



Thesis
zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science (B.Sc.)
im Studiengang Wirtschaftsmathematik

EINE SCHÄTZUNG DER OPTIMALEN CO₂-STEUER MIT DEM DICE-MODELL

vorgelegt von: Patrick Ngaggou Donfack
am: 30. November 2020
Erstprüfer: Prof. Dr. Matthias Ehrhardt
Zweitprüferin: Dr. Soňa Kilianová

Kurzfassung

Aus wirtschaftlicher Sicht ist der Klimawandel ein Marktversagen. Um dieses Versagen zu korrigieren, befürworten Ökonomen eine Steuer auf Treibhausgasemissionen, die als CO₂-Steuer oder soziale Kosten von Kohlenstoff (SKK) bezeichnet wird. Aufgrund der globalen Natur des Klimawandels muss die Steuer global sein und die kosteneffiziente Anforderung erfordert eine globale harmonisierte Steuer. Wir haben anhand der neuesten Version des DICE-Modells (DICE2016R) den optimalen Wert dieser internationalen und harmonisierten CO₂-Steuer unter zwei Szenarien geschätzt, und zwar: freies und 2,5 °C-Temperaturziel. Für den aktuellen Zeitraum 2020 (ein Zeitraum umfasst ein Intervall von 5 Jahren) beträgt die Steuer einerseits unter dem freien Temperaturzielszenario 36,72 \$/TCO₂ und andererseits unter dem 2,5 °C-Temperaturzielszenario 229,14 \$/TCO₂. Wir haben jedoch betont, dass die Lehren, die aus diesen Ergebnissen gezogen werden konnten, durch die strukturelle Unsicherheit, die mit der funktionalen Form der Emissionsminderungskostenfunktion verbunden ist, stark abgeschwächt wurden. Diese Ergebnisse sollten als Ausgangspunkt für Forschungsarbeiten zur Schätzung der Kohlenstoffsteuer in der Gemeinschaft der Ökonomen des Klimawandels angesehen werden.

Schlagwörter: Marktversagen, CO₂-Steuer, SKK, DICE-Modell

Abstract

From an economic point of view, climate change is a market failure. To correct this failure, economists advocate a tax on greenhouse gas emissions known as the CO₂-tax, or the Social Cost of Carbon (SCC). Due to the global nature of climate change, the tax must be global and the cost-efficient exigence requires a global harmonized tax. Using the latest version of the DICE model (DICE2016R), we have estimated the optimal value of this international and harmonized CO₂-tax under two scenarios, namely: free and 2.5 °C temperature target. For the current period 2020 (a period encompasses an interval of 5 years) the tax is on the one hand under the free temperature target scenario 36,72 \$/TCO₂ and on the other hand under the 2.5°C temperature target scenario 229,14 \$/TCO₂. However, we have emphasized that the lessons that could be drawn from these results have been severely mitigated by the structural uncertainty associated with the functional form of the costs of emissions reductions function. These results should be seen as a starting point for research into carbon tax estimates in the climate change economist community.

Key words: Market failure, CO₂-tax, SCC, DICE model

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	3
1 Die marktbasieren CO₂-Reduktionsmechanismen	7
1.1 Klimawandel als Marktversagen	7
1.1.1 Globale negative Externalität	7
1.1.2 Globales öffentliches Gut	8
1.1.3 Öffentliches Gut-Problem: Trittbrettfahrer und Gefangenendilemma	9
1.2 CO ₂ -Bepreisung	10
1.2.1 Die CO ₂ -Steuer	10
1.2.2 Die handelbaren Kohlenstoffrechte	11
1.3 Maßnahmenempfehlung: international harmonisierte und national erhobene CO ₂ -Steuer	12
2 Eine Schätzung der optimalen CO₂-Steuer mit dem DICE-Modell	17
2.1 Definition der sozialen Kosten von Kohlenstoff	18
2.2 Das DICE-Modell und die Methodologie	18
2.2.1 Beschreibung des DICE-Modells	19
2.2.2 DICE-„exogene“ Zustände	20
2.2.3 Wirtschaftsmodell	21
2.2.4 Kohlenstoffmodell	23
2.2.5 Klimamodell	23
2.2.6 Zusammenfassung der DICE-Dynamik	24
2.2.7 Wohlfahrtsmaximierung	26
2.3 Beschreibung des DICE-MATLAB-Codes (DICE-MC)	29
2.3.1 Reformulierungen des Optimalsteuerungsproblems (OSP1)	30
2.3.2 Algorithmen des DICE-MATLAB-Code DICE2013R-mc	32
2.4 Wichtige Ergebnisse der DICE2016R-Version	35
2.4.1 Das freie Temperaturzielszenario	35
2.4.2 Das feste Temperaturzielszenario	37
2.5 Über die Notwendigkeit, die Emissionsminderungskostenfunktion erneut zu untersuchen	38
2.5.1 Die Einschränkungen der Emissionsminderungskostenfunktion	39
2.5.2 Gelegenheit für weitere Forschungen: DICE-Modell mit zeitlich abhängiger Emissionsminderungskostenfunktion	43
Fazit	45

Literatur	49
Akronyme	53
Symbolverzeichnis	54
Mathematische Notation	55
Glossar	60
Anhang	61
A Alle Variablen, Anfangsbedingungen und Parameterwerte des DICE-Modells	61

Tabellenverzeichnis

2.1 Wichtige klimapolitische Variablen mit DICE2016R-Version unter zwei Szenarien.	36
A.1 Beschreibung der Variablen der DICE-Dynamik	62
A.2 Anfangsbedingungen der endogenen Variablen für DICE2013R und DICE2016R	63
A.3 Standardparameterwerte für DICE2013R und DICE2016R	63

Abbildungsverzeichnis

2.1	Blockdiagramm des DICE-Modells.	20
2.2	(a) Industrieemissionen (GtCO ₂), (b) Atmosphärische Kohlenstoffkonzentration (ppm), (c) Atmosphärischer Temperaturanstieg (°C) mit 1900 als Referenzjahr, (d) Emissionsminderungsrate (% von Output Y) und (e) Soziale Kosten von Kohlenstoff (2010USD/GtCO ₂).	35

Danksagung

Wie eine kamerunische Weisheit besagt, bindet eine Hand kein Paket. Daher möchte ich hier folgenden Personen bzw. Gemeinschaften meinen Dank aussprechen:

- Meinen Betreuern Herrn Prof. Dr. Matthias Ehrhardt und Frau Dr. Soňa Kilianová für all die richtungsweisenden Ratschläge, die sie mir gegeben haben. Insbesondere möchte ich Herrn Prof. Dr. Ehrhardt dafür danken, dass er mir dieses faszinierende Thema als Bachelorarbeit vorgeschlagen hat. Durch diese Arbeit konnten wir die im Bachelor-Studiengang in Wirtschaft und numerischer Mathematik erworbenen Kenntnisse anwenden. Ebenso haben wir die Herausforderungen des Klimawandels besser verstanden.
- Herrn Apl. Prof. Dr. Gregor Herbort und Herrn Prof. Dr. Hanno Gottschalk für ihre Unterstützung und ihr Vertrauen.
- Der evangelischen Studierendengemeinde (ESG) Wuppertal für ihre vielfältige Unterstützung sowohl in meinem Alltag als auch im akademischen Leben. Besonders hervorheben möchte ich dabei Frau Renate Bosch, welche mir stets dank ihrer freundlichen und aufmerksamen Art wertvolle Ratschläge gegeben hat.
- Meinen Freunden Moritz, Dustin und Ole für das Korrekturlesen meiner Arbeit.
- Meinem Onkel Steve Donfack und meinen Eltern Herrn und Frau Ngapgou für ihre unvergängliche Unterstützung.

Einleitung

Die United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) definiert in seinem Artikel 1 den Klimawandel als: „Änderungen des Klimas, die unmittelbar oder mittelbar menschlicher Aktivität zugeordnet sind und die Zusammensetzung der globalen Atmosphäre verändern und die zu der über vergleichbare Zeiträume beobachteten natürlichen Klimavariabilität hinzukommen“. Durch die Unterscheidung zwischen dem Klimawandel, der auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen ist und die, die atmosphärische Zusammensetzung verändern, und der Klimavariabilität, die auf natürliche Ursachen zurückzuführen ist, unterstreicht die UNFCCC die enormen Auswirkungen menschlicher Aktivitäten auf den Klimawandel.

In seinem fünften Bewertungsbericht stellte das IPCC [IPC13] fest, dass es „äußerst wahrscheinlich ist, dass mehr als die Hälfte des beobachteten Anstiegs der globalen durchschnittlichen Oberflächentemperatur“ von 1951 bis 2010 durch menschliche Aktivitäten verursacht wurde. Mit „äußerst wahrscheinlich“ meinte das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), dass die Wahrscheinlichkeit zwischen 95% und 100% beträgt, dass mehr als die Hälfte der modernen Erwärmung auf Menschen zurückzuführen ist. Darüber hinaus hat die anthropogene Erwärmung laut dem IPCC-Sonderbericht über 1,5 °C Globale Erwärmung [IPC18] bereits etwa 1 °C über dem vorindustriellen Niveau erreicht. Um das Jahrzehnt herum 2006–2015 hatte die menschliche Aktivität die Welt im Vergleich zu vorindustriellen Zeiten (1850–1900) um 0,87 °C ($\pm 0,12$ °C) erwärmt. Wenn die derzeitige Erwärmungsrate anhält, würde die Welt um 2040 eine vom Menschen verursachte globale Erwärmung von 1,5 °C und um 2100 von 3 bis 4 °C erreichen. Der gleiche Bericht unterstreicht jedoch die Tatsache, dass die Erwärmung über 2 °C ein tiefgreifendes Risiko für die menschliche Gesellschaft und die natürlichen Ökosysteme darstellt. Als Reaktion auf diese Risiken haben sich die Vertragsparteien der UNFCCC auf der Conference of the Parties (COP) 21 in Paris am 12. Dezember 2015 verpflichtet, die anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen, insbesondere CO₂, dringend zu verringern, um den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur im Vergleich zu vorindustriellen Zeiten weit unter 2 Grad Celsius zu begrenzen, während versucht wird, den Temperaturanstieg auf 1,5 °C zu begrenzen. Der IPCC-Sonderbericht 1,5 °C Globale Erwärmung [IPC18] gibt Hinweise, dass für die Erreichung des 1,5 °C-Ziels ein Netto-CO₂-Ausstoß von Null bis etwa 2050 erforderlich sein wird.

Aus wirtschaftlicher Sicht ist der Klimawandel ein Marktversagen, genauer ein negativer externer Effekt, da diejenigen, die Treibhausgase produzieren, nicht die vollen Folgen der Kosten ihres Handelns selbst tragen müssen. Mit der Festlegung eines angemessenen

Preises für Kohlenstoff durch Steuern oder Emissionsrechte (Cap-and-Trade System) trägt der Emittent die vollen sozialen Kosten¹ seiner Handlungen. Dies wird Individuen und Unternehmen dazu veranlassen, von kohlenstoffreichen Waren und Dienstleistungen abzuweichen und in kohlenstoffarmen Alternativen zu investieren, siehe STERN [Ste07]. Daher wurden die Kohlendioxidsteuer und das Cap-and-Trade System (CTS) von Ökonomen fast einstimmig als bevorzugte Instrumente angesehen, um die externen Wirkungen des Klimawandels auf kosteneffiziente Weise anzugehen, siehe KELLETT et al. [Kel18]. Die Kosteneffizienz fordert, dass die Emissionsminderungskosten aller Emissionsquellen weltweit gleich sein sollten. Obwohl sowohl die Kohlendioxidsteuer als auch das CTS kosteneffizient sind, bevorzugen wir eine international harmonisierte CO₂-Steuer und national erhoben als politisches Instrument zur Bekämpfung des Klimawandels. Da der Klimawandel ein globales Problem ist, sollten alle politischen Instrumente zwischen den souveränen Staaten ausgehandelt werden. Solche internationalen Verhandlungen werden unweigerlich mit zwei Problemen konfrontiert sein: der Dimension des Abkommens und dem Trittbrettfahrer, siehe WEITZMAN [Wei15]. Während die Dimension einer Kohlenstoffsteuer eins ist, ist die Dimension eines CTS die Anzahl der beteiligten Staaten. Die Kohlenstoffsteuer ist daher ein einfacheres Instrument für internationale Verhandlungen als ein CTS. Darüber hinaus verkörpert die Kohlenstoffsteuer eine „Gegenkraft“ gegen der Trittbrettfahrer, da die Steuer für alle Unternehmen auf der Welt gleich wäre, würde ein rationales Unternehmen versuchen, so viel wie möglich die Technologie mit den niedrigsten Emissionen einzuführen, um keinen Wettbewerbsnachteil zu erleiden.

Die schwierigste Aufgabe im CO₂-Steuerregime besteht darin, die richtige Höhe der Steuer abzuschätzen. Um die SKK zu quantifizieren, modellieren Ökonomen die Dynamik von Klima-Wirtschafts-Wechselwirkungen mithilfe von Integrated Assessment Models (IAMs), die mathematische Modelle von Phänomenen aus der Wirtschaft und der Geophysik enthalten, siehe KELLETT et al. [Kel16]. Studien zur Ökonomie des Klimawandels wurden von drei unabhängigen IAMs dominiert: Dynamic Integrated model of Climate-Economy (DICE), Policy Analysis of the Greenhouse Effect (PAGE) and Climate Framework for Uncertainty (FUND), siehe KELLETT et al. [Kel16]. Obwohl sich diese Modelle in ihren Details unterscheiden, haben sie alle vier gemeinsame Elemente: Modellierung geophysikalischer Prozesse und sozioökonomischer Prozesse und Schätzungen klimabedingter Schäden und Abzinsung künftiger Verluste, siehe KELLETT et al. [Kel18]. In seiner durchgeführten umfassenden Studie zur Notwendigkeit einer Überarbeitung der Modelle zur Schätzung der SKK hat NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE [Nat17] drei Themen ermittelt, die für künftige IAMs erforderlich sind: (i) Einbeziehung von Unsicherheiten, (ii) Modularität und (iii) Transparenz.

In diesem Zusammenhang haben wir das DICE-IAM für unsere Arbeit ausgewählt. In der Tat ist eine Open-Source-Implementierung des Modells (in der General Algebraic

1 In der Wirtschaftsliteratur wird die CO₂-Steuer auch als die sozialen Kosten von Kohlenstoff (SKK) bezeichnet. Im Zusammenhang mit Steuern verwischen wir in dieser Arbeit die Unterscheidung zwischen Kohlendioxid und Kohlenstoff, da beide linear miteinander verbunden sind, $1 \text{ TC} = 3,67 \text{ GtCO}_2$. So bezieht sich die Kohlenstoffsteuer auch auf die Kohlendioxidsteuer und umgekehrt.

