Freie Universität Berlin

Volkswirtschaftliche Bewertung öffentlicher Investitionen

Giacomo Corneo

Fachbereich Wirtschaftswissenschaft
Diskussionsbeiträge

Economics

2015/12

Volkswirtschaftliche Bewertung öffentlicher Investitionen

Giacomo Corneo*

April 2015

*Freie Universität Berlin, CEPR, London, CESifo, München, IMK, Düsseldorf, IZA, Bonn.
Ich bedanke mich bei Frank Neher für wertvolle Kommentare.

Zusammenfassung

Drei Probleme der Risikobewertung bei öffentlichen Investitionen werden behandelt. Erstes Thema ist die Frage nach der richtigen Diskontrate bei unsicherem Wirtschaftswachstum. Zentrales Ergebnis ist, dass die übliche Ramsey-Gleichung bei Unsicherheit keine Gültigkeit mehr hat und einer bestimmten Korrektur bedarf. Die zweite Frage betrifft die Bewertung riskanter Investitionsprojekte mittels Sicherheitsäquivalente. Sowohl für kleine als auch für große Risiken werden praktikable Ansätze für die Bestimmung der Sicherheitsäquivalente vorgestellt. Das dritte Problem ist die Ermittlung des optimalen Zeitpunkts einer öffentlichen Investition, wenn sich die Projektunsicherheit in Zeitverlauf ändert. Es zeigt sich, dass die traditionelle Entscheidungsregel der Kosten-Nutzen-Analyse - investiere, wenn der Nettogegenwartswert positiv ist - in Situationen dieser Art irreführend ist. Eine Formel der optimalen Wartezeit für die Realisierung eines Investitionsvorhabens wird dann hergeleitet.

1 Einleitung

Die Kosten-Nutzen-Analyse (KNA) liefert dem öffentlichen Entscheidungsträger eine Vielzahl von Instrumenten, die ihm helfen können, seine Investitionsentscheidungen im Sinne des Gemeinwohls zu treffen. Eine zentrale Frage bei der volkswirtschaftlichen Bewertung öffentlicher Investitionen betrifft die Berücksichtigung von Risiko. Hierzu soll die KNA praktikable Verfahren entwickeln, die den Besonderheiten der öffentlichen Investitionen Rechnung tragen. Ansonsten droht eine unkritische Übernahme von Verfahren aus der privaten Investitionsrechnung, die typischerweise auf einer Effizienthypothese bezüglich der Finanzmärkte basieren, mit der den Besonderheiten der öffentlichen Investitionen Rechnung nicht getragen wird.

In diesem Beitrag werde ich einige methodische Aspekte der Bewertung von Risiko bei öffentlichen Investitionenen erörtern. Drei Klassen von Problemen werden behandelt:

Das erste Bewertungsproblem betrifft die Unsicherheit des künftigen Wirtschaftswachstums und die Implikationen dieser Unsicherheit für die Wahl der Diskontrate. Die Relevanz dieses Problems ergibt sich aus der Langlebigkeit der Infrastruktur, welche bedeutet, dass die Diskontierung einen großen Einfluss auf die Entscheidungsfindung hat. Für solchen Fälle gilt es daher, ein Diskontierungsverfahren zu entwickeln, das die lange Frist korrekt bewertet und die entsprechende Unsicherheit bezüglich der allgemeinen wirtschaftlichen Entwicklung berücksichtigt. Abschnitt 2 dieses Beitrags untersucht deshalb die Frage nach der richtigen Diskontrate, wenn Projekte besonders langlebig sind und das Wirtschaftswachstum unsicher ist. Es zeigt sich, dass die übliche Ramsey-Gleichung in diesem Rahmen keine Gültigkeit mehr besitzt und auf eine bestimmte Weise angepasst werden muss.

Das zweite Bewertungsproblem betrifft die Unsicherheit der Nettonutzen öffentlicher Investitionen, wenn ein systematisches Risiko vorliegt. Im Rahmen einer KNA soll in solchen Fällen die Bewertung mittels der Ermittlung von Sicherheitsäquivalenten erfolgen; dabei soll man zwischen kleinen und großen Risiken unterscheiden. In Abschnitt 3 wird zunächst die Ermittlung der Sicherheitsäquivalente bei kleinen Risiken mit und ohne systematischem Risiko kurz dargestellt. Kern des Abschnitts stellt die Bewertung großer Risiken dar. Dabei präsentiere ich einige Ansätze, wie das Sicherheitsäquivalent mit vergleichsweise kleinem Aufwand ermittelt werden kann.

Das dritte Bewertungsproblem betrifft die Entwicklung der Unsicherheit im Zeitverlauf und die Implikationen dieser Entwicklung für die Auswahl des Zeitpunkts einer öffentlichen Investition. Diese Frage stellt sich sobald die öffentliche Investition mit bedeutsamen versunkenen Kosten einhergeht und eine allmähliche Auflösung von technologischer, sozialer und politischer Unsicherheit im Zeitablauf stattfindet. In solchen Situationen sollte die öffentliche Hand abwägen, ob ein Infrastrukturprojekt sofort oder zu einem zukünftigen Zeitpunkt durchgeführt werden sollte. Abschnitt 4 zeigt, dass die traditionelle Entscheidungsregel der KNA - investiere, wenn der Nettogegenwartswert positiv ist - in Situationen dieser Art irreführend sein kann. Des Weiteren wird eine Formel hergeleitet, mit der die optimale Wartezeit für die Realisierung staatlicher Vorhaben ermittelt werden kann.

Der vorliegende Beitrag bringt neuere Forschungsergebnisse der Literatur zur volkswirtschaftlichen Bewertung öffentlicher Investitionen zusammen und präsentiert einige neue Resultate. Die drei Themen wurden nicht nur wegen ihrer praktischen Relevanz, sondern auch wegen des Eindrucks gewählt, dass sie in der Praxis bisher vergleichsweise wenig Beachtung gefunden haben.

2 Diskontierung für langlebige Infrastruktur

In modernen Volkswirtschaften stellt der Staat den Großteil der Infrastruktur bereit. Im Laufe von Infrastrukturprojekten fallen Nutzen und Kosten zu unterschiedlichen Zeitpunkten an. Voraussetzung für eine rationale Entscheidungsfindung ist deshalb eine angemessene zeitliche Homogenisierung dieser Größen. Dies wirft die Frage auf, wie der

Staat die Nutzen und Kosten von Infrastrukturprojekten diskontieren soll.

Charakteristisch für Infrastrukturprojekte ist, dass ihre Lebensdauer mehrere Dekaden beträgt. Für derartig langgestreckte Planungshorizonte liefert das Marktssystem keine verlässlichen Signale über den ökonomischen Wert der Zeit: Liquide Wettbewerbsmärkte für Finanztitel mit einer Frist von mehr als dreißig Jahren existieren praktisch nicht. Die zeitliche Homogenisierung der Nettonutzen aus langlebigen Infrastrukturprojekten muss somit andere Knappheitssignale als die Marktzinsen verwenden. Genau für solche Fälle ist der Ansatz der *sozialen Zeitpräferenzrate* entwickelt worden.[1] Dabei werden die Nettonutzen des betrachteten Projekts wie Konsumgrößen interpretiert, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten den Privathaushalten zur Verfügung stehen. Diese Konsumgrößen werden dann entsprechend der Grenzrate der Substitution zwischen heutigem und künftigem Konsum bewertet.

Die Herleitung des Diskontsatzes unter Rückgriff auf das Konzept der sozialen Zeitpräferenzrate führt unter relativ milden Annahmen zur berühmten *Ramsey-Gleichung*, die wie folgt aussieht:

$$d = \rho + g\eta. \tag{1}$$

Wobei d den Diskontsatz bezeichnet, ρ die reine Zeitpräferenz in der sozialen Wohlfahrtsfunktion ist und $g\eta$ das Produkt aus der Wachstumsrate des Pro-Kopf-Konsums (g) und der Elastizität des Grenznutzens (η) darstellt.

Bei langlebigen Infrastrukturprojekten wirft aber die Quantifizierung von g schwierige Fragen auf, denn zum Punkt der Entscheidungsfindung kennt man den Wachstumspfad der Wirtschaft nach Inbetriebsnahme der Infrastruktur nicht. Diese Unsicherheit ist beträchtlich. So hat die Erfahrung seit dem Beginn der industriellen Revolution gezeigt, dass Prognosen über das langfristige Wirtschaftswachstum - also über g - immer wieder mit großen Fehlern behaftet waren. Dies liegt an der Unsicherheit über den technis-

[1] Siehe z. B. Corneo (2012, Kap. XII).

chen Fortschritt sowie an der Möglichkeit, dass von Menschen oder Natur verursachte Umwälzungen das Wirtschaftswachstum nachhaltig verändern. Da solche Unsicherheiten mit dem Planungshorizont zunehmen, betrifft dieses Problem insbesondere die Investitionen in Infrastruktur. Wie soll also dieser Unsicherheit Rechnung getragen werden? In der Ramsey-Gleichung geht man von einer sicheren Wachstumsrate aus; sollte man einfach die sichere Wachstumsrate durch ihren Erwartungswert ersetzen?

In diesem Abschnitt werde ich eine modifizierte Ramsey-Gleichung bei unsicherem Wachstum herleiten und erläutern. Auf dem Weg dahin stelle ich den deterministischen Fall dar, sprich die üblicherweise betrachtete Situation, in der die künftige Wachstumsrate als mit Sicherheit bekannt angenommen wird. Dies wird die Interpretation des stochastischen Falls erleichtern.

