefragte Strommenge abzüglich der Leistung aus intermittierenden erneuerbaren Energien bezeichnet. So ist das Laden der Batterie bei z. B. negativer Residuallast (Überschuss an Strom aus erneuerbaren Energien) sinnvoll. Hier ließe sich das elektrische Speichersystem bei niedrigen Preisen und damit zu geringen Kosten laden. Entladen würde das elektrische Speichersystem bei z. B. hoher Residuallast, was mit hohen Strompreisen einhergeht.

zusammensetzen.⁷ Abhängig vom Anteil an variablen erneuerbaren Energien am Erzeugungsmix sowie von der generellen Ausgestaltung des Energiesystems, hat die flexible Fahrweise bzw. Flexibilisierung solcher Kraftwerke einen teils erheblichen Wert (Kopiske et al., 2017).

Während sich Realloptionskomponenten in allen drei aufgeführten Flexibilitätsoptionen finden lassen, soll nachfolgend der Fokus auf den flexiblen Stromerzeugern liegen. Zunächst stellt die Stromerzeugung generell eine der kapitalintensivsten Industrien dar (FERC, 2020, S. 36). Gepaart mit hohen Irreversibilitäten in Investitionsausgaben und den zeitlichen Handlungsspielräumen, mit solchen Investitionen in Stromerzeugungsanlagen und Flexibilisierung bestehender Kraftwerke warten zu können, ist die Realloptionsanalyse als Bewertungsmethode prädestiniert. Zusätzlich zur vorgelagerten Investitionsentscheidung verfügen die genannten Kraftwerke über operative Flexibilität (Alizadeh et al., 2016). Auch diese lässt sich über den Realloptionsgedanken wertetechnisch erfassen. Vor diesem Hintergrund wird im nachfolgenden Abschnitt 5.2 Realloptionsliteratur systematisiert, die sich mit dieser Thematik auseinandersetzt. Hierbei wird die Unterteilung in konventionelle Kraftwerke sowie erneuerbare Energien vorgenommen. Die vorgestellte Literatur gibt dabei nicht nur einen Überblick zu flexiblen Stromerzeugern, sondern auch einen generellen Überblick zu den Einsatzmöglichkeiten der Realloptionsanalyse. Im darauffolgenden Abschnitt 5.3 wird ein an flexiblen Stromproduzenten, insb. von flexiblen Biogasanlagen, inspiriertes Modell vorgestellt. Die Investitionen in die Biogasanlagen lassen sich aus ökonomischer Sicht allgemein als Investitionen in Projekte mit operativer Flexibilität betrachten. Das später entwickelte Modell lässt sich zudem problemlos auf andere Sachverhalte übertragen.

⁷Hierbei ist festzuhalten, dass nicht alle der aufgeführten Kraftwerke „von Haus aus“ den gleichen Grad an Flexibilität haben. Insbesondere Grundlastkraftwerke sind nicht unbedingt auf einen transienten Betrieb ausgelegt, sodass bei solcher Fahrweise erhöhte Instandhaltungskosten sowie eine verringerte Lebensdauer denkbar sind (Mikkola & Lund, 2016). Eine Flexibilisierung solcher Kraftwerke ist jedoch nicht ausgeschlossen.

5.2 Realloptionsliteratur im Bereich Energie

In den nachfolgenden Unterabschnitten wird ausgewählte Realloptionsliteratur aus dem Segment Energie möglichst allgemein systematisiert.⁸ In den Unterabschnitten 5.2.1 und 5.2.2 wird zunächst einschlägige Literatur zum Einsatz von Realoptionen in der ökonomischen Bewertung von konventionellen Kraftwerken sowie von erneuerbaren Energien zusammengefasst. Anschließend werden in Unterabschnitten 5.2.3 und 5.2.4 zwei Modelle näher beschrieben, die in engerer Beziehung zum in Abschnitt 5.3 entwickelten Modell stehen. Zuletzt erfolgt in Unterabschnitt 5.2.5 eine kurze Einordnung des Modells aus Abschnitt 5.3 in die Literatur.

5.2.1 Konventionelle Kraftwerke

Die Anwendung der Realloptionsbewertung im Segment Energie erfolgte anfangs insbesondere im Bereich der konventionellen Kraftwerke, wie z. B. für Kern-, Braunkohle-, Steinkohle- und Gasturbinenkraftwerke.⁹ So kann Pindyck (1993) als eine der frühen Arbeiten in dieses Feld eingeordnet werden. Pindyck (1993) untersucht dabei den Einfluss von technischer Unsicherheit und von Unsicherheit der für die Projektrealisierung nötigen Kosten auf die Investitionsentscheidung. Erstere Kosten resultieren aus der Tatsache, dass (technisch) anspruchsvolle Projekte oft eine unsichere Realisierungszeit haben und damit Unsicherheit darüber besteht, wie viele Kosten tatsächlich am Ende anfallen. Zweitere Kosten beziehen sich auf die Preise für Baumaterial und Arbeitskräfte, die sich unsicher im Zeitablauf entwickeln können. Neben der Fokussierung auf die Auswirkung der beiden unsicheren Triebkräfte auf die Investitionsentscheidung, wendet Pindyck (1993) sein Modell konkret auf die Investitionsentscheidung in ein Kernkraftwerk an. Hierbei berücksichtigt er die Marktbedingungen um 1982 und parametrisiert sein Modell mit Daten aus dieser Zeit. Im Ergebnis stellt Pindyck (1993) fest, dass die Unsicherheit über die Kosten für die Projektrealisierung im direkten Vergleich zur technischen Unsicherheit wahrscheinlich einen größeren Einfluss auf die Investitionsentscheidung hat.

⁸Siehe auch Tab. 4.2 zur Einordnung von Energieinfrastruktur in die wirtschaftliche Infrastruktur und die Einordnung von Realloptionsliteratur.

⁹Einen generellen Überblick zu Arbeiten, die sich mit Realoptionen befassen, geben (Trigeorgis & Tsekrekos, 2018).

Während Pindyck (1993) eine Initialinvestition betrachtet, wird die Realloptionsanalyse auch für die Bewertung von Flexibilität im Betrieb bzw. der Fahrweise von thermischen Kraftwerken verwendet. Hier wenden z. B. Frayer & Uludere (2001) die Realloptionsanalyse auf Mittellastkohlekraftwerke (engl. Mid-Merit Coal-Fired Plants) und auf Gasturbinenkraftwerke an.¹⁰ Vor dem Hintergrund von unsicheren Strompreisen untersuchen sie den Wert der jeweiligen Kraftwerke unter Berücksichtigung ihrer operativen Fahrmöglichkeiten. Eine Bewertung auf Basis der herkömmlichen Kapitalwertmethode gibt dabei eine Präferenz in Richtung des Mittellastkohlekraftwerks, da es im Vergleich zum Gasturbinenkraftwerk geringere Grenzkosten aufweist. Tatsächlich finden Frayer & Uludere (2001) jedoch einen nicht zu vernachlässigenden Flexibilitätswert in der Fahrweise des Gasturbinenkraftwerks. Blicke dieser unberücksichtigt, würde mehr als die Hälfte dieses Werts im Kapitalwert unerfasst bleiben. Dies gilt ebenfalls für das weniger flexible Mittellastkohlekraftwerk. Schlussendlich kann das Gasturbinenkraftwerk unter Berücksichtigung von Realoptionen sogar wertvoller als das Mittellastkohlekraftwerk sein, was in starkem Kontrast zur Analyse mit herkömmlichen Methoden steht.

Im Vergleich zu Frayer & Uludere (2001) stellen Tseng & Barz (2002) einen (mathematisch) anspruchsvollen Ansatz zu Bewertung von Kraftwerken in der kurzen Frist vor. Sie berücksichtigen dabei ebenso wie Frayer & Uludere (2001) Optionalitäten in der Fahrweise und insbesondere viele (technische) Rahmenbedingungen, wie z. B. Mindestberiebs- und Stillstandszeiten, Kosten für das An- und Herunterfahren des Kraftwerks sowie Vorlaufzeiten bzgl. der stündlichen Entscheidung, das Kraftwerk einzusetzen. Damit beschränken Tseng & Barz (2002) die Möglichkeiten zur Kraftwerkeinsatzplanung (engl. Unit Commitment) und erzeugen eine größere Realitätsnähe. Die Bewertung führen sie dabei über eine Monte Carlo Simulation unter Berücksichtigung von unsicheren Preisen von Strom und Betriebsstoffen (wie z. B. Erdgas, Öl, Kohle etc.) durch. Diese bewertungsrelevanten Zustandsgrößen werden dabei jeweils über Itô-Prozesse modelliert. Während ihr Ansatz ein breites Anwendungsfeld bietet, weisen Tseng & Barz (2002) im Ergebnis ihres Ansatzes auch darauf hin, dass die herkömmlich unbeachteten technische Limitierungen durchaus ein Bewertungsrisiko darstellen

¹⁰Grundlastkraftwerke (engl. Baseload Plants) befinden sich i. d. R. in einem kontinuierlichen Betrieb. Sie sind nicht flexibel genug, um sich auf Änderungen in der Nachfrage einzustellen. Mittellastkraftwerke sind hingegen bis zu einem bestimmten Grad im Stande, flexibel auf Änderungen in der Nachfrage zu reagieren. Die größte Flexibilität und damit im Vergleich ausgeprägteste Lastfolgefähigkeit haben Spitzenlastkraftwerke (engl. Peakload Plants oder ugs. „Peaker“). Entsprechend sind Realoptionen insb. im Betrieb von Mittellast- und Spitzenlastkraftwerken zu finden (Frayer & Uludere, 2001, Tabelle 6).

können.

Thompson et al. (2004) untersuchen ebenfalls den Wert von thermischen Kraftwerken unter Optimierung ihrer Fahrweise. Zusätzlich betrachten sie auch hydroelektrische Dämme. Ebenso wie Tseng & Barz (2002) berücksichtigen Thompson et al. (2004) eine Vielzahl von realen operativen Charakteristika. Während der Bewertungsansatz von Tseng & Barz (2002) aufgrund des Monte-Carlo-Ansatzes in Kombination mit einer rückwärts gerichteten dynamischen Programmierung als rechenintensiv einzustufen ist, wählen Thompson et al. (2004) einen anderen Weg. Sie nutzen Realoptionsanalyse, um nichtlineare partielle Integro-Differentialgleichungen abzuleiten. Über diesen Ansatz ist es Thompson et al. (2004) möglich, viele Eigenschaften von Spot Preisen, wie Zeitabhängigkeit, Mean-Reversion und Spikes zu integrieren und gleichzeitig eine angemessene Rechenzeit bei ausreichender Genauigkeit der Ergebnisse zu wahren. An dieser Stelle kann auch das Modell von Tseng & Lin (2007) aufgeführt und als evolutorische Erweiterung von Tseng & Barz (2002) gesehen werden. Tseng & Lin (2007) bewerten ebenfalls thermische Kraftwerke, erhöhen jedoch unter Verzicht auf den Monte-Carlo-Ansatz und mit Einsatz eines Zwei-Faktoren-Preisgitters die Rechenzeit ihres Modells erheblich.

Während einige Arbeiten im kombinierten Bereich von Realoptionen und Kraftwerkeinsatzplanung zu verorten sind, lassen sich auch Arbeiten einordnen, die sich wie Pindyck (1993) mit Initialinvestitionen beschäftigen. Als Beispiel lassen sich Näsäkkälä & Fleten (2005) anführen. Sie betrachten Investitionen in Gasturbinenkraftwerke. Dabei untersuchen sie insb. die Fragestellung nach der technologischen Ausgestaltung des Kraftwerks als Grund- oder Spitzenlastkraftwerk. Sie untersuchen auch den Zeitpunkt, ab dem ein initial für Grundlast entworfenes Gasturbinenkraftwerk in Richtung eines Spitzenlastkraftwerks umgerüstet werden sollte. Als unsicheren Werttreiber nutzen Näsäkkälä & Fleten (2005) den Spark Spread, der auf Basis eines Zwei-Faktoren-Modells modelliert wird.¹¹ Dies ermöglicht die Berücksichtigung einer kurzfristigen Mean-Reversion sowie eines langfristig unsicheren Mean-Reversion Levels. Im Ergebnis ihrer Untersuchung finden Näsäkkälä & Fleten (2005) zwei gegensätzliche Effekte: Einerseits erhöht die Unsicherheit im Spark Spread den Wert von Gaskraftwerken in Spitzenlastkonfiguration, andererseits bewirkt sie jedoch gleichzeitig das realoptions-typische Aufschieben der Investition in die Zukunft.

¹¹Der Spark Spread bestimmt sich als Preisdifferenz bzw. Marge zwischen einer Menge verkauften Stroms und der für diesen Strom nötigen Menge an Erdgas.

Zuletzt soll die Arbeit von Rohlfs & Madlener (2011) genannt werden. Sie betrachten die Investition in ein Kohlekraftwerk. Hierbei integrieren sie die Möglichkeit, direkt zu Beginn in Maßnahmen zur Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (engl. Carbon Capture and Storage (CCS)) zu investieren oder das Kraftwerk über eine nachgelagerte Investition später nachzurüsten. Ihr entwickeltes Modell erlaubt dabei, bis zu vier Quellen von Unsicherheit zu berücksichtigen: den Strompreis, den CO_2 -Preis, die Kosten für die CO_2 -Abscheidung, den Transport und die Speicherung sowie die zukünftigen Investitionskosten des CCS. Im Ergebnis ihrer Untersuchung finden Rohlfs & Madlener (2011) insbesondere, dass Kohlekraftwerke mit einer CCS-Initialausstattung nur in Situationen mit hohen CO_2 -Preisen und gleichzeitig niedrigen Volatilitäten des CO_2 -Preises ökonomisch sinnvoll sind. Entsprechend sind Kohlekraftwerke mit der späteren Möglichkeit der CCS-Nachrüstung aus ökonomischer Sicht zu bevorzugen.

Die systematisierte Literatur zeigt deutlich, dass sich die Realloptionsanalyse insb. für Entscheidungen bzgl. der Initialinvestition und für die Bewertung von operativer Flexibilität im Bereich der konventionellen Kraftwerke eignet. Die Modelle unterscheiden sich vor diesem Hintergrund lediglich in technischen und ökonomischen Detailfragen, die dem jeweils untersuchten Problem zugrunde liegen. Demnach ist die Anwendung der beschriebenen Modelle nicht nur in anderen Bereichen von wirtschaftlicher Infrastruktur, sondern auch in der Projektbewertung von privatwirtschaftlichen Unternehmen möglich, solange die Investitionsprojekte Eigenschaften aus dem Bereich der konventionellen Kraftwerke teilen bzw. aufweisen.

5.2.2 Erneuerbare Energien

Starker global- und nationalpolitischer Fahrtwind hat vor dem Hintergrund der globalen Erderwärmung die Türen für nachhaltige Technologien der Energieerzeugung geöffnet.¹² Dem globalen Makrotrend folgend, ist ein umfangreicher realoptionstheoretischer Literaturkorpus erwachsen, der sich auf Themen aus dem Bereich der erneuerbaren Energien fokussiert. Hierbei werden vielschichtige Problemfelder bearbeitet. Eine grobe Zweiteilung der Arbeiten kann in der ökonomischen Bewertung von dezentraler Stromerzeugung, wie z. B. von Windparks, Photovoltaikanlagen, Wasserkraftwerken und Biogasanlagen, sowie in der (verwandten) Entscheidungsunterstützung im Bereich der

¹²Genauer muss von Energiewandlung gesprochen werden, da Energie im Sinne der Energieerhaltung nicht erzeugt werden kann. Umgs. hat sich jedoch der Begriff der Energieerzeugung etabliert.

Umweltwirtschaftspolitik gesehen werden.¹³ Nachfolgend soll ein kurzer Überblick über die in der Fachliteratur publizierten vielfältigen Einsatzmöglichkeiten der Realloptionsanalyse und die mit deren Hilfe untersuchten Problemstellungen gegeben werden.

Zunächst soll sich auf die Bewertungsaspekte konzentriert werden. In diesem Zusammenhang bewerten Caporal & Brandão (2008) die wiederkehrende Möglichkeit eines Unternehmens seinen hydroelektrisch produzierten Strom entweder zu einem langfristig (vertraglich) fixierten Preis oder direkt am volatilen Strommarkt zu verkaufen. Diese periodische Entscheidung erzeugt starke Optionscharakteristika, sodass Caporal & Brandão (2008) die Realloptionsmethode zur Bewertung nutzen. Mit Hilfe von Binomial- und Entscheidungsbaumverfahren stellen sie fest, dass solche Flexibilitätskomponenten signifikant sind und nicht mit der traditionellen Kapitalwertmethode erfasst werden können. Gerade um Fehlbewertungen zu vermeiden, sollte hier nach Caporal & Brandão (2008) die Realloptionsmethode zum Einsatz kommen. Ebenfalls im Bereich Wasserkraft untersuchen Bøckman et al. (2008) die Investitionsentscheidung in kleine Wasserkraftwerke. Sie bewerten die Investitionsoption und leiten eine Entscheidungsregel für Investoren in Form eines optimalen Schwellenwerts für den Strompreis ab. Da die funktionale Beschreibung ihres Investitionsproblems zusätzlich zur Ermittlung des optimalen Investitionszeitpunkts bzw. des optimalen Timings auch eine optimale Kapazitätswahl erlaubt, bestimmen Bøckman et al. (2008) zusätzlich zum Investitionsschwellenwert die optimale Kapazität bzw. Dimension der Wasserkraftwerke.

Neben der Wasserkraft wird auch das Thema der Windkraft modelltheoretisch erfasst. Fleten et al. (2007) entwickeln ein Modell für die Investition in und die Dimensionierung von dezentralen erneuerbaren Stromerzeugungsprojekten. Sie gehen dabei davon aus, dass der Strompreis die Hauptquelle der Unsicherheit darstellt und bilden diesen über eine GBM ab. Ihr Modell wenden sie im Rahmen einer Fallstudie auf die Investitionsentscheidung in einen Windpark an. Im Rahmen ihrer Untersuchung bestätigen Fleten et al. (2007) das gängige Ergebnis von Verzögerung der Investition und Vergrößerung der Kapazität bei zunehmender Unsicherheit, welches in der (theoretischen) Realloptionsliteratur zu Investitionstiming und -kapazitätswahl vorherrscht. Auch Kitzing et al. (2017) untersuchen Investitionen in Windenergie und leiten den optimalen Investitionszeitpunkt und -umfang ab. Sie weisen dabei insb. auf die Bedeutung einer Kapazitäts-

¹³Die hier gewählte Trennung ist alles andere als trennscharf. Oft werden in einschlägigen Studien sowohl der Bewertungsaspekt als auch die umweltwirtschaftspolitischen Implikationen beleuchtet. Für einen Literaturüberblick von Realloptionen im Bereich der erneuerbaren Energien sei auf Kozlova (2017) hingewiesen.

beschränkung hin, sodass der Windpark keine ausufernden Ausmaße annehmen kann. Eine Vernachlässigung der Kapazitätsbeschränkung führt zu suboptimalem Verhalten, da dadurch die Investoren verleitet sind, zu lange zu warten. Demnach wirkt sich die Kapazitätsbeschränkung positiv auf die Investitionsneigung aus.

Realloptionsliteratur lässt sich ebenfalls im Bereich der Photovoltaikanlagen finden. Beispielsweise bewerten Martinez-Cesena et al. (2012) die Investitionen in häusliche Photovoltaikanlagen. Sie berücksichtigen hier insb. die Verzögerungsoption vor dem Hintergrund von technologischem Fortschritt von Photovoltaikanlagen und analysieren die Marktlage im Vereinigten Königreich. Zhang et al. (2016) betrachten ebenfalls Photovoltaikanlagen. Sie entwickeln ein Realoptionsmodell mit vier Unsicherheitsquellen, um die Investition in jene zu bewerten. Im Rahmen ihrer empirischen Untersuchung der Entscheidungssituation in China stellen Zhang et al. (2016) fest, dass hohe Investitionsausgaben sowie hohe Volatilitäten in CO_2 - und Strompreis unvorteilhaft sind, wenn es um eine Verbesserung der Investitionsbereitschaft geht. Vielmehr sollte die Subventionierung erhöht, technologischer Fortschritt gefördert sowie die Marktlage stabilisiert werden, wenn es darum geht, das Investitionsvolumen in Photovoltaik umgehend zu erhöhen (Zhang et al., 2016).

Aus der zuvor beschriebenen Literatur mit Fokus auf den Bewertungsaspekten von erneuerbaren Energien wird eines deutlich: Viele der Ergebnisse in Bezug auf die Investitionsneigung bestätigen die Befunde von abstrakteren bzw. allgemeineren Realoptionsmodellen. So lassen sich stellvertretend die Ergebnisse von Zhang et al. (2016) problemlos anhand des „kanonischen“ Realoptionsmodells aus Unterabschnitt 3.2.2 nachvollziehen. Bspw. wird aus Gl. 3.28 sofort deutlich, dass sich die Investitionsneigung verringert, wenn die Investitionsausgaben I hoch sind. In logischer Konsequenz sollten bspw. die Subventionierung und der technologische Fortschritt erhöht werden, um die Investitionsneigung zu erhöhen.¹⁴ Auch der Einfluss von Unsicherheit σ wird aus Gl. 3.28 deutlich. So wächst das Optionmultiple $\beta_1/(\beta_1 - 1)$ mit zunehmender Unsicherheit, was wiederum die Investitionsneigung verringert. Auch hier kann abermals die einfache Gegenmaßnahme in Form einer Beruhigung der Marktlage als Möglichkeit aufgeführt wer-

¹⁴Siehe auch Unterabschnitt 4.4.3 für den Einfluss von Subventionen auf die effektiven Investitionsausgaben.

den, um die Investitionsneigung zu erhöhen.¹⁵

Neben Studien, die eher auf die Bewertung und die Entscheidungsunterstützung von Investoren ausgerichtet sind, wird die Realoptionsanalyse häufig auch als Mittel eingesetzt, um wertvolle Erkenntnisse bzw. Entscheidungsunterstützung zur Umweltwirtschaftspolitik zu liefern. Vor diesem Hintergrund analysieren Boomsma et al. (2012) bspw. die Investitionsentscheidung und Kapazitätswahl von Projekten im Bereich der erneuerbaren Energien. Die Analyse erfolgt dabei unter Berücksichtigung von mehreren Unsicherheitsquellen sowie verschiedenen gängigen Fördersystemen, die sich z. B. durch fixe Einspeisevergütungen oder im Handel von Zertifikaten für erneuerbare Energien äußern. Boomsma et al. (2012) zeigen, dass der Zeitpunkt und Umfang von Investitionen in erneuerbare Energien Projekte stark von der Art des Fördersystems und der Unsicherheit beeinflusst werden. In einer ähnlichen Zielsetzung untersuchen Torani et al. (2016), wie private Haushalte angeregt werden können, in Photovoltaikanlagen zu investieren. Im Gegensatz zu Zhang et al. (2016) stellen sie fest, dass Subventionen nur eine geringe Auswirkung auf die Adoption von Photovoltaikanlagen haben. Zudem finden sie auch eine geringe Auswirkung von CO₂-Steuern. Demnach sind nach Torani et al. (2016) sowohl die Subventionen als auch CO₂-Steuern keine effektiven politischen Stellschrauben, wenn es darum geht, den Anteil der Solarenergie am Energiemix zu erhöhen. Vielmehr sollten Forschung und Entwicklung sowie der allgemeine technologische Wandel unterstützt werden, um die die Akzeptanz und Adoption von Photovoltaikanlagen zu erhöhen.

Auch Welling (2016) untersucht die Auswirkungen von (Entscheidungs-)Flexibilität in Bezug auf die Größe und den Zeitpunkt von Investitionen in Projekte aus dem Bereich der erneuerbaren Energien. Für die Anwendung seines entwickelten Entscheidungsmodells fokussiert er sich auf deutsche Photovoltaikprojekte. Auch er kommt zu dem Ergebnis, dass eine höhere Unsicherheit eine Investitionsverzögerung sowie gleichzeitig die

¹⁵Da im Rahmen dieser Arbeit die theoretische Literatur um die Thematik der Kapazitätswahl unberücksichtigt bleibt, soll der Vollständigkeit halber kurz der Zusammenhang zw. Unsicherheit und Kapazitätswahl festgehalten werden. Ein zentrales Ergebnis dieses Literaturstrangs (siehe z. B. Dangl (1999), Hagspiel et al. (2016) oder Lukas et al. (2017), um einige wenige zu nennen) ist die Erweiterung des allgemeinen Befunds über das Aufschieben von Investitionen bei höherer Unsicherheit um die Dimension der gleichzeitigen Wahl einer höheren Kapazität. So lässt sich die Ursache des von Kitzing et al. (2017) beschriebenen Effekts der Kapazitätsbeschränkung einfach ergründen. Ist die Unsicherheit hoch, ist es optimal, eine höhere Kapazität bei gleichzeitig späterer Investition zu wählen. Ist diese Kapazität jedoch beschränkt und die gewollte Kapazität (freie Kapazitätswahl) übersteigt bei einem Level von Unsicherheit die limitierte Kapazität, so entweicht bildlich gesprochen der dadurch entstehende Druck, indem relativ zur freien Kapazitätswahl die Investitionsneigung ansteigt.

Wahl einer größeren Kapazität bewirkt. Jedoch wird die gewählte Kapazität stark von der Art, nicht aber durch die Höhe, der staatlichen Subventionierung bestimmt. Im Gegensatz dazu finden Bigerna et al. (2019) einen Trade-Off zwischen der Höhe der Einspeisevergütung und dem kombinierten Investitions- und Kapazitätswahlverhalten. Während hohe Einspeisevergütungen zu früheren Investitionen führen, verringern sie gleichzeitig die optimale Kapazität und umgekehrt. In Abhängigkeit von verschiedenen Zielsetzungen auf Regierungsebene leiten Bigerna et al. (2019) eine optimale Subventionspolitik ab. Auch Finjord et al. (2018) untersuchen den Einfluss von Subventionssystemen auf das Investitionsverhalten. Ihre Untersuchung erfolgt dabei speziell vor dem Hintergrund von „grünem“ Zertifikatehandel in Norwegen und Schweden anhand einer Windenergie-Fallstudie. Im Ergebnis finden sie höhere Warteanreize bei der Investitionsentscheidung für schwedische Investoren im direkten Vergleich zu norwegischen Investoren und führen diese auf die kürzeren Subventionsfristen im norwegischen Fördersystem für erneuerbare Energien zurück. Babich et al. (2020) hingegen betrachten die Fragestellung, ob Regierungen ihre Förderpolitik zur Erhöhung der Akzeptanz von Solaranlagen für private Haushalte besser in Form von Steuererleichterungen oder Einspeisetarifen gestalten sollten. Sie kommen zu dem Schluss, dass stark schwankende Strompreise und stabile Preise für Solarmodule die Förderoption der Einspeisetarife begünstigt. Andererseits sprechen eine ausgeprägte Heterogenität in der Stromerzeugungseffizienz der Haushalte, volatile Panelkosten und eine geringe Preisvariabilität und/oder eine positive Korrelation zwischen volatilen Preisen und Kosten für eine Politik der Steuererleichterungen (Babich et al., 2020).