Modeling System (GAMS)–Sprache, siehe NORDHAUS [Nor17b]) seit langem Online mit einem Benutzerhandbuch [Nor13] (aktualisiert in [Nor16]) verfügbar. Das DICE–Modell ist modular aufgebaut und besteht aus klar definierten Klima–, Kohlenstoff– und sozio–ökonomischen Submodellen. Die Einbeziehung von Unsicherheit in dem DICE–Modell ist Gegenstand laufender Arbeiten, siehe KELLETT et al. [Kel18]. Darüber hinaus hat KELLETT et al. [Kel16] das Modell in Matrix Laboratory (MATLAB) (einer Plattform, die häufiger als GAMS verwendet wird) neu codiert und den Code öffentlich zugänglich gemacht. Zusätzlich haben sie in KELLETT et al. [Kel19] vollständige und präzise mathematische Definitionen der Modelle geliefert.

Wir haben unsere Arbeit in zwei Kapitel unterteilt. Im ersten Kapitel geben wir einen Überblick über die Literatur zur Wirtschaft des Klimawandels. Genauer beschreiben wir die Marktversagen, die zum Klimawandel führen. Wir bieten auch einen Vergleich zwischen den beiden politischen Instrumenten zur CO₂–Bepreisung: CO₂–Steuer und handelbare CO₂–Rechte und motivieren unsere politische Empfehlung für eine international harmonisierte und national erhobene CO₂–Steuer ausführlicher. Im zweiten Kapitel geben wir eine formale Definition des Soziale Kosten von Kohlenstoff (SKK) auf der Grundlage des ersten Prinzips der Wohlfahrtsökonomie. Anschließend geben wir eine Tutorial–Beschreibung des DICE–Modells und seines Problems der optimalen Steuerung. Wir beschreiben auch in algorithmischer Form den Open–Source–DICE–MATLAB–Code von KELLETT et al. [Kel16]. Zudem schätzen wir die optimalen SKK, indem wir die DICE2016R–Version unter zwei Szenarien ausführen: dem freien und dem festen Temperaturziel. Außerdem untersuchen wir die Grenzen des DICE–Modells und seine Auswirkungen auf die Interpretation unserer Ergebnisse. Schließlich schlagen wir eine Forschungsrichtung für zukünftige Arbeiten vor.

KAPITEL 1

Die marktbasieren CO₂-Reduktionsmechanismen

Ein Marktversagen beschreibt die wirtschaftliche Situation, in der die Zuteilung von Waren und Dienstleistungen durch einen freien Markt nicht effizient ist, d.h. die Zuteilung maximiert nicht die soziale Wohlfahrt. Aus wirtschaftlicher Sicht ist der Klimawandel laut STERN [Ste07] „das größte Marktversagen, das die Welt je gesehen hat“.

Laut demselben Autor sind drei politische Elemente für eine wirksame globale Reaktion auf den Klimawandel erforderlich. Die erste ist die Bepreisung für Kohlenstoff, die durch die CO₂-Steuer oder das Cap-and-Trade System (CTS) umgesetzt wird. Die zweite ist die Politik zu der Unterstützung der Innovationen und dem Einsatz kohlenstoffarmer Technologien. Und die dritte Maßnahme besteht darin, Hindernisse für die Energieeffizienz zu beseitigen und Einzelpersonen darüber zu informieren, aufzuklären und zu überzeugen, was sie verändern können, um auf den Klimawandel zu reagieren.

Da wir den wirtschaftlichen Standpunkt betrachten, werden wir uns in dieser Arbeit auf die Bepreisung für Kohlenstoff beschränken, die auch als marktbasierendes politisches Instrument bezeichnet wird. In diesem Kapitel stellen wir in Abschnitt 1.1 die Marktversagen vor, die zum Klimawandel führen. In Abschnitt 1.2 beschreiben wir die beiden politischen Instrumente für die CO₂-Bepreisung: die CO₂-Steuer und die handelbaren CO₂-Rechte. Wir empfehlen in Abschnitt 1.3 als politisches Instrument zur Minderung des CO₂-Ausstoßes eine international harmonisierte und national erhobene Kohlenstoffsteuer.

1.1 Klimawandel als Marktversagen

In diesem Abschnitt stellen wir die wirtschaftlichen Prinzipien vor, die es ermöglichen, den Klimawandel als Marktversagen einzustufen: Externalität, öffentliches Gut und seine Folgen, das Trittbrettfahrerproblem und das Gefangenendilemma.

1.1.1 Globale negative Externalität

Externalitäten beziehen sich auf Situationen, in denen die Auswirkung der Produktion oder des Verbrauchs von Waren und Dienstleistungen anderen Kosten oder Nutzen auferlegt, die sich nicht in den Preisen widerspiegeln, die für die erbrachten Waren und Dienstleistungen berechnet werden. Wenn die Auswirkungen nachteilig sind, spricht man von einer **negativen Externalität**. Wenn es vorteilhaft ist, spricht man von einer **positiven Externalität**, siehe MANKIW [Man18].

Der vom Menschen verursachte Klimawandel ist eine negative Externalität. Diejenigen, die Treibhausgasemissionen verursachen, bewirken den Klimawandel und verursachen damit Kosten für die Welt und zukünftige Generationen. Sie sind jedoch weder direkt über Märkte noch auf andere Weise direkt mit den vollen Folgen der Kosten ihres Handelns konfrontiert STERN [Ste07].

Im Gegensatz zu anderen Umweltproblemen wie der Luftverschmutzung und ihren Kosten für die öffentliche Gesundheit, die lokale negative externe Effekte sind, ist der Klimawandel eine negative externe Wirkung, die sowohl in ihren Ursachen als auch in ihren Folgen global ist:

- Die inkrementellen Auswirkungen einer Tonne Treibhausgase (THG) auf den Klimawandel sind unabhängig davon, wo auf der Welt sie emittiert werden, da THG in die Atmosphäre diffundieren und lokale Klimaveränderungen vom globalen Klimasystem abhängen. Während verschiedene Länder unterschiedliche Mengen produzieren, ist der Grenzscha-den¹ einer zusätzlichen Einheit unabhängig davon, ob sie aus Großbritannien oder Australien stammt, siehe STERN [Ste07].
- Die Auswirkungen des Klimawandels sind anhaltend und entwickeln sich im Laufe der Zeit. In der Atmosphäre bleiben einige THG Hunderte von Jahren nachweisbar. Darüber hinaus reagiert das Klimasystem nur langsam auf einen Anstieg der atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen, und die ökologische, wirtschaftliche und soziale Reaktion auf den Klimawandel weist noch mehr Verzögerungen auf. Die Auswirkungen von THG sind jetzt zu spüren und werden sich langfristig weiter durchsetzen, siehe STERN [Ste07].

1.1.2 Globales öffentliches Gut

Die Standard-Wirtschaftstheorie unterscheidet zwei Hauptkategorien von Gütern: private Güter und öffentliche Güter. **Private Güter** sind Güter, die parzelliert und ausgeschlossen werden können, damit ihnen eindeutige Eigentumsrechte zugeordnet werden können. **Öffentliche Güter** sind dagegen Güter, die nicht ausgeschlossen werden können, d.h. die Auswirkungen der Güter (Nutzen oder Kosten) werden von allen geteilt. Wenn eine Ware nicht ausschließbar und im Konsum nicht konkurrierend ist, so dass die Verwendung der Ware durch eine Person oder die Beeinträchtigung durch eine Person die Verfügbarkeit für andere nicht beeinträchtigt, gilt die Ware als ein **reines öffentliches Gut**. Wenn ein Gut nur eines dieser Merkmale aufweist, ist es ein **unreines öffentliches Gut**, siehe KAUL [Kau13].

Es ist wichtig zu betonen, dass der Begriff „Gut“ im Zusammenhang mit öffentlichen Gütern nicht bedeutet, Waren (wie in „Waren und Dienstleistungen“) sollten auch nicht als normativ (wie in „zum Wohl der Öffentlichkeit“) interpretiert werden, selbst wenn dies der Fall ist. In diesem Sinne ist die Beseitigung eines öffentlichen Übels (z.B. einer

¹ Grenzscha-den ist der zusätzliche Schaden, der durch eine zusätzliche Emissionseinheit verursacht wird. Wir verwenden in dieser Arbeit als Emissionseinheit GtCO₂.

Krankheit) selbst ein öffentliches Gut, wobei Übel hier Kosten bedeutet, siehe MORRISSEY et al. [Mor02].

Wir können uns das „öffentliche Gut“ als etwas vorstellen (z.B. eine Organisation, eine Krankheit, ein neues Wissen oder ein Verbrechen), von dem die Auswirkungen (Nutzen oder Kosten) gemäß ihrer geografischen Größenordnung (lokal oder global) möglicherweise jeden betreffen können.

Die Eindämmung des Klimawandels ist ein rein öffentliches Gut. Diejenigen, die nicht dafür bezahlen, können nicht davon ausgeschlossen werden, die Vorteile zu nutzen, und die Freude einer Person am Klima beeinträchtigt nicht die Fähigkeit anderer, es auch zu genießen. Darüber hinaus ist die Eindämmung des Klimawandels ein globales öffentliches Gut, da ihre Auswirkungen weltweit erreichbar sind und sie können sich über eine oder mehrere Generationen erstrecken.

1.1.3 Öffentliches Gut-Problem: Trittbrettfahrer und Gefangenendilemma

Das Hauptproblem bei öffentlichen Gütern ist die Unterversorgung. Da die öffentlichen Güter nicht ausschließbar sind, haben die Menschen einen Anreiz, Trittbrett zu fahren: Wenn eine Partei die Vorteile eines öffentlichen Gutes erhält, ohne zu den Kosten beizutragen, siehe NORDHAUS [Nor15].

Ein weiterer häufig genannter Grund für die Unterversorgung ist als **Gefangenendilemma** bekannt geworden. Es kennzeichnet eine Situation, in der das unabhängige Streben nach Eigennutzen beide schlechter macht als wenn sie kooperiert hätten, siehe KAUL et al. [Kau00].

So ist Unterversorgung in den Köpfen vieler zu einem weiteren, zweiten, bestimmenden Merkmal von öffentlichen Gütern geworden, das zu einem dritten führt, nämlich, die Gleichung, dass öffentliche Güter staatlich bereitgestellt werden sollte. Da öffentliche Güter nicht nur zu einem Marktversagen, sondern, wie gezeigt, auch zu Kooperationsversagen führen, wird der Staat aufgefordert, sein Versorgungsdilemma zu lösen, siehe KAUL et al. [Kau00].

Im Falle der internationalen Klimapolitik haben die Länder einen Anreiz, sich auf die Emissionsminderungen anderer zu verlassen, ohne eine angemessene innerstaatliche Minderung vorzunehmen. Hinzu kommt zeitliches Trittbrettfahren, wenn die heutige Generation von den Verbrauchsvorteilen hoher CO₂-Emissionen profitiert, während künftige Generationen diese Emissionen bei geringerem Verbrauch oder in einer verschlechterten Umwelt bezahlen, siehe NORDHAUS [Nor15].

Darüber hinaus könnte die Eindämmung des Klimawandels als globales öffentliches Gut nicht von einem Staat allein effizient durchgeführt werden. Da die Auswirkungen von THG auf den Klimawandel unabhängig davon sind, wo sie emittiert werden, werden die Bemühungen eines Staates zur Emissionsminderung durch die Treibhausgasemissionen des Trittbrettfahrerstaates abgeschwächt.

Um diese Probleme des Markt- und Kooperationsversagens im Falle des Klimawandels zu lösen, brauchen wir daher einen anderen Rahmen als die lokalen öffentlichen Güter.

Ein solcher Rahmen wird von NORDHAUS [Nor15] gegeben: dem **Klimaclub**. Die Idee eines Klimaclubs sollte als idealisierte Lösung des Trittbrettfahrerproblems und des Gefangenendilemmas angesehen werden, das die effiziente Bereitstellung globaler öffentlicher Güter verhindert. Der Club ist eine Vereinbarung der teilnehmenden Länder, harmonisierte Emissionsminderungen vorzunehmen. Ein wesentlicher Teil des Clubmechanismus besteht darin, dass Nichtteilnehmer bestraft werden. Die hier analysierte Strafe ist ein einheitlicher Prozentsatz der Zölle auf die Einfuhr von Nichtteilnehmern in die Clubregion. Ein wichtiger Aspekt des Clubs ist, dass er eine strategische Situation schafft, in der Länder, die in ihrem eigenen Interesse handeln, aufgrund der Struktur der Anreize in den Club eintreten und ein hohes Maß an Emissionsreduzierung vornehmen.

1.2 CO₂-Bepreisung

Wie wir im vorigen Abschnitt gesehen haben, ist der Klimawandel aus wirtschaftlicher Sicht entweder ein negativ externer Effekt, der sich aus den Treibhausgasemissionen ergibt, oder ein Problem des öffentlichen Gutes aufgrund unvollständiger Eigentumsrechte. Diese beiden Perspektiven können zu unterschiedlichen politischen Vorschriften für den Klimawandel führen: CO₂-Steuern im Vergleich zu handelbaren Kohlenstoffrechten, auch als CTS bekannt, siehe STAVINS [Sta19].

Der erste Ansatz wird nach dem Ökonomen Arthur Pigou [Pig13] auch als *pigouvianische Steuern* bezeichnet, früher Verfechter ihrer Verwendung. Der zweite Ansatz bezieht sich auf Ronald Coases Arbeit [Coa60].

1.2.1 Die CO₂-Steuer

Etwa 40 Jahre vor COASE [Coa60] konzentrierte sich die Literatur auf eine einzige wirtschaftliche Antwort auf das Problem der Externalitäten: die Besteuerung der fraglichen Externalität, siehe STAVINS [Sta19]. Die Eigenschaften der Kohlenstoffsteuer können wie folgt zusammengefasst werden:

Durch die Festsetzung einer Steuer auf jede Einheit einer Verschmutzung, die dem marginalen sozialen Schaden auf der effizienten Ebene der Verschmutzungskontrolle entspricht, könnte die Regulierungsbehörde die Emittenten theoretisch dazu zwingen, die von ihnen verursachten Schäden nach dem Verursacherprinzip zu internalisieren. D.h. die Steuer gibt dem Emittenten einen Anreiz, die nicht bezahlten sozialen Kosten seiner Emissionen bei der Zusammensetzung der Waren- und Dienstleistungspreise zu berücksichtigen.

