

Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (<http://www.ub.tuwien.ac.at>).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (<http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/>).



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

D I P L O M A R B E I T

Ökonomische Modelle der globalen Klimaerwärmung

Ausgeführt am Institut für
Wirtschaftsmathematik
der Technischen Universität Wien

unter der Anleitung von
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Alexia Fürnkranz-Prskawetz

durch

Barbara Lugschitz
A.-Stifter-Straße 55
4780 Schärding

Wien, Dezember 2010

DANKSAGUNG

An dieser Stelle bedanke ich mich recht herzlich bei Frau Prof. Fürnkranz-Prskawetz, die meine Diplomarbeit betreut hat. Ich danke auch meinen Eltern, die mir stets wohlwollend zur Seite standen und mir das Studium finanziell ermöglicht haben. Ganz besonders bedanke ich mich bei meinen Studienkollegen, die mich begleitet und mein Studium sehr bereichert haben. Meinem Freund danke ich für die alltägliche Unterstützung und Geduld, die er während des gesamten Studiums mit mir hatte.

Kurzfassung

In meiner Diplomarbeit behandle ich die Klimamodelle „A Question of Balance“¹ (im Weiteren mit DICE-Modell-2007 bezeichnet) von W. Nordhaus, „Global Warming und Economic Externalities“² von A. Rezai, D. K. Foley und Lance Taylor und „Economic Growth and Global Warming: A Model of Multiple Equilibria and Thresholds“³ von A. Greiner und W. Semmler.

Das DICE-Modell-2007 beruht auf einem ökonomischen Modell, das um geophysikalische Gleichungen erweitert wird. Mit dem Modell ist es möglich, verschiedene Politiken in Bezug auf die globale Erwärmung zu vergleichen. In meiner Diplomarbeit gehe ich auf das Basismodell und den optimalen Fall ein. Im Basismodell wird das derzeitige anthropogene Verhalten in Bezug auf den Klimawandel simuliert und es dient als Referenzpfad für andere Politiken. Im optimalen Fall wird das bevorzugte Verhalten bezüglich der Maßnahmen zur Milderung des Klimawandels ermittelt, dabei werden die aktuellen Kosten der Emissionsreduktion mit dem Nutzen verminderter zukünftiger Klimaschäden abgewogen. Ein großer Schwerpunkt liegt auf der Thematik der intergenerationellen Gerechtigkeit. Dabei geht es darum, auf wie viel gegenwärtige Generationen verzichten müssen, um zukünftigen Generationen eine weniger zerstörte Umwelt zu hinterlassen. Der Emissionsreduktionspfad des optimalen Falls erweist sich anfangs als sehr gemäßigt, auf mittlere und lange Sicht werden allerdings drastische Maßnahmen gefordert.

Das Modell „Global Warming und Economic Externalities“ ist stark an das DICE-Modell-2007 angelehnt, allerdings ist es im Vergleich dazu noch deutlich vereinfacht. Insgesamt werden drei verschiedene Szenarien modelliert, welche sich in ihren Strategien, dem Klimawandel entgegenzutreten, unterscheiden. Der „business-as-usual“-Fall, bei dem die Externalität der Klimaerwärmung nicht berücksichtigt wird, simuliert das aktuelle Verhalten und wird als Vergleichspfad für den optimalen Fall verwendet. Im optimalen Fall wird die Externalität vollständig internalisiert und es zeigt sich, dass alle Generationen von Aktivitäten zur Milderung des Klimawandels profitieren. Dem optimalen Pfad zufolge wird der Verminderungsaufwand verstärkt in den ersten Jahrzehnten ausgeführt. Da in vielen anderen Klimamodellen auf einen anderen Referenzpfad

¹[6]

²[9]

³[4]

zurückgegriffen wird, wird auch dieser noch modelliert. Die Autoren dieses Modells merken an, dass die Thematik der intergenerationellen Gerechtigkeit sich aus der Wahl eines Referenzpfades, der die Externalität teilweise internalisiert, ergibt. Dieser Vergleich führt zu falschen Schlussfolgerungen, aus denen sich die Problematik der intergenerationellen Gerechtigkeit begründet.

Das dritte Modell basiert auf einem endogenen Wachstumsmodell, das um die Aspekte der globalen Klimaerwärmung erweitert wird. Das vorrangige Ziel ist hierbei nicht, verschiedene Politiken, dem Klimawandel entgegenzutreten, zu modellieren, sondern die Langzeiteffekte der Interaktion von globaler Erwärmung und Wirtschaftswachstum, insbesondere der Übergangsdynamik, die mit der Klimaerwärmung auftreten kann, zu untersuchen. Es wird analysiert, ob mehrere Gleichgewichte auftreten und ob es Schwellen gibt, die die Einzugsbereiche der optimalen Pfade für die langfristig stabilen Zustände trennen.

Nach der Erklärung der Modelle, die ich alle mit dem Computerprogramm Mathematica nachprogrammiert habe, ziehe ich einen Vergleich, der die Übereinstimmungen und Divergenzen der Modelle herausarbeitet.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung - Der Klimawandel	1
2. DICE-Modell-2007 (W. Nordhaus, 2008)	6
2.1. Einleitung	6
2.2. Das Modell	10
2.2.1. Zielfunktion	10
2.2.2. Wirtschaftsbeziehungen	10
2.2.3. Geophysikalische Gleichungen	13
2.3. Die Politiken	16
2.3.1. Das Basismodell	16
2.3.2. Das Optimalmodell	16
2.3.3. Anmerkungen zu den Computerkalkulationen	17
2.4. Ergebnisse	18
2.4.1. Soziale Kohlenstoffkosten	18
2.4.2. Kohlenstoffpreis bzw. Kohlenstoffsteuern	19
2.4.3. Emissionskontrollrate	20
2.4.4. Emissionen	20
2.4.5. CO_2 -Konzentration	20
2.4.6. Temperaturanstieg	22
2.4.7. Weitere wirtschaftliche Variablen	22
2.5. Diskussion	24
3. „Global Warming and Economic Externalities“ (A. Rezai et al., 2009)	26
3.1. Einleitung	26
3.2. Das Modell	28
3.2.1. Der optimale Fall	33
3.2.2. Der „business-as-usual“ (BAU)-Fall	34
3.2.3. Der beschränkte Fall	36
3.3. Anmerkungen zur Berechnung	39

3.4.	Ergebnisse	41
3.4.1.	Intergenerationelle Gerechtigkeit	47
3.5.	Diskussion	48
4.	„Economic Growth and Global Warming: A Model of Multiple Equilibria and Thresholds“ (A.Greiner und W. Semmler, 2005)	49
4.1.	Einleitung	49
4.2.	Das Modell	51
4.2.1.	Treibhausgasemissionen und die Veränderung der globalen Durchschnittstemperatur	51
4.2.2.	Marktwirtschaft mit Regierungsaktivität	54
4.2.3.	Das Problem des sozialen Planers	65
5.	Vergleich der Modelle	71
5.1.	Vergleich DICE-Modell-2007 - „Global Warming and Economic Externalities“	71
5.2.	„Economic Growth and Global Warming: A Model of Multiple Equilibria and Thresholds“	78
5.2.1.	Marktwirtschaft mit Regierungsaktivität	80
5.2.2.	Das Problem des sozialen Planers	81
5.3.	Resümee	82
	Appendix	83
A.	Überblick über die wichtigsten Gleichungen, Variablen und Parameter der Modelle	83
A.1.	DICE-Modell-2007	83
A.1.1.	Modellgleichungen	83
A.1.2.	Variablendefinition und Einheiten	84
A.1.3.	Parameter	85
A.1.4.	Bemerkung zur Zeitperiode	86
A.2.	„Global Warming and Economic Externalities“	86
A.2.1.	Modellgleichungen	86
A.2.2.	Variablendefinition	87
A.2.3.	Parameter	88
A.3.	„Economic Growth and Global Warming: A Model of Multiple Equilibria and Thresholds“	89
A.3.1.	Modellgleichungen	89

A.3.2. Variablendefinition	89
A.3.3. Parameter	90
Abbildungsverzeichnis	93
Literaturverzeichnis	94

1. Einleitung - Der Klimawandel

In der vorliegenden Diplomarbeit habe ich mich mit den Klimamodellen „A Question of Balance“¹ von W. Nordhaus, „Global Warming und Economic Externalities“² von A. Rezai, D. K. Foley und Lance Taylor und „Economic Growth and Global Warming: A Model of Multiple Equilibria and Thresholds“³ von A. Greiner und W. Semmler beschäftigt. Die beiden ersten Modelle modellieren auf vereinfachte Weise den Klimawandel und dessen Auswirkungen auf die Wirtschaft und vergleichen verschiedene Politiken für das anthropogene Verhalten in Bezug auf den Klimawandel. Im dritten Modell werden nicht die unterschiedlichen Politiken, sondern die Langzeiteffekte der Interaktion von globaler Erwärmung und Wirtschaftswachstum analysiert. Da der Klimawandel die grundlegende Thematik meiner Diplomarbeit ist, möchte ich vorab auf dessen wichtigste Dynamiken eingehen.

Das Klima der Erde beruht auf einer Energiebilanz. Die Menge der Sonnenstrahlung, die von der Erde absorbiert wird, muss mit der Wärmestrahlung der Erde, die ins All abgegeben wird, übereinstimmen, damit sich das Klima im Gleichgewicht befindet. Die absorbierte Sonnenstrahlung entspricht der „auf der Erde ankommende[n] Sonnenstrahlung abzüglich des reflektierten Anteils“⁴. Erfolgt eine Abweichung von dieser Energiebilanz, so verändert sich das Klima. Wird zum Beispiel „mehr absorbiert als abgestrahlt“⁵, so hat dies zur Folge, dass sich das Klima erwärmt, wodurch wiederum mehr Wärmestrahlung von der Erde emittiert wird. Da im längerfristigen Mittel die Erde genau so viel Wärmestrahlung emittieren muss, wie sie Sonnenstrahlung absorbiert, erfolgt diese Erwärmung solange, bis sich das Klima wieder in einem Gleichgewicht befindet.⁶

Für eine Veränderung der Energiebilanz gibt es drei Möglichkeiten: „Erstens kann die ankommende Sonnenstrahlung durch Änderungen in der Umlaufbahn um die Sonne oder in der Sonne

¹[6]

²[9]

³[4]

⁴[8], S.13

⁵[8], S.12

⁶[8], S. 12ff

selbst variieren. Zweitens⁷ hängt der ins All reflektierte Anteil der Strahlung „von der Bewölkung und der Helligkeit der Erdoberfläche [(zum Beispiel Eisbedeckung)] ab“⁸ und kann sich verändern.⁹ „Drittens wird die abgehende Wärmestrahlung durch den Gehalt der Atmosphäre an absorbierenden Gasen (oft Treibhausgase genannt) und Aerosolen (also Partikeln in der Luft) beeinflusst.“¹⁰ Die Treibhausgase beeinflussen also die Strahlungsbilanz und sind dadurch für Klimaveränderungen mitverantwortlich. Im Konkreten lassen Treibhausgase „zwar die ankommende Sonnenstrahlung passieren“¹¹, absorbieren aber Wärmestrahlung, die von der Erdoberfläche abgegeben wird, und emittieren diese in alle Richtungen, also auch wieder zur Erdoberfläche zurück. „Dadurch kommt an der Oberfläche mehr Strahlung an als ohne Treibhausgase: nämlich nicht nur die Sonnenstrahlung, sondern zusätzlich die von den Treibhausgasen abgestrahlte Wärmestrahlung. Ein Gleichgewicht kann sich erst wieder einstellen, wenn die Oberfläche zum Ausgleich auch mehr abstrahlt - also wenn sie wärmer ist. Dies ist der Treibhauseffekt.“¹² Der Treibhauseffekt ist prinzipiell eine natürliche Eigenschaft der Erdatmosphäre, die sogar lebensnotwendig ist. Ohne diesen Effekt würde die durchschnittliche Oberflächentemperatur der Erde -18°C betragen. Durch den Treibhauseffekt liegt diese Temperatur um 33 Grad höher, also bei +15°C. „Der Grund zur Sorge über die globale Erwärmung liegt darin, dass der Mensch diesen Treibhauseffekt nun verstärkt. Da der Treibhauseffekt insgesamt für eine Temperaturdifferenz von 33 Grad verantwortlich ist, kann bereits eine prozentual geringe Verstärkung desselben zu einer Erwärmung um mehrere Grad führen.“¹³ Um den negativen anthropogenen Einfluss besser zu verstehen, wird auf die wichtigsten Treibhausgase näher eingegangen. Dabei ist als erstes der Wasserdampf zu nennen, der den größten Beitrag zum Treibhauseffekt liefert. Da seine Konzentration jedoch vom Menschen nicht direkt beeinflusst werden kann, ist er kein Bestandteil der Diskussion über den Treibhauseffekt.¹⁴

Die weiteren Gase, die für den Treibhauseffekt verantwortlich sind, kommen in sehr kleinen Mengen in der Atmosphäre vor, da diese hauptsächlich aus Stickstoff (78%) und Sauerstoff (21%) besteht. Das verbleibende 1% besteht zu 90% aus Argon. Somit verbleiben nur 0,1% der Atmosphäre für all die anderen Gase. Die drei wichtigsten Treibhausgase sind Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4) und Distickstoffoxid (N_2O).¹⁵

⁷[8], S.13

⁸[8], S.13

⁹[8], S.13

¹⁰[8], S.13

¹¹[8], S.30

¹²[8], S.31

¹³[8], S.32

¹⁴[8], S. 30ff

¹⁵[1], S. 486ff

	Kohlendioxid	Methan	Distickstoffoxid
Konzentration vor der Industrialisierung, ppm	280	0,70	0,27
Konzentration 1998, ppm	365	1,75	0,31
Anstieg	30%	150%	15%

Tabelle 1.1.: Treibhausgaskonzentration

Tabelle 1.1¹⁶ beschreibt die atmosphärische Konzentration (gemessen in ppm (parts per million)) der drei wichtigsten Treibhausgase vor der industriellen Revolution und im Jahr 1998. Die drei Gase unterscheiden sich sehr stark in der Effektivität, mit der sie Strahlung absorbieren und wieder emittieren. CO_2 ist, pro Molekül betrachtet, dabei am wenigsten effektiv im Vergleich zu N_2O , das am effektivsten ist. Das heißt, pro Molekül betrachtet emittiert CO_2 weniger Wärmestrahlung als N_2O und trägt dadurch weniger zur Klimaerwärmung bei. Da sich aber wesentlich mehr CO_2 in der Atmosphäre befindet, spielt Kohlendioxid im Treibhauseffekt eine größere Rolle als Methan und Distickstoffoxid. Alle drei hier aufgeführten Treibhausgase haben eine lange Lebensdauer in der Atmosphäre. CO_2 besitzt eine Lebensdauer zwischen fünf und mehreren hundert Jahren, für Methan beträgt die Lebensdauer etwa 10 Jahre und für Distickstoffoxid etwa 100 Jahre. Es wird davon ausgegangen, dass unter all den langlebigen Treibhausgasen das CO_2 für 60% der Erwärmung des Klimas seit der Industrialisierung verantwortlich ist.¹⁷

„Es ist [...] Konsens in der Klimaforschung, dass der Mensch für den Anstieg der CO_2 -Konzentration verantwortlich ist.“¹⁸ Der größte Teil der anthropogenen CO_2 -Emissionen geht auf „die Verbrennung fossiler Brennstoffe“¹⁹ (also „Erdöl, Kohle und Erdgas“²⁰) zurück.²¹ „Der Rest erklärt sich aus Landnutzungsänderungen, insbesondere durch die Zerstörung der Wälder und der damit verbundenen Verbrennung von Biomasse.“²²

Die Kohlendioxidkonzentration der Atmosphäre von 2005 (379 ppm) übersteigt bei weitem den natürlichen Bereich der letzten 650 000 Jahre und die jährliche Wachstumsrate der CO_2 -Konzentration war in den letzten Jahren größer als seit Beginn der Messungen, obwohl hier von Jahr zu Jahr Schwankungen auftreten können.²³

¹⁶[1], S. 487

¹⁷[1], S. 486ff

¹⁸[5], S.40

¹⁹[5], S.39

²⁰[5], S.39

²¹[5], S. 39

²²[5], S.40

²³[12], S. 2ff

Die Auswirkungen der globalen Klimaerwärmung sind bereits in vielen Bereichen spürbar. So ist es dem Intergovernmental Panel on Climate Change²⁴ (IPCC) zufolge sicher, dass sich die globale Oberflächentemperatur, im Speziellen seit 1950, erhöht hat. Die Temperaturerhöhung von 1850-1899 bis 2001-2005 beträgt in etwa 0,76°C.²⁵

Elf der letzten zwölf Jahre zählen zu den zwölf wärmsten Jahren in den Aufzeichnungen der globalen Oberflächentemperatur (seit 1850). Der lineare Erwärmungstrend der letzten 50 Jahre ist fast doppelt so groß wie jener der letzten 100 Jahre. Weiters ist ein weiträumiges Schmelzen von Schnee und Eis sowie der Anstieg des globalen durchschnittlichen Meeresspiegels erwiesen. Beobachtungen seit 1961 zeigen, dass die durchschnittliche Temperatur der Ozeane bis in Tiefen von mindestens 3000m ansteigt und dass 80% der dem Klimasystem zugeführten Wärme von den Ozeanen absorbiert wurden. Diese Erwärmung hat eine Ausdehnung des Wassers zur Folge und trägt damit zum Anstieg des Meeresspiegels bei. Weitere Faktoren, die zum Meeresspiegelanstieg beitragen, sind der Rückgang von Gletschern und Schneebedeckung sowie Eiskappen. Weitere Veränderungen sind bei den arktischen Temperaturen, dem arktischen Eis, den Niederschlagsmengen, der Meeresversalzung sowie extremen Wetterereignissen wie Dürren, schweren Niederschlägen und der Intensität tropischer Wirbelstürme beobachtbar, um nur ein paar zu nennen.²⁶

Welche Folgen sind durch die globale Erderwärmung zu erwarten? Es ist anzunehmen, dass die globale Durchschnittstemperatur „um mehrere Grad Celsius“²⁷ ansteigen wird.²⁸ Daneben sind der Rückgang der Gebirgsgletscher und das Schrumpfen des arktischen Meer-Eises besonders sichtbare Auswirkungen.²⁹ „[...] die Kontinentaleismassen in Grönland und der Antarktis zeigen Anzeichen von beschleunigtem Abschmelzen, Permafrost-Boden taut auf, der Meeresspiegel steigt“³⁰ an. Es kommt gehäuft zu Wetterextremen und es besteht die Möglichkeit, dass sich die Meeresströmungen verändern.³¹ Aufgrund der bisher eher geringen Erwärmung sind die

²⁴Beim IPCC handelt es sich um einen zwischenstaatlichen Ausschuss für Klimaänderungen, der gemeinsam von der Welt-Meteorologie-Organisation (WMO) und dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) gegründet wurde ([5], S. 133) „mit der Aufgabe, eine verbindliche internationale Erklärung zum wissenschaftlichen Verständnis der Klimaänderungen zu verfassen. Die periodischen Sachstandsberichte des IPCC zu den Ursachen und Auswirkungen sowie von möglichen Handlungsstrategien sind die umfassendsten und aktuellsten verfügbaren Berichte zu diesem Thema.“ [5], S. 133

²⁵[11], S.36.

²⁶[12], S. 2ff

²⁷[8], S. 54

²⁸[8], S. 54

²⁹[8], S. 80

³⁰[8], S. 80

³¹[8], S.70ff und S.67ff

Folgen bislang noch mild, was³² „nicht über die Schwere des Problems hinwegtäuschen [sollte]. Die Auswirkungen werden bei ungebremsster Erwärmung sehr tiefgreifend sein, auch wenn die zeitliche Abfolge und regionale Ausprägung sich nur schwer im Einzelnen vorhersehen lässt.“³³ Besonders die Menschen in ärmeren Regionen werden die Auswirkungen des Klimawandels spüren.³⁴

Wie kann gegen die globale Erderwärmung vorgegangen werden? Es gibt drei verschiedene Arten, wie der Mensch auf den Klimawandel reagieren kann:

- *Adaption*: Das bedeutet, nichts zu unternehmen und sich an die veränderten Umstände anzupassen.

- *Offsetting*: Darunter werden Aktionen verstanden, die den entgegengesetzten klimatischen Effekt wie die Ansammlung von Treibhausgasen in der Atmosphäre haben. Ein Beispiel dafür wäre die Abgabe partikelförmiger Materie in die Atmosphäre, welche die Solarstrahlung zurück in den Weltraum reflektiert.

- *Mitigation*: Dabei wird versucht, die klimatischen Auswirkungen zu reduzieren, indem die Wachstumsrate der Treibhausgaskonzentration reduziert wird. Entweder geschieht dies durch eine Reduktion der Wachstumsrate der Emissionen oder durch ein Verstärken der Senken dieser Gase (wodurch diese wieder aus der Atmosphäre entfernt werden).

Diese drei Reaktionsmöglichkeiten müssen nicht exklusiv sein, sondern es ist möglich, alle drei gleichzeitig zu verfolgen. Der zweiten Möglichkeit wird im Moment kaum Beachtung geschenkt. Die meiste Aufmerksamkeit fokussiert sich auf die Reduktion von Emissionen und die Verstärkung der CO_2 -Senken, wie zum Beispiel dem Pflanzen von Bäumen.³⁵

³²[8], S. 81

³³[8], S. 81

³⁴[8], S. 81

³⁵[1], S. 495ff

2. DICE-Modell-2007 (W. Nordhaus, 2008)

2.1. Einleitung

Dieser Abschnitt behandelt das Buch „A Question of Balance“¹ von William Nordhaus, in dem ein Modell beschrieben wird, das es ermöglicht, verschiedene Alternativen, mit dem Klimawandel umzugehen, zu vergleichen. Der Autor, William Nordhaus, geht von einem ökonomischen Modell aus und erweitert dieses um geophysikalische Gleichungen. Im Großen und Ganzen werden die aktuellen Kosten der Emissionsreduktion mit dem Nutzen verminderter zukünftiger Klimaschäden abgewogen. In dem vorliegenden Text erkläre ich den Aufbau des DICE-Modells-2007 und erläutere die Basispolitik sowie die Optimalpolitik.

Um verschiedene Alternativen in Bezug auf den Umgang mit dem Klimawandel zu vergleichen, wurde in dem vorliegenden Modell ein ökonomischer Ansatz gewählt. Dabei werden alle wirtschaftlichen Aktivitäten in eine gemeinsame Einheit umgewandelt und die verschiedenen Politiken dahingehend verglichen, welche Auswirkungen sie auf die Gesamtmenge dieser gemeinsamen Einheit haben. Im DICE-Modell-2007 werden die Werte der Güter auf US-Dollar von 2005 bezogen, wobei diese Werte eher einen Standardwarenkorb als wirkliches Geld repräsentieren. Tatsächlich werden also die wirtschaftlichen Aktivitäten in Einheiten von Standardwarenkörben umgewandelt.

Die zentralen Fragestellungen eines ökonomischen Ansatzes sind: Um wieviel müssen die Emissionen von CO_2 und den anderen Treibhausgasen reduziert werden? Welchem Zeitpfad folgen die Reduktionen optimalerweise? Wie sollte die Reduktion zwischen den verschiedenen Industrien und den verschiedenen Ländern aufgeteilt werden? Auf welche Art werden die Reduktionskosten auf Konsumenten und Firmen aufgespalten?

Letztendlich geht es darum, die Kosten für die Verlangsamung des Klimawandels mit den Schä-

¹[6]

den eines schnelleren Klimawandels abzuwägen. Es zeigt sich, dass die Umsetzung am besten über Marktmechanismen erfolgt. Dabei geben im Besonderen höhere Preise für kohlenstoffhaltige Brennstoffe einen Anreiz für Konsumenten und Firmen, ihren Energiehaushalt zu verändern und Kohlenstoffemissionen zu senken. Auf lange Sicht regt dies Firmen dazu an, neue Technologien zu entwickeln. Eine Möglichkeit, diese Kohlenstoffpreise zu ermitteln, sind die sozialen Kosten für Kohlenstoff, die den aktuellen Wert der zusätzlichen wirtschaftlichen Schäden angeben, die durch eine weitere Tonne von Kohlenstoffemissionen entstehen. Zur Umwälzung dieser sozialen Kosten können erhöhte Kohlenstoffpreise oder Steuern auf Kohlenstoffprodukte eingeführt werden.

Im DICE-Modell-2007 wird versucht, die Faktoren, die sich auf das Wirtschaftswachstum, die CO_2 -Emissionen, den Kohlenstoffkreislauf, den Klimawandel und die Klimapolitiken auswirken, miteinander zu verbinden. Dies spiegelt sich auch im Namen des Modells wider, da DICE ein Akronym für „Dynamic Integrated model of Climate and the Economy“ ist. Das Modell betrachtet die Ökonomie des Klimawandels aus dem Blickwinkel einer neoklassischen Wachstumstheorie. Dabei wird auf aktuellen Konsum verzichtet und stattdessen werden Investitionen in Kapital, Bildung und Technologie getätigt, um den Konsum in der Zukunft zu erhöhen. Dieser Ansatz wird im DICE-Modell-2007 noch durch das „natürliche Kapital“ des Klimasystems als zusätzlichen Kapitalstock erweitert, wobei die Konzentration der Treibhausgase als negativer Kapitalstock zu verstehen ist. Durch heutigen Konsumverzicht und Investitionen in die Emissionsreduktion wird dieser Kapitalstock erhöht und die zukünftigen Konsummöglichkeiten werden durch verhinderte Klimaveränderungen gesteigert. Diese Thematik wird als intergenerationale Gerechtigkeit bezeichnet. Es geht also darum, auf wie viel gegenwärtige Generationen verzichten müssen, um zukünftigen Generationen eine weniger zerstörte Umwelt zu hinterlassen.

Nachdem das DICE-Modell-2007 ein globales Modell ist, werden die Schätzungen für Wirtschaft, Emissionen und Auswirkungen für 12 Regionen durchgeführt und dann über die Wechselkurse der Kaufkraftparität zu einem globalen Ganzen aggregiert. Für viele Teile des Modells ist diese Aggregation nicht von Nachteil, da zum Beispiel die regionale Verteilung von Treibhausgasen relativ unwichtig ist, solange die globale Konzentration korrekt geschätzt wird. Allerdings ist es durch diesen globalen Ansatz nicht möglich, die Kosten und Vorteile der Einflüsse für einzelne Regionen zu berechnen. Dafür ermöglicht das globale Modell einfachere, leichter handzuhabende Gleichungen und ein leichteres Verständnis des Modells. Der Großteil der wichtigen Variablen, wie Welt-Output, Kapitalstock, CO_2 -Emissionen und CO_2 -Konzentration, globale Temperaturveränderung und Klimaschäden, sind endogen in das Modell integriert. An-

dere, wie Bevölkerung, Bestand an fossilen Brennstoffen und das Tempo der technologischen Änderungen, werden exogen angenommen. Als Rückmeldung generiert das Modell den Pfad der Emissionsreduktion oder den Kohlenstoffpreis.

Für alle Bereiche, die notwendig sind, um den Klimawandel für die nächsten Jahrzehnte zu verstehen, besitzt das DICE-Modell-2007 Untermodelle. Diese Untermodelle versuchen in vereinfachter Weise den jeweiligen Bereich möglichst genau wiederzugeben. Aufgrund der Vereinfachung können die Untermodelle leicht angepasst und in ein integriertes Modell, das alle Komponenten verlinkt, eingebunden werden.

Es wird davon ausgegangen, dass die Welt ein Set von wohldefinierten Präferenzen besitzt, das durch eine soziale Wohlfahrtsfunktion, welche die verschiedenen Konsumpfade reiht, abgebildet wird. Die relative Wichtigkeit der unterschiedlichen Generationen wird durch die reine Zeitpräferenzrate und die Konsumelastizität beeinflusst. Diese beiden Parameter interagieren, um die Diskontrate festzulegen, welche für ökonomische Entscheidungen wichtig ist. Der Konsumpfad wird sowohl durch ökonomische als auch geophysikalische Beziehungen eingeschränkt. Als wichtige Entscheidungsvariablen des Wirtschaftsbereiches fungieren sowohl die Sparrate des physischen Kapitals als auch die Emissionskontrollrate.

Jede Region ist mit einem anfänglichen Kapitalstock, Arbeits- und Technologielevel ausgestattet. Das Bevölkerungswachstum und der Technologiewandel sind regionalspezifisch und exogen, während die Kapitalakkumulation durch die Optimierung des Konsumflusses über die Zeit bestimmt wird. Der Technologiewandel kann in zwei verschiedenen Formen auftreten, einem wirtschaftsweiten Technologiewandel oder aber einem kohlenstoffsparenden Technologiewandel. Die fossilen Brennstoffe sind in ihrer Verfügbarkeit begrenzt. Da die kohlenstoffbasierenden Brennstoffe teurer werden, werden sie über die Zeit durch nicht kohlenstoffhaltige Brennstoffe substituiert. Die Preissteigerung wird entweder durch die Ressourcenausbeutung oder durch Politiken, die die Kohlenstoffemissionen reduzieren, verursacht. Die im Modell implementierte Backstop-Technologie ermöglicht ein vollständiges Ersetzen aller fossilen Brennstoffe zu einem relativ hohen, jedoch über die Zeit sinkenden, Preis. Der Output wird als Cobb-Douglas-Produktionsfunktion in Kapital, Arbeit und Energie angenommen.