Aus den vorangegangenen Ausführungen zu umweltwirtschaftspolitischen Fragestellungen wird zum einen abermals eine Bestätigung von konventionellen Ergebnissen aus der Realoptionsliteratur deutlich. Zum anderen wird jedoch klar, dass aufgrund vieler verschiedener nationaler und grenzübergreifender Fördermechanismen, immer der spezielle Fall betrachtet werden muss. Allgemeine Aussagen lassen sich aufgrund des hohen Spezialisierungsgrades der einzelnen nationalen Fördersysteme und der teils komplexen Regulierungsvorschriften nicht mehr ohne Weiteres treffen.

Während die Realoptionsanalyse für Wind- und Wasserkraftanlagen sowie für Photovoltaikanlagen und die damit verbundenen umweltwirtschaftspolitischen Fragestellungen häufig Anwendung findet, ist sie im Bereich der Biogasanlagen deutlich unterrepräsentiert (Kozlova, 2017). So können lediglich drei Arbeiten identifiziert werden: Neben Siegert (2014), der sich auf die Abbruchoption des Betriebs einer typischen 500 kW Biogas-

anlage in Deutschland fokussiert, sind zusätzlich lediglich Di Corato & Moretto (2011) sowie Briest et al. (2022) zu nennen. Di Corato & Moretto (2011) untersuchen die Investitionsentscheidung in eine Biogasanlage, bei der die Inputs bis zu einem gewissen Grad substituierbar sind. Sie leiten den Wert der Wechseloption bzgl. der Inputs ab und ermitteln den Wert der Investitionsmöglichkeit. Briest et al. (2022) betrachten eine operative Wechseloption einer Biogasanlage von einem kontinuierlichen Betrieb, mit konstanter Einspeisevergütung nach dem EEG, hin zu einem marktorientierten Betrieb, bei dem der Strom der Biogasanlage am Strommarkt verkauft werden muss. Im Ergebnis ihrer Untersuchung finden sie Marktconstellations, in denen sich der gängige Zusammenhang zw. Investitionsneigung und Unsicherheit umkehrt. Zudem stellen sie fest, dass diese Marktconstellations für Biogasanlagen in Deutschland vorherrschen. Ferner leiten sie Implikationen über die Dimensionierung der deutschen Förderpolitik in diesem Bereich her.

Bevor die Einordnung des in Abschnitt 5.3 entwickelten Modells in Unterabschnitt 5.2.5 erfolgt, werden zunächst zwei verwandte Modelle, von Dixit & Pindyck (1994, Kapitel 6.2) im nachfolgenden Unterabschnitt 5.2.3 und von Briest et al. (2022) im darauf folgenden Unterabschnitt 5.2.4, näher vorgestellt.

5.2.3 Das Modell von Dixit & Pindyck (1994, Kapitel 6.2)

Dixit & Pindyck (1994, Kapitel 6.2) untersuchen den Einfluss der operativen Flexibilität einer Produktionsanlage auf seine initiale Investition. Sie betrachten die Produktionsanlage dabei selbst als Menge von amerikanischen Optionen, nämlich Optionen, auf der einen Seite Güter und Dienstleistungen zu produzieren, wenn die Preise x_t die operativen Kosten c überschreiten, und auf der anderen Seite (kostenlos) die Produktion auszusetzen, wenn die operativen Kosten relativ zum Preis überhand nehmen.

Ausgehend vom Preis x_t , der einer GBM

$$dx_t = \alpha x_t dt + \sigma x_t dW_t \quad (5.1)$$

folgt, ermitteln Dixit & Pindyck (1994, Kapitel 6.2) zunächst den Projektwert $V(x)$, der bereits die operative Flexibilität enthält. Über den Ansatz der Contingent Claims ermit-

teln Dixit & Pindyck (1994, Kapitel 6.2) für $V(x)$

$$V(x) = \begin{cases} A_1 x^{\beta_1}, & \text{für } x \leq c \\ B_2 x^{\beta_2} + \frac{x}{r-\alpha} - \frac{c}{r}, & \text{für } c < x. \end{cases} \quad (5.2)$$

Hierbei sind $\beta_1 > 1$ und $\beta_2 < 0$ über

$$\beta_{1,2} = \frac{1}{2} - \frac{\alpha}{\sigma^2} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{\sigma^2}\right)^2 + \frac{2r}{\sigma^2}} \quad (5.3)$$

gegeben sowie die Konstanten A_1 und B_2 über¹⁶

$$A_1 = \frac{c^{1-\beta_1}}{\beta_1 - \beta_2} \left(\frac{\beta_2}{r} - \frac{\beta_2 - 1}{r - \alpha} \right) \quad (5.4)$$

$$B_2 = \frac{c^{1-\beta_1}}{\beta_1 - \beta_2} \left(\frac{\beta_1}{r} - \frac{\beta_1 - 1}{r - \alpha} \right) \quad (5.5)$$

definiert. Die Interpretation der einzelnen Terme in $V(x)$ ist hier intuitiv: Zunächst für den Fall $x \leq c$ besteht der Projektwert aus dem Optionswert, den operativen Betrieb wieder aufnehmen zu können.¹⁷ Für $c < x$ hingegen, beschreibt der erste Term die Option, die Produktion zeitweise stillzulegen. Letzteres wird besonders deutlich, wenn die zwei Entwicklungsrichtungen von x im Bereich $c < x$ betrachtet werden. Wird x sehr groß, hat die Option der zeitweisen Stilllegung immer weniger wert, da ein Unterschreiten der Schwelle c immer unwahrscheinlicher wird. Demnach muss der Projektwert für $x \rightarrow \infty$ in Richtung des „naiven“ Nettokapitalwerts konvergieren. Auf der anderen Seite, wenn x sich in Richtung der Schwelle c bewegt, wird die Option zur zeitweisen Stilllegung immer wertvoller.

¹⁶Die Konstanten werden an der Stelle $x = c$ gefunden.

¹⁷Koeffizient A_1 kann umformuliert werden, sodass

$$A_1 = \left(B_2 c^{\beta_2} + \frac{c}{r-\alpha} - \frac{c}{r} \right) c^{-\beta_1}. \quad (5.6)$$

Damit ergibt sich für $V(x)$ im Bereich $x \leq c$

$$V(x) = \left(B_2 c^{\beta_2} + \frac{c}{r-\alpha} - \frac{c}{r} \right) \left(\frac{x}{c} \right)^{\beta_1}. \quad (5.7)$$

Strukturell ist dies nichts anderes, als die in Unterabschnitt 3.2.2 entwickelte Option to Invest, wobei die optimale „Investitionsschwelle“ $x^* = c$.

Mit definiertem $V(x)$ fahren Dixit & Pindyck (1994, Kapitel 6.2) mit der Bestimmung der Investitionsoption $F(x)$ fort. Für den Optionswert ermitteln sie schließlich

$$F(x; x^*) = \left(B_2 x^{*\beta_2} + \frac{x^*}{r - \alpha} - \frac{x^*}{r} - I \right) \left(\frac{x}{x^*} \right)^{\beta_1}, \quad (5.8)$$

wobei sich x^* numerisch aus

$$(\beta_1 - \beta_2) B_2 x^{*\beta_2} + (\beta_1 - 1) \frac{x^*}{r - \alpha} - \beta_1 \left(\frac{c}{r} + I \right) = 0 \quad (5.9)$$

ergibt.

Schlussendlich untersuchen Dixit & Pindyck (1994, Kapitel 6.2) u. a. auch den Einfluss der Unsicherheit auf die Investitionsneigung. Für einen Anstieg der Unsicherheit finden sie einen Rückgang der Investitionsneigung ($\partial x^* / \partial \sigma > 0$). Dies begründen Dixit & Pindyck (1994, Kapitel 6.2) insbesondere damit, dass mit steigender Unsicherheit zwar der Projektwert zunimmt, jedoch der Optionswert einen größeren Wertzuwachs erfährt, sodass es erst für größere x optimal wird, die Option auszuüben.

5.2.4 Das Modell von Briest et al. (2022)

Motiviert durch zunehmende Anforderungen an die Versorgungssicherheit und damit Netzstabilität sind Briest et al. (2022) eine der wenigen Arbeiten, welche die Realloptionsanalyse im Bereich von Biogasanlagen einsetzt und die Flexibilisierung jener ökonomisch untersuchen.¹⁸ Sie untersuchen dabei im Kern die Option den operativen Zustand einer bereits betriebenen Biogasanlage von einem erneuerbare Energien Gesetz (EEG)-orientierten Betrieb in einen marktorientierten Betrieb zu wechseln. Während im EEG-orientierten Betrieb die Anlage kontinuierlich betrieben wird und aufgrund von garantierter Einspeisevergütung der Umsatz der Anlage konstant ist, muss der Anlagenbetreiber im marktorientierten Betrieb den produzierten Strom selbst verkaufen bzw.

¹⁸Mit zunehmendem Anteil von erneuerbaren Energien im Energiemix und insb. von nicht regelbaren Erneuerbaren Energien, wie Windkraft und Photovoltaik, erhöht sich die Unsicherheit in Bezug auf die Stromversorgung. Im Gegensatz zu Windkraft und Photovoltaik sind Biogasanlagen regelbar und können Strom „on Demand“ bereitstellen. Da das EEG jedoch ursprünglich starke Anreize für den kontinuierlichen Betrieb gesetzt hat, entsteht vor dem Hintergrund eines netzdienlichen flexiblen, d. h. marktorientierten Betriebs, eine interessante ökonomische Entscheidungssituation, von einem kontinuierlichen in einen flexibilisierten Betrieb zu wechseln.

vermarkten. Ein solcher marktorientierter Betrieb geht dabei i. d. R. mit einer Flexibilisierung der Anlage einher, was entsprechende (irreversible) Investitionen in zusätzliche Stromerzeugekapazität erfordert. Das von Briest et al. (2022) untersuchte Problem lässt sich dabei aus Realoptionssicht in eine zeitlich beschränkte Wechseloption (engl. Switching Option) während und eine perpetuale Investitionsoption im Anschluss an den EEG Vergütungszeitraum einteilen.

Um das Entscheidungsproblem des Anlagenbetreibers zu analysieren, wählen Briest et al. (2022) einen innovativen Ansatz, der sich in der Dekomposition des Entscheidungsproblems in zwei miteinander verbundene Optimierungsstufen äußert und damit die Komplexität des Realoptionsmodells drastisch reduziert. Während Realoptionsmodelle im Bereich der erneuerbaren Energien oft eine Modellierung auf Basis einer Zustandsgröße auf dem „Preislevel“ durchführen, z. B. in dem der Strompreis oder Spark Spread über eine Verlaufshypothese abgebildet wird, betrachten sie direkt den Umsatz, der sich bei optimaler Fahrweise der Anlage aus diesen Preisen ergibt. Da ein solcher Umsatz am Markt nicht beobachtet werden kann, approximieren sie diesen unter Einsatz eines Modells zur Kraftwerkseinsatzplanung (engl. Unit Commitment Model). Anschließend führen sie eine Zeitreihenanalyse durch und finden, dass der Umsatz R_t der Biogasanlage über einen exponentiellen OU Prozess der Form

$$dR_t = \eta \left(\bar{X} + \frac{\sigma^2}{2\eta} - \ln R_t \right) R_t dt + \sigma R_t dW_t \quad (5.10)$$

beschrieben werden kann. Hierbei ist η die Mean-Reversion Geschwindigkeit, \bar{X} das Mean-Reversion Level der Log-Umsätze, σ die Volatilität und dW_t das Wiener Inkrement. Briest et al. (2022) leiten anschließend den Projektwert für die perpetuale Wechseloption mit

$$V_2(R) = \mathbb{E}_R \left[\int_0^L (R_t - c) e^{-rt} dt \right] \quad (5.11)$$

$$= e^{\bar{X} + \frac{\sigma^2}{4\eta}} \int_0^L e^{e^{-\eta t} (\ln R - \bar{X}) - \frac{\sigma^2}{4\eta} e^{-2\eta t} - rt} dt - \frac{c}{r} (1 - e^{-rL}) \quad (5.12)$$

her, wobei \mathbb{E}_R den Erwartungswert konditional auf den Anfangszustand $R_0 = R$ darstellt, L die Restlebensdauer der Anlage nach dem EEG Vergütungszeitraum ist und c die konstanten operativen Kosten bezeichnet. Für den Wert der perpetualen Investitionsmöglichkeit finden sie nach zweimaliger Transformation des Problems in Richtung

der Weber Gleichung, auf deren Replikation an dieser Stelle verzichtet wird, mit Investitionsausgaben I

$$F(R; z^*) = \begin{cases} e^{\frac{(\ln R - \bar{X})^2}{4\bar{\sigma}^2}} \frac{(V_2(z^*) - I)}{e^{\frac{z^{*2}}{4}} D_\nu(-z^*)} D_\nu\left(-\frac{\ln R - \bar{X}}{\bar{\sigma}}\right), & \text{für } R \leq R^* \\ V_2(R) - I, & \text{für } R^* < R. \end{cases} \quad (5.13)$$

Hierbei ist $z = (X - \bar{X})/\bar{\sigma}$, wobei $\bar{\sigma} = \sigma/\sqrt{2\eta}$ und $D_\nu(\cdot)$ stellt die parabolische Zylinderfunktion dar mit $\nu = -r/\eta < 0$.¹⁹ Der Schwellenwert z^* muss dabei numerisch über Bedingung 25 aus Briest et al. (2022) ermittelt werden. Während für die perpetuale Investitionsoption eine fast analytische Lösung des Problems möglich ist, müssen Briest et al. (2022) für die Bewertung der finiten Wechseloption numerische Lösungsverfahren über die Crank-Nicolson finite Differenzenmethode bemühen.

Im Ergebnis ihrer Untersuchung wird gezeigt, dass sich die Investitionsneigung mit einer Erhöhung der Unsicherheit ebenfalls erhöhen kann. Damit finden sie, unter Einsatz des exponentiellen OU Prozesses für die Modellierung von Umsätzen, als erste die Umkehr des gängigen negativen Zusammenhangs zwischen Unsicherheit und Investitionsneigung. Damit der Effekt eintritt, müssen die drei Größen: Unsicherheit σ , Mean-Reversion Level \bar{X} und Mean-Reversion Geschwindigkeit η sowie zusätzlich die effektiven operativen Kosten $c + rI$ berücksichtigt werden. Die Umkehrung des Zusammenhangs zw. Investitionsneigung und Unsicherheit finden Briest et al. (2022). insb. wenn das effektive Mean-Reversion Level $\bar{R} = e^{\bar{X} + \frac{\sigma^2}{4\eta}} < c + rI$. Hier jedoch nur, wenn auch die Mean-Reversion Geschwindigkeit η ausreichend hoch ist, um die Umsätze immer wieder in Richtung dieses ökonomisch unvorteilhaften $\bar{R} < c + rI$ zu stimulieren. Demnach ist eine generell schlechte ökonomische (Ausgangs-)Lage mit $\bar{R} < c + rI$ sowie ein großer Druck in Richtung dieser Lage nötig, damit eine höhere Unsicherheit zu einem erhöhten Investitionsanreiz führt. Auf der anderen Seite kann das gängige Ergebnis aus der einschlägigen Realloptionsliteratur bestätigt werden, sobald $\bar{R} \geq c + rI$.

Neben der generellen Betrachtung parametrisieren Briest et al. (2022) ihr entwickeltes Modell auch auf der Basis von realen Daten und führen eine Case Study zum Thema Biogas durch. Dabei bewerten sie die finite Wechseloption und bestimmen einen optimalen zeitabhängigen Investitionsschwellenwert. Sie bestätigen hier ihren theoretischen

¹⁹Siehe Abschnitt 5.3 für die Transformation in Richtung Weber Gleichung sowie den Einsatz von parabolischen Zylinderfunktionen.

Befund bzgl. Investitionsneigung und stellen ferner fest, dass ein Wechsel aus einem EEG-orientierten Betrieb für Biogasanlagen in den marktorientierten Betrieb, ebenso wie der marktorientierte Betrieb selbst, generell in Deutschland ökonomisch nicht sinnvoll ist. Sie untersuchen auch das in Deutschland zeitweilig aufgesetzte Prämiensystem aus Markt- und Managementprämie sowie Flexibilitätsprämie, welches dazu dienen soll den operativen Wechsel sowie den generellen marktorientierten Betrieb von Biogasanlagen zu fördern. Hier kann eine Überdimensionierung des Prämiensystems festgestellt werden, da es für alle Biogasanlagen, jünger als 17 Jahre, sinnvoll ist, sofort in den marktorientierten Betrieb zu wechseln.

5.2.5 Einordnung und Abgrenzung des Modells aus Abschnitt 5.3

Im Rahmen der Modellbildung in Abschnitt 5.3 wird im Kern eine zeitl. unbeschränkte Investitionsmöglichkeit betrachtet, in ein Projekt mit operativer Flexibilität zu investieren, wobei die stochastische Entwicklung der Zustandsgröße über einen reinen OU Prozess abgebildet wird. Dies wurde bis dato noch nicht untersucht, sodass die Literatur um diesen vernachlässigten Aspekt erweitert wird.²⁰ Die Relevanz äußert sich zudem dadurch, dass für bestimmte Parameterkonstellationen die Umkehrung in der oft postulierten Beziehung zw. Investitionsneigung und Unsicherheit gefunden werden kann. Zusätzlich wird auch die Grundlage für Modellerweiterungen geschaffen, wie z. B. um die Kapazitätswahl, realitätsnähere (technische) Nebenbedingungen im Rahmen von Fallstudien, weitere stochastische Komponenten in der Zustandsvariablen oder spieltheoretische Aspekte. Das entwickelte Entscheidungsmodell ist dabei stark durch realoptionstheoretische Arbeiten aus den Bereichen der konventionellen Kraftwerke in Unterabschnitt 5.2.1 sowie der erneuerbaren Energien aus Unterabschnitt 5.2.2 inspiriert. Jedoch ist festzuhalten, dass die Anwendungsmöglichkeiten ebenfalls über den energiewirtschaftlichen Kontext hinausgehen. Aus diesem Grund wird die Modellbildung im anschließenden Abschnitt 5.3 sowie die numerische Auswertung in Abschnitt 5.4 möglichst allgemein gehalten.

Um die Einordnung im Rahmen der (energiewirtschaftlichen) Realoptionsliteratur vornehmen zu können, muss zunächst der Fokus auf eines der (technischen) Unterscheidungsmerkmale zw. der Realoptionsliteratur im Bereich der konventionellen Kraftwer-

²⁰Nach bestem Wissen des Autors.

ke sowie im Bereich der erneuerbaren Energien gelenkt werden: Die Regelbarkeit der Anlagen. Während konventionelle Kraftwerke aus technischer Sicht in der Lage sind, Energie in Abhängigkeit von Nachfrageentwicklungen aktiv bereitstellen zu können, gestaltet sich dies im Bereich der erneuerbaren Energien weitaus schwieriger. Photovoltaikanlagen vermögen dies nicht.²¹ Sie können zwar „vom Netz“ genommen werden, jedoch nicht aktiv die Leistung erhöhen (Després et al., 2017). Ein ähnliches Bild lässt sich für Windkraftanlagen zeichnen. Diese sind zwar technisch durchaus in der Lage, für eine kurze Zeitspanne die Leistung aktiv zu erhöhen, jedoch ist dieses Vermögen stark durch den ursprünglichen Betriebsmodus und die mit der leistungssteigernden Maßnahme verbundene mechanische Belastung der Windkraftanlagen beschränkt (Hansen et al., 2014). Im Gegensatz zu Solar- und Windkraftanlagen sind Wasserkraftwerke und Biogasanlagen als regelbar einzustufen. Die hier beschriebene Regelbarkeit korrespondiert dabei mit operativer Flexibilität. So können Investitionen in regelbare Erzeugungseinheiten als Projekte mit operativer Flexibilität interpretiert werden. Demnach lässt sich das in Abschnitt 5.3 vorgestellte Modell sowohl im Rahmen der konventionellen Kraftwerke als auch im Bereich der erneuerbaren Energien anwenden; hier insbesondere für Mittellast- und Gasturbinenkraftwerke, aber auch für Biogasanlagen und Wasserkraftwerke.

Jedoch lässt sich das vorgestellte Modell auch ohne Bezug zu energiewirtschaftlichen Themen als Grundlagenmodell in evolutorischer Linie zu Dixit & Pindyck (1994, Kapitel 6.2) oder auch McDonald & Siegel (1985) einstufen. Während McDonald & Siegel (1985) das Projekt mit operativer Flexibilität als Summe von europäischen Call Optionen interpretieren, wählen Dixit & Pindyck (1994, Kapitel 6.2) den Ansatz über amerikanische Optionen, wie in Unterabschnitt 5.2.3 näher ausgeführt. Auch das Markteintritts- und Austrittsmodell von Dixit (1989), welches u. a. von Briest et al. (2020) im Rahmen der Modellbildung adop- und adaptiert wurde, kann vor diesem Hintergrund uminterpretiert werden. So kann äquivalent der Markteintritt als operativer Betrieb und der Marktaustritt (mit Option auf erneuten Markteintritt) als zeitweises Aussetzen des Betriebs

²¹Im Bereich von erneuerbaren Energien, welche die Sonneneinstrahlung nutzen, lassen sich weiter Solarthermiekraftwerke aufführen. Diese nutzen die Energie der Sonne, um Dampf zu erzeugen, welcher wiederum über eine Dampfturbine zum Betrieb von elektrischen Generatoren eingesetzt wird. Solche Kraftwerke bieten durchaus auch operative Flexibilität (Alizadeh et al., 2016). Solarthermiekraftwerke spielen jedoch im Vergleich zu Photovoltaikanlagen aufgrund höherer Kosten eine eher untergeordnete Rolle. Während Photovoltaik in den USA Ende 2017 eine Kapazität von 74 GW hatte, war die Kapazität von Solarthermiekraftwerken zu diesem Zeitpunkt bei lediglich 1.8 GW (FERC, 2020, S. 51).

eines Kraftwerks verstanden werden.²² Während Dixit & Pindyck (1994, Kapitel 6.2) und McDonald & Siegel (1985) aber auch Dixit (1989) jeweils eine GBM für die Modellierung der Zustandsvariablen einsetzen, wird im Gegensatz dazu, im in Abschnitt 5.3 vorgestellten Modell, ein OU Prozess verwendet.²³

Die Verwendung des OU Prozesses in der Modellierung im Bereich der Realoptionsanalyse ist dabei weniger typisch, da hier generell keine analytischen Lösungen möglich sind (Dixit & Pindyck, 1994, S. 78). Tatsächlich wird die GBM oft „due to the simple solutions obtainable for geometric Brownian motions, [...]“ (Fleten et al., 2007, S. 805) verwendet. In herkömmlichen Ansätzen aus der theoretischen, aber auch aus der energiewirtschaftlichen, Realoptionsliteratur wird daher die stochastische Entwicklung der Zustandsvariablen i. d. R. als GBM abgebildet. So modellieren Fleten et al. (2007), stellvertretend für viele weitere energiewirtschaftliche Ansätze aus der Realoptionsliteratur, den langfristigen Strompreis im Rahmen ihrer Untersuchung als GBM.²⁴ Begründet wird dieses Vorgehen u. a. in der Argumentationslinie von Pindyck (2001), wonach die Formulie-

²²Wenn in Dixit (1989) in Gln. 8 und 10 bzw. analog in Gln. 12 und 13 jeweils die Markteintrittskosten $k = 0$ und die Marktaustrittskosten $l = 0$ sind, müssen über Gln. 12 und 13 die Schwellenwerte für Eintritt P_H und Austritt P_L identisch sein. Durch $P_H = P_L = P^*$ reduziert sich das Modell in seiner Grundlegenden Struktur in Richtung Dixit & Pindyck (1994, Kapitel 6.2) Gl. 12. Da das Gleichungssystem nun unterbestimmt wäre, kann P^* über ein einfaches ökonomisches Argument gefunden werden. Mit kostenlosem Markteintritt und -austritt, bzw. analog bei kostenlosem Wechsel des operativen Zustands, würde immer gewechselt, sobald die operativen Kosten überschritten sind. Ein längerer operativer Betrieb, wenn die Erlöse unterhalb der operativen Kosten sind, ebenso, wie der Stillstand der Anlage, wenn die Erlöse die operativen Kosten übersteigen, ist bei kostenlosem Wechsel des Betriebszustands nicht mit dem ökonomischen Prinzip vereinbar. In der Notation von Dixit (1989) wäre damit $P^* = w$, wobei w die operativen Kosten sind. Damit kann bei Uminterpretation der Ausgangslage das Modell Dixit & Pindyck (1994, Kapitel 6.2) als Grenzfall zu Dixit (1989) gesehen werden.

²³Im Bereich der „Entry-Exit Modelle“ existieren wenige Arbeiten, die sich mit Eintritts- und Austrittsentscheidungen unter Mean-Reversion auseinandersetzen. Tsekrekos (2010) erweitert das Modell von Dixit (1989) durch Einsatz eines geometrischen OU Prozesses anstelle einer GBM. Unter Einsatz von Kummers konfluenter hypergeometrischer Funktion, kann Tsekrekos (2010) eine quasi-analytische Lösungen angeben. Im Ergebnis stellt er fest, dass die Annahme von Mean-Reversion einen deutlichen Einfluss auf das Ergebnis hat. Ähnlich betrachtet auch Tvedt (2022) die Eintritts- und Austrittsproblemstellung unter Einsatz eines geometrischen OU Prozesses. Leung & Li (2014) setzen einen gewöhnlichen OU Prozess als Zustandsvariable im Rahmen ihrer Untersuchung der optimalen Timing Strategien im Bereich des Pairs Trading, um in den Markt ein- und wieder auszutreten, ein. Während die genannte Literaturliste durchaus Schnittmengen mit dem in Abschnitt 5.3 vorgestellten Modell aufweist, grenzt sich das entwickelte Modell deutlich durch die Kombination aus herkömmlichen OU Prozess in Kombination mit der Lösung über die Weber-Gleichung von dieser Literatur ab. Ebenfalls konnte die Umkehrung des Investitions-Unsicherheits-Zusammenhangs unter Einsatz des OU Prozesses bisher nicht gefunden werden.

²⁴In Kozlova (2017, App. 1) ist eine tabellarische Zusammenfassung der analysierten Realoptionsliteratur im Bereich der Erneuerbaren Energien zu finden. Auch hier wird der Strompreis mehrheitlich über eine GBM abgebildet.

rung des Preises über eine GBM, für Investitionen mit Bezug zu Rohstoffen in der langen Frist, zu kleinen Bewertungsfehlern führt. Fleten et al. (2007, S. 805) beschreiben jedoch auch: „A stochastic description of short-term deviations [durch Mean-Reversion Prozesse/Komponenten] is more important for investments in power units with an operational flexibility such as natural gas units.“ Demnach spielt Mean-Reversion insbesondere eine Rolle für die zuvor beschriebenen Projekte mit operativer Flexibilität.