2.1 Der Fall sicheren Wirtschaftswachstums

Ein Investitionsprojekt im Infrastrukturbereich verringere heute (zum Zeitpunkt $t = 0$) den (pro-Kopf) Konsum um eine Einheit, erhöhe aber den morgigen Konsum (zum Zeitpunkt $t = 1$) um einen bestimmten Betrag. Um den Diskontsatz zu ermitteln, mit dem ein solches Projekt zu bewerten ist, betrachten wir ein hypothetisches Projekt, bei dem die Gesellschaft genau indifferent ist, ob sie es durchführt oder nicht. Da dieses Projekt eine Einheit kostet und eine Periode dauert, beträgt sein Ertrag genau $1 + d$, wobei d der gesuchte Diskontsatz ist. Ich bezeichne dieses hypothetische Projekt als "das kritische Projekt".

Die Präferenzen der Gesellschaft werden durch eine soziale Wohlfahrtsfunktion abgebildet, die wir für diesen einfachen Fall wie folgt schreiben können:

$$W = u(c_0) + \frac{u(c_1)}{1+\rho}.$$

Hierbei steht c_t für den Pro-Kopf-Konsum in der Periode $t \in \{0, 1\}$ und u für eine streng monoton steigende Nutzenfunktion. Der positive Parameter ρ bezeichnet die reine Zeitpräferenz in der sozialen Wohlfahrtsfunktion (Pearce und Ulph, 2001; Stern, 2006).

Wir unterstellen, dass d klein in Relation zu c ist. Die Auswirkung des betrachteten kritischen Projekts auf die soziale Wohlfahrt lässt sich somit approximieren durch

$$\Delta W \approx -u'(c_0) + \frac{u'(c_1)}{1+\rho}(1+d). \tag{2}$$

Da es sich um ein Projekt handelt, bei dem die Gesellschaft indifferent ist, ob es durchgeführt wird, muss $\Delta W = 0$ sein. Aus Gleichung (2) wird dann

$$u'(c_0) \approx u'(c_1)e^{d-\rho}. \tag{3}$$

Dabei habe ich die Approximationsregel benutzt, nach der $1 + x \approx e^x$ gilt. Äquivalent zu (3) ist die Schreibweise

$$d - \rho \approx \ln\left(\frac{u'(c_0)}{u'(c_1)}\right). \tag{4}$$

Nun unterstellen wir zur Vereinfachung eine beliebige isoelastische Nutzenfunktion,

$$u(c) = \frac{c^{1-\eta} - 1}{1-\eta}, \tag{5}$$

wobei η die Elastizität des Grenznutzens ist.[2] Man beachte, dass

$$\lim_{\eta \to 1} u(c) = \ln(c),$$

ein Ergebnis, das aus der Anwendung der L'Hôpital-Regel resultiert.

Wenn der Nutzen isoelastisch ist, wird Gleichung (4) zu

$$d - \rho \approx \eta \ln\left(\frac{c_1}{c_0}\right).$$

[2] Monoton streng steigende Transformationen von (5) führen zu den gleichen Ergebnissen.

Im Logarithmus steht implizit der Wachstumsfaktor des Konsums, denn es gilt $c_1 = (1+g)c_0$. Unter erneuter Verwendung der oben benutzten Approximationsregel gelangen wir endlich zu

$$d - \rho \approx \eta g$$

bzw. zur Ramsey-Gleichung (1). Die Frage ist nun, wie diese Formel modifiziert werden soll, wenn die Wachstumsrate unsicher ist.

2.2 Der Fall unsicheren Wirtschaftswachstums

Wenn die Wachstumsrate des Konsums unsicher ist, wird eine geeignete Modellierung des Konsumspfads als Zufallsvariable benötigt. Die Literatur verwendet hierfür sogenannte *stochastische Prozesse* (Karlin und Taylor, 1975). Um der exponentiellen Natur des Konsumspfads Rechnung zu tragen, bietet sich an, die Zeit als stetige Größe und den Konsum als *geometrische Brownsche Bewegung* zu modellieren:

$$dc = gc \cdot dt + \sigma c \cdot dz, \tag{6}$$

wobei g und σ dem Entscheidungsträger bekannte Parameter sind und $dz = \epsilon_t \sqrt{dt}$ das Inkrement eines Wiener-Prozesses ist, d.h.

$$\epsilon_t \sim N(0,1)$$

und

$$E[\epsilon_t \epsilon_s] = 0 \qquad \forall s \neq t.$$

Somit haben wir unterstellt, dass

$$E[dc] = gE[c]dt$$

oder äquivalent,

$$E\left[\frac{dc}{dt}\right] = gE[c].$$

Daher gilt für diesen stochastischen Prozess, dass

$$E[c_t] = c_0 e^{gt},$$

d.h. $g = \ln(E[c_1]) - \ln(c_0)$ bezeichnet nun *die Wachstumsrate des Erwartungswerts des Konsums.*[3]

Betrachten wir nun die Entwicklung des Logarithmus des Konsums, $\ln c \equiv F$. Aus (6) und unter Verwendung von Ito's Lemma erhalten wir

$$dF = \frac{gc}{c}dt - \frac{\sigma^2 c^2}{2c^2}dt + \frac{\sigma c}{c}dz,$$

oder

$$dF = \mu \cdot dt + \sigma \cdot dz, \tag{7}$$

wobei $\mu \equiv g - (\sigma^2/2)$. Dementsprechend verhält sich der logarithmierte Konsum wie eine Brownsche Bewegung mit Drift. Aus (7) folgt dann, dass

$$E[\Delta F] = \mu \Delta t$$

und insbesondere

$$E[\ln c_1 - \ln c_0] = \mu. \tag{8}$$

Somit ist μ *der Erwartungswert der Wachstumsrate des Konsums* $y \approx \ln(1 + y) \equiv \ln c_1 -$

[3] Barro (2006) zeigt, dass eigentlich auch über die langfristige Wachtumsrate eine erhebliche Unsicherheit herrscht. Für eine Analyse der Diskontierung bei einer solchen Unsicherheit siehe Gollier (2012) und Weitzman (2012).

$\ln c_0$:

$$\mu \approx E[y].$$

Analog folgert man aus (7), dass

$$Var[\Delta F] = \sigma^2 \Delta t$$

und

$$Var[y] \approx \sigma^2.$$

Somit ist die Annahme des stochastischen Prozesses (6) äquivalent zur Annahme, dass die Wachstumsrate des Konsums $y_t \sim N(\mu, \sigma^2)$ ist. Das ist eine gängige Annahme in der Finanzliteratur (z.B. Shreve, 2004). Unter dieser Annahme soll nun der Diskontsatz für die KNA langlebiger Infrastruktuprojekte hergeleitet werden.

Erneut betrachten wir ein kritisches Investitionsprojekt, das zum Zeitpunkt $t = 0$ den (pro-Kopf) Konsum um eine Einheit verringert und ihn zum Zeitpunkt $t = 1$ genau um $1 + d$ erhöht, womit die Gesellschaft genau indifferent ist, ob das Investitionsprojekt durchgeführt wird oder nicht. Die erwartete soziale Wohlfahrtsfunktion schreiben wir nun unmittelbar als:

$$E[W] = u(c_0) + e^{-\rho} E[u(c_1)].$$

Da das betrachtete Projekt die erwartete soziale Wohlfahrt weder erhöht noch verringert, muss

$$-u'(c_0) + e^{-\rho+d} E[u'(c_1)] \approx 0 \tag{9}$$

gelten.

Erneut nehmen wir die isoelastische Nutzenfunktion (5) an. Unter Unsicherheit entspricht die Elastizität des Grenznutzens η der *relativen Risikoaversion*, $-cu''(c)/u'(c)$, des repräsentativen Individuums der betrachteten Gesellschaft (De Finetti, 1952; Arrow, 1963; Pratt, 1964). Der empirische Befund dazu ist zwar uneinheitlich, aber unterstützt insgesamt die Hypothese, dass sich die relative Risikoaversion mit dem Konsum wenig ändert. Dabei wird oft ein Wert von η zwischen 1 und 2 als plausibel erachtet (Quiggin, 2005; Chetty, 2006).

Aus (9) und der Annahme konstanter relativer Risikoaversion folgert man:

$$e^{\rho-d} = \frac{E[c_1^{-\eta}]}{c_0^{-\eta}} = \frac{E[c_0^{-\eta}e^{-y\eta}]}{c_0^{-\eta}} = E[e^{-\eta y}]. \tag{10}$$

Diese Gleichung zeigt, dass die Ramsey-Gleichung (1) dem Spezialfall $\sigma = 0$ entspricht. In diesem Spezialfall ergibt sich nämlich $y = g = \mu$ und (10) liefert den gleichen Diskontsatz wie (1). Um den allgemeinen Fall zu lösen, muss hingegen der Erwartungswert $E[e^{-\eta y}]$ ermittelt werden.

Um die Diskontrate herzuleiten, verwenden wir nun das oben gezeigte Ergebnis, daß $y_t \sim N(\mu, \sigma^2)$. Wir erhalten dann:

$$E[e^{-\eta y}] = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int e^{-\eta y} e^{\frac{-(y-\mu)^2}{2\sigma^2}} dy = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int e^{\frac{-y^2+2\mu y-2\eta\sigma^2 y-\mu^2}{2\sigma^2}} dy.$$

Durch Aufspaltung des Exponents im obigen Integral und geschickte Umformung ergibt sich:

$$E[e^{-\eta y}] = e^{-\eta\left(\mu-\frac{\eta\sigma^2}{2}\right)} \cdot \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int e^{\frac{-[y-(\mu-\eta\sigma^2)]^2}{2\sigma^2}} dy.$$

Der zweite Term im Produkt auf der rechten Seite dieser Gleichung ist das Integral der Dichtefunktion einer normalverteilten Zufallsvariable - und somit gleich Eins. Daher gilt

$$E[e^{-\eta y}] = e^{-\eta\left(\mu-\frac{\eta\sigma^2}{2}\right)}.$$

Setzt man diesen Erwartungswert in (10) ein, erhält man

$$\rho - d = -\eta\left(\mu - \frac{\eta\sigma^2}{2}\right).$$

Hieraus ergibt sich der gesuchte Diskontsatz als

$$d = \rho + \eta\mu - \frac{\eta^2\sigma^2}{2}. \tag{11}$$

Alternativ können wir den Zusammenhang $\mu = g - (\sigma^2/2)$ benutzen und den Diskontsatz als Funktion der Wachstumsrate des Erwartungswerts des Konsums ausdrücken:

$$d = \rho + \eta g - \frac{\eta(1+\eta)\sigma^2}{2}. \tag{12}$$

Diese Formeln zeigen, dass die erforderliche Anpassung der Ramsey-Gleichung im Fall von unsicherem Wirtschaftswachstum subtil ist (Gollier, 2002 und 2013). Der einfache Ersatz der sicheren Wachstumsrate durch ihren Erwartungswert ist nämlich verfehlt: Die richtige Diskontrate ist kleiner. Der Fehler steigt mit den Parametern σ^2 und η, welche jeweils die Unsicherheit und die Risikoaversion abbilden. Je größer sie sind, desto größer ist die erforderliche Verringerung der unkorrigierten Diskontrate.