In einem solchen System emittieren umweltschädliche Aktivitäten, bis sie einen höheren monetären Vorteil als die Steuer erzielen. Mit anderen Worten, es lohnt sich für Unternehmen, die Emissionen so weit zu senken, dass ihre Emissionsminderungsgrenzkosten dem gemeinsamen Steuersatz entsprechen. Diese Eigenschaft stellt sicher, dass die Emissionsminderungsgrenzkosten über alle Emissionsquellen ausgeglichen werden und die für die Kosteneffizienz erforderlichen Bedingungen erfüllen. Grundsätzlich wird dies sowohl kurzfristig als auch langfristig Bestand haben, indem Anreize für die Verbreitung und Innovation kostengünstiger Minderungstechnologien geschaffen werden, siehe STAVINS [Sta19].

Beispiel: die Funktionsweise einer Kohlenstoffsteuer

Ein Unternehmen, das in einem Land, in dem eine Steuer von 20 €/TCO₂ erhoben wird, 10 TCO₂ ausstößt, muss für die Durchführung seiner Aktivitäten zusätzliche 200 € zahlen. Wenn dieses Unternehmen rational ist und seine Treibhausgasemissionen zu einem Preis von weniger als 20 €/TCO₂ reduzieren kann, wird es seine Emissionen reduzieren, bis seine Minderungskosten 20 €/TCO₂ erreichen. Sobald dieser Schwellenwert erreicht ist, zahlt es die Steuer von 20 €/TCO₂, bis es einen günstigeren Weg zur Reduzierung seiner Emissionen findet. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass das Gesetz eingehalten wird, während die Kosten für die Einhaltung minimiert werden. Quelle: DELBOSC et al. [Del09].

1.2.2 Die handelbaren Kohlenstoffrechte

Nach COASE [Coa60] wurde es möglich, das Umweltverschmutzungsproblem als eine Klärung schlecht definierter Eigentumsrechte zu betrachten. Nach dem Coase-Theorem könnten private Akteure, wenn handelbare Eigentumsrechte an natürlichen Ressourcen an Agenten verteilt werden, die an einer Externalität beteiligt sind, die Nutzung dieser Ressourcen durch einen Handel mit diesen Eigentumsrechten auf kostengünstige Weise zuweisen, siehe STAVINS [Sta19]. Ein interessanter und gleichzeitig problematischer Ansatz des Coase-Theorem ist, dass die anfängliche Verteilung von Rechten für die Fähigkeit des Marktes, das effiziente Ergebnis zu erzielen, keine Rolle spielt, sondern die Verteilung des wirtschaftlichen Wohlergehens bestimmt, siehe MANKIW [Man18].

Einer der Pioniere, der eine solche Marktlösung zur Bewältigung der Externalität vorschlug, war der kanadische Ökonom DALES [Dal68]. Er empfahl die Einführung eines übertragbaren Quotensystems zur Regulierung der Wasserverschmutzung in den Seen und Flüssen seines Landes. In einem solchen System muss die Regulierungsbehörde nur die zulässige Gesamtemissionsmenge (Cap) festlegen, die dieser Gesamtsumme entsprechenden Rechte verteilen und einzelnen Emissionsquellen den Handel mit den Zertifikaten ermöglichen, bis eine optimale Zuteilung erreicht wurde. Dies war der grundlegende Gedankengang hinter dem, was als „Cap-and-Trade System (CTS)“ bekannt wurde, siehe STAVINS [Sta19].

Bei einem CTS legt die Regulierungsbehörde eine Obergrenze oder Cap für ausgewählte Treibhausgasemissionsquellen fest. Basierend auf dem Cap wird die Gesamtzahl der Emissionszertifikate sowie der teilnehmenden Unternehmen und einer Verteilungsmethode¹ für die Zertifikate an diese Unternehmen festgelegt. Diese Unternehmen müssen dann bis zum Ende jedes Konformitätszeitraums über ausreichende Zertifikate verfügen, um ihre Emissionen zu decken. Wenn sie mehr Zertifikate halten als sie benötigen, kann der Überschuss verkauft

¹ Es gibt zwei grundlegende Mechanismen für die Verteilung von Zertifikaten: kostenlose Zuteilung und Versteigerung. Die kostenlose Zuteilung können entweder auf der Grundlage von historischen Emissionswerten während eines bestimmten Basiszeitraums (Grandfathering) oder auf der Grundlage von Benchmarks verteilt werden. In diesem Fall wird die Anzahl der Zertifikate durch Leistungsmessungen für eine bestimmte Produktgruppe oder einen bestimmten Sektor bestimmt. Durch die Versteigerung können Regierungen Angebote für Zertifikate einholen. Quelle: BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT (BMU) [Bun12].

werden, und entsprechend müssen mehr von anderen Systemteilnehmern gekauft werden, wenn sie mehr Emissionen hatten als sie Zertifikate halten, siehe BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT (BMU) [Bun12].

Unter diesen Bedingungen liegt es im Interesse jedes Unternehmens, eine Minderung bis zu dem Punkt durchzuführen, an dem seine Grenzminderungskosten dem marktbestimmten Preis handelbarer Zertifikate entsprechen. Somit wird die Umweltbedingung erfüllt und die Emissionsminderungsgrenzkosten werden quellenübergreifend ausgeglichen, wodurch die Kosteneffizienzbedingung erfüllt wird, siehe STAVINS [Sta19].

Beispiel: die Funktionsweise eines Cap-and-Trade System

- Cap: In diesem Beispiel müssen die vorherigen jährlichen Emissionen von 10.000 TCO₂ von Unternehmen A und B um 10% auf 9.000 TCO₂ reduziert werden. Jedem Unternehmen werden 4.500 Emissionszertifikate zugewiesen.
- Trade: Mit verbesserter Technologie reduziert Unternehmen A seine Emissionen von 5.000 auf 4.000 TCO₂. Da zur Deckung der Emissionen nur 4.000 Zertifikate benötigt werden, können die zusätzlichen Zertifikate auf dem Markt verkauft werden. Für Unternehmen B wären die Kosten für emissionsmindernde Technologien teurer als der Kauf der zusätzlichen 500 Zertifikate, die es auf dem Markt benötigt. Am Ende wird das 10%-Reduktionsziel erreicht. Quelle: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) [Bun12].

1.3 Maßnahmenempfehlung: international harmonisierte und national erhobene CO₂-Steuer

Unter sehr restriktiven Annahmen liefern eine Kohlenstoffsteuer und ein CTS identische Ergebnisse für äquivalente Emissionsminderungen. Zu diesen Annahmen gehören perfekte Voraussicht (keine Unsicherheit in Bezug auf die Zukunft), perfekter Wettbewerb auf allen Märkten, keine Interaktion mit anderen Richtlinien und universelle Abdeckung (alle Quellen für Treibhausgasemissionen). In der Praxis gelten die für die theoretische Äquivalenz erforderlichen Annahmen nicht. Daher ist es wahrscheinlich, dass sich die tatsächliche Leistung einer Kohlenstoffsteuer und eines CTS unterscheidet, siehe HAITES [Hai18].

Wie WEITZMAN [Wei15] und NORDHAUS [Nor07b] schlagen wir eine international harmonisierte und national erhobene Kohlenstoffsteuer vor, um den Klimawandel einzudämmen. Sowohl die international harmonisierte CO₂-Steuer als auch das CTS werden zu einer kosteneffizienten Emissionsreduzierung der Treibhausgasemissionen führen, indem die Minderungsgrenzkosten der Emissionen in allen Quellen der Welt ausgeglichen werden. Es gibt jedoch Eigenschaften einer uniformen Kohlenstoffsteuer, die es zu einem besseren Instrument als ein uniformes CTS machen.

Im Folgenden fassen wir einige der möglichen Vorteile einer international harmonisierten und national erhobenen Kohlenstoffsteuer in Bezug auf ein international harmonisiertes CTS zusammen.

Behandlung der Unsicherheit

Die genauen Auswirkungen des Klimawandels sind alles andere als vorhersehbar, so dass ein erhebliches Maß an Unsicherheit hinsichtlich des Grades der Umweltschaden und der Kosten des Klimaschutzes besteht. Ein wesentliches Ergebnis der Umweltökonomie ist, dass die relative Effizienz der Preis- und Mengenregulierung von der Grenzfunktion der Emissionsminderungskosten und der Umweltschaden abhängt. Laut WEITZMAN [Wei74] erweist der mengenbasierte Ansatz sich als überlegen, wenn die Grenzsadensfunktion relativ steil ist. Andernfalls ist der preisbasierte Ansatz attraktiver. Mit anderen Worten, wenn der Grenzsadens mit dem Emissionsniveau sehr schnell zunimmt, ist das CTS besser als die Steuer. Und anderfalls, wenn die Grenzkosten der Emissionsminderung mit dem Grad der Emissionsreduzierung sehr schnell ansteigen.

Mehrere neuere Studien wenden einen Weitzman-ähnlichen Rahmen auf die Klimapolitik an, siehe GOULDER et al. [Gou13]. Diese Analysen deuten darauf hin, dass eine relevante Grenzkostenfunktion der Emissionsminderung steiler ist als die relevante Grenzumweltschadensfunktion. Daher neigen sie dazu, die Kohlenstoffsteuer zu unterstützen.

Volatilität der Marktpreise für handelbare Zertifikate

Angesichts der Unsicherheit aufgrund der ungenau vorhersehbaren Auswirkungen des Klimawandels sind sowohl mengenbasierte als auch preisbasierte Kontrollen für den Zeitraum, in dem sie gelten (zwischen den Zeiten der regelmäßigen Überprüfung), von Natur aus unsicher, aber die Unsicherheit nimmt unterschiedliche Formen an. Bei CTS sind die Gesamtemissionen bekannt, aber der Preis oder die (Grenz-) Kosten sind ungewiss. Bei einer Kohlenstoffsteuer ist der Preis oder die (Grenz-) Kosten der Kohlenstoffemissionen bekannt, die Gesamtemissionen sind jedoch ungewiss, siehe WEITZMAN [Wei15].

Nach Ansicht von WEITZMAN [Wei15] wird die Volatilität der Energiepreise von der Öffentlichkeit sehr schlecht toleriert. Schwankungen der Kohlenstoffpreise, insbesondere in extremen Fällen, könnten die öffentliche Meinung beeinträchtigen und einige Zeit später (Jahrzehnte, Generationen?) die gesamte Idee eines marktorientierten Ansatzes für das Problem des Klimawandels diskreditieren. Auf der anderen Seite ist es schwer vorstellbar, dass die breite Öffentlichkeit so verärgert ist, weil die Gesamtemissionen schwanken.

Andere verzerrende Steuern ausgleichen

Verzerrende Steuern auf Einkommen und Kapital verursachen Kosten für die Wirtschaft, indem sie Anreize für Arbeit und Investitionen schaffen. Wenn eine Steuer oder eine aufsichtsrechtliche Beschränkung eingeführt wird, interagieren sie mit den bereits bestehenden verzerrenden Steuern und aufsichtsrechtlichen Beschränkungen, so dass die bestehende Ineffizienz oder der Wohlfahrtverlust zunimmt und als Teil der zusätzlichen Kosten der Klimawandelpolitik gezählt werden sollte, siehe NORDHAUS [Nor07b].

Ein wichtiges Merkmal einer Kohlenstoffsteuer ist, dass sie die Einnahmen der Regierung erhöht, die durch die Senkung der Steuersätze für verzerrende Steuern wie Einkommens- und Kapitalsteuern recycelt werden können und somit werden die sozialen Nettokosten der Gesamtpolitik gesenkt. Diese Eigenschaft ist in der Literatur als schwache Form der doppelten Dividende der Kohlenstoffsteuer bekannt, vgl. GOULDER [Gou94].

Der bekannte Fall, der vom UNFCCC als Beispiel angeführt wird, ist die einnahmenneutrale Kohlenstoffsteuer von British Columbia (kanadische Provinz). Diese Kohlenstoffsteuer wurde in 2008 eingeführt, mit einer breiten Abdeckung, wenigen Befreiungen und der Verwendung von Einnahmen für Steuergutschriften mit niedrigem Einkommen und breit angelegte Steuersenkungen. Empirische und Simulationsmodelle legen nahe, dass die Steuer die Emissionen in der Provinz um 5–15% gesenkt hat, vgl. MURRAY et al. [Mur15].

Grundsätzlich kann ein Auktionsmechanismus in einem CTS das gleiche Ergebnis erzielen, siehe GOULDER et al. [Gou13]. Die Praxis legt jedoch nahe, dass die meisten Genehmigungen im CTS zu Nullkosten an „verdiente“ Parteien vergeben oder verteilt werden, um den politischen Widerstand zu verringern. Die wichtigste Schlussfolgerung ist, dass die Verwendung von Steueransätzen anstelle von Mengenansätzen dazu beitragen wird, eine effizientere Erfassung und Wiederverwertung der Einnahmen aus den CO₂-Beschränkungen zu fördern, siehe NORDHAUS [Nor07b].

Eine Kohlenstoffsteuer ist ein einfacheres Instrument für internationale Verhandlungen

Dieser Zustand ergibt sich aus der Weitzman-Eigenschaft [Wei15] der geringen Dimensionalität der Instrumente internationaler Verhandlungen zur Lösung der externen Auswirkungen des Klimawandels. In der Tat ist die Aushandlung einer harmonisierten Kohlenstoffsteuer ein Problem einer Dimension, da das Problem auf das Niveau der Kohlenstoffsteuer reduziert wird, während der Handel mit einem harmonisierten CTS zwischen n Nationen n Dimensionen hat, aufgrund der Tatsache, dass für jedes Land eine Emissionsobergrenze (Cap) ausgehandelt werden sollte.

Die Grundidee hinter dem Kriterium der geringen Dimensionalität besteht darin, dass durch die Beschränkung der Verhandlungen auf einen hervorstechenden Punkt mehr Hoffnung besteht, mit niedrigen Transaktionskosten ein gutes Ergebnis zu erzielen. Mit anderen Worten, es ist einfacher, einen Preis für die CO₂-Steuer als n Emissionsobergrenzen für jeden Staat auszuhandeln, insbesondere wenn der Preis im Hinblick auf die Gleichheit des Grenzaufwands als „fair“ interpretiert werden kann.

„Gegenkraft“ gegen Trittbrettfahrer

Die wichtigste Eigenschaft des Instruments oder der Verhandlungsinstrumente ist eine „Gegenkraft“ gegen das enge Eigeninteresse des Trittbrettfahrers. Also, es sollen Anreize eingebaut werden, die die Externalität automatisch internalisieren, vgl. WEITZMAN [Wei15].