Ein weiterer Vorteil der GBM ist die Nichtnegativität, was für einige ökonomische Größen zutrifft. So kann bspw. der Umsatz eines Unternehmens nicht negativ werden. Nicht selten können jedoch in energiewirtschaftlichen Fragestellungen negative Preise beobachtet werden, wie für den Strompreis oder in jüngster Vergangenheit den Ölpreis. Ebenso können abgeleitete Größen, wie Spark Spreads, oder betriebswirtschaftliche Kennzahlen, wie Netto- oder Free Cashflows, negativ werden. Insbesondere wenn solche betriebswirtschaftlichen Kennzahlen durch Rohstoffpreise getrieben sind, kann die GBM nur als unzureichender Kandidat für den Fall einer direkten stochastischen Modellierung dieser Größen einzustufen sein.²⁵

Dixit & Pindyck (1994, S. 77 ff.) geben vor dem Hintergrund der Wahl eines geeigneten stochastischen Prozesses einige Anregungen, wobei auch sie auf die vorteilhaften mathematischen Eigenschaften der GBM hinweisen. So zeigen sie, dass Öl- und Kupferpreise für einen Zeitraum von 120 Jahren als „mean reverting“ anzusehen sind. Würde hingegen ein kürzerer Zeitraum betrachtet, z. B. 30 oder 40 Jahre, so käme auch die GBM als Kandidat in Frage. Demnach hat der Erhebungszeitraum für die Preisdaten einen deutlichen Einfluss auf die Wahl des stochastischen Prozesses, wobei es keine absolut „richtige“ Wahl zu geben scheint. Tatsächlich führen Dixit & Pindyck (1994, S. 77 ff.) ihre Analyse mit inflationsbereinigten Preisen durch. Dieser Punkt bleibt generell in realoptionstheoretischen Modellen unbeachtet. So wird in der einschlägigen Literatur bei Wahl des stochastischen Prozesses keine Angabe darüber gemacht, ob nominale oder infla-

²⁵Negativität einer Nettoerfolgsgröße kann auch unter Einsatz der GBM erreicht werden. In der Literatur wird dies u. a. über die Berücksichtigung von operativen Kosten bewerkstelligt. So kann eine Nettoerfolgsgröße, wie z. B. der Nettocashflow, über die Differenz von Einzahlungen, die über eine GBM beschrieben werden, und (operativen) konstanten oder auch stochastischen Auszahlungen abgebildet werden. Hierbei kann die Differenz durchaus negativ werden, die vorteilhaften Eigenschaften der GBM bleiben aber erhalten.

tionsbereinigte Preise modelliert werden.²⁶ Diese Problematik soll jedoch nicht weiter adressiert werden.

Das Modell aus Abschnitt 5.3 lässt sich ebenfalls in die theoretische Literatur mit Einsatz von OU Prozessen oder verwandten stochastischen Prozessen, wie dem exponentiellen OU Prozess, einordnen. Hier bezieht sich das im Rahmen dieses Kapitels vorgestellte Modell auf einige frühere Arbeiten. Bspw. untersuchen Levendorskii (2005) und Boyarchenko & Levendorskii (2007, Kap. 4) das optimale Timing für die Ausübung von amerikanischen Kauf- und Verkaufsoptionen, wenn der zugrunde liegende Preis einem exponentiellen OU-Prozess folgt. Sie sind im Stande, numerisch entsprechende Entscheidungsregeln für Investoren abzuleiten. Jaimungal et al. (2013) hingegen fokussieren sich ausschließlich auf Investitionsoptionen. In ihrem betrachteten Modell folgen sowohl der Projektwert als auch die Investitionskosten einem exponentiellen OU Prozess. Zuletzt können auch Briest et al. (2022) aufgeführt werden. Wie in Unterabschnitt 5.2.4 zuvor beschrieben, modellieren sie die Umsatzerlöse über einen exponentiellen OU Prozess. Schlussendlich lässt sich das anschließend vorgestellte Modell als vereinfachte Erweiterung des Modells von Briest et al. (2022) um den Aspekt der operativen Flexibilität aus Dixit & Pindyck (1994, Kapitel 6.2) verstehen. In seiner Ausgestaltung kommt es dabei, ähnlich zu Briest et al. (2022), der Investitionsentscheidung in eine Biogasanlage mit operativer Flexibilität am nächsten, da hier die größte Schnittmenge zwischen der realtechnischen sowie der mathematisch formulierten operativen Flexibilität besteht. Wie zuvor beschrieben, lässt sich das Modell jedoch problemlos auch in anderen Bereichen einsetzen bzw. auf entsprechende Problemstellungen zuschneiden.

5.3 Modellbildung

In diesem Abschnitt wird ein Entscheidungsmodell vorgestellt, das durch die initiale Investition eines Unternehmens in ein Projekt, z. B. eine Biogasanlage, mit operativer

²⁶Ein nomineller Rohstoffpreis könnte bspw. über eine Kombination von OU Prozess und GBM modelliert werden, wobei die GBM die inflationsgetriebene Preissteigerung erfasst. Auf der anderen Seite könnte inflationsbereinigt entsprechend mit einem exponentiellen oder gar reinen OU Prozess gearbeitet werden. In Park & Sharp-Bette (1990, S. 70 ff.) sind Ausführungen zur Investitionsrechnung mit und ohne Berücksichtigung von Inflation zu finden. Die Bewertung unter Berücksichtigung von Inflation in Preisen, aber auch in der Verzinsung sollte zu gleichen Ergebnissen führen, wie die Bewertung mit inflationsbereinigten Größen. Ggf. könnte die Transformation des Ausgangsproblems in die inflationsbereinigte Welt das Problem vereinfachen.

Flexibilität motiviert ist. Das Unternehmen soll risikoneutral sein und Cashflows mit einer Rate r diskontieren. Auch soll die Möglichkeit der Fremdfinanzierung unberücksichtigt bleiben, sodass das Unternehmen die Investition aus eigenen Mitteln finanziert. Die Kapazität des Projekts soll zudem im Vergleich zum Gesamtmarkt klein sein, sodass für die operative Entscheidung der Marktpreis, z. B. der Strompreis im Falle der Biogasanlage, als gegeben angenommen wird.²⁷ Im Gegensatz zu Briest et al. (2022) soll die operationale Flexibilität jedoch nicht separat ausgelagert und über ein Unit Commitment Modell erfasst werden, sondern direkt im Rahmen des Realoptionsmodells in Anlehnung an Dixit & Pindyck (1994, Kapitel 6.2) Berücksichtigung finden. In diesem Sinne soll die Modellierung „am Stück“ erfolgen. Damit dies möglich ist, werden nachfolgend einige vereinfachende Annahmen getroffen.²⁸

Zunächst soll angenommen werden, dass der Preis, wie z. B. der Strompreis, über ein Einfaktormodell aus Lucia & Schwartz (2002) beschrieben werden kann. Demnach wird der Preis x_t direkt über einen zeitstetigen OU Prozess formuliert

$$dx_t = \eta(\bar{x} - x_t)dt + \sigma dW_t. \quad (5.14)$$

Hier sind η ein Maß für die Geschwindigkeit der Mean-Reversion, \bar{x} das Mean-Reversion Level, σ die Standardabweichung und dW_t das Wiener Inkrement. Aus Anhang A.4 ergibt sich dabei, ausgehend von einem Anfangszustand $x_0 = x$, der Erwartungswert für den Preis von

$$\mathbb{E}_x[x(t)] = (x - \bar{x})e^{-\eta t} + \bar{x}. \quad (5.15)$$

Die Approximation des z. B. Strompreises über einen OU Prozess ist dabei naheliegend, wenn auch in Unterabschnitt 5.1.1 auf einige deutlich komplexere Modelle zur Strom-

²⁷Das Unternehmen soll sich in einem Wettbewerbsmarkt befinden. In der Praxis kann ein solcher Markt gegeben sein, wenn er annähernd kompetitiv ist, sodass sowohl Käufer als auch Verkäufer zu wenig Marktmacht besitzen, um den Preis zu beeinflussen (Pindyck & Rubinfeld, 2015, S. 54 ff. & Kapitel 8). Für den Fall einer Biogasanlage, deren Strom am Markt verkauft wird, ist dies sicher der Fall. Als weiteres Beispiel lässt sich der amerikanische Gasmarkt aufführen, der mit seinen tausenden Produzenten, Zwischenhändlern und Konsumenten hoch kompetitiv ist (FERC, 2020, S. 31).

²⁸Hier ermöglichen die Annahmen, zum Preis der Realitätsnähe, eine gewisse Transparenz bzw. Nachvollziehbarkeit des Modellansatzes aber auch ein breiteres Anwendungsfeld. Analog zu Pindyck (1988) lässt sich jedoch durchaus argumentieren, dass die Ergebnisse im Rahmen der numerischen Studie aus Abschnitt 5.4 im direkten Vergleich mit anspruchsvolleren Modellen qualitativ wenig an Gültigkeit einbüßen.

preismodellierung hingewiesen wird.²⁹ Gl. 5.14 zeigt über ihre Struktur die modelltheoretischen Implikationen, welche sich durch ökonomische Argumente untermauern lassen. Aus ökonomischer Sicht ist die Rückkehr zu einem Mean-Reversion Level hauptsächlich auf den Mechanismus von Angebot und Nachfrage zurückzuführen.³⁰ So argumentiert Schwartz (1997), dass bei hohen Rohstoffpreisen das Angebot steigt, was wiederum einen Abwärtsdruck auf die Preise nach sich zieht. Auf der anderen Seite reduziert sich bei niedrigen Preisen das Angebot, wodurch wiederum ein Aufwärtsdruck bzgl. der Preise entsteht. Vor diesem Hintergrund ist davon auszugehen, dass die Rohstoffpreise mit den langfristigen Grenzkosten der Produktion in Beziehung stehen sollten (Dixit & Pindyck, 1994, S. 74). Auch wenn kurzfristige Schwankungen auftreten können, sollten sich die Preise im langfristigen Mittel immer diesen Grenzkosten annähern. Bhattacharya (1978) argumentiert ähnlich, jedoch nicht für Preise sondern direkt für Projekte: In einem kompetitiven Umfeld sollten sich die Projekt-Cashflows hin zu einem langfristigen Mittel entwickeln, was zu Indifferenz für neue Investitionen führt. Für den Fall, dass Unternehmen zusätzliche Projekteinnahmen auf einem Markt generieren, würden Wettbewerber auf den Markt gelockt, sodass die Einnahmen über Marktkräfte wieder in Richtung des langfristigen Mittels gedrückt würden.

Gl. 5.14 verkörpert diesen ökonomischen Sachverhalt. Sollte bspw. der Strompreis hoch sein, würden viele Stromproduzenten versuchen, ihren Strom auf dem Markt zu verkaufen. Das steigende Stromangebot würde wiederum dazu führen, dass der Strompreis (in Richtung des Mean-Reversion Level \bar{x}) sinkt. Liegen die Strompreise jedoch unterhalb \bar{x} , würden die Stromproduzenten Kapazitäten herunterfahren. Dem sinkenden Angebot würde dann über einen Preisanstieg in Richtung \bar{x} entgegengewirkt.³¹ Die Geschwindig-

²⁹Ein offensichtliche Schwäche der Annahme, dass z. B. der Strompreis einem reinen OU Prozess folgt, ist das Fehlen der typischen Spikes. Auch langfristige Trends, die sich z. B. in einem zeitabhängigen Mean-Reversion Level äußern, bleiben unberücksichtigt. Zuletzt spielt auch die Saisonalität eine wichtige Rolle. Auch diese kann über den OU Prozess nicht erfasst werden. Jedoch könnte der Preis auch als inflationsbereinigt betrachtet werden, ebenso wie die Verzinsung r , sodass zumindest inflationsgetriebene Preistrends keine Rolle mehr spielen würden.

³⁰Eine solche Argumentation impliziert einen zugrundeliegenden Wettbewerbsmarkt bzw. einen hinreichend kompetitiven Markt. Andernfalls lässt sich nicht mehr ohne weiteres bei Veränderung des Angebots auf eine Veränderung der Nachfrage und umgekehrt schließen (Pindyck & Rubinfeld, 2015, S.56).

³¹Dies wird aus Gl. 5.14 wie folgt ersichtlich: Wenn $x_t > \bar{x}$, dann ist mit $\eta > 0$ immer $\eta(\bar{x} - x_t)dt < 0$. Da σdW_t ungerichtet ist, d. h. in einem Zeitschritt dt kann $\sigma dW_t \leq 0$, so kann die Änderung im Preis über dt ebenfalls $dx_t \leq 0$. Mit jedem weiteren dt , für das $dx_t > 0$, wird jedoch der kumulative Druck in Richtung \bar{x} durch die steigende Differenz $\bar{x} - x_t$ größer, sodass eine Änderung in Richtung \bar{x} immer wahrscheinlicher wird. Für den Fall $x_t < \bar{x}$ kehrt sich diese Logik um. Schlussendlich wird sich x_t immer wieder in Richtung \bar{x} bewegen.

keit dieser Logik wird dabei über η moderiert. Zuletzt befeuert die über σ skalierte Unsicherheit die wiederkehrende Abweichung von \bar{x} , denn für den deterministischen Fall $\sigma = 0$ (siehe analog Gl. 5.15) würde sich je nach $x_0 \lesseqgtr \bar{x}$ nur eine rein steigende oder rein fallende Bewegung des Preises in Richtung \bar{x} ergeben, ohne erneute Möglichkeit der Abweichung. In Bezug auf Gl. 5.14 sei auch darauf hingewiesen, dass negative Preise $x_t < 0$ möglich sind. Dies ist ausdrücklich erwünscht, da negative Preise z. B. an Strommärkten nicht selten vorkommen.³² Auch wird nicht zuletzt durch negative Preise der intuitive Wert der operativen Flexibilität deutlich.

Zusätzlich zur Verlaufshypothese des Preises, soll gängigen Modellen aus der Realoptionsliteratur gefolgt und angenommen werden, dass das Projekt, wie bspw. eine Biogasanlage, eine unendliche Lebensdauer hat. Dem Beispiel der Biogasanlage folgend, sollen, im Gegensatz zu Briest et al. (2022), technische Nebenbedingungen außer Acht gelassen werden, wie z. B. der Biogasvolumenstrom oder die Speicherkapazität von Biogas innerhalb der Anlage. Es soll vielmehr angenommen werden, dass immer ausreichend Biogas für Stromproduktion und -verkauf am Markt vorhanden ist. Diese Annahme ließe sich bspw. in der Praxis über einen bilateralen Vertrag zwischen einem großen Biomethan Hersteller und dem Biogasanlagenbetreiber realisieren. Beide bräuchten lediglich einen Anschluss an das Gasnetz und könnten die Abrechnung problemlos über die Bilanzierung von eingespeistem und entnommenem Biomethan durchführen. Zuletzt soll angenommen werden, dass die operativen Kosten konstant sind (da z. B. über einen bilateralen Vertrag fixiert) und die Geschwindigkeit zum Hoch- und Herunterfahren der Anlage sowie die damit verbundenen Kosten vernachlässigbar sind.³³

5.3.1 Projektwert mit operativer Flexibilität

Um die Investitionsentscheidung in ein Projekt mit operativer Flexibilität – eine Biogasanlage mit flexiblem Betrieb – in Unterabschnitt 5.3.2 untersuchen zu können, ist zunächst die Bestimmung des Projektwerts notwendig, der bereits die operative Flexi-

³²Anstelle des Strompreises ließe sich auch der Spark Spread oder eine betriebswirtschaftliche Kenngröße wie der Free Cashflow über einen reinen OU Prozess approximieren.

³³Aufgrund der schnellen Reaktionszeit von Gasmotoren können die Reaktionsgeschwindigkeiten vernachlässigt werden (Hochloff & Braun, 2014). Ishikawa et al. (2021) konnten zeigen, dass einige Biogasanlagen so schnell anfahren, dass sie sogar Sekundärregelung bereitstellen können, d. h. die Anlagen erreichen die Nennleistung innerhalb von 5 Minuten. Die Zeiten für das Hoch- und Herunterfahren von Anlagen ist ein bedeutenderes Problem für Stein- oder Braunkohlekraftwerke.

bilität enthält. Da der Leistungswechsel der Biogasanlage und damit das Ansprechen auf Preissignale ohne Zeitverzug und als kostenlos angenommen wird, reduziert sich die Entscheidung über die Wahl zwischen Stromproduktion und Leerlauf, gegeben einem aktuellen Strompreis x_t , auf folgendes einfaches Funktional

$$\pi(x_t) = \max(x_t - c, 0), \quad (5.16)$$

mit c als konstante operative Kosten. Die operative Strategie ist dabei deutlich: Für $x_t > c$ wird die Anlage mit voller Auslastung gefahren, sodass $\pi(x_t) > 0$.³⁴ Hingegen wird die Anlage für $x_t \leq c$ heruntergefahren, sodass $\pi(x_t) = 0$. Über die in Abschnitt 3.2 vorgestellte Bellman Gleichung 3.16 kann die durch die operative Strategie induzierte Flexibilität und damit Optionalität erfasst werden, sodass der Projektwert $V(x)$ die Bellman Gleichung

$$\mathbb{E}[dV(x)] + \pi(x)dt = rV(x)dt \quad (5.17)$$

erfüllen muss. Gl. 5.17 beschreibt dabei, dass über Zeitschritt den dt , die geforderte Verzinsung des Projekts gleich seiner erwarteten Wertänderung plus einem realisierten Erlös ist. Demnach lässt sich $V(x)$ unter Berücksichtigung der zwei operativen Bereiche wie folgt darstellen:

$$V(x) = \begin{cases} \frac{1}{rdt} \mathbb{E}[dV(x)], & \text{für } x \leq c \\ \frac{1}{rdt} \left(\mathbb{E}[dV(x)] + (x - c)dt \right), & \text{für } c < x. \end{cases} \quad (5.18)$$

Nun kann Itô's Lemma angewendet werden.³⁵ Für die Region $x \leq c$ ergibt sich somit

$$\frac{1}{2} \sigma^2 V''(x) + \eta(\bar{x} - x)V'(x) - rV(x) = 0. \quad (5.19)$$

Für die Region $c < x$ ergibt sich eine ähnliche Dgl., die aufgrund von $-(x - c)$ jedoch inhomogen ist

$$\frac{1}{2} \sigma^2 V''(x) + \eta(\bar{x} - x)V'(x) - rV(x) = -(x - c). \quad (5.20)$$

³⁴Da die Reaktionsgeschwindigkeit der Anlage vernachlässigt wird, gibt es keine Abstufung in der Fahrweise. Die Anlage wird entweder unter Vollast betrieben oder abgeschaltet. In Glensk & Madlener (2019) sind im Falle von größeren Gasturbinenkraftwerken mehr als die zwei Zustände „An“ und „Aus“ zu finden.

³⁵Die Anwendung von Itô's Lemma für den Fall $c < x$ ist in Anhang C.1 zu finden.

Beide Gln. 5.19 und 5.20 lassen sich über $z = (x - \bar{x})/\bar{\sigma}$ mit $\bar{\sigma} = \sigma/\sqrt{2\eta}$ und Setzen der Ansatzfunktionen $V(x) = e^{z^2/4}w(z)$ für $x \leq c$ und $V(x) = e^{z^2/4}f(z)$ für $c < x$ in jeweils eine homogene und inhomogene Weber-Gleichung überführen³⁶

$$w''(z) + \left(-\frac{1}{4}z^2 + \nu + \frac{1}{2}\right)w(z) = 0, \quad (5.21)$$

$$f''(z) + \left(-\frac{1}{4}z^2 + \nu + \frac{1}{2}\right)f(z) = -e^{-\frac{z^2}{4}} \frac{z\bar{\sigma} + \bar{x} - c}{\eta} \quad (5.22)$$

wobei $\nu = -\frac{r}{\eta}$. Die Lösung zur homogenen Weber Gleichung 5.21 kann dabei für nicht-ganzzahlige $\nu < 0$, was mit ökonomisch sinnvollen Parametern $r > 0$ und $\eta > 0$ im Rahmen dieser Arbeit erfüllt ist, z. B. nach Spanier & Oldham (1987, S. 447), Boyarchenko & Levendorskii (2007, S. 263 ff.) oder Peskir & Shiryaev (2006, S. 193) über

$$w(z) = A_1 D_\nu(-z) + A_2 D_\nu(z) \quad (5.23)$$

angegeben werden, wobei $D_\nu(\pm z)$ jeweils parabolische Zylinderfunktionen darstellen. Dabei kann $D_\nu(\pm z)$ für $\nu < 0$ in Integralform

$$D_\nu(\pm z) = \frac{1}{\Gamma(-\nu)} e^{-\frac{z^2}{4}} \int_0^\infty e^{-\frac{u^2}{2} \mp zu} u^{-\nu-1} du \quad (5.24)$$

repräsentiert werden. Nun soll zur Bestimmung der konstanten Koeffizienten A_1 und A_2 ein einfaches Argument zum Einsatz kommen. Da zunächst der Bereich $x < c$ betrachtet wird, ist das Grenzverhalten für $x \rightarrow -\infty$ interessant. Hier sollte der Projektwert $V(x)$ wertlos werden. Da A_1 und A_2 konstant sind, ist für das Grenzverhalten entsprechend nur $e^{z^2/4}D_\nu(-z)$ sowie $e^{z^2/4}D_\nu(z)$ für $z \rightarrow -\infty$ von Interesse. Entsprechend ergeben sich:

$$\lim_{z \rightarrow -\infty} e^{\frac{z^2}{4}} D_\nu(-z) = \lim_{z \rightarrow -\infty} \frac{1}{\Gamma(-\nu)} \int_0^\infty e^{-\frac{u^2}{2} + zu} u^{-\nu-1} du = 0, \quad (5.25)$$

$$\lim_{z \rightarrow -\infty} e^{\frac{z^2}{4}} D_\nu(z) = \lim_{z \rightarrow -\infty} \frac{1}{\Gamma(-\nu)} \int_0^\infty e^{-\frac{u^2}{2} - zu} u^{-\nu-1} du = \infty. \quad (5.26)$$

Hieraus wird deutlich, dass Koeffizient $A_2 = 0$ zu setzen ist. Für die inhomogene Weber Gleichung 5.22 ist nun zusätzlich zu einer homogenen Lösung $f_h(z)$ eine partikuläre Lösung $f_p(z)$ nötig, sodass $f(z) = f_h(z) + f_p(z)$. Für $f_h(z)$ ergibt sich analog zu Gl.

³⁶Die Entwicklung der inhomogenen Weber Gleichung 5.22 ist in Anhang C.2 zu finden.

5.23

$$f_h(z) = B_1 D_\nu(-z) + B_2 D_\nu(z). \quad (5.27)$$

Für die partikuläre Lösung kann über den Ansatz vom Typ der rechten Seite die Lösung

$$f_p(z) = \left(\frac{\bar{\sigma}z}{r+\eta} + \frac{\bar{x}-c}{r} \right) e^{-\frac{z^2}{4}} \quad (5.28)$$

gefunden werden.³⁷ Die partikuläre Lösung hat dabei eine interessante Interpretation. Diese wird deutlich, wenn der Projektwert ohne jegliche Optionalität $V_{naiv}(x)$ betrachtet wird. Dieser lässt sich über

$$V_{naiv}(x) = \mathbb{E}_x \left[\int_0^\infty (x_t - c) e^{-rt} dt \right] = \frac{x - \bar{x}}{r + \eta} + \frac{\bar{x} - c}{r} \quad (5.29)$$

mit Erwartungswert $\mathbb{E}_x[\cdot]$ bedingt auf den initialen Zustand $x_0 = x$ bestimmen. Für $e^{z^2/4} f_p(z)$ und mit $\bar{\sigma}z = x - \bar{x}$ enthält der Projektwert mit operativer Flexibilität $V(x)$ somit $V_{naiv}(x)$. Nun kann abermals ein Argument zur Grenzwertbetrachtung bemüht werden, um einen der beiden konstanten B_1 und B_2 zu eliminieren. Dazu kann die Interpretation der partikulären Lösung als naiver Projektwert dienen. Sollte der Preis $x \rightarrow \infty$ und somit seine transformierte Form $z \rightarrow \infty$, so sollte die operative Flexibilität keinen Wert mehr haben, denn die Anlage würde nicht mehr heruntergefahren. In diesem Fall muss der Projektwert seinem naiven Wert $V_{naiv}(x)$ entsprechen. Da für $f_h(z)$ analog zu Gl. 5.25 und 5.26

$$\lim_{z \rightarrow \infty} e^{\frac{z^2}{4}} D_\nu(-z) = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{1}{\Gamma(-\nu)} \int_0^\infty e^{-\frac{u^2}{2} + zu} u^{-\nu-1} du = \infty, \quad (5.30)$$

$$\lim_{z \rightarrow \infty} e^{\frac{z^2}{4}} D_\nu(z) = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{1}{\Gamma(-\nu)} \int_0^\infty e^{-\frac{u^2}{2} - zu} u^{-\nu-1} du = 0 \quad (5.31)$$

gilt, muss hier die Konstante $B_1 = 0$ gesetzt werden. Damit lässt sich der Projektwert $V(z)$ mit $z_c = (c - \bar{x})/\bar{\sigma}$ zunächst in der Form

$$V(z) = \begin{cases} A_1 e^{\frac{z^2}{4}} D_\nu(-z) & z \leq z_c \\ B_2 e^{\frac{z^2}{4}} D_\nu(z) + \frac{\bar{\sigma}z}{r+\eta} + \frac{\bar{x}-c}{r} & z_c < z \end{cases} \quad (5.32)$$

³⁷Siehe abermals Anhang C.2.

angeben. Zuletzt müssen die Konstanten A_1 und B_2 gefunden werden, um den Projektwert eindeutig bestimmen zu können. Dies kann über ein Argument am Übergangspunkt $x = c$ erfolgen. Da der Strompreis über einen Diffusionsprozess in Gl. 5.14 beschrieben ist, kann sich x_t nicht schlagartig im Sinne eines sprunghaften Verhaltens ändern. Demnach muss x_t an der Stelle c frei in die eine oder andere Richtung diffundieren können. In entsprechender Konsequenz muss vielmehr der Projektwert $V(x = c)$ simultan sowohl durch seine Lösungen für $x \leq c$ als auch $c < x$ definiert und zudem an der Stelle $x = c$ differenzierbar sein. Es ergibt sich daraus das Gleichungssystem

$$A_1 e^{\frac{z_c^2}{4}} D_\nu(-z_c) = B_2 e^{\frac{z_c^2}{4}} D_\nu(z_c) + \frac{\bar{\sigma} z_c}{r + \eta} + \frac{\bar{x} - c}{r} \quad (5.33)$$

$$A_1 \tilde{D}_\nu(-z_c) = B_2 \tilde{D}_\nu(z_c) + \frac{\bar{\sigma}}{r + \eta} \quad (5.34)$$

wobei³⁸

$$\tilde{D}_\nu(\pm z) = \mp \frac{1}{\Gamma(-\nu)} \int_0^\infty e^{-\frac{u^2}{2} \mp zu} u^{-\nu} du. \quad (5.35)$$

Für Koeffizient A_1 kann

$$A_1 = B_2 \frac{\tilde{D}_\nu(z_c)}{\tilde{D}_\nu(-z_c)} + \frac{1}{\tilde{D}_\nu(-z_c)} \frac{\bar{\sigma}}{r + \eta} \quad (5.36)$$

³⁸Die Ableitung ist mit

$$\tilde{D}_\nu(\pm z) = \left(e^{\frac{z^2}{4}} D_\nu(\pm z) \right)' = \mp \frac{1}{\Gamma(-\nu)} \int_0^\infty e^{-\frac{u^2}{2} \mp zu} u^{-\nu} du$$

gegeben. Dies lässt sich über ein „heuristisches Argument“ aus der numerischen Approximation der Ableitung mittels zentraler Differenz (linke Seite) und der numerischen Integration (rechte Seite) der nachfolgenden Gl. für kleine h numerisch nachweisen

$$\left(\frac{e^{\frac{(z+h)^2}{4}} D_\nu(\pm(z+h)) - e^{\frac{(z-h)^2}{4}} D_\nu(\pm(z-h))}{2h} \right) \approx \mp \frac{1}{\Gamma(-\nu)} \int_0^\infty e^{-\frac{u^2}{2} \mp zu} u^{-\nu} du.$$

Da es sich bei dem Integral um ein uneigentliches Integral handelt (nach oben unbeschränkt mit ∞), muss, bevor die Leibniz-Regel für konstante Integrationsgrenzen $\frac{\partial}{\partial x} \int_0^a f(u, x) du = \int_0^a \frac{\partial f(u, x)}{\partial x} du$ mit $a = \infty$ angewendet werden kann, dass Integral auf Konvergenz überprüft werden. Dazu ließe sich bspw. das Majorantenkriterium nutzen. An dieser Stelle soll auf einen solchen detaillierten Nachweis verzichtet und dem „heuristisches Argument“ gefolgt werden. Tatsächlich impliziert die Angabe von $D_\nu(\pm z)$ in Spanier & Oldham (1987, S. 447) bereits die Konvergenz, da sich andernfalls die Lösung zur Weber Gleichung für $\nu < 0$ nicht angeben ließe.

gefunden werden, wobei Koeffizient B_2 mit

$$B_2 = \frac{\tilde{D}_V(-z_c)}{\tilde{D}_V(z_c)D_V(-z_c) - \tilde{D}_V(-z_c)D_V(z_c)} \left(\left(\frac{\bar{\sigma}z_c}{r+\eta} + \frac{\bar{x}-c}{r} \right) e^{-\frac{z_c^2}{4}} - \frac{D_V(-z_c)}{\tilde{D}_V(-z_c)} \frac{\bar{\sigma}}{r+\eta} \right). \quad (5.37)$$

gegeben ist. Schlussendlich lässt sich der Projektwert mit operationaler Flexibilität $V(x)$ über

$$V(x; z_c) = \begin{cases} A_1 e^{\frac{(x-\bar{x})^2}{4\bar{\sigma}^2}} D_V\left(-\frac{x-\bar{x}}{\bar{\sigma}}\right) & x \leq c \\ B_2 e^{\frac{(x-\bar{x})^2}{4\bar{\sigma}^2}} D_V\left(\frac{x-\bar{x}}{\bar{\sigma}}\right) + \frac{x-\bar{x}}{r+\eta} + \frac{\bar{x}-c}{r} & c < x \end{cases} \quad (5.38)$$

angeben.