Das Besondere des DICE-Modells-2007 ist, dass es zusätzlich noch geophysikalische Beziehungen integriert, welche die Wirtschaft mit den verschiedenen, den Klimawandel betreffenden, Faktoren verbindet. Das industrielle CO_2 ist das einzige Treibhausgas, das im DICE-Modell-2007 behandelt und hinsichtlich seines optimalen Emissionsreduktionspfades untersucht wird.

Dies spiegelt die Ansicht wider, dass CO_2 der Hauptverursacher der globalen Erwärmung ist und die anderen Treibhausgase nur wenig oder einen schwer erfassbaren Einfluss haben. CO_2 , das im Zuge landwirtschaftlicher Nutzung entsteht, und andere Treibhausgase sind exogen in das Modell eingebaut. Die CO_2 -Emissionen werden durch eine Funktion des Gesamtoutputs, einer zeitabhängigen Emissions-Output-Rate und einer Emissionskontrollrate prognostiziert. Die Emissionskontrollrate wird durch die jeweils betrachtete Klimawandelpolitik ermittelt.

Der Kohlenstoffkreislauf wird durch ein Drei-Reservoirs-Modell beschrieben. Dieses besteht aus der Atmosphäre, einer sich schnell mischenden Schicht aus Biosphäre und dem oberen Teil des Ozeans und der Tiefsee. Es wird angenommen, dass jedes Reservoir innerlich gut vermischt ist und ein gegenseitiger Austausch der angrenzenden Bereiche erfolgt, wobei die Vermischung zwischen der Tiefsee und den restlichen Reservoirs sehr langsam vor sich geht.

Folgende Gleichungen beschreiben das Klimasystem: Die Gleichung für die radioaktive Strahlung gibt den Einfluss von akkumulierten Treibhausgasen auf die Strahlungsbilanz an und die beiden Klimagleichungen berechnen die globale Durchschnittstemperatur der Erdoberfläche und der Tiefsee für jeden Zeitschritt.

Zum Schluss wird das schwierige Thema der wirtschaftlichen Auswirkungen der Klimaänderung untersucht. Es basiert auf der Annahme, dass die Schäden einer langsamen Klimaveränderung gemäßigt sind, diese jedoch mit dem Ausmaß der Veränderungen nichtlinear anwachsen. Weiters wird davon ausgegangen, dass die Schäden wesentlich stärker die armen, kleinen, tropischen Länder treffen werden als die reichen, großen Länder.

Als beste Politik erweist sich in diesem Modell eine langsame, jedoch steigende Investition in Emissionsreduktion, die bei relativ geringen Kosten durchaus beträchtliche Klimaschäden verhindert.

2.2. Das Modell

Dieses Kapitel erläutert den mathematischen Aufbau des DICE-Modells-2007 und ist aufgeteilt in die Abschnitte Zielfunktion, wirtschaftliche Beziehungen und Klima-Emissions-Gleichungen. Zur Verbesserung der Übersicht sind alle Gleichungen, Variablen und Parameter im Appendix nochmals aufgelistet.

2.2.1. Zielfunktion

Im DICE-Modell-2007 basiert die Herleitung der Zielfunktion auf der Annahme, dass sowohl wirtschaftliche, als auch klimatische Maßnahmen derart gestaltet sein sollten, dass sie den Konsumfluss über die Zeit optimieren. Konsum wird in diesem Zusammenhang als verallgemeinerter Konsum aufgefasst, der neben traditionellen Marktgütern und Dienstleistungen auch nicht käuflich erwerbbar Güter wie Freizeit, Gesundheit und Umweltleistungen beinhaltet. Die mathematische Darstellung dieser Annahme erfolgt über die Maximierung einer sozialen Wohlfahrtsfunktion, welche über die diskontierte Summe des bevölkerungsgewichteten Pro-Kopf-Konsumnutzens definiert wird.

$$W = \sum_{t=1}^{Tmax} U [c(t), L(t)] (1 + \rho)^{-t} \quad (2.1)$$

Hierbei bezeichnet U den Konsumnutzen, der sich, wie aus der Nutzenfunktion (Gleichung (2.2)) ersichtlich, pro Periode proportional zum Bevölkerungslevel $L(t)$ verhält. $c(t)$ beschreibt den Pro-Kopf-Konsum zur Zeit t und ρ die reine Zeitpräferenzrate, die als Diskontrate zur Wohlfahrtsgewichtung des Nutzens der verschiedenen Generationen dient. Die Zeitpräferenzrate ρ wird in Prozent pro Zeiteinheit berechnet und misst die Wichtigkeit des Wohlergehens zukünftiger Generationen in Relation zur gegenwärtigen Generation. Eine Zeitdiskontierungsrate gleich Null bedeutet eine Gleichbehandlung zukünftiger Generationen verglichen mit gegenwärtigen Generationen, wohingegen ein positives ρ bedeutet, dass das Wohlergehen zukünftiger Generationen „abdiskontiert“ wird im Vergleich mit näheren Generationen. Das Modell läuft über 600 Jahre, wobei jeder Zeitschritt ein Jahrzehnt darstellt.

2.2.2. Wirtschaftsbeziehungen

Die Optimierung erfolgt unter einer Reihe von Nebenbedingungen, unter anderem der Nutzenfunktion.

$$U [c(t), L(t)] = L(t) \left[c(t)^{1-\alpha} / (1 - \alpha) \right] \quad (2.2)$$

Der Nutzen entspricht der Bevölkerungsgröße multipliziert mit dem Nutzen des Pro-Kopf-Konsums. Der Parameter α wird als Konsumelastizität bezeichnet und repräsentiert die Aversion vor einer ungleichen Stellung der verschiedenen Generationen. Für einen niedrigen (hohen) Wert von α wird bei Entscheidungen wenig (stark) berücksichtigt, ob die zukünftige Generation reicher oder ärmer als die gegenwärtige ist. Aus den Parametern ρ und α wird die Diskontrate, welche in die Balance zwischen den heutigen Emissionsreduktionskosten und dem Nutzen verringerter, zukünftiger Klimaschäden einfließt, errechnet. Bei einer hohen Kapitalverzinsung werden die Emissionsreduktionen zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführt, während sie bei einer niedrigen Verzinsung früher umgesetzt werden.

Die folgenden drei Gleichungen beschreiben die Entwicklung des Weltoutputs über die Zeit. Dabei sind Bevölkerung und Arbeitskraft exogen gewählt, wobei das Bevölkerungswachstum zu Beginn gegeben ist und danach sinkt, sodass sich die Gesamtbevölkerung einer Größe von 8,5 Milliarden annähert. $Q(t)$ ist eine modifizierte neoklassische Produktionsfunktion mit konstanten Skalenerträgen in Kapital und Arbeit und Hicks-neutralem technologischen Fortschritt.

$$Q(t) = \Omega(t) [1 - \Lambda(t)] A(t) K(t)^\gamma L(t)^{1-\gamma} \quad (2.3)$$

$\Omega(t)$ und $\Lambda(t)$ bezeichnen die Klimaschädigung sowie die Senkungskosten. Die Schädigung des Klimas verhält sich proportional zum Weltoutput und ist eine polynome Funktion der Veränderungen der globalen Durchschnittstemperatur. $A(t)$ beschreibt die Produktivität.

$$\Omega(t) = 1 / \left[1 + \pi_1 T_{AT}(t) + \pi_2 T_{AT}(t)^2 \right] \quad (2.4)$$

$T_{AT}(t)$ stellt die globale Durchschnittstemperatur dar. π_1 bezeichnet den Koeffizienten der Temperatur und π_2 den Koeffizienten der Temperatur im Quadrat.

Die Senkungskosten-Gleichung (2.5) beinhaltet die geschätzten Schäden größerer Sektoren wie Landwirtschaft, die Kosten des Meeresspiegelanstiegs, negative Auswirkungen auf die Gesundheit, immaterielle Werte und Schätzungen möglicher Kosten von Katastrophenschäden. Infolge der fehlenden Grundlage an empirischen Studien beruht diese Gleichung stark auf Vermutungen. Bei der Senkungskostenfunktion hängen die Kosten der Emissionsreduktion von der Emissionsreduktionsrate ab. Die Emissionsreduktionsrate wird durch eine „Emissionskontrollrate“ $\mu(t)$ dargestellt, die die anteilmäßige Reduktion von Emissionen in Relation zu unkontrollierten Emissionen ausdrückt. Diese Rate $\mu(t)$ ist von zentraler Bedeutung in dieser Studie und fungiert als Kontrollvariable in diesem Modell.

$$\Lambda(t) = \pi(t) \theta_1(t) \mu(t)^{\theta_2} \quad (2.5)$$

$\pi(t)$ beschreibt über

$$\pi(t) = \varphi(t)^{1-\theta_2} \quad (2.6)$$

die Erhöhung der Senkungskosten durch unvollständige Partizipation bei einer gegebenen globalen Kontrollrate. Dabei steht $\varphi(t)$ für den Emissionsanteil der partizipierenden Gruppe und θ_2 fungiert als Parameter.

Die Senkungskostenfunktion (2.5) wird streng konvex angenommen, um anzuzeigen, dass die marginalen Reduktionskosten von Null beginnend mehr als linear mit der Reduktionsrate steigen. $\theta_1(t)$ und θ_2 bezeichnen die Parameter.

Im Modell integriert findet sich eine Backstop-Technologie. Dies ist eine Technologie, die alle fossilen Energieträger ersetzen kann. Die Backstop-Technologie könnte CO_2 aus der Atmosphäre entfernen oder eine universelle, umweltfreundliche Null-Kohlenstoff-Energietechnologie sein. Es könnte eine bereits bekannte Technologie sein oder eine bis jetzt noch nicht entdeckte. Es wird angenommen, dass der Backstop-Preis anfangs sehr hoch ist und dann über die Zeit mit kohlenstoffsparenden Technologieveränderungen sinkt. Die Backstop-Technologie wird in das Modell eingegliedert, indem der Zeitpfad der Parameter in der Senkungskosten-Gleichung (2.5) so festgesetzt wird, dass die marginalen Kosten der hundertprozentigen Senkung jedes Jahr mit dem Backstop-Preis übereinstimmen. Bei einer Emissionskontrollrate von 100 Prozent wird also vollständig auf die Backstop-Technologie gewechselt. Die Kosten für die Backstop-Technologie erscheinen recht hoch. Es muss allerdings beachten werden, dass dies die marginalen Kosten für die Reduktion der letzten Einheit von Kohlenstoffemissionen sind.

Die nächsten drei Gleichungen definieren die Verteilung des Outputs zwischen Konsum $C(t)$ und Bruttoinvestition $I(t)$, den Pro-Kopf-Konsum $c(t)$ und die Kapitalbilanzgleichung $K(t)$. δ_K bezeichnet dabei die Abschreibung des Kapitalstocks.

$$Q(t) = C(t) + I(t) \quad (2.7)$$

$$c(t) = C(t) / L(t) \quad (2.8)$$

$$K(t) = I(t) + (1 - \delta_K) K(t-1) \quad (2.9)$$

Die letzten beiden Gleichungen im Wirtschaftsabschnitt sind die Emissionsgleichung der Industrie und die Ressourceneinschränkung fossiler Brennstoffe.

$$E_{Ind}(t) = \sigma(t) [1 - \mu(t)] A(t) K(t)^\gamma L(t)^{1-\gamma} \quad (2.10)$$

$$CCum \geq \sum_{t=0}^{Tmax} E_{Ind}(t) \quad (2.11)$$

Der unkontrollierte CO_2 -Ausstoß der Industrie ist gegeben durch einen Level an Kohlenstoffintensität $\sigma(t)$, multipliziert mit dem Weltoutput. $\sigma(t)$ beschreibt also den Anteil des unkontrollierten CO_2 -Ausstoßes vom Weltoutput und wird exogen angenommen. Diese Emissionen werden dann durch die Emissionsreduktionsrate $\mu(t)$ reduziert, die, wie schon erwähnt, als Kontrollvariable fungiert.

Gleichung (2.11)² ist eine Beschränkung der gesamten Ressourcen fossiler Brennstoffe, „ $CCum$ “ steht dabei für den maximalen Konsum an fossilen Brennstoffen. Das DICE-Modell-2007 geht davon aus, dass die stufenweisen Abbaukosten gleich Null sind und die fossilen Brennstoffe durch den Markt optimal über die Zeit aufgeteilt werden, sodass optimale Hotelling-Zinsen erzeugt werden.

2.2.3. Geophysikalische Gleichungen

In diesem Abschnitt geht es darum, die Wirtschaftsaktivitäten und Treibhausgasemissionen mit dem Kohlenstoffhaushalt, der radioaktiven Strahlung und dem Klimawandel in Verbindung zu setzen. Die besondere Herausforderung hierbei ist es, sehr komplexe Vorgänge in ein geophysikalisches Wirtschaftsmodell einzubinden. Dazu ist eine starke Vereinfachung der Dynamiken auf wenige Gleichungen notwendig, wobei darauf geachtet wird, ein transparentes Modell sowie eine empirisch und rechnerisch lösbare Optimierung zu erhalten.

²Nordhaus führt diese Ungleichung folgendermaßen auf:

$$CCum \leq \sum_{t=0}^{Tmax} E_{Ind}(t).$$

Nach Rücksprache mit dem Autor, stellte sich heraus, dass die Formel im Original [6] falsch dargestellt wurde. Ich baue sie daher in korrigierter Form ein.

In der folgenden Gleichung wird der Zusammenhang zwischen Wirtschaftsaktivität und Treibhausgasemission dargestellt. $E(t)$ beschreibt die gesamten Kohlenstoffemissionen, die sich aus endogenen industriellen und exogenen Kohlenstoffemissionen aus der landwirtschaftlichen Nutzung zusammensetzen.

$$E(t) = E_{Ind}(t) + E_{Land}(t) \quad (2.12)$$

Gleichung (2.13) bis (2.15) definieren den Kohlenstoffkreislauf, der aus einem Drei-Reservoirs-Modell besteht. Die drei Reservoirs sind die Atmosphäre, ein sich mischendes Reservoir aus der Biosphäre und dem oberen Teil des Ozeans und das dritte Reservoir ist die Tiefsee. Es wird angenommen, dass die Tiefsee auf lange Sicht ein endliches, jedoch enorm großes Sinkvermögen für Kohlenstoff besitzt und alle drei Reservoirs auf kurze Sicht innerlich gut gemischt sind, die Vermischung zwischen den oberen Reservoirs und der Tiefsee jedoch sehr langsam vor sich geht.

$$M_{AT}(t) = E(t) + \phi_{11}M_{AT}(t-1) + \phi_{21}M_{UP}(t-1) \quad (2.13)$$

$$M_{UP}(t) = \phi_{12}M_{AT}(t-1) + \phi_{22}M_{UP}(t-1) + \phi_{32}M_{LO}(t-1) \quad (2.14)$$

$$M_{LO}(t) = \phi_{23}M_{UP}(t-1) + \phi_{33}M_{LO}(t-1) \quad (2.15)$$

$M_{AT}(t)$, $M_{UP}(t)$, $M_{LO}(t)$ stehen dabei für die Menge an Kohlenstoff in dem jeweiligen Reservoir. ϕ_{ij} bezeichnet den jeweiligen Parameter für den Austausch an Kohlenstoff pro Periode, wobei der Austausch von i nach j erfolgt. 1 steht dabei für den Bereich Atmosphäre, 2 für Biosphäre und oberen Teil des Ozeans und 3 steht für die Tiefsee.

Als nächstes wird der Zusammenhang zwischen der Ansammlung von Treibhausgasen und dem Klimawandel erfasst. Da die diesbezüglich vorhandenen Forschungsmodelle zu komplex sind, um sie in ein Wirtschaftsmodell zu integrieren, wird ein kleines Modell, das die grundlegenden Beziehungen zwischen Treibhausgaskonzentration, radioaktiver Strahlung und Klimawandeldynamik erfasst, verwendet.

Die Anhäufung von Treibhausgasen führt, aufgrund einer Steigerung der radioaktiven Strahlung, zu einer Erwärmung der Erdoberfläche. Gleichung (2.16) erklärt die Beziehung zwischen der Ansammlung von Treibhausgasen und der steigenden radioaktiven Strahlung.

$$F(t) = \eta \{ \log_2 [M_{AT}(t) / M_{AT}(1750)] \} + F_{EX}(t) \quad (2.16)$$

Der größte Teil der Erwärmung ist auf CO_2 zurückzuführen. Die anderen Treibhausgase und Kraftkomponenten werden im DICE-Modell-2007 als exogen behandelt, da sie relativ klein sind und ihre Kontrolle entweder exogen oder kaum bekannt ist.

Nachfolgend wird das Klimamodell beschrieben (Gleichung (2.17) - (2.18)). Erhöhte radioaktive Strahlung erwärmt die Atmosphäre, welche wiederum den oberen Teil des Ozeans und allmählich die Tiefsee erwärmt. Die Zeitdifferenz des Systems wird vorwiegend durch die Trägheit der verschiedenen Schichten verursacht.

$$T_{AT}(t) = T_{AT}(t-1) + \xi_1 \{F(t) - \xi_2 T_{AT}(t-1) - \xi_3 [T_{AT}(t-1) - T_{LO}(t-1)]\} \quad (2.17)$$

$$T_{LO}(t) = T_{LO}(t-1) + \xi_4 \{T_{AT}(t-1) - T_{LO}(t-1)\} \quad (2.18)$$

$T_{AT}(t)$ und $T_{LO}(t)$ bezeichnen die globale Durchschnittstemperatur der Erdoberfläche und die Temperatur des oberen Teils des Ozeans. ξ_1, ξ_2, ξ_3 und ξ_4 sind die Parameter des Klimamodells. ξ_3 ist dabei der Koeffizient des Hitzeverlustes der Atmosphäre an den Ozean und ξ_4 der Koeffizient der Hitzeerzeugung der Tiefsee.

2.3. Die Politiken

Der große Vorteil von integrierten Beurteilungsansätzen wie dem DICE-Modell-2007 ist es, dass man verschiedene Politiken auf eine konsistente und umfassende Weise untersuchen kann. Es ist möglich, die Kosten und Auswirkungen von alternativen Politiken auf die Umwelt auf einmal zu analysieren.

2.3.1. Das Basismodell

Das Basismodell simuliert eine Welt, in der für die nächsten 250 Jahre keine Emissionskontrollen vorgenommen werden. Dies bedeutet, dass sich Personen und Firmen dem sich verändernden Klima anpassen, aber Regierungen nichts unternehmen, um die Treibhausgasemissionen einzuschränken oder die Treibhausexternalitäten zu internalisieren. Nach diesen zweieinhalb Jahrhunderten „erwacht“ die Welt und optimiert die Emissionstrajektorie vor dem Hintergrund der Schäden des Klimawandels. Davon ausgehend indizieren die Vorhersagen einen starken Anstieg der CO_2 -Emissionen und CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre sowie einen Temperaturanstieg von $5,3^\circ C$ für das Jahr 2100 im Vergleich zu 1900.

2.3.2. Das Optimalmodell

Im optimalen Modell wird eine Politik ermittelt, welche den abdiskontierten Nutzen maximiert. Das heißt, das Modell versucht, ein optimales Verhältnis zwischen aktuellen Senkungskosten und zukünftigen Schäden der globalen Erwärmung zu finden. Die Emissionsreduktionstrajektorie stellt die optimale Politik dafür dar. Dem Ganzen liegt zu Grunde, dass alle Länder sich in einer Weise an der Emissionsreduktion beteiligen, die effizient über Industrien, Länder und Zeit ist. Anders ausgedrückt: Im Sinne einer effizienten Politik müssen die marginalen Emissionsreduktionskosten für Sektoren und Länder ausgeglichen sein. Laut diesem Grundsatz entsprechen also die marginalen Kosten der Emissionsreduktion dem marginalen Nutzen der geminderten, zukünftigen Schäden.

Aus nachvollziehbaren Gründen sind diese Annahmen extrem optimistisch und dieses Modell sollte mit Vorsicht betrachtet werden. Es wird nicht angenommen, dass all diese Voraussetzungen auch tatsächlich eingehalten werden, vielmehr dient diese Politik als Vergleichswert für alternative Politiken. Dies ist der beste mögliche Pfad für die Emissionsreduktion unter den angenommenen wirtschaftlichen, technischen und geophysikalischen Bedingungen. Weiters ist noch anzumerken, dass das wirtschaftliche Optimum der Klimastabilität oder anderen nichtwirtschaftlichen Gütern keinen Wert zuweist. Es werden nur solche nicht käuflich erwerbbar Güter

beachtet, welche für die Menschen einen Wert besitzen.

Zusammenfassend folgt dieses Modell einem Reduktionspfad, der anfangs sehr gemäßigt ist und auf mittlere und lange Sicht drastische Maßnahmen fordert. Mit seiner idealen und effizienten Politik ist dieser relativ günstig und hat auf lange Sicht doch einen bedeutenden Einfluss auf den Klimawandel.

2.3.3. Anmerkungen zu den Computerkalkulationen

Mit Hilfe des Programms Mathematica habe ich versucht, das Modell nachzuberechnen. Aufgrund der Komplexität des Modells habe ich die Optimierung nicht selbst durchgeführt und stattdessen die Ergebnisse für μ von Nordhaus übernommen. Mit dieser Hilfestellung und den Informationen, die ich aus der online verfügbaren Exceltabelle [7] entnommen habe, konnte ich die restlichen Berechnungen durchführen und die Graphiken selbst erstellen. Es ist noch zu erwähnen, dass Nordhaus in dieser Exceltabelle des Modells bei der Variablen „Kohlenstoffkonzentration in der Atmosphäre“ die Rekursion für den letzten Zeitschritt nicht weiterlaufen lässt, sondern den Wert des Jahres 400 einfügt. In meinen Berechnungen habe ich die Rekursion weiterlaufen lassen, daher differieren die Werte dieser Variablen, sowie aller davon abhängigen, für die letzte Zeiteinheit. Die Kohlenstoffpreise sowie die sozialen Kohlenstoffkosten habe ich aus „A Question of Balance“³ übernommen. Bei der Durchführung der Abdiskontierung habe ich andere Ergebnisse erhalten, als sie bei Nordhaus aufgeführt sind. Deswegen habe ich auch die Gegenwartswerte aus „A Question of Balance“⁴ entnommen.

³[6]

⁴[6]

2.4. Ergebnisse

Bei den Ergebnissen des DICE-Modells-2007 ist vorweg darauf hinzuweisen, dass diese Art von Modell hauptsächlich dazu dient, die Dynamiken komplexer Systeme nachzuvollziehen. Die Ergebnisse vermitteln eine falsche Genauigkeit, die nicht das exakte Verhalten, die Messfehler und die Unsicherheiten repräsentiert. Aufgrund der internen Konsistenz von Annahmen und Schlussfolgerungen und der festzustellenden Unterschiede alternativer Annahmen und Politiken bieten die integrierten Beurteilungsmodelle jedoch eine unverzichtbare Fachrichtung.

Als erstes wird der wirtschaftliche Nettogewinn verglichen. Dieser beschreibt den Gegenwartswert des Konsums der optimalen Politik abzüglich jenem des Basismodells. Die optimale Politik erreicht einen gesamten wirtschaftlichen Nettogewinn von 3,37 Billionen \$. Obwohl dies eine immense Zahl ist, stellt dieser Wert nur 0,17% des gesamten, zukünftigen und abdiskontierten Einkommens dar.

Tabelle 2.1 weist den Gegenwartswert (GW) des Klimaschadens, den Gegenwartswert der Senkungskosten sowie den Gegenwartswert von Senkungskosten plus Klimaschaden auf. Die Differenz der Gegenwartswerte von Senkungskosten plus Klimaschaden weicht mit 3,07 Billionen \$ vom wirtschaftlichen Nettogewinn aufgrund von Nichtlinearitäten in der Kosten-, Schaden- und Nutzenfunktion ab, bietet aber eine gute Approximation der wirtschaftlichen Einflüsse.

	Basismodell	Optimalmodell
	(Billionen 2005 US-Dollar)	
GW des Klimaschadens	22,55	17,31
GW der Senkungskosten	0,04	2,20
GW von Senkungskosten + Klimaschaden	22,59	19,52

Tabelle 2.1.: Klimaschäden und Senkungskosten

2.4.1. Soziale Kohlenstoffkosten

Eine der wichtigsten Berechnungen des Modells sind die sozialen Kohlenstoffkosten. Diese bezeichnen den zusätzlichen Schaden, der durch eine weitere Tonne an Kohlenstoffemissionen verursacht wird. Im Besonderen sind die Werte des Basismodells interessant, da sie indizieren, wie viel für ein effizientes Emissions-Kontroll-Programm maximal aufgewendet werden sollte. Daher betragen die optimalen Kohlenstoffsteuern immer weniger oder gleich viel wie die sozialen Kohlenstoffkosten. Im Jahr 2005 belaufen sich die sozialen Kohlenstoffkosten für das

Basismodell auf 28,1 \$ und für das Optimalmodell auf 27,3 \$.

2.4.2. Kohlenstoffpreis bzw. Kohlenstoffsteuern

Unter dem Kohlenstoffpreis versteht man in einem Handelssystem den Marktpreis von Kohlenstoff. In einem Steuersystem arbeitet man mit Steuern, die für Kohlenstoffemissionen erhoben werden. Der optimale Kohlenstoffpreis, beziehungsweise die optimalen Steuern, sind jene, bei denen die Kosten für eine weitere Reduzierung der Kohlenstoffemissionen gleich dem Nutzen, der durch die Verringerung des Klimaschadens entsteht, sind. Es wird angenommen, dass die Kohlenstoffpreise innerhalb und zwischen den Ländern abgestimmt sind. Dies könnte durch vereinheitlichte Steuern oder über ein System von handelbaren Emissionszertifikaten geschehen. Um die steigenden Schäden und das Bedürfnis nach strengeren Einschränkungen widerzuspiegeln, sollten die optimalen Kohlenstoffpreise über die folgenden Jahrzehnte stark ansteigen. Die Steuern in der optimalen Politik betragen 34 \$ pro metrischer Tonne Kohlenstoff für das Jahr 2010 (Berechnungen in US-Dollar 2005) und steigen in den kommenden Jahren auf 42 \$ in 2015, 90 \$ in 2050 und 202 \$ in 2100 an. Das Basismodell weist eine Hotellingrente von 0,07 \$ pro Tonne Kohlenstoff auf, welche die relative Menge an fossilem Kohlenstoff reflektiert. Tabelle 2.2 und 2.3 dokumentieren die Kohlenstoffpreise für die Jahre 2005 - 2105. Generell ist der höchstmögliche Kohlenstoffpreis durch die Kosten, die eine Backstop-Technologie ermöglichen würden, festgelegt.

	2005	2015	2025	2035	2045	2055	2065
	(2005 US-Dollar pro Tonne Kohlenstoff)						
Basismodell	0,08	0,03	0,04	0,07	0,10	0,15	0,23
Optimalmodell	27,28	41,90	53,39	66,49	81,31	98,01	116,78

Tabelle 2.2.: Kohlenstoffpreise bzw. Steuern

	2075	2085	2095	2105
Basismodell	0,35	0,53	0,79	1,18
Optimalmodell	137,82	161,37	187,68	217,02

Tabelle 2.3.: Kohlenstoffpreise bzw. Steuern

2.4.3. Emissionskontrollrate

Abbildung 2.1 zeigt den Verlauf der CO_2 -Emissionskontrollrate des Basismodells und des Optimalmodells für den Zeitraum bis 2125. Die Emissionskontrollrate des Optimalmodells beschreibt die Verringerung der CO_2 -Emissionen in Bezug auf die Emissionen des Basismodells. Das Optimalmodell startet mit einer Kontrollrate von etwa 16% in der zweiten Modellperiode, steigt danach langsam an und erreicht im Jahr 2050 etwa 25%.

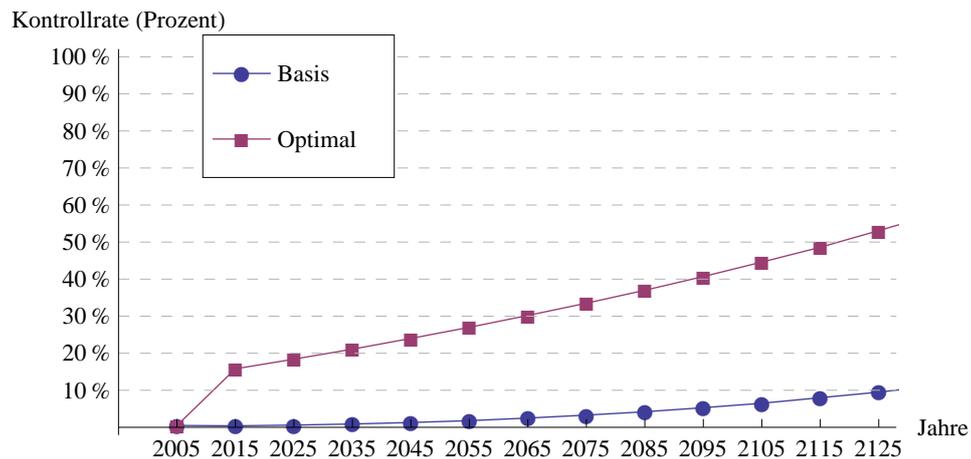


Abbildung 2.1.: Emissionskontrollrate. Die globale CO_2 -Emissionskontrollrate der Strategien für das nächste Jahrhundert

2.4.4. Emissionen

Im Basismodell wachsen die industriellen CO_2 -Emissionen stark an und erreichen etwa 20 Milliarden Tonnen Kohlenstoff pro Jahr in 2110. Da das optimale Modell nicht von Beginn an Emissionsreduktionen verlangt, folgt der Verlauf einer Höckerform mit einem Maximum von fast 12 Milliarden Tonnen im Jahr 2105 (Abbildung 2.2).