Diese Eigenschaft der „Gegenkraft“ ist Teil eines preisbasierten harmonisierten Systems, da rationale Unternehmen weltweit ihre Emissionen so weit reduzieren werden, solange ihre Emissionsminderungsgrenzkosten dem gemeinsamen Steuersatz entsprechen, andernfalls werden sie im Vergleich zu anderen weniger preislich wettbewerbsfähig. Es fehlt jedoch in einem mengenbasierten internationalen CTS.

In einem CTS möchten alle rationalen Einheiten aus Eigeninteresse eine möglichst große Obergrenze erhalten (unabhängig davon, ob das Cap als Zertifikate gehandelt werden kann oder nicht). Abgesehen von Altruismus gibt es auf der anderen Seite keine Gegenkraft, die die Interessengruppen dazu ermutigt, die gewünschte Emissionsobergrenze zu senken, da sie anderen einen Wettbewerbsvorteil verschaffen, vgl. WEITZMAN [Wei15].

Der Erfolg oder Misserfolg eines CTS hängt von der Fähigkeit einer Instanz ab, den Marktteilnehmern eine Obergrenze zuzuweisen. Innerhalb einer Nation weist die Regierung verbindliche Obergrenzen zu. Aber unter souveränen Nationen müssen verbindliche Obergrenzen ausgehandelt werden. Ein mengenbasiertes internationales System vom Typ Kyoto scheitert, weil niemand einen Anreiz hat, die Externalität zu verinnerlichen, und jeder den eigennützigen Anreiz hat Trittbrett zu fahren. Was bleibt, ist im Wesentlichen ein unberechenbares Muster altruistischer individueller Freiwilligenarbeit, das weit von einer sozial optimalen Lösung des Problems entfernt ist, siehe WEITZMAN [Wei15].

Wir haben in diesem Kapitel gesehen, dass der Klimawandel aus wirtschaftlicher Sicht ein Marktversagen ist, da er sowohl eine negative Externalität als auch ein Problem des öffentlichen Gutes darstellt.

Die negative Externalität ergibt sich aus der Tatsache, dass die Treibhausgasemittenten nicht mit den vollen Folgen der Kosten ihrer Handlungen belastet werden und das Problem des öffentlichen Gutes ist die Folge des Fehlens von Eigentumsrechten auf das Klima. Diese beiden Perspektiven können zu unterschiedlichen politischen Vorschriften für den Klimawandel führen: Kohlenstoffsteuern versus handelbare Kohlenstoffrechte.

Im Gegensatz zu den klassischen Beispielen von Lehrbüchern für Umweltprobleme wie saurer Regen, Luftverschmutzung oder Überfischung, die ein lokales Marktversagen darstellen, ist der Klimawandel ein globales Marktversagen. Die Emissionen haben nämlich die gleichen Auswirkungen, egal wo sie entstehen. Daher sollte jede politische Empfehlung gegen den Klimawandel zum einen eine globale Lösung sein, um ein Trittbrettfahren von Ländern zu vermeiden, und zum anderen sollte die Politik eine Verhandlungslösung anstreben, da alle Staaten als souverän gelten.

Angesichts dieser Einschränkungen haben die Ökonomen als Maßnahme eine international harmonisierte und national erhobene Kohlenstoffsteuer vorgeschlagen. Laut WEITZMAN [Wei15] gibt es zwei Hauptgründe, die es zu einem besseren Instrument als einheitliches CTS machen. Zunächst werden sowohl eine international harmonisierte Kohlenstoffsteuer als auch ein harmonisiertes CTS zu einer kosteneffizienten Emissionsreduzierung von THG führen, indem die Grenzkosten für Minderungen in allen Emissionsquellen der Welt ausgeglichen werden. Der erste Unterschied zwischen den beiden Instrumenten besteht darin, dass eine Kohlenstoffsteuer ein einfacheres Instrument für internationale Verhandlungen ist, da sie eine einzige Dimension haben, während das CTS die Dimension der Anzahl der Länder hat. Der zweite Unterschied beruht auf der Tatsache, dass eine international harmonisierte und national einbehaltene Kohlendioxidsteuer eine Gegenkraft gegen den Trittbrettfahrer implementiert.

KAPITEL 2

Eine Schätzung der optimalen CO₂-Steuer mit dem DICE-Modell

Im vorigen Kapitel haben wir festgestellt, dass die ideale Politik gegen den Klimawandel eine international harmonisierte Kohlenstoffsteuer sein sollte. Die größte Herausforderung bei der Verwendung der Kohlenstoffsteuer als Instrument zur Regulierung der Treibhausgasemissionen besteht jedoch darin, das richtige Steuerniveau festzulegen.

Die CO₂-Steuer oder die sozialen Kosten von Kohlenstoff (SKK) werden normalerweise unter Verwendung relativ komplexer dynamischer Optimierungs- oder Simulationsmodelle geschätzt, die Klimaprozesse, Wirtschaftswachstum und Rückkopplungen zwischen beiden in einem einzigen Modellierungsrahmen kombinieren, oft als „IAM“ bezeichnet. Es gibt mehrere IAMs, die von ihren Entwicklern frei zur Verfügung gestellt werden, aber sie werfen zwei Hauptprobleme auf. Einige dieser IAMs erfordern eine steile Lernkurve, um sie ausreichend gut zu verstehen, um auf praktische Probleme angewandt zu werden und ihre „Black-Box“-Natur (d.h. in vielen IAMs ist nicht klar, welche Annahmen das Modell hat), machen ihre Ergebnisse für politische Entscheidungsträger nicht vertrauenswürdig, siehe WOLVERTON et al. [Wol13].

Angesichts dieser Einschränkungen ist das in dieser Arbeit verwendete IAM DICE von NORDHAUS et al. [Nor13] das wohl einflussreichste und am weitesten untersuchte integrierte Bewertungsmodell und eines von drei IAMs, die die offizielle Bewertung der Klimapolitik in den Vereinigten Staaten informieren, siehe HAFEEZ et al. [Haf17]. Tatsächlich basiert der Erfolg des DICE-Modells auf seiner Transparenz und Zugänglichkeit und entfernt sich somit von groß angelegten „Black-Box“-Modellen, ohne jedoch die strukturellen Wechselwirkungen zwischen Klima und Wirtschaft zu verlieren, siehe VAN DEN BIJGAART et al. [van16].

Dieses Kapitel ist in fünf Abschnitte unterteilt. Abschnitt 2.1 enthält eine formale Definition der SKK auf der Grundlage des ersten Prinzips der Wohlfahrtsökonomie. Diese Definition verdeutlicht die Interpretation der SKK und identifiziert klar die theoretische Größe, die wir schätzen wollen. Abschnitt 2.2 enthält eine detaillierte Beschreibung des DICE-Modells und des zugehörigen Optimalsteuerungsproblems. Abschnitt 2.3 beschreibt in algorithmischer Form den DICE-MATLAB-Code (DICE-MC) von KELLETT et al. [Kel16]. Abschnitt 2.4 enthält die Schätzung der optimalen SKK und die Hauptergebnisse des DICE-Modells unter zwei Szenarien: freies und festes Temperaturziel. Abschnitt 2.5 stellt die Grenzen des DICE-Modells vor und schlägt einen neuen Forschungsweg für die Gemeinschaft der Ökonomen des Klimawandels vor.

2.1 Definition der sozialen Kosten von Kohlenstoff

In der Wirtschaft des Klimawandels haben wir die SKK nach dem Konzept einer Sozialwohl-fahrtsfunktion (SWF) definiert. Der SWF formalisiert die normativen Urteile, die erforderlich sind, um die Wünschbarkeit aller möglichen Zuweisungen von „Konsum“ unter den Personen, aus denen die Gesellschaft besteht, einzustufen, siehe WOLVERTON et al. [Wol13]. Der Begriff Konsum bezieht sich hier auf alle markt- und nichtmarktbezogenen Waren und Dienstleistungen, die zum Wohlbefinden der Menschen beitragen können. Aus dieser sozialen Wohlfahrtsperspektive ist der SKK laut WOLVERTON et al. [Wol13] wie folgt definiert:

„Der SKK ist die Abnahme des Gesamtverbrauchs, die den derzeitigen . . . Wert der sozialen Wohlfahrt um den gleichen Betrag verändern würde wie eine Erhöhung der Kohlenstoffemissionen um eine Einheit in einem bestimmten Jahr.“

Um diese Definition mathematisch zu präzisieren, sei $W(0)$ die soziale Wohlfahrt in der aktuellen Periode, sei $C(t)$ der Gesamtverbrauch und sei $E(t)$ die Treibhausgasemission in der Periode $t (\geq 0)$. Wir beachten, dass die soziale Wohlfahrt in der gegenwärtigen Periode $W(0)$ im Allgemeinen nicht nur von der Wohlfahrt der gegenwärtigen Generation abhängt, sondern auch von den zukünftigen Generationen. Der SKK kann bestimmt werden, indem das totale Differential des Wertes der SWF gleich Null gesetzt wird,

$$dW(0) = \frac{\partial W(0)}{\partial E(t)} dE(t) + \frac{\partial W(0)}{\partial C(t)} dC(t) = 0,$$

und Auflösen nach $\frac{dC(t)}{dE(t)}$ liefert:

$$SKK(t) \equiv \frac{dC(t)}{dE(t)} = -\frac{\frac{\partial W(0)}{\partial E(t)}}{\frac{\partial W(0)}{\partial C(t)}}. \quad (2.1)$$

Mit anderen Worten, der SKK ist die Grenzrate der Substitution in der sozialen Wohlfahrtsfunktion zwischen Treibhausgasemissionen und Gesamtverbrauch im Zeitraum t . Dies ist die Menge an Konsum in einem zukünftigen Jahr t , die ein wohlwollender Sozialplaner heute opfern würde, um die Treibhausgasemissionen im Jahr t um eine Einheit (gemäß Konvention, eine Tonne) zu reduzieren. Diese Definition der SKK hängt nicht von der spezifischen operativen Definition der sozialen Wohlfahrt ab.

2.2 Das DICE-Modell und die Methodologie

Bevor wir das DICE-Modell beschreiben, ist anzumerken, dass das DICE-Modell zwar das einflussreichste und am weitesten verbreitete IAM ist, jedoch unter unvollständigen Angaben und geringfügigen Inkonsistenzen leidet. Zuerst gibt es keine endgültige Aussage des DICE-Modells. Vielmehr gibt es zwei Hauptquellen in Form eines Benutzerhandbuchs [Nor13] (aktualisiert in [Nor16]) und des verfügbaren Codes selbst (sowohl das Handbuch als auch der Code sind unter [Nor17b] verfügbar). Zusätzliche Erklärungen und gelegentlich

Gleichungen finden sich in verschiedenen anderen Quellen, darunter [Nor14; Nor17a]. Diese Quellen stimmen jedoch nicht überein, und tatsächlich ist die Spezifikation in [Nor13] unvollständig. Darüber hinaus gibt es in [Nor13] einige geringfügige Inkonsistenzen zwischen Text und Gleichungen, siehe KELLETT et al. [Kel19].

Die neueste Version des Modells ist DICE2016R, eine überarbeitete Version des DICE2013R. Das DICE2013R ist in der Literatur weit verbreitet. Wichtig ist, dass der Wechsel von DICE2013R zu DICE2016R im Wesentlichen keine strukturellen Änderungen beinhaltet. Die Modellaktualisierung umfasst vielmehr Aktualisierungen der Anfangsbedingungen und der meisten Modellparameter, siehe KELLETT et al. [Kel19].

Wir geben in der Tabelle A.2 und Tabelle A.3 Anfangsbedingungen und Modellparameter für DICE2013R und DICE2016R an. Der DICE-MC von KELLETT et al. [Kel16] verarbeitet beide Parametersätze. Dieser Code repliziert die Funktionalität des DICE-GAMS-Code (DICE-GC) von NORDHAUS [Nor17b]. Wie oben erwähnt, unterscheidet sich die Beschreibung des Modells in dem Benutzerhandbuch [Nor13] und dem Update [Nor16] in mehreren Aspekten vom verfügbaren DICE-GC. Aus Konsistenzgründen bezieht sich unsere Beschreibung des DICE-Modells daher eher auf die Implementierung in [Kel16; Nor17b] als auf die Beschreibung in [Nor16; Nor13]. Mit anderen Worten, im Fall eines Konflikts zwischen der Beschreibung und dem Code werden wir den Code als Referenz bevorzugen.

2.2.1 Beschreibung des DICE-Modells

Das DICE-Modell betrachtet den Klimawandel im Rahmen der Wirtschaftswachstumstheorie. In einem neoklassischen Standardmodell für optimales Wachstum, das als Ramsey-Modell bekannt ist, investiert die Gesellschaft in Kapital, Bildung und Technologien und reduziert so den heutigen Konsum, um den Konsum in der Zukunft zu steigern. Das DICE-Modell erweitert diesen Ansatz, indem es das Klimasystem als „natürliches Kapital“ betrachtet. Mit anderen Worten, es betrachtet Treibhausgaskonzentrationen als negatives Naturkapital und Emissionsminderungen als Investitionen, die die Menge des Naturkapitals erhöhen (oder das negative Kapital reduzieren). Durch die Bereitstellung von Output zur Emissionsminderung reduzieren Volkswirtschaften heute den Konsum, verhindern jedoch den wirtschaftlich schädlichen Klimawandel und erhöhen damit in Zukunft die Konsummöglichkeiten. Das Modell enthält alle Elemente von der Wirtschaft über den Klimawandel bis hin zu Schäden in einer Form, die versucht, vereinfachte „Best Practices“ in jedem Bereich darzustellen, siehe [Nor17a; Nor13].

Ein Blockdiagramm des DICE-IAM ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Wir beschreiben jeden der Modellierungsblöcke in Abbildung 2.1 in den Unterabschnitten Abschnitt 2.2.2–Abschnitt 2.2.5 unten. Hier stellen wir jedoch fest, dass das Modell nichtlinear und zeitabhängig ist. Das Modell geht von zwei Steuerinputs aus: der Sparquote s und der CO₂-Emissionsminderungsquote μ . Die erste davon beschreiben wir ausführlicher in Abschnitt 2.2.3. Letzteres ist die Rate, mit der die industriellen Kohlendioxidemissionen gemindert werden.