Der ökonomische Grund für dieses Ergebnis ist der Wunsch nach einer Vorsorge: Bei unsicherem Wirtschaftswachstum verringert eine Investition das Risiko eines niedrigen Konsumniveaus in der Zukunft und erfüllt dadurch eine Versicherungsfunktion. Die im Vergleich zur Ramsey-Gleichung verringerte Diskontrate erleichtert die Investitionsentscheidung und trägt dem Vorsichtsmotiv des Entscheidungsträgers Rechnung.[4]

Kommen wir nun zur sich hier anschließenden Frage der Quantifizierung der Effekte der Wachstumsunsicherheit. Im Vergleich zur traditionellen Ramsey-Gleichung, benötigen die Formeln (11) und (12) zusätzlich eine Quantifizierung von der Standardabweichung der Wachstumsrate des Pro-Kopf-Konsums, σ. Dafür verwendet die Literatur in der Regel Zeitreihen über den beobachteten Konsumpfad. Hieraus ergeben sich für entwickelte Volkswirtschaften vergleichsweise geringe Schätzwerte für σ. Beispielsweise findet Gollier (2011) für Deutschland auf der Grundlage von jährlichen Makrodaten der Periode 1969-

[4] Man merke, dass der Ausdruck $1+\eta$ in (12) dem Konzept von *prudence* entspricht. Gemäß Kimball (1990) wird prudence als $-cu'''(c)/u''(c)$ definiert.

2010, dass $\sigma = 1,83\%$ beträgt. Dies führt zu einer sehr kleinen Korrektur der Diskontrate: Der Term $\eta(1+\eta)\sigma^2/2$ beträgt nur 0,03%, wenn $\eta = 1$ ist und nur 0,1%, wenn $\eta = 2$ ist.

Gollier (2011) bietet aber auch eine zweite Methode zur Schätzung von σ an. Anstatt getrennt für jedes Land einzeln, wird nun σ für alle Länder im Rahmen einer Querschnittsbetrachtung von vierzigjährigen Perioden wirtschaftlicher Entwicklung geschätzt. Mit diesem Ansatz gelangt er zu wesentlich höheren Schätzwerten für σ, denn im Ländervergleich sind die langfristigen Wachstumsperformances sehr disparat. Wendet man diese Schätzmethode an, gewinnt das Vorsichtsmotiv stark an Bedeutung und die ermittelte Diskontrate d ist klein: Bei $\eta = 2$ findet Gollier anhand von (12) und Daten für einen Querschnitt von 190 Länder, dass d nur $0,67\%$ beträgt.

Was ist die praktische Bedeutung dieser Befunde? Letzten Endes sollte σ die bestmögliche Einschätzung der Standardabweichung der Wachstumsrate über *die kommenden* Jahrzehnte darstellen. Die Verwendung der beiden oben beschriebenen Ermittlungsverfahren kann dabei helfen, grobe Fehler bei der Ermittlung der Diskontrate zu vermeiden. Für die Formulierung der bestmöglichen Einschätzung sollten aber auch alle anderen möglichen relevanten Informationen über die Zukunft verwendet werden. Ähnlich wie für die Festlegung der anderen Variabeln der Ramsey-Gleichung könnte auch σ in regelmäßigen Abständen von einer Expertenkommission festgesetzt werden, die verschiedene Methoden verwendet und eine wohlüberlegte und transparente Abwägung vornimmt. Hierzu würden nicht nur Zeitreihen- und Querschnittsmethoden zählen, sondern auch modellbasierte Simulationsrechnungen.

3 Bewertung riskanter Projekte

Nicht nur das Wirtschaftswachstum, sondern auch der Nettonutzen der einzelnen Investitionsprojekte der öffentlichen Hand ist üblicherweise unsicher. Zum Zeitpunkt der Entscheidungsfindung weiß die öffentliche Hand oft nicht, ob ein in Frage kommendes Projekt einen großen oder einen kleinen Nutzen stiften wird. Dies ist z. B. der Fall bei Infrastrukturen, die von Katastrophenereignissen (z.B. einer Überschwemmung) zerstört werden können. So können Projekten mit gleichem erwartetem Nettonutzen für die Gesellschaft sehr unterschiedliche Risikoeigenschaften haben. Diese Art von Situationen stellt die KNA vor die Frage, wie Projektrisiken bewertet werden sollten.

Ist ein Projekt risikobehaftet, kann man vorab seinen Nettonutzen nicht durch feste Größen beschreiben. Der jeweilige jährliche Nettonutzen stellt vielmehr vom Standpunkt des Entscheidungsträgers eine Zufallsvariable dar. Diese ordnet jedem ex-ante möglichen Zustand eine Wahrscheinlichkeit und den Wert des Nettonutzens in diesem Zustand zu.

Ein naheliegender Bewertungsansatz besteht darin, dass man den Erwartungswert des Nettonutzens eines Projekts in jedem Jahr ermittelt und diese Erwartungswerte dann benutzt, um den Gegenwartswert ("Net Present Value") des Projekts zu bestimmen (Arrow und Lind, 1970). Diese Vorgehensweise entspricht der optimalen Entscheidungsfindung eines risikoneutralen Investors, da die Streuung der möglichen Erträge des Projekts bei dieser Vorgehensweise überhaupt keine Rolle spielt. Bei öffentlichen Projekten sollte aber die Entscheidung im Sinne der Gesellschaft getroffen werden, welche überwiegend aus risikoscheuen Menschen besteht. Dies suggeriert, dass der Rückgriff auf den Erwartungswert zu einer fehlerhaften Bewertung führen würde (Foldes und Rees, 1977). Grundsätzlich soll nicht der Erwartungswert, sondern das *Sicherheitsäquivalent* des Nettonutzens in die Ermittlung des Gegenwartswerts der Investitionsprojekte einfließen.[5]

Dieser Abschnitt liefert daher einen Überblick der zentralen Methoden zur Ermittlung von Sicherheitsäquivalenten. Eine grundsätzliche Einsicht ist, dass das Bewertungsverfahren davon abhängen soll, ob das Projekt ein *kleines* oder ein *großes Risiko* darstellt. Dabei werde ich mich vorwiegend der Betrachtung von sogenannten großen Risiken widmen, deren Definition in Kürze erfolgen wird. Der Grund für dieses Vorgehen beruht auf

[5] Die konkurrierende Sichtweise, die auf Hirshleifer (1966) zurückgeht, ist dass riskante öffentliche Investitionen genau wie private riskante Investitionen bewertet werden sollten. Hierfür sollte man die Preise von entsprechenden Finanztiteln heranziehen. Um diese konkurrierende Sichtweise zu rechtfertigen, braucht man ausgeprägt optimistische Annahmen über die Effizienz von Finanzmärkten (Rees, 1982; Quiggins 2005). Siehe auch Beckers et al. (2009) für eine ausführliche Diskussion.

der Tasache, dass die Methode zur Bewertung kleiner Risiken vergleichsweise gut bekannt ist.

3.1 Sicherheitsäquivalente

Betrachten wir der Einfachheit halber ein Projekt, das eine Lebensdauer von einem Jahr aufweist, so dass Fragen der Diskontierung ausgeklammert bleiben können. Das betrachtete Projekt stifte dem repräsentativen Individuum einen unsicheren Nettonutzen in Höhe von y in Geld gemessenen Konsumeinheiten. Ich bezeichne die Variable y als *das Einkommen des Projekts*. Durch das Projekt steigt das Konsumniveau des Individuums auf $c + y$. Dabei steht c für das Konsumniveau des repräsentativen Individuums ohne Durchführung des Projekts. Ich nenne diese Variable auch *sonstiges Einkommen*.

Das unsichere Einkommen des Projekts wird mit seinem Sicherheitsäquivalent bewertet. Das Sicherheitsäquivalent, das wir mit S bezeichnen, entspricht der *Äquivalenzvariation* des Projekts (Corneo, 2012):

$$E[u(c+S)] = E[u(c+y)]. \tag{13}$$

Während y eine Zufallsvariable ist, ist S eine deterministische Größe, die als Lösung der obigen Gleichung zu bestimmen ist.

Wenn das Individuum *risikoneutral* ist, ist die Nutzenfunktion u linear. In diesem Fall hat die obige Gleichung die Lösung $S = E[y]$: das Projekt ist dann mit seinem erwarteten Einkommen zu bewerten. Bei *Risikoaversion* ist u streng konkav und das Sicherheitsäquivalent weicht im Allgemeinen vom erwarteten Einkommen des Projekts ab.