Nachfolgend soll der ermittelte Projektwert grafisch in Abb. 5.4 dargestellt werden. Hierzu werden die folgenden allgemeinen Parameterwerte, welche auch später im Rahmen der numerischen Studie in Bezug auf die Investitionsneigung genutzt werden, verwendet: $r = 0,1$ p. a., $\eta = 0,6$, $\bar{x} = 0,06$, $\sigma = 0,6$, sowie $c = 0,12$.³⁹

Aus Abb. 5.4 wird dabei die Auswirkung der operativen Flexibilität deutlich. Sie schützt den Anlagenbetreiber vor negativen Ergebnissen. Während eine Anlage, die sich naiv im Dauerbetrieb befindet, selbst bei Strompreisen kleiner als die operativen Kosten gefahren würde und damit $V_{naiv}(x) \leq 0$ erzeugt, schützt die operative Flexibilität vor diesem Umstand, sodass $V(x; z_c) \geq 0$. Auch das Grenzverhalten von $V(x; z_c)$ wird deutlich. Sollte $x \rightarrow -\infty$, so ergibt sich daraus $V(x) \rightarrow 0$. Auf der anderen Seite geht für $x \rightarrow \infty$ $V(x; z_c)$ in $V_{naiv}(x)$ über.

³⁹Die hier verwendeten Parameter sind in Anlehnung an einschlägige Realloptionsliteratur bzw. frei festgelegt worden. Das Modell kann dabei je nach Anwendungsfall entsprechend auch mit realistischen Werten parametrisiert werden. Im Rahmen der Biogasanlage ließen sich die Parameter x_t , \bar{x} und σ in Eur/kWh oder Eur/MWh interpretieren. Für \bar{x} und c könnten dabei Abschätzungen auf Basis der Levelized Cost of Electricity aus Kost et al. (2021, S. 28) vorgenommen werden. Für \bar{x} ließe sich die Wahl dabei vor dem Hintergrund der in Abschnitt 5.3 gegebenen Argumentation bzgl. des Einflusses von Angebot und Nachfrage auf das langfristige Mean-Reversion Level treffen. Es ist ebenfalls denkbar, die Größen direkt auf Basis einer Strompreiszeitreihe zu ermitteln. Aufgrund der bereits beschriebenen Limitationen des Modells wäre dies jedoch nicht ohne weiteres im Sinne einer korrekten Zeitreihenanalyse möglich, da die Zeitreihe z. B. nicht stationär oder saisonal sein kann, Spikes enthält etc. Jedoch besteht hier, wie durch Weron (2014) beschrieben, auch nicht zwangsweise die Absicht, den Strompreis perfekt stündlich, minütlich oder gar sekundlich abzubilden. Vielmehr soll der Einfluss einer wesentlichen Komponente, der Mean-Reversion, untersucht werden.

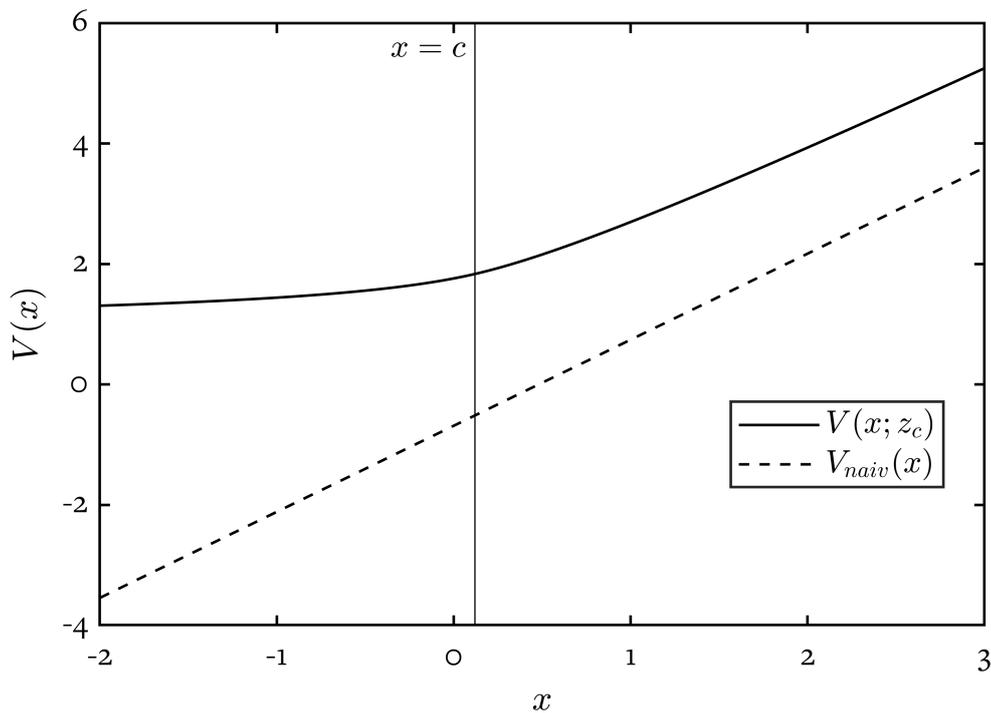


Abbildung 5.4: Darstellung des Projektwerts mit und ohne operative Flexibilität.

5.3.2 Wert der Investitionsentscheidung

Nachdem in Unterabschnitt 5.3.1 der Projektwert mit operativer Flexibilität ermittelt wurde, muss nun die initiale Investitionsentscheidung untersucht werden. Analog zum Projektwert $V(x)$ kann, ausgehend vom Ansatz der dynamischen Programmierung, der Wert der Investitionsmöglichkeit $F(x)$ gefunden werden. Entsprechend muss $F(x)$

$$F(x) = \begin{cases} \frac{1}{r dt} \mathbb{E}[dF(x)], & \text{für } x \leq x^* \\ V(x; z_c) - I, & \text{für } x^* < x \end{cases} \quad (5.39)$$

erfüllen, wobei I die Investitionsausgaben darstellt (siehe auch Gl. 3.19). Da vor Investition in die Anlage bzw. das Projekt mit operativer Flexibilität keine Cashflows fließen, muss der Wert der Investitionsmöglichkeit $F(x)$ – für $x \leq x^*$ der Wert der Option to Invest – mit r über einen Zeitschritt dt verzinst, seiner erwarteten Wertänderung entsprechen. Für $x^* < x$ hingegen, wird die Investitionsoption ausgeübt und existiert nicht mehr. Hier muss $F(x)$ gleich dem Nettokapitalwert sein, welcher sich aus dem Projekt-

wert mit operativer Flexibilität und den Investitionsausgaben ergibt.

Da $V(x)$ bereits bekannt ist, muss lediglich $F(x)$ für $x \leq x^*$ ermittelt werden. Analog zu den Transformationen in Unterabschnitt 5.3.1 muss $F(x)$ die Dgl.

$$\frac{1}{2}\sigma^2 F''(x) + \eta(\bar{x} - x)F'(x) - rF(x) = 0 \quad (5.40)$$

lösen. Mit $F(x) = e^{z^2/4}g(z)$ und den bereits verwendeten Transformationen $z = (x - \bar{x})/\bar{\sigma}$ mit $\bar{\sigma} = \sigma/\sqrt{2\eta}$ lässt sich Gl. 5.40 ebenfalls in eine Weber Gleichung überführen

$$g''(z) + \left(-\frac{1}{4}z^2 - \frac{r}{\eta} + \frac{1}{2}\right)g(z) = 0, \quad (5.41)$$

wobei die bekannte Ansatzform

$$g(z) = C_1 D_\nu(-z) + C_2 D_\nu(z) \quad (5.42)$$

gewählt wird. Auch hier kann eine der Konstanten C_1 und C_2 über ein einfaches ökonomisches Argument zu Null gewählt werden. Dazu muss das Verhalten von $F(x)$ für $x \rightarrow -\infty$ betrachtet werden. Hier sollte der Optionswert $F(x) \rightarrow 0$. Da für $x \rightarrow -\infty$ jedoch $e^{z^2/4}D_\nu(z) \rightarrow \infty$, muss Konstante $C_2 = 0$.

Nun sind lediglich die zwei Größen C_1 und x^* unbekannt. Demnach werden zwei Gleichungen benötigt mit denen über ein Gleichungssystem C_1 und x^* bestimmt werden können. Dazu werden die Value Matching und Smooth Pasting Bedingungen eingesetzt. An dieser Stelle stellt sich die Frage, für welchen Bereich von $V(x)$ diese Bedingungen aufgestellt werden müssen. Abermals kann ein einfaches ökonomisches Argument dienen. Aus Sicht des Anlagenbetreibers ist es sinnlos, seine Investitionsoption auszuüben, um dann eine Anlage im Leerlauf zu belassen. Demnach muss $V(x; z_c)$ im Bereich $c < x$ für die Aufstellung von Value Matching und Smooth Pasting Bedingungen zum Einsatz kommen. Da für den Erwerb der Anlage mit Wert $V(x; z_c)$ erst irreversible Investitionsausgaben I gezahlt werden müssen, ergibt sich für das Gleichungssystem

$$C_1 e^{z^{*2}/4} D_\nu(-z^*) = B_2 e^{\frac{z^{*2}}{4}} D_\nu(z^*) + \frac{\bar{\sigma} z^*}{r + \eta} + \frac{\bar{x} - c}{r} - I, \quad (5.43)$$

$$C_1 \tilde{D}_\nu(-z^*) = B_2 \tilde{D}_\nu(z^*) + \frac{\bar{\sigma}}{r + \eta}, \quad (5.44)$$

wobei z^* den zu x^* korrespondierenden transformierten Schwellenwert darstellt. Aus der Smooth Pasting Bedingung aus Gl. 5.44 wird sofort die strukturelle Ähnlichkeit zu Gl. 5.36 deutlich. Für C_1 kann entsprechend

$$C_1 = B_2 \frac{\tilde{D}_V(z^*)}{\tilde{D}_V(-z^*)} + \frac{1}{\tilde{D}_V(-z^*)} \frac{\bar{\sigma}}{r + \eta} \quad (5.45)$$

formuliert werden. z^* muss nach Einsetzen von Gl. 5.45 in die Value Matching Bedingung aus Gl. 5.43 numerisch gefunden werden

$$B_2 \frac{\tilde{D}_V(z^*)D_V(-z^*) - \tilde{D}_V(-z^*)D_V(z^*)}{\tilde{D}_V(-z^*)} + \frac{D_V(-z^*)}{\tilde{D}_V(-z^*)} \frac{\bar{\sigma}}{(r + \eta)} - e^{-\frac{z^{*2}}{4}} \left(\frac{\bar{\sigma}z^*}{r + \eta} + \frac{\bar{x} - c}{r} - I \right) = 0. \quad (5.46)$$

Der so über Gl. 5.46 ermittelte Schwellenwert $x^* = \bar{x} + \bar{\sigma}z^*$ muss dabei aus ökonomischer Sicht sowohl die effektiven operativen Kosten $c + rI$ übersteigen, als auch zu einem positiven Nettobarwert $V(x^*; z_c) - I \geq 0$ führen.⁴⁰ Für $F(x; z^*)$ ergibt sich schließlich

$$F(x; z^*) = \begin{cases} C_1 e^{\frac{(x-\bar{x})^2}{4\bar{\sigma}^2}} D_V\left(-\frac{x-\bar{x}}{\bar{\sigma}}\right), & \text{für } x \leq x^* \\ V(x; z_c) - I, & \text{für } x^* < x. \end{cases} \quad (5.47)$$

Zuletzt soll auch der Wert der Investitionsmöglichkeit $F(x; z^*)$ für die Parameterwerte aus Unterabschnitt 5.3.1, erweitert um $I = 2$, in Abb. 5.5 dargestellt werden.⁴¹ Abb. 5.5 zeigt dabei deutlich den Wert, mit der Investitionsentscheidung warten zu können. Während der Barwert der sofortigen Investition $V(x; z_c) - I$ negativ werden kann, schützt die Flexibilität, mit der Entscheidung warten zu können, den Optionsinhaber vor jenen schlechten Ergebnissen. Erst wenn x ausreichend groß ist, wird die Option ausgeübt.

⁴⁰Für die Validierung des numerisch ermittelten Schwellenwerts sind entsprechend solche Prüfkriterien für die Implementierung in z. B. Matlab zu berücksichtigen.

⁴¹Die Investitionsausgaben für eine Biogasanlage könnten für eine konkrete Parametrisierung des Modells in Anlehnung an Briest et al. (2022) gewählt werden.

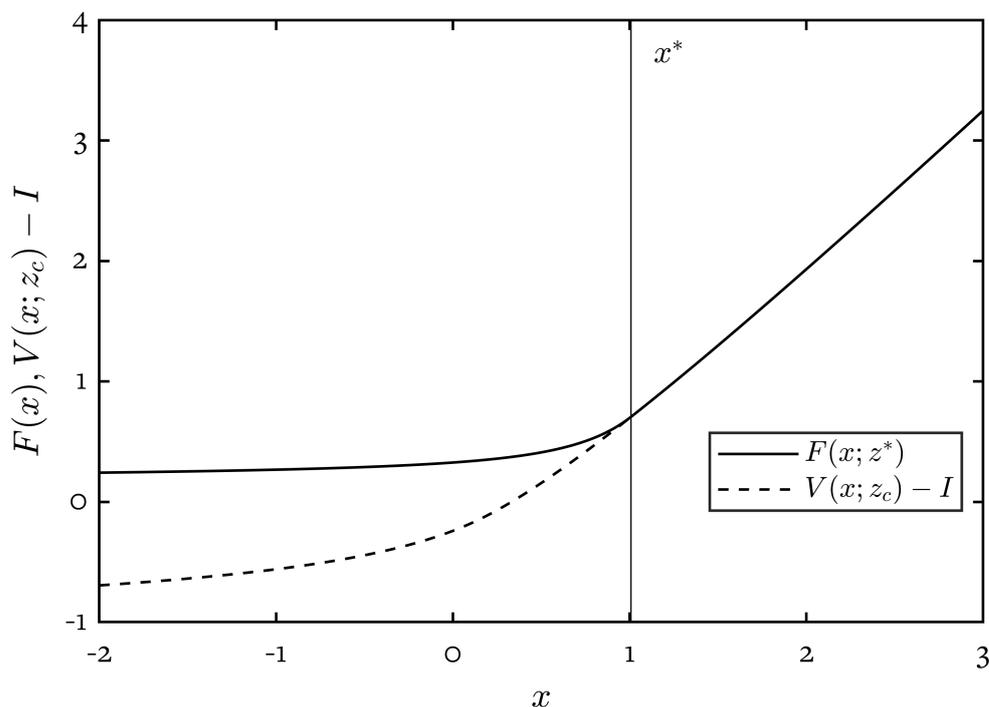


Abbildung 5.5: Darstellung des Wertes der Investitionsmöglichkeit und des Projektwerts mit operativer Flexibilität.

5.4 Numerische Analyse der Investitionsentscheidung

Für die Analyse der Auswirkung der einzelnen Parameter werden als Ausgangspunkt die Werte aus den Unterabschnitten 5.3.1 und 5.3.2 verwendet. Sie seien an dieser Stelle nochmals zusammengefasst: $r = 0,10$ p. a., $\eta = 0,60$, $\bar{x} = 0,06$, $\sigma = 0,60$, $c = 0,12$ sowie $I = 2,00$.

Das zentrale Ergebnis lässt sich dabei in Abb. 5.6 festhalten und wird in den Unterabschnitten 5.4.1 bis 5.4.3 für seine treibenden Kräfte σ , \bar{x} sowie η detailliert diskutiert.

5.4.1 Einfluss der Preisunsicherheit

Aus Abb. 5.6 wird zunächst eines besonders deutlich: Die Umkehrung des gängigen Zusammenhangs zw. Investitionsneigung und der Unsicherheit für einige Konstellationen

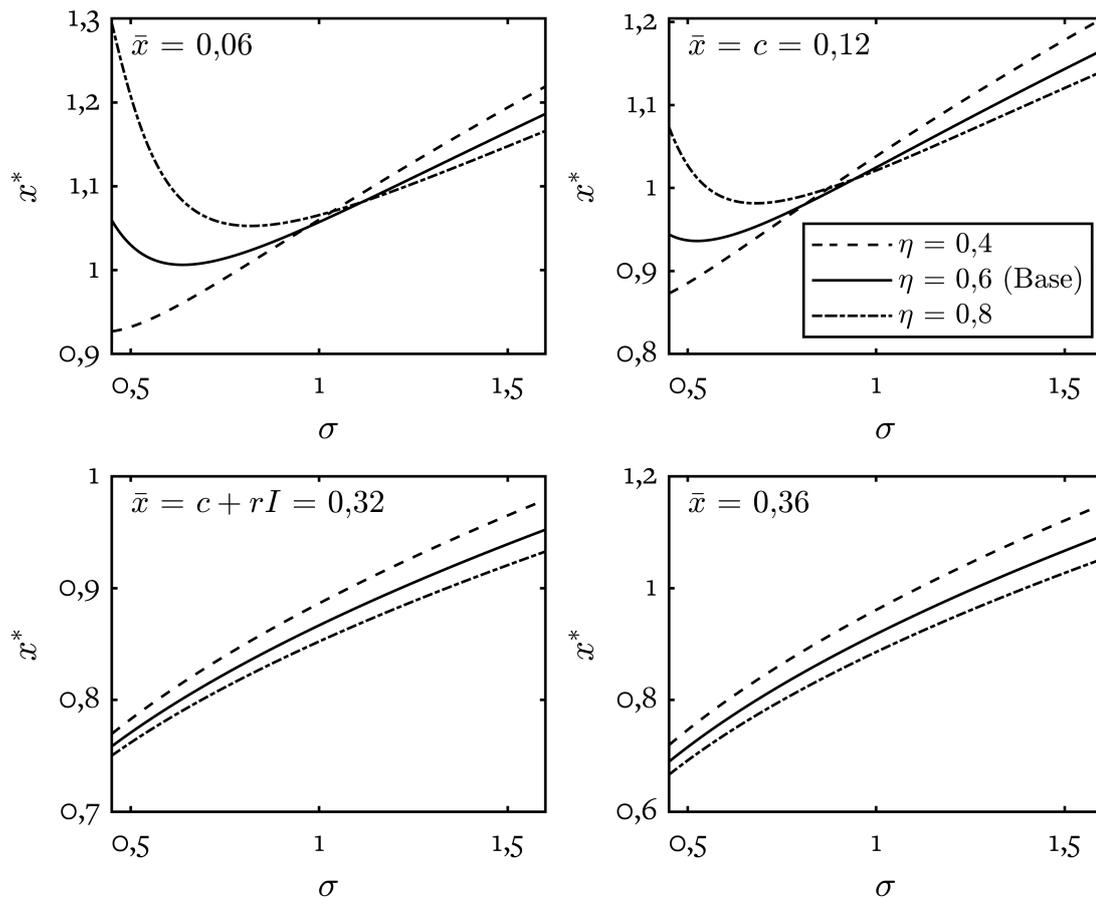


Abbildung 5.6: Darstellung des Einflusses von Unsicherheit σ , Mean-Reversion Geschwindigkeit η und Mean-Reversion Level \bar{x} auf den Investitionsschwellenwert x^* .

von \bar{x} und η . Demnach kann eine Erhöhung der Unsicherheit σ eine Erhöhung der Investitionsneigung x^* bewirken. Dies steht in starkem Kontrast zu den herkömmlichen Ergebnissen aus der einschlägigen Realloptionsliteratur, wo i. d. R. die Investitionsneigung mit steigender Unsicherheit des Investitionsvorhabens abnimmt.

Dieses Ergebnis ist neu und konnte bisher lediglich von Briest et al. (2022), jedoch in einem anderen Modellaufbau, gefunden werden. Wie in Unterabschnitt 5.2.4 aufgezeigt, haben sie eine Umkehrung des Zusammenhangs zw. Investition und Unsicherheit für Erlöse, welche über einen exponentiellen OU Prozess beschrieben werden, gefunden. Dieser Effekt beruht auf einem effektiven Mean-Reversion Level, das sich mit wachsendem σ erhöht und damit im erwarteten Projektwert materialisiert, sodass der erwartete Projektwert mit zunehmender Unsicherheit ebenfalls anwächst. Dies ist im hier vorlie-

genden Modell nicht der Fall. Das Mean-Reversion Level \bar{x} entspricht hier dem effektiven Mean-Reversion Level, womit letzteres konstant ist.

Tatsächlich erfährt der Projektwert $V(x; z_c)$ auch im hier vorgestellten Modell einen Zuwachs durch eine erhöhte Unsicherheit. Dieser Zuwachs ist jedoch aus dem Projektwert mit operativer Flexibilität $V(x; z_c)$ begründet. Da der Projektwert operative Optionaltät enthält – die Anlage herunterzufahren wenn $x_t \leq c$ und die Anlage unter Vollast zu betreiben wenn $c < x_t$ – wird diese mit zunehmendem σ wertvoller, da ein höheres σ , als ungerichtetes Maß für Unsicherheit, die Schwankungsbreite von x vergrößert. Dies wiederum steigert sowohl das Potenzial für (extrem) hohe Preise als auch niedrige bis negative Preise. Die operative Flexibilität ermöglicht dem Anlagenbetreiber, das volle Potenzial für hohe Preise auszunutzen und schützt ihn dabei gleichzeitig vor Preisen unterhalb der operativen Kosten.

Während sowohl in Briest et al. (2022) als auch in diesem Kapitel der erwartete Projektwert einen Zuwachs mit erhöhter Unsicherheit erfährt, ist zuletzt für die Umkehrung des Zusammenhangs zwischen Investitionsneigung und Unsicherheit seine wertmäßige Zunahme in Relation zum Optionswert maßgebend. Erst wenn sich $V(x; z_c)$ wertmäßig schneller als der Optionswert mit zunehmendem σ erhöht, kann sich der gängige Zusammenhang zw. x^* und σ umkehren.⁴² Da in Dixit & Pindyck (1994, S. 192) der Projektwert, unter Annahme einer GBM für den Preisprozess, ebenfalls mit steigendem σ zunimmt, jedoch der Zuwachs im Optionswert durchgängig stärker ist, lässt sich darauf schließen, dass der Preisprozess eine tragende Rolle für diesen Effekt spielt. In den nachfolgenden Unterabschnitten 5.4.2 und 5.4.3 werden die zwei maßgebenden Parameter \bar{x} und η ökonomisch genauer beleuchtet, um ihren Beitrag zur Umkehrung des Zusammenhangs zw. x^* und σ zu erläutern.

5.4.2 Einfluss des Mean-Reversion Level

Das Mean-Reversion Level \bar{x} kann aus ökonomischer Sicht als (Gleichgewichts-)Preis interpretiert werden, dem sich der Preisprozess x_t in langer Frist nähert. Dieser sollte im Falle von Rohstoffen, wie dem speziellen „Rohstoff“ Strom, über die in Abschnitt 5.3 beschriebene Dynamik von Angebot und Nachfrage, in Beziehung zu den langfristigen Grenzkosten der Produktion stehen (Dixit & Pindyck, 1994, S. 74). Bezogen auf das

⁴²Bildlich formuliert, treten Value Matching und Smooth Pasting früher zusammen, d. h. für kleinere x .

Beispiel einer Biogasanlage im Marktbetrieb könnte dieser Preis bspw. über die Stromgestehungskosten (engl. Levelized Cost of Electricity) approximiert werden, die in der langen Frist im Durchschnitt auf einem (deutschen) Strommarkt zu erwarten sind.⁴³ Das Streben in Richtung eines langfristigen Mean-Reversion Level wird zudem auch aus dem Erwartungswert in Gl. 5.15 für $t \rightarrow \infty$ deutlich und ist somit modelltheoretisch induziert.

In Abb 5.6 sind als Mean-Reversion Level $\bar{x} = 0,06$, $\bar{x} = c = 0,12$, $\bar{x} = c + rI = 0,32$ und $\bar{x} = 0,36$ verwendet worden. Hierbei ist insbesondere der Fall $\bar{x} = c + rI$ von Interesse, wo das Mean-Reversion Level den effektiven operativen Kosten entspricht. Analog zu Briest et al. (2022) kann das Verhältnis von $\bar{x} \stackrel{\leq}{\geq} c + rI$ auch hier im Sinne von Märkten interpretiert werden, die sich im langfristigen Wettbewerbsgleichgewicht oder Ungleichgewicht befinden. So können Märkte sehr hohen Wettbewerb $\bar{x} < c + rI$ und wenig Wettbewerb $\bar{x} > c + rI$ aufweisen.⁴⁴ Der intuitive Einfluss dieser Konstellationen lässt sich dabei auch aus dem Schwellenwert x_{KW} , der sich aus der einfachen Anwendung der Barwertmethode mit $V_{naiv}(x)$ aus Gl. 5.29 und Investitionsausgaben I über $V_{naiv}(x_{KW}) - I \stackrel{!}{=} 0$ ergibt

$$x_{KW} = \bar{x} - \left(\frac{\bar{x}}{r} - \frac{c + rI}{r} \right) (r + \eta), \quad (5.48)$$

ableiten. Immer wenn $\bar{x} < c + rI$ wird der zweite Term der rechten Seite von Gl. 5.48 negativ, sodass sich mit $r, \eta > 0$ in logischer Konsequenz x_{KW} erhöht. Diese höheren Anforderungen an die initiale Investition sind dabei einleuchtend, da durch erhöhte Preise zu Beginn, die zukünftig ökonomisch schlechte Ausgangslage mit $\bar{x} < c + rI$ ausgeglichen werden muss. Auf der anderen Seite wird der zweite Term mit $\bar{x} \geq c + rI$ positiv, sodass x_{KW} fällt und damit die finanziellen Anforderungen an das Projekt weniger strikt werden. Hier sind keine hohen Preise zu Beginn nötig und sogar Preise von Null denkbar, von denen ausgehend, sich die Investition zu Beginn lohnt.