Das Modell verwendet einen Zeitschritt von 5 Jahren, beginnend im Jahr 2015 für DICE2016R (oder 2010 für DICE2013R). Mit dem diskreten Zeitindex $i \in \mathbb{N}$ und dem

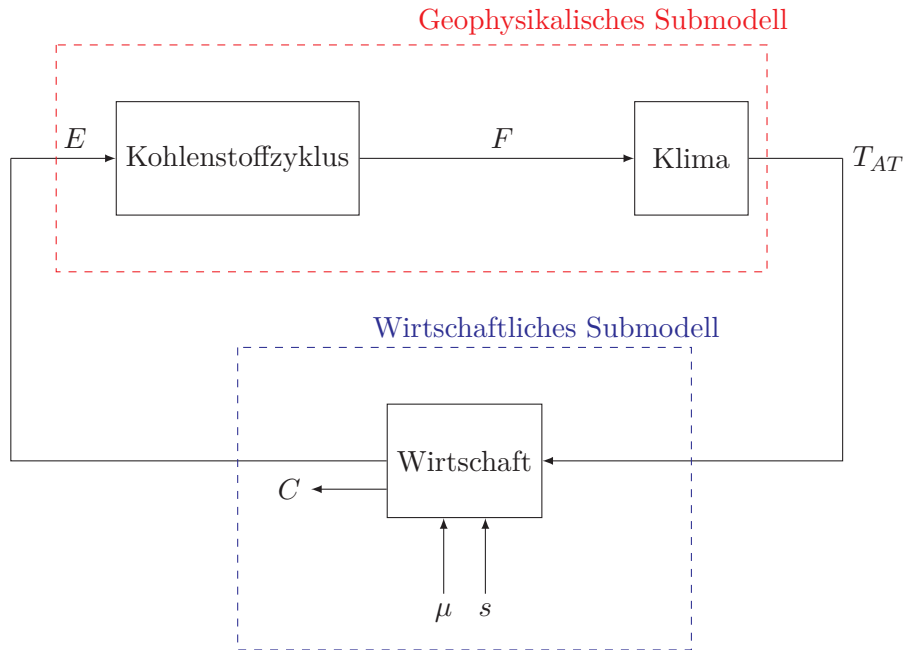


Abbildung 2.1: Blockdiagramm des DICE-Modells.
Quelle: HAFEED et al. [Haf17].

Zeitschritt $\Delta = 5$ und der Anfangszeit $t_0 = 2015$ erhalten wir:

$$t = t_0 + \Delta \cdot (i - 1), \forall i \in \mathbb{N}. \quad (2.2)$$

Und somit $t \in \{2015, 2020, 2025, \dots\}$.

2.2.2 DICE-„exogene“ Zustände

Die Zustände für die Bevölkerung L , Gesamtfaktorproduktivität A (ein Maß für den technologischen Fortschritt) und die Kohlenstoffintensität der Wirtschaftstätigkeit σ werden häufig als „exogene Variablen“ bezeichnet. Dies liegt daran, dass sie nicht von den Zuständen für Klima, kohlenstoffkreislauf oder Kapital beeinflusst werden, die häufig als „endogene Variablen“ bezeichnet werden.

Das Populationsmodell (2.3) wird als Hassell-Modell bezeichnet. Die Gesamtfaktorproduktivität (2.4) ergibt eine logistische Funktion, d.h. die Gesamtfaktorproduktivität nimmt mit abnehmender Wachstumsrate monoton zu. Die Kohlenstoffintensität der Wirtschaftstätigkeit (2.5) ähnelt der Gesamtfaktorproduktivität dahingehend, dass es sich um eine monoton abnehmende Funktion mit abnehmender Abnahmerate handelt, siehe KELLETT et al. [Kel19].

$$L(i+1) = L(i) \left(\frac{1 + L_a}{1 + L(i)} \right)^{l_g}, \quad (2.3)$$

$$A(i+1) = \frac{A(i)}{1 - g_A \exp(-\delta_A \Delta(i-1))}, \quad (2.4)$$

$$\sigma(i+1) = \sigma(i) \exp(-g_\sigma(1 - \delta_\sigma)^{\Delta(i-1)} \Delta). \quad (2.5)$$

Die verbleibenden drei exogenen Variablen sind gegeben durch

$$F_{EX}(i) = f_0 + \min \left\{ f_1 - f_0, \frac{f_1 - f_0}{t_f} (i-1) \right\}, \quad (2.6)$$

$$E_{Land}(i) = E_{LO} \cdot (1 - \delta_{EL})^{i-1}, \quad (2.7)$$

$$\theta_1(i) = \frac{p_b}{1000 \cdot \theta_2} (1 - \delta_{p_b}^{i-1}) \cdot \sigma(i). \quad (2.8)$$

Die exogenen Variable F_{EX} und E_{Land} sind Schätzungen der Wirkung anderer Treibhausgase als Kohlendioxid und der Emissionen aufgrund von Landnutzungsänderungen. Und θ_1 ist eine Schätzung der Kosten für Emissionsminderungsmaßnahmen. Hier steht p_b für den Preis einer Backstop-Technologie, mit der Kohlendioxid aus der Atmosphäre entfernt werden kann oder alle fossilen Brennstoffe ersetzt werden können. Es wird angenommen, dass die Kosten einer solchen Technologie im Laufe der Zeit sinken und proportional zur Emissionsintensität der Wirtschaftstätigkeit sind, siehe KELLETT et al. [Kel19].

Die numerischen Werte für alle Parameter sowie die Anfangswerte für alle Variablen sind in der Tabelle A.3 und in der Tabelle A.2¹ sowie im DICE-MC von KELLETT et al. [Kel16] gegeben.

2.2.3 Wirtschaftsmodell

Das Wirtschaftsmodell des DICE-Modells ist ein Standard in der Literatur zum Wirtschaftswachstum. Zusammenfassend geht das DICE-Modell von einem einzigen globalen wirtschaftlichen „Kapital“ aus. Das Kapital wird abgeschrieben und durch Investitionen aufgefüllt. Der aus dem Brutto-Output abgeleitete Netto-Output wird zwischen Konsum und Investition aufgeteilt.

Der Brutto-Output ist das Produkt aus drei Faktoren: der Gesamtfaktorproduktivität A , dem Kapital K und der Arbeit L , die von der Weltbevölkerung angenähert werden. Zusätzlich tragen Kapital und Arbeit mit verschiedenen Graden zum Brutto-Output bei,

¹ Wir haben in diesem Abschnitt und den folgenden bestimmte Parameter, die für das Verständnis des Modells nicht entscheidend sind, bewusst nicht definiert. Der interessierte Leser wird die Bedeutung dieser Parameter sowie aller anderen in Anhang A finden.

die durch eine Konstante gegeben sind, die als Kapitalelastizität γ ¹ bezeichnet wird. D.h., der Brutto-Output ist gegeben durch

$$Y(i) = A(i)K(i)^\gamma L(i)^{1-\gamma}. \quad (2.9)$$

Die Funktion in (2.9) wird als Cobb-Douglas-Produktionsfunktion mit Hicks-neutralen technologischen Fortschritt bezeichnet. Ein neutraler technologischer Fortschritt ist laut HICKS [Hic63] eine Erfindung, die die Grenzproduktivität von Arbeit und Kapital im gleichen Verhältnis erhöht.

Der Netto-Output Q ist gleich dem Brutto-Output Y , der um zwei Faktoren verringert wird²: (i) Klimaschäden Ω durch eine steigende Lufttemperatur und (ii) Kosten für Bemühungen zur Emissionminderung Λ :

$$Q(i) = (1 - \Omega(i) - \Lambda(i))Y(i) \quad (2.10)$$

Die Schadensfunktion Ω und die Emissionsminderungskostenfunktion Λ sind die Anteile der globalen Bruttoproduktion, die jedes Jahr aufgrund der Auswirkungen des Klimawandels und der Eindämmung der Treibhausgasemission verloren gehen. Sie sind durch die folgenden Funktionen dargestellt:

$$\Omega(i) = a_2 T_{AT}(i)^{a_3}, \quad (2.11)$$

$$\Lambda(i) = \theta_1(i)\mu(i)^{\theta_2}. \quad (2.12)$$

Hier ist T_{AT} der globale atmosphärische Temperaturanstieg seit der vorindustriellen Zeit (1900). Außerdem wird der Parameter a_2 so kalibriert, dass bei einem Temperaturanstieg von 3°C ein Verlust von 2% des Brutto-Outputs erzielt wird, siehe NORDHAUS [Nor16].

Der Netto-Output wird zwischen Konsum C und Investition I aufgeteilt

$$Q(i) = C(i) + I(i) \quad (2.13)$$

und die Sparquote ist definiert als

$$s(i) = \frac{I(i)}{Q(i)}. \quad (2.14)$$

Die wirtschaftliche Dynamik (2.16) ist ein Kapitalakkumulationsmodell, bei dem das

1 Die Elastizität misst die Reaktionsfähigkeit der Produktion auf eine Änderung des Arbeits- oder Kapitalniveaus in der Produktion. Wenn beispielsweise $\gamma = 0,3$ ist, würde eine Erhöhung des Kapitalverbrauchs um 1% zu einer Steigerung der Produktion um ungefähr 0,3% führen.

2 Die angegebene Form des Netto-Outputs bezieht sich eher auf die DICE-MC- und DICE-GC-Spezifikation [Kel16; Nor17b] als auf die Modellspezifikation [Nor17a; Nor13], die eine andere Form bietet.

Kapital abgeschrieben wird durch

$$\Phi_K := (1 - \delta_K)^\Delta \quad (2.15)$$

und aufgefüllt wird durch eine Investition I in Form des Produkts aus Sparquote und Netto-Output, d.h.

$$\begin{aligned} K(i+1) &= \Phi_K K(i) + \Delta \cdot I \\ &= \Phi_K K(i) + \Delta \cdot Q(i)s(i). \end{aligned} \quad (2.16)$$

2.2.4 Kohlenstoffmodell

Der Kohlenstoffkreislauf wird durch ein Drei-Reservoir-Modell des globalen Kohlenstoffkreislaufs dargestellt, wobei die drei Variablen M_{AT} , M_{UP} und M_{LO} die durchschnittliche Kohlenstoffkonzentration (in Einheiten von GtC) in der Atmosphäre, dem oberen Ozean und dem tiefen oder unteren Ozean beschreiben. Wir bezeichnen die Kohlenstoffkonzentrationsvariable mit $M := [M_{AT} \ M_{UP} \ M_{LO}]^\top \in \mathbb{R}^3$ und die Koeffizienten $\zeta_{ii} \in [0, 1]$ geben die Diffusion zwischen Reservoirs an:

$$M(i+1) = \Phi_M M(i) + B_M E(i), \quad (2.17)$$

wobei

$$\Phi_M := \begin{bmatrix} \zeta_{11} & \zeta_{12} & \zeta_{13} \\ \zeta_{21} & \zeta_{22} & \zeta_{23} \\ \zeta_{31} & \zeta_{32} & \zeta_{33} \end{bmatrix}, \quad B_M := \begin{bmatrix} \xi_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.18)$$

Die Konzentration des atmosphärischen Kohlenstoffs wird durch die CO₂-Emissionen E aufgrund der Wirtschaftstätigkeit bestimmt¹. Die unkontrollierten industriellen CO₂-Emissionen ergeben sich aus der Kohlenstoffintensität σ multipliziert mit dem Brutto-Output. Die gesamten CO₂-Emissionen E entsprechen unkontrollierten Emissionen, die um die Emissionsminderungsrate μ reduziert werden, plus exogene Landnutzungsemissionen, d.h.

$$E(i) = E_{Industrie}(i) + E_{Land}(i) \quad (2.19)$$

$$= \sigma(i) (1 - \mu(i)) A(i) K(i)^\gamma L(i)^{1-\gamma} s(i) + E_{Land}(i). \quad (2.20)$$

2.2.5 Klimamodell

Die im DICE-Modell verwendete Klima- oder Temperaturdynamik (2.31) wird aus einem zweischichtigen Energiebilanzmodell (EBM) abgeleitet, siehe HELD et al. [Hel10]. EBM schätzt die Änderungen der global gemittelten Oberflächentemperatur aus den Änderungen des Strahlungsantriebs. Zusätzlich umfasst ein zweischichtiges EBM den Wärmeaustausch

¹ Der Parameter ξ_2 dient lediglich zur Umwandlung von CO₂ in Kohlenstoff (siehe Tabelle A.3).

zwischen Atmosphäre, Landoberfläche und oberem Ozean (im Folgenden einfach als atmosphärische Schicht bezeichnet) und dem unteren Ozean. Um die Gleichungen der Klima- oder Temperaturdynamik zu erhalten, wird das zeitkontinuierliche zweischichtige EBM durch ein einfaches explizites Euler-Verfahren diskretisiert. Eine ausführliche Herleitung des Klimamodells wird in KELLETT et al. [Kel19] gegeben.

Die Beziehung zwischen Treibhausgasakkumulation und erhöhtem Strahlungsantrieb ist

$$F(i) = \eta \log_2 \left(\frac{M_{AT}(i)}{M_{AT,1750}} \right) + F_{EX}(i), \quad (2.21)$$

wobei F die Änderung des gesamten Strahlungsantriebs von Treibhausgasen aus anthropogenen Quellen wie CO₂ ist. F_{EX} ist der exogene Strahlungsantrieb aus anderen langlebigen Nicht-CO₂-Treibhausgasen wie Aerosolen, troposphärischem Ozon und anderen Faktoren, wie in (2.37) definiert. Der erste Faktor η ist der Strahlungsantrieb aufgrund atmosphärischer CO₂-Konzentration.

Sei T_{AT} die globale mittlere atmosphärische Temperaturerhöhung und T_{LO} die globale mittlere Temperaturerhöhung des unteren Ozeans. Mit $T := [T_{AT} \ T_{LO}]^\top \in \mathbb{R}^2$ führt der Strahlungsantrieb zur Erwärmung nach einem zweischichtigen EBM¹:

$$T(i+1) = \Phi_T T(i) + B_T F(i+1), \quad (2.22)$$

wobei

$$\Phi_T := \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} \\ \phi_{21} & \phi_{22} \end{bmatrix}, \quad B_T := \begin{bmatrix} \xi_1 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.23)$$

Als Nullreferenz wird hier die Temperatur im Jahr 1900 genommen.

2.2.6 Zusammenfassung der DICE-Dynamik

Nach einer detaillierten Beschreibung der DICE-Dynamik geben wir in diesem Abschnitt eine kompakte Zusammenfassung ihrer Gleichungen.

Das DICE-Modell besteht aus drei Untermodellen für Klima, kohlenstoffkreislauf und Wirtschaft. Die Klima- und Kohlenstoffmodelle werden auch unter dem geophysikalischen Modell zusammengefasst, siehe Abbildung 2.1. Die Zustandsvariablen dieser drei Submodelle sind die endogenen Variablen des Modells. Zusätzlich wird das Modell von mehreren exogenen Zustandsvariablen beeinflusst, die die endogenen Zustandsvariable miteinander verbinden, d.h. die drei Submodelle. Neben diesen zwei Arten von Variablen verfügt das Modell über Entscheidungsvariablen und Zwischenvariablen. Die Beschreibung aller

¹ Es gibt einen Unterschied zwischen der Spezifikation des Klimamodells im Benutzerhandbuch, Update [Nor16; Nor13] und GAMS-Code [Nor17b]. In [Nor16; Nor13] steht $F(i)$ an der Stelle von $F(i+1)$ in (2.22). Da unser Ziel darin besteht, die Funktionalität des GAMS-Codes [Nor17b] zu replizieren, verwenden wir dessen Spezifikation. Laut KELLETT et al. [Kel19] hat dieser Unterschied jedoch einen vernachlässigbaren quantitativen Einfluss auf die mit dem Modell erzielten numerischen Ergebnisse.