Die implizite Gleichung (13) zeigt, dass die Ermittlung des Sicherheitsäquivalentes im Allgemeinen folgende drei Schritte beinhaltet: Erstens muss eine von Neumann-Morgenstern Nutzenfunktion u gewählt werden, welche die Risikopräferenzen des repräsentativen Individuums abbildet. Man beachte, dass aufgrund der formalen Eigenschaften des Erwartungswerts lineare Transformationen der Nutzenfunktion den Wert des Sicherheitsäquivalentes unverändert lassen. Zweitens muss die Dichtefunktion des Konsums sowohl im Status quo als auch bei Durchführung des Projekts angegeben werden; dadurch gewinnt man auch die gemeinsame Verteilung des Einkommens des Projekts und des sonstigen Einkommens. Drittens muss die Gleichung (13) nach S gelöst werden.

3.2 Kleines Risiko

Die Ermittlung des Sicherheitsäquivalentes gestaltet sich im Fall eines kleinen Risikos als vergleichsweise einfach. Diese Risikoeinstufung erfolgt, wenn die wohlfahrtsmäßigen Konsequenzen der Projektunsicherheit für die Bürger relativ geringfügig sind, da das Einkommen des einzelnen Projekts nur einen Bruchteil des individuellen Konsums darstellt und die Verteilung des sonstigen Einkommens von der Durchführung des Projekts praktisch unberührt bleibt. Kleines Risiko bedeutet nicht, dass das Projekt wenig Geld kostet. Selbst große Infrastrukturprojekte mit erheblichem Risiko können sachgerecht als "kleine Risiken" eingestuft werden, wenn ihr Risiko auf eine sehr große Anzahl von Individuen so verteilt wird, dass die Folgen für die Einzelnen gering sind - also bei einer effizienten Risikostreuung. Ein Beispiel dafür ist die Raumfahrt, die sehr kostspielig ist und deren Nutzen für die Menschheit höchst ungewiss sind. Ihre Kosten werden vom Staat getragen und durch sein Steuer-Transfer-System über Abermillionen von Individuen gestreut; das repräsentative Individuum trägt nur einen Bruchteil davon und die wohlfahrtsmäßigen Konsequenzen riskanter Raumfahrtsprojekte können für das einzelne Individuum daher als klein eingestuft werden.

Im Fall eines kleinen Risikos im obigen Sinne ist es akzeptabel, dass der Wohlfahrtseffekt des Projekts durch eine *Taylor-Entwicklung erster Ordnung* approximiert wird. Aus Gleichung (13) ergibt sich dann

$$S \cdot E[u'(c)] \simeq E[u'(c) \cdot y].$$

Durch Umformen und Anwendung der Definition der Kovarianz läßt sich das Sicherheitsäquivalent des Projekts ausdrücken wie:

$$S \simeq E[y] + \frac{Cov[u'(c), y]}{E[u'(c)]}. \tag{14}$$

Diese Formel zeigt, dass für die Bewertung kleiner riskanter Projekte nicht ihre Varianz, sondern ihre Kovarianz mit dem Grenznutzen des Konsums der Privathaushalte ausschlaggebend ist. Da dieser Grenznutzen eine monoton fallende Funktion des Konsums ist, verringert sich das Sicherheitsäquivalent mit größer werdender Kovarianz zwischen dem Einkommen des Projekts und dem sonstigen Einkommen des repräsentativen Individuums.

Die Intuition für dieses zentrale Ergebnis ist wie folgt. Eine positive Kovarianz bedeutet, dass das Projekt tendenziell genau in den Zuständen der Welt erfolgreich ist, in denen das sonstige Einkommen der Individuen vergleichsweise hoch ist. In diesem Fall trägt das Projekt relativ wenig zur Wohlfahrtssteigerung bei, da in diesen Zuständen der Grenznutzen vergleichsweise klein ist. Eine negative Kovarianz hat hingegen einen positiven Einfluss auf die Bewertung des Projekts, weil es die Schwankungen des sonstigen Einkommens kompensiert: Das Projekt ist tendenziell genau dann erfolgreich, wenn das sonstige Einkommen der Individuen vergleichsweise niedrig ist.

Im Spezialfall eines sicheren Konsumniveaus des repräsentativen Individuums ohne Durchführung des Projekts ist $Cov[u'(c), y] = 0$, weil $u'(c)$ deterministisch ist; gemäß der Formel (14) entspricht der volkswirtschaftliche Wert des Projekts seinem erwarteten Einkommen. Die Risikoaversion der Bürger übt in diesem Fall keinen Einfluss auf die Bewertung riskanter Projekte aus. Um diesen Sachverhalt darzulegen, sagen Ökonomen, dass bei kleinen Risiken die Unsicherheit ein Phänomen zweiter Ordnung ist.

Formel (14) lässt sich weiter vereinfachen, wenn wir von einer *konstanten relativen Risikoaversion*, $-cu''(c)/u'(c)$, ausgehen. Dann ist die Nutzenfunktion durch (5) gegeben und η entspricht dem Koeffizienten der relativen Risikoaversion. Wie bereits erwähnt, ein

Wert für η zwischen 1 und 2 erscheint plausibel.

Unter der Annahme einer konstanten relativen Risikoaversion vereinfacht sich (14) zu

$$S \simeq E[y] - \eta \frac{Cov[c, y]}{E[c]}, \tag{15}$$

man siehe z. B. die Herleitung in Corneo (2012). Wenn die Risiken des sonstigen Einkommens und des Einkommens des Projekts statistisch unabhängig voneinander sind, ist die Kovarianz in (15) gleich Null. Dann soll man das Projekt - trotz Unsicherheit uind Risikoavesion - durch den Erwartungswert seines Nettonutzens bewerten. Dieser Sachverhalt spiegelt erneut die Tatsache wider, dass bei kleinen Risiken die Risikoübernahme ein Phänomen zweiter Ordnung darstellt. Ökonomisch bedeutet dies, dass das Risiko des Projekts annähernd vollständig vernachlässigt werden kann, denn es wird effizient wegdiversifiziert.

Bei einer positiven Kovarianz geht indessen mit dem Projekt ein sogenanntes *systematisches Risiko* einher, das nicht vernachlässigt werden darf und zusätzlich die Unsicherheit der Individuen in Bezug auf ihren Wohlstand erhöht. Genau deshalb ist daher das Sicherheitsäquivalent kleiner als der Erwartungswert des Einkommens aus dem Projekt. Die entsprechende Verringerung ist umso größer, je ausgeprägter die Risikoaversion ist. Bei einer negativen Kovarianz ergibt sich der umgekehrte Sachverhalt: Die Durchführung des Projekts verringert die Einkommensunsicherheit. Somit ist der volkswirtschaftliche Wert des Projekts höher als sein Erwartungswert. Dies ist insbesondere bei Katastrophenabwehrmaßnahmen der Fall (Beckers *et al.*, 2009).

3.3 Großes Risiko

Leider deckt der Fall des kleinen Risikos nicht alle Investitionsvorhaben der öffentlichen Hand, die einer KNA unterworfen werden. Dies ist besonders offensichtlich im Fall der Entwicklungsländer: Große Infrastrukturprojekte z.B. im Energie- und Verkehrsbereich können in armen Ländern einen erheblichen Einfluss auf das Wirtschaftswachstum und das Pro-Kopf-Einkommen ausüben. Herrscht über die Folgen des Projekts für die Bürger beträchtliche Unsicherheit, ist das oben geschilderte Vorgehen zur Ermittlung der Sicherheitsäquivalente nicht mehr angebracht. Man spricht dann von einem "großen Risiko".

Ein weiteres Beispiel eines großen Risikos ist ein Projekt, das einen beachtlichen Anteil der Menge eines wohlfahrtsmäßig wichtigen und schwer substituierbaren Gutes - wie etwa Wasser - bereitstellt (Quiggins, 2005). Auch in solchen Fällen ist eine Risikobewertung anhand der Formeln (14) und (15) nicht mehr sinnvoll.

In großen entwickelten Volkswirtschaften, wie etwa Deutschland, sind die oben angeführten Beispiele von großen Risiken von geringem praktischem Interesse. Aus Sicht des repräsentativen Individuums können die allermeisten Infrastrukturprojekte als kleine Risiken betrachtet werden. Allerdings reicht oft die Perspektive des repräsentativen Individuums nicht aus, denn besondere Personengruppen sind häufig von öffentlichen Investitionen überdurchschnittlich betroffen und müssen ein beachtliches Risiko tragen. Dies macht die Problematik der großen Risiken auch für die entwickelten Volkswirtschaften relevant (Centre d'Analyse Stratégique, 2011). Hierzu betrachte man die folgenden drei Beispiele:

Beispiel I

Eine Tourismusregion sieht sich einer potentiellen Bedrohung von Waldbränden ausgesetzt. Der Touristenstrom in dieser Region hängt mit der Schönheit des Waldes zusammen. Der Staat könnte spezielle Flugzeuge kaufen, die bei der Bekämpfung von Waldbränden eingesetzt werden. Das Einkommen der kleinen Hoteliers und der übrigen Kleinunternehmen der lokalen Tourismusbranche hängt somit entscheidend vom Eintreten des Falls eines Waldbrandes und vom Kauf der speziellen Flugzeuge ab. Für diese Personengruppe beinhaltet die Entscheidung der öffentlichen Hand - die speziellen Flugzeuge zu kaufen - ein großes Risiko im obigen Sinne.

Beispiel II

Einige kleine Fischereien sind an einem See angesiedelt. Unter ungünstigen Bedingungen könnten Algen die Seeoberfläche so weit bedecken, dass der See umkippt und keine Fischerei mehr möglich ist. Der Staat könnte Kläranlagen am Seeufer installieren, die die Wahrscheinlichkeit des Umkippens beträchtlich verringern. Dadurch würde sich das Einkommensrisiko der Fischer stark verringern.