Aus Abb. 5.6 und aus Briest et al. (2022) wird dabei deutlich, dass die Umkehrung des Zusammenhangs zwischen Investitionsneigung und Unsicherheit nur auftritt, wenn $\bar{x} < c + rI$. Es lässt sich demnach festhalten, dass der in der Literatur postulierte Zusam-

⁴³Gemittelte Stromgestehungskosten aus z. B. Kost et al. (2021, S. 28) könnten dafür genutzt werden.

⁴⁴Tatsächlich ist zu beachten, dass $c + rI$ projekt- bzw. anlagenspezifisch ist, während \bar{x} vom Markt vorgegeben wird. $\bar{x} < c + rI$ stellt auf Dauer eine schlechte ökonomische Situation dar. Es kann jedoch dennoch sinnvoll sein, ab einer bestimmten Höhe von x_t zu investieren, wenn der Überschuss zu Beginn in Erwartung die Nachteile in der langen Frist ausgleicht.

menhang zw. Investitionsneigung und Unsicherheit für $\bar{x} \geq c + rI$ weiterhin Gültigkeit besitzt, während sich der Zusammenhang für $\bar{x} < c + rI$ im Falle von Mean-Reversion Prozessen als Verlaufshypothese des Preises (für den reinen OU Prozess oder den exponentiellen OU Prozess aus Briest et al. (2022)) umkehren kann.

Aus Abb. 5.6 wird zudem deutlich, dass, auch wenn für $\bar{x} < c + rI$ eine höhere Unsicherheit für bestimmte σ zu einem fallenden x^* führt und damit den Zusammenhang zw. Investitionsneigung und Unsicherheit partiell umkehrt, generell im Anschluss daran für ausreichend große σ , x^* wieder ansteigt. Auch wird deutlich, dass alle Kurven für ein fixiertes η mit kleineren \bar{x} stets über den Kurven für größere \bar{x} liegen. Demnach, auch wenn sich der Zusammenhang zw. x^* und σ partiell umkehren kann, nimmt die Investitionsneigung generell ab, wenn \bar{x} sinkt. Analog dazu lässt sich der Effekt von c und I ableiten. Höhere c und I wirken sich demnach wie ein sinkendes \bar{x} aus und führen über steigende x^* zu einer Abnahme der Investitionsneigung.

5.4.3 Einfluss der Mean-Reversion Geschwindigkeit

Der zuvor in Unterabschnitten 5.4.1 und 5.4.2 beschriebene Einfluss von σ und \bar{x} wird durch den Einfluss von η komplettiert. Abb. 5.6 zeigt dabei zunächst anschaulich, dass für $\bar{x} < c + rI$ die Stärke der Ausprägung des u-förmigen Verlaufs von x^* deutlich von η abhängt. Je höher η , desto extremer der u-förmige Verlauf von x^* . Die Mean-Reversion Geschwindigkeit η moderiert dabei den Effekt von σ auf den Projektwert mit operativer Flexibilität $V(x; z_c)$ und auf den Optionswert $F(x; z^*)$. Während sich σ zunächst positiv auf die operationale Flexibilität im Projektwert und auf den Flexibilitätswert, mit der Investition zu warten, auswirkt, reduziert eine hohes η analog zu Briest et al. (2022) diesen positiven Effekt. Die hohe Schwankungsbreite durch hohe σ und damit die höhere Wahrscheinlichkeit von extremen Werten über einen (längeren) Zeitraum wird dabei mit großen η beschnitten. Ein hohes η erzeugt bei großen Abweichungen zw. Preisen x_t und \bar{x} ein verstärktes Moment in Richtung \bar{x} (siehe Gl. 5.14). Dadurch wird der positive Effekt von σ auf $V(x; z_c)$ und $F(x; x^*)$ teilweise aufgelöst bzw. gedämpft. Dabei wirkt sich der wertdämpfende Effekt für bestimmte σ deutlich stärker auf $F(x; x^*)$ als auf $V(x; z_c)$ aus. Dies ermöglicht eine stärkere Zunahme des Projektwerts mit σ im Vergleich zum Optionswert, sodass sich der Zusammenhang zw. x^* und σ partiell umkehren kann und damit ein u-förmiger Verlauf für x^* über σ bei ausreichend hohen η resultiert. Aus Abb. 5.6 wird darüber hinaus auch deutlich, dass für $\bar{x} \geq c + rI$ der wertdämpfende

Effekt von η weiterhin bestehen bleibt, sich jedoch eine eindeutige Reihung und Tendenz der Kurven einstellt. Für hohe η liegen die Kurven stets unter den Kurven für niedrigere η und x^* erhöht sich durchgängig mit zunehmender Unsicherheit. Demnach steigt die Investitionsneigung mit höheren η und sinkt mit höherer Unsicherheit. Die eindeutige Tendenz der Kurven legt dabei nahe, dass der Optionswert für $\bar{x} \geq c + rI$ stets stärker mit σ zunimmt als der Projektwert. Der eindeutigen Reihung hingegen liegt die bereits beschriebenen Dämpfung des Einflusses von σ zugrunde. In Kombination mit guten ökonomischen Projektaussichten $\bar{x} \geq c + rI$ ist es aus investitionsplanerischer Sicht demnach bei hohen η sinnvoller, das Projekt früher auszuführen, da der durch σ gespeiste Wert zu Warten, mit zunehmendem η geringer wird.⁴⁵

Zuletzt können die beiden zuvor isoliert beschriebenen Effekte für $\bar{x} < c + rI$ auch kombiniert betrachtet werden. Hier wird neben dem u-förmigen Verlauf von x^* zu Beginn insbesondere deutlich, dass die Kurven für ausreichend große σ die eindeutige Reihung und Tendenz anstreben und sich damit das gleiche Verhalten von x^* über σ wie für $\bar{x} \geq c + rI$ einstellt. Demnach leistet σ moderiert durch η einen Wertbeitrag, der ab einer bestimmten Höhe die Konstellation $\bar{x} < c + rI$ effektiv in eine Konstellation mit $\bar{x} \geq c + rI$ überführt. Dies erfolgt für hohe η erst bei höheren σ und entsprechend für niedrigere η „früher“ bei niedrigeren σ .

5.4.4 Einfluss der Diskontrate

Zuletzt soll der Einfluss der Diskontrate r auf die Investitionsneigung in Abb. 5.7 untersucht werden. Es wird deutlich, dass für eine Erhöhung in r sich die Kurven von x^* über σ nach oben verschieben. Damit verringert sich die Investitionsneigung mit höherer Diskontrate. Auf der anderen Seite bewirkt eine Verringerung der Diskontrate eine Reduktion des allgemeinen Schwellenwertniveaus über σ , sodass sich die Investitionsneigung erhöht. Die generelle Verlaufsstruktur, die zuvor in Unterabschnitten 5.4.1 bis 5.4.3 beschrieben wurde, bleibt dabei unverändert.

Der Effekt von r auf x^* lässt sich dabei auf positive und negative Diskontierungseffekte zurückführen. Zunächst verringert ein höheres r den Barwert der irreversiblen Investitionsausgaben I sowie den Barwert der operativen Kosten c , was sich positiv auf auf

⁴⁵Anders formuliert, sinkt der Flexibilitätswert drastisch mit hohen η , da bei sehr hoher Mean-Reversion kaum noch „effektive“ Unsicherheit über den Preis besteht. Für $\eta \rightarrow \infty$ wäre der Preis in den nächsten Momenten praktisch sicher.

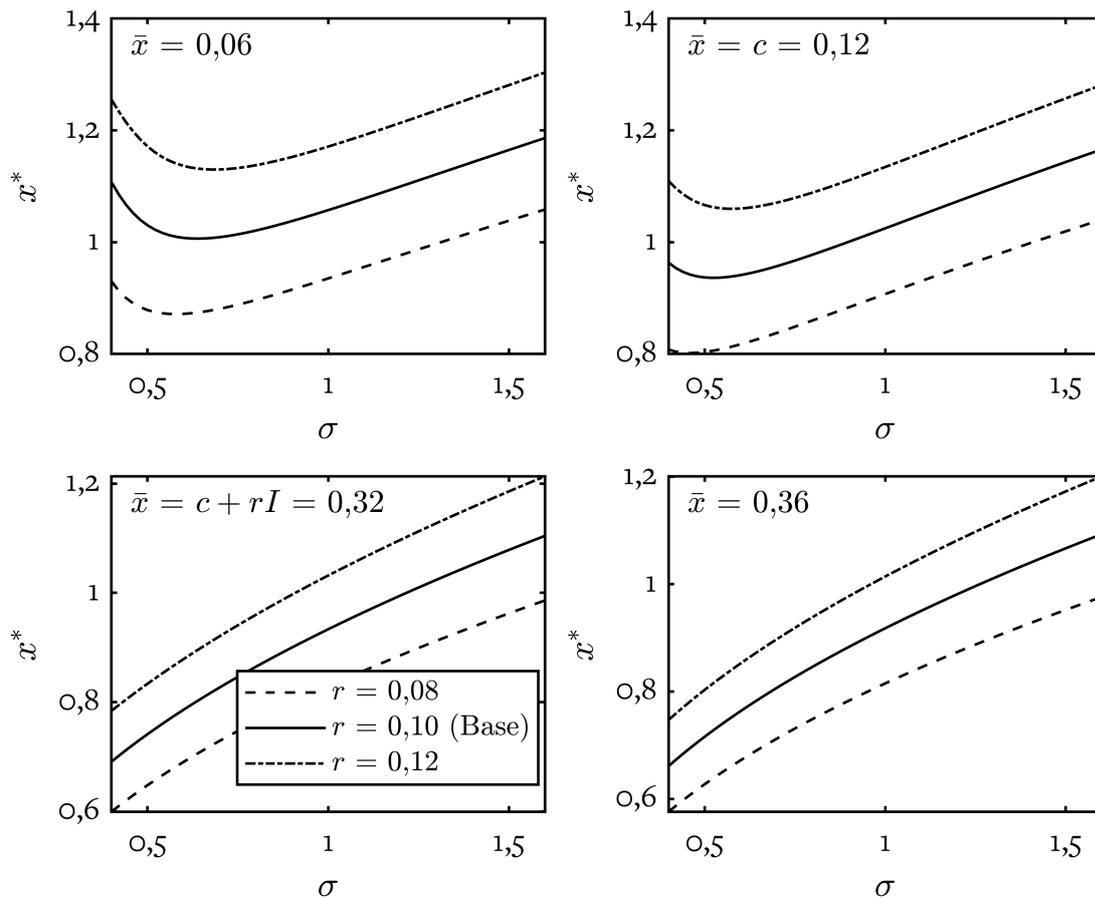


Abbildung 5.7: Darstellung des Einflusses der Diskontrate r auf den Investitionsschwellenwert x^* .

die Investitionsneigung auswirkt. Jedoch reduziert ein erhöhtes r ebenso den Barwert aller zukünftigen Einzahlungen aus dem Projekt bzw. der Anlage. Dieser Effekt wirkt sich negativ auf die Investitionsneigung aus. Schlussendlich überwiegt der negative Effekt den positiven Effekt, sodass sich netto ein negativer Effekt bei Erhöhung von r herauskristallisiert. Umgekehrt reduziert sich x^* bei einer Verringerung von r und damit steigt bei geringerer Diskontrate die Investitionsneigung. Analog dazu lässt sich unter Berücksichtigung der effektiven operativen Kosten $c + rI$ argumentieren. Je höher die Diskontierung, desto höher die effektiven operativen Kosten und damit geringer die Investitionsneigung. Wenn sich die effektiven operativen Kosten entsprechend über eine Verringerung von r verkleinern, steigt die Investitionsneigung, da das Projekt relativ zur höheren Diskontrate attraktiver wird.

5.5 Abschließende Bemerkung

Im Rahmen dieses Kapitels wurde gezeigt, wie der Realloptionsansatz, inspiriert am Infrastruktursegment Energie, eingesetzt werden kann, um Investitionsentscheidungen in Projekte mit operativer Flexibilität modelltheoretisch zu untersuchen. Da operative Flexibilität im Sinne von Flexibilitätsoptionen insb. für die zukünftige Aufrechterhaltung von Stromnetzen und damit Strommärkten von Bedeutung ist, wurden hier Möglichkeiten für den Einsatz von Realloptionsanalyse identifiziert. Im Anschluss wurde ein Modell entwickelt, das unter Berücksichtigung der Eigenschaft der Mean-Reversion von Rohstoffen, wie dem „speziellen“ Rohstoff Strom, die beschriebene Investitionsentscheidung abbildet.

Es wird zudem gezeigt, welchen Einfluss die Modellierung der Zustandsgröße auf die Investitionsentscheidung haben kann. Die Literatur zeigt bei herkömmlicher Modellierung über eine GBM im Falle einer Investition in ein Projekt mit operativer Flexibilität den häufig zu beobachtenden Effekt, dass höhere Unsicherheit den Investor zu einem Aufschieben der Investition veranlasst und damit die Investitionsneigung reduziert. Wie im Rahmen dieses Kapitels gezeigt, kann sich dieser Effekt bei der Modellierung der Zustandsgrößen über einen OU Prozess partiell drastisch umkehren. Demnach erweitert dieses Kapitel die Literatur um diese wichtige Erkenntnis.

Generell kann der gefundene Effekt, der zur partiellen Umkehrung des Zusammenhangs zw. Unsicherheit und Investitionsneigung führt, über dem OU Prozess immanente Parameter in Kombination mit der operativen Flexibilität im Projekt erläutert werden. Zunächst würde diese Umkehrung ausbleiben, wenn das Projekt keine operative Flexibilität hat, sodass sich im Fall der Investition in ein solches Projekt der etablierte Effekt aus der Literatur einstellt. Sobald jedoch operative Flexibilität vorliegt, integriert der Projektwert Realloptionskomponenten. Sein Wert steigt somit mit zunehmender Unsicherheit σ . In Kombination mit den weiteren Parametern des OU Prozesses, in Form des Mean-Reversion Level \bar{x} und der Mean-Reversion Geschwindigkeit η , ergibt sich die Umkehrung immer dann, wenn die effektiven operativen Kosten $c + rI$ größer als \bar{x} sind.⁴⁶ Hierbei muss die Mean-Reversion Geschwindigkeit ausreichend hoch sein, damit sich die Preise in Richtung dieses ökonomisch äußerst unvorteilhaften $\bar{x} < c + rI$ bewegen. Somit ist neben der generellen ökonomisch unvorteilhaften Gesamtlage $\bar{x} < c + rI$, in

⁴⁶Der Effekt tritt ebenso bei $c = 0$ ein. Hier wäre entsprechend $\bar{x} < rI$ ausreichend, um den Standardeffekt partiell umzukehren.

der sich das Projekt mit operativer Flexibilität befinden muss, auch ein hoher Druck η in Richtung dieser Lage nötig, damit die Umkehrung des Standardeffekts partiell eintritt. Das hier entwickelte Modell lässt sich im energiewirtschaftlichen Kontext am nächsten als Investitionsentscheidung in eine Biogasanlage mit einem flexiblen Strommarkt-betrieb interpretieren. Die Biogasanlage kann dabei als Flexibilitätsoption dienen, um die Stromnetzstabilität zu stärken. Festzuhalten ist jedoch, dass einige vereinfachte Annahmen getroffen wurden, welche kritisch zu hinterfragen sind. Insbesondere wenn der Preis als Strompreis interpretiert wird, erfasst die Modellierung charakteristische Komponenten wie Preisspitzen und Saisonalitäten nicht. Entsprechend ließe sich das Modell für eine höhere Realitätsnähe um diese Komponenten erweitern.⁴⁷ Zudem wird die Möglichkeit der Fremdfinanzierung nicht berücksichtigt, welche durchaus eine Rolle in der Untersuchung der Investitionsneigung spielen kann. Auch werden operative, technische, Limitierungen nicht berücksichtigt. Jedoch ließen sich auch diese zum Preis einer besseren Nachvollziehbarkeit integrieren.

⁴⁷Jedoch ermöglicht die bestehende Modellierung somit das „Herausfiltern“ des reinen Effekts der Mean-Reversion.

6 Schlussbetrachtung

Wirtschaftliche Infrastruktur ist von herausragender Bedeutung für den Wohlstand sowie für die technologische Entwicklung auf nationaler und globaler Ebene. Sie ist dabei häufig äußerst kapitalintensiv und erfordert für ihre Realisierung eine anspruchsvolle, vorgelagerte (Investitions-)Planung. Empirische Indizien in Bezug auf die eingesetzten Methoden zur Investitionsplanung stellen dabei regelmäßige Fehlplanungen heraus. So liefern Business Cases, Kosten-Nutzen-Analysen sowie Sozial- und Umweltverträglichkeitsprüfungen regelmäßig schlechte Planungsergebnisse. Entsprechend häufig sind Fehlplanungen mit immensen Kosten bzw. Mehrbelastungen und damit aus investitionsplanerischer Sicht mit suboptimalem Verhalten verbunden.

Als mögliche Ursache hierfür kann die Kombination von Eigenschaftsdimensionen von Infrastrukturinvestitionen aufgeführt werden. So zeichnen sich Infrastrukturinvestitionen insbesondere durch multiple Unsicherheitsfaktoren in Bezug auf die irreversiblen Investitionsausgaben, die Einnahmen und die Bauzeiten aus. Kombiniert mit Handlungsspielräumen der Investoren entsteht ein Flexibilitätswert, der praktisch mit herkömmlichen Methoden nicht erfasst werden kann. Solche Handlungsspielräume sind beispielsweise jene, mit der Investition zu warten und damit den Investitionszeitpunkt auf einen für den Investor möglichst günstigen, optimalen Zeitpunkt verschieben zu können. Auch Handlungsspielräume im Betrieb der Infrastruktur sind für die Bewertung essentiell und eine fehlende Berücksichtigung kann zu teils gravierenden Fehlbewertungen führen. So würde eine Kraftwerksbetreiberin Strom über ihre Energieinfrastruktur, d. h. ihr Kraftwerk, nur anbieten, solange der Erlös die effektiven operativen Kosten überschreitet. Entsprechend würde sie von ihrer operativen Flexibilität Gebrauch machen und für die Zeitspanne keinen Strom anbieten, in der die effektiven operativen Kosten die Erlöse überschreiten.

Die Realoptionsanalyse, als Bewertungstool in evolutorischer Linie zu den herkömmlich eingesetzten Bewertungsmethoden, kann als Methode herausgestellt werden, die

den identifizierten Eigenschaftsdimensionen von Infrastrukturinvestitionen gerecht werden kann und eine verbesserte Entscheidungsfindung erlaubt. Entsprechend viele Anwendungen der Methodik sind in der einschlägigen Realoptionsliteratur zu finden. Neben den ökonomischen und modelltheoretischen Grundlagen wird in der vorliegenden Arbeit das generelle Vermögen der Realoptionsmethode an zwei komplexen Entscheidungsmodellen aufgezeigt.

Im ersten Modell aus Kapitel 4 werden unsichere Einnahmen, unsichere Investitionsausgaben sowie unsichere Bauzeiten abgebildet. Zusätzlich werden die zeitliche Dispersion der Investitionsausgaben sowie staatliche Fördermechanismen in Form von Steuererleichterungen und direkten Subventionen integriert. Basierend auf dieser Modellstruktur bzw. den Eigenschaftsdimensionen wird die Investitionsentscheidung in eine derartige Infrastruktur für ein rationales Unternehmen untersucht. Insbesondere wird deutlich, dass die Vernachlässigung der herausgearbeiteten Eigenschaftsdimension sich deutlich auf das Investitionsverhalten des Unternehmens auswirkt. Entsprechend wichtig ist diesen Eigenschaftsdimensionen mittels Realoptionsmethode gerecht zu werden.

Im Ergebnis der Modellierung lassen sich folgende zentrale Erkenntnisse ableiten: Zunächst wirkt sich die erwartete Bauzeit in Kombination mit der zeitlichen Dispersion der Investitionsausgaben erheblich auf die Investitionsneigung aus. So schwindet die Investitionsneigung mit zunehmender Bauzeit, wenn Infrastrukturprojekte hohe vorgelagerte Investitionsausgaben (hohe Investitionen zu Beginn) aufweisen. Für den Fall der stark nachgelagerten Ausgaben (hohe Investitionen zum Ende hin) steigt hingegen die Investitionsneigung mit steigender erwarteter Bauzeit. Eine sowohl steigende als auch fallende Investitionsneigung ist bei zeitlich eher gleichmäßig verteilten Investitionsausgaben mit steigender erwarteter Bauzeit festzustellen. Zudem lässt sich generell festhalten, dass der in der Literatur postulierte negative Zusammenhang zwischen Investitionsneigung und Unsicherheit bestätigt werden kann. Entsprechend sinkt die Investitionsneigung in Infrastrukturprojekte zu investieren, wenn die Unsicherheit über Einnahmen und Ausgaben steigt, teils stark. Zuletzt kann die Erkenntnis aus der Literatur bestätigt werden, dass, um mehr Investitionen in Infrastruktur zu stimulieren, Subventionen als Anreizmechanismus, die Steuererleichterungen als Anreiz dominieren. Dieses Ergebnis besteht trotz der unsicheren Bauzeit, deren Einfluss in diesem Zusammenhang noch nicht in der Literatur untersucht worden ist. Entsprechend sollten staatliche Anreize insbesondere auf direkte Subventionen der Investitionsausgaben

abzielen.

Im zweiten Modell aus Kapitel 5 wird im Vergleich zu Kapitel 4 der Fokus weniger auf die allgemeinen Eigenschaftsdimensionen von Infrastruktur gelegt, sondern vielmehr auf die Berücksichtigung von operativer Flexibilität als bedeutender Wertbestandteil des Infrastrukturprojektwerts. Eine solche operative Flexibilität ist insbesondere in energiewirtschaftlichen Infrastrukturprojekten anzutreffen. Motiviert durch immanente operative Flexibilität in Flexibilitätsoptionen, wie z. B. von Biogasanlagen, zur Sicherung eines stabilen, versorgungssicheren Betriebs des Stromnetzes, wird ein Entscheidungsmodell entwickelt. Hierbei wird der hochvolatile Strompreis als Werttreiber durch einen reinen OU Prozess approximiert. Eine solche Modellierung ist in der einschlägigen Realloptionsliteratur noch nicht erfolgt. Entsprechend erweitert das entwickelte Modell nicht nur Realloptionsliteratur aus dem Segment Energie sondern auch abstraktere Realloptionsmodelle, die sich mit Investitionen in Projekte mit operativer Flexibilität auseinandersetzen.

Folgende wichtige Erkenntnisse können hieraus festgehalten werden: Es kann festgestellt werden, dass sich der Zusammenhang von Investitionsneigung und Unsicherheit teils umkehrt. Dieser Effekt rührt dabei aus der Zustandsgröße in Form des OU Prozesses in Kombination mit der operativen Projektflexibilität bzw. dem Optionswert im Projektwert her. Ausschlaggebend sind die effektiven operativen Kosten im Vergleich zum Mean-Reversion Level. Ist das Mean-Reversion Level höher als die effektiven operativen Kosten, kann zunächst der in der Literatur als negativ postulierte Effekt von Investitionsneigung und Unsicherheit bestätigt werden. Ist hingegen das Mean-Reversion Level kleiner als die effektiven operativen Kosten, so stellt sich für bestimmte Größenordnungen von Unsicherheit ein positiver Zusammenhang ein. Entsprechend nimmt die Investitionsneigung mit steigender Unsicherheit zu. Dieser Effekt wird durch die Mean-Reversion Geschwindigkeit moderiert und ist besonders ausgeprägt, wenn die Mean-Reversion Geschwindigkeit hoch ist. Der hier beschriebene Effekt ist dabei neu und stellt damit eine wichtige Erweiterung der Literatur dar. Ebenfalls wird die Bedeutung der operativen Flexibilität deutlich, ohne diese sich der Effekt nicht einstellt.

Abschließend lässt sich festhalten, dass die beiden Modelle sowie die in ihnen untersuchten Investitionsentscheidungssituationen, als Kern dieser Arbeit, die einschlägige Realloptionsliteratur um wichtige Aspekte erweitern und jeweils eine neue Grundlage für Modellerweiterungen oder aber auch für den „Zuschnitt“ auf konkrete Probleme

aus der Praxis bilden können. Ganz nach dem Motto: „Was gestern als gut galt, kann heute verbessert werden; worauf wir heute stolz sind, mag morgen überholt sein.“ Hamburger Kunsthalle „Transparentes Museum“ am 22. August 2021, konnte gezeigt werden, dass trotz einer mehr als drei Dekaden reichenden Entwicklung von Realoptionsliteratur immer noch neue und damit unerforschte – zu mindestens zu einem kleinen Teil durch diese Arbeit nun erforschte – Aspekte in der Investitionsrechnung existieren. Entsprechend ist zu erwarten, dass durch die zunehmend verbesserten Methoden zur Investitionsplanung, insbesondere durch die Realoptionsmethode, sich zukünftig die in der Praxis getroffenen Investitionsentscheidungen weiter verbessern und Fehlplanungen mehr und mehr zur Ausnahme werden.