Variablen der Dynamik des DICE-Modells sind in der Tabelle A.1 zusammengefasst. Für eine kompakte Darstellung definieren wir den Parameter

$$\Phi_K := (1 - \delta_K)^\Delta,$$

die Zustandsvektoren

$$T := [T_{AT} \ T_{LO}]^\top, \quad M := [M_{AT} \ M_{UP} \ M_{LO}]^\top,$$

und die Matrizen

$$\Phi_T := \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} \\ \phi_{21} & \phi_{22} \end{bmatrix}, \quad B_T := \begin{bmatrix} \xi_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \Phi_M := \begin{bmatrix} \zeta_{11} & \zeta_{12} & \zeta_{13} \\ \zeta_{21} & \zeta_{22} & \zeta_{23} \\ \zeta_{31} & \zeta_{32} & \zeta_{33} \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad B_M := \begin{bmatrix} \xi_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Wir werden auch folgende Zwischengrößen verwenden, die gegeben sind durch

$$Y(i) = A(i)K(i)^\gamma L(i)^{1-\gamma}, \quad (2.24)$$

$$\Omega(i) = a_2 T_{AT}(i)^{a_3}, \quad (2.25)$$

$$\Lambda(i) = \theta_1(i)\mu(i)^{\theta_2}, \quad (2.26)$$

$$Q(i) = (1 - \Omega(i) - \Lambda(i))Y(i), \quad (2.27)$$

$$E_{Industrie}(i) = \sigma(i)(1 - \mu(i))Y(i). \quad (2.28)$$

Die Dynamik der endogenen Zustandsvariablen ist gegeben durch

$$K(i+1) = \Phi_K K(i) + \Delta \cdot Q(i)s(i), \quad (2.29)$$

$$M(i+1) = \Phi_M M(i) + B_M E(i), \quad (2.30)$$

$$T(i+1) = \Phi_T T(i) + B_T F(i+1). \quad (2.31)$$

Wobei die Emissionen E und der Strahlungsantrieb F gegeben sind durch:

$$E(i) = E_{Industrie}(i) + E_{Land}(i) \quad (2.32)$$

$$F(i+1) = \eta \log_2 \left(\frac{\zeta_{11} M_{AT}(i) + \zeta_{12} M_{UP}(i) + \xi_2 E(i)}{M_{AT,1750}} \right) + F_{EX}(i+1) \quad (2.33)$$

Die exogene Zustandsvariable ist gegeben durch

$$L(i+1) = L(i) \left(\frac{1 + L_a}{1 + L(i)} \right)^{l_g}, \quad (2.34)$$

$$A(i+1) = \frac{A(i)}{1 - g_A \exp(-\delta_A \Delta(i-1))}, \quad (2.35)$$

$$\sigma(i+1) = \sigma(i) \exp(-g_\sigma(1 - \delta_\sigma)^{\Delta(i-1)} \Delta), \quad (2.36)$$

$$F_{EX}(i) = f_0 + \min \left\{ f_1 - f_0, \frac{f_1 - f_0}{t_f} (i-1) \right\}, \quad (2.37)$$

$$E_{Land}(i) = E_{LO} \cdot (1 - \delta_{EL})^{i-1}, \quad (2.38)$$

$$\theta_1(i) = \frac{p_b}{1000 \cdot \theta_2} (1 - \delta_{p_b}^{i-1}) \cdot \sigma(i). \quad (2.39)$$

2.2.7 Wohlfahrtsmaximierung

Das DICE-Modell geht davon aus, dass die Wirtschafts- und Klimapolitik so gestaltet sein sollte, dass der Konsumfluss im Laufe der Zeit optimiert wird. Die mathematische Darstellung dieser Annahme ist, dass Strategien gewählt werden, um eine soziale Wohlfahrtsfunktion W zu maximieren, d.h. die abgezinste Summe des bevölkerungsgewichteten Nutzens des Pro-Kopf-Verbrauchs, siehe NORDHAUS et al. [Nor13].

Der Konsum ergibt sich aus (2.10) und (2.14) als

$$C(i) = Q(i)(1 - s(i)). \quad (2.40)$$

Der Nutzen wird wie folgt angegeben:

$$U(C(i), L(i)) = L(i) \left(\frac{\left(\frac{C(i)}{L(i)} \right)^{1-\alpha} - 1}{1-\alpha} \right), \quad (2.41)$$

wobei $\alpha > 0$ die Elastizität des Grenznutzens des Konsums genannt wird.

Das optimale Steuerungsproblem, das die soziale Wohlfahrt maximiert, ist dann gegeben durch

$$W^* = \max_{s, \mu} \Delta \cdot scale1 \cdot \sum_{i=1}^N \frac{U(C(i), L(i))}{(1 + \rho)^{\Delta(i-1)}} - scale2$$

so dass (2.29), (2.30), (2.31), (2.32) und (2.40)

$$\begin{aligned} \mu(1) &= \mu_0 \\ \mu(i) &\geq 0, & i = 2, \dots, N & \quad (\text{OSP1}) \\ \mu(i) &\leq 1, & i = 2, \dots, 29 \\ \mu(i) &\leq 1,2, & i = 30, \dots, N \\ 0 \leq s(i) &\leq 1, & i = 1, \dots, N - 10 \\ s(i) &= s^*, & i = N - 9, \dots, N. \end{aligned}$$

wobei ρ die reine Rate der sozialen Zeitpräferenz ist, d.h. der Abzinsungssatz, der die Wohlfahrtsgewichte der Nutzen verschiedener Generationen angibt und N ist die Anzahl der Zeitschritte. Die Parameter $scale1$ und $scale2$ sind Skalierungsparameter. Sie sind für die Berechnungen nicht erforderlich und stellen sicher, dass der Grenznutzen des Konsums der ersten Periode gleich 1 ist und der Barwert des Verbrauchs gleich dem Barwert des Nutzens ist, siehe NORDHAUS [Nor17b]. Die Anfangsbedingungen der Zustandsvariablen befinden sich in der Tabelle A.2. Die Konstante s^* ist die optimale Sparquote und wird berechnet als

$$s^* = \frac{\delta + 0,004}{\delta + 0,004\alpha + \rho} \gamma.$$

Da die Lagrange-Multiplikatoren oder Schattenpreise¹ der Nebenbedingungen (2.32) und (2.40) definiert sind durch:

$$\lambda_E^*(i) = \frac{\partial W^*(0)}{\partial E(i)} \quad \text{und} \quad \lambda_C^*(i) = \frac{\partial W^*(0)}{\partial C(i)}, \quad (2.42)$$

ist die SKK gegeben durch:

$$SKK(i) = -1000 \cdot \frac{\frac{\partial W^*(0)}{\partial E(i)}}{\frac{\partial W^*(0)}{\partial C(i)}} = -1000 \cdot \frac{\lambda_E^*(i)}{\lambda_C^*(i)}. \quad (2.43)$$

¹ Ein Schattenpreis für eine Nebenbedingung kann als Änderung der Zielfunktion interpretiert werden, indem diese Nebenbedingung um eine Einheit gelockert wird. Mit Schattenpreisen ist es möglich, jede Nebenbedingung mit einem Preis zu versehen. Anders ausgedrückt, handelt es sich um einen impliziten oder „planenden“ Preis, den eine Ressource erhält, wenn es keinem Marktpreis für diese Ressource gibt, siehe PERMAN [Per03].

Bemerkung 1.

- Der Faktor 1000 skaliert die SKK auf 2010USD/GtCO₂.
- In DICE-MC und DICE-GC [Kel16; Nor17b] enthält der Nenner einen additiven Faktor von 0,00001 für das DICE2016R-Modell. Dies ändert den Dollarwert der SKK erst nach etwa 2150, siehe KELLETT et al. [Kel16].

Warum den zukünftigen Nutzen diskontieren?

Laut PERMAN [Per03] weisen Einzelpersonen als Verbraucher eine positive Zeitpräferenz auf, da sie einen Anreiz in Form der Zahlung von Zinsen benötigen, um den Konsum und damit den Nutzen durch Sparen zu verschieben. Aus der Konsumenten-souveränität folgt, dass wir bei der Überlegung, wie die Gesellschaft intertemporale Entscheidungen treffen sollte, mit einer positiven Zeitpräferenzrate in Form von $\rho > 0$ arbeiten sollten.

Obwohl die Idee, den Nutzen verschiedener Generationen zu diskontieren, unter Ökonomen ein Konsens besteht, ist der Wert des Diskontsatzes oder der Zeitpräferenzrate ρ eines der umstrittensten Elemente in der Wirtschaft des Klimawandels. Grundsätzlich sind zwei Ansätze entgegengesetzt. Einerseits existiert der normative Ansatz, der besagt, dass angesichts der extrem langen Zeitskalen des Klimasystems und damit der langfristigen Auswirkungen der aktuellen Emissionen der Abzinsungssatz neutral sein sollte, um zukünftigen Generationen zu gewährleisten, dass sie in unbestimmter Zukunft mit den gegenwärtigen Generationen auf eine gleiche Weise behandelt werden. Diese Neutralität zwischen den Generationen wird durch eine Zeitpräferenzrate nahe Null dargestellt. Dieser normative Ansatz wird im Stern-Bericht ¹ [Ste07] über die Wirtschaft des Klimawandels verwendet. Andererseits gibt es den positiven Ansatz, der vorschlägt, den Abzinsungssatz so zu kalibrieren, dass sichergestellt wird, dass der Realzins im Modell nahe am durchschnittlichen Realzins und der durchschnittlichen realen Kapitalrendite, die am Markt beobachtbar ist, ist. Dieser positive Ansatz wird im DICE-Modell verwendet, siehe NORDHAUS et al. [Nor13].

Diese beiden Ansätze führen zu deutlich unterschiedlichen Ergebnissen. Strukturell sind das im Stern-Bericht verwendete Modell und das DICE-Modell identisch, sie unterscheiden sich allerdings grundlegend bei dem Wert der Zeitpräferenzrate ρ . Im DICE2007-Modell beträgt ρ 1,5% und die SKK betragen 35 \$/TC, während der Stern-Bericht die SKK mit ρ gleich 0,1% schätzt, so dass die SKK 350 \$/TC betragen. Diese Zahl ist das Zehnfache des Ergebnisses des DICE-Modells, siehe NORDHAUS [Nor07a].

¹ Der Stern-Bericht über die Wirtschaft des Klimawandels ist ein Bericht über die Auswirkungen des Klimawandels und der globalen Erwärmung auf dem Planeten, den der Ökonom Nicholas Stern für die britische Regierung verfasst hat. Er wurde am 30. Oktober 2006 veröffentlicht.

2.3 Beschreibung des DICE-MATLAB-Codes (DICE-MC)

Der DICE-MC `DICE2013R-mc`¹ von KELLETT et al. [Kel16] bietet die gleiche Grundfunktionalität wie der DICE-GAMS-Code (DICE-GC) für DICE2013R und DICE2016R, der bei [Nor17b] erhältlich ist.

Diese Implementierung von DICE2013R (DICE2016R) nutzt das Computer Algebra Systems for Algorithmic Differentiation (CasADi)-Framework zur algorithmischen Differenzierung und numerischen Optimierung (siehe, ANDERSSON et al. [And18]) in Verbindung mit MATLAB. Die Version 3.0.0 von CasADi oder eine höhere Version wird verwendet und daher ist im Allgemeinen Matlab 2014a oder eine höhere Version erforderlich. Entsprechende Binärdateien² von CasADi v.3.0.0 oder von einer höheren Version sind unter [And18] verfügbar.

DICE2013R-mc besteht aus drei Hauptdateien:

- `DICE2013R_mc.m` ist die Top-Level-Datei und ruft die beiden folgenden Dateien auf.
- `set_DICE_parameters.m` ist eine Funktion, die die Horizontlänge N als Parameter verwendet und alle anderen erforderlichen Parameter, einschließlich exogener Variablen, in der Struktur `Params` zurückgibt.
- `dice_dynamic.m` ist eine Funktion, die die dynamischen Zustände (die endogenen Variablen) von DICE2013R berechnet. Zusätzlich zu den dynamischen Zuständen werden auch der Wert der Zielfunktion und die Mengen berechnet, die für die sozialen Kosten der Kohlenstoffberechnung als Verhältnis der Grenzwerte erforderlich sind, nämlich die Emissionen und der Verbrauch.

Neben den drei oben aufgeführten Kernkomponentendateien werden zwei nützliche Dienstprogrammdateien bereitgestellt, die für die Schätzung der SKK jedoch nicht relevant sind: `plot_results.m` und `compute_auxiliary_quantities.m`, siehe KELLETT et al. [Kel16] für weitere Details.

Da `DICE2013R_mc.m`, `set_DICE_parameters.m` und `dice_dynamic.m` die relevante Dateien für die Schätzung der SKK sind und der Code bereits unter [Kel16] verfügbar ist, werden wir im nächsten Unterabschnitt die Implementierung dieser Dateien in algorithmischer Form beschreiben.

¹ Der Code bietet die Implementierung der DICE-Versionen 2013 und 2016.

² Nach dem Herunterladen einer geeigneten CasADi-Version soll man CasADi zu dem MATLAB-Pfad hinzufügen, wie unter [And18] beschrieben.

2.3.1 Reformulierungen des Optimalsteuerungsproblems (OSP1)

Um das (OSP1) zu lösen, wandeln KELLETT et al. [Kel16] es in ein gleichwertiges Optimalsteuerungsproblem (OSP) um, indem sie eine zusätzliche Zustandsvariable:

$$J(i) = \sum_{j=1}^i \frac{U(C(j), L(j))}{(1 + \rho)^{\Delta(i-j)}}, \quad (2.44)$$

eingeführen, die verwendet wird, um die Zielfunktion (soziale Wohlfahrt) zu definieren.