Beispiel III

Eine bisher relativ isolierte Gegend könnte durch den Bau einer neuen Verkehrsverbindung wesentlich leichter erreichbar sein. Dadurch würden Handelsbeziehungen und Tourismus ein beschleunigtes, aber unsicheres Wachstum erfahren. Die Preise der Immobilien und Grundstücke in dieser Gegend würden sich erheblich ändern. Baut der Staat die neue Verkehrsanbindung, tragen die lokalen Besitzer ein beachtliches Vermögensrisiko.

In diesen und ähnlich gelagerten Fällen, übt das Projekt für die besonders betroffene Personengruppe (Tourismusunternehmer, Fischer und Hausbesitzer in den drei Beispielen) selbst dann einen signifikanten Wohlfahrtseffekt aus, wenn das Risiko des Projekts statistisch unabhängig vom makroökonomischen Risiko ist (unsystematisches Risiko). Grund dafür ist die Ineffizienz der Finanzmärkte bzw. die Tatsache dass Versicherungsmärkte wegen ausgeprägter Informationsasymmetrien unvollständig sind.

Wie sollte nun die Risikoübernahme dieser Personengruppen im Rahmen der Projektsbewertung durch die öffentliche Hand berücksichtigt werden? Die jeweils besonders betroffene Personengruppe sollte in der KNA gesondert berücksichtigt werden und zwar unter der Annahme, dass für sie ein großes Risiko vorliegt. Demzufolge sollten die entsprechenden Sicherheitsäquivalente dieser großen Risiken separat ermitteln werden. Danach sollten sie zum Sicherheitsäquivalent für die restlichen Personen hinzuaddiert werden, für die die oben präsentierte Methode des kleinen Risikos Anwendung findet.

Wie sollen nun die Sicherheitsäquivalente bei großen Risiken ermittelt werden?

Wie oben erwähnt wurde, verlangt die Ermittlung des Sicherheitsäquivalentes, dass die Gleichung (13) nach S gelöst wird. Beispielsweise nimmt diese Gleichung im wichtigen

Spezialfall einer konstanten relativen Risikoaversion die folgende allgemeine Form an:

$$\sum_{\omega} p_{\omega} \left(c_{\omega} + S\right)^{1-\eta} - q = 0,$$

wobei p_{ω} die Wahrscheinlichkeit des Zustands ω ist, c_{ω} das Konsumniveau in diesem Zustand ohne Durchführung des Projekts und q eine Konstante ist. Um S zu finden, ist man in der Regel auf eine numerische Analyse der Gleichung angewiesen.

In der Folge sollen Ansätze geschildert werden, die die Ermittlung des Sicherheitsäquivalentes für eine beliebige Nutzenfunktion u vereinfachen können, ohne daß man auf numerische Methoden Rückgriff nehmen muss.

Als Einstieg in die Analyse dient der einfache Spezialfall, bei dem das sonstige Einkommen der Individuen, c, *deterministisch* ist. Da die Nutzenfunktion streng monoton ist, kann sie invertiert werden. Aus (13) erhält man dann die gesuchte Größe als:

$$S = u^{-1}(E[u(c+y)]) - c.$$

Nun betrachten wir den allgemeinen Fall, bei dem das sonstige Einkommen unsicher ist. Bei *zufallsbehaftetem* c empfiehlt Quiggin (2005, S. 30-31 und 61-63) folgendes naheliegendes Verfahren: Zuerst ermittle man das Sicherheitsäquivalent des Konsums $c+y$ und dasjenige des Konsums c. Dann definiere man das Sicherheitsäquivalent des Projekts wie die Differenz zwischen diesen beiden Sicherheitsäquivalenten.

Nun wollen wir zeigen, dass die von Quiggin vorgeschlagene Prozedur das Sicherheitsäquivalent S im Allgemeinen *nicht* exakt bestimmt. Sie ermittelt eigentlich eine Größe $\widetilde{S}$, die implizit durch folgende Gleichung definiert ist:

$$u\left(u^{-1}(E[u(c)]) + \widetilde{S}\right) = E[u(c+y)]. \tag{16}$$

Vergleicht man diese Gleichung mit der ursprunglichen Gleichung (13), sieht man, dass im Allgemeinen $S \neq \widetilde{S}$. Um zu zeigen, dass die Gleichung (16) dem vom Quiggin vorgeschlagenen Verfahren genau entspricht, definieren wir die hierzu benötigten Sicherheitsäquivalente K_0 und K_1 aus

$$u(K_0) = E[u(c)].$$

und

$$u(K_1) = E[u(c + y)].$$

Durch Einsetzen in (16) erhalten wir:

$$u\left(K_0 + \widetilde{S}\right) = u(K_1).$$

Daher gilt, dass $\widetilde{S} = K_1 - K_0$ ist. Dies entspricht dem von Quiggin (2005) empfohlenen Weg.

Nur im Falle, daß c deterministisch ist, gilt tatsächlich $\widetilde{S} = S$. Ist aber c stochastisch, ist dieses Verfahren mit einem Fehler behaftet. Wenn die Varianz von c mit dem Planungshorizont steigt, kann der Fehler für das Sicherheitsäquivalent in der fernen Zukunft groß werden. Für die KNA von langlebigen Infrastrukturprojekten kann es dann sinnvoll sein, die Robustheit der Ergebnisse anhand alternativer Verfahren zu erfassen. Diesen wenden wir uns jetzt zu.

3.3.1 Zwei Approximationen

In diesem Abschnitt werde ich zwei vereinfachende alternative Verfahren zur Ermittlung der Sicherheitsäquivalente bei einem unsicheren sonstigen Einkommen c vorschlagen.

Verfahren 1

Eine erste Möglichkeit nutzt die Approximation von $E[u(c + S)]$ durch eine *Taylor-*

Entwicklung zweiter Ordnung aus:

$$E[u(c+S)] \simeq E[u(c)] + SE[u'(c)] + \frac{S^2}{2}E[u''(c)].$$

Durch Einsetzen dieser Approximation in (13) ergibt sich,

$$\frac{S^2}{2}E[u''(c)] + SE[u'(c)] + E[u(c)] - E[u(c+y)] \simeq 0. \tag{17}$$

Diese ist eine quadratische Gleichung in S, die einfach zu lösen ist. Hat sie zwei unterschiedliche Lösungen, stellt die kleinere der beiden das gesuchte Sicherheitsäquivalent S dar.

Verfahren 2

Der zweite Vorschlag basiert auf einer Approximation von $E[u(c+S)]$ durch eine Taylor-Entwicklung erster Ordnung und einer Approximation von $E[u(c+y)]$ durch eine Taylor-Entwicklung zweiter Ordnung.

Um das Sicherheitsäquivalent zu ermitteln, hilft es, $c = \mu_c + z_c$ und $y = \mu_y + z_y$ zu definieren. Dabei gilt $\mu_c = E[c]$ und $\mu_y = E[y]$. Als z_c und z_y werden Zufallsvariablen mit einem Erwartungswert von Null und einer Varianz von σ_c^2 bzw. σ_y^2 bezeichnet. Ihre Kovarianz bezeichne man mit σ_{cy}. Nun können wir das Sicherheitsäquivalent über die Ermittlung der *Risikoprämie* $\pi = \mu_y - S$ herleiten.

Die Gleichung (13) können wir jetzt schreiben wie

$$E[u(c+\mu_y-\pi)] = E[u(c+y)]. \tag{18}$$

Aus den Taylor-Entwicklungen erhält man:

$$E[u(c+\mu_y-\pi)] \simeq u\left(\mu_c+\mu_y\right) + E\left[\left(z_c-\pi\right)u'\left(\mu_c+\mu_y\right)\right]$$

und

$$E[u(c+y)] \simeq u\left(\mu_c+\mu_y\right)+E\left[\left(z_c+z_y\right)u'\left(\mu_c+\mu_y\right)\right]+E\left[\frac{\left(z_c+z_y\right)^2}{2}u''\left(\mu_c+\mu_y\right)\right].$$

Durch Einsetzen der beiden in (18) ergibt sich

$$-\pi u'\left(\mu_c+\mu_y\right) \simeq E\left[z_c^2+2z_cz_y+z_y^2\right]\frac{u''\left(\mu_c+\mu_y\right)}{2}$$

und daraus wiederum die Risikoprämie

$$\pi \simeq \frac{-u''\left(\mu_c+\mu_y\right)}{2u'\left(\mu_c+\mu_y\right)}\left(\sigma_c^2+\sigma_{cy}+\sigma_y^2\right). \tag{19}$$

Im relevanten Spezialfall einer konstanten relativen Risikoaversion $\eta=-xu''(x)/u'(x)$ wird aus (19) die Risikoprämie zu:

$$\pi \simeq \frac{\eta\left(\sigma_c^2+\sigma_{cy}+\sigma_y^2\right)}{2\left(\mu_c+\mu_y\right)}. \tag{20}$$

Über diesen Weg gelangen wir somit zu folgender Formel für das Sicherheitsäquivalent:

$$S \simeq \mu_y-\frac{\eta\left(\sigma_c^2+\sigma_{cy}+\sigma_y^2\right)}{2\left(\mu_c+\mu_y\right)}. \tag{21}$$

Es ist interessant zu sehen, dass für den Spezialfall eines sicheren sonstigen Einkommens c - also $\sigma_c^2=\sigma_{cy}=0$ - Formel (20) der üblichen Formel für die Risikoprämie entspricht (Eeckhoudt *et al.*, 2005).

4 Lernen und Irreversibilität

Die Grundregel der KNA - wie auch der privaten Investitionsrechnung - besagt, dass ein Projekt genau dann vorteilhaft und durchzuführen ist, wenn sein Gegenwartswert ("Net Present Value") positiv ist. In der KNA ergibt sich dieser Gegenwartswert aus der Diskontierung der Nettonutzen des Projekts, sprich der in Geld gemessene Nutzen abzüglich der Kosten. Ist der Gegenwartswert echt positiv, sollte der Staat das Projekt durchführen.