A Anhang zu Kapitel 3

A.1 Varianz des Wiener Inkrements

Zunächst lässt sich der Erwartungswert einer standardnormalverteilten Zufallszahl $\mathbb{E}[\epsilon_t] = 0$ festhalten. Ihre Varianz $\text{Var}[\epsilon_t]$ bestimmt sich allgemein nach

$$\begin{aligned}\text{Var}[\epsilon_t] &= \mathbb{E} \left[(\epsilon_t - \mathbb{E}[\epsilon_t])^2 \right] \\ &= \mathbb{E} \left[\epsilon_t^2 \right] - 2\mathbb{E}[\epsilon_t]\mathbb{E}[\epsilon_t] + (\mathbb{E}[\epsilon_t])^2 \\ &= \mathbb{E} \left[\epsilon_t^2 \right] - (\mathbb{E}[\epsilon_t])^2.\end{aligned}\tag{A.1}$$

Hier beschreibt Gl. A.1 den Verschiebungssatz, der sich aus der Anwendung des Erwartungswertoperators ergibt. Da $\text{Var}[\epsilon_t] = 1$ per Definition, muss $\mathbb{E}[\epsilon_t^2] = 1$, da $\mathbb{E}[\epsilon_t] = 0$. Analog zu ϵ_t kann für das Wiener Inkrement $dW_t = \epsilon_t\sqrt{dt}$ vorgegangen werden

$$\begin{aligned}\text{Var}[dW_t] &= \mathbb{E} \left[(dW_t)^2 \right] - (\mathbb{E}[dW_t])^2 \\ &= \mathbb{E} \left[(dW_t)^2 \right] \\ &= \mathbb{E} \left[\epsilon_t^2 \right] dt \\ &= dt.\end{aligned}\tag{A.2}$$

A.2 Korrelation zwischen Wiener Inkrementen

Die Korrelation zwischen zwei Zufallsgrößen X und Y ist definiert als

$$\rho_{XY} = \frac{\mathbb{E}[(X - \mathbb{E}[X])(Y - \mathbb{E}[Y])]}{\sqrt{\text{Var}(X)}\sqrt{\text{Var}(Y)}} = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sigma_X\sigma_Y}. \quad (\text{A.3})$$

Im Folgenden soll die Korrelation zwischen zwei Wiener Inkrementen

$$dW_1 = \epsilon_1 \sqrt{dt} \quad (\text{A.4})$$

$$dW_2 = \epsilon_2 \sqrt{dt} \quad (\text{A.5})$$

betrachtet werden. Dazu wird zunächst die Kovarianz gebildet

$$\begin{aligned} \text{Cov}[dW_1 dW_2] &= \mathbb{E}[(dW_1 - \mathbb{E}[dW_1])(dW_2 - \mathbb{E}[dW_2])] \\ &= \mathbb{E}[dW_1 dW_2] - \mathbb{E}[\mathbb{E}[dW_1] dW_2] - \mathbb{E}[\mathbb{E}[dW_2] dW_1] + \mathbb{E}[dW_1] \mathbb{E}[dW_2] \\ &= \mathbb{E}[dW_1 dW_2]. \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

Anschließend lässt sich die Korrelation ableiten

$$\begin{aligned} \rho_{dW_1 dW_2} &= \frac{\mathbb{E}[dW_1 dW_2]}{\sqrt{dt}\sqrt{dt}} \\ \Leftrightarrow \mathbb{E}[dW_1 dW_2] &= \rho_{dW_1 dW_2} dt. \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

A.3 Erwartungswert der geometrisch Brownschen Bewegung

Der Erwartungswert $\mathbb{E}_x[x(t)]$ mit Initialzustand $x = x_0$ einer stochastischen Größe $x(t)$, die einer GBM der Form

$$dx(t) = \alpha x(t) dt + \sigma x dW(t) \quad (\text{A.8})$$

folgt, muss wegen $\mathbb{E}[dx(t)] = \alpha x(t) dt$ folgende homogene Dgl. erster Ordnung lösen:

$$x'(t) - \alpha x(t) = 0. \quad (\text{A.9})$$

Unter Einsatz der Ansatzfunktion $x = Ce^{\alpha t}$ ergibt sich

$$\begin{aligned}\alpha Ce^{\alpha t} - \alpha Ce^{\alpha t} &= 0 \\ \Leftrightarrow 0 &= 0.\end{aligned}\tag{A.10}$$

C kann hierbei beliebige Werte annehmen. Ausgehend vom Initialzustand lässt sich jedoch die Anfangsbedingung $x(0) = x$ definieren, sodass sich aus der Ansatzfunktion

$$x(0) = C = x\tag{A.11}$$

ergibt. Entsprechend ergibt sich der Erwartungswert mit

$$\mathbb{E}_x[x(t)] = xe^{\alpha t}.\tag{A.12}$$

A.4 Erwartungswert Ornstein-Uhlenbeck Prozess

Für die Ermittlung des Erwartungswerts wird mit der bekannten stochastischen Differentialgleichung für den OU Prozess

$$dx(t) = \eta(\bar{x} - x(t))dt + \sigma dW(t)\tag{A.13}$$

gestartet. Da durch Erwartungswertbildung der letzte Term wegen $\mathbb{E}[dW(t)] = 0$ wegfällt, muss der gesuchte Erwartungswert $\mathbb{E}_x[x(t)]$, wobei $x_0 = x$ den Zustand in $t = 0$ darstellt, der alle nötigen Informationen enthält (Markov-Eigenschaft), Lösung der folgenden inhomogenen Dgl. erster Ordnung mit konstanten Koeffizienten sein

$$x'(t) + \eta x(t) = \eta \bar{x}.\tag{A.14}$$

Für die Lösung kommt eine Ansatzfunktion der Struktur $x = x_h + x_p$ mit $x_h = Ce^{-\eta t}$ sowie $x_p = c_0$ mit C und c_0 als Konstanten zum Einsatz. Durch Einsetzen der homogenen Lösung ergibt sich

$$\begin{aligned}-\eta Ce^{-\eta t} + \eta Ce^{-\eta t} &= 0 \\ \Leftrightarrow 0 &= 0.\end{aligned}\tag{A.15}$$

Einsetzen von x_p gibt

$$\begin{aligned}\eta c_0 &= \eta \bar{x} \\ \Leftrightarrow c_0 &= \bar{x}.\end{aligned}$$

Aus Gl. A.15 wird deutlich, dass C beliebige Werte annehmen kann. Durch $x(0) = x$ in der Erwartungswertbildung muss

$$\begin{aligned}x(0) &= C + \bar{x} \\ \Leftrightarrow C &= x - \bar{x}.\end{aligned}\tag{A.16}$$

Schlussendlich kann der Erwartungswert über

$$\mathbb{E}_x[x(t)] = (x - \bar{x})e^{-\eta t} + \bar{x}\tag{A.17}$$

angegeben werden.

B Anhang zu Kapitel 4

B.1 Stochastische Entwicklung der versunkenen Investitionsausgaben

Ausgehend von der Kopplung $I = k\hat{I}$, wobei k der GBM aus Gl. 4.29 folgt und \hat{I} konstant ist, liefert die Anwendung von Itô's-Lemma

$$\begin{aligned}
 dI &= \underbrace{\frac{\partial I}{\partial \hat{I}} d\hat{I}}_{=0} + \underbrace{\frac{\partial I}{\partial k} dk}_{\hat{I}dk} + \frac{1}{2} \underbrace{\frac{\partial^2 I}{\partial k^2} (dk)^2}_{=0} \\
 &= \alpha_k k \hat{I} dt + \sigma_k k \hat{I} dW_k \\
 &= \alpha_k I dt + \sigma_k I dW_k \\
 &= \alpha_I I dt + \sigma_I I dW_I,
 \end{aligned} \tag{B.1}$$

wobei $\alpha_I = \alpha_k$, $\sigma_I = \sigma_k$ und $dW_I = dW_k$.

B.2 Entwicklung des Projektwerts

Analog zu Sarkar & Zhang (2015) kann Gl. 4.31 unter Einsatz der expliziten Lösung zur stochastischen Dgl. 4.30 mit

$$x_t = x e^{(\alpha_x - \frac{\sigma_x^2}{2})t + \sigma_x W_{t,x}} \tag{B.2}$$

interpretiert werden. Hierbei ist $x = x_0$ der aktuelle Zustand des Erlösprozesses, der alle nötigen Informationen für die Erwartungswertbildung $\mathbb{E}_x[\cdot]$ in Gl. 4.31 enthält. Wird

der Erwartungswert gebildet, ergibt sich aus B.2

$$\mathbb{E}_x[x_t] = xe^{\alpha_x t} \mathbb{E} \left[e^{\sigma_x W_{t,x} - \frac{\sigma_x^2}{2} t} \right]. \quad (\text{B.3})$$

Da $e^{\sigma_x W_{t,x} - \frac{\sigma_x^2}{2} t}$ ein Martingal darstellt, ist der beste „Schätzer“ für seinen zukünftigen Wert bzw. seinen Erwartungswert durch den aktuellen Wert gegeben, sodass

$$\mathbb{E} \left[e^{\sigma_x W_{t,x} - \frac{\sigma_x^2}{2} t} \right] = e^{\overbrace{\sigma_x W_{0,x} - \frac{\sigma_x^2}{2} 0}^{=0}} = e^0 = 1. \quad (\text{B.4})$$

Für den Projektwert ergibt sich schließlich für $r > \alpha_x$

$$\begin{aligned} V_2(x) &= \mathbb{E}_x \left[\int_0^\infty (1 - \tau) x_t e^{-rt} dt \right] \\ &= (1 - \tau) x \int_0^\infty e^{-(r - \alpha_x)t} dt \\ &= (1 - \tau) \frac{x}{r - \alpha_x} \end{aligned} \quad (\text{B.5})$$

B.3 Entwicklung der partiellen Differentialgleichung für die Investitionsoption

Ausgangspunkt bildet die Bellman Gleichung

$$\mathbb{E}[dF(x, I)] = rF(x, I)dt. \quad (\text{B.6})$$

Zum Expandieren der linken Seite der Gleichung muss Itô's Lemma angewandt werden

$$dF(x, I) = F_x dx + F_I dI + \frac{1}{2} F_{xx} (dx)^2 + \frac{1}{2} F_{II} (dI)^2 + F_{xI} (dx dI). \quad (\text{B.7})$$

Aufgrund der Linearitätseigenschaft des Erwartungswertoperators $\mathbb{E}[\cdot]$, kann dieser auf jeden Term einzeln angewendet werden:

$$\mathbb{E}[F_x dx] = F_x \mathbb{E}[dx] = \alpha_x x F_x dt,$$

$$\begin{aligned}
\mathbb{E}[F_I dI] &= \alpha_I I F_I dt, \\
\mathbb{E}\left[\frac{1}{2} F_{xx} (dx)^2\right] &= \frac{1}{2} \sigma_x^2 x^2 F_{xx} dt, \\
\mathbb{E}\left[\frac{1}{2} F_{II} (dI)^2\right] &= \frac{1}{2} \sigma_I^2 I^2 F_{II} dt, \\
\mathbb{E}[F_{xI} (dx dI)] &= \sigma_x \sigma_I \rho_{xI} x I F_{xI} dt = \sigma_{xI} x I F_{xI} dt,
\end{aligned}$$

sodass $\mathbb{E}[dF(x, I)]$

$$\mathbb{E}[dF(x, I)] = \left(\frac{1}{2} \sigma_x^2 x^2 F_{xx} + \frac{1}{2} \sigma_I^2 I^2 F_{II} + \sigma_{xI} x I F_{xI} + \alpha_x x F_x + \alpha_I I F_I \right) dt. \quad (\text{B.8})$$

Eingesetzt in die Bellman Gleichung ergibt sich die partielle Dgl. mit Ableitungen nach beiden Zustandsvariablen x und I

$$\frac{1}{2} \sigma_x^2 x^2 F_{xx} + \frac{1}{2} \sigma_I^2 I^2 F_{II} + \sigma_{xI} x I F_{xI} + \alpha_x x F_x + \alpha_I I F_I - rF = 0 \quad (\text{B.9})$$

mit Kovarianz $\sigma_{xI} = \rho_{xI} \sigma_x \sigma_I$.

B.4 Homogenität des Entscheidungsproblems

Das betrachtete Problem kann auf die Abhängigkeit von einer Zustandsvariablen reduziert und so die Anwendung eines numerischen Verfahrens vermieden werden.¹ In den folgenden Ausführungen wird dem Anhang von McDonald & Siegel (1986) sowie den Ausführungen von Dixit & Pindyck (1994, S. 207 ff.) gefolgt.

Wie in Abschnitt 4.3 angenommen, folgen sowohl die Einnahmen als auch die Investitionsausgaben einer GBM. Der Wert der Investitionsmöglichkeit, der Option to Invest, ist demnach abhängig von x und I . Die Option würde aufrecht erhalten werden, wenn x niedrig und I hoch ist. Ausgeübt würde die Option, wenn x ausreichend hoch ist, sodass der Projekt V ausreichend höher als I ist. Daraus ergeben sich intuitiv zwei Bereiche,

¹Für bestimmte Fälle ist die Reduktion möglich. Anhand ihrer Diskriminante $d = (\frac{1}{2} \sigma_x^2 x^2)(\frac{1}{2} \sigma_I^2 I^2) - (\frac{1}{2} \sigma_x \sigma_I \rho_{xI} x I)^2 > 0$ für $\rho_{xI} < 1$ lässt sich die partielle Dgl. B.9 als elliptisch einordnen. Für diese muss ein Free Boundary Problem gelöst werden. Es ist zu beachten, dass die Einordnung der partiellen Dgl. eine lokale Eigenschaft ist.

die durch einen Übergang, die Free Boundary, voneinander getrennt sein sollten. Der Gedanke lässt sich in Abbildung B.1 visualisieren.

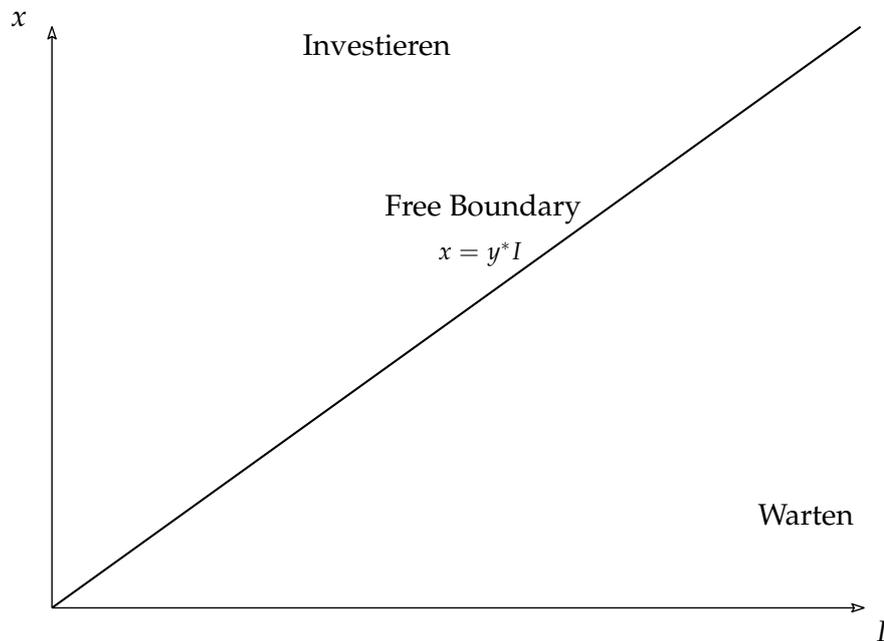


Abbildung B.1: Investition mit unsicheren Einnahmen und Investitionsausgaben nach Dixit & Pindyck (1994, S. 208).

Erklären lässt sich der Gedanke, wenn neben den Prozessen aus den Gleichungen 4.29 und 4.30 zwei weitere Prozesse $I' = uI$ und $x' = ux$ betrachtet werden, die ebenfalls einer GBM folgen sollen. Es wird deutlich, dass, wenn zum Beispiel $u = 2$ gewählt wird, die Erlöse x' doppelt so hoch wie x und die Investitionsausgaben I' doppelt so hoch wie I sind. In Bezug auf das Optimierungsproblem sind die beiden Vergleichsprozesse jedoch genauso zu bewerten, wie die ursprünglichen Prozesse. Das Optimierungsproblem ändert sich nicht und ist deshalb unabhängig von u . Ausschlaggebend ist nur das Verhältnis von $y = \frac{x}{I}$. Dieses ist für alle $u \neq 0$ gleich. Demnach lässt sich das Problem auf eine Dimension reduzieren und die Free Boundary sollte als Gerade durch den Ursprung verlaufen. Dementsprechend ist $F(x, I)$ homogen vom Grad Eins in x und I und lässt sich als

$$F(x, I) = If\left(\frac{x}{I}\right) = If(y) \quad (\text{B.10})$$

schreiben. Ausgehend hiervon, müssen die Ableitungen nach x und I in der partiellen

Dgl. B.9 durch Ableitungen nach y ersetzt werden.

$$\begin{aligned}
 F_x(x, I) &= \frac{\partial}{\partial x} \left(I f \left(\frac{x}{I} \right) \right) \\
 &= \frac{\partial I}{\partial x} f \left(\frac{x}{I} \right) + \frac{\partial f \left(\frac{x}{I} \right)}{\partial x} I \text{ (Produktregel)} \\
 &= \frac{\partial f \left(\frac{x}{I} \right)}{\partial \left(\frac{x}{I} \right)} \frac{\partial \left(\frac{x}{I} \right)}{\partial x} I \text{ (Kettenregel)} \\
 &= \frac{\partial f(y)}{\partial y} \frac{1}{I} I \\
 &= f_y(y)
 \end{aligned} \tag{B.11}$$

$$\begin{aligned}
 F_I(x, I) &= \frac{\partial I}{\partial I} f(y) + \frac{\partial f(y)}{\partial I} I \\
 &= f(y) + \frac{\partial f(y)}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial I} I \\
 &= f(y) + \left(-\frac{x}{I^2} I \frac{\partial f(y)}{\partial y} \right) \\
 &= f(y) - y f_y(y)
 \end{aligned} \tag{B.12}$$

$$\begin{aligned}
 F_{xx}(x, I) &= \frac{\partial f_y(y)}{\partial x} \\
 &= \frac{\partial f_y(y)}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial x} \\
 &= \frac{1}{I} f_{yy}(y)
 \end{aligned} \tag{B.13}$$

$$\begin{aligned}
 F_{II}(x, I) &= \frac{\partial}{\partial I} (f(y) - y f_y(y)) \\
 &= \frac{\partial f(y)}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial I} - \frac{\partial y f_y(y)}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial I} \text{ (Summen- und Kettenregel)} \\
 &= f_y(y) \frac{\partial y}{\partial I} - \left(y \frac{\partial f_y(y)}{\partial y} + f_y(y) \frac{\partial y}{\partial y} \right) \frac{\partial y}{\partial I} \\
 &= \frac{y^2}{I} f_{yy}(y)
 \end{aligned} \tag{B.14}$$

$$\begin{aligned}
 F_{xI}(x, I) &= \frac{\partial f_y(y)}{\partial I} \\
 &= \frac{\partial f_y(y)}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial I}
 \end{aligned}$$

$$= -\frac{y}{I} f_{yy}(y). \quad (\text{B.15})$$

Nach einsetzen in Dgl. B.9 ergibt sich die gewöhnliche Dgl.

$$\sigma^2 y^2 f'' + (\alpha_x - \alpha_I) y f' + (r - \alpha_I) f = 0, \quad (\text{B.16})$$

wobei $\sigma^2 = \frac{1}{2}\sigma_x^2 + \frac{1}{2}\sigma_I^2 - \rho_{xI}\sigma_x\sigma_I$.

B.5 Entwicklung der erwarteten Realisationszeit

Die erwartete Realisationszeit t_m ist als Zeit zwischen den Punkten y^* und my^* mit $m > 1$ definiert, die der Prozess $y_t = x_t/I_t$ in Erwartung zurücklegt. Demnach ist zunächst der Prozess y_t nötig, der sich als Quotient der GBMs von x_t und I_t ergibt. Die Anwendung von Itô's Lemma auf den Quotienten y_t ergibt zunächst

$$\begin{aligned} dy_t &= y_x dx_t + y_I dI_t + \frac{1}{2} y_{xx} (dx_t)^2 + \frac{1}{2} y_{II} (dI_t)^2 + y_{xI} (dx_t dI_t) \\ &= \frac{1}{I} dx_t - \frac{x}{I^2} dI_t + \frac{x}{I^3} (dI_t)^2 - \frac{1}{I^2} (dx_t dI_t) \\ &= (\alpha_x - \alpha_I + \sigma_I^2 - \rho_{xI}\sigma_x\sigma_I) y_t dt + \sigma_x y_t dW_{t,x} - \sigma_I y_t dW_{t,I} \end{aligned} \quad (\text{B.17})$$

Nun lässt sich ein generelles Argument über die Korrelation zwischen zwei GBMs, das in Shreve (2004, S. 171 ff.) zu finden ist, nutzen. So lassen sich folgende Definitionen einführen:

$$W_I = \rho_{Ix} W_x + \sqrt{1 - \rho_{Ix}^2} W \quad (\text{B.18})$$

$$W_x = \rho_{xI} W_I + \sqrt{1 - \rho_{xI}^2} W, \quad (\text{B.19})$$

wobei $\rho_{Ix} = \rho_{xI}$ die Korrelationskoeffizienten darstellen. Entsprechend lässt der jeweilige Wiener-Prozess als Kombination aus dem jeweils anderen Wiener-Prozess und einem vollkommen unabhängigen dritten Wiener-Prozess W darstellen. Da annahm gemäß $\rho_{Ix} = 0$, gilt $W_I = W$ sowie $W_x = W$, sodass sich in Gl. B.17 insbesondere $\sigma_x y_t dW_{t,x} - \sigma_I y_t dW_{t,I}$ auf $y_t(\sigma_x - \sigma_I) dW_t$ reduziert. Entsprechend lassen sich Gl. B.17

umformulieren

$$dy_t = (\alpha_x - \alpha_I + \sigma_I^2)y_t dt + (\sigma_x - \sigma_I)y_t dW_t \quad (\text{B.20})$$

und die effektive Driftrate $\alpha' = \alpha_x - \alpha_I + \sigma_I^2$ sowie die effektive Volatilität $\sigma' = \sigma_x - \sigma_I$ einführen. Anschließend wird Wilmott et al. (1993, S. 370 ff.) gefolgt, wo für die GBM die erwartete Passierzeit von einem Startwert bis zu einer höher liegenden Grenze mit

$$t_m = \frac{1}{\frac{1}{2}\sigma'^2 - \alpha'} \ln \left(\frac{y_0}{y_1} \right) \quad (\text{B.21})$$

hergeleitet wird. Umstellen ergibt

$$t_m = \frac{1}{\alpha - \frac{1}{2}\sigma^2} \ln \left(\frac{y_1}{y_0} \right), \quad (\text{B.22})$$

wobei $y_1 > y_0$, sodass $\alpha > \frac{1}{2}\sigma^2$ damit eine endliche erwartete Passierzeit zwischen y_1 und y_0 existiert. Mit $\alpha = \alpha'$ und $\sigma = \sigma'$ ergibt sich für die erwartete Realisationszeit zwischen my^* und y^* demnach

$$t_m = \frac{\ln m}{\alpha_x - \alpha_I + \sigma_x \sigma_I - \frac{1}{2}(\sigma_x^2 - \sigma_I^2)}. \quad (\text{B.23})$$

C Anhang zu Kapitel 5

C.1 Anwendung von Itô's-Lemma für den Ornstein-Uhlenbeck Prozess

Ausgangspunkt bildet die Bellman Gleichung

$$\mathbb{E}[dV(x)] = rV(x)dt - (x - c)dt. \quad (\text{C.1})$$

Zum expandieren der linken Seite der Gleichung wird Itô's Lemma angewandt

$$dV(x) = V'(x)dx + \frac{1}{2}V''(x)(dx)^2. \quad (\text{C.2})$$

Erwartungswertbildung führt zu

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[V'(x)dx] &= V'(x)\mathbb{E}[dx] = \eta(\bar{x} - x)V'(x)dt, \\ \mathbb{E}\left[\frac{1}{2}V''(x)(dx)^2\right] &= \frac{1}{2}\sigma^2V''(x)dt, \end{aligned} \quad (\text{C.3})$$

sodass $V(x)$ die Dgl.

$$\frac{1}{2}\sigma^2V''(x) + \eta(\bar{x} - x)V'(x) - rV(x) = -(x - c) \quad (\text{C.4})$$

erfüllen muss.

C.2 Transformation zu inhomogener Weber-Gleichung

Ausgehend von der inhomogenen Dgl.

$$\frac{1}{2}\sigma^2 V''(x) + \eta(\bar{x} - x)V'(x) - rV(x) = -(x - c) \quad (\text{C.5})$$

wird nachfolgend die Transformation zur Weber Gleichung gezeigt. Analog kann die Transformation für die homogene Variante erfolgen. Zunächst wird $z = \frac{x-\bar{x}}{\bar{\sigma}}$ mit $\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{2\eta}}$ definiert und die Ansatzfunktion $V(x) = e^{z^2/4}f(z)$ gesetzt. Anschließend können die partiellen Ableitungen erfolgen

$$\frac{\partial(\cdot)}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial(\cdot)}{\partial z} \frac{1}{\bar{\sigma}} \quad (\text{C.6})$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial(\cdot)}{\partial z} \frac{1}{\bar{\sigma}} \right) \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial^2(\cdot)}{\partial z^2} \frac{1}{\bar{\sigma}^2}. \quad (\text{C.7})$$

Nun können weitere Rechenschritte erfolgen und die partiellen Ableitungen in Gl. C.5 integriert werden

$$\begin{aligned} & \underbrace{\frac{\sigma^2}{2\eta}}_{\bar{\sigma}^2} V''(x) + \underbrace{(\bar{x} - x)}_{-\bar{\sigma}z} V'(x) - \frac{r}{\eta} V(x) = - \underbrace{\frac{x - c}{\eta}}_{\frac{z\bar{\sigma} + \bar{x} - c}{\eta}} \\ \Leftrightarrow & \underbrace{\left(e^{\frac{z^2}{4}} f(z) \right)''}_{e^{\frac{z^2}{4}} \left(\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4}z^2 \right) f(z) + zf'(z) + f''(z) \right)} - \underbrace{z \left(e^{\frac{z^2}{4}} f(z) \right)'}_{e^{\frac{z^2}{4}} \left(\frac{1}{2}z^2 f(z) + zf'(z) \right)} - \frac{r}{\eta} e^{\frac{z^2}{4}} f(z) = - \frac{z\bar{\sigma} + \bar{x} - c}{\eta} \\ & \Leftrightarrow e^{\frac{z^2}{4}} \left(\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{4}z^2 - \frac{r}{\eta} \right) f(z) + f''(z) \right) = - \frac{z\bar{\sigma} + \bar{x} - c}{\eta} \\ & \Leftrightarrow f''(z) + \left(-\frac{1}{4}z^2 - \frac{r}{\eta} + \frac{1}{2} \right) f(z) = -e^{-\frac{z^2}{4}} \frac{z\bar{\sigma} + \bar{x} - c}{\eta}. \end{aligned} \quad (\text{C.8})$$

Die Beschreibung der homogenen Lösung zu C.8 wird bereits in Unterabschnitt 5.3.1 ausführlich behandelt und soll hier nicht noch einmal aufgeführt werden. An dieser Stelle wird lediglich die partikuläre Lösung zur inhomogenen Weber Gleichung C.8 ermittelt.

Für die partikuläre Lösung $f_p(z)$ wird über den Ansatz vom Typ der rechten Seite

$$\begin{aligned} f_p(z) &= aze^{-\frac{z^2}{4}} + be^{-\frac{z^2}{4}} \\ &= e^{-\frac{z^2}{4}}(az + b) \end{aligned} \quad (\text{C.9})$$

gesetzt. Mit Ableitungen

$$\left(f_p(z)\right)' = -\frac{1}{2}ze^{-\frac{z^2}{4}}(az + b) + ae^{-\frac{z^2}{4}} \quad (\text{C.10})$$

$$\left(f_p(z)\right)'' = \left(\frac{z^2}{4} - \frac{1}{2}\right)e^{-\frac{z^2}{4}}(az + b) - aze^{-\frac{z^2}{4}}. \quad (\text{C.11})$$

Einsetzen der zweiten Ableitung in Gl. C.8 ergibt

$$\left(-\left(\frac{r}{\eta} + 1\right)az - \frac{r}{\eta}b\right)e^{-\frac{z^2}{4}} = \left(-\frac{\bar{\sigma}}{\eta}z + \frac{\bar{x} - c}{\eta}\right)e^{-\frac{z^2}{4}}. \quad (\text{C.12})$$

Aus anschließendem Koeffizientenvergleich ergibt sich schließlich für a und b

$$a = \frac{\bar{\sigma}}{r + \eta} \quad (\text{C.13})$$

$$b = \frac{\bar{x} - c}{r}. \quad (\text{C.14})$$

Abschließend lässt sich die partikuläre Lösung

$$f_p(z) = \left(\frac{\bar{\sigma}z}{r + \eta} + \frac{\bar{x} - c}{r}\right)e^{-\frac{z^2}{4}} \quad (\text{C.15})$$

angeben.