2.4.5. CO_2 -Konzentration

Zu Beginn beträgt die Kohlenstoffkonzentration 380 ppm (parts per million of carbon) und steigt im Basismodell auf fast 1200 ppm im Jahre 2205 an. Das Optimalmodell folgt einer Höckerform mit Werten von fast 700 ppm in 2175 und etwa 650 ppm in 2200 (Abbildung 2.3).

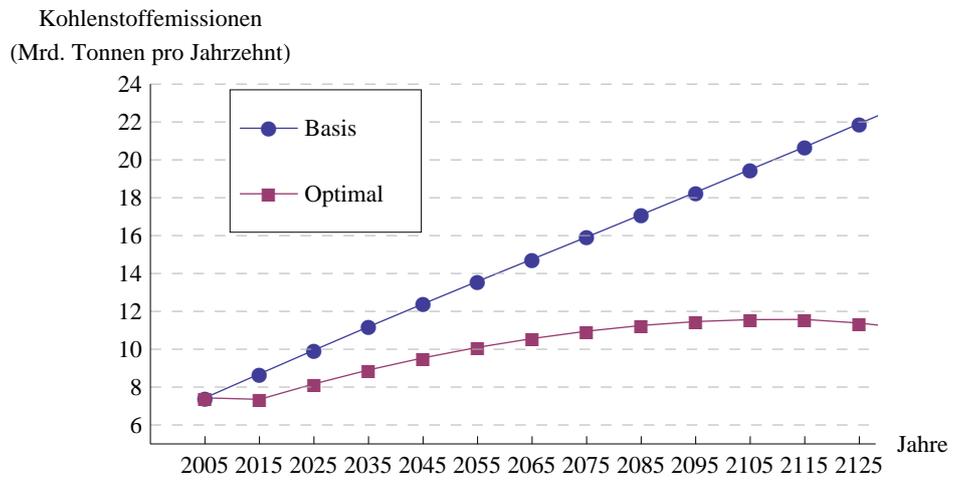


Abbildung 2.2.: Globale Emissionen von industriellem CO_2 .

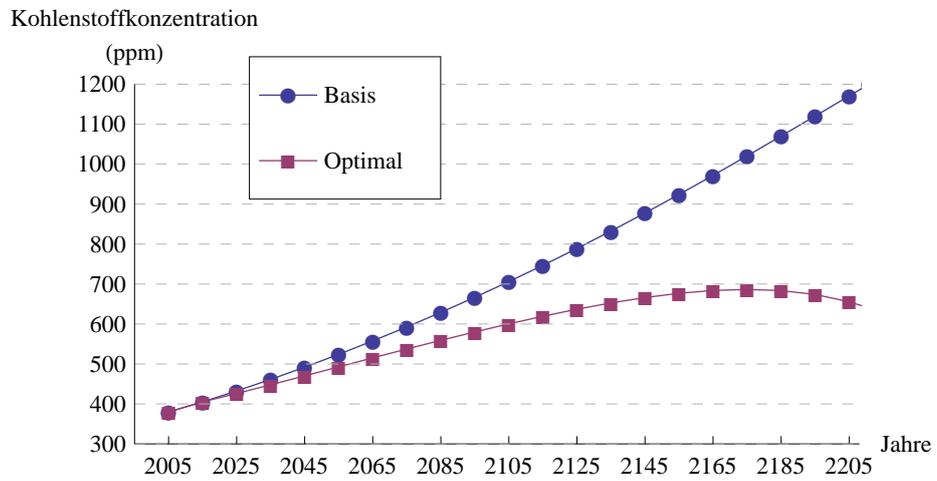


Abbildung 2.3.: CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre. Der Wert für 2005 ist der aktuelle Wert.

2.4.6. Temperaturanstieg

Der Temperaturanstieg startet im Basismodell bei $0,73^{\circ}\text{C}$ in 2005 (relativ zum Durchschnitt von 1890 - 1910) und erreicht 3°C im Jahr 2105 und 5°C im Jahr 2195. Ein großer Teil der Erwärmung beruht auf vergangenen Emissionen und der klimatischen Trägheit. Selbst wenn zukünftige Emissionen vollständig verhindert werden würden, läge der Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur bei etwa 1°C . Aufgrund dieser Trägheit ist es extrem schwierig, über das nächste Jahrhundert Einfluss auf die Temperaturtrajektorie zu nehmen und selbst bei Emissionsreduktionen von 50% bis 2050 in Bezug auf das Basismodell würde der Temperaturanstieg immer noch mindestens 2°C betragen. Immerhin reduziert der optimale Pfad die globale Durchschnittstemperatur, verglichen mit dem Basismodell, im Jahr 2105 um $0,5^{\circ}\text{C}$ und im Jahr 2195 um $1,6^{\circ}\text{C}$ (Abbildung 2.4).

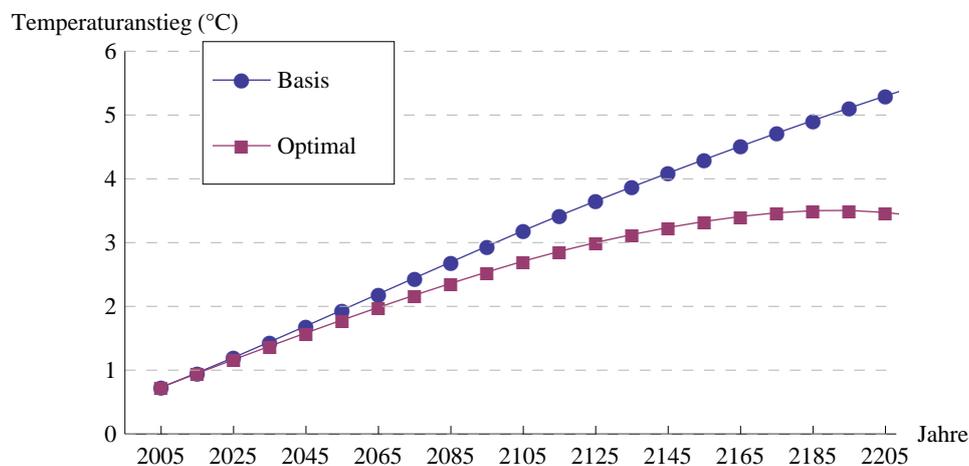


Abbildung 2.4.: Veränderung der globalen Durchschnittstemperatur. Der Anstieg ist relativ zum Durchschnitt von 1900.

2.4.7. Weitere wirtschaftliche Variablen

Dieses Modell inkludiert weitere Wirtschafts- und Umweltvariablen wie den Pro-Kopf-Konsum (Abbildung 2.5) und das Kohlenstoff-Output-Verhältnis. Dabei sollten zwei Punkte erwähnt werden, die den Trend betreffen. Als erstes geht das Modell von einem anhaltenden, raschen Wirtschaftswachstum aus, jedoch von einem etwas schwächeren Wachstum als in den letzten vier Jahrzehnten. Die durchschnittlichen globalen Wachstumsraten des Pro-Kopf-Konsums betragen anstatt der jährlichen 2,5% von 1960 - 2000 nun 1,3% für das folgende Jahrhundert. Dies führt zu einem Pro-Kopf-Konsum von 25.000 \$ in 2105, im Gegensatz zu 6.620 \$ in 2005. Dieser

Anstieg führt zu einer Erhöhung von Emissionen, aber auch zu einer Verbesserung des Lebensstandards, wodurch zusätzliche Mittel vorhanden sind, um gegen die Erderwärmung vorzugehen.

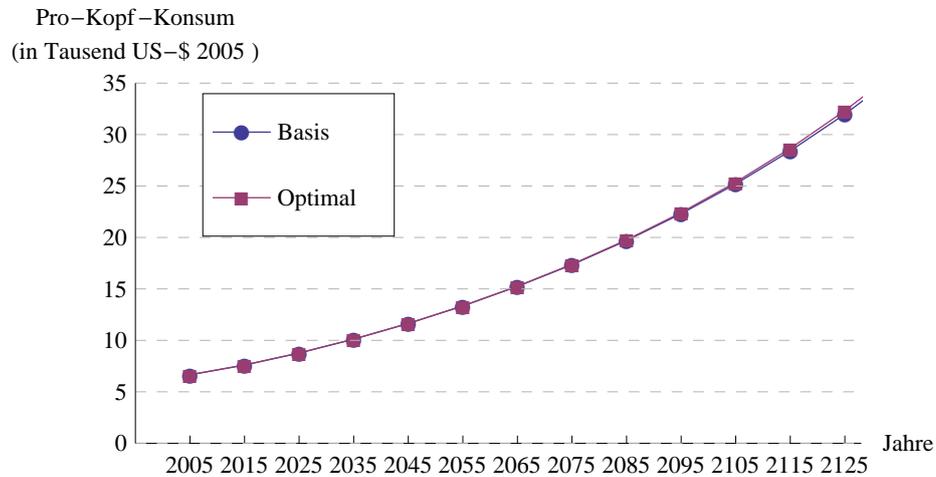


Abbildung 2.5.: Pro-Kopf-Konsum. Die Prognose des DICE-Modells-2007 geht von einem starken Anstieg des Pro-Kopf-Konsums aus, wobei Basis- und Optimalmodell nicht zu unterscheiden sind.

Weiters wird davon ausgegangen, dass die Entkarbonisierung im Basismodell langsamer als bisher vor sich gehen wird. Diese Schlussfolgerung beruht auf den Vorhersagen einer geringeren Verschiebung zu kohlenstoffarmen Brennstoffen und einem steigenden Anteil an Entwicklungsländern mit hohem CO_2 -BIP Verhältnis. Aufgrund dieser Trends wird von einer Verringerung des CO_2 -BIP Verhältnisses von nur 0,6% (anstatt bisheriger 1,7%) pro Jahr ausgegangen.

2.5. Diskussion

Die Ergebnisse dieses Modells sollten aufgrund der folgenden Problematiken mit Vorsicht betrachtet werden.

Als erstes beinhalten Struktur, Gleichungen, Daten und Parameter wichtige, noch nicht vollständig verstandene Elemente. Aufgrund der Langzeitprognose mit wenig erfassten Vorgängen sind die Ergebnisse umso fehlerbehafteter, je weiter sie in die Zukunft berechnet werden.

Zweitens arbeitet das Modell mit einer starken Vereinfachung der Dynamiken. Die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Teilen des Systems sind, besonders aufgrund der Langzeitdynamik, extrem kompliziert. Um eine möglichst gute Transparenz und Handhabung zu gewährleisten, müssen die sehr komplexen Vorgänge von Emissionen, Konzentrationen, Klimawandel, Emissionsreduktionskosten und Auswirkungen des Klimawandels stark vereinfacht werden. Dadurch gehen allerdings wichtige Informationen, wie zum Beispiel regionale Details, verloren. So können arme und reiche Regionen nicht getrennt untersucht werden und es ist nicht möglich, Kosten und Nutzen der Einflüsse für einzelne Regionen und Länder zu berechnen.

Als dritter Punkt ist anzuführen, dass das Modell von einer vollständigen Partizipation ausgeht, deren Einhaltung sehr unwahrscheinlich ist. Darunter versteht man nicht nur die Beteiligung aller Länder, sondern auch die der gesamten Wirtschaft, sodass es keine Ausnahmen für einzelne Staaten oder Wirtschaftsbereiche gibt.

Viertens nimmt das Modell an, dass sämtliche Elemente, wie zum Beispiel die Kohlenstoffpreise, sowohl innerhalb der Länder als auch zwischen den Ländern, aber auch über alle Sektoren vollständig harmonisiert sind. Das bedeutet auch, dass keine Sektoren favorisiert und keine Länder ausgenommen werden. Auch diese Annahme ist aus heutiger Sicht nicht erfüllbar.

Fünftens ist zu erwähnen, dass durch andere Maßnahmen wie Umweltpolitik, Militärpolitik, Steuer- oder Transferprogramme oder internationale Hilfsprogramme eventuell wesentlich größere Verbesserungen der menschlichen Situation möglich wären, diese zu beachten jedoch das Ausmaß des Modells übersteigt.

Sechstens wäre es von Vorteil, den kohlenstoffeffizienten Technologiewandel, der aufgrund der schweren Modellierung exogen eingeführt wurde, endogen einzuführen, da steigende Kohlenstoffpreise durchaus die Forschung und Entwicklung neuer Energietechnologien bewirken

können.

Und siebtens repräsentiert dieses Modell nur einen einzigen Ansatz mit dem Klimawandel umzugehen. Dies stellt folgerichtig eine sehr eingeschränkte Sichtweise dar, da andere Annahmen, Schätzungen oder Modellierungen eventuell bessere Ergebnisse erzielen könnten. Neben diesen Einschränkungen erfolgt die Untersuchung aus der Sichtweise einer einzigen Person, dem Autor, und damit unter einem eingeschränkten Blickwinkel und den Vorurteilen, die damit verbunden sind.

3. „Global Warming and Economic Externalities“ (A. Rezai et al., 2009)

3.1. Einleitung

Das folgende Kapitel behandelt das im Workingpaper „Global Warming and Economic Externalities“ [9] beschriebene Modell zur Analyse der wirtschaftlichen Auswirkungen der globalen Klimaerwärmung.

Durch seine Eigenschaften der Nichtausschließbarkeit und der Nichtrivalität des Konsums ist das Weltklima ein öffentliches Gut und die Klimaerwärmung eine negative Externalität. Durch diese implizierte Ineffizienz geht der wirtschaftliche Entscheidungsträger von marginalen sozialen Kosten gleich Null aus und erkennt die wahren Kosten der CO_2 -Emissionen nicht, was zu überhöhten Emissionen führt. Der Entscheidungsträger besitzt perfekte Voraussicht und kennt die Konsum-, Produktions- und Investitionsentscheidungen von sich selbst und allen anderen und kann dadurch den Pfad der CO_2 -Konzentration korrekt vorhersagen. Da er jedoch davon ausgeht, dass niemand seinen Kohlenstoffausstoß reduziert, bewertet er seinen eigenen Beitrag an Emissionen als vernachlässigbar. Daraus folgt, dass sich alle Entscheidungsträger für den ineffizienten Weg entscheiden.

Da die Entscheidungsträger die negativen Auswirkungen der Treibhausgasemissionen nicht berücksichtigen, erfolgt eine überhöhte Kapitalakkumulation, die eine überhöhte Akkumulation von Treibhausgasen mit sich bringt. Da zukünftige Generationen eine geringere CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre bevorzugen würden, sollten gegenwärtige Generationen weniger Kapital anhäufen und mehr davon konsumieren. Die beidseitigen Gewinne können durch eine Kostentransparenz erreicht werden. Um die negative Externalität der globalen Erderwärmung zu internalisieren, genügt es, die richtigen Preissignale für Treibhausgasemissionen zu setzen. Durch diesen Schritt werden die Emissionskosten auf ihren wahren Wert erhöht und die Entscheidungsträger beginnen in die Schadensverminderung zu investieren. Dieser Milderungsaufwand ist vergleichsweise niedrig, betrachtet man die Gewinne, die durch die vermiedenen Emissionen

erreicht werden.

In der Literatur zur Diskussion über den Klimawandel liegt ein großer Schwerpunkt auf der intergenerationellen Gerechtigkeit. Die Autoren dieses Papers sehen diese Thematik allerdings als unerheblich an, da alle Generationen von der Verlangsamung des Klimawandels profitieren. Häufen gegenwärtige Generationen weniger Kapital an und investieren mehr in die Schadensverminderung, so können sie zukünftigen Generationen einen besseren Mix von Kapital und Treibhausgasen hinterlassen und dabei ihren eigenen Konsumlevel halten.

Im vorliegenden Modell wird ein optimaler Pfad ermittelt, bei dem die gesamte Externalität internalisiert wird. Als Vergleich dient ein Referenzpfad, der den momentanen Zustand ohne Korrektur der Externalität beschreibt. Dieser wird mit „BAU“ bezeichnet, was als Akronym für „business as usual“ steht. Der Vergleich zeigt, dass die Internalisierung von einem ineffizienten zu einem effizienten Wachstumspfad mit höheren Pro-Kopf-Konsumlevels in jeder Periode und einem geringeren Schaden der Umwelt führt. Die Verminderung des Treibhauseffekts ist also primär kein intergenerationelles Problem, diese Problematik tritt erst bei der Verteilung des potentiellen Gewinns auf.

Da die intergenerationelle Gerechtigkeit ein derart präsent Thema bei anderen Modellen ist, wird in diesem Modell noch ein dritter Pfad, der als „beschränkt optimaler Pfad“ bezeichnet wird, eingeführt, der vielen anderen Modellen als Referenzpfad dient. Der beschränkt optimale Pfad basiert auf dem optimalen Pfad, mit der Variation, dass es den Entscheidungsträgern nicht möglich ist, in die Verminderung des Klimawandels zu investieren. Dies impliziert jedoch, dass die Entscheidungsträger trotzdem die sozialen marginalen Kosten der Emissionen kennen und diese Information in ihre Konsum-, Produktions- und Investitionsentscheidungen einbeziehen. Dadurch wird die Externalität teilweise internalisiert und die Entscheidungsträger wählen einen verstärkten Konsum und eine geringere Kapitalakkumulation, da dies die einzigen ihnen zur Verfügung stehenden Mittel sind, um gegen den Klimawandel vorzugehen. Der beschränkt optimale Pfad zeigt im Vergleich mit dem optimalen Pfad einen größeren Pro-Kopf-Konsum für die ersten Jahrzehnte, worauf sich die Diskussion über die intergenerationelle Gerechtigkeit stützt. Dieser Vergleich beinhaltet jedoch eine zu hohe Einschätzung der Kosten für die Milderung des Klimawandels.

3.2. Das Modell

Dieses Modell basiert auf einem Ramsey-Cass-Koopmans Modell, welches um die Dynamik und Auswirkungen der Treibhausgasemissionen erweitert wird. Als Produktionsfunktion dient eine Cobb-Douglas-Produktionsfunktion, über die ein Gut produziert wird.

Die Entscheidungsträger optimieren den Konsumfluss über die Zeit, indem sie über die diskontierte Summe des Pro-Kopf-Konsumnutzens maximieren.

$$\max_{s(t), m(t)} \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+\rho)^{t-1}} U \left[\frac{C(t)}{N(t)} \right] \quad (3.1)$$

Die Kontrollvariablen der Zielfunktion¹ sind $s(t)$ und $m(t)$. $s(t)$ beschreibt den Anteil am Output, der der Investition zugewiesen wird. $m(t)$ ist in $s(t)$ enthalten und steht für den Anteil am Output, der in Aktivitäten zur Verminderung des Klimawandels eingesetzt wird. Das bedeutet, beschließt der Entscheidungsträger, Kapital für die Verminderung des Klimawandels aufzuwenden, so reduziert dies die Kapitalmenge, die der Investition zugeteilt ist (Gleichung (3.9)).

Das Modell läuft über 60 Zeitschritte, wobei ein Zeitschritt ein Jahrzehnt darstellt. Der Parameter ρ beschreibt die Abdiskontierung des Nutzens und bewirkt, dass zukünftiger Nutzen, im Vergleich zu gegenwärtigem Nutzen, weniger stark in die Maximierung eingeht. Es wird $\rho = 0,1$ angenommen. Der Konsum wird durch $C(t)$ symbolisiert und $N(t)$ beschreibt den Bevölkerungsstock zur Zeit t .

$$N(t) = N_0 \left(\frac{1}{e^{gn \cdot t}} \right) + N_{Max} \left(1 - \frac{1}{e^{gn \cdot t}} \right) \quad (3.2)$$

Der Bevölkerungsverlauf² beginnt bei einem momentanen Stock von etwa 6500 Millionen (N_0) und konvergiert zu einem Bevölkerungsstock von 8500 Millionen (N_{Max}). gn beschreibt die initiale Wachstumsrate der Bevölkerung und die Parameterwerte für die Funktion lauten: $N_0 = 6,5$, $N_{Max} = 8,5$ und $gn = 0,35$.

Gleichung (3.3) definiert in einer isoelastischen Form den Nutzen, der aus einem bestimmten Konsumlevel zur Zeit t gewonnen wird, wobei $c(t)$ den Pro-Kopf-Konsum und η die Elastizität des marginalen Konsumnutzens ausdrückt. η wird mit $\eta = 2$ angenommen.

¹Im Anhang befindet sich eine Liste der Gleichungen, Variablen und Parameter, um eine bessere Übersicht zu ermöglichen.

²Der Wachstumspfad der Bevölkerung entspricht jenem des DICE-Modell-2007 von Nordhaus [6].

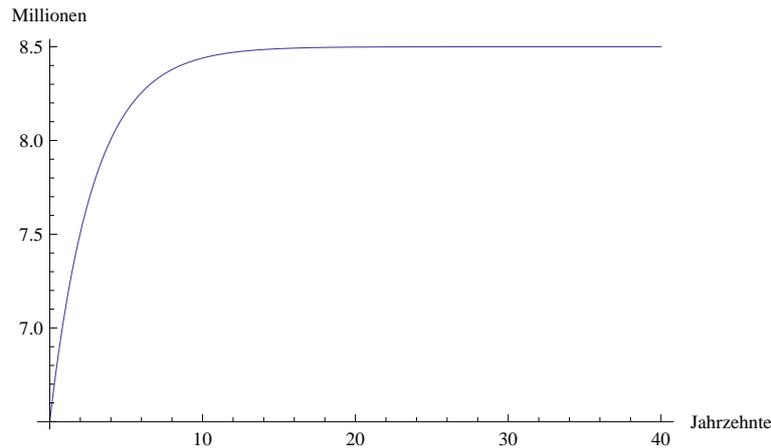


Abbildung 3.1.: Wachstumspfad der Bevölkerung

$$U[c(t)] = c(t)^{1-\eta} / (1-\eta) \quad (3.3)$$

Für die Konsum- und Investitionsentscheidungen der Periode t steht der effektive Output $Y(t-1)$, der sich am Ende der Periode $t-1$ ergibt, zur Verfügung. Der Konsum $C(t)$ beschreibt dabei jenen Anteil an $Y(t-1)$, der nicht der Investition $s(t)$ zugeteilt wird.

$$C(t) = [1-s(t)]Y(t-1) \quad (3.4)$$

Teilt man den gesamten Konsum $C(t)$ durch den Bevölkerungsstock $N(t)$, so ergibt dies den Pro-Kopf-Konsum $c(t)$.

$$c(t) = C(t)/N(t) \quad (3.5)$$

Durch die Cobb-Douglas-Produktionsfunktion in Kapital $K(t)$ und effektiver Arbeit $L(t)$ wird der potentielle Output $F[K(t), L(t)]$ generiert, der in Billionen (2000-2010) US-Dollar gemessen wird.

$$F[K(t), L(t)] = AK(t)^\alpha L(t)^{1-\alpha} \quad (3.6)$$

A beschreibt die Produktivität und wird so kalibriert, dass der potentielle Output zu Beginn mit dem aktuellen Wert von 60 Billionen US-Dollar übereinstimmt. Dies liefert $A = 28,4$. α beschreibt die Elastizität des Outputs in Bezug auf das Kapital und wird mit $\alpha = 0,35$ angenommen. Die effektive Arbeit setzt sich aus der Arbeitsproduktivität $B(t)$ und dem Wachstumspfad der Bevölkerung $N(t)$ über

$$L(t) = B(t)N(t) \quad (3.7)$$

zusammen.

$$B(t) = B_0 \left(\frac{1}{e^{gb \cdot t}} \right) + B_{Max} \left(1 - \frac{1}{e^{gb \cdot t}} \right) \quad (3.8)$$

Die zugehörigen Parameter sind der Startwert $B_0 = 1$, der Endwert $B_{Max} = 3$ und die initiale Wachstumsrate der Produktivität $gb = 0,1$. Dadurch ergibt sich eine Arbeitsbevölkerung, die gegen das Dreifache der Bevölkerung konvergiert.

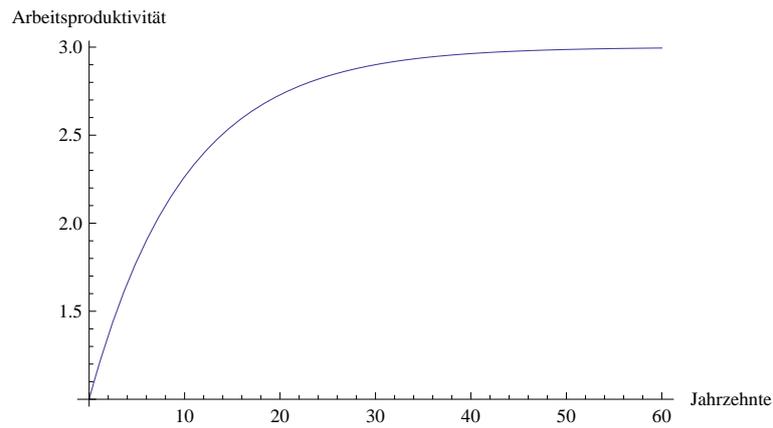


Abbildung 3.2.: Arbeitsproduktivität $B(t)$

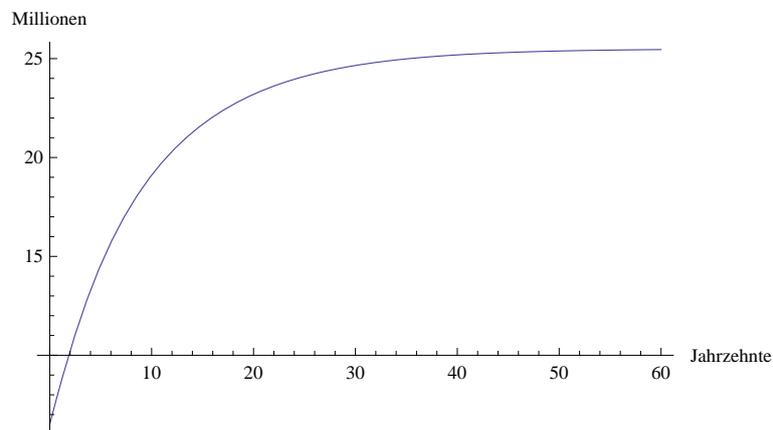


Abbildung 3.3.: Effektive Arbeit $L(t) = B(t)N(t)$

Die Dynamik der Zustandsgleichung des Kapitals ergibt sich aus der Investition $I(t)$ und der Abschreibung des Kapitals δ .

$$K(t) = (1 - \delta)K(t-1) + [s(t) - m(t)]Y(t-1) \quad (3.9)$$

$I(t) = s(t) - m(t)$ bedeutet, dass der ursprünglich der Investition zugedachte Anteil des Outputs $s(t)$ noch durch den Anteil, der zur Milderung des Klimawandels ausgegeben wird, reduziert wird. Der initiale Wert beträgt $K(0) = 200$ und es wird $\delta = 0,7$ angenommen.

$$CD(t) = (1 - \varepsilon)CD(t-1) + G[Y(t-1)] - M[m(t)]Y(t-1) \quad (3.10)$$

Das Akronym CD steht für „carbon dioxide“ und beschreibt die Menge an CO_2 , die sich in der Atmosphäre befindet (Messeinheit ppmv (parts per million volume)). Das Kohlendioxid wird als zusätzliche Zustandsvariable in das Modell aufgenommen. ε beschreibt den natürlichen Abbau an Kohlenstoff in der Atmosphäre und wird mit $\varepsilon = 0,036$ angenommen. Die Steuerung der Treibhausgasansammlung erfolgt über die vom Output abhängigen Emissionen $G[Y(t-1)]$ und die Aktivitäten zur Verminderung des Klimawandels $M[m(t)]Y(t-1)$. Der anfängliche Wert beträgt $CD(0) = 380$.

$$G[Y(t)] = \beta Y(t) \quad (3.11)$$

Die Emissionen sind linear im Output mit einer konstanten Kohlenstoffintensität der Produktion von $\beta = 0,056$.

$$M[m(t)] = \zeta \frac{1 - e^{-vm(t)}}{\nu} \quad (3.12)$$

Die Milderung des Klimawandels erfolgt entweder durch eine Reduzierung des Ausstoßes an Emissionen oder durch die Beseitigung von Kohlenstoff aus der Atmosphäre. Diese Milderungsaktivitäten haben jedoch keinen Einfluss auf die Kohlenstoffintensität der Produktion. Der Skalierungsparameter ζ wird mit $\zeta = 3$ angenommen. $0 < \nu$ spiegelt den abnehmenden Ertrag von $m(t)$ wider und wird mit $\nu = 6$ angenommen. ν misst also die Effektivität der Schadensverminderung für verschiedene Levels der Schadensverminderungsinvestitionen $m(t)$.

$$Z[CD(t)] = \left[1 - \left[\frac{CD(t) - 280}{CDMax - 280} \right]^{\frac{1}{\gamma}} \right]^{\gamma} \quad (3.13)$$

Die Schadensfunktion³ $Z[CD(t)]$ beschreibt die Auswirkungen der CO_2 -Emissionen auf den

³Diese Funktion wird im Paper [9] folgendermaßen angeführt:

$$Z[CD(t)] = 1 - \left[1 - \left[\frac{CD(t) - 280}{CDMax - 280} \right]^{\frac{1}{\gamma}} \right]^{\gamma}$$

Output, da $Z[CD(t)]$ den verbleibenden Outputanteil darstellt. Um das Modell möglichst knapp zu halten, werden Temperaturdynamiken nicht berücksichtigt und die Emissionen wirken sich direkt und ohne zeitliche Verzögerung auf den Output aus. Die kohlenstoffabhängigen Schädigungen werden zwischen 0 und 1 gemessen und folgendermaßen kalibriert: Bei einem Kohlenstofflevel von 280 ppmv vor der Industrialisierung liegt keine Schädigung vor und bei diesem Zustand entspricht der gesamte potentielle Output dem effektiven Output. Bei einem Kohlenstofflevel von 780 ppmv (= CD_{Max}) hingegen tritt ein vollständiger Outputverlust ein. Dies impliziert, dass bereits beim momentanen Wert von 380 ppmv ein gewisser Anteil des potentiellen Outputs verloren geht. Es wird $\gamma = 0,5$ angenommen.