Die Grundregel eines positiven Gegenwartswerts ist unvollständig in dem Sinne, daß sie keine Auskunft über *den Zeitpunkt* der Investition gibt. Streng genommen gilt sie nur in Situationen, in denen die Investitionsmöglichkeit nur zu einem bestimmten Zeitpunkt existiert und der Entscheidungsträger eine 0-1 Entscheidung treffen muss: Entweder investiert er zu dem entsprechenden Zeitpunkt oder er investiert nie, denn die Investitionsmöglichkeit verschwindet nach diesem Zeitpunkt. In Bezug auf öffentliche Investitionen ist dies aber eine eher seltene Situation. Üblicher ist der Fall, in dem der Staat durchaus die Möglichkeit hat, zu warten und ein bestimmtes Projekt zu einem späteren Zeitpunkt durchzuführen. Diese zeitliche Variabilität kann von großer Bedeutung sein, denn unter Umständen ist es für den Staat nicht optimal zu investieren, sobald er feststellt, dass der Gegenwartswert des Projekts positiv ist.

Die neuere Literatur zur Projektbewertung hat Situationen aufgezeigt, in denen trotz eines echt positiven Gegenwartswerts des Projekts die zeitliche Verschiebung seiner Realisierung optimal ist (Dixit und Pindyck, 1994, Centre d'Analyse Stratégique, 2011). Diese Situationen sind durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet:

1. Es besteht die Möglichkeit, das Projekt zu einem späteren Zeitpunkt durchzuführen.

2. Aufgrund beträchtlicher versunkener Kosten ist das einmal durchgeführte Projekt faktisch irreversibel.

3. Es herrscht Unsicherheit über die Nettonutzen vom Projekt und diese Unsicherheit verändert sich im Zeitablauf im Zuge der Gewinnung neuer Erkenntnisse.

Diesen Situationen wenden wir uns nun zu.

4.1 Ein Beispiel aus der Klimapolitik

Ein einfaches Gedankenexperiment möge die Relevanz der hier besprochenen Situationen verdeutlichen:

Eine staatliche Institution könnte ein Investitionsprojekt durchführen, das Schäden von Umweltkatastrophen verringert, die in erster Linie vom Klimawandel verursacht werden können. Im Bereich der derzeitigen klimapolitischen Diskussion handelt es sich somit um eine "adaptation policy". Nun kann der Klimawandel im Voraus nicht exakt vorhergesehen werden. Insbesondere hängt seine Intensität von Präventivmaßnahmen ab, die auf globaler Ebene beschlossen werden ("mitigation policy"). Nun stellen wir uns vor, dass eine Weltkonferenz über die Klimapolitik einberufen worden ist. Sollte sie erfolgreich sein, werden daraufhin alle Staaten der Welt Maßnahmen einführen, welche den Klimawandel substantiell bremsen werden. Wie sollte nun die staatliche Behörde ihre Möglichkeit bewerten, in die "adaptation policy" zu investieren?

Man unterstelle, dass heute - also bevor die Weltkonferenz stattgefunden hat - eine KNA des Projekts ergeben hat, dass sein erwarteter Gegenwartswert echt positiv ist. Gemäß der herkömmlichen Regel der KNA sollte also der Staat investieren. Trotzdem könnte eine Vertagung der Entscheidung auf den Zeitpunkt, an dem deutlich wird, ob die Weltgemeinschaft den Klimawandel tatsächlich bekämpft, besser sein. Denn: Sollte der Klimawandel gestoppt werden, sind kostspielige Maßnahmen zur Milderung seiner Folgen ja überflüssig (Tsur und Withagen, 2013).

Um diesen Sachverhalt zu verdeutlichen, betrachten wir folgendes numerisches Beispiel, das leicht verändert von Dixit und Pindyck (1994) übernommen worden ist. Die Zeit sei in Perioden von drei Jahren eingeteilt und wir befinden uns in der Periode $t = 0$. Der Planungshorizont ist unendlich und die Diskontrate beträgt 10% pro Periode. Das Investitionsvorhaben kostet $I = 160$. Der heute erwartete Nettonutzen in jeder Periode beträgt $E[y_t|t = 0] = 20$.

Konditioniert auf die Informationen des Entscheidungsträgers zu Beginn der heutigen

Periode ist somit der (erwartete) Gegenwartswert des Projekts:

$$GW = -160 + \sum_{t=0}^{\infty} \frac{20}{(1.1)^t} = -160 + 220 = 60 > 0.$$

Somit suggeriert die herkömmliche KNA, dass der Staat in $t = 0$ investieren soll.

Nun berücksichtigen wir, dass am Anfang der Periode $t = 1$ die Klimakonferenz stattfindet. Ist die Konferenz erfolgreich, beschließt die Weltgemeinschaft Präventivmaßnahmen zur Senkung der CO2-Emissionen, welche die Wahrscheinlichkeit von Umweltkatastrophen verringern. In diesem Fall sinkt der erwartete Nettonutzen aus dem betrachteten Investitionsvorhaben auf $E[y_t|t = 1] = 10$ pro Periode $t \geq 1$. Scheitert hingegen die Konferenz, werden Klimakatastrophen wahrscheinlicher und der pro Periode erwartete Nettonutzen aus dem Investitionsvorhaben erhöht sich auf $E[y_t|t = 1] = 30$. Da $E[y_t|t = 0] = 20\ \forall t$, sind diese zwei möglichen Ergebnisse der Weltklimakonferenz gleich wahrscheinlich.

Der staatliche Entscheidungsträger lernt also am Anfang der nächsten Periode etwas über den volkswirtschaftlichen Wert des heute betrachteten Investitionsvorhabens. Wie verändert diese Lernmöglichkeit seine optimale Investitionsentscheidung?

Wenn die betrachtete Investition vollkommen *reversibel* wäre, würde sich daran nichts ändern. Denn: Im Fall eines positiven Ergebnisses der Klimakonferenz könnte der Staat sofort das Projekt zu seinem Herstellungspreis wieder verkaufen und auf den daraus resultierenden Schutz verzichten. Dies wäre in jenem Zustand der Welt tatsächlich optimal, denn am Anfang der Periode 1 wäre der Schutz aus dem Vorhaben nur 110 Geldeinheiten wert, während die Aufgabe des Projekts Ressourcen im Wert von 160 Geldeinheiten frei machen würde. Im Fall eines Scheiterns der Konferenz würde hingegen der Staat optimalerweise am Projekt und dem daraus resultierenden Schutz festhalten, denn dieser hätte einen Wert in Höhe von 330.

Der Sachverhalt ändert sich grundlegend, wenn die betrachtete Investition *irreversibel* ist und auch in der nächsten Periode getätigt werden kann. Dann sollte die staatliche

Institution die Option berücksichtigen, eine Periode zu warten und nur in dem Fall zu investieren, wenn die Weltklimakonferenz gescheitert ist. Diese Option ist tatsächlich dem sofortigen Beginn des Investitionsprojekts überlegen, denn ihr heute erwarteter Gegenwartswert beträgt:

$$\widetilde{GW} = \frac{1}{2} \cdot 0 + \frac{1}{2} \cdot \left[-\frac{160}{1.1} + \sum_{t=1}^{\infty} \frac{30}{(1.1)^t} \right] \simeq 77 > 60.$$

Dieses Beispiel zeigt, dass bei Irreversibilität und Lernen die traditionelle Bedingung $GW > 0$ nicht mehr hinreichend ist, um eine positive Investitionsentscheidung zu rechtfertigen. Der Staat sollte prüfen, ob durch Warten und Sammeln zusätzlicher Informationen ein noch besseres Ergebnis erzielt werden kann. Dies hebt den Wert der Flexibilität hervor: Durch eine heutige irreversible Investitionsentscheidung verzichtet der Investor auf eine Flexibilität, die für ihn wertvoll ist.[6]

4.2 Optimale Wartezeit

Bei Irreversibilität einer Investition und der Möglichkeit, etwas über deren Folgen zu lernen, entspricht ein Investitionsvorhaben einer *realen Option*. Die Frage für den Staat als Investor ist, wann diese Option ausgeübt werden sollte bzw. wie lange der Staat warten sollte, bevor er das Vorhaben realisiert. In der Literatur bezeichnet man dieses Problem als *optimal stopping* (z.B. Dixit und Pindyck, 1994). Der dazugehörige Lösungsansatz soll hier erläutert werden.

Als Anwendungsbeispiel aus dem Infrastrukturbereich soll die Erweiterung einer zweispurigen zu einer dreispurigen Autobahn dienen. Der Gegenwartswert der volkswirtschaftlichen Nutzen aus diesem Projekt, V_t, hängt von der Entwicklung der Verkehrsnachfrage für die betrachtete Autobahnstrecke ab. Diese Nachfrage ist wiederum unsicher, da sie von tech-

[6] Wohlgemerkt existieren auch Investitionsentscheidungen, die zusätzliche Flexibilität erzeugen. Beispielsweise können Investitionen in ein Forschungsvorhaben die Möglichkeit eröffnen, in der Zukunft in einem bestimmten Bereich tätig zu werden und dort Erfolge erzielen zu können, falls dieser Bereich irgendwann überhaupt wichtig werden sollte (Centre d'Analyse Stratégique, 2011).

nologischen, sozialen und regionalen Zufällen abhängt, die nur vage prognostiziert werden können. Wie das obige Zahlenbeispiel suggeriert, ist die Entscheidung heute ($t = 0$) zu investieren, selbst dann nicht notwendigerweise optimal, wenn der heute erwartete Gegenwartswert des Projekts V_0 größer als die Investitionskosten I ist. Wartet der Staat zum Beispiel bis zum Zeitpunkt t, wird er eine Einschätzung des Gegenwartswerts des Projekts V_t haben, die womöglich substantiell von V_0 abweicht. Durch das Warten kann der Staat die Fehlerwahrscheinlichkeit verringern, in ein Projekt zu investieren, das eigentlich suboptimal ist. Aber eine längere Zeit des Wartens bedeutet auch, dass das Gemeinwesen länger auf den Nutzen des Projekts verzichtet, was wiederum kostspielig ist. Dies ist die maßgebende Abwägung in den hier betrachteten Entscheidungssituationen.