Literaturverzeichnis

- (Abel 1983) ABEL, Andrew B.: Optimal Investment Under Uncertainty. In: The American Economic Review 73 (1983), Nr. 1, S. 228–233
- (Akerlof 1970) AKERLOF, George A.: The Market for "Lemons": Quality Uncertainty and the Market Mechanism. In: Quarterly Journal of Economics 84 (1970), aug, Nr. 3, S. 488–500
- (Alizadeh et al. 2016) ALIZADEH, M. I. ; PARSA MOGHADDAM, M. ; AMJADY, N. ; SIANO, P. ; SHEIKH-EL-ESLAMI, M. K.: Flexibility in Future Power Systems with High Renewable Penetration: A Review. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 57 (2016), S. 1186–1193
- (Angelou & Economides 2008) ANGELOU, Georgios ; ECONOMIDES, Anastasios: A Real Options Approach for Prioritizing ICT Business Alternatives: A Case Study From Broadband Technology Business Field. In: Journal of the Operational Research Society 59 (2008), Nr. 10, S. 1340–1351
- (Ansar et al. 2014) ANSAR, Atif ; FLYVBJERG, Bent ; BUDZIER, Alexander ; LUNN, Daniel: Should We Build More Large Dams? The Actual Costs of Hydropower Megaproject Development. In: Energy Policy 69 (2014), Nr. June, S. 43–56
- (Ashuri et al. 2012) ASHURI, Baabak ; KASHANI, Hammed ; MOLENAAR, Keith R. ; LEE, Sangjoo ; LU, Jian: Risk-Neutral Pricing Approach for Evaluating BOT Highway Projects with Government Minimum Revenue Guarantee Options. In: Journal of Construction Engineering and Management 138 (2012), Nr. 4, S. 545–557
- (Babich et al. 2020) BABICH, Volodymyr ; LOBEL, Ruben ; YÜCEL, Safak: Promoting Solar Panel Investments: Feed-in-Tariff vs. Tax-Rebate Policies. In: Manufacturing & Service Operations Management 22 (2020), Nr. 6, S. 1148 – 1164

- (Baker et al. 2011) BAKER, H. K. ; DUTTA, Shantanu ; SAADI, Samir: Management Views on Real Options in Capital Budgeting. In: *Journal of Applied Finance* 21 (2011), Nr. 1, S. 1–12
- (Balliauw 2020) BALLIAUW, Matteo: Time to Build: A Real Options Analysis of Port Capacity Expansion Investments Under Uncertainty. In: *Research in Transportation Economics* (2020), S. Im Erscheinen
- (Balliauw et al. 2019) BALLIAUW, Matteo ; KORT, Peter M. ; ZHANG, Anming: Capacity Investment Decisions of Two Competing Ports Under Uncertainty: A Strategic Real Options Approach. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 122 (2019), S. 249–264
- (Bar-Ilan & Strange 1996) BAR-ILAN, Avner ; STRANGE, William C.: Investment Lags. In: *American Economic Review* 86 (1996), Nr. 3, S. 610–622
- (Beckers et al. 2013) BECKERS, Frank ; CHIARA, Nicola ; FLESCHE, Adam ; MALY, Jiri ; SILVA, Eber ; STEGEMANN, Uwe: A Risk-Management Approach to a Successful Infrastructure Project: Initiation, Financing, and Execution. In: *McKinsey Working Papers on Risk* (2013), Nr. 52
- (Bellman 1972) BELLMAN, Richard: *Dynamic Programming*. 6. Princeton University Press, 1972. – S. 1–340
- (Bensoussan 2018) BENSOUSSAN, Alain: *Estimation and Control of Dynamical Systems*. Bd. 48. Springer, 2018. – S. 1–547
- (Bensoussan & Chevalier-Roignant 2019) BENSOUSSAN, Alain ; CHEVALIER-ROIGNANT, Benoît: Sequential Capacity Expansion Options. In: *Operations Research* 67 (2019), Nr. 1, S. 33–57
- (Berk & DeMarzo 2016) BERK, Jonathan B. ; DEMARZO, Peter M.: *Grundlagen der Finanzwirtschaft: Analyse, Entscheidung und Umsetzung*. 3. Hallbergmoos : Pearson, 2016. – S. 1–768
- (Bhattacharya 1978) BHATTACHARYA, Sudipto: Project Valuation with Mean-Reverting Cash Flow Streams. In: *The Journal of Finance* 33 (1978), Nr. 5, S. 1317–1331

- (Bieg et al. 2015) BIEG, Hartmut ; KUSSMAUL, Heinz ; WASCHBUSCH, Gerd: Investition. 3. Vahlen, 2015. – S. 1–362
- (Bigerna et al. 2019) BIGERNA, Simona ; WEN, Xingang ; HAGSPIEL, Verena ; KORT, Peter M.: Green Electricity Investments : Environmental Target and the Optimal Subsidy. In: *European Journal of Operational Research* 279 (2019), Nr. 2, S. 635–644
- (Black & Scholes 1973) BLACK, Fischer ; SCHOLES, Myron: The Pricing of Options and Corporate Liabilities. In: *Journal of Political Economy* 81 (1973), jan, Nr. 3, S. 637–654
- (Blanchard & Flint 2017) BLANCHARD, Jean Marc F. ; FLINT, Colin: The Geopolitics of China’s Maritime Silk Road Initiative. In: *Geopolitics* 22 (2017), Nr. 2, S. 223–245
- (Blohm et al. 2012) BLOHM, Hans ; LÜDER, Klaus ; SCHÄFER, Christina: Investition - Schwachstellenanalyse des Investitionsbereichs und Investitionsrechnung. 10. Vahlen, 2012. – S. 1–345
- (BMWi 2020) BMWi: Die Nationale Wasserstoffstrategie. In: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2020), S. 1–29
- (Bøckman et al. 2008) BØCKMAN, Thor ; FLETEN, Stein-Erik ; JULIUSSEN, Erik ; LANGHAMMER, Håvard J. ; REVDAL, Ingemar: Investment Timing and Optimal Capacity Choice for Small Hydropower Projects. In: *European Journal of Operational Research* 190 (2008), S. 255–267
- (von Böhm-Bawerk & Leonard 1891) BÖHM-BAWERK, Eugen von ; LEONARD, Henrietta: The Austrian Economists. In: *The Annals of the American Academy of Political and Social Science* 1 (1891), S. 361–384
- (Boomsma et al. 2012) BOOMSMA, Trine K. ; MEADE, Nigel ; FLETEN, Stein-Erik: Renewable Energy Investments under Different Support Schemes: A Real Options Approach. In: *European Journal of Operational Research* 220 (2012), Nr. 1, S. 225–237
- (Box et al. 2016) BOX, George E. P. ; JENKINS, Gwilym M. ; REINSEL, Gregory C. ; LJUNG, Greta M.: *Time Series Analysis*. 5. Wiley, 2016. – S. 659
- (Boyarchenko & Levendorskii 2007) BOYARCHENKO, Svetlana ; LEVENDORSKII, Sergei: *Irreversible Decisions Under Uncertainty*. Springer, 2007. – S. 1–285

- (Bradley et al. 1977) BRADLEY, Stephen P. ; HAX, Arnaldo C. ; MAGNANTI, Thomas L.: Applied Mathematical Programming. 1. Addison-Wesley, 1977. – S. 1–539
- (Brennan & Schwartz 1985) BRENNAN, Michael J. ; SCHWARTZ, Eduardo S.: Evaluating Natural Resource Investments. In: The Journal of Business 58 (1985), Nr. 2, S. 135–157
- (Bridge et al. 2018) BRIDGE, Gavin ; ÖZKAYNAK, Begüm ; TURHAN, Ethemcan: Energy Infrastructure and the Fate of the Nation: Introduction to Special Issue. In: Energy Research and Social Science 41 (2018), S. 1–11
- (Briest et al. 2022) BRIEST, Gordon ; LAUVEN, Lars-Peter ; KUPFER, Stefan ; LUKAS, Elmar: Leaving Well-Worn Paths: Reversal of the Investment-Uncertainty Relationship and Flexible Biogas Plant Operation. In: European Journal of Operational Research 300 (2022), Nr. 3, S. 1162–1176
- (Briest & Lukas 2018) BRIEST, Gordon ; LUKAS, Elmar: Unsichere Kosten und Vorlaufzeiten bei Infrastrukturprojekten unter Unsicherheit: Eine kapitalmarktorientierte Betrachtung. In: CRASSELT, Nils (Hrsg.) ; LUKAS, Elmar (Hrsg.) ; MÖLLS, Sascha H. (Hrsg.): Handbuch Kapitalmarktorientierte Unternehmensbewertung: Grundlagen, Methoden, Regulierung und Branchentrends. Stuttgart : Schäffer-Pöschel, 2018, S. 513–527
- (Briest et al. 2020) BRIEST, Gordon ; LUKAS, Elmar ; MÖLLS, Sascha H. ; WILLERSHAUSEN, Timo: Innovation Speed Under Uncertainty and Competition. In: Managerial and Decision Economics 41 (2020), Nr. 8, S. 1517–1527
- (Brounen et al. 2004) BROUNEN, Dirk ; DE JONG, Abe ; KOEDIJK, Kees: Corporate Finance In Europe Confronting Theory With Practice. In: ERIM Report Series (2004), S. 1–40
- (Bulan 2005) BULAN, Laarni T.: Real Options, Irreversible Investment and Firm Uncertainty: New Evidence from U.S. Firms. In: Review of Financial Economics 14 (2005), Nr. 3-4, S. 255–279
- (Busby et al. 2021) BUSBY, Joshua W. ; BAKER, Kyri ; BAZILIAN, Morgan D. ; GILBERT, Alex Q. ; GRUBERT, Emily ; RAI, Varun ; RHODES, Joshua D. ; SHIDORE, Sarang ; SMITH, Caitlin A. ; WEBBER, Michael E.: Cascading Risks: Understanding the 2021 Winter Blackout in Texas. In: Energy Research and Social Science 77 (2021)

- (Busse von Colbe et al. 2018) BUSSE VON COLBE, Walter ; LASSMANN, Gert ; WITTE, Frank: Investitionstheorie und Investitionsrechnung. 5. Springer, 2018. – S. 1–337
- (Calderón et al. 2015) CALDERÓN, César ; MORAL-BENITO, Enrique ; SERVÉN, Luis: Is Infrastructure Capital Productive? A Dynamic Heterogeneous Approach. In: Journal of Applied Econometrics 30 (2015), S. 177–198
- (Cantarelli et al. 2012) CANTARELLI, Chantal C. ; FLYVBJERG, Bent ; BUHL, Søren L.: Geographical Variation in Project Cost Performance: The Netherlands versus Worldwide. In: Journal of Transport Geography 24 (2012), Nr. September, S. 324–331
- (Caporal & Brandão 2008) CAPORAL, Alexandre ; BRANDÃO, Luiz Eduardo T.: Valuation of a Power Plant with the Real Options Approach. In: Brazilian Business Review 5 (2008), Nr. 2, S. 103–120
- (Cartea & González-Pedraz 2012) CARTEA, Álvaro ; GONZÁLEZ-PEDRAZ, Carlos: How Much Should We Pay for Interconnecting Electricity Markets? A Real Options Approach. In: Energy Economics 34 (2012), Nr. 1, S. 14–30
- (Chollet 2018) CHOLLET, François: Deep Learning with Python. Manning Publications Co., 2018. – S. 1–360
- (Copeland & Antikarov 2003) COPELAND, Thomas E. ; ANTIKAROV, Vladimir: Real Options: A Practitioner's Guide. New York: Thomson/Texere, 2003. – S. 1–372
- (Copeland & Keenan 1998) COPELAND, Thomas E. ; KEENAN, Philip T.: How Much Is Flexibility Worth? In: McKinsey Quarterly (1998), Nr. 2, S. 38–49
- (Cormen et al. 2009) CORMEN, Thomas H. ; LEISERSON, Charles E. ; RIVEST, Ronald L. ; STEIN, Clifford: Introduction to Algorithms. 3. The MIT Press, 2009. – S. 1–1292
- (Cotrugli 2017) COTRUGLI, Benedetto: The Book of the Art of Trade. In: CARRARO, Carlo (Hrsg.) ; FAVERO, Giovanni (Hrsg.): Benedetto Cotrugli – The Book of the Art of Trade. Palgrave Macmillan, 2017, S. 21 – 172
- (Cox et al. 1979) COX, John C. ; ROSS, Stephen A. ; RUBINSTEIN, Mark: Option Pricing: A Simplified Approach. In: Journal of Financial Economics 7 (1979), sep, Nr. 3, S. 229–263

- (Dangl 1999) DANGL, Thomas: Investment and Capacity Choice under Uncertain Demand. In: *European Journal of Operational Research* 117 (1999), Nr. 3, S. 415–428
- (Danielova & Sarkar 2011) DANIELOVA, Anna ; SARKAR, Sudipto: The Effect of Leverage on the Tax-Cut versus Investment-Subsidy Argument. In: *Review of Financial Economics* 20 (2011), Nr. 4, S. 123–129
- (Després et al. 2017) DESPRÉS, Jacques ; MIMA, Silvana ; KITOUS, Alban ; CRIQUI, Patrick ; HADJSAID, Nouredine ; NOIROT, Isabelle: Storage as a Flexibility Option in Power Systems with High Shares of Variable Renewable Energy Sources: A POLES-Based Analysis. In: *Energy Economics* 64 (2017), S. 638–650
- (Di Corato & Moretto 2011) DI CORATO, Luca ; MORETTO, Michele: Investing in Biogas: Timing, Technological Choice and the Value of Flexibility from Input Mix. In: *Energy Economics* 33 (2011), Nr. 6, S. 1186–1193
- (Diederich 1989) DIEDERICH, Helmut: *Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. 6. Stuttgart Berlin Köln : Kohlhammer, 1989. – S. 1–559
- (Dixit 1989) DIXIT, Avinash K.: Entry and Exit Decisions under Uncertainty. In: *Journal of Political Economy* 97 (1989), Nr. 3, S. 620–638
- (Dixit 1992) DIXIT, Avinash K.: Investment and Hysteresis. In: *Journal of Economic Perspectives* 6 (1992), Nr. 1, S. 107–132
- (Dixit & Pindyck 1994) DIXIT, Avinash K. ; PINDYCK, Robert S.: *Investment Under Uncertainty*. Princeton : Princeton University Press, 1994. – S. 1–468
- (Domschke & Scholl 2008) DOMSCHKE, Wolfgang ; SCHOLL, Armin: *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre*. 4. Springer, 2008. – S. 1–414
- (El Karoui & Quenez 1995) EL KAROUI, Nicole ; QUENEZ, Marie-Claire: Dynamic Programming and Pricing of Contingent Claims in an Incomplete Market. In: *SIAM Journal on Control and Optimization* 33 (1995), Nr. 1, S. 29–66
- (European Commission 2018) EUROPEAN COMMISSION: *Science, Research and Innovation Performance of the EU 2018, Strengthening the Foundations for Europe 's Future*. 2018. – S. 1–500

- (Ewald et al. 2017) EWALD, Christian-Oliver ; OUYANG, Ruolan ; SIU, Tak K.: On the Market-Consistent Valuation of Fish Farms: Using the Real Option Approach and Salmon Futures. In: *American Journal of Agricultural Economics* 99 (2017), Nr. 1, S. 207–224
- (Ewald & Taub 2020) EWALD, Christian-Oliver ; TAUB, Bart: Real Options, Risk Aversion and Markets: A Corporate Finance Perspective. In: *SSRN Electronic Journal* (2020)
- (Fanone et al. 2013) FANONE, ENZO ; GAMBA, Andrea ; PROKOPCZUK, Marcel: The Case of Negative Day-Ahead Electricity Prices. In: *Energy Economics* 35 (2013), S. 22–34
- (Feichtinger & Hartl 1986) FEICHTINGER, Gustav ; HARTL, Richard F.: *Optimale Kontrolle Ökonomischer Prozesse*. Walter de Gruyter, 1986. – S. 1–631
- (FERC 2020) FERC ; FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION (Hrsg.): *Energy Primer - A Handbook of Energy Market Basics*. 2020. – S. 1–142
- (Finjord et al. 2018) FINJORD, Fredrik ; HAGSPIEL, Verena ; LAVRUTICH, Maria ; TANGEN, Marius: The Impact of Norwegian-Swedish Green Certificate Scheme on Investment Behavior: A Wind Energy Case Study. In: *Energy Policy* 123 (2018), Nr. August, S. 373–389
- (Fleten et al. 2016) FLETEN, Stein-Erik ; LINNERUD, Kristin ; MOLNÁR, Peter ; TANDBERG NYGAARD, Maria: Green Electricity Investment Timing in Practice: Real Options or Net Present Value? In: *Energy* 116 (2016), S. 498–506
- (Fleten et al. 2007) FLETEN, Stein-Erik ; MARIBU, K. M. ; WANGENSTEEN, I.: Optimal Investment Strategies in Decentralized Renewable Power Generation under Uncertainty. In: *Energy* 32 (2007), Nr. 5, S. 803–815
- (Flyvbjerg 2014) FLYVBJERG, Bent: What You Should Know About Megaprojects and Why: An Overview. In: *Project Management Journal* 45 (2014), Nr. 2, S. 6–19
- (Frayer & Uludere 2001) FRAYER, Julia ; ULUDERE, Nazli Z.: What Is It Worth? Application of Real Options Theory to the Valuation of Generation Assets. In: *Electricity Journal* 14 (2001), Nr. 8, S. 40–51

- (Funston 2006) FUNSTON, Kris: Real Options and Telecommunications Regulation. In: COOPER, Russel (Hrsg.) ; MADDEN, Gary (Hrsg.) ; LLOYD, Ashley (Hrsg.) ; SCHIPP, Michael (Hrsg.): The Economics of Online Markets and ICT Networks. Physika Verlag, 2006, S. 113–127
- (Galant et al. 2013) GALANT, S. ; PEIRANO, E. ; DEBARBERIS, L.: Electricity Storage: A New Flexibility Option for Future Power Systems. In: MIGLIAVACCA, Gianluigi (Hrsg.): Advanced Technologies for Future Transmission Grids. Springer, 2013, Kap. 7
- (Galera & Solino 2010) GALERA, Antonio L. L. ; SOLINO, Antonio S.: A Real Options Approach for the Valuation of Highway Concessions. In: Transportation Science 44 (2010), Nr. 3, S. 416–427
- (Gao & Driouchi 2013) GAO, Yongling ; DRIOUCHI, Tarik: Incorporating Knightian Uncertainty into Real Options Analysis: Using Multiple-Priors in the Case of Rail Transit Investment. In: Transportation Research Part B: Methodological 55 (2013), S. 23–40
- (Garvin & Cheah 2004) GARVIN, Michael J. ; CHEAH, Charles Y. J.: Valuation Techniques for Infrastructure Investment Decisions. In: Construction Management and Economics 22 (2004), Nr. 4, S. 373–383
- (Gleich et al. 2008) GLEICH, Ronald ; KIENINGER, Michael ; KÄMMLER-BURRAK, Andrea: Auswirkung der Fair Value-Bewertung nach IAS/IFRS auf das Performance Measurement. In: FUNK, Wilfried (Hrsg.) ; ROSSMANITH, Jonas (Hrsg.): Internationale Rechnungslegung und Internationales Controlling. Gabler, 2008, S. 481–516
- (Glensk & Madlener 2019) GLENSK, Barbara ; MADLENER, Reinhard: The Value of Enhanced Flexibility of Gas-Fired Power Plants: A Real Options Analysis. In: Applied Energy 251 (2019), Nr. 2018, S. 113–125
- (Graham & Harvey 2002) GRAHAM, John ; HARVEY, Campbell: Capital Budgeting and Capital Structure. In: Journal of Applied Corporate Finance 15 (2002), Nr. 1, S. 8–23
- (Graham & Harvey 2001) GRAHAM, John R. ; HARVEY, Campbell R.: The Theory and Practice of Corporate Finance: Evidence from the Field. In: Journal of Financial Economics 60 (2001), Nr. 2-3, S. 187–243
- (Grimes 2011) GRIMES, Arthur: Building Bridges: Treating a New Transport Link as a Real Option. 2011

- (Guerra et al. 2018) GUERRA, Manuel ; NUNES, Cláudia ; OLIVEIRA, Carlos: On a Class of Optimal Stopping Problems with Applications to Real Option Theory. 2018
- (Guiso & Parigi 1999) GUIISO, Luigi ; PARIGI, Guisepppe: Investment and Demand Uncertainty. In: The Quarterly Journal of Economics 114 (1999), Nr. 1, S. 185–227
- (Hagspiel et al. 2016) HAGSPIEL, Verena ; HUISMAN, Kuno J.M. ; KORT, Peter M. ; NUNES, Cláudia: How to escape a declining market: Capacity investment or Exit? In: European Journal of Operational Research 254 (2016), Nr. 1, S. 40–50
- (Hansen et al. 2014) HANSEN, Anca D. ; ALTIN, Müfit ; MARGARIS, Ioannis D. ; IOV, Florin ; TARNOWSKI, Germán C.: Analysis of the Short-Term Overproduction Capability of Variable Speed Wind Turbines. In: Renewable Energy 68 (2014), S. 326–336
- (Hartman 1972) HARTMAN, Richard: The Effects of Price and Cost Uncertainty on Investment. In: Journal of Economic Theory 5 (1972), Nr. 2, S. 258–266
- (Helms et al. 2016) HELMS, Thorsten ; LOOCK, Moritz ; BOHNSACK, René: Timing-Based Business Models for Flexibility Creation in the Electric Power Sector. In: Energy Policy 92 (2016), S. 348–358
- (Henn 2015) HENN, Liesel: A Multi-dimensional Financing Appraisal Framework for Public Infrastructure, Southern Cross University, Dissertation, 2015. – S. 272
- (Hillier & Lieberman 2002) HILLIER, Frederick S. ; LIEBERMAN, Gerald J.: Introduction to Operations Research. 7. McGraw-Hill, 2002. – S. 1–1214
- (Hochloff & Braun 2014) HOCHLOFF, Patrick ; BRAUN, Martin: Optimizing Biogas Plants with Excess Power Unit and Storage Capacity in Electricity and Control Reserve Markets. In: Biomass and Bioenergy 65 (2014), S. 125–135
- (Hull 2009) HULL, John C.: Optionen, Futures und andere Derivate. 7. New Jersey : Pearson, 2009. – S. 1–822
- (Hull 2015) HULL, John C.: Optionen, Futures und andere Derivate. 9. München : Pearson, 2015. – S. 1–1053

- (Ioakimidis et al. 2018) IOAKIMIDIS, Christos S. ; THOMAS, Dimitrios ; RYCERSKI, Pawel ; GENIKOMSAKIS, Konstantinos N.: Peak Shaving and Valley Filling of Power Consumption Profile in Non-Residential Buildings Using an Electric Vehicle Parking Lot. In: *Energy* 148 (2018), S. 148–158
- (Ishikawa et al. 2021) ISHIKAWA, Shiho ; CONNELL, Nicholas O. ; LECHNER, Raphael ; HARA, Ryoichi ; KITA, Hiroyuki ; BRAUTSCH, Markus: Load Response of Biogas CHP Systems in a Power Grid. In: *Renewable Energy* 170 (2021), S. 12–26
- (Jaimungal et al. 2013) JAIMUNGAL, Sebastian ; SOUZA, Max O. de ; ZUBELLI, Jorge P.: Real Option pricing with Mean-Reverting Investment and Project Value. In: *European Journal of Finance* 19 (2013), Nr. 7-8, S. 625–644
- (Jing et al. 2021) JING, Rui ; WANG, Xiaonan ; ZHAO, Yingru ; ZHOU, Yue ; WU, Jianzhong ; LIN, Jianyi: Planning Urban Energy Systems Adapting to Extreme Weather. In: *Advances in Applied Energy* 3 (2021)
- (Jockenhövel 2010) JOCKENHÖVEL, Albrecht: Ausblick. In: DEMEL, Walter (Hrsg.) ; FRIED, Johannes (Hrsg.) ; HEHL, Ernst-Dieter (Hrsg.) ; LEHMANN, Gustav A. (Hrsg.) ; JOCKENHÖVEL, Albrecht (Hrsg.) ; SCHMIDT-GLINTZER, Helwig (Hrsg.) ; THAMER, Hans-Ulrich (Hrsg.): *WBG Weltgeschichte - Eine Globale Geschichte von den Anfängen bis ins 21. Jahrhundert Band I: Vom Beginn bis 1200 v. Chr.* 2010, Kap. Ferne Lebe, S. 460–472
- (Kalenscher & van Wingerden 2011) KALENSCHER, Tobias ; WINGERDEN, Marijn van: Why We Should Use Animals to Study Economic Decision Making - A Perspective. In: *Frontiers in Neuroscience* 5 (2011), S. 1–11
- (Karlin & Taylor 1975) KARLIN, Samuel ; TAYLOR, Howard M.: *A First Course in Stochastic Processes*. 2. San Diego: Academic Press, 1975. – S. 1–576
- (Kauppinen et al. 2018) KAUPPINEN, Lauri ; SIDDIQUI, Afzal S. ; SALO, Ahti: Investing in Time-to-Build Projects with Uncertain Revenues and Costs: A Real Options Approach. In: *IEEE Transactions on Engineering Management* 65 (2018), Nr. 3, S. 448–459
- (Keles et al. 2012) KELES, Dogan ; GENOESE, Massimo ; MÖST, Dominik ; FICHTNER, Wolf: Comparison of Extended Mean-Reversion and Time Series Models for Electri-

- city Spot Price Simulation Considering Negative Prices. In: *Energy Economics* 34 (2012), Nr. 4, S. 1012–1032
- (Kellogg 2014) KELLOGG, Ryan: The Effect of Uncertainty on Investment: Evidence from Texas Oil Drilling. In: *American Economic Review* 104 (2014), Nr. 6, S. 1698–1734
- (Kepp & Männasoo 2021) KEPP, Kaido ; MÄNNASOO, Kadri: Investment Irreversibility and Cyclical Adversity: Implications for the Financial Performance of European Manufacturing Companies. In: *Managerial and Decision Economics* 42 (2021), Nr. 7, S. 1665–1678
- (Kirchgässner 2008) KIRCHGÄSSNER, Gebhard: *Homo Oeconomicus - The Economic Model of Behaviour and Its Applications in Economics and Other Social Sciences*. Springer, 2008. – S. 1–356
- (Kitzing et al. 2017) KITZING, Lena ; JUUL, Nina ; DRUD, Michael ; BOOMSMA, Trine K.: A Real Options Approach to Analyse Wind Energy Investments Under Different Support Schemes. In: *Applied Energy* 188 (2017), S. 83–96
- (Kopiske et al. 2017) KOPISKE, Jakob ; SPIEKER, Sebastian ; TSATSARONIS, George: Value of Power Plant Flexibility in Power Systems with High Shares of Variable Renewables: A Scenario Outlook for Germany 2035. In: *Energy* 137 (2017), S. 823–833
- (Kost et al. 2021) KOST, Christoph ; SHAMMUGAM, Shivenes ; FLURI, Verena ; PEPPER, Dominik ; MEMAR, Aschkan D. ; SCHLEGEL, Thomas: Study: Levelized Cost of Electricity-Renewable Energy Technologies. 2021. – Forschungsbericht. – S. 1–45
- (Kostka & Anzinger 2016a) KOSTKA, Genia ; ANZINGER, Niklas: Large Infrastructure Projects in Germany: A Cross-sectoral Analysis. In: KOSTKA, Genia (Hrsg.) ; FIEDLER, Jobst (Hrsg.): *Large Infrastructure Projects in Germany: Between Ambition and Realities*. Palgrave Macmillan, 2016, S. 15–38
- (Kostka & Anzinger 2016b) KOSTKA, Genia ; ANZINGER, Niklas: Offshore Wind Power Expansion in Germany: Scale Patterns, and Causes of Time Delays and Cost Overruns. In: KOSTKA, Genia (Hrsg.) ; FIEDLER, Jobst (Hrsg.): *Large infrastructure projects in Germany: Between Ambition and Realities*. 2016, S. 147 – 190