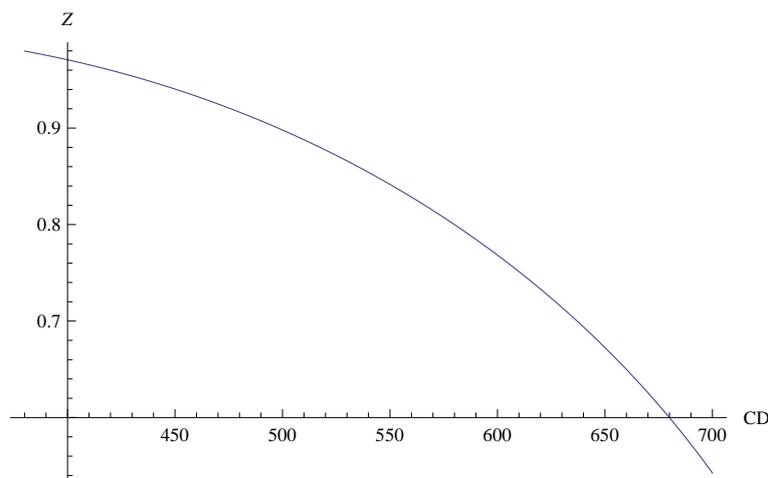


Abbildung 3.4.: Schadensfunktion

Der effektive Output ergibt sich aus dem potentiellen Output korrigiert durch die Schadensfunktion.

$$Y(t) = Z[CD(t)] F[K(t), L(t)] \quad (3.14)$$

Es ergibt sich das folgende Maximierungsproblem:

$$\max_{s(t), m(t)} \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+\rho)^{t-1}} U \left[\frac{C(t)}{N(t)} \right] \quad (3.15)$$

und beschreibt damit den Outputverlust, der durch die Klimaerwärmung herbeigeführt wird.

unter den Nebenbedingungen

$$K(t) = (1 - \delta)K(t-1) + [s(t) - m(t)]Y(t-1), \quad (3.16)$$

$$CD(t) = (1 - \varepsilon)CD(t-1) + G[Y(t-1)] - M[m(t)]Y(t-1) \quad (3.17)$$

und den Anfangsbedingungen

$$K(0) = K_0, \quad CD(0) = CD_0$$

sowie den Transversalitätsbedingungen

$$\lambda(T)K(T) = 0, \quad \mu(T)CD(T) = 0.$$

Aus der Zielfunktion und den beiden Zustandsgleichungen erhält man mit $\lambda(t)$ als Schattenpreis des Kapitals und $\mu(t)$ als Schattenpreis des CO_2 in der Atmosphäre die Lagrangefunktion des Problems.

$$\begin{aligned} \Lambda[K, CD, \lambda, \mu, t] = & \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1 + \rho)^{(t-1)}} [U[c(t)] - \\ & \lambda(t) [K(t) - [(1 - \delta)K(t-1) + [s(t) - m(t)]Y(t-1)]] - \\ & \mu(t) [CD(t) - [(1 - \varepsilon)CD(t-1) + G[Y(t-1)] - M[m(t)]Y(t-1)]]] \end{aligned} \quad (3.18)$$

Dabei ist $\mu(t) < 0$, da CO_2 die Produktion negativ beeinflusst.

3.2.1. Der optimale Fall

Da die Zielfunktion quasikonkav ist und die Nebenbedingungen konvex in K und CD sind, genügt es, für die Durchführung der Optimierung einen Sattelpunkt der Lagrangefunktion zu finden, da dieser die optimale Lösung des Problems darstellt. Unter der Voraussetzung des konkaven Maximierungsproblems wird ein Sattelpunkt der Lagrangefunktion durch das Lösen der folgenden First-Order-Conditions ermittelt. Diese Lösung stellt dann gleichzeitig die optimale Lösung des Problems dar.⁴

First-Order-Conditions:

$$\partial_{\lambda} \Lambda = 0 \Leftrightarrow K(t) = (1 - \delta)K(t-1) + [s(t) - m(t)]Y(t-1), \quad (3.19)$$

⁴[2] S.8.

$$\partial_{\mu}\Lambda = 0 \Leftrightarrow CD(t) = (1 - \varepsilon)CD(t-1) + G[Y(t-1)] - M[m(t)]Y(t-1), \quad (3.20)$$

$$\begin{aligned} \partial_K\Lambda = 0 \Leftrightarrow \lambda(t) &= \frac{1}{(1 + \rho)K(t)} \\ &\left[\alpha [c(t+1)]^{1-\eta} + [(1 - \delta)K(t) + \alpha Y(t) [s(t+1) - m(t+1)]] \lambda(t+1) + \right. \\ &\left. \frac{\alpha}{\mathbf{v}} \mu(t+1) Y(t) \left[\zeta e^{-vm(t+1)} - \zeta + \beta \mathbf{v} \right] \right], \end{aligned} \quad (3.21)$$

$$\begin{aligned} \partial_{CD}\Lambda = 0 \Leftrightarrow \mu(t) &= \frac{1}{1 + \rho} \left[\frac{h_{CD} [c(t+1)]^{1-\eta}}{[-1 + h_{CD}] i_{CD}} \right. \\ &- \frac{1}{i_{CD}} F[K(t), L(t)] [1 - h_{CD}]^{\gamma-1} h_{CD} [s(t+1) - m(t+1)] \lambda(t+1) - \\ &\left. \left[\varepsilon - 1 + \frac{1}{\mathbf{v} i_{CD}} F[K(t), L(t)] [1 - h_{CD}]^{\gamma-1} h_{CD} \left[\zeta e^{-vm(t+1)} - \zeta + \beta \mathbf{v} \right] \right] \mu(t+1) \right], \end{aligned} \quad (3.22)$$

$$\partial_s\Lambda = 0 \Leftrightarrow s(t) = 1 - \frac{N(t)}{Y(t)} [N(t) \lambda(t)]^{\frac{1}{\eta}}, \quad (3.23)$$

$$\partial_m\Lambda = 0 \Leftrightarrow m(t) = -\frac{\log \left[-\frac{\lambda(t)}{\zeta \mu(t)} \right]}{\mathbf{v}} \quad (3.24)$$

mit $h_{CD} = \left[\frac{CD(t) - 280}{CD_{Max} - 280} \right]^{\frac{1}{\gamma}}$ und $i_{CD} = [CD(t) - 280]$.

Nachdem der Zeitpfad von $\lambda(t)$ die Veränderungen im Schattenpreis des Kapitals widerspiegelt, drücken die Veränderungen $j(t) = \frac{\lambda(t+1)}{\lambda(t)} - 1$ den Zeitpfad des Realzinssatzes $j(t)$ aus.

3.2.2. Der „business-as-usual“ (BAU)-Fall

Der „business-as-usual“-Fall wird ohne Berücksichtigung der negativen Externalität der Klimaerwärmung modelliert. Bei einer Zustandsvariablen wird von einer Externalität gesprochen, wenn sie die Zielfunktion oder die Beschränkungen beeinflusst, es jedoch keine Möglichkeit gibt, den Entscheidungsträgern ihren sozialen Preis aufzuzwingen. Aus diesem Grund handeln

die Entscheidungsträger so, als ob ihre Entscheidungen keinen Einfluss auf den Pfad der Externalität hätten. Würden allerdings alle Entscheidungsträger dieselbe Entscheidung treffen, so würde sich der Pfad der Externalität verändern. Der Unterschied zwischen dem optimalen und dem BAU-Fall entsteht also dadurch, dass sich die Entscheidungsträger nicht der wahren sozialen Emissionskosten bewusst sind und nicht die richtigen Preissignale gesetzt werden, um die Wirtschaft zu steuern.

Der Gleichgewichtspfad mit einer nicht korrigierten Externalität wird ebenfalls durch die First-Order-Conditions der Lagrangefunktion dargestellt. Die First-Order-Conditions in Bezug auf die Schattenpreise ergeben die Bewegungsabläufe des Systems. Um zu modellieren, dass der Entscheidungsträger die wahren sozialen Emissionskosten nicht erkennt und daher nicht in seine Konsum-, Investitions- und Produktionsentscheidungen einbezieht, wird der Schattenpreis der CO_2 -Emissionen, $\lambda(t)$, in den First-Order-Conditions Null gesetzt. $\lambda(t) = 0$ hat $m(t) = 0$ in den First-Order-Conditions zur Folge. Aus dem Umstand, dass die Entscheidungsträger die wahren sozialen Emissionskosten nicht berücksichtigen, folgt also, dass sie keine Notwendigkeit sehen, in die Verminderung des Klimawandels zu investieren.

Die Problemstellung sowie die zu lösenden modifizierten First-Order-Conditions sehen folgendermaßen aus:

$$\max_{s(t), m(t)} \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+\rho)^{t-1}} U \left[\frac{C(t)}{N(t)} \right] \quad (3.25)$$

unter den Nebenbedingungen⁵

$$K(t) = (1 - \delta)K(t-1) + [s(t) - m(t)]Y(t-1), \quad (3.26)$$

$$CD(t) = (1 - \varepsilon)CD(t-1) + G[Y(t-1)] - M[m(t)]Y(t-1) \quad (3.27)$$

und den Anfangsbedingungen

$$K(0) = K_0, \quad CD(0) = CD_0$$

sowie den Transversalitätsbedingungen

$$\lambda(T)K(T) = 0, \quad \mu(T)CD(T) = 0.$$

⁵ $m(t)$ ist bei der Aufstellung des Problems noch gegeben, da $\lambda(t)$ erst in den First-Order-Conditions Null gesetzt wird, und erst daraus $m(t) = 0$ folgt.

Lagrangefunktion:

$$\begin{aligned} \Lambda[K, CD, \lambda, \mu, t] = & \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+\rho)^{t-1}} [U[c(t)] - \\ & \lambda(t) [K(t) - [(1-\delta)K(t-1) + [s(t) - m(t)]Y(t-1)]] - \\ & \mu(t) [CD(t) - [(1-\varepsilon)CD(t-1) + G[Y(t-1)] - M[m(t)]Y(t-1)]]] \end{aligned} \quad (3.28)$$

Modifizierte First-Order-Conditions:

$$\partial_{\lambda} \Lambda_{BAU} = 0 \Leftrightarrow K(t) = (1-\delta)K(t-1) + s(t)Y(t-1), \quad (3.29)$$

$$\partial_{\mu} \Lambda_{BAU} = 0 \Leftrightarrow CD(t) = (1-\varepsilon)CD(t-1) + G[Y(t-1)], \quad (3.30)$$

$$\begin{aligned} \partial_K \Lambda_{BAU} |_{\mu(t)=0} = 0 \Leftrightarrow \lambda(t) = & \frac{1}{(1+\rho)K(t)} \\ & \left[\alpha [c(t+1)]^{1-\eta} + [(1-\delta)K(t) + \alpha Y(t)s(t+1)] \lambda(t+1) \right], \end{aligned} \quad (3.31)$$

$$\partial_s \Lambda_{BAU} |_{\mu(t)=0} = 0 \Leftrightarrow s(t) = 1 - \frac{N(t)}{Y(t)} [N(t) \lambda(t)]^{\frac{1}{\eta}}. \quad (3.32)$$

Beim BAU-Pfad gibt es zwei fehlerhafte Zuteilungen. Erstens weisen die Entscheidungsträger der Schadensmilderung keine Ressourcen zu, da es keinen Marktpreis für Kohlenstoffemissionen gibt und zweitens investieren sie zu viel in Kapitalakkumulation, da sie die Auswirkungen von steigendem Output auf den Klimaschaden ignorieren.

3.2.3. Der beschränkte Fall

In vielen Modellen, wie zum Beispiel dem DICE-Modell-2007 von Nordhaus, wird als Referenzpfad der optimale Pfad, unter der Einschränkung, dass es nicht möglich ist, in die Verminderung des Klimawandels zu investieren, verwendet. Da durch diese Annahmen die Externalität teilweise internalisiert wird, stellt dieser Pfad für die Autoren des Papers keinen gültigen Referenzpfad dar. Nachdem dieser Pfad in der Literatur aber häufig als Referenzpfad benutzt wird, wird er in die Analyse mit einbezogen.

Der Entscheidungsträger kennt die marginalen sozialen Kosten der Emissionen und bezieht diese in seine Konsum-, Investitions- und Produktionsentscheidungen mit ein. Allerdings investiert

er nicht in die Verminderung des Klimawandels, was nur mit marginalen sozialen Kosten der Emissionen gleich Null zu erklären ist. Der beschränkte Fall stellt also eine inkonsistente Mischung der Annahmen über die Information des Entscheidungsträgers dar.

Da der Entscheidungsträger die negativen Auswirkungen der CO_2 -Emissionen kennt, entscheidet er sich, weniger Kapital anzuhäufen und mehr davon zu investieren. Dies impliziert eine Verringerung des Outputs und stellt die einzige Möglichkeit dar, die Emissionen zu verringern.

Als Kontrollvariable fungiert nur noch die Kapitalinvestition. Das Maximierungsproblem des beschränkten Falls sieht wie folgt aus:

$$\max_{s(t)} \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+\rho)^{t-1}} U \left[\frac{C(t)}{N(t)} \right] \quad (3.33)$$

unter den Nebenbedingungen

$$K(t) = (1 - \delta)K(t-1) + s(t)Y(t-1), \quad (3.34)$$

$$CD(t) = (1 - \varepsilon)CD(t-1) + G[Y(t-1)] \quad (3.35)$$

und den Anfangsbedingungen

$$K(0) = K_0, \quad CD(0) = CD_0$$

sowie den Transversalitätsbedingungen

$$\lambda(T)K(T) = 0, \quad \mu(T)CD(T) = 0.$$

Lagrangefunktion des beschränkten Falls:

$$\begin{aligned} \Lambda[K, CD, \lambda, \mu, t] = & \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+\rho)^{t-1}} [U[c(t)] - \\ & \lambda(t) [K(t) - [(1 - \delta)K(t-1) + s(t)Y(t-1)]] - \\ & \mu(t) [CD(t) - [(1 - \varepsilon)CD(t-1) + G[Y(t-1)]]] \end{aligned} \quad (3.36)$$

Die First-Order-Conditions des beschränkten Falls sind also ein Spezialfall des optimalen Modells mit $m(t) = 0$.

$$\partial_{\lambda} \Lambda_{COPT} = 0 \Leftrightarrow K(t) = (1 - \delta)K(t-1) + s(t)Y(t-1) \quad (3.37)$$

$$\partial_{\mu}\Lambda_{COPT} = 0 \Leftrightarrow CD(t) = (1 - \varepsilon)CD(t - 1) + G[Y(t - 1)] \quad (3.38)$$

$$\begin{aligned} \partial_K\Lambda_{COPT} = 0 \Leftrightarrow \lambda(t) = \frac{1}{(1 + \rho)K(t)} & \left[\alpha [c(t + 1)]^{1-\eta} + \right. \\ & \left. (1 - \delta)K(t)\lambda(t + 1) + \alpha Y(t) [s(t + 1)\lambda(t + 1) + \beta\mu(t + 1)] \right] \end{aligned} \quad (3.39)$$

$$\begin{aligned} \partial_{CD}\Lambda_{COPT} = 0 \Leftrightarrow \mu(t) = \frac{1}{(1 + \rho)[-1 + h_{CD}] i_{CD}} & \left[h_{CD} [c(t + 1)]^{1-\eta} + \right. \\ & \left. (1 - \varepsilon)[-1 + h_{CD}] i_{CD} \mu(t + 1) + Y(t) h_{CD} [s(t + 1)\lambda(t + 1) + \beta\mu(t + 1)] \right] \end{aligned} \quad (3.40)$$

$$\partial_s\Lambda_{COPT} = 0 \Leftrightarrow s(t) = 1 - \frac{N(t)}{Y(t)} [N(t)\lambda(t)]^{\frac{1}{\eta}} \quad (3.41)$$

$$h_{CD} = \left[\frac{CD(t) - 280}{CD_{Max} - 280} \right]^{\frac{1}{\gamma}} \text{ und } i_{CD} = [CD(t) - 280].$$

Die Veränderung der Zustandsgleichung erfolgt nur durch Emissionen und den natürlichen Abbau von CO_2 . Für jede Schadensverminderungsfunktion, deren Verwendung sinnvoll ist, ist der marginale Gewinn des Kapitals im beschränkten Fall niedriger als im optimalen. Die Folge der geringeren Kapitalakkumulation ist schlüssig, da dies die einzige Möglichkeit ist, um dem steigenden $CD(t)$ entgegenzuwirken.

3.3. Anmerkungen zur Berechnung

Der Zeithorizont des Modells beträgt 600 Jahre und ist hinreichend groß, sodass die Pfade ihren stabilen Zustand bereits in der Mitte des Zeithorizonts erreichen. Dadurch wird über die „Turnpike“ Eigenschaft garantiert, dass die Modellierung mit endlichem Zeithorizont jene mit unendlichem imitiert.

Aus den First-Order-Conditions ergeben sich in Verbindung mit den zugehörigen Start- und Endbedingungen die zu lösenden Gleichungssysteme. Konkret ergeben sich für die jeweiligen Fälle die folgenden Gleichungssysteme, die sich primär aus den „complementary slackness conditions“⁶ (CSC) zusammensetzen:

Optimaler Fall

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial \lambda} \lambda = 0, \quad \frac{\partial \Lambda}{\partial \mu} (-\mu) = 0, \quad \frac{\partial \Lambda}{\partial K} K = 0, \quad \frac{\partial \Lambda}{\partial CD} CD = 0,$$

wobei über $\frac{\partial \Lambda}{\partial s} = 0$ und $\frac{\partial \Lambda}{\partial m} = 0$ die optimalen Ausdrücke der Kontrollvariablen ermittelt werden und das System durch Substituieren dieser in die anderen Gleichungen reduziert wird. Die initialen Werte für K und CD werden in allen Fällen in das Gleichungssystem integriert.

BAU-Fall

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial \lambda} \lambda = 0, \quad \frac{\partial \Lambda}{\partial \mu} (-1) = 0, \quad \frac{\partial \Lambda}{\partial K} K = 0,$$

wobei nur der optimale Ausdruck für die Kontrolle s in den anderen Gleichungen substituiert wird. Die Kontrolle m sowie der Schattenpreis μ werden in den First-Order-Conditions gleich Null gesetzt. Für μ werden aufgrund von $\mu = 0$ die CSC nicht angewandt.

Beschränkt optimaler Fall

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial \lambda} \lambda = 0, \quad \frac{\partial \Lambda}{\partial \mu} (-1) = 0, \quad \frac{\partial \Lambda}{\partial K} K = 0, \quad \frac{\partial \Lambda}{\partial CD} (-1) = 0,$$

wobei nur der optimale Ausdruck für die Kontrolle s in den anderen Gleichungen substituiert wird und die Kontrolle m in den First-Order-Conditions Null gesetzt wird. Für μ und CD werden die CSC nicht angewandt, da dies die Berechnung der Lösung für Mathematica vereinfacht.

⁶[2], S.6

Über den Mathematica Befehl „FindRoot“ wird die Optimierung durchgeführt, wobei die Spezifizierung der initialen Suchparameter ausschlaggebend ist.

Alle Berechnungen dieses Kapitels sowie die Erstellung der Grafiken habe ich mit Hilfe des Programms Mathematica durchgeführt.

3.4. Ergebnisse

Im optimalen Pfad werden die Entscheidungsträger so viel in die Verminderung des Klimawandels investieren, bis die marginalen Kosten der Schadensverminderung gleich sind mit dem Outputnutzen, der durch die Verringerung des Umweltschadens entsteht. Der Verminderungsaufwand wird verstärkt in den ersten Jahrzehnten ausgeführt und die tatsächlichen Kosten dafür sind relativ gering und belaufen sich auf etwa 2% des BIPs. In weiterer Folge müssen nur noch die aktuellen Emissionen behandelt werden.

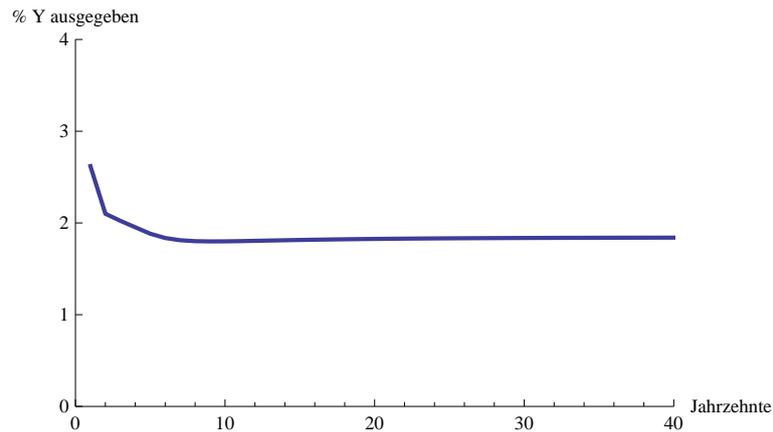


Abbildung 3.5.: Aufwand zur Verringerung des Umweltschadens im optimalen Fall in % des BIPs.

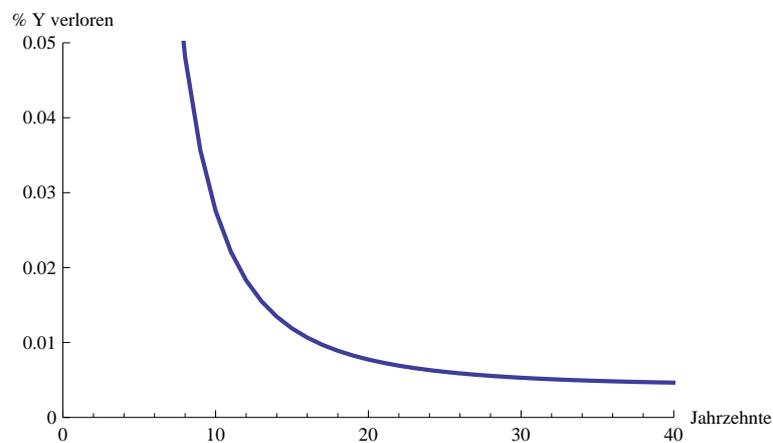


Abbildung 3.6.: Prozentueller Verlust des Outputs durch den Klimawandel im optimalen Fall.

In Verbindung mit einer adäquaten Kapitalakkumulation ergibt dies nachhaltig wachsende Output- und Konsumlevels.

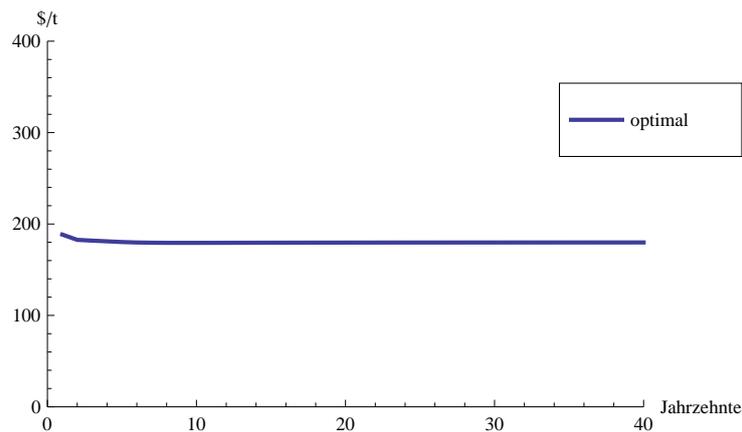


Abbildung 3.7.: Kohlenstoffpreis im optimalen Fall

Der Kohlenstoffpreis⁷ ist gleich den marginalen Kosten der Schadensverminderung und stabilisiert sich im optimalen Pfad um 180 US-Dollar/t. Dies liegt nahe dem Wert keiner Verminderungskosten (160 US-Dollar/t). Die Kohlenstoffkonzentration in der Atmosphäre verringert sich fast bis zum Level vor der Industrialisierung.

Da im BAU-Fall die korrekten Preissignale fehlen, um die negative Externalität zu korrigieren, sehen sich die Entscheidungsträger unfähig, den Pfad der CO_2 -Akkumulation zu verändern und verfolgen nur eine Nutzen- und Konsummaximierung. Dies führt zu mehreren Ineffizienzen. Obwohl keine Schadensverminderung durchgeführt wird, erhöht sich das Kapital die ersten 100 Jahre ähnlich wie im optimalen Fall. Dies führt dazu, dass die CO_2 -Akkumulation sehr rasch vor sich geht.

Es wird solange Kapital angehäuft, bis der Grad der Umweltschädigung eine weitere Akkumulation aufgrund der sinkenden Produktivität von Kapital und Arbeitsinput unrentabel macht. Output und Pro-Kopf-Konsum liegen im Gleichgewicht etwa 20% unter dem aktuellen Level und betragen weniger als 25% des optimalen Levels. Der implizierte Kohlenstoffpreis und die Verminderungsausgaben sind fünfzigmal höher als im optimalen Fall.

Im beschränkten Gleichgewichtspfad sind die Entscheidungsträger um die Möglichkeit der Schadensverringerung beraubt. Sie erhalten allerdings die korrekten Preissignale und können daher über die Kapitalakkumulation eine gewisse Steuerung vornehmen. Da die momentane Akkumu-

⁷Der Kohlenstoffpreis wird über $-483,1 \cdot \mu(t) / \lambda(t)$ errechnet.

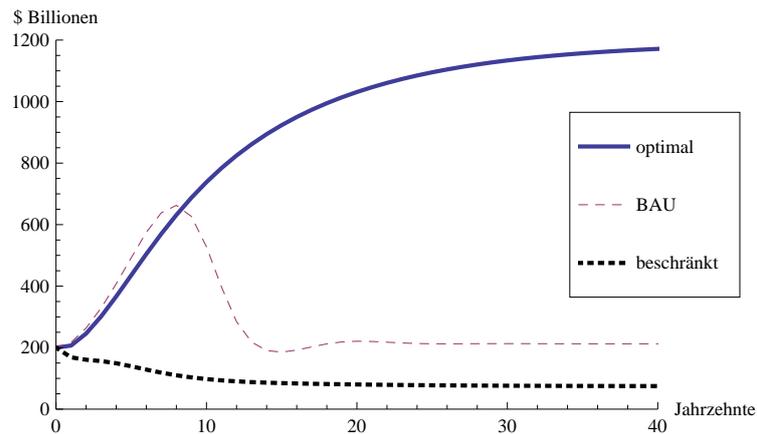


Abbildung 3.8.: Kapital

lation mit zu hohen CO_2 -Emissionen verbunden ist, erfolgt eine Verringerung des Kapitalstocks.

Dadurch sind die Schädigungen im beschränkten Fall etwas geringer als im BAU-Fall. Ein Gleichgewicht kann nur erreicht werden, wenn die aktuellen Emissionen gleich dem natürlichen Abbau der vorhandenen Kohlenstoffakkumulation in der Atmosphäre sind. Die CO_2 -Konzentration und der Kohlenstoffpreis sind niedriger als im BAU-Pfad, der Kohlenstoffpreis ist jedoch zwanzigmal höher als im optimalen Level.

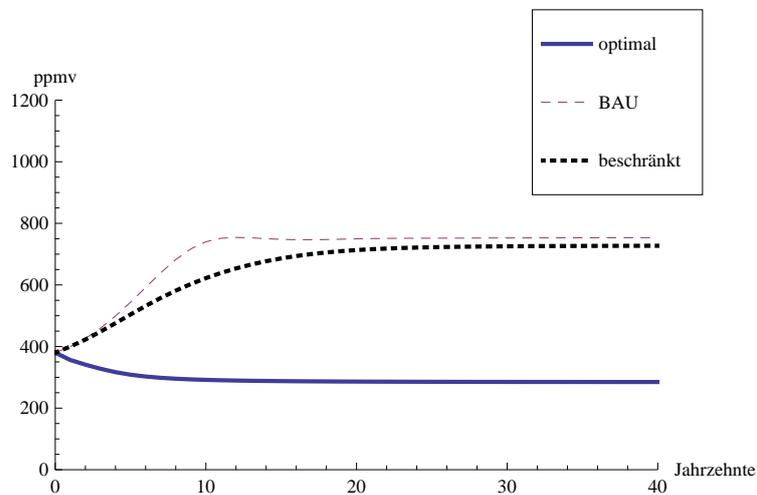


Abbildung 3.9.: CO_2 -Akkumulation in der Atmosphäre

Zusammenfassend ist der gesamte Nutzen im optimalen Pfad am größten, gefolgt vom be-

schränkten Fall und dem BAU-Pfad. Das Wachstum des Kapitalstocks ist ebenfalls im optimalen Pfad am größten, danach folgt der BAU-Pfad, da sich die Entscheidungsträger im beschränkten Fall über den schädlichen Effekt der Investition bewusst sind und vorsichtiger damit umgehen. Klimatische Katastrophen werden im BAU-Fall mit Sicherheit und im beschränkten Fall sehr wahrscheinlich eintreten. Im optimalen Fall hingegen wird sich der CO_2 -Level auf einem niedrigen oder moderaten Niveau stabilisieren. Während die quantitativen Ergebnisse dieser Simulation von speziellen Parameterannahmen abhängen, sind die qualitativen Ergebnisse davon unabhängig. Im Besonderen ermöglicht die Verschiebung vom ineffizienten BAU-Pfad zum effizienten optimalen Pfad eine Pareto-Verbesserung. Daraus folgt, dass es keine Kosten für die Verminderung des Klimawandels gibt, sondern nur signifikante Gewinne daraus resultieren (in diesen Simulationen bis zu 400% des BIPs). Da auch höhere oder niedrigere Diskontierungsraten nichts daran ändern, folgt daraus, dass die Themen der Generationen-Gleichheit und der Unsicherheit von sekundärer Relevanz sind.