Mit (2.44) können wir die Wohlfahrtsdynamik wie folgt umschreiben:

$$J(i+1) = J(i) + \frac{U(C(i), L(i))}{(1 + \rho)^{\Delta(i-1)}}, \quad J(1) = 0. \quad (2.45)$$

Dann haben wir das folgende äquivalente OSP:

$$W^* = \max_{s, \mu} \Delta \cdot \text{scale1} \cdot J(N+1) - \text{scale2}$$

so dass (2.29), (2.30), (2.31), (2.32), (2.40) und (2.45)

$$\begin{aligned} \mu(1) &= \mu_0 \\ \mu(i) &\geq 0, & i = 2, \dots, N \\ \mu(i) &\leq 1, & i = 2, \dots, 29 \\ \mu(i) &\leq 1, 2, & i = 30, \dots, N \\ 0 \leq s(i) &\leq 1, & i = 1, \dots, N-10 \\ s(i) &= s^*, & i = N-9, \dots, N. \end{aligned} \quad (\text{OSP2})$$

Um den Algorithmus von `DICE2013R_mc.m`, `set_DICE_parameters.m` und `dice_dynamic.m` zu beschreiben, schreiben wir jetzt das (OSP2) in abstrakter Form um.

Wir definieren:

$$x := [K \ M \ T \ J]^\top \in \mathbb{R}^7, \quad (2.46)$$

der Vektor der endogenen Zustandsvariablen und Extrazustandsvariable,

$$u := [\mu \ s]^\top \in \mathbb{R}^2, \text{ der Vektor der Streuungsvariablen,} \quad (2.47)$$

$$v := [E \ C]^\top \in \mathbb{R}^2, \text{ der Vektor der Variablen von Interesse,} \quad (2.48)$$

$$w := [L \ A \ \sigma \ E_{Land} \ F_{EX} \ \theta_1]^\top \in \mathbb{R}^6, \quad (2.49)$$

der Vektor der exogenen Variablen,

$$x_0 := [K_0 \ M_0 \ T_0 \ J_0]^\top \in \mathbb{R}^7, \text{ der Vektor der Anfangsbedingungen,} \quad (2.50)$$

$$p \in \mathbb{R}^{(\cdot)} \text{ der Vektor, der alle Parameter des Modells beinhaltet.} \quad (2.51)$$

Bemerkung 2.

- v wird als Vektor der Variablen von Interesse bezeichnet, weil es die zur Berechnung der SKK erforderlichen Variablen enthält.
- $\mathbb{R}^{(\cdot)}$ wird als eine Konvention für die Dimension von p benutzt.

Auf diese Weise können wir die dem (OSP2) zugrunde liegende Dynamik wie folgt umschreiben¹:

$$x(i+1) = f(x(i), u(i), v(i), w(i), p), \quad x(1) = x_0, \quad i = 1, \dots, N, \quad (2.52)$$

$$v(i) = h(x(i), u(i), w(i), p), \quad i = 1, \dots, N+1, \quad (2.53)$$

wobei die Funktion $f : \mathbb{R}^7 \times \mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}^6 \times \mathbb{R}^{(\cdot)} \rightarrow \mathbb{R}^7$, $f = [f_K \ f_M \ f_T \ f_J]^\top$ gegeben ist. Die Funktionen $f_i, i \in \{K, M, T, J\}$ sind in der Reihe nach die rechtsseitigen Funktionen der Dynamik (2.29), (2.30), (2.31) und (2.32). Die Funktion $h : \mathbb{R}^7 \times \mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}^6 \times \mathbb{R}^{(\cdot)} \rightarrow \mathbb{R}^2$, $h = [h_E \ h_C]^\top$ ist gegeben. Analog sind die Funktionen $h_i, i \in \{E, C\}$ in der Reihe nach die rechtsseitigen Funktionen der Dynamik (2.19) und (2.40).

Aus diesen Umformungen erhalten wir die folgende abstrakte Formulierung des (OSP2)

$$W^* = \max_{x, u, v} \Delta \cdot scale1 \cdot x_J(N+1) - scale2$$

so dass (2.52) und (2.53)

$$\begin{aligned} \underline{x} &\leq x \leq \bar{x}, \\ \underline{u} &\leq u \leq \bar{u}, \\ \underline{v} &\leq v \leq \bar{v}, \end{aligned} \quad (OSP3)$$

wobei,

$$\begin{aligned} x_l(i) &= 0, \quad \forall (i, l) \in \{1, \dots, N+1\} \times \{K, M_{AT}, M_{UP}, M_{LO}, T_{AT}, T_{LO}\}, \\ x_J(i) &= -\infty, \quad \forall i \in \{1, \dots, N+1\}, \\ \bar{x}_l(i) &= \infty, \quad \forall (i, l) \in \{1, \dots, N+1\} \times \{K, M_{AT}, M_{UP}, M_{LO}, T_{AT}, T_{LO}, J\}, \\ v_l(i) &= -\infty, \quad \forall (i, l) \in \{1, \dots, N+1\} \times \{E, C\}, \\ \bar{v}_l(i) &= \infty, \quad \forall (i, l) \in \{1, \dots, N+1\} \times \{E, C\}. \end{aligned}$$

Für \underline{u} und \bar{u} siehe (OSP2).

¹ Die Nebenbedingung $v(N+1) = h(x(N+1), u(N+1), w(N+1), p)$ ist eine „Dummy–Nebenbedingung“, die nur zum Codierungszweck dient.

2.3.2 Algorithmen des DICE-MATLAB-Code DICE2013R-mc

Mit Hilfe des (OSP3) sind hier die Algorithmen des DICE-MC von KELLETT et al. [Kel16] angegeben.

Algorithm 1 Menge aller DICE-Parameter

Input: $parameterSet \in \{2013, 2016, 1\}$ (1 für benutzerdefinierte Parameter)

Output: $Params$ die Struktur, die die Vektoren aller exogenen Variablen w und Parameter p enthält.

```

function SETDICEPARAMETERS ( $parameterSet$ )
    % Zuweisen der Parameter der Modell-Version
     $Params.p = Parameter$  aus  $parameterSet$       % siehe Tabelle A.3 für 2013 und
                                                2016 DICE-Version

    % Zuweisen der exogenen Variablen
     $N = Params.p.N$                             % Horizontlänge

    % Initialisieren der exogenen Variablen mit rekursiver Dynamik
     $w.L(1) = L_0$ 
     $w.A(1) = A_0$ 
     $w.\sigma(1) = \sigma_0$ 
    for  $i = 1$  to  $N$  do
         $w.L(i + 1) = f_L(Params.p, i)$ 
         $w.A(i + 1) = f_A(Params.p, i)$ 
         $w.\sigma(i + 1) = f_\sigma(Params.p, i)$ 
         $w.FEX(i) = f_{EX}(Params.p, i)$ 
         $w.ELand(i) = f_{Land}(Params.p, i)$ 
         $w.\theta_1(i) = f_{\theta_1}(Params.p, i)$ 
    end for
     $w.FEX(N + 1) = f_{FEX}(Params.p, N + 1)$ 
     $w.ELand(N + 1) = f_{ELand}(Params.p, N + 1)$ 
     $w.\theta_1(N + 1) = f_{\theta_1}(Params.p, N + 1)$ 
    % Die Funktionen  $f_i, i \in \{L, A, \sigma, ELand, FEX, \theta_1\}$  sind in der Reihe nach die
    rechtsseitigen Funktionen der Dynamik (2.34), (2.35), (2.36), (2.37), (2.38) und (2.39).
     $Params.w = w$ 
end function

```

Algorithm 2 Rechtsseitige Funktionen der Zustandsdynamik (2.52) und (2.53)

Input:

- x : Vektor der endogenen und zusätzlichen Zustandsvariablen, siehe (2.46).
- u : Vektor der Streuungsvariablen, siehe (2.47)
- v : Vektor der Variablen von Interesse, der entweder leer ist oder die Variablen von Interesse enthält, siehe (2.48).
- $Params$: Output der Funktion `SetDICEParameters`
- i : Horizontzeit, $i \in \{1, \dots, N + 1\}$

Output:

- f : Rechtsseitige Funktion von x , siehe (2.52).
- h : Rechtsseitige Funktion von v , siehe (2.53).

```

function DICE_DYNAMICS( $x, u, v, Params, i$ )
   $E = h_E(x, u, Params.w(i), Params.p)$ 
   $C = h_C(x, u, Params.w(i), Params.p)$ 
  if  $v = \emptyset$  then
     $v = [E \ C]^T$ 
  end if
   $T_{NEXT} = f_T(x_T, u, v, Params.w(i), Params.p)$ 
   $M_{NEXT} = f_M(x_M, u, v, Params.w(i), Params.p)$ 
   $K_{NEXT} = f_K(x_K, u, v, Params.w(i), Params.p)$ 
   $J_{NEXT} = f_J(x_J, u, v, Params.w(i), Params.p)$ 
   $f = [T_{NEXT} \ M_{NEXT} \ K_{NEXT} \ J_{NEXT}]^T$ 
   $h = [E \ C]^T$ 
end function

```

Algorithm 3 DICE013-mc-master (Hauptdatei des DICE-MATLAB-Codes)**Input:****Output:** Löse das (OSP3) und gib den SKK aus.Wähle das $parameterSet \in \{2013, 2016, 1\}$. $Params = \text{setDICEParameters}(parameterSet)$ $N = Params.N$ % Horizontlänge $x_0 =$ Anfangsbedingung aus $parameterSet$

% Konstruiere „guess“ für Entscheidungsvariablen für das Nichtlineares Programm (NLP).

% $x_{guess}, u_{guess}, v_{guess}$ sind Vektoren von Variablenvektoren (Matrizen).% $x_{guess}, u_{guess}, v_{guess} \in \mathbb{R}^{N+1}$, aber $x_{guess}(i) \in \mathbb{R}^7, u_{guess}(i) \in \mathbb{R}^2, v_{guess}(i) \in \mathbb{R}^2$.Setze u_{guess} mit vordefinierten Werten. $x_{guess} = 0, x_{guess}(1) = x_0$ **for** $i = 1$ to N **do** $[f \ h] = \text{DICE Dynamics}(x(i), u(i), \emptyset, Params, i)$ $x_{guess}(i + 1) = f$ $v_{guess}(i) = h$ **end for** $v_{guess}(N + 1) = h$ $z_{guess} = [x_{guess}(:) \ u_{guess}(:) \ v_{guess}(:)]^\top$ % Mit $(:)$ werden die Matrizen x_{guess}, \dots vektorisiert.

% Konstruiere Grenzen für Entscheidungsvariablen von NLP

 $x_{LB} = x, x_{UB} = \bar{x}, u_{LB} = u, u_{UB} = \bar{u}, v_{LB} = v, v_{UB} = \bar{v}$ $z_{LB} = [x_{LB}(:) \ u_{LB}(:) \ v_{LB}(:)]^\top, z_{UB} = [x_{UB}(:) \ u_{UB}(:) \ v_{UB}(:)]^\top$ Deklariere x, u und v als symbolischen Vektor von Variablenvektor (Matrizen)% Wandle (OSP3) $\in \mathbb{R}^{(7+2+2) \times (N+1)}$ in (NLP) $\in \mathbb{R}^{(7+2+2) \cdot (N+1)}$ um. $F(1) = x(1) - x_0$ **for** $i = 1$ to N **do** $[f \ h] = \text{DICE Dynamics}(x(i), u(i), v, Params, i)$ $F(i) = x(i + 1) - f$ $H(i) = v(i) - h$ **end for** $H(N + 1) = v(N + 1)$

% „Dummy-Nebenbedingung“

 $z = [x(:) \ u(:) \ v(:)]^\top$ $G = [F(:) \ H(:)]^\top$

Löse das NLP

$$W^* = \max_z \Delta \cdot scale1 \cdot x_J(N + 1) - scale2 \quad (\text{NLP})$$

so dass $G(z) = 0, z_{LB} \leq z \leq z_{UB}$.**return** z^* $x^* = z^*.x, u^* = z^*.u, v^* = z^*.v$ % $x^* \in \mathbb{R}^{7 \cdot (N+1)}$ und $u^*, v^* \in \mathbb{R}^{2 \cdot (N+1)}$ $W^* = x_J^*(7 \cdot (N + 1))$ **return** λ

% Lagrange-Multiplikator

 $\lambda_E = \lambda.E, \lambda_C = \lambda.C$ $SKK = 1000 \cdot \frac{\lambda_E}{\lambda_C}$

2.4 Wichtige Ergebnisse der DICE2016R–Version

In diesem Abschnitt werden die mit der DICE2016R–Version des DICE–Modells berechneten Ergebnisse der wichtigsten Umwelt– und Klimapolitikvariablen unter dem optimalen Politik–Szenario erläutert. Wir werden zwei Unterszenarien differenzieren, nämlich das des freien und das des festen Temperaturziels. Wie in DICE–basierten Studien üblich berücksichtigen wir nur die Ergebnisse der ersten 200 Jahre, obwohl die Modelle einen Zeithorizont von insgesamt 500 Jahren abdecken.

Das optimale politische Szenario maximiert die wirtschaftliche Wohlfahrt, wobei ab 2015 alle Nationen beteiligt sind. Darüber hinaus geht es von der effizientesten Klimaschutzpolitik aus. Also entspricht das optimale Szenario einem international harmonisierten CO₂–Steuerregime mit Auswirkungen ab 2015.

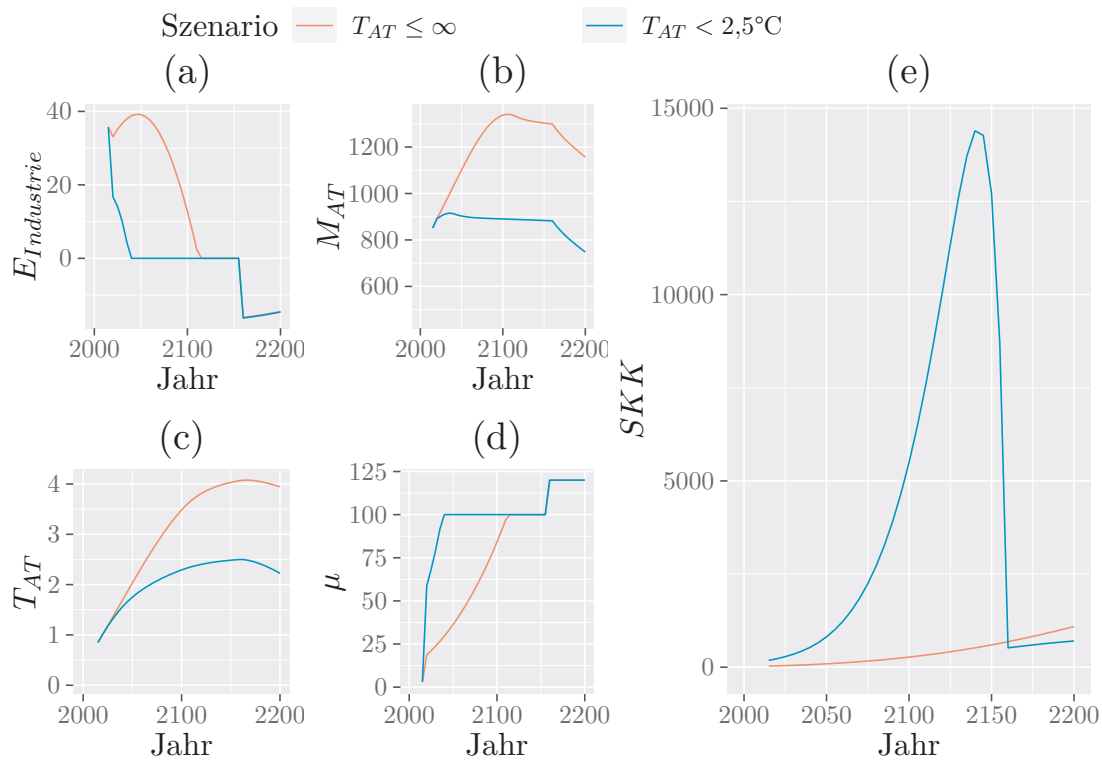


Abbildung 2.2: (a) Industrieemissionen (GtCO₂), (b) Atmosphärische Kohlenstoffkonzentration (ppm), (c) Atmosphärischer Temperaturanstieg (°C) mit 1900 als Referenzjahr, (d) Emissionsminderungsrate (% von Output Y) und (e) Soziale Kosten von Kohlenstoff (2010USD/GtCO₂).