- (Kostka & Fiedler 2016a) KOSTKA, Genia ; FIEDLER, Jobst: Introduction. In: KOSTKA, Genia (Hrsg.) ; FIEDLER, Jobst (Hrsg.): Large infrastructure projects in Germany: Between Ambition and Realities. Palgrave Macmillan, 2016, S. 1–14
- (Kostka & Fiedler 2016b) KOSTKA, Genia (Hrsg.) ; FIEDLER, Jobst (Hrsg.): Large Infrastructure Projects in Germany: Between Ambition and Realities. 2016. – S. 1–201
- (Kozlova 2017) KOZLOVA, Mariia: Real Option Valuation in Renewable Energy Literature: Research Focus, Trends and Design. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 80 (2017), S. 180–196
- (Krainer 1968) KRAINER, Robert E.: The Time Profile of Capital Accumulation in the Automobile Industry. In: Journal of Political Economy 76 (1968), Nr. 5, S. 1049–1057
- (Kupfer 2020) KUPFER, Stefan: Investition in Innovation: Dynamische Investitionsstrategien bei Technologischem Fortschritt und Unter Unsicherheit. Springer, 2020. – S. 1–275
- (Kupfer & Welling 2018) KUPFER, Stefan ; WELLING, Andreas: Die Bewertung Unsicherer, Beschränkter Zahlungsströme am Beispiel eines Infrastrukturprojektes. In: CRASELT, Nils (Hrsg.) ; LUKAS, Elmar (Hrsg.) ; MÖLLS, Sascha (Hrsg.) ; TIMMRECK, Christian (Hrsg.): Handbuch Kapitalmarktorientierte Unternehmensbewertung: Grundlagen, Methoden, Regulierung und Branchentrends. Stuttgart : Schäffer-Pöschel, 2018, S. 531–544
- (Kurose & Ross 2014) KUROSE, James ; ROSS, Keith: Computernetzwerke - Der Top-Down Ansatz. 6. Pearson, 2014. – S. 1–894
- (Ladwig 2021) LADWIG, Theresa: A Techno-Economic Comparison of Demand Side Management with Other Flexibility Options. In: MÖST, Dominik (Hrsg.) ; SCHREIBER, Steffi (Hrsg.) ; HERBST, Andrea (Hrsg.) ; JAKOB, Martin (Hrsg.) ; MARTINO, Angelo (Hrsg.) ; POGANIETZ, Witold-Roger (Hrsg.): The Future European Energy System. Springer, 2021, Kap. 9, S. 155 – 173
- (Laux 2006) LAUX, Helmut: Wertorientierte Unternehmenssteuerung und Kapitalmarkt - Fundierung Finanzwirtschaftlicher Entscheidungskriterien und (Anreize für deren Umsetzung. 2. Springer, 2006. – S. 1–719

- (Leung & Li 2014) LEUNG, Tim ; LI, Xin: Optimal Mean Reversion Trading with Transaction Costs and Stop-Loss Exit. (2014), November, Nr. 1411.5062
- (Levendorskii 2005) LEVENDORSKII, Sergei Z.: Perpetual American Options and Real Options Under Mean-Reverting Processes. 2005
- (Lorscheid 1998) LORSCHIED, Peter: Kointegration und strategische Planung - Konstruktion, Schätzung und Entscheidungsorientierte Analyse Ökonometrischer Unternehmensmodelle. Wiesbaden : Deutscher Universitätsverlag, 1998. – S. 17–26
- (Lorson et al. 2014) LORSON, Peter ; PFIRMANN, Armin ; TESCHE, Thomas: Niederwerttest für Beteiligungen im Jahresabschluss nach HGB. In: KoR : internationale und kapitalmarktorientierte Rechnungslegung ; IFRS 14 (2014), Nr. 6, S. 324–331
- (Loubergé et al. 2002) LOUBERGÉ, Henri ; VILLENEUVE, Stéphane ; CHESNEY, Marc: Long-Term Risk Management of Nuclear Waste: A Real Options Approach. In: Journal of Economic Dynamics and Control 27 (2002), Nr. 1, S. 157–180
- (Lucia & Schwartz 2002) LUCIA, Julio J. ; SCHWARTZ, Eduardo S.: Electricity Prices and Power Derivatives: Evidence from the Nordic Power Exchange. In: Review of Derivatives Research 5 (2002), Nr. 1, S. 5–50
- (Lukas et al. 2017) LUKAS, Elmar ; SPENGLER, Thomas S. ; KUPFER, Stefan ; KIECKHÄFER, Karsten: When and How Much to Invest? Investment and Capacity Choice under Product Life Cycle Uncertainty. In: European Journal of Operational Research 260 (2017), Nr. 3, S. 1105–1114
- (Lukas & Thiergart 2019) LUKAS, Elmar ; THIERGART, Sascha: The Interaction of Debt Financing, Cash Grants and the Optimal Investment Policy Under Uncertainty. In: European Journal of Operational Research 276 (2019), Nr. 1, S. 284–299
- (Majd & Pindyck 1987) MAJD, Saman ; PINDYCK, Robert S.: Time to Build, Option Value, and Investment Decisions. In: Journal of Financial Economics 18 (1987), Nr. 1, S. 7–27
- (Malliaris & Brock 1999) MALLIARIS, Anastasios G. ; BROCK, William A.: Stochastic Methods in Economics and Finance. 8. Amsterdam : Elsevier Science, 1999

- (Mamon 2004) MAMON, Rogemar: Three Ways to Solve for Bond Prices in the Vasicek Model. In: *Journal of Applied Mathematics and Decision Sciences* 8 (2004), Nr. 1, S. 1–14
- (Margsiri et al. 2008) MARGSIRI, Worawat ; MELLO, Antonio S. ; RUCKES, Martin E.: A Dynamic Analysis of Growth via Acquisition. In: *Review of Finance* 12 (2008), Nr. 4, S. 635–671
- (Marques et al. 2015a) MARQUES, João ; CUNHA, Maria ; SAVIĆ, Dragan: Using Real Options in the Optimal Design of Water Distribution Networks. In: *Journal of Water Resources Planning and Management* 141 (2015), Nr. 2, S. 1–10
- (Marques et al. 2015b) MARQUES, João ; CUNHA, Maria ; SAVIĆ, Dragan A.: Multi-Objective Optimization of Water Distribution Systems Based on a Real Options Approach. In: *Environmental Modelling and Software* 63 (2015), S. 1–13
- (Martinez-Cesena et al. 2012) MARTINEZ-CESENA, Eduardo A. ; AZZOPARDI, Brian ; MUTALE, Joseph: Assessment of Domestic Photovoltaic Systems Based on Real Options Theory. In: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 21 (2012), Nr. 2, S. 250–262
- (Marzouk & Ali 2018) MARZOUK, Mohamed ; ALI, Mohamed: Mitigating Risks in Wastewater Treatment Plant PPPs Using Minimum Revenue Guarantee and Real Options. In: *Utilities Policy* 53 (2018), Nr. October 2017, S. 121–133
- (Maslow 1943) MASLOW, Abraham H.: A Theory of Human Motivation. In: *Psychological Review* 50 (1943), Nr. 4, S. 370 – 396
- (McDonald 2000) McDONALD, Robert L.: Real Options and Rules of Thumb in Capital Budgeting. In: BRENNAN, Michael J. (Hrsg.) ; TRIGEORGIS, Lenos (Hrsg.): *Project Flexibility, Agency, and Competition: New Developments in the Theory and Application of Real Options*. Oxford University Press, 2000, S. 13–33
- (McDonald 2006) McDONALD, Robert L.: The Role of Real Options in Capital Budgeting: Theory and Practice. In: *Journal of Applied Corporate Finance* 18 (2006), Nr. 2, S. 28–39

- (McDonald & Siegel 1985) MCDONALD, Robert L. ; SIEGEL, Daniel R.: Investment and the Valuation of Firms When There is an Option to Shut Down. In: *International Economic Review* 26 (1985), Nr. 2, S. 331–349
- (McDonald & Siegel 1986) MCDONALD, Robert L. ; SIEGEL, Daniel R.: The Value of Waiting to Invest. In: *The Quarterly Journal of Economics* 101 (1986), Nr. 4, S. 707–727
- (Mikkola & Lund 2016) MIKKOLA, Jani ; LUND, Peter D.: Modeling Flexibility and Optimal Use of Existing Power Plants with Large-Scale Variable Renewable Power Schemes. In: *Energy* 112 (2016), S. 364–375
- (Milne & Whalley 2000) MILNE, Alistair ; WHALLEY, Elizabeth: Time to build, Option Value and Investment Decisions': A Comment. In: *Journal of Financial Economics* 56 (2000), Nr. 2, S. 325–332
- (Möglich & Raebel 2014) MÖGLICH, Ann-Kristin ; RAEBEL, Ralf: Die Verbriefung von Infrastrukturfinanzierungen. In: *Zeitschrift für das gesamte Kreditwesen* 19 (2014), S. 950–953
- (Mun 2002) MUN, Johnathan: *Real Options Analysis Tools and Techniques for Valuing Strategic Investments and Decisions*. John Wiley & Sons, 2002. – S. 1–386
- (Myers 1977) MYERS, Stewart C.: Determinants of Corporate Borrowing. In: *Journal of Financial Economics* 5 (1977), Nr. 2, S. 147–175
- (Näsäkkälä & Fleten 2005) NÄSÄKKÄLÄ, Erkkä ; FLETEN, Stein-Erik: Flexibility and Technology Choice in Gas Fired Power Plant Investments. In: *Review of Financial Economics* 14 (2005), S. 371–393
- (Neftci 2000) NEFTCI, Salih N.: *An Introduction to the Mathematics of Financial Derivatives*. 2. Academic Press, 2000. – S. 1–527
- (Nickel et al. 1981) NICKEL, H. ; CONRAD, R. ; VÖLKELE, S. ; LEUPOLD, W. ; HERFURTH, G.: *Mathematik für Ingenieur- und Fachschulen*. 5. VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1981. – S. 1–373
- (Nishihara 2018) NISHIHARA, Michi: Valuation of an R&D Project with Three Types of Uncertainty. In: *EURO Journal on Decision Processes* 6 (2018), Nr. 1-2, S. 93–113

- (Øksendal 2010) ØKSENDAL, Bernt: Stochastic Differential Equations: An Introduction with Applications. 6. Heidelberg : Springer, 2010
- (Ozorio et al. 2012) OZORIO, Luiz de M. ; BASTIAN-PINTO, Carlos de L. ; BRANDÃO, Luiz Eduardo T.: The Choice of Stochastic Process in Real Option Valuation. In: Real Options 16th Annual International Conference, URL <http://realoptions.org/openconf2012/data/papers/49.pdf>, 2012, S. 1–13
- (Panayi & Trigeorgis 1998) PANAYI, Sylvia ; TRIGEORGIS, Lenos: Multi-stage Real Options: The Cases of Information Technology Infrastructure and International Bank Expansion. In: The Quarterly Review of Economics and Finance 38 (1998), Nr. 3, S. 675–692
- (Papaefthymiou & Dragoon 2016) PAPAETHYMIU, G. ; DRAGOON, Ken: Towards 100Flexibility. In: Energy Policy 92 (2016), S. 69–82
- (Park & Sharp-Bette 1990) PARK, Chan S. ; SHARP-BETTE, Gunter P.: Advanced Engineering Economics. John Wiley & Sons, 1990. – S. 1–740
- (Pennings 2000) PENNINGS, Enrico: Taxes and Stimuli of Investment under Uncertainty. In: European Economic Review 44 (2000), Nr. 2, S. 383–391
- (Peskir & Shiryaev 2006) PESKIR, Goran ; SHIRYAEV, Albert: Optimal Stopping and Free-Boundary Problems. Birkhäuser Verlag, 2006. – S. 1–500
- (Pike 1996) PIKE, Richard: A Longitudinal Survey on Capital Budgeting Practices. In: Journal of Business Finance and Accounting 23 (1996), Nr. 1, S. 79–92
- (Pike 1988) PIKE, Richard H.: An Empirical Study of the Adoption of Sophisticated Capital Budgeting Practices and Decision-Making Effectiveness. In: Accounting and Business Research 18 (1988), Nr. 72, S. 341–351
- (Pilpola & Lund 2019) PILPOLA, Sannamari ; LUND, Peter D.: Different Flexibility Options for Better System Integration of Wind Power. In: Energy Strategy Reviews 26 (2019), S. 1 – 11
- (Pindyck 1988) PINDYCK, Robert S.: Irreversible Investment, Capacity Choice, and the Value of the Firm. In: The American Economic Review 78 (1988), Nr. 5, S. 969–985

- (Pindyck 1993) PINDYCK, Robert S.: Investments of Uncertain Cost. In: Journal of Financial Economics 34 (1993), Nr. 1, S. 53–76
- (Pindyck 2001) PINDYCK, Robert S.: The Dynamics of Commodity Spot and Futures Markets : A Primer. In: The Energy Journal 22 (2001), Nr. 3, S. 1–29
- (Pindyck & Rubinfeld 2015) PINDYCK, Robert S. ; RUBINFELD, Daniel L.: Mikroökonomie. 8. Pearson, 2015. – S. 1–1008
- (Price 1995) PRICE, Simon: Aggregate Uncertainty, Capacity Utilization and Manufacturing Investment. In: Applied Economics 27 (1995), Nr. 2, S. 147–154
- (Quigg 1993) QUIGG, Laura: Empirical Testing of Real Option-Pricing Models. In: The Journal of Finance 48 (1993), Nr. 2, S. 621–640
- (Reiß 2007) REISS, Winfried: Mikroökonomische Theorie. 6. Oldenbourg, 2007. – S. 606
- (van Renssen 2020) RENNSSEN, Sonja van: The hydrogen solution? In: Nature Climate Change 10 (2020), Nr. 9, S. 799–801
- (Rigopoulos 2015) RIGOPOULOS, George: A Review on Real Options Utilization in Capital Budgeting Practice. In: International Journal of Information, Business and Management 7 (2015), Nr. 2, S. 1–16
- (Rohlf's & Madlener 2011) ROHLFS, Wilko ; MADLENER, Reinhard: Valuation of CCS-Ready Coal-Fired Power Plants: A Multi-Dimensional Real Options Approach. In: Energy Systems 2 (2011), Nr. 3-4, S. 243–261
- (Ryan & Ryan 2002) RYAN, Patricia A. ; RYAN, Glenn P.: Capital Budgeting Practices of the Fortune 1000: How Have Things Changed? In: Journal of Business and Management 8 (2002), Nr. 4, S. 355–364
- (Sarkar & Zhang 2015) SARKAR, Sudipto ; ZHANG, Chuanqian: Investment Policy with Time-to-build. In: Journal of Banking and Finance 55 (2015), Nr. February, S. 142–156
- (Schall et al. 1978) SCHALL, L. D. ; SUNDEM, G. L. ; GEIJSBEEK, W. R.: Survey and Analysis of Capital Budgeting Methods. In: The Journal of Finance 33 (1978), Nr. 1, S. 281–287

- (Schierenbeck & Wöhle 2012) SCHIERENBECK, Henner ; WÖHLE, Claudia B.: Grundzüge der Betriebswirtschaftslehre. 18. München : Oldenbourg Wissenschaftlicher Verlag GmbH, 2012. – S. 1–958
- (Schmidt et al. 2019) SCHMIDT, Tobias S. ; SCHMID, Nicolas ; SEWERIN, Sebastian: Policy Goals, Partisanship and Paradigmatic Change in Energy Policy – Analyzing Parliamentary Discourse in Germany over 30 Years. In: *Climate Policy* 19 (2019), Nr. 6, S. 771–786
- (Schreiber et al. 2021) SCHREIBER, Steffi ; ZÖPHEL, Christoph ; MÖST, Dominik: The Future European Energy System. In: MÖST, Dominik (Hrsg.) ; SCHREIBER, Steffi (Hrsg.) ; HERBST, Andrea (Hrsg.) ; JAKOB, Martin (Hrsg.) ; MARTINO, Angelo (Hrsg.) ; POGANIETZ, Witold-Roger (Hrsg.): *The Future European Energy System*. Springer International Publishing, 2021, Kap. 10, S. 177 – 198
- (Schumacher & Würfel 2015) SCHUMACHER, Ingrid ; WÜRFEL, Philip: Strategien zur Strombeschaffung in Unternehmen. Springer Gabler, 2015. – S. 1 – 163
- (Schwartz 1997) SCHWARTZ, Eduardo S.: The Stochastic Behavior of Commodity Prices: Implications for Valuation and Hedging. In: *The Journal of Finance* 52 (1997), Nr. 3, S. 923–973
- (Schwartz & Moon 2000) SCHWARTZ, Eduardo S. ; MOON, Mark: Rational Pricing of Internet Companies. In: *Financial Analysts Journal* 56 (2000), Nr. 3, S. 62–75
- (Schwartz & Moon 2001) SCHWARTZ, Eduardo S. ; MOON, Mark: Rational Pricing of Internet Companies Revisited. In: *The Financial Review* 36 (2001), Nr. 4, S. 7–26
- (Seydel 2017) SEYDEL, Rüdiger U.: *Tools for Computational Finance*. 6. Springer-Verlag London, 2017. – S. 479
- (Shreve 2004) SHREVE, Steven E.: *Stochastic Calculus for Finance II : Continuous-Time Models*. Springer New York, 2004. – S. 1–550
- (Siegert 2014) SIEGERT, Georg: *Costs , Benefits , and Security of Supply in Bio-Electricity Feed-in Tariff Systems : A Real Options Approach*. 2014

- (Smit 2003) SMIT, Han T.: Infrastructure Investment as a Real Options Game The Case of European Airport Expansion Smit. In: *Financial Management* 32 (2003), Nr. 4, S. 27–57
- (Sovacool et al. 2014) SOVACOO, Benjamin K. ; GILBERT, Alex ; NUGENT, Daniel: An International Comparative Assessment of Construction Cost Overruns for Electricity Infrastructure. In: *Energy Research and Social Science* 3 (2014), S. 152–160
- (Spanier & Oldham 1987) SPANIER, Jerome ; OLDHAM, Keith B.: *An Atlas of Functions*. 1. Hemisphere Publishing Corporation, 1987. – S. 700
- (Straub 2012) STRAUB, Thomas: *Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. Pearson, 2012. – S. 1–550
- (Tanguturi & Harmantzis 2006) TANGUTURI, Venkata P. ; HARMANTZIS, Fotios C.: Migration to 3G Wireless Broadband Internet and Real Options: The Case of an Operator in India. In: *Telecommunications Policy* 30 (2006), Nr. 7, S. 400–419
- (Taylor & Karlin 1998) TAYLOR, Howard M. ; KARLIN, Samuel: *An Introduction To Stochastic Modeling*. 3. Academic Press, 1998. – S. 1–631
- (Thommen & Achleitner 2009) THOMMEN, Jean-Paul ; ACHLEITNER, Ann-Kristin: *Allgemeine Betriebswirtschaftslehre - Umfassende Einführung aus Managementorientierter Sicht*. 6. Gabler, 2009. – S. 1–1183
- (Thompson et al. 2004) THOMPSON, Matt ; DAVISON, Matt ; RASMUSSEN, Henning: Valuation and Optimal Operation of Electric Power Plants in Competitive Markets. In: *Operations Research* 52 (2004), Nr. 4, S. 546–562
- (Thompson et al. 2009) THOMPSON, Matt ; DAVISON, Matt ; RASMUSSEN, Henning: Natural Gas Storage Valuation and Optimization: A Real Options Application. In: *Naval Research Logistics* 56 (2009), Nr. 3, S. 226–238
- (Torani et al. 2016) TORANI, Kiran ; RAUSSER, Gordon ; ZILBERMAN, David: Innovation Subsidies Versus Consumer Subsidies: A Real Options Analysis of Solar Energy. In: *Energy Policy* 92 (2016), S. 255–269
- (Triantis & Borison 2001) TRIANTIS, Alex ; BORISON, Adam: Real Options: State of the Practice. In: *Journal of Applied Corporate Finance* 14 (2001), Nr. 2, S. 8–24

- (Triantis 2005) TRIANTIS, Alexander: Realizing the Potential of Real Options: Does Theory Meet Practice? In: *Journal of Applied Corporate Finance* 17 (2005), Nr. 2, S. 8–16
- (Trigeorgis 1993) TRIGEORGIS, Lenos: Real Options and Interactions with Financial Flexibility. In: *Financial Management* 22 (1993), Nr. 3, S. 202–224
- (Trigeorgis 2001) TRIGEORGIS, Lenos: Real Options: An Overview. In: SCHWARTZ, Eduardo S. (Hrsg.) ; TRIGEORGIS, Lenos (Hrsg.): *Real Options and Investment under Uncertainty: Classical Readings and Recent Contributions*. Cambridge : MIT Press, 2001, S. 103–134
- (Trigeorgis & Tsekrekos 2018) TRIGEORGIS, Lenos ; TSEKREKOS, Andrianos E.: Real Options in Operations Research: A Review. In: *European Journal of Operational Research* 270 (2018), Nr. 1, S. 1–24
- (Truong et al. 2008) TRUONG, Giang ; PARTINGTON, Graham ; PEAT, Maurice: Cost-of-Capital Estimation and Capital-Budgeting Practice in Australia. In: *Australian Journal of Management* 33 (2008), Nr. 1, S. 95–121
- (Tsekrekos 2010) TSEKREKOS, Andrianos E.: The Effect of Mean Reversion on Entry and Exit Decisions under Uncertainty. In: *Journal of Economic Dynamics & Control* 34 (2010), apr, Nr. 4, S. 725–742
- (Tseng & Barz 2002) TSENG, Chung-Li ; BARZ, Graydon: Short-Term Generation Asset Valuation: A Real Options Approach. In: *Operations Research* 50 (2002), Nr. 2, S. 297–310
- (Tseng & Lin 2007) TSENG, Chung-Li ; LIN, Kyle Y.: A Framework Using Two-Factor Price Lattices for Generation Asset Valuation. In: *Operations Research* 55 (2007), Nr. 2, S. 234–251
- (Tuttle 1901) TUTTLE, Charles A.: The Fundamental Economic Principle. In: *Quarterly Journal of Economics* 15 (1901), Nr. 2, S. 218–253
- (Tvedt 2022) TVEDT, Jostein: Optimal Entry and Exit Decisions Under Uncertainty and the Impact of Mean Reversion. In: *SN Operations Research Forum* 3 (2022), December, Nr. 4, S. 1–21

- (Vahs & Schäfer-Kunz 2007) VAHS, Dietmar ; SCHÄFER-KUNZ, Jan: Einführung in die Betriebswirtschaftslehre. 5. Stuttgart : Schäffer-Pöschel, 2007
- (Walter 2006) WALTER, Rolf: Geschichte der Weltwirtschaft - Eine Einführung. Böhlau Verlag, 2006. – S. 1–257
- (Wang 2010) WANG, George Y.: A Dynamic Programming Approach to Real Option Valuation in Incomplete Markets. In: 2010 Third International Conference on Business Intelligence and Financial Engineering, 2010, S. 146–151
- (de Weck et al. 2003) WECK, Olivier de ; NEUFVILLE, Richard de ; CHAIZE, Mathieu: Enhancing the Economics of Communication Satellites via Orbital Reconfigurations and Staged Deployment. In: AIAA Space Conference and Exposition (2003), S. 1–14
- (Welling 2013) WELLING, Andreas: Strategien externen Unternehmenswachstums: Ein spieltheoretischer Realoptionenansatz. Wiesbaden : Springer Gabler, 2013
- (Welling 2016) WELLING, Andreas: The Paradox Effects of Uncertainty and Flexibility on Investment in Renewables under Governmental Support. In: European Journal of Operational Research 251 (2016), Nr. 3, S. 1016–1028
- (Welling et al. 2015) WELLING, Andreas ; LUKAS, Elmar ; KUPFER, Stefan: Investment Timing under Political Ambiguity. In: Journal of Business Economics 85 (2015), Nr. 9, S. 977–1010
- (Weron 2014) WERON, Rafal: Electricity Price Forecasting: A Review of the State-Of-The-Art with a Look into the Future. In: International Journal of Forecasting 30 (2014), Nr. 4, S. 1030–1081
- (Wickart & Madlener 2007) WICKART, Marcel ; MADLENER, Reinhard: Optimal Technology Choice and Investment Timing: A Stochastic Model of Industrial Cogeneration vs. Heat-only Production. In: Energy Economics 29 (2007), Nr. 4, S. 934–952
- (Willershausen 2008) WILLERSHAUSEN, Timo: Marktwertorientierte Bewertung von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten - Eine Realoptionstheoretische Analyse. Tectum Verlag, 2008. – S. 1–249
- (Wilmott 2013) WILMOTT, Paul: Paul Wilmott Introduces Quantitative Finance. 2. Wiley, 2013. – S. 1–728

- (Wilmott et al. 1993) WILMOTT, Paul ; DEWYNNE, Jeff ; HOWISON, Sam: Option Pricing Mathematical Models and Computation. Oxford Financial Press, 1993. – S. 1–455
- (Wöhe & Döring 2010) WÖHE, Günter ; DÖRING, Ulrich: Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 24. Verlag Franz Vahlen München, 2010. – S. 1–1083
- (Würfel 2017) WÜRFEL, Philip: Unter Strom - Die Neuen Spielregeln der Stromwirtschaft. 2. Springer, 2017 (47). – S. 1–297
- (Yu et al. 2007) YU, Chia-Feng ; CHANG, Ta-Cheng ; FAN, Chinn-Ping: FDI timing: Entry cost subsidy versus tax rate reduction. In: Economic Modelling 24 (2007), Nr. 2, S. 262–271
- (Zantow et al. 2016) ZANTOW, Roger ; DINAUER, Josef ; SCHÄFFLER, Christian: Finanzwirtschaft des Unternehmens: Die Grundlagen des modernen Finanzmanagements. 3. Hallbergmoos : Pearson S, 2016. – S. 1–624
- (Zhang et al. 2016) ZHANG, M. M. ; ZHOU, P. ; ZHOU, D. Q.: A Real Options Model for Renewable Energy Investment with Application to Solar Photovoltaic Power Generation in China. In: Energy Economics 59 (2016), S. 213–226
- (Zöphel et al. 2018) ZÖPHEL, Christoph ; SCHREIBER, Steffi ; MÜLLER, Theresa ; MÖST, Dominik: Which Flexibility Options Facilitate the Integration of Intermittent Renewable Energy Sources in Electricity Systems? In: Current Sustainable/Renewable Energy Reports 5 (2018), S. 37–44