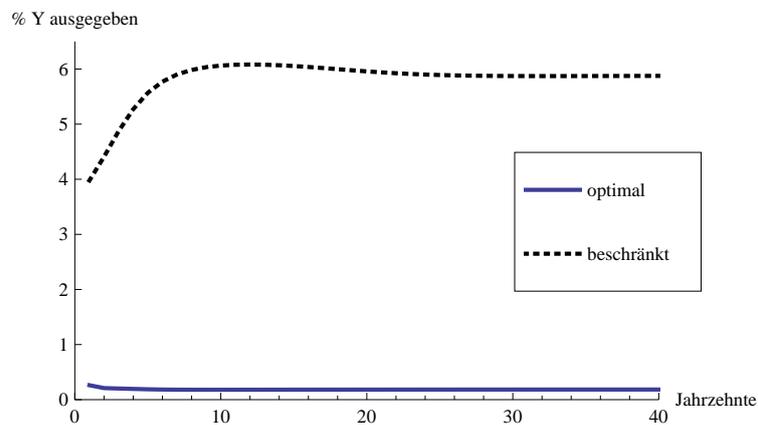


Abbildung 3.10.: Aktivitäten zur Verminderung des Klimawandels.

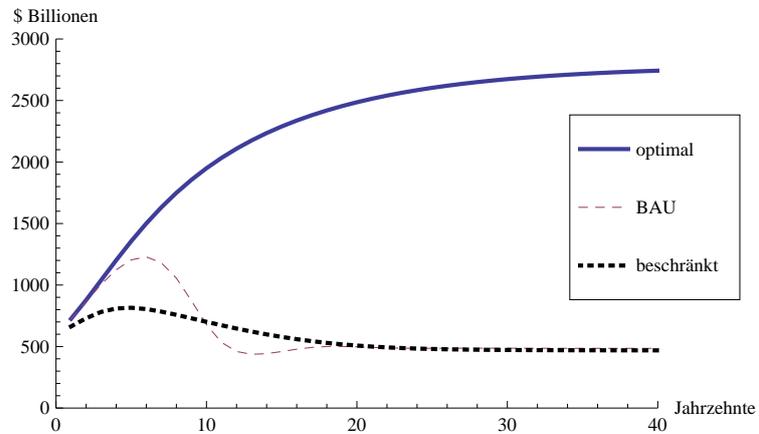


Abbildung 3.11.: Output

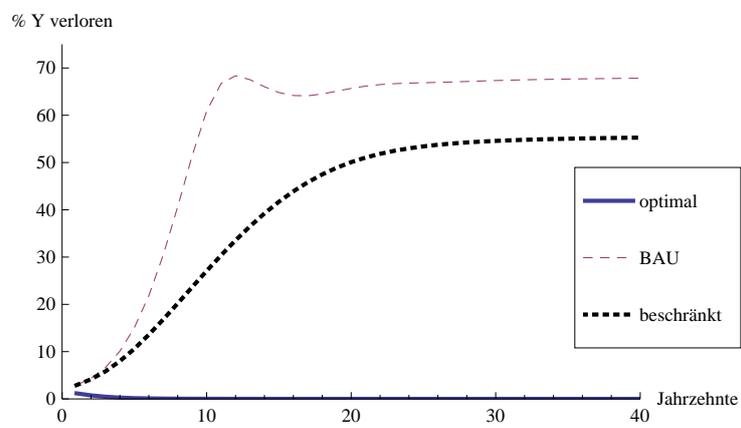


Abbildung 3.12.: Anteil des Outputs, der durch die globale Erderwärmung verloren geht.

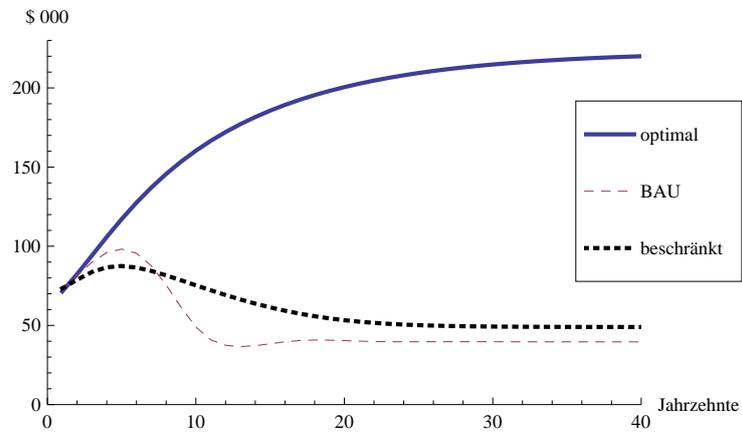


Abbildung 3.13.: Pro-Kopf-Konsum

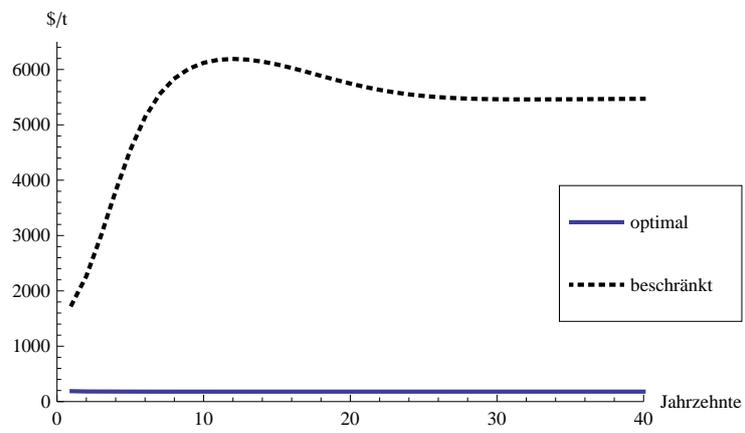


Abbildung 3.14.: Kohlenstoffpreis

3.4.1. Intergenerationelle Gerechtigkeit

Bei der aktuellen Diskussion über den Klimawandel wird in der Literatur, wie zum Beispiel dem DICE-Modell-2007 von Nordhaus ⁸, häufig ein Schwerpunkt auf das Thema der Gleichheit zwischen den Generationen gelegt. Diese Thematik entsteht jedoch nur dadurch, dass in den meisten Modellen der beschränkte Pfad als Referenzpfad zum optimalen dient. Im beschränkten Fall investieren die Entscheidungsträger weniger Kapital. Das Kapital wird vermehrt konsumiert, da dies die einzige Möglichkeit darstellt, die CO_2 -Emissionen zu reduzieren. Im Vergleich mit dem optimalen Fall vermittelt dies den Anschein, dass gegenwärtige Generationen auf Konsum verzichten müssen, um zukünftigen Generationen eine weniger zerstörte Umwelt zu hinterlassen. Die diesbezüglich entscheidenden Parameter sind der Diskontfaktor ρ und die Elastizität des Nutzens bezüglich des Konsums η .

Wird hingegen der BAU-Pfad als Vergleichsmaß benutzt, so sieht man, dass kein Konsumverzicht gegenwärtiger Generationen notwendig ist und eine Pareto-Verbesserung für alle Generationen möglich ist. Die Parameter ρ und η beeinflussen dann nur die Verteilung des Gewinns zwischen den Generationen. Tatsächlich weist der optimale Pfad mit den verwendeten Parametern einen leicht geringeren Pro-Kopf-Konsum für das erste Jahrzehnt als der BAU-Pfad auf. Dies ist jedoch dadurch begründet, dass der Entscheidungsträger im BAU-Pfad den eigenen Konsum zu stark gewichtet. Erkennt der Entscheidungsträger die wahren marginalen sozialen Werte der Schadensverminderung und die hohe Ertragsrate einer Milderungsinvestition für den Konsum zukünftiger Generationen, so bevorzugt er es, seinen Konsum in den ersten zehn Jahren leicht zu reduzieren.

⁸[6]

3.5. Diskussion

Vergleicht man dieses Modell mit dem DICE-Modell-007 von Nordhaus, so ist neben dem großen Thema der unterschiedlichen Referenzpfade noch anzumerken, dass das Modell „Global Warming and Economic Externalities“[9] noch wesentlich stärker vereinfacht ist, als das DICE-Modell-2007. Insbesondere wird die Temperatur der Atmosphäre nicht in das Modell eingegliedert und die Schädigung der Umwelt erfolgt direkt aus der CO_2 -Konzentration und ohne zeitliche Verschiebung über eine Schädigungsfunktion.

Im Gegensatz zu Nordhaus führen die Autoren dieses Papers dafür eine obere Grenze für die CO_2 -Akkumulation ein, die einen vollständigen Verlust des Outputs mit sich bringt.

Ein weiterer Unterschied ist, dass in diesem Modell positive Schadensverminderungskosten auch bei einem sehr geringen Verminderungsaufwand auftreten.

Während Nordhaus das Bevölkerungslevel auch für den Arbeitsinput verwendet, wird in diesem Modell eine Arbeitsproduktivitätsfunktion eingesetzt, die langfristig zu einem fast dreifachen Arbeitsinput führt. Es ist allerdings fragwürdig, ob die Annahmen für den stark steigenden Arbeitskraftinput tatsächlich realistisch sind.

Eine starke Vereinfachung der Realität erfolgt auch durch die konstante Modellierung der Kohlenstoffintensität der Produktion (β). Ein endogenes β würde die tatsächlichen Umstände besser reflektieren.

4. „Economic Growth and Global Warming: A Model of Multiple Equilibria and Thresholds“ (A.Greiner und W. Semmler, 2005)

Dieser Abschnitt meiner Diplomarbeit behandelt das von Alfred Greiner und Willi Semmler verfasste Paper „Economic Growth and Global Warming: A Model of Multiple Equilibria and Thresholds“ [4].

4.1. Einleitung

Zur Durchführung der Analyse wird ein endogenes Wachstumsmodell herangezogen, das um die Aspekte der globalen Klimaerwärmung erweitert wird. Nordhaus geht von einer Wirtschaft, die sich in einem stabilen Zustand befindet, aus und nimmt das Wachstum der Wirtschaft exogen an. Dadurch lässt er Feedback-Effekte einer verminderten CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre auf das wirtschaftliche Wachstum außer Acht. Im Gegenzug dazu wird das Wachstum im folgenden Modell endogen integriert. Dies impliziert, dass umweltpolitische Maßnahmen nicht nur den Level der Wirtschaftsvariablen bestimmen, sondern auch deren langfristige Wachstumsraten.

Nachdem natürlich nicht der gesamte Klimawandel in das Modell eingebaut werden kann, beschränkt sich die Analyse auf ein Energiebilanzmodell, in das die Beeinflussung der Albedo¹ der Erde durch die wachsende Konzentration an Treibhausgasen als Feedback-Effekt eingebaut wird. Da in der Marktwirtschaft ein anhaltendes Pro-Kopf-Wachstum ohne Tendenz für sinkende Wachstumsraten beobachtet werden kann, wird auch dieser Aspekt in das Modell integriert. In diesem Modell wird also die Rückwirkung der Schäden der Klimaerwärmung auf die Wirtschaft beachtet und Aktivitäten zur Schadensverminderung sind möglich. Als Politikinstrument dient

¹Unter Albedo wird allgemein das relative Reflexionsvermögen eines Himmelskörpers verstanden.[10], S. 19.

eine Kohlenstoffsteuer.

Das vorrangige Ziel ist es nicht, wie bei Nordhaus, verschiedene Politiken bezüglich des Umgangs mit dem Klimawandel zu ermitteln, sondern die Langzeiteffekte der Interaktion von globaler Erwärmung und Wirtschaftswachstum, insbesondere die Übergangsdynamik, die mit der Klimaerwärmung auftreten kann, zu untersuchen. Dabei wird analysiert, ob mehrere Gleichgewichte vorhanden sind und ob Schwellen auftreten, welche die Einzugsbereiche der optimalen Pfade für die langfristig stabilen Zustände trennen.

Bemerkungen zu den Computerkalkulationen

Die Berechnungen und Grafiken zu diesem Kapitel wurden von mir mit Hilfe des Programms Mathematica erstellt.

4.2. Das Modell

4.2.1. Treibhausgasemissionen und die Veränderung der globalen Durchschnittstemperatur

Um die Einflüsse der Treibhausgasemissionen auf die Veränderung der globalen Durchschnittstemperatur zu beschreiben, wird die einfachste Version eines Klimamodells, das sogenannte Energiebilanzmodell (EBM), herangezogen. Dem EBM zufolge verhält sich die Veränderung der globalen Durchschnittstemperatur der Erde folgendermaßen:

$$\frac{dT(t)}{dt} c_h \equiv \dot{T}(t) c_h = S_E - H(t) - F_N(t), \quad T(0) = T_0. \quad (4.1)$$

$T(t)$ beschreibt dabei die durchschnittliche globale Temperatur der Erdoberfläche² und wird in Kelvin³ (K) ausgedrückt. Für die Zeit vor der Industrialisierung wird ein Wert von $T_0 = 287,8 \text{ K}$ angenommen. c_h stellt die Wärmekapazität⁴ der Erdoberfläche dar und wird mit $c_h = 0,1497 \text{ Jm}^{-2}\text{K}^{-1}$ (Joule pro Quadratmeter pro Kelvin) beschrieben. Da die Erdoberfläche großteils von Meerwasser bedeckt ist, wird dieser Wert primär durch die Ozeane bestimmt. Eine Zeitperiode umfasst ein Jahr. Im Folgenden wird das Zeitargument t weggelassen, solange dadurch keine Unklarheiten entstehen.

S_E beschreibt die solare Einstrahlung und $H(t)$ den nichtradiativen Energiefluss. Die Differenz kann durch $S_E - H(t) = Q(1 - \alpha_1(T))/4$, mit $Q = 1367,5 \text{ Wm}^{-2}$ als Solarkonstante dargestellt werden. $\alpha_1(T)$ ist die planetare Albedo⁵, welche beschreibt, wieviel der eingehenden Energie in das Weltall reflektiert wird. Erfolgt eine Abweichung von der gleichgewichtigen Durchschnittstemperatur der Erdoberfläche, so hat dies einen Feedback-Effekt auf die Reflexion der eingehenden Energie zur Folge. Steigt die Temperatur zum Beispiel an, so ist der Feedback-Effekt in der Reduktion der mit Eis und Schnee bedeckten Gebiete beobachtbar. Daraus resultiert, dass weniger solare Strahlung reflektiert wird und die Temperatur weiter ansteigt. Die Funktion $\alpha_1(T)$ hängt also negativ von der Temperatur ab. Es existieren noch weitere Feedbackeffekte, die jedoch von den Autoren nicht weiter beachtet werden, da die qualitativen Ergebnisse die selben bleiben.

Die Funktion $1 - \alpha_1(T)$ stellt jenen Teil der Energie dar, der nicht reflektiert wird. Wie aus Abbildung 4.1 ersichtlich, wird diese Funktion so angenommen, dass die Albedo bei einer durch-

²Zur besseren Übersicht befindet sich im Appendix eine Liste der Gleichungen, Variablen sowie Parameter.

³0°C sind 273,15 Kelvin.

⁴Die Wärmekapazität beschreibt jene Menge an Wärme, die einem Quadratmeter horizontaler Fläche zugeführt werden muss, um die Oberflächentemperatur des Reservoirs um 1K zu erhöhen.

⁵Unter der planetaren Albedo wird das Rückstreuvermögen der Erde, wie es von einem anderen Himmelskörper aus zu beobachten ist, verstanden. [10], S. 19.

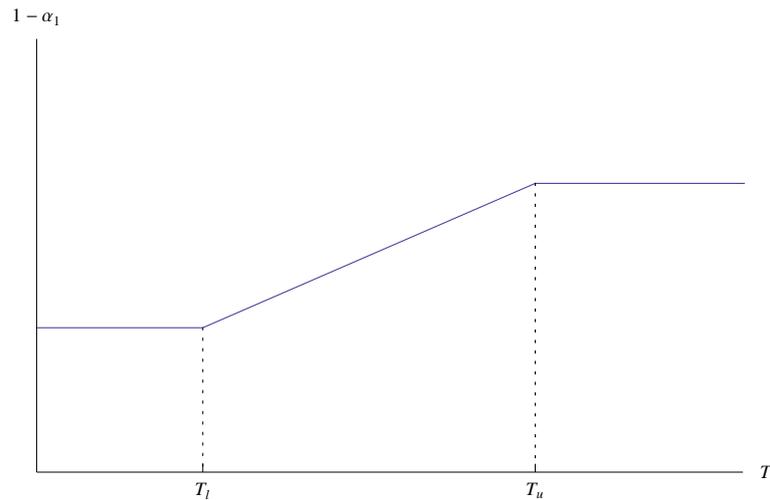


Abbildung 4.1.: Albedo als Funktion der Temperatur

schnittlichen Temperatur $< T_l$ konstant bleibt, danach bis T_u linear sinkt, wodurch die Funktion $1 - \alpha_1(T)$ linear steigt und ab T_u wieder konstant ist. Diese Funktion wird durch die differenzierbare Funktion (4.2) mit den Parametern $k_1 = 5,610^{-3}$ und $k_2 = 0,2135$ approximiert.

$$1 - \alpha_1(T) = k_1 \left(\frac{2}{\pi} \right) \text{ArcTan} \left(\frac{\pi(T - 293)}{2} \right) + k_2 \quad (4.2)$$

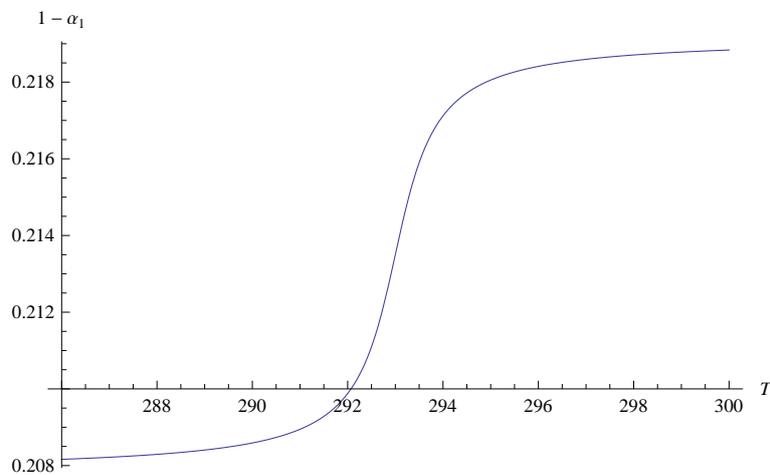


Abbildung 4.2.: Approximation der Albedo

$F_N(t) = F \uparrow (t) - F \downarrow (t)$ beschreibt die Differenz zwischen dem ausgehenden und dem eingehenden radiativen Fluss mit der Dimension Wm^{-2} (Watt pro Quadratmeter). $F \uparrow$ folgt dem

Stefan-Boltzmann-Gesetz mit $F \uparrow = \varepsilon \sigma_T T^4$. Das relative Emissionsvermögen ε beschreibt dabei das Verhältnis der aktuellen Emissionen zu den Emissionen eines schwarzen Körpers⁶. Für die Erde wird $\varepsilon = 0,95$ angenommen. $\sigma_T = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ beschreibt die Stefan-Boltzmann-Konstante. Das Flussverhältnis $F \uparrow / F \downarrow$ ist durch $F \uparrow / F \downarrow = 109/88$ gegeben.

Zusammenfassend kann das EBM nun als

$$\dot{T}(t) c_h = \frac{1367,5}{4} (1 - \alpha_1(T)) - 0,95 (5,67 \cdot 10^{-8}) (21/109) T^4, \quad T(0) = T_0 \quad (4.3)$$

dargestellt werden.

Die Treibhausgasemissionen bewirken eine Erhöhung der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre, was wiederum zu einer Verstärkung des Treibhauseffekts führt. Der Einfluss der Treibhausgase auf die Bilanz der ein- und ausfallenden Energie des Erd-Atmosphäre-Systems wird über die radiative Strahlung, ausgedrückt in Wm^{-2} , gemessen. Für CO_2 wird die radiative Strahlung (F) durch

$$F = 6,3 \ln \frac{M}{M_0} \quad (4.4)$$

ausgedrückt. M beschreibt dabei die aktuelle CO_2 -Konzentration⁷ und M_0 die Konzentration vor der Industrialisierung⁸. M_0 wird auf Eins normalisiert. Für die anderen Treibhausgase ist es möglich, ihre Effekte in äquivalenter CO_2 -Strahlung auszudrücken.

Wird (4.3) um den Einfluss der radiativen CO_2 -Strahlung (4.4) erweitert, so ergibt dies:

$$\dot{T}(t) c_h = \frac{1367,5}{4} (1 - \alpha_1(T)) - 0,95 (5,67 \cdot 10^{-8}) (21/109) T^4 + (1 - \xi) 6,3 \ln \frac{M}{M_0}, \quad T(0) = T_0. \quad (4.5)$$

Der Parameter ξ beschreibt jenen Teil der durch den Treibhauseffekt produzierten Erwärmung, der durch die Ozeane absorbiert wird, indem die Wärme von oberen Schichten in die Tiefsee übertragen wird. ξ wird mit $\xi = 0,23$ angenommen.

Die Veränderung der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre wird durch die folgende Gleichung

⁶Ein „schwarzer Körper“ ist ein Objekt, das die maximale Menge an Radiation emittiert und dadurch $\varepsilon = 1$ besitzt.

⁷Die CO_2 -Konzentration wird in ppm (parts per million) ausgedrückt.

⁸siehe [11], S.25

repräsentiert:

$$\dot{M} = \beta_1 E - \mu M, M(0) = M_0. \quad (4.6)$$

E beschreibt dabei die Emissionen und $\mu = 0,1$ die Inverse der Lebenszeit von CO_2 in der Atmosphäre. Die Tatsache, dass nicht die gesamten Emissionen in die Atmosphäre übergehen, sondern ein Teil davon von den Ozeanen aufgenommen wird, wird durch $\beta_1 = 0,49$ erfasst.

4.2.2. Marktwirtschaft mit Regierungsaktivität

Wirtschaftliche Struktur des Modells

Die Wirtschaft wird durch ein Individuum repräsentiert und es wird ein homogenes Gut produziert. Der repräsentative Haushalt maximiert über den diskontierten Fluss des Pro-Kopf-Konsumnutzens, gewichtet mit der Anzahl der Haushaltsmitglieder, und unter der Berücksichtigung einer Budgetbeschränkung als Nebenbedingung. $U(C)$ beschreibt die Nutzenfunktion und C den Pro-Kopf-Konsum.

$$U(C) = \ln C \quad (4.7)$$

Das Optimierungsproblem des Haushaltes wird folgendermaßen angeschrieben:

$$\max_{C,A} \int_0^{\infty} e^{-\rho t} L_0 e^{nt} \ln C dt \quad (4.8)$$

unter der Nebenbedingung

$$\dot{K} = Y(1 - \tau) - C - A - \tau_E E L^{-1} - (\delta + n)K, K(0) = K_0. \quad (4.9)$$

$\rho = 0,03$ stellt die subjektive Diskontrate und L_0 die Arbeitskraft zum Zeitpunkt $t = 0$, die auf Eins normalisiert wird und mit der konstanten Rate $n = 0,02$ wächst, dar. Y beschreibt die Pro-Kopf-Produktion, $\tau = 0,15$ den Einkommenssteuersatz, K das Pro-Kopf-Kapital und A die Pro-Kopf-Aktivitäten, um den Schaden des Klimawandels zu vermindern. Diese Aktivitäten werden als privates Gut modelliert. E steht für die Emissionen und $\tau_E > 0$ für die Steuern auf Emissionen⁹. $\delta = 0,075$ beschreibt die Abschreibungsrate des Kapitals und L die Arbeitskraft, welche mit der Rate n wächst.

⁹Da es nur einen Entscheidungsträger in der Wirtschaft gibt, wird die Emissionssteuer als einziges regulierendes Instrument betrachtet. Ein Handel mit Emissionszertifikaten wäre in dieser modellierten Wirtschaft nicht durchführbar, da dazu die Verhandlungspartner fehlen. Allerdings wäre es durchaus möglich, dass in einem realistischeren Szenario der Handel mit Emissionszertifikaten eine bessere umweltpolitische Maßnahme darstellen könnte.

Die Pro-Kopf-Produktionsfunktion lautet:

$$Y = BK^\alpha \bar{K}^{1-\alpha} D(T - T_0) \quad (4.10)$$

Die positive Konstante B wird mit $B = 0,35$ angenommen. Der Parameter $\alpha = 0,45$ beschreibt die Elastizität des Outputs in Bezug auf das Kapital. \bar{K} stellt eine aus Spillovers resultierende positive Externalität des Kapitals dar. Im Gleichgewicht impliziert diese Annahme, dass der marginale private Bruttokapitalertrag¹⁰ konstant und gleich $\alpha BD(\cdot)$ ist. Solange B genügend groß ist, wird auf diese Weise ein anhaltendes Pro-Kopf-Wachstum generiert. Die Schadensfunktion $D(T - T_0)$ repräsentiert den Schaden, der durch die Abweichung von der normalen Temperatur T_0 entsteht und wird durch

$$D(\cdot) = \left(a_1 (T - T_0)^2 + 1 \right)^{-\psi} \quad (4.11)$$

mit den Parametern $a_1 > 0$ und $\psi > 0$ beschrieben. Es werden Parameterwerte von $a_1 = 0,04$ und $\psi = 0,05$ angenommen, die implizieren, dass eine Erhöhung der durchschnittlichen Oberflächentemperatur von 3 (2; 1) Grad einen Schaden von 1,5 (0,7; 0,2) Prozent mit sich bringt.

In der Modellierung wird angenommen, dass die Treibhausgase ein Nebenprodukt des in der Produktion verwendeten Kapitals sind. Die Emissionen E werden in äquivalentem CO_2 ausgedrückt und sind eine Funktion des Pro-Kopf-Kapitals relativ zu den Pro-Kopf-Aktivitäten der Schadensverminderung. Ein höherer Kapitalstock geht bei einem gegebenen Level an Ausgaben zur Schadensverminderung also mit höheren Emissionen einher. Die Emissionen haben keinen direkten Einfluss auf den Nutzen und die Produktion, sondern beeinflussen diese nur indirekt über die Veränderung des Klimas und den daraus resultierenden Folgen einer erhöhten globalen Durchschnittstemperatur und extremeren Wettervorkommnissen.

$$E = \left(a \frac{LK}{LA} \right)^\gamma \quad (4.12)$$

Der Parameter $a = 1,65 \cdot 10^{-4}$ kann als Technologieindex interpretiert werden und beschreibt, wie verschmutzend eine Technologie ist. Ein großer Wert für a impliziert eine verhältnismäßig verschmutzende Technologie und hat bei einem gegebenen Kapitalstock und gegebenen Ausgaben für die Schadensverminderung hohe Emissionen zur Folge. Der Parameter $\gamma > 0$ wird mit $\gamma = 1$ angenommen.

¹⁰Unter Bruttokapitalertrag wird der Kapitalertrag vor Abzug der Steuern und zu einem Temperaturlevel wie vor der Industrialisierung verstanden.

Die Regierung wird in dieser Wirtschaft relativ einfach modelliert. Ihre Aufgabe ist es, das Marktversagen, das aufgrund der negativen Umweltexternalitäten auftritt, auszugleichen. Die Einnahmen der Regierung werden eingesetzt, beeinflussen jedoch das Wohlergehen des Haushaltes nicht und haben daher keinen Einfluss auf die Konsum-Investitions-Entscheidung des Haushaltes.

Der Entscheidungsträger der Wirtschaft berücksichtigt in seinen Entscheidungen weder die negative Externalität des Kapitals, die Treibhausgasemissionen noch die positiven Externalitäten.

Um die optimale Lösung zu ermitteln, wird die Momentanwert-Hamiltonfunktion aufgestellt:

$$H(\cdot) = \ln C + \lambda_1 \left((1 - \tau) B K^\alpha \bar{K}^{1-\alpha} D(\cdot) - C - A - \tau_E L^{-1} a^\gamma K^\gamma A^{-\gamma} - (\delta + n) K \right) \quad (4.13)$$

λ_1 bezeichnet den Schattenpreis von K.

Die notwendigen Optimalitätsbedingungen sind gegeben durch:

$$\frac{\partial H(\cdot)}{\partial C} = C^{-1} - \lambda_1 = 0, \quad (4.14)$$

$$\frac{\partial H(\cdot)}{\partial A} = \tau_E L^{-1} a^\gamma K^\gamma \gamma A^{-\gamma-1} - 1 = 0, \quad (4.15)$$

$$\dot{\lambda}_1 = (\rho + \delta) \lambda_1 - \lambda_1 \left((1 - \tau) B \alpha D(\cdot) - (\tau_E / L K) \gamma a^\gamma K^\gamma A^{-\gamma} \right). \quad (4.16)$$

In (4.16) geht ein, dass im Gleichgewicht $K = \bar{K}$ gilt. Weiters muss die Grenztransversalitätsbedingung¹¹ $\lim_{t \rightarrow \infty} e^{(\rho-n)t} \lambda_1 K = 0$ erfüllt sein.

Aus Gleichung (4.14) folgt

$$\lambda_1 = C^{-1} \quad (4.17)$$

sowie

$$\dot{\lambda}_1 = -\frac{\dot{C}}{C^2}. \quad (4.18)$$

Werden λ_1 und $\dot{\lambda}_1$ in Gleichung (4.16) substituiert, so ergibt sich nach Umformungen die fol-

¹¹Im Original [4] S. 11 als $\lim_{t \rightarrow \infty} e^{(-\rho+n)t} \lambda_1 K = 0$ dargestellt.

gende Differentialgleichung, welche die Wachstumsrate des Pro-Kopf-Konsums angibt.

$$\frac{\dot{C}}{C} = -(\rho + \delta) + \alpha(1 - \tau)BD(\cdot) - \gamma(\tau_E/LK) a^\gamma K^\gamma A^{-\gamma} \quad (4.19)$$

Aus Gleichung (4.15) folgt

$$A = \tau_E^{1/(\gamma+1)} L^{-1/(\gamma+1)} a^{\gamma/(\gamma+1)} K^{\gamma/(\gamma+1)} \gamma^{1/(\gamma+1)} \quad (4.20)$$

Durch Substitution von A in Gleichung (4.12) folgt nach Umformungen:

$$E = (\tau_E/LK)^{-\gamma/(1+\gamma)} a^{\gamma/(1+\gamma)} \gamma^{-\gamma/(1+\gamma)} \quad (4.21)$$

Unter der Verwendung von (4.5) und (4.6), den numerischen Parameterwerten und den hergeleiteten Gleichungen, wird die Marktwirtschaft vollständig durch das folgende System von Differentialgleichungen beschrieben.

$$\begin{aligned} \dot{T} c_h &= \frac{1367,5}{4} (1 - \alpha_1(T)) - 0,95 (5,67 \cdot 10^{-8}) (21/109) T^4 + \\ & (1 - \xi) 6,3 \cdot \ln \frac{M}{M_0}, \quad T(0) = T_0, \end{aligned} \quad (4.22)$$

$$\dot{M} = \beta_1 (\tau_E/LK)^{-\gamma/(1+\gamma)} a^{\gamma/(1+\gamma)} \gamma^{-\gamma/(1+\gamma)} - \mu M, \quad M(0) = M_0, \quad (4.23)$$

$$\frac{\dot{C}}{C} = -(\rho + \delta) + \alpha(1 - \tau)BD(\cdot) - \gamma(\tau_E/LK)^{1/(1+\gamma)} a^{\gamma/(1+\gamma)} \gamma^{-\gamma/(1+\gamma)}, \quad (4.24)$$

$$\begin{aligned} \frac{\dot{K}}{K} &= (1 - \tau)BD(T - T_0) - (\tau_E/LK)^{1/(1+\gamma)} a^{\gamma/(1+\gamma)} \gamma^{-\gamma/(1+\gamma)} (1 + \gamma) - \\ & \frac{C}{K} - (\delta + n), \quad K(0) = K_0, \end{aligned} \quad (4.25)$$

wobei $C(0)$ durch die Gesellschaft gewählt werden kann.

Dynamik der Wirtschaft

Zunächst wird der gleichgewichtige Wachstumspfad definiert.

Definition 1. Ein gleichgewichtiger Wachstumspfad (GWP) ist ein Pfad, der $\dot{T} = 0$, $\dot{M} = 0$ und $\dot{C}/C = \dot{K}/K$, mit $M \geq M_0$, erfüllt.

Es wird also gefordert, dass sowohl Temperatur als auch Treibhausgaskonzentration entlang des GWP konstant sind. Die Wachstumsrate des Pro-Kopf-Konsums ist gleich jener des Pro-Kopf-Kapitals und konstant. Weiters werden nur GWP betrachtet, bei denen die Treibhausgaskon-

zentration über jener vor der Industrialisierung liegt.

Eine konstante Konzentration an Treibhausgasen bedeutet eine konstante Menge an Emissionen. Bei einer wachsenden Wirtschaft ist dies allerdings nur möglich, wenn die Aktivitäten zur Schadensverminderung im gleichen Ausmaß wachsen wie der Kapitalstock. Es muss also das Verhältnis A/K von Schadensverminderungsaktivitäten zu Kapitalstock konstant sein. Nachdem die Schadensverminderungsaktivitäten durch den Entscheidungsträger so gewählt werden, dass Gleichung (4.15) erfüllt ist, ergibt sich, dass

$$A/K = a^{0,5} (\tau_E/LK)^{0,5} \quad (4.26)$$

konstant sein muss. Die Regierung muss also den Steuersatz für Emissionen so wählen, dass τ_E/LK konstant ist, also so, dass der Steuersatz τ_E im gleichen Ausmaß wie der aggregierte Kapitalstock LK wächst.¹² τ_E/LK wird 0,001 angenommen.

Um die Dynamik des Modells zu untersuchen, wird das Verhältnis $c \equiv C/K$, welches auf dem GWP konstant ist, ins Auge gefasst.

Wegen

$$c \equiv C/K \Rightarrow \dot{c} = \frac{\dot{C}K - \dot{K}C}{K^2} = \left(\frac{\dot{C}}{C} - \frac{\dot{K}}{K} \right) \frac{C}{K} \quad (4.27)$$

kann \dot{c} durch die Gleichungen (4.24) und (4.25) hergeleitet werden.

Dadurch wird das dynamische System durch die folgenden Differentialgleichungen dargestellt:

$$\begin{aligned} \dot{T} &= \left(\frac{1367,5}{4} (1 - \alpha_1(T)) - 0,95 (5,67 \cdot 10^{-8}) (21/109) T^4 \right) c_h^{-1} + \\ &\quad \left((1 - \xi) 6,3 \ln \frac{M}{M_0} \right) c_h^{-1}, \quad T(0) = T_0, \end{aligned} \quad (4.28)$$

$$\dot{M} = \beta_1 (\tau_E/LK)^{-\gamma/(1+\gamma)} a^{\gamma/(1+\gamma)} \gamma^{-\gamma/(1+\gamma)} - \mu M, \quad M(0) = M_0, \quad (4.29)$$

$$\dot{c} = c \left((n - \rho) - (1 - \alpha)(1 - \tau) BD(\cdot) + (\tau_E/LK)^{1/(1+\gamma)} a^{\gamma/(1+\gamma)} \gamma^{-\gamma/(1+\gamma)} + c \right). \quad (4.30)$$

$c(0)$ kann von der Gesellschaft frei gewählt werden.

Auf dem GWP wird die Treibhausgaskonzentration und die globale Durchschnittstemperatur durch das Verhältnis τ_E/LK bestimmt. Über die globale Durchschnittstemperatur auf dem GWP

¹²[3] S. 11

wird dann das Verhältnis von Konsum zu Kapital und die gleichgewichtige Wachstumsrate g festgelegt. Wird (4.29) = 0 nach M aufgelöst und das Ergebnis in (4.28) eingesetzt, so ergibt dies die Funktion von Abbildung 4.3.

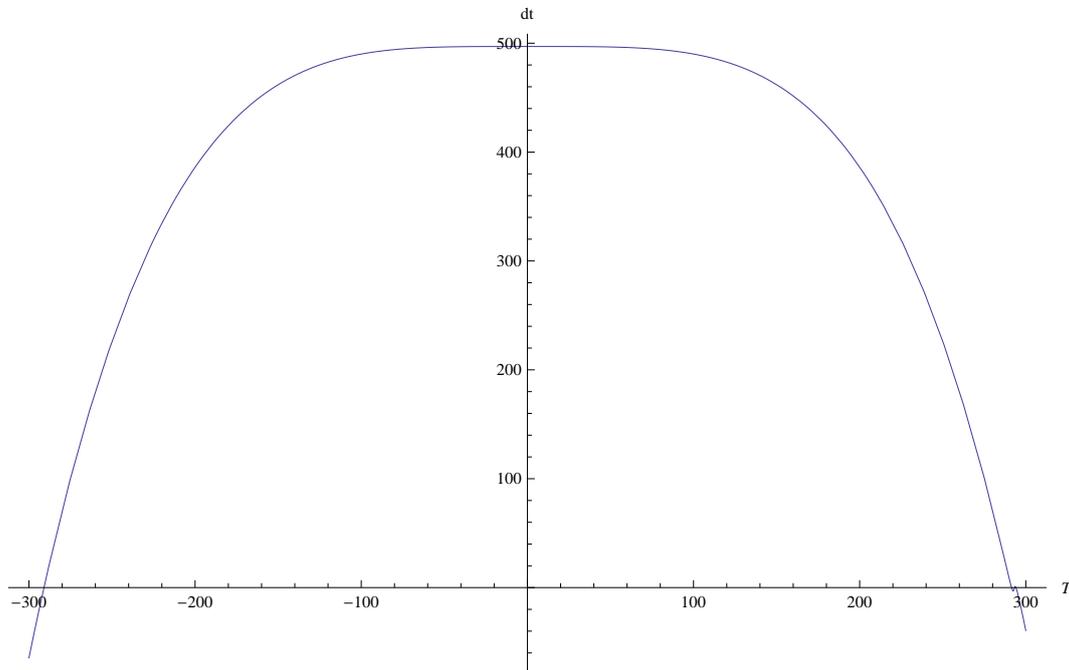


Abbildung 4.3.: Mehrfache Gleichgewichte

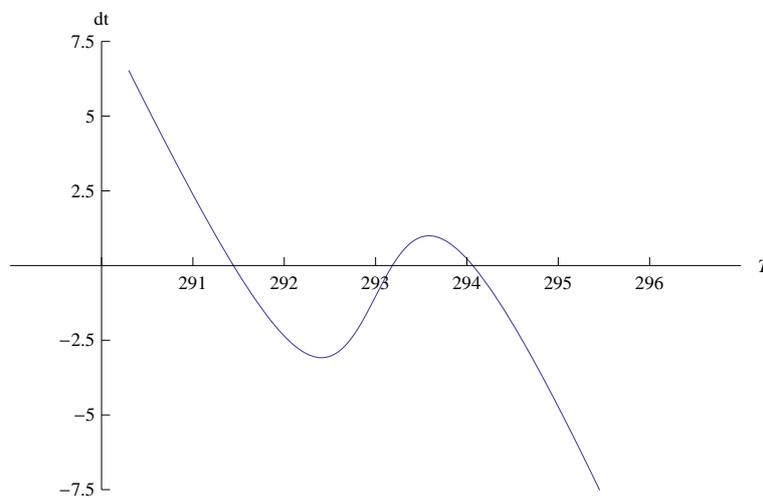


Abbildung 4.4.: Ausschnitt des Temperaturbereichs 290 - 296 Kelvin aus Abbildung 4.3.

Für $dT = 0$ gibt es also 4 Lösungen, wobei aus realistischen Gründen die Lösung bei -291

Kelvin¹³ in der folgenden Untersuchung nicht weiter beachtet wird. Die folgende Tabelle gibt die Gleichgewichtswerte für T^* und c^* , die gleichgewichtige Wachstumsrate g sowie die Eigenwerte der zu (4.28)-(4.30) gehörenden Jacobimatrix an.

Gleichgewicht	T^*	c^*	g	Eigenwerte
I	291,4	0,1698	2,6%	-5,01; -0,1; 0,17
II	293,2	0,167	2,3%	4,95; -0,1; 0,167
III	294,1	0,1657	2,2%	-3,64; -0,1; 0,166

Die Gleichgewichte I und III sind stabile Sattelpunkte, Gleichgewicht II dagegen ist instabil. Es gibt also zwei langfristige Gleichgewichte, zu denen die Wirtschaft konvergieren kann. Bei einer Konvergenz zu Gleichgewicht I erfolgt ein Temperaturanstieg von 3,6 K und die gleichgewichtige Wachstumsrate (g) beträgt 2,6%. Gleichgewicht III impliziert einen Temperaturanstieg von 6,3 K und ein g von 2,2%.

Die Resultate deuten auf die Existenz einer Schwelle hin, sodass initiale Bedingungen bestimmen, ob die Wirtschaft zu Gleichgewicht I oder III konvergiert.

Robustheit und vergleichende Statistik

Im folgenden Abschnitt wird untersucht, wie robust sich die Ergebnisse des letzten Abschnittes gegenüber einer Veränderung von τ_E/LK erweisen. Es ist noch anzumerken, dass die Thematik der globalen Erwärmung nur so lange existiert, bis die fossilen Brennstoffe vollständig aufgebraucht sind. In diesem Modell wird von einer Wirtschaft ausgegangen, für die fossile Brennstoffe einen wichtigen Produktionsinputfaktor darstellen.

Wird das Modell entlang des GWP's untersucht, so impliziert dies, dass die Wirtschaft die Emissionen auf einem konstanten Level stabilisieren kann und die Konvergenzrate genügend hoch ist. Der GWP wird zwar nur für $t \rightarrow \infty$ erreicht, allerdings stellt er für geringe Abweichungen trotzdem eine gute Approximation dar.

Wird τ_E/LK variiert, so beeinflusst dies die Position der dT -Kurve und bestimmt die gleichgewichtige Temperatur und eventuell die Anzahl der Gleichgewichte. Eine Erhöhung von τ_E/LK verschiebt die dt -Kurve nach unten und nach links und impliziert dadurch eine Reduzierung der Temperatur auf dem GWP. Ist die Erhöhung von τ_E/LK genügend groß, so existiert nur noch ein Gleichgewicht.

¹³Aufgrund zweier positiver und einem negativen Eigenwert ist dieses Gleichgewicht instabil.

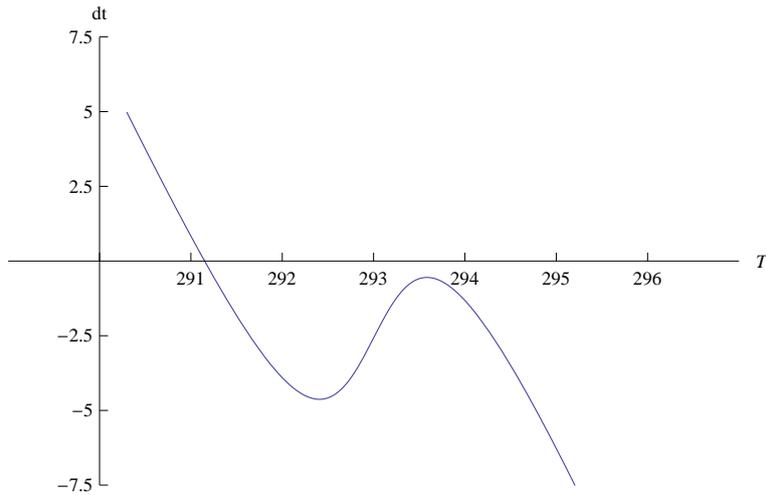


Abbildung 4.5.: $\tau_E/LK = 0,00108$

Wie Abbildung 4.5 zeigt, impliziert eine Erhöhung auf $\tau_E/LK = 0,00108$ nur noch ein Gleichgewicht mit einer Temperatur von 291,2 Kelvin im Gleichgewicht. Aufgrund zweier negativer reeller Eigenwerte ist das Gleichgewicht ein stabiler Sattelpunkt.

Verringert man hingegen (wie in Abbildung 4.6) den Wert von $\tau_E/LK = 0,001$ auf $\tau_E/LK = 0,0008$, so ergibt dies ebenfalls nur ein einziges Gleichgewicht mit einer gleichgewichtigen Temperatur von 294,8 Kelvin. Auch dieses Gleichgewicht ist aufgrund zweier negativer reeller Eigenwerte ein stabiler Sattelpunkt.

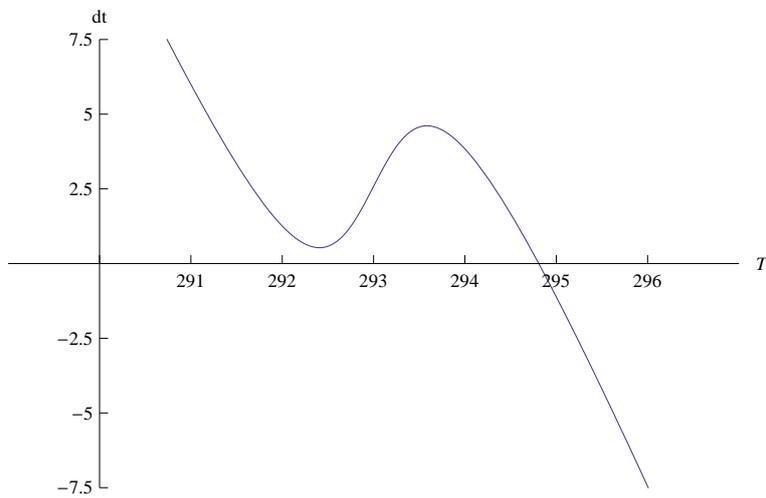


Abbildung 4.6.: $\tau_E/LK = 0,0008$

Die Vergleiche zeigen, dass sowohl die gleichgewichtige Temperatur als auch die Dynamik des Systems sehr stark durch die Entscheidungen der Regierung bezüglich des Emissionssteuersatzes beeinflusst werden. Es ist also der Emissionssteuersatz und dadurch die Aktivität für die Milderung des Klimawandels ausschlaggebend dafür, ob der langfristige Gleichgewichtspfad eindeutig ist oder ob es mehrere Gleichgewichte gibt.

In der folgenden Analyse wird die Eindeutigkeit des Gleichgewichts vorausgesetzt. Die Untersuchung des Modells wird auf den GWP eingeschränkt, obwohl dies nur eine Approximation darstellt.

Das Wohlergehen auf dem GWP wird durch

$$J = \int_0^{\infty} e^{-(\rho-n)t} \ln(c^* K^* e^{gt}) dt \quad (4.31)$$

dargestellt.

Aus Gleichung (4.31) ist ersichtlich, dass das Wohlergehen im Gleichgewicht positiv von der Konsumrate c^* und der ausgewogenen Wachstumsrate g , welche endogen ermittelt werden, abhängt. K^* , das auf Eins ($K^* \equiv 1$) normalisiert wird, wirkt sich ebenfalls positiv auf das Wohlergehen aus. Aus den Gleichungen (4.24) und (4.30) ist zu erkennen, dass τ_E/LK einen negativen direkten Effekt und einen positiven indirekten Effekt durch die Reduzierung der Oberflächentemperatur und die dadurch implizierten geringeren Schäden auf c^* und g hat. Dies legt die Vermutung nahe, dass ein invers U-förmiger Zusammenhang zwischen τ_E/LK und c^* beziehungsweise g besteht. Um das deutlicher zu erkennen, werden g , c^* , T^* sowie M^* für unterschiedliche Werte von τ_E/LK und unterschiedliche Schadensfunktionen kalkuliert.

Zuerst werden für die Schadensfunktion die Parameter dieses Abschnittes herangezogen (Tabelle 4.1). Für eine Schadensfunktion, die geringere Auswirkungen der Temperatursteigerung repräsentiert, werden die Parameter $a_1 = 0,03$ und $\psi = 0,03$ gewählt (Tabelle 4.2). Das bedeutet, dass eine Erhöhung der Oberflächentemperatur um 3 (2; 1) Grad einen Schaden von 0,7 (0,3; 0,1) Prozent des Outputs impliziert. Aus den Tabellen 4.1 und 4.2 ist ersichtlich, dass g und c^* gleich auf Veränderungen von τ_E/LK reagieren. Es wird also durch eine Maximierung der ausgeglichenen Wachstumsrate gleichzeitig auch der Wohlstand maximiert. Weiters bestätigen die Tabellen die Existenz einer inversen U-förmigen Kurve zwischen τ_E/LK und g beziehungsweise c^* .

$a_1 = 0,04$ und $\psi = 0,05$				
τ_E/LK	g	c^*	T^*	M^*
0,0008	0,0214	0,1646	294,8	2,23
0,00108	0,0259	0,1701	291,2	1,92
0,0025	0,0279	0,1725	289	1,26
0,003	0,028	0,1728	288,5	1,15
0,0036	0,0281	0,1728	288	1,05
0,0042	0,028	0,1728	287,7	0,97
0,005	0,0279	0,1726	287,2	0,89
0,006	0,0276	0,1723	286,8	0,81

Tabelle 4.1.: g, c^*, T^*, M^* für unterschiedliche Werte von τ_E/LK mit $a_1 = 0,04$ und $\psi = 0,05$.

$a_1 = 0,03$ und $\psi = 0,03$				
τ_E/LK	g	c^*	T^*	M^*
0,0008	0,0249	0,1689	294,8	2,23
0,00108	0,0273	0,1717	291,2	1,92
0,00235	0,028	0,1727	289,1	1,3
0,0032	0,0281	0,1729	288,3	1,11
0,0036	0,0281	0,1728	288	1,05
0,0042	0,028	0,1728	287,7	0,97
0,005	0,0279	0,1727	287,2	0,89
0,006	0,0278	0,1725	286,8	0,81

Tabelle 4.2.: g, c^*, T^*, M^* für unterschiedliche Werte von τ_E/LK mit $a_1 = 0,3$ und $\psi = 0,03$.

Für beide Schadensfunktionen wird die ausgeglichene Wachstumsrate für einen Wert von τ_E/LK , der über dem Wert vor der Industrialisierung liegt, maximiert. Das heißt eine Abweichung von der globalen Durchschnittstemperatur vor der Industrialisierung hat auf lange Sicht positive Wachstums- und Wohlfandeffekte zur Folge. Die logische Konsequenz aus der Tatsache, dass die Temperatur im Gleichgewicht bei geringeren Schäden jene bei stärkeren übersteigt, impliziert einen positiven Effekt für Wachstum und Wohlfand trotz stärkerer Temperatursteigerung.

4.2.3. Das Problem des sozialen Planers

Es wird ein sozialer Planer angenommen, der die positiven und negativen Externalitäten des Kapitals miteinbezieht. Daher sieht die Zustandsgleichung im Fall des sozialen Planers folgendermaßen aus:

$$\dot{K} = BKD(T - T_0) - C - A - (\delta + n)K, K(0) = K_0. \quad (4.32)$$

Durch diese Internalisierung werden \dot{M} und \dot{T} in das Optimierungsproblem aufgenommen, welches dann folgendermaßen lautet:

$$\max_{C,A} \int_0^{\infty} e^{-\rho t} L_0 e^{nt} \ln C dt \quad (4.33)$$

unter den Nebenbedingungen

$$\dot{K} = BKD(T - T_0) - C - A - (\delta + n)K, K(0) = K_0, \quad (4.34)$$

$$\dot{M} = \beta_1 E - \mu M, M(0) = M_0, \quad (4.35)$$

$$\dot{T} = c_h^{-1} \left(\frac{1367,5}{4} (1 - \alpha_1(T)) - 0,95 (5,67 \cdot 10^{-8}) (21/109) T^4 + (1 - \xi) 6,3 \ln \frac{M}{M_0} \right), T(0) = T_0. \quad (4.36)$$

E ist wieder durch Gleichung (4.12) und D durch Gleichung (4.11) gegeben.

Um die notwendigen Optimalitätsbedingungen herzuleiten, wird die Momentanwert-Hamiltonfunktion aufgestellt

$$H(\cdot) = \ln C + \lambda_2 (BKD(T - T_0) - C - A - (\delta + n)K) + \lambda_3 (\beta_1 a^\gamma K^\gamma A^{-\gamma} - \mu M) + \lambda_4 c_h^{-1} \left(\frac{1367,5}{4} (1 - \alpha_1(T)) - 0,95 (5,67 \cdot 10^{-8}) (21/109) T^4 + (1 - \xi) 6,3 \ln \frac{M}{M_0} \right), \quad (4.37)$$

mit $1 - \alpha_1(T)$ gegeben durch Gleichung (4.2). $\lambda_i, i = 2, 3, 4$ sind die Schattenpreise von K, M und T , wobei λ_2 positiv ist und λ_3 und λ_4 negativ sind.

Die notwendigen Optimalitätsbedingungen sind gegeben durch:

$$\frac{\partial H(\cdot)}{\partial C} = C^{-1} - \lambda_2 = 0, \quad (4.38)$$

$$\frac{\partial H(\cdot)}{\partial A} = -\lambda_3 \beta_1 a^\gamma K^\gamma \gamma A^{-\gamma-1} - \lambda_2 = 0, \quad (4.39)$$

$$\dot{\lambda}_2 = (\rho + \delta) \lambda_2 - \lambda_2 B D(\cdot) - \lambda_3 \beta_1 \gamma a^\gamma K^\gamma \gamma^{-1} A^{-\gamma}, \quad (4.40)$$

$$\dot{\lambda}_3 = (\rho - n) \lambda_3 - \lambda_3 \mu - \lambda_4 (1 - \xi) 6,3 c_h^{-1} M^{-1}, \quad (4.41)$$

$$\dot{\lambda}_4 = (\rho - n) \lambda_4 - \lambda_2 B K D'(\cdot) + \lambda_4 c_h^{-1} 341,875 \alpha_1'(\cdot) + \quad (4.42)$$

$$\lambda_4 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,95 (21/109) 4 T^3 c_h^{-1}, \quad (4.43)$$

mit $\alpha_1' = -k_1 \left(1 + 0,25 \pi^2 (T - 293)^2\right)^{-1}$. Weiters muss die Grenztransversalitätsbedingung¹⁴ $\lim_{t \rightarrow \infty} e^{(\rho-n)t} (\lambda_2 K + \lambda_3 T + \lambda_4 M) = 0$ erfüllt sein.

Wird ein Vergleich zwischen den Optimalitätsbedingungen in der Marktwirtschaft und jenen des sozialen Planers gezogen, so zeigt sich, wie die Regierung in der Marktwirtschaft die Steuern setzen muss, um das soziale Optimum nachzubilden. Vergleicht man (4.15) und (4.39), so wird ersichtlich, dass τ_E/LK so gesetzt werden muss, sodass $\tau_E/LK = \beta_1 (-\lambda_3) / (\lambda_2 K)$ erfüllt ist:

Aus Gleichung (4.15) lässt sich

$$a^\gamma K^\gamma \gamma A^{-\gamma-1} = \tau_E^{-1} L \quad (4.44)$$

und aus Gleichung (4.39)

$$a^\gamma K^\gamma \gamma A^{-\gamma-1} = \lambda_2 (-\lambda_3 \beta_1)^{-1} \quad (4.45)$$

herleiten.

Werden die rechten Seiten gleichgesetzt, so ergibt dies

$$\tau_E/LK = (-\lambda_3 \beta_1) / (\lambda_2 K). \quad (4.46)$$

Wird τ_E/LK auf diese Weise gewählt, so internalisiert der repräsentative Haushalt die negative Externalität des Kapitals.

¹⁴Im Original [4] S. 18 als $\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-(\rho+n)t} (\lambda_2 K + \lambda_3 T + \lambda_4 M) = 0$ dargestellt.

Aus dem Vergleich der Wachstumsrate des Pro-Kopf-Konsums in der Marktwirtschaft mit jener des sozialen Planers lässt sich der Steuersatz der Marktwirtschaft herleiten. Aus Gleichung (4.38) folgt

$$\lambda_2 = C^{-1} \quad (4.47)$$

sowie

$$\dot{\lambda}_2 = -\frac{\dot{C}}{C^2}. \quad (4.48)$$

Werden λ_2 und $\dot{\lambda}_2$ in Gleichung (4.40) auf diese Weise substituiert, so ergibt dies die Wachstumsrate des Pro-Kopf-Konsums im Fall des sozialen Planers:

$$\frac{\dot{C}}{C} = -(\rho + \delta) + BD(\cdot) + \lambda_3 \beta_1 \gamma a^\gamma K^{\gamma-1} A^{-\gamma} C \quad (4.49)$$

Wird nun (4.49) mit der Wachstumsrate des Pro-Kopf-Konsums in der Marktwirtschaft (4.19) verglichen, so ergibt dies den Einkommenssteuersatz $\tau = (1 - \alpha^{-1})$.

Wird τ auf diese Weise gewählt, so beachtet der repräsentative Entscheidungsträger die positive Externalität des Kapitals. Es zeigt sich, dass die Regierung eine Investitionszulage in der Höhe von $\tau = (1 - \alpha^{-1})$ leisten muss. Dieser Zuschuss wird durch den Ertrag der Emissionssteuer und/oder durch eine Konsum- oder Pauschalsteuer finanziert.

Wird in Gleichung (4.39) λ_2 durch $\lambda_2 = C^{-1}$ (siehe 4.47) substituiert, so ergibt dies nach Umformungen

$$A/K = (c(-\lambda_3) \beta_1 \gamma a^\gamma)^{1/(1+\gamma)}. \quad (4.50)$$

Das Einsetzen von (4.50) in die Gleichungen (4.49) und (4.34) ergibt nach Umformungen die Gleichungen (4.51) und (4.52). Wird in Gleichung (4.35) E durch (4.12) substituiert und Gleichung (4.50) eingesetzt, so ergibt dies (4.53).

Wird in Gleichung (4.43) λ_2 durch $\lambda_2 = C^{-1}$ (siehe 4.47) substituiert, so ergibt dies nach Umformungen Gleichung (4.58).