2.4.1 Das freie Temperaturzielszenario

Die Abbildung 2.2 zeigt unsere Resultate, nämlich die Entwicklung des Treibhausgasemissionen ((a)–Rotkurve), die atmosphärische Kohlenstoffkonzentration ((b)–Rotkurve) und die damit verbundene Temperaturerhöhungskurve ((c)–Rotkurve). Nach einer Phase des Anstiegs aufgrund des Wirtschaftswachstums beginnen die Emissionen um das Jahr 2045

Tabelle 2.1: Wichtige klimapolitische Variablen mit DICE2016R-Version unter zwei Szenarien.

	Z1 ¹		Z2 ²		Z3 ³		Z4 ⁴	
	Jahr	Wert	Jahr	Wert	Jahr	Wert	Jahr	Wert
Klimapolitikvariable								
μ (% von Y)								
$T_{AT} \leq \infty$	2020	18,72			2115	100,00	2160	120,00
$T_{AT} < 2,5^\circ\text{C}$	2020	58,78			2040	100,00	2160	120,00
SKK (2010 USD/TCO ₂)								
$T_{AT} \leq \infty$	2020	36,72	2380	2798,35	2115	352,56	2160	685,18
$T_{AT} < 2,5^\circ\text{C}$	2020	229,14	2140	14393,33	2040	533,52	2160	521,24
Umweltvariable								
T_{AT} (°C)								
$T_{AT} \leq \infty$	2020	1,02	2165	4,08	2115	3,75	2160	4,07
$T_{AT} < 2,5^\circ\text{C}$	2020	1,02	2160	2,50	2040	1,56	2160	2,50
M_{AT} (ppm)								
$T_{AT} \leq \infty$	2020	891,33	2105	1341,33	2115	1333,20	2160	1299,19
$T_{AT} < 2,5^\circ\text{C}$	2020	891,33	2035	915,72	2040	913,52	2160	882,48
$E_{Industrie}$ (GtCO ₂)								
$T_{AT} \leq \infty$	2020	33,10	2045	39,22	2115	0,00	2160	-16,09
$T_{AT} < 2,5^\circ\text{C}$	2020	16,79	2015	35,74	2040	913,52	2160	-16,24

¹ Z1 repräsentiert den aktuellen Zeitpunkt oder Zeitraum von 2020. Ein Zeitraum umfasst 5 Jahre.

² Z2 ist der Zeitpunkt, an dem das Maximum der Variable erreicht wird.

³ Z3 ist der Zeitraum, in dem zum ersten Mal die Industrieemissionen Null werden oder die Emissionsminderungsrate 100% beträgt.

⁴ Z4 ist der Zeitraum, in dem erstmals Technologien mit negativen Emissionen eingesetzt werden.

herum abzunehmen, erreichen im 2115 Null und werden in 2150 negativ. Aufgrund der Trägheit der Klimasysteme steigen die atmosphärische Kohlenstoffkonzentration und die globale Temperatur bis 2105 und 2165 weiter an und beginnt danach abzunehmen. Das Maximum der atmosphärischen Temperatur wird im 2165 mit 4,08 °C erreicht.

Die Abbildung 2.2 ((d)-Rotkurve) stellt die Minderungsrate dar, die sich unter dem freien Temperaturzielszenario ergibt. Für den ersten Zeitraum (2015)¹ ist die Minderungsrate exogen festgelegt. Die erste endogen optimierte Minderungsrate tritt im Jahr 2020 mit rund 19% auf. Ab diesem Zeitpunkt steigen die Minderungsraten stetig an, bis sie im Jahr 2115 ihre vorübergehende Obergrenze von 100% erreichen. Anschließend steigen die Minderungsraten im Jahr 2160 auf 120%, da die Obergrenze durch die Annahme der

1 Ein Zeitschritt deckt immer einen Zeitraum von 5 Jahren.

Verfügbarkeit einer Technologie mit „negativen Emissionen“ gelockert wird¹. Außerdem sind alle Dollarwerte im Jahr 2010 in USD gegeben.

Die Abbildung 2.2 ((e)–Rotkurve) gibt die optimale CO₂-Steuer oder die SKK an. Der optimale Kohlenstoffpreis im Jahr 2015 wird auf 30,70 \$/TCO₂ geschätzt und steigt stetig über die betrachtete Zeitspanne von 200 Jahren hinaus an. Das Maximum wird im Jahr 2380 mit einer CO₂-Steuer von 2798,35 \$/TCO₂ erreicht.

2.4.2 Das feste Temperaturzielszenario

Die Abbildung 2.2 ((c)–Rotkurve) zeigt, dass das optimale freie Temperaturzielszenario in der zweiten Hälfte des aktuellen Jahrhunderts (2050–2100) und des nächsten Jahrhunderts (2100–2200) zu einem Temperaturanstieg in der Größenordnung von 2–3,5 °C und 3–4 °C führen könnte. Angesichts der Berichte des IPCC besteht der überwältigende wissenschaftliche Konsens jedoch darin, dass der Temperaturanstieg für die zweite Hälfte des aktuellen Jahrhunderts auf 2 °C (siehe, IPCC [IPC13]) und vorzugsweise auf 1,5 °C (siehe, IPCC [IPC18]) begrenzt werden sollte.

Unter DICE–2016R ist das Ziel eines Temperaturanstiegs um 1,5 °C jedoch überhaupt nicht erreichbar, und die Realisierbarkeit des 2 °C-Ziels würde eine wesentliche Anpassung des Modells erfordern, sodass die Technologien für „negative Emissionen“ in großem Umfang bereits kurzfristig (in der Umgebung von 2050) verfügbar sind und nicht nur ab 2160, wie in Abschnitt 2.4.1, vgl. NORDHAUS [Nor17a]. Wir folgen daher dem Ansatz von NORDHAUS [Nor16] und betrachten das weniger ehrgeizige Ziel von 2,5 °C².

Wie in MICHAELIS et al. [Mic19] betont wird, implizieren die Probleme des DICE-Modells bei der Bewältigung der Temperaturziele von 1,5 und 2 °C keineswegs, dass diese Ziele für die Klimapolitik unerreichbar sind. Wie aus den Projektionen des IPCC [IPC15] hervorgeht, gibt es mehrere Minderungspfade, die die Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre in diesem Jahrhundert auf einem Niveau von 450–500 ppm stabilisieren und so mit hoher Sicherheit garantieren, dass die Zunahme der globalen Durchschnittstemperaturerhöhung unter 2 °C gehalten wird. Darüber hinaus ist unter ausgeprägteren und schnelleren Minderungsbemühungen sogar das Ziel von 1,5 °C noch erreichbar, siehe IPCC [IPC18]. Dieser offensichtliche Widerspruch zu den Ergebnissen des DICE2016R-Modells hat hauptsächlich zwei Gründe. Erstens enthalten die groß angelegten IAMs, die für die Projektionen des IPCC verwendet werden, im Gegensatz zu DICE normalerweise eine komplexe Darstellung des Energiesektors, die eine detailliertere Analyse der Emissionsminderungsoptionen ermöglicht. Zweitens stützen sich die IPCC-Projektionen, die das 2 °C-Ziel erreichen, häufig auf den weit verbreiteten Einsatz von Technologien mit „negativen Emissionen“ bereits

-
- 1 Derzeit ist eine der vielversprechendsten Technologien in der Entwicklung die Kombination von Bioenergie mit Kohlenstoffabscheidung und -speicherung. Die verlockende Aussicht, dass solche Technologien in großem Umfang verfügbar sein werden, birgt jedoch die Gefahr, dass kurzfristige Minderungsmaßnahmen vernachlässigt werden, siehe MICHAELIS et al. [Mic19].
 - 2 Dieses Ziel scheint auch angesichts der Verpflichtungen auf nationaler Ebene zur Reduzierung der CO₂-Emissionen im Rahmen des Pariser Abkommens realistischer zu sein, siehe MICHAELIS et al. [Mic19].

in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts, siehe IPCC [IPC14]. Dies steht im Gegensatz zu den eher pessimistischen Annahmen über die Verfügbarkeit jener im DICE2016R-Modell verwendeten Technologien.

Wie in der Abbildung 2.2 (Blaukurve) gezeigt wird, führt die Maximierung der Wohlfahrt in DICE2016R unter der zusätzlichen Einschränkung $T_{AT}(i) \leq 2.5, \forall i = 1, \dots, N$ zu stark steigenden Minderungsraten, die ab 2115 ihre vorübergehende Grenze von 100% erreichen, bevor sie wieder im Jahr 2160 auf 120% ansteigen. Als Ergebnis wird im Vergleich zu dem freien Temperaturzielszenario der Temperaturanstieg verlangsamt und die verbundenen industriellen Emissionen und die atmosphärische Kohlenstoffkonzentration werden erheblich reduziert. Analog werden die SKK stark steigen. Die optimale CO₂-Steuer im Jahr 2015 wird auf 30,70 \$/TCO₂ geschätzt und steigt auf 815,83 \$/TCO₂ im Jahr 2050 und 14393,33 \$/TCO₂ im Jahr 2140, was das Maximum darstellt.

2.5 Über die Notwendigkeit, die Emissionsminderungskostenfunktion erneut zu untersuchen

Das DICE-Modell verbindet geophysikalische und sozioökonomische Dynamiken, deren Struktur und Parameter eindeutig einer Vielzahl von Unsicherheiten unterliegen. Die Quantifizierung und das Verständnis der Auswirkungen dieser Unsicherheiten auf die SKK-Schätzungen und die damit verbundenen politischen Empfehlungen sind daher für die politischen Entscheidungsträger von großer Bedeutung. Die klimawirtschaftliche Literatur unterscheidet zwischen parametrischer Unsicherheit und struktureller Unsicherheit in IAMs wie das DICE-Modell. Die Parametrische Unsicherheit ist die Unsicherheit über die Werte verschiedener Parameter innerhalb eines IAM-Moduls. Dagegen bezieht sich die strukturelle Unsicherheit auf die Unsicherheit bezüglich der funktionalen Form der Gleichungen, aus denen das IAM besteht, siehe KELLETT et al. [Kel19].

Eines der umstrittensten Elemente der Klimawirtschaft ist die funktionale Form der Emissionsminderungskostenfunktion. Wir wiederholen an dieser Stelle die Gleichung der Emissionsminderungskostenfunktion (2.12):

$$A(i) = \theta_1(i)\mu(i)^{\theta_2}. \quad (2.54)$$

Dies drückt die Emissionsminderungskosten (in % des globalen Outputs) aus, die ausschließlich von der Emissionsminderungsrate μ abhängen, die auf die Potenz θ_2 angehoben und durch die Kosten für eine kohlenstoffarme Technologie θ_1 skaliert wird, die mit der Zeit exogen abnimmt.

Wie GRUBB et al. [Gru20] hervorheben, offenbart ein Moment der Reflexion über die Gleichung (2.54) etwas Seltsames: Sie beinhaltet die Annahme einer zeitlichen Unabhängigkeit zwischen aufeinanderfolgenden Zeiträumen. Die Emissionsminderungskosten im Jahr 2050 haben zum Beispiel nichts damit zu tun, was zuvor geschehen ist.

Außerdem argumentieren GRUBB et al. [Gru20], dass diese Annahme sehr unrealistisch ist, da es Zeit, Mühe und Geld benötigt, komplexe Systeme zu ändern und vorhandenes Kapital abzuschreiben, nachzurüsten, oder zu ersetzen. Die Kosten für die Transition

hängen von der vererbten Infrastruktur, den Technologien und der Industrie ab, die in den vergangenen Jahren und Jahrzehnten aufgebaut wurden. Und der „Referenzpfad“, (die angenommene Basislinie, aus der die erforderlichen Transitionskosten berechnet werden) wird unweigerlich die Geschichte der angesammelten Vermögenswerte, Infrastrukturen, Industrien, Institutionen und tatsächlich der sozialen Normen widerspiegeln.

Diese Beobachtungen spiegeln zwei Kernkomponenten der zeitlichen Interdependenz wider: **Trägheit** und **induziertes Lernen**. Diese kombiniert mit anderen Effekten dient auch dazu, **Pfadabhängigkeit** zu erzeugen. Diese drei Konzepte sind miteinander verbunden, aber analytisch verschieden, siehe GRUBB et al. [Gru20].

2.5.1 Die Einschränkungen der Emissionsminderungskostenfunktion

Bevor wir die drei Komponenten der zeitlichen Interdependenz näher erläutern, ist es wichtig, an die Beobachtung von George Box zu erinnern, dass „alle Modelle falsch sind, aber einige nützlich“. Wie GRUBB et al. [Gru20] erwähnt, geht es daher nicht darum, ob das Fehlen eines dynamischen Realismus (zeitliche Abhängigkeit) solche Modelle falsch macht. Die Frage ist, ob die daraus abgeleiteten Erkenntnisse nützlich oder umgekehrt möglicherweise irreführend für die Bewertung der Klimapolitik sind.

Trägheit und Übergangskosten

Das DICE-Modell beinhaltet implizit die Annahme, dass die Emissionsminderungskosten um einen bestimmten Betrag zum Zeitpunkt i dargestellt werden können, ohne einen direkten Bezug zu dem zuvor Geschehenen. Und der