Bei solchen Entscheidungsproblemen besteht nun die Lösung darin, dass der Staat einen kritischen Wert V^* ermittelt und genau dann investiert, wenn V_t diesen kritischen Wert erreicht hat. In der traditionellen KNA ist $V^* = I$, d.h. der Staat investiert, sobald der Nettogegenwartswert $V_t - I$ positiv ist. Nun werden wir sehen, dass in der hier betrachteten Situation $V^* > I$ ist, d.h. die Regel für die optimale Investitionsentscheidung ist im Allgemeinen restriktiver, als die herkömmliche KNA vermuten läßt.

Um den optimalen Wert V^* zu bestimmen, muss der staatliche Entscheidungsträger eine Vorstellung über die künftige Entwicklung von V haben. Ausgehend von seinem heutigen Wert, V_0, unterstelle ich nun, dass V_t sich wie eine *geometrische Brownsche Bewegung* verhält:

$$dV = \alpha V dt + \sigma V dz, \tag{22}$$

wobei α und σ positive Parameter sind und $dz = \epsilon_t \sqrt{dt}$ das Inkrement eines Wiener-Prozesses darstellt. Diese Annahme entspricht derjenigen im Abschnitt 2.2 über die Konsumentwicklung.[7]

[7] Hier habe ich angenommen, dass die Investitionskosten I fest sind. Alternativ könnte man annehmen, dass I sich ebenfalls wie eine geometrische Brownsche Bewegung verhält. Dann gründet die Lösung auf einem (zeitinvarianten) kritischen Wert für das Verhältnis V_t/I_t. Der Staat sollte genau dann investieren, wenn dieser kritische Wert erreicht ist. Im Allgemeinen ist der kritische Wert größer als 1, d.h. der kritischen Wert in der traditionellen KNA (McDonald und Siegel, 1986).

Unsere Aufgabe besteht nun darin, den kritischen Wert V^* zu finden, der den (heute) erwarteten Nettogegenwartswert des Projekts,

$$E\left[(V_T - I)\, e^{-\delta T}\right],$$

maximiert. Dabei steht T für das heute unbekannte Datum, an dem zum ersten Mal $V_t = V^*$ sein wird.

Man merke, daß ich hier die Diskontrate mit δ bezeichnet habe, um eine eventuelle Verwechselung mit dem Symbol für das Differential zu vermeiden. Damit die Existenz des optimalen kritischen Werts V^* garantiert werden kann, nehme ich an, dass $\delta > \alpha$ gilt.

Bezeichnen wir den Wert der Option, in das Projekt zu investieren, mit:

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

Es bietet sich an, dieses Optimierungsproblem mit Hilfe der *dynamischen Programmierung* zu lösen. Als Einstieg dient die Überlegung, daß solange nicht investiert wird, das Projekt keine Nettonutzen erzeugen kann. Pro Zeiteinheit entspricht dann sein gesamter Ertrag dem erwarteten Zuwachs des Werts des Projekts. Daher ergibt sich aus der Bellman-Gleichung:

$$\delta F dt = E[dF]. \tag{23}$$

An dieser Stelle benutzen wir (22) und Ito's Lemma, um das Differential $dF(V)$ zu bestimmen:

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

Wohlgemerkt ist die Brownsche Bewegung nicht der einzige stochastische Prozess, der in dieser Literatur untersucht worden ist. Alternative Modellierungsmöglichkeiten bieten z.B "mean-reverting"-Prozesse (Tsekrekos, 2013) und Poisson-Prozesse (Sennewald und Wälde, 2006; Gollier, 2013).

Durch Einsetzen dieser Gleichung in (23) und Berücksichtigung von $E(dz) = 0$ gelangen wir zu folgendem Zwischenergebnis:

$$\frac{1}{2}\sigma^2 V^2 F''(V) + \alpha V F'(V) - \delta F(V) = 0. \tag{24}$$

Dies ist eine homogene Differentialgleichung zweiter Ordnung in F. Die gesuchte Funktion, die diese Gleichung löst, muss ferner die folgenden drei Randbedingungen erfüllen:

$$F(0) = 0. \tag{25}$$

Diese Bedingung ist notwendig, denn $V_t = 0, \forall t \geq 0$ resultiert aus (22), wenn $V = 0$ ist.

$$F(V^*) = V^* - I. \tag{26}$$

Auch diese Bedingung ist erforderlich, denn das Projekt wird genau dann durchgeführt, wenn der kritische Wert V^* erreicht ist.

$$F'(V^*) = 1. \tag{27}$$

Diese dritte Bedingung ist die aus der Literatur bekannte *smooth-pasting condition*.[8]

Man merke, dass bei der hier betrachteten Differentialgleichung zweiter Ordnung tatsächlich drei Nebenbedingungen notwendig sind, denn der Wert von F an der oberen Grenze ist unbekannt, da V^* endogen als Teil der Lösung zu bestimmen ist.

Mathematische Funktionen, die (25) erfüllen, haben die Form

$$F(V) = AV^\beta \tag{28}$$

[8] Für eine formale Herleitung dieser Bedingung kann man Dixit und Pindyck (1994, S. 130-132) konsultieren.

mit $\beta > 0$. Aus jeweils (26) und (27) ergeben sich dann

$$AV^{*\beta} = V^* - I$$

und

$$\beta A V^{*\beta-1} = 1.$$

Teilt man die erste Gleichung durch die zweite und formt das Ergebnis um, ergibt sich:

$$V^* = \frac{\beta}{\beta - 1} I. \tag{29}$$

Da offensichtlich $V^* > 0$ sein muss, zeigt (29), dass $\beta > 1$ notwendig ist. Daher folgt auch $V^* > I$. Dies ist ein zentrales Ergebnis. Es besagt, daß es für den Staat nicht optimal ist, zu investieren, sobald der Nettogegenwartswert des Projekts positiv ist!

Vielmehr muss der Nettogegenwartswert des Projekts einen Mindestbetrag erreichen, der umso höher ausfällt, je kleiner β ist. Der optimale Abstand zwischen dem kritischen Wert von V und den Investitionskosten ist

$$V^* - I = \frac{I}{\beta - 1}.$$

Der nächste Schritt ist die Bestimmung des bisher unbekannten Parameters β. Durch Einsetzen von (28) in (24) und Vereinfachen erhalten wir:

$$\frac{\sigma^2}{2}\beta^2 + \left(\alpha - \frac{\sigma^2}{2}\right)\beta - \delta = 0.$$

Wie man leicht prüfen kann, hat diese quadratische Gleichung nur eine positive Lösung. Sie lautet:

$$\beta = \frac{1}{2} - \frac{\alpha}{\sigma^2} + \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{\sigma^2}\right)^2 + \frac{2\delta}{\sigma^2}}.$$

Es ist nicht schwer zu zeigen, dass β mit σ fällt. Dies bedeutet, dass mehr Unsicherheit (ein größeres σ) zu einem höheren kritischen Wert V^* führt. Die ökonomische Interpretation dieses Ergebnisses ist wie folgt. Eine größere Unsicherheit in Bezug auf die Vorteilhaftigkeit des Projekts bedeutet, daß ein kostspieliger Entscheidungsfehler wahrscheinlicher wird. Würde der Staat nämlich bereits investieren, sobald $V = I$ ist, würde er auf die Möglichkeit verzichten, später die Investition zu tätigen. Damit würde er die Chance verpassen, die Investition zu einem Zeitpunkt zu tätigen, zu dem sie einen viel höheren Gegenwartswert hat. Je größer die Unsicherheit (σ), desto größer der erforderliche Abstand des erwarteten Gegenwartswerts des Projekts von seinen Kosten, damit es für den Staat optimal ist, diese Investition zu tätigen.

Hingegen zeigt die obige Formel, daß β mit der Diskontrate δ steigt. Somit führt eine höhere Diskontierung zurück in die Richtung der herkömmlichen Regel der KNA, dass ein echt positiver Gegenwartswert des Projekts hinreichend ist, um die Investition zu rechtfertigen. Die Intuition ist naheliegend: Eine höhere Diskontrate bedeutet, dass der Staat dem eventuell verpassten höheren Gegenwartswert weniger Bedeutung beimisst, denn er würde ihn in der Zukunft realisieren. Dies verringert den erforderlichen Abstand des erwarteten Gegenwartswerts des Projekts von seinen Kosten, damit es für den Staat optimal ist, die Investition zu tätigen.

Man merke, dass diese Ergebnisse nicht von der Annahme getrieben werden, daß der Wert des Projekts sich im Zeitverlauf tendenziell erhöht. Um dies zu zeigen, betrachten wir den Spezialfall, in dem die erwartete Wachstumsrate des Werts des Projekts gleich Null ist, d.h. $\alpha = 0$. Durch Einsetzen von β in (29) erhalten wir für $\alpha = 0$:

$$\frac{V^*}{I} = \frac{\sqrt{\frac{1}{4} + \frac{2\delta}{\sigma^2}} + \frac{1}{2}}{\sqrt{\frac{1}{4} + \frac{2\delta}{\sigma^2}} - \frac{1}{2}}.$$

In diesem Fall hängt die Abweichung von der üblichen Entscheidungsregel der KNA allein vom Verhältnis δ/σ^2 ab. Das Verhältnis V^*/I ist in δ/σ^2 monoton fallend. Strebt δ/σ^2 gegen Null, geht V^*/I gegen ∞. Strebt hingegen δ/σ^2 gegen ∞, erhalten wir die übliche

Regel, d.h. $V^* = I$.