Das soziale Optimum wird dann durch das folgende System von Differentialgleichungen vollständig beschrieben:

$$\dot{C} = C \left(BD(\cdot) - (\rho + \delta) - ((C/K)(-\lambda_3)\beta_1 \gamma a^\gamma)^{1/(1+\gamma)} \right), \quad (4.51)$$

$$\dot{K} = K \left(BD(\cdot) - C/K - ((C/K)(-\lambda_3)\beta_1 \gamma a^\gamma)^{1/(1+\gamma)} - (\delta + n) \right), \quad K(0) = K_0, \quad (4.52)$$

$$\dot{M} = (C/K)^{-\gamma/(1+\gamma)} (-\lambda_3)^{-\gamma(1+\gamma)} \beta_1^{1(1+\gamma)} \gamma^{-\gamma/(1+\gamma)} a^{\gamma/(1+\gamma)} - \mu M, \quad M(0) = M_0, \quad (4.53)$$

$$\dot{T} = c_h^{-1} \left(341,875(1 - \alpha_1(T)) - 0,95(5,67 \cdot 10^{-8})(21/109)T^4 + \right. \quad (4.54)$$

$$\left. (1 - \xi)6,3 \ln \frac{M}{M_0} \right), \quad T(0) = T_0, \quad (4.55)$$

$$\dot{\lambda}_3 = (\rho - n)\lambda_3 - \lambda_3 \mu - \lambda_4(1 - \xi)6,3 c_h^{-1} M^{-1}, \quad (4.56)$$

$$\dot{\lambda}_4 = (\rho - n)\lambda_4 - \lambda_2 B \frac{K}{C} D'(\cdot) + \lambda_4 c_h^{-1} 341,875 \alpha_1'(\cdot) + \quad (4.57)$$

$$\lambda_4 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,95(21/109)4T^3 c_h^{-1}. \quad (4.58)$$

Wie in der Marktwirtschaft ist ein GWP durch $\dot{T} = \dot{M} = 0$ und $\dot{C}/C = \dot{K}/K$ mit $M \geq M_0$ gegeben. $\dot{T} = \dot{M} = 0$ impliziert $\dot{\lambda}_3 = \dot{\lambda}_4 = 0$.

Nachdem $\dot{C}/C = \dot{K}/K$ auf dem GWP erfüllt ist, lässt sich aus (4.51) und (4.52) herleiten, dass $c^* = \rho - n$ gilt. Aus $\dot{M} = 0$ lässt sich ein $\lambda_3(M)$ und aus $\dot{T} = 0$ ein $M(T)$ ermitteln. Werden $\lambda_3(M)$ und $M(T)$ in $\dot{\lambda}_3$ eingesetzt und $\dot{\lambda}_3 = 0$ gesetzt, so lässt sich ein $\lambda_4(T)$ ermitteln. Wird letztendlich $\lambda_4(T)$ in $\dot{\lambda}_4$ eingesetzt, so ergibt dies eine Differentialgleichung, die nur noch von T abhängt. Wird $\dot{\lambda}_4 = 0$ gesetzt, ergibt sich ein T^* , welches den GWP im sozialen Optimum repräsentiert.

Mit den Parametern des letzten Abschnittes und mit $a_1 = 0,04$ und $\psi = 0,05$ als Parameter der Schadensfunktion ergibt sich ein einziger GWP, der ein stabiler Sattelpunkt (zwei negative reelle Eigenwerte) ist (Abbildung 4.7). Die Temperatur und die Treibhausgaskonzentration betragen $T^* = 287,9$ und $M^* = 1,02$, was eine Temperaturerhöhung um 0,1 Grad bedeutet.

Natürlich hängen auch diese Resultate stark von der Schadensfunktion ab. Für eine Schadensfunktion, die sehr geringe Schäden durch den Klimawandel bewirkt, sieht das Ergebnis anders aus. Werden für die Schadensfunktion die Parameter $a_1 = 0,004$ und $\psi = 0,004$ gewählt, so bedeutet dies, dass eine Erhöhung der Oberflächentemperatur um 3 (2; 1) Grad einen Schaden von 0,01 (0,01; 0,001) Prozent des Outputs impliziert. Diese Werte ergeben drei Gleichgewichte, von denen Gleichgewicht I und III stabile Sattelpunkte sind und Gleichgewicht II instabil ist (Abbildung 4.8).

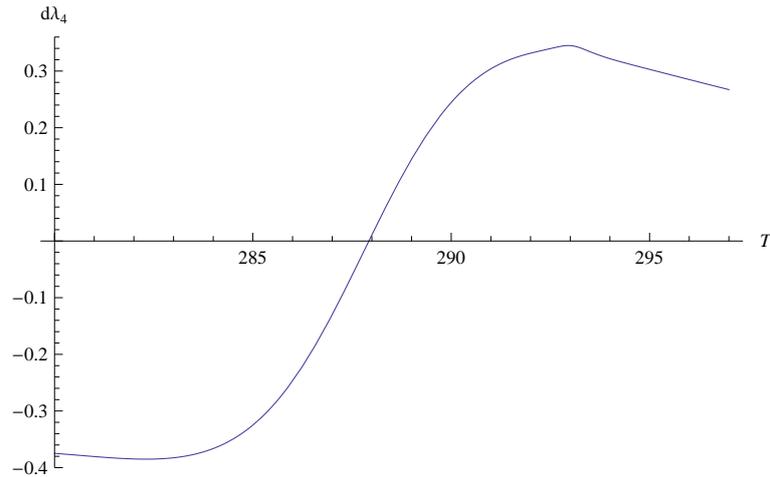


Abbildung 4.7.: Ein Gleichgewicht im Optimum für $a_1 = 0,004$ und $\psi = 0,004$.

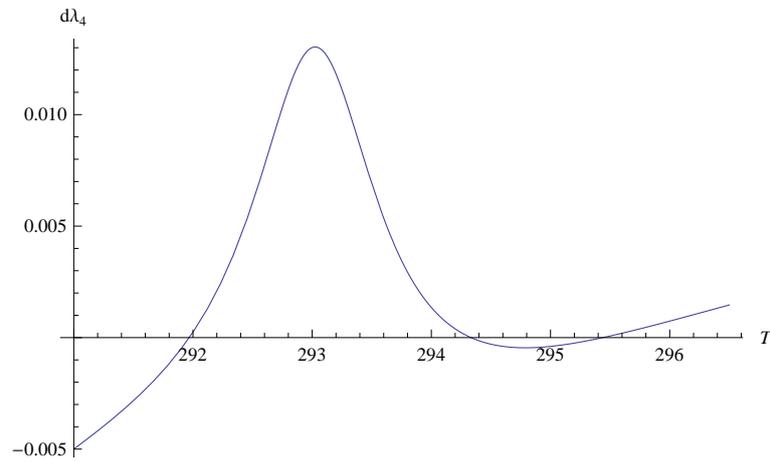


Abbildung 4.8.: Mehrere Gleichgewichte im Optimum für $a_1 = 0,004$ und $\psi = 0,004$.

Gleichgewicht	T^*	Eigenwerte
I	292	-3,36; -0,3; 0,33; 3,37
II	294,32	-4,7; 4,71; 0,005-0,12i; 0,005+0,12i
III	295,4	-6,34; -0,06; 0,07; 6,35

Werden die Parameter der Schadensfunktion jedoch so gewählt, dass der entstehende Schaden marginal größer ist, so ist der langfristige GWP wieder eindeutig. Die Parameter $a_1 = 0,004$ und $\psi = 0,005$ liefern einen stabilen Sattelpunkt mit $T^* = 291,8$.

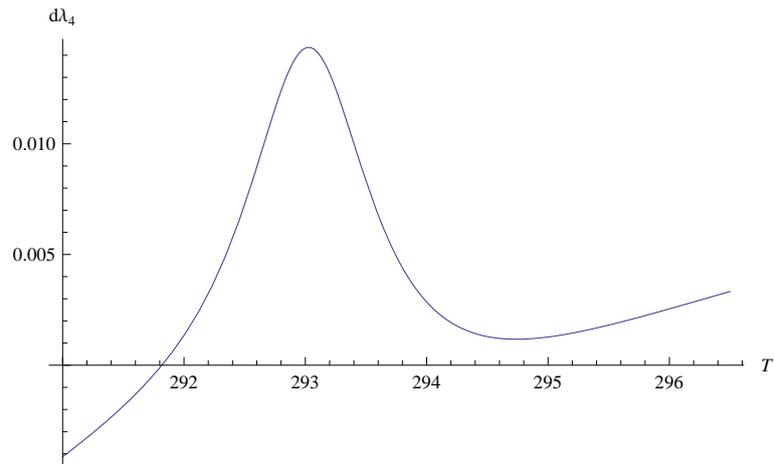


Abbildung 4.9.: Eindeutiges Gleichgewicht im Optimum für $a_1 = 0,004$ und $\psi = 0,005$.

Für plausible Schadensfunktionen ist das langfristige Gleichgewicht im Fall des sozialen Planers also eindeutig. Nur wenn sehr kleine Schäden für die Temperatursteigerungen angenommen werden, können mehrfache Gleichgewichte auftreten.

Abschließend ist festzuhalten, dass es laut diesen Modellierungen nicht ideal ist, keine Emissionssteuern festzusetzen. Durch die Internalisierung der Externalitäten des Kapitals mittels der Steuern erweisen sich die Steuern als wohlstandsverbessernd.

Diskussion

Neben den üblichen Unsicherheiten, mit denen ein solches Modell behaftet ist, ist zusätzlich noch zu erwähnen, dass a (siehe Gleichung (4.12)) exogen gewählt ist und dadurch der technologische Fortschritt im Modell leider nicht endogen erfasst wird.

5. Vergleich der Modelle

In diesem Abschnitt ziehe ich einen Vergleich über die drei in meiner Diplomarbeit behandelten Modelle. Als erstes stelle ich das DICE-Modell-2007¹ und das Modell „Global Warming and Economic Externalities“², das zur Vereinfachung mit GWEE-Modell abgekürzt wird, gegenüber, da diese vom Aufbau her sehr ähnlich sind und ein konkreter Vergleich gut möglich ist.

5.1. Vergleich DICE-Modell-2007 - „Global Warming and Economic Externalities“

Im DICE-Modell-2007 wird die Ökonomie des Klimawandels aus dem Blickwinkel einer neoklassischen Wachstumstheorie betrachtet, während das GWEE-Modell auf einem Ramsey-Cass-Koopmans-Modell beruht, das um die Dynamik und Auswirkungen der Treibhausgasemissionen erweitert wird. Beide Modelle laufen über 600 Jahre und wiegen im Großen und Ganzen die aktuellen Kosten einer Emissionsreduktion mit dem Nutzen verminderter zukünftiger Klimaschäden ab.

In beiden Modellen wird der Großteil der wichtigen Variablen, wie Output, Kapitalstock, CO_2 -Emissionen, CO_2 -Konzentration und Klimaschäden, endogen in das Modell integriert. Während jedoch die globale Temperaturveränderung im DICE-Modell-2007 endogenisiert ist, wird sie im GWEE-Modell überhaupt nicht behandelt und die Zerstörung der Umwelt wird direkt aus der CO_2 -Konzentration abgeleitet. Die Bevölkerung sowie der technologische Fortschritt werden in beiden Modellen exogen angenommen. Als Rückmeldung des Modells wird im DICE-Modell-2007 der Pfad der Emissionsreduktion generiert, während im GWEE-Modell die Anteile des Outputs, die für die Minderung der Klimaschädigung sowie für die Investition ausgegeben werden, ermittelt werden.

Im DICE-Modell-2007 ist industrielles CO_2 das einzige Treibhausgas, das hinsichtlich seines Emissionsreduktionspfades untersucht wird. CO_2 , das im Zuge landwirtschaftlicher Nutzung

¹[6]

²[9]

entsteht, sowie alle anderen Treibhausgase werden exogen behandelt. Im GWEE-Modell wird ausschließlich CO_2 behandelt, auf die restlichen Treibhausgase wird nicht weiter eingegangen.

Während im GWEE-Modell über die diskontierte Summe des Pro-Kopf-Konsumnutzens maximiert wird, wird im DICE-Modell-2007 bei dieser Maximierung der bevölkerungsgewichtete Pro-Kopf-Konsumnutzen herangezogen.

$$\max_{c(t)} \sum_{t=1}^{Tmax} (1 + \rho)^{-t} L(t) \left[c(t)^{1-\alpha} / (1 - \alpha) \right] \quad \text{DICE-Modell-2007} \quad (2.1)$$

$$\max_{s(t), m(t)} \sum_{t=1}^T (1 + \rho)^{-t+1} \left[c(t)^{1-\eta} / (1 - \eta) \right] \quad \text{GWEE-Modell} \quad (3.1)$$

ρ bezeichnet dabei die Abdiskontierung, $c(t)$ den Pro-Kopf-Konsum, α und η die jeweiligen Konsumelastizitäten und $L(t)$ die Bevölkerung im DICE-Modell-2007. Indirekt wird bei beiden Modellen über $c(t)$ maximiert. Im GWEE-Modell fungieren der Investitionsanteil $s(t)$ des Outputs und jener Anteil, der in die Minderung der Umweltschädigung investiert wird, als Kontrollvariablen. Im DICE-Modell-2007 dient nur die Emissionsreduktionsrate $\mu(t)$ als Kontrollvariable.

Der Pro-Kopf-Konsum setzt sich in beiden Fällen aus Konsum/Bevölkerung zusammen, wobei die Bevölkerung im GWEE-Modell genauso angenommen wird wie im DICE-Modell-2007.

$$c(t) = C(t) / L(t) \quad \text{DICE-Modell-2007} \quad (2.8)$$

$$c(t) = C(t) / N(t) \quad \text{GWEE-Modell} \quad (3.5)$$

$C(t)$ beschreibt den Konsum und $L(t)$ und $N(t)$ die jeweilige Bevölkerung.

Der Konsum ist in beiden Modellen jener Teil des Outputs, der nicht investiert wird.

$$C(t) = [1 - I(t) / Q(t)] Q(t) \quad \text{DICE-Modell-2007} \quad (2.7)$$

$$C(t) = [1 - s(t)] Y(t - 1) \quad \text{GWEE-Modell} \quad (3.4)$$

$Q(t)$ und $Y(t - 1)$ beschreiben den Output der beiden Modelle. Im GWEE-Modell wird $Y(t - 1)$ verwendet, da der Output der Vorperiode am Beginn der nächsten Periode (in diesem Fall t)

aufgeteilt wird. $s(t)$ bezeichnet im GWEE-Modell den Anteil des Outputs, der für Investitionen ausgegeben wird. Im DICE-Modell-2007 ist er über $I(t)/Q(t)$ ersichtlich.

$$Q(t) = \Omega(t)[1 - \Lambda(t)]A(t)K(t)^\gamma L(t)^{1-\gamma} \quad \text{DICE-Modell-2007} \quad (2.3)$$

$$Y(t) = Z[CD(t)]AK(t)^\alpha L(t)^{1-\alpha} \quad \text{GWEE-Modell} \quad (3.14)$$

Die Funktionen $\Omega(t)$ und $Z[CD(t)]$, die den Outputverlust durch Klimaschäden beschreiben, werden später noch genauer erläutert. Im DICE-Modell-2007 ist der Output bereits um die Kosten der Verminderung der Klimaschäden $\Lambda(t)$ reduziert. Diese Kosten werden im Gegensatz dazu im GWEE-Modell als Anteil des Outputs betrachtet, da $m(t)$ ein Teil der Investitionen ist.

$$\Lambda(t) = \pi(t)\theta_1(t)\mu(t)^{\theta_2} \quad (2.5)$$

$\pi(t)$ beschreibt über

$$\pi(t) = \varphi(t)^{1-\theta_2} \quad (2.6)$$

die Erhöhung der Senkungskosten durch unvollständige Partizipation bei einer gegebenen globalen Kontrollrate. Dabei steht $\varphi(t)$ für den Emissionsanteil der partizipierenden Gruppe und θ_2 fungiert als Parameter.

$\mu(t)$ in Gleichung (2.5) stellt die Emissionskontrollrate dar, die die anteilmäßige Reduktion von Emissionen in Relation zu unkontrollierten Emissionen ausdrückt. $\theta_1(t)$ und θ_2 bezeichnen die Parameter der Senkungskostenfunktion. Im Gegensatz zum GWEE-Modell ist im DICE-Modell-2007 eine Backstop-Technologie integriert, indem der Zeitpfad der Parameter der Senkungskosten-Gleichung so festgesetzt wird, dass die marginalen Kosten der hundertprozentigen Senkung jedes Jahr mit dem Backstop-Preis übereinstimmen.

Die Produktivität $A(t)$ beziehungsweise A wird in beiden Modellen exogen und im GWEE-Modell zusätzlich noch konstant angenommen. In beiden Modellen wird dadurch der technologische Fortschritt nicht endogen in das Modell integriert.

Das Kapital setzt sich in beiden Modellen aus dem durch Abschreibung verminderten Kapitalstock der Vorperiode und jenem Anteil des Outputs, der der Kapitalinvestition zugedacht ist, zusammen. Diese Kapitalinvestition wird im DICE-Modell-2007 durch $I(t)$ und im GWEE-Modell über $s(t) - m(t)$, also der Investition verringert um die Ausgaben für die Milderung des

Klimawandels, beschrieben.

$$K(t) = I(t) + (1 - \delta_K) K(t-1) \quad \text{DICE-Modell-2007} \quad (2.9)$$

$$K(t) = (1 - \delta) K(t-1) + [s(t) - m(t)] Y(t-1) \quad \text{GWEE-Modell} \quad (3.9)$$

δ_K und δ bezeichnen die Abschreibung.

Die in der Produktionsfunktion vorkommende Arbeitskraft stellt einen der deutlichen Unterschiede der beiden Modelle dar. Während im DICE-Modell-2007 die Arbeitskraft gleich der Bevölkerung ist, wird im GWEE-Modell die Arbeitskraft über $L(t) = B(t)N(t)$ berechnet. Im GWEE-Modell ergibt sich durch

$$B(t) = B_0 \left(\frac{1}{e^{gb \cdot t}} \right) + B_{Max} \left(1 - \frac{1}{e^{gb \cdot t}} \right) \quad (3.8)$$

im Vergleich zur Bevölkerung und zum DICE-Modell-2007 fast die dreifache Arbeitskraft.

Da die Funktionen $\Omega(t)$ und $Z[CD(t)]$, die im jeweiligen Modell den Outputverlust durch Klimaschäden beschreiben, sehr stark variieren, wird zuerst $\Omega(t)$ des DICE-Modell-2007 näher erläutert und danach auf $Z[CD(t)]$ des GWEE-Modells genauer eingegangen.

$$\Omega(t) = 1 / \left[1 + \pi_1 T_{AT}(t) + \pi_2 T_{AT}(t)^2 \right] \quad (2.4)$$

$T_{AT}(t)$ stellt die globale Durchschnittstemperatur dar. π_1 und π_2 bezeichnen die Parameter der Schadensfunktion. $\Omega(t)$ beschreibt also die Umweltschäden in Abhängigkeit von der globalen durchschnittlichen Oberflächentemperatur. Diese Oberflächentemperatur spiegelt die Erwärmung der Atmosphäre und der Tiefsee wieder, die durch erhöhte radioaktive Strahlung verursacht wird. In der Modellierung ist auch die durch die Trägheit der verschiedenen Schichten verursachte Zeitdifferenz integriert.

$$T_{AT}(t) = T_{AT}(t-1) + \xi_1 \{ F(t) - \xi_2 T_{AT}(t-1) - \xi_3 [T_{AT}(t-1) - T_{LO}(t-1)] \} \quad (2.17)$$

$$T_{LO}(t) = T_{LO}(t-1) + \xi_4 \{ T_{AT}(t-1) - T_{LO}(t-1) \} \quad (2.18)$$

$T_{AT}(t)$ und $T_{LO}(t)$ bezeichnen die globale Durchschnittstemperatur der Erdoberfläche und die Temperatur des oberen Teils des Ozeans. ξ_1, ξ_2, ξ_3 und ξ_4 sind die Parameter der Klimagleichung.

$F(t)$ beschreibt den aus der Akkumulation von Treibhausgasen entstehenden Anstieg der radioaktiven Strahlung, der zur Erwärmung der Erdoberfläche führt.

$$F(t) = \eta \{ \log_2 [M_{AT}(t) / M_{AT}(1750)] \} + F_{EX}(t) \quad (2.16)$$

F_{EX} beschreibt die exogene radioaktive Strahlung und η ist ein Parameter. M_{AT} steht für die Menge an Kohlenstoff, die sich in der Atmosphäre befindet. Der Kohlenstoffkreislauf wird durch ein Drei-Reservoirs-Modell beschrieben, das aus der Atmosphäre, einer sich schnell mischenden Schicht aus Biosphäre und dem oberen Teil des Ozeans sowie der Tiefsee besteht.

$$M_{AT}(t) = E(t) + \phi_{11}M_{AT}(t-1) + \phi_{21}M_{UP}(t-1) \quad (2.13)$$

$$M_{UP}(t) = \phi_{12}M_{AT}(t-1) + \phi_{22}M_{UP}(t-1) + \phi_{32}M_{LO}(t-1) \quad (2.14)$$

$$M_{LO}(t) = \phi_{23}M_{UP}(t-1) + \phi_{33}M_{LO}(t-1) \quad (2.15)$$

$M_{AT}(t)$, $M_{UP}(t)$, $M_{LO}(t)$ stehen dabei für die Menge an Kohlenstoff in dem jeweiligen Reservoir. ϕ_{ij} bezeichnet den jeweiligen Parameter für den Austausch an Kohlenstoff pro Periode, wobei der Austausch von i nach j erfolgt. 1 steht dabei für den Bereich Atmosphäre, 2 für Biosphäre und oberen Teil des Ozeans und 3 steht für die Tiefsee. $E(t)$ beschreibt die Emissionen, die sich in die endogenen Emissionen der Industrie und in die exogenen Emissionen der Landwirtschaft aufteilen.

$$E(t) = E_{Ind}(t) + E_{Land}(t) \quad (2.12)$$

$$E_{Ind}(t) = \sigma(t) [1 - \mu(t)] A(t) K(t)^\gamma L(t)^{1-\gamma} \quad (2.10)$$

$$CCum \geq \sum_{t=0}^{Tmax} E_{Ind}(t) \quad (2.11)$$

$\sigma(t)$ beschreibt die Kohlenstoffintensität, die multipliziert mit dem Weltoutput den unkontrollierten Emissionsausstoß der Industrie ergibt. Diese Emissionen werden dann durch die Emissionsreduktionsrate $\mu(t)$ reduziert. $CCum$ steht für den maximalen Konsum an fossilen Brennstoffen.

Im GWEE-Modell hingegen wird durch die Schadensfunktion $Z[CD(t)]$ der Outputverlust direkt aus der CO_2 -Akkumulation hergeleitet, ohne die Temperatur und die Zeitverzögerung in

das Modell zu integrieren. $CD(t)$ beschreibt die CO_2 Akkumulation in der Atmosphäre.

$$Z[CD(t)] = \left[1 - \left[\frac{CD(t) - 280}{CDMax - 280} \right]^{\frac{1}{7}} \right]^{\gamma} \quad (3.13)$$

$$CD(t) = (1 - \varepsilon)CD(t - 1) + G[Y(t - 1)] - M[m(t)]Y(t - 1) \quad (3.10)$$

Im Gegensatz zum DICE-Modell-2007 ist mit $CDMax$ ein Grenzwert für die Akkumulation von CO_2 in der Atmosphäre gegeben, bei dem ein vollständiger Outputverlust eintritt.

$$G[Y(t)] = \beta Y(t) \quad (3.11)$$

$G[Y(t)]$ stellt die vom Output abhängigen Emissionen dar, β die CO_2 -Intensität.

$$M[m(t)] = \zeta \frac{1 - e^{-vm(t)}}{\nu} \quad (3.12)$$

$M[m(t+1)]Y(t)$ stellt die Aktivitäten zur Verminderung des Klimawandels dar. ζ und ν dienen als Parameter.

In beiden Modellen wird eine optimale Politik ermittelt, bei der die Externalität der Treibhausgase internalisiert wird. Dabei werden die Entscheidungsträger mit den wahren Emissionskosten konfrontiert. Im DICE-Modell-2007 erfolgt diese Internalisierung durch Emissionssteuern oder den Handel von Emissionszertifikaten, während im GWEE-Modell die Internalisierung durch eine Kostentransparenz erreicht wird. Da die Emissionskosten auf ihren wahren Wert erhöht werden, beginnen die Entscheidungsträger in die Schadensverminderung zu investieren. Dieser Verminderungsaufwand ist verhältnismäßig niedrig, verglichen mit den Gewinnen, die durch die vermiedenen Emissionen erreicht werden.

Als Vergleichspfad dient im DICE-Modell-2007 das Basismodell. Dabei wird angenommen, dass für die nächsten 250 Jahre keine Emissionskontrollen vorgenommen werden. Personen und Firmen passen sich zwar den Klimaveränderungen an, die Regierungen unternehmen aber nichts, um die Emissionen einzuschränken oder die Externalität der Treibhausgase zu internalisieren. Im DICE-Modell-2007 wird bei der Suche nach dem optimalen Emissionsreduktionspfad versucht, zwischen aktuellen Kosten der Schadensverminderung und zukünftigen Schäden der Klimaerwärmung abzuwiegen. Großes Gewicht liegt dabei auf der Frage, wie groß der Verzicht gegenwärtiger Generationen sein muss, um zukünftigen Generationen eine weniger zerstörte Umwelt zu hinterlassen.

Im GWEE-Modell hingegen dient der BAU-Fall als Referenzpfad zum optimalen Pfad. Dieser BAU-Pfad modelliert den momentanen Zustand ohne einer Korrektur der Externalität. Dabei erkennen die Entscheidungsträger die wahren sozialen Emissionskosten nicht und beziehen sie daher nicht in ihre Konsum-, Investitions- und Produktionsentscheidungen mit ein. Aus diesem Umstand folgt, dass sie keine Notwendigkeit sehen, in die Verminderung des Klimawandels zu investieren. Weiters beachten sie die negativen Auswirkungen eines steigenden Outputs auf das Klima nicht und investieren zu viel in Kapitalakkumulation, was wiederum zu einer überhöhten Akkumulation von Treibhausgasen führt. Die Kostentransparenz des optimalen Falls führt dazu, dass gegenwärtige Generationen weniger Kapital anhäufen und mehr davon konsumieren. Von der geringeren CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre profitieren die zukünftigen Generationen. Die gegenwärtigen Generationen können also den eigenen Konsumlevel halten und trotzdem den zukünftigen Generationen eine weniger zerstörte Umwelt hinterlassen. Dadurch stellt die Milderung des Klimaschadens des optimalen Pfades eine Pareto-Verbesserung für alle Generationen dar.

Die Problematik der intergenerationellen Gerechtigkeit tritt also im GWEE-Modell nicht auf. Erst bei der Aufteilung des potentiellen Gewinns spielt die intergenerationelle Gerechtigkeit eine Rolle. Um den Vergleichspfad des DICE-Modell-2007 zu simulieren wird im GWEE-Modell noch ein weiterer Pfad, der „beschränkt optimale Pfad“, untersucht. In diesem Fall ist es den Entscheidungsträgern nicht möglich in die Verminderung des Klimawandels zu investieren, sie kennen jedoch die sozialen marginalen Kosten der Emissionen und beziehen diese Information in ihre Konsum-, Produktions- und Investitionsentscheidungen mit ein. Dadurch wird die Externalität teilweise internalisiert. Nachdem die Entscheidungsträger die negativen Auswirkungen der CO_2 -Emissionen kennen, ist die schlüssige Folgerung, dass sie weniger Kapital anhäufen und mehr davon konsumieren, da dies unter diesen Umständen die einzige Möglichkeit darstellt, um gegen den Klimawandel vorzugehen. Der beschränkt optimale Pfad zeigt im Vergleich mit dem optimalen Pfad einen größeren Pro-Kopf-Konsum für die ersten Jahrzehnte. Dieser Vergleich liefert den Anschein, dass gegenwärtige Generationen auf Konsum verzichten müssen, um zukünftigen Generationen eine weniger zerstörte Umwelt zu hinterlassen. Allerdings beinhaltet dieser Vergleich eine zu hohe Einschätzung der Kosten für die Milderung des Klimawandels.

Zusammenfassend erweist sich im DICE-Modell-2007 eine langsame, jedoch steigende Investition in die Emissionsreduktion als beste Politik, die bei relativ geringen Kosten durchaus beträchtliche Klimaschäden verhindert. Das GWEE-Modell liefert eine optimale Politik, bei der der Verminderungsaufwand verstärkt in den ersten Jahrzehnten ausgeführt wird und die tatsäch-

lichen Kosten dafür vergleichsweise gering sind. Weiters ist die Thematik der intergenerationalen Gerechtigkeit von sekundärer Relevanz und das Ergebnis zeigt, dass es keine Kosten für die Verminderung des Klimawandels gibt, sondern nur signifikante Gewinne daraus resultieren.

5.2. „Economic Growth and Global Warming: A Model of Multiple Equilibria and Thresholds“

Dieses Modell³ beruht auf einem endogenen Wachstumsmodell, das um die Aspekte der globalen Klimaerwärmung erweitert wird. Während im DICE-Modell-2007 und im GWEE-Modell davon ausgegangen wird, dass sich die Wirtschaft in einem stabilen Zustand befindet und das Wirtschaftswachstum exogen angenommen wird, wird das Wirtschaftswachstum in diesem Modell endogen integriert.

Der Klimawandel wird über ein Energiebilanzmodell, in das die Auswirkungen der wachsenden Treibhausgaskonzentration auf die Albedo der Erde eingebaut werden, erfasst. In diesem Modell haben also die Schäden der Klimaerwärmung eine Auswirkung auf die Wirtschaft. Als Politikinstrument dient eine Kohlenstoffsteuer und es sind Aktivitäten zur Schadensverminderung möglich.

Während im DICE-Modell-2007 und im GWEE-Modell verschiedene Politiken, mit der globalen Erderwärmung umzugehen, verglichen werden, ist es in diesem Modell vorrangig, die Langzeiteffekte der Interaktion von Klimawandel und Wirtschaftswachstum, insbesondere die Übergangsdynamik, die mit der Klimaerwärmung auftreten kann, zu untersuchen. Dabei wird analysiert, ob mehrere Gleichgewichte auftreten und ob Schwellen vorhanden sind, welche die Einzugsbereiche der optimalen Pfade für die langfristigen, stabilen Zustände trennen.

Klimagleichungen

Mit Hilfe eines Energiebilanzmodells werden die Einflüsse der Treibhausgasemissionen auf die Veränderung der globalen Durchschnittstemperatur beschrieben:

$$\dot{T}(t) c_h = S_E - H(t) - F_N(t), T(0) = T_0. \quad (4.1)$$

$T(t)$ beschreibt dabei die durchschnittliche globale Temperatur und c_h die Wärmekapazität der Erdoberfläche. Im Folgenden wird das Zeitargument t weggelassen, solange dadurch keine Unklarheiten entstehen. S_E stellt die solare Einstrahlung und $H(t)$ den nichtstrahlenden Energiefluss

³[4]

dar. Die Differenz kann durch $S_E - H(t) = Q(1 - \alpha_1(T))/4$, mit Q als Solarkonstante dargestellt werden. $\alpha_1(T)$ ist dabei die planetare Albedo. Erfolgt eine Abweichung von der gleichgewichtigen Durchschnittstemperatur der Erdoberfläche, so hat dies einen Feedback-Effekt auf die Reflexion der eingehenden Energie zur Folge.

$F_N(t) = F \uparrow(t) - F \downarrow(t)$ beschreibt die Differenz zwischen dem ausgehenden und dem eingehenden radiativen Fluss, wobei $F \uparrow$ dem Stefan-Boltzmann-Gesetz mit $F \uparrow = \varepsilon \sigma_T T^4$ folgt. Das relative Emissionsvermögen ε beschreibt das Verhältnis der aktuellen Emissionen zu den Emissionen eines schwarzen Körpers und σ_T die Stefan-Boltzmann-Konstante.

Wird die Treibhausgaskonzentration durch weitere Emissionen erhöht, so führt dies zu einer Verstärkung des Treibhauseffekts. Die radioaktive Strahlung (F) wird für CO_2 durch

$$F = 6,3 \ln \frac{M}{M_0} \quad (4.4)$$

ausgedrückt. M beschreibt dabei die aktuelle CO_2 -Konzentration und M_0 die Konzentration vor der Industrialisierung. Während im DICE-Modell-2007 die anderen Treibhausgase exogen in das Modell aufgenommen werden und im GWEE-Modell nicht weiter auf die anderen Treibhausgase eingegangen wird, ist es in diesem Modell möglich, die Effekte der anderen Treibhausgase in äquivalenter CO_2 -Strahlung auszudrücken.

Gleichung (4.1) wird um den Einfluss der radiativen CO_2 -Strahlung (4.4) erweitert:

$$\dot{T}(t) c_h = S_E - H(t) - F_N(t) + (1 - \xi) 6,3 \ln \frac{M}{M_0}, \quad T(0) = T_0. \quad (4.4)$$

Der Parameter ξ beschreibt jenen Teil der durch den Treibhauseffekt produzierten Erwärmung, der durch die Ozeane absorbiert wird, indem die Wärme von oberen Schichten in die Tiefsee übertragen wird.

Die Veränderung der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre wird durch die folgende Gleichung ausgedrückt:

$$\dot{M} = \beta_1 E - \mu M, \quad M(0) = M_0. \quad (4.6)$$

E beschreibt dabei die Emissionen und μ die Inverse der Lebenszeit von CO_2 in der Atmosphäre. Die Tatsache, dass nicht die gesamten Emissionen in die Atmosphäre übergehen, sondern ein Teil davon von den Ozeanen aufgenommen wird, wird durch β_1 erfasst.

5.2.1. Marktwirtschaft mit Regierungsaktivität

Wirtschaftliche Struktur des Modells

Die Wirtschaft wird durch ein Individuum repräsentiert und es wird ein homogenes Gut produziert. Eine Zeitperiode umfasst ein Jahr. Der repräsentative Haushalt maximiert über den diskontierten Pro-Kopf-Konsumnutzen, der mit der Anzahl der Haushaltsmitglieder gewichtet wird. Als Nebenbedingung dient die Budgetbeschränkung.

$$\max_{C,A} \int_0^{\infty} e^{-\rho t} L_0 e^{nt} \ln C dt \quad (4.8)$$

$$\dot{K} = Y(1 - \tau) - C - A - \tau_E E L^{-1} - (\delta + n)K, K(0) = K_0. \quad (4.9)$$

ρ beschreibt die Diskontrate und L_0 die Arbeitskraft zum Zeitpunkt $t = 0$, die mit der konstanten Rate n wächst. Y beschreibt die Pro-Kopf-Produktion, τ den Einkommenssteuersatz, K das Pro-Kopf-Kapital und A die Pro-Kopf-Aktivitäten, um den Schaden des Klimawandels zu vermindern. E steht für die Emissionen und τ_E für die Steuern auf Emissionen. δ beschreibt die Abschreibungsrate des Kapitals und L die Arbeitskraft, welche mit der Rate n wächst.

$$Y = BK^\alpha \bar{K}^{1-\alpha} D(T - T_0) \quad (4.10)$$

B beschreibt die Produktivität und der Parameter α die Elastizität des Outputs in Bezug auf das Kapital. \bar{K} stellt eine aus Spillovers resultierende positive Externalität des Kapitals dar. Die Schadensfunktion $D(T - T_0)$ repräsentiert den Schaden, der durch die Abweichung von der normalen Temperatur T_0 entsteht und wird durch

$$D(\cdot) = \left(a_1 (T - T_0)^2 + 1 \right)^{-\psi} \quad (4.11)$$

mit den Parametern a_1 und ψ ausgedrückt.

In der Modellierung wird angenommen, dass die Treibhausgase ein Nebenprodukt des in der Produktion verwendeten Kapitals sind. Die Emissionen E werden in äquivalentem CO_2 ausgedrückt.

$$E = \left(a \frac{LK}{LA} \right)^\gamma \quad (4.12)$$

Der Parameter a kann als Technologieindex interpretiert werden und beschreibt, wie verschmutzend eine Technologie ist. Wie in den anderen beiden Modellen ist der technologische Fortschritt also nicht endogen in das Modell eingebaut. γ ist ein Parameter der Funktion.

Wie im DICE-Modell-2007 haben die Emissionen keinen direkten Einfluss auf den Nutzen und die Produktion, sondern beeinflussen diese nur indirekt über die Klimaerwärmung und die daraus resultierenden Folgen.

Die Regierung hat in diesem Modell die Aufgabe, das durch Umweltexternalitäten verursachte Marktversagen auszugleichen. Der Entscheidungsträger der Wirtschaft berücksichtigt in seinen Entscheidungen weder die Externalitäten des Kapitals noch die Treibhausgasemissionen.

Das Modell zeigt, dass die Entscheidungen der Regierung bezüglich des Emissionssteuersatzes die gleichgewichtige Temperatur und die Dynamik des Systems sehr stark beeinflussen. Der Emissionssteuersatz und dadurch die Aktivität für die Milderung des Klimawandels ist ausschlaggebend dafür, ob der langfristige Gleichgewichtspfad eindeutig ist oder ob es mehrere Gleichgewichte gibt. Bei mehreren Gleichgewichten deutet das Ergebnis auf die Existenz einer Schwelle hin, sodass initiale Bedingungen bestimmen, zu welchem Gleichgewicht die Wirtschaft konvergiert.

Es ergibt sich, dass eine Abweichung von der globalen Durchschnittstemperatur vor der Industrialisierung auf lange Sicht positive Wachstums- und Wohlfandeffekte zur Folge hat.

5.2.2. Das Problem des sozialen Planers

Es wird von einem sozialen Planer ausgegangen, der die positiven und negativen Externalitäten des Kapitals miteinbezieht. Daher sieht die Zustandsgleichung im Fall des sozialen Planers folgendermaßen aus:

$$\dot{K} = BKD(T - T_0) - C - A - (\delta + n)K, K(0) = K_0. \quad (4.32)$$

Für plausible Schadensfunktionen ergibt sich im Fall des sozialen Planers ein eindeutiges langfristige Gleichgewicht. Nur wenn sehr kleine Schäden für die Temperatursteigerungen angenommen werden, können mehrfache Gleichgewichte auftreten.

Aus den Optimalitätsbedingungen des sozialen Planers kann abgeleitet werden, wie die Regierung in der Marktwirtschaft die Steuern setzen muss, um das soziale Optimum nachzubilden. Dadurch gelingt es, dass der repräsentative Haushalt die Externalitäten internalisiert. Laut diesen Modellierungen ist es nicht ideal, keine Emissionssteuern festzusetzen, da diese sich durch die implizierte Internalisierung der Externalität als wohlfandsverbessernd erweisen. Es zeigt

sich, dass die Regierung eine Investitionszulage leisten muss.

5.3. Resümee

Abschließend ist festzuhalten, dass die Modelle mit einer Vielzahl von Annahmen arbeiten, die alle von Unsicherheiten betroffen sind. Daher variieren die Ergebnisse, in welcher zeitlichen Abfolge und Intensität die Aktivitäten zur Emissionsreduktion getätigt werden sollen. In allen Modellen sind solche Milderungsaktivitäten aber Bestandteil der Ergebnisse oder Modellierungen. Trotz aller Unsicherheiten, wie sich das Klima entwickeln wird und welche Schäden entstehen werden, herrscht nämlich großer Konsens darüber, dass es Veränderungen und Schäden geben wird und eine Mäßigung dieser nur über Investitionen in die Milderung des Klimawandels möglich ist.

A. Überblick über die wichtigsten Gleichungen, Variablen und Parameter der Modelle

Dieser Abschnitt führt die Gleichungen, Variablen und Parameter der Modelle „A Question of Balance“¹ (im Weiteren mit DICE-Modell-2007 bezeichnet) von W. Nordhaus, „Global Warming und Economic Externalities“² von A. Rezai, D. K. Foley und Lance Taylor und „Economic Growth and Global Warming: A Model of Multiple Equilibria and Thresholds“³ von A. Greiner und W. Semmler auf.

A.1. DICE-Modell-2007

A.1.1. Modellgleichungen

$$W = \sum_{t=1}^{Tmax} U [c(t), L(t)] (1 + \rho)^{-t} \quad (2.1)$$

$$U [c(t), L(t)] = L(t) \left[c(t)^{1-\alpha} / (1 - \alpha) \right] \quad (2.2)$$

$$Q(t) = \Omega(t) [1 - \Lambda(t)] A(t) K(t)^\gamma L(t)^{1-\gamma} \quad (2.3)$$

$$\Omega(t) = 1 / \left[1 + \pi_1 T_{AT}(t) + \pi_2 T_{AT}(t)^2 \right] \quad (2.4)$$

$$\Lambda(t) = \pi(t) \theta_1(t) \mu(t)^{\theta_2} \quad (2.5)$$

$$\pi(t) = \varphi(t)^{1-\theta_2} \quad (2.6)$$

¹[6]

²[9]

³[4]

$$Q(t) = C(t) + I(t) \quad (2.7)$$

$$c(t) = C(t) / L(t) \quad (2.8)$$

$$K(t) = I(t) + (1 - \delta_K) K(t-1) \quad (2.9)$$

$$E_{Ind}(t) = \sigma(t) [1 - \mu(t)] A(t) K(t)^\gamma L(t)^{1-\gamma} \quad (2.10)$$

$$CCum \geq \sum_{t=0}^{Tmax} E_{Ind}(t) \quad (2.11)$$

$$E(t) = E_{Ind}(t) + E_{Land}(t) \quad (2.12)$$

$$M_{AT}(t) = E(t) + \phi_{11} M_{AT}(t-1) + \phi_{21} M_{UP}(t-1) \quad (2.13)$$

$$M_{UP}(t) = \phi_{12} M_{AT}(t-1) + \phi_{22} M_{UP}(t-1) + \phi_{32} M_{LO}(t-1) \quad (2.14)$$

$$M_{LO}(t) = \phi_{23} M_{UP}(t-1) + \phi_{33} M_{LO}(t-1) \quad (2.15)$$

$$F(t) = \eta \{ \log_2 [M_{AT}(t) / M_{AT}(1750)] \} + F_{EX}(t) \quad (2.16)$$

$$T_{AT}(t) = T_{AT}(t-1) + \xi_1 \{ F(t) - \xi_2 T_{AT}(t-1) - \xi_3 [T_{AT}(t-1) - T_{LO}(t-1)] \} \quad (2.17)$$

$$T_{LO}(t) = T_{LO}(t-1) + \xi_4 \{ T_{AT}(t-1) - T_{LO}(t-1) \} \quad (2.18)$$

A.1.2. Variablendefinition und Einheiten

(Endogene Variablen sind mit Sternchen markiert)

$A(t)$ = Produktivität

* $c(t)$ = Pro-Kopf-Konsum von Gütern und Dienstleistungen ((2005) US-Dollar pro Person)

* $C(t)$ = Konsum von Gütern und Dienstleistungen (Billionen (2005) US-Dollar)

* $E(t)$ = gesamte Kohlenstoffemissionen (in Milliarden metrischer Tonnen Kohlenstoff pro Periode)

$E_{Land}(t)$ = Kohlenstoffemissionen aufgrund landwirtschaftlicher Nutzung (in Milliarden metrischer Tonnen Kohlenstoff pro Periode)

* $E_{Ind}(t)$ = industrielle Kohlenstoffemissionen (in Milliarden metrischer Tonnen Kohlenstoff pro Periode)

* $F(t), F_{EX}(t)$ = gesamte und exogene radioaktive Strahlung (Watt pro Quadratmeter von 1900)

* $I(t)$ = Investition (Billionen (2005) US-Dollar)

* $K(t)$ = Kapitalstock (Billionen (2005) US-Dollar)

$L(t)$ = Bevölkerung und Arbeitseinsatz (Millionen)

* $M_{AT}(t), M_{UP}(t), M_{LO}(t)$ = Kohlenstoffmenge im Reservoir für Atmosphäre (atmosphere), oberen Teil des Ozeans (upper oceans) und Tiefsee (lower oceans) (Milliarden metrischer Tonnen Kohlenstoff, Beginn der Periode)

t = Zeit (Jahrzehnte von 2001-2010, 2011-2020, ...)

* $Q(t)$ = Nettooutput von Gütern und Dienstleistungen, bereinigt um Senkungskosten und Schäden (Billionen (2005) US-Dollar)

* $T_{AT}(t), T_{LO}(t)$ = globale Durchschnittstemperatur der Erdoberfläche und Temperatur der Tiefsee ($^{\circ}\text{C}$ Anstieg seit 1900)

* $U[c(t), L(t)]$ = Nutzenfunktion

* W = Zielfunktion

* $\Lambda(t)$ = Senkungskostenfunktion (Senkungskosten als Teil des Weltoutputs)

* $\mu(t)$ = Emissionskontrollrate

* $\Omega(t)$ = Schadensfunktion (Klimaschaden als Teil des Weltoutputs)

* $\varphi(t)$ = Emissionsrate der partizipierenden Gruppe

* $\pi(t)$ = Erhöhung der Senkungskosten bei unvollständiger Partizipation

* $\sigma(t)$ = Anteil der unkontrollierten, industriellen Emissionen am Output (metrische Tonnen Kohlenstoff pro Output in Preisen von 2005)

A.1.3. Parameter

$CCum$ = maximaler Konsum an fossilen Brennstoffen (Milliarden metrischer Tonnen Kohlenstoff)

$Tmax$ = Länge der angesetzten Periode für das Modell (60 Perioden = 600 Jahre)

α = Konsumelastizität

γ = Elastizität des Outputs in Bezug auf Kapital

δ_k = Abschreibungsrate des Kapitals (pro Periode)

η = temperaturbeeinflussender Parameter ($^{\circ}\text{C}$ pro Watt pro Quadratmeter)

$\phi_{11}, \phi_{12}, \phi_{21}, \phi_{22}, \phi_{23}, \phi_{32}, \phi_{33}$ = Parameter des Kohlenstoffkreislaufes (Fluss pro Periode)

π_1, π_2 = Parameter der Schadensfunktion

ρ = Diskontrate (pro Jahr)

$\theta_1(t), \theta_2$ = Parameter der Senkungskostenfunktion

ξ_1, ξ_2 = Parameter der Klimagleichungen (Fluss pro Periode)

ξ_3 = Koeffizient des Hitzeverlustes der Atmosphäre an den Ozean

ξ_4 = Koeffizient der Hitzeerzeugung der Tiefsee

A.1.4. Bemerkung zur Zeitperiode

Dieses Modell läuft in 10-Jahres-Zeitschritten. Die Variablen sind generell als Fluss pro Jahr definiert, manche als Fluss pro Jahrzehnt. Die Übergangsparameter sind generell pro Jahrzehnt definiert.

A.2. „Global Warming and Economic Externalities“

A.2.1. Modellgleichungen

$$\max_{s(t), m(t)} \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+\rho)^{t-1}} U \left[\frac{C(t)}{N(t)} \right] \quad (3.1)$$

$$N(t) = N_0 \left(\frac{1}{e^{gn \cdot t}} \right) + N_{Max} \left(1 - \frac{1}{e^{gn \cdot t}} \right) \quad (3.2)$$

$$U[c(t)] = c(t)^{1-\eta} / (1-\eta) \quad (3.3)$$

$$C(t) = [1 - s(t)] Y(t-1) \quad (3.4)$$

$$c(t) = C(t) / N(t) \quad (3.5)$$

$$F[K(t), L(t)] = AK(t)^\alpha L(t)^{1-\alpha} \quad (3.6)$$

$$L(t) = B(t)N(t) \quad (3.7)$$

$$B(t) = B_0 \left(\frac{1}{e^{gb \cdot t}} \right) + B_{Max} \left(1 - \frac{1}{e^{gb \cdot t}} \right) \quad (3.8)$$

$$K(t) = (1 - \delta)K(t-1) + [s(t) - m(t)]Y(t-1) \quad (3.9)$$

$$CD(t) = (1 - \varepsilon)CD(t-1) + G[Y(t-1)] - M[m(t)]Y(t-1) \quad (3.10)$$

$$G[Y(t)] = \beta Y(t) \quad (3.11)$$

$$M[m(t)] = \zeta \frac{1 - e^{-vm(t)}}{\nu} \quad (3.12)$$

$$Z[CD(t)] = \left[1 - \left[\frac{CD(t) - 280}{CD_{Max} - 280} \right]^{\frac{1}{\gamma}} \right]^\gamma \quad (3.13)$$

$$Y(t) = Z[CD(t)]F[K(t), L(t)] \quad (3.14)$$

A.2.2. Variablendefinition

$B(t)$ = Arbeitsproduktivität

$c(t)$ = Pro-Kopf-Konsum

$C(t)$ = Konsum

$CD(t)$ = Kohlenstoffmenge in der Atmosphäre

$F[K(t), L(t)]$ = potentieller Output

$G[Y(t)]$ = Kohlenstoffemissionen

$K(t)$ = Kapitalstock

$L(t)$ = Arbeitsinput

$m(t)$ = Outputanteil für Aktivitäten zur Verminderung des Klimawandels

$M[m(t)]$ = Schadensverminderung

$N(t)$ = Bevölkerung

$s(t)$ = Outputanteil für Investition

t = Zeit (Jahrzehnte)

$U [c(t)]$ = Konsumnutzen

$Y(t)$ = effektiver Output

$Z[CD(t)]$ = Schadensfunktion

$\lambda(t)$ = Schattenpreis des Kapitals

$\mu(t)$ = Schattenpreis der Kohlenstoffmenge der Atmosphäre

A.2.3. Parameter

A = Produktivität der gesamten Inputfaktoren

B_0 = Startwert der Arbeitsproduktivität

B_{Max} = Endwert der Arbeitsproduktivität

$CDMax$ = Kohlenstoffakkumulation in der Atmosphäre, die keinen Output mehr ermöglicht

gn = initiale Wachstumsrate der Bevölkerung

gb = initiale Wachstumsrate der Arbeitsproduktivität

N_0 = momentane Bevölkerung

N_{Max} = maximale Bevölkerung

α = Elastizität des potentiellen Outputs in Bezug auf das Kapital

β = Kohlenstoffintensität der Produktion

δ = Abschreibungsrate des Kapitals

ε = Verfall von Kohlenstoff in der Atmosphäre

γ = Parameter der Schadensfunktion

η = Elastizität des marginalen Konsumnutzens

ν = Semi-Elastizität von $m(t)$

ρ = Diskontrate

ζ = Skalierungsparameter der Schadensverminderungsfunktion

A.3. „Economic Growth and Global Warming: A Model of Multiple Equilibria and Thresholds“

A.3.1. Modellgleichungen

$$\dot{T}(t)c_h = S_E - H(t) - F_N(t), T(0) = T_0. \quad (4.1)$$

$$1 - \alpha_1(T) = k_1 \left(\frac{2}{\pi} \right) \text{ArcTan} \left(\frac{\pi(T - 293)}{2} \right) + k_2 \quad (4.2)$$

$$\dot{T}(t)c_h = \frac{1367,5}{4} (1 - \alpha_1(T)) - 0,95 (5,67 \cdot 10^{-8}) (21/109) T^4, T(0) = T_0 \quad (4.3)$$

$$F = 6,3 \ln \frac{M}{M_0} \quad (4.4)$$

$$\dot{T}(t)c_h = \frac{1367,5}{4} (1 - \alpha_1(T)) - 0,95 (5,67 \cdot 10^{-8}) (21/109) T^4 + (1 - \xi) 6,3 \ln \frac{M}{M_0}, T(0) = T_0 \quad (4.5)$$

$$\dot{M} = \beta_1 E - \mu M, M(0) = M_0 \quad (4.6)$$

$$U(C) = \ln C \quad (4.7)$$

$$\max_{C,A} \int_0^{\infty} e^{-\rho t} L_0 e^{nt} \ln C dt \quad (4.8)$$

$$\dot{K} = Y(1 - \tau) - C - A - \tau_E E L^{-1} - (\delta + n)K, K(0) = K_0 \quad (4.9)$$

$$Y = BK^\alpha \bar{K}^{1-\alpha} D(T - T_0) \quad (4.10)$$

$$D(\cdot) = \left(a_1 (T - T_0)^2 + 1 \right)^{-\psi} \quad (4.11)$$

$$E = \left(a \frac{LK}{LA} \right)^\gamma \quad (4.12)$$

$$\dot{K} = BKD(T - T_0) - C - A - (\delta + n)K, K(0) = K_0 \quad (4.32)$$

A.3.2. Variablendefinition

$A(t)$ = Pro-Kopf-Aktivität zur Verminderung des Klimaschadens

$C(t)$ = Pro-Kopf-Konsum

$D(T - T_0)$ = Schadensfunktion

$E(t)$ = Emissionen

$F(t)$ = radiative Strahlung

$F_N(t)$ = Differenz zwischen ausgehendem und eingehendem radiativen Fluss

$H(t)$ = nicht radiativer Energiefluss

$K(t)$ = Kapital

$\bar{K}(t)$ = positive Externalität des Kapitals

$L(t)$ = Arbeitsinput

$M(t)$ = CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre

t = Zeit

$T(t)$ = Temperatur

$U(C)$ = Nutzenfunktion

$Y(t)$ = Pro-Kopf-Produktion

$\alpha_1(T)$ = planetare Albedo

A.3.3. Parameter

a = Technologieindex

a_1 = Parameter der Schadensfunktion

B = Parameter der Pro-Kopf-Produktionsfunktion

c_h = Wärmekapazität der Erdoberfläche

k_1, k_2 = Parameter der Funktion $1 - \alpha_1(T)$

L_0 = Arbeitsinput zum Zeitpunkt $t = 0$

M_0 = CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre vor der Industrialisierung

n = Wachstumsrate des Arbeitsinputs

Q = Solarkonstante

S_E = solare Einstrahlung

T_0 = Temperatur vor der Industrialisierung

α = Elastizität des Outputs in Bezug auf das Kapital

β_1 = Anteil der Emissionen, die in die Atmosphäre übergehen

δ = Abschreibungsrate des Kapitals

ε = relatives Emissionsvermögen der Erde

γ = Parameter der Emissionsfunktion

μ = inverse Lebenszeit von CO_2 in der Atmosphäre

ρ = Diskontrate

σ_T = Stefan-Boltzmann-Konstante

τ = Einkommenssteuersatz

τ_E = Steuersatz auf Emissionen

ξ = Anteil der Erwärmung durch den Treibhauseffekt, der durch die Ozeane absorbiert wird

ψ = Parameter der Schadensfunktion

Abbildungsverzeichnis

2.1. Emissionskontrollrate. Die globale CO_2 -Emissionskontrollrate der Strategien für das nächste Jahrhundert	20
2.2. Globale Emissionen von industriellem CO_2	21
2.3. CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre. Der Wert für 2005 ist der aktuelle Wert.	21
2.4. Veränderung der globalen Durchschnittstemperatur. Der Anstieg ist relativ zum Durchschnitt von 1900.	22
2.5. Pro-Kopf-Konsum. Die Prognose des DICE-Modells-2007 geht von einem starken Anstieg des Pro-Kopf-Konsums aus, wobei Basis- und Optimalmodell nicht zu unterscheiden sind.	23
3.1. Wachstumspfad der Bevölkerung	29
3.2. Arbeitsproduktivität $B(t)$	30
3.3. Effektive Arbeit $L(t) = B(t)N(t)$	30
3.4. Schadensfunktion	32
3.5. Aufwand zur Verringerung des Umweltschadens im optimalen Fall in % des BIPs.	41
3.6. Prozentueller Verlust des Outputs durch den Klimawandel im optimalen Fall.	41
3.7. Kohlenstoffpreis im optimalen Fall	42
3.8. Kapital	43
3.9. CO_2 -Akkumulation in der Atmosphäre	43
3.10. Aktivitäten zur Verminderung des Klimawandels.	44
3.11. Output	45
3.12. Anteil des Outputs, der durch die globale Erderwärmung verloren geht.	45
3.13. Pro-Kopf-Konsum	46
3.14. Kohlenstoffpreis	46
4.1. Albedo als Funktion der Temperatur	52
4.2. Approximation der Albedo	52
4.3. Mehrfache Gleichgewichte	59
4.4. Ausschnitt des Temperaturbereichs 290 - 296 Kelvin aus Abbildung 4.3.	59

4.5.	$\tau_E/LK = 0,00108$	61
4.6.	$\tau_E/LK = 0,0008$	61
4.7.	Ein Gleichgewicht im Optimum für $a_1 = 0,004$ und $\psi = 0,004$	69
4.8.	Mehrere Gleichgewichte im Optimum für $a_1 = 0,004$ und $\psi = 0,004$	69
4.9.	Eindeutiges Gleichgewicht im Optimum für $a_1 = 0,004$ und $\psi = 0,005$	70

Literaturverzeichnis

- [1] M. Common und S. Stagl. *Ecological Economics*. Cambridge University Press, 2005.
- [2] D.K. Foley. *Notes on Constrained Maximization, Lagrangians, and Firstorder Conditions*. <http://homepage.newschool.edu/foleyd/GECO6190/MaxNotes.pdf>, Online, Stand 03.11.2010.
- [3] A. Greiner. *Global warming in a basic endogenous growth Model*. Working Paper 19, CEM, 8 2003.
- [4] A. Greiner und W. Semmler. *Economic Growth and Global Warming: A Model of Multiple Equilibria and Thresholds*. *Journal of Economic Behavior and Organization*, 57(4):430-447, 2005.
- [5] M. Latif. *Klimawandel und Klimadynamik*. Eugen Ulmer Stuttgart, 2009.
- [6] W. Nordhaus. *A Question of Balance*. Yale University Press, 2008. <http://nordhaus.econ.yale.edu/DICE2007.htm>, Online, Stand 30.04.2010.
- [7] W. Nordhaus. 1 2008. <http://nordhaus.econ.yale.edu/DICE2007.htm>, Online, Stand 30.04.2010.
- [8] S. Rahmstorf und H.J. Schnellhuber. *Der Klimawandel*. C.H. Beck oHG, 2006.
- [9] A.Rezai, D.K. Foley und L. Taylor. *Global Warming and Economic Externalities*. Working Paper 3, SCEPA, 2 2009.
- [10] W. Roedel. *Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre*. Springer-Verlag, 1992.
- [11] Solomon, S., D.Qin, M. Manning, R.B. Alley, T. Berntsen, N.L. Bindoff, Z. Chen, A. Chidthaisong, J.M. Gregory, G.C. Hegerl, M. Heimann, B. Hewitson, B.J. Hoskins, F. Joos, J. Jouzel, V. Kattsov, U. Lohmann, T. Matsuno, M. Molina, N. Nicholls, J. Overpeck, G. Raga, V. Ramaswamy, J. Ren, M. Rusticucci, R. Somerville, T.F. Stocker, P. Whetton, R.A. Wood und D. Wratt. 2007: Technical Summary. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the*

Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor und H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- [12] IPCC, 2007: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor und H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.