5 Abschließende Bemerkungen

Das erste Thema dieses Beitrags war die Herleitung der Diskontrate im Rahmen des Ansatzes der sozialen Zeitpräferenzrate, wenn das künftige Wirtschaftswachstum unsicher ist. Dieses Thema ist von erstrangiger Bedeutung für die Evaluierung besonders langlebiger Infrastrukturprojekte. Es wurde gezeigt, dass die übliche Ramsey-Gleichung bei Unsicherheit keine Gültigkeit mehr hat. Die passend modifizierte Ramsey-Gleichung enthält eine Korrektur, die dem Vorsorgemotiv von Investitionen Rechnung trägt. Dieses Vorsorgemotiv führt dazu, dass die Diskontrate kleiner ausfällt, als im Fall eines sicheren Wirtschaftswachstums.

Die praktische Umsetzung der angepassten Ramsey-Gleichung erfordert die Quantifizierung der Varianz der Wachstumsrate, welche für die Tragweite des Vorsorgemotivs maßgebend ist. Schätzverfahren, die auf einer Zeitreihenanalyse basieren, erzeugen erheblich kleinere Schätzwerte als Verfahren, die auf einer Querschnittsbetrachtung basieren. Für ein Land wie Deutschland suggerieren die Zeitreihenanalysen, dass das Vorsorgemotiv vernachläßigbar ist. Aus einer Querschnittsbetrachtung erscheint es dagegen als ausschlaggebend. Zum jetztigen Zeitpunkt ist leider unklar, welches Schätzverfahren das bessere ist. Klar sollte allerdings den Praktikern sein, dass die Vernachlässigung der Wachstumsunsicherheit zur Wahl einer Diskontrate führt, die zu hoch ist.

Die zweite Fragestellung, die in diesem Beitrag behandelt wurde, betrifft die Bewertung riskanter Investitionsprojekte. In der KNA ist es üblich zwischen kleinen und großen Risiken zu unterscheiden und die allermeisten Investitionsvorhaben als mit kleinen Risiken behaftet einzustufen. Daher wird in Forschung und Praxis dem Fall der großen Risiken wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Ich habe hingegen betont, daß der Fall der großen Risiken sogar für entwickelte Volkswirtschaften relevant ist. Nicht in dem Sinne, daß das repräsentative Individuum dort einem großen Risiko unterworfen sei, sondern in dem Sinne, dass einzelne Bevölkerungsgruppen von den unsicheren Folgen bestimmter öffentlicher Projekte betroffen sein können, gegen die sie sich nicht effizient absichern können - nicht einmal durch das Steuer-Transfer-System.

Da der Fall des großen Risikos praktische Relevanz besitzt, habe ich Ansätze vorgestellt, wie das Sicherheitsäquivalent des Projektsnutzens mit vergleichsweise kleinem Aufwand - ohne auf numerische Verfahren angewiesen zu sein - ermittelt werden kann. Solche Sichherheitäquivalente bezüglich der besonders betroffenen Bevölkerungsgruppen sollten zu dem Sicherheitsäquivalent für die restlichen Individuen hinzuaddiert werden, welches durch die übliche Bewertungsmethode des kleinen Risikos ermittelt werden kann.

Das dritte und letzte Anliegen dieses Beitrags war die Thematisierung der Rolle der Irreversibilität bei der Möglichkeit des Lernens über die Folgen von Investitionsprojekten. Öffentliche Projekte, die sich durch Irreversibilität und Unsicherheit kennzeichnen, entsprechen realen Optionen. Ich habe gezeigt, dass in solchen Situationen die traditionelle Entscheidungsregel der Kosten-Nutzen-Analyse - investiere, wenn der Nettogegenwartswert positiv ist - irreführend sein kann. Deshalb habe ich eine Formel hergeleitet, welche die optimale Wartezeit für die Realisierung von Investitionsvorhaben in bestimmten Fällen ermittelt.

Der Bewertungsansatz der realen Optionen kann für spezielle Investitionsbereiche der öffentlichen Hand ein nützliches Komplement zum üblichen Instrumentarium der KNA werden. Es sollte aber nicht übersehen werden, dass die Umsetzung dieses Ansatzes mit einem beträchtlichen Aufwand verbunden ist und nur in Fällen gerechtfertigt erscheint, in denen der Aspekt der Flexibilität wirklich im Vordergrund steht.

Literaturhinweise

Arrow, K. (1963): Liquidity preference, Lecture VI in Lecture Notes for Economics 285, Stanford University.

Arrow, K. / Lind, R. (1970): Uncertainty and the evaluation of public investment, American Economic Review 60, 364-378.

Barro, R. (2006): Rare disasters und asset markets in the twentieth century, Quarterly Journal of Economics 121, 823-866.

Beckers, T. /Corneo, G. / Klatt, J.P. / Mühlenkamp, H. (2009), Zeitliche Homogenisierung und Berücksichtigung von Risiko im Rahmen von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen, Berlin/Speyer.

Centre d'Analyse Stratégique (2011): Le Calcul du Risque dans les Investissements Publics, Paris: La Documentation Francaise.

Chetty, R. (2006): A new method of estimating risk aversion, American Economic Review 96, 1821-1834.

Corneo, G. (2012): Öffentliche Finanzen: Ausgabenpolitik, 4. Auflage, Tübingen: Mohr Siebeck.

De Finetti, B. (1952): Sulla preferibilitá, Giornale degli Economisti 11, 685-709.

Dixit, A. / Pidyck, R. (1994): Investment under Uncertainty, Princeton: Princeton University Press.

Eeckhoudt, L. / Gollier, C. / Schlesinger, H. (2005): Economic and Financial Decisions under Risk, Princeton: Princeton University Press.

Foldes, L. / Rees, R. (1977): A note on the Arrow-Lind theorem, American Economic Review 67, 188-193.

Gollier, C. (2002): Discounting an uncertain future, Journal of Public Economics 149-166.

Gollier, C. (2011): On the underestimation of the precautionary effect in discounting, Geneva Risk and Insurance Review 36, 95-111.

Gollier, C. (2012): Evaluation of long-dated investments under uncertain growth trend, volatility and catastrophes, CESifo WP N°.4052.

Gollier, C. (2013): Pricing the Planet's Future, Princeton: Princeton University Press.

Hirshleifer, J. (1966): Investment decision under uncertainty: Applications of the state-preference approach, Quarterly Journal of Economics 80, 252-277.

Karlin, S. / Taylor, H. (1975): A First Course in Stochastic Processes, 2. Auflage, New York: Academic Press.

Kimball, M. (1990): Precautionary saving in the small and in the large, Econometrica 58, 53-73.

McDonald, R. / Siegel, D. (1986): The value of waiting to invest, Quarterly Journal of Economics 101, 707-728.

Pratt, J. (1964): Risk aversion in the small and in the large, Econometrica 32, 122-136.

Pearce, D. / Ulph, D. (2001): A social discount rate for the United Kingdom, CSERGE WP GEC 95-01.

Quiggin, J. (2005): Risk and discounting in project evaluation, in Australian Government (Hrsg.): Risk in Cost-Benefit-Analysis, Report 110.

Rees, R. (1982): Stock-market discount rates and uncertain public investments, Journal of Economics, Suppl. 2, 51-61.

Sennewald, K. / Wälde, K. (2006): "Ito's Lemma" and the Bellman equation for Poisson processes: An applied view, Journal of Economics 89, 1-36.

Shreve, S. (2004): Stochastic Calculus for Finance II: Continuous Time Models, New York: Springer.

Stern, N. (2006): Stern Review: The Economics of Climate Change, London.

Tsekrekos, A. (2013): Irreversible exit decisions under mean-reverting uncertainty, Journal of Economics 110, 5-23.

Tsur, Y. / Withagen, C. (2013): Preparing for catastrophic climate change, Journal of Economics 110, 225-239.

Weitzman, M. (2012): Rare disasters, tail-hedged investments and risk-adjusted discount rates, NBER WP 18496.

Diskussionsbeiträge - Fachbereich Wirtschaftswissenschaft - Freie Universität Berlin
Discussion Paper - School of Business and Economics - Freie Universität Berlin

2015 erschienen:

2015/1	GÖRLITZ, Katja und Christina GRAVERT The effects of increasing the standards of the high school curriculum on school dropout *Economics*
2015/2	BÖNKE, Timm und Clive WERDT Charitable giving and its persistent and transitory reactions to changes in tax incentives: evidence from the German Taxpayer Panel *Economics*
2015/3	WERDT, Clive What drives tax refund maximization from inter-temporal loss usage? Evidence from the German Taxpayer Panel *Economics*
2015/4	FOSSEN, Frank M. und Johannes KÖNIG Public health insurance and entry into self-employment *Economics*
2015/5	WERDT, Clive The elasticity of taxable income for Germany and its sensitivity to the appropriate model *Economics*
2015/6	NIKODINOSKA, Dragana und Carsten SCHRÖDER On the Emissions-Inequality Trade-off in Energy Taxation: Evidence on the German Car Fuel Tax *Economics*
2015/7	GROß, Marcus; Ulrich RENDTEL; Timo SCHMID; Sebastian SCHMON und Nikos TZAVIDIS Estimating the density of ethnic minorities and aged people in Berlin: Multivariate kernel density estimation applied to sensitive geo-referenced administrative data protected via measurement error *Economics*
2015/8	SCHMID, Timo; Nikos TZAVIDIS; Ralf MÜNNICH und Ray CHAMBERS Outlier robust small area estimation under spatial correlation *Economics*
2015/9	GÖRLITZ, Katja und Marcus TAMM Parenthood and risk preferences *Economics*
2015/10	BÖNKE, Timm; Giacomo CORNEO und Christian WESTERMEIER Erbschaft und Eigenleistung im Vermögen der Deutschen: eine Verteilungsanalyse *Economics*

2015/11 GÖRLITZ, Katja und Marcus TAMM
The pecuniary and non-pecuinary returns to voucher-financed training
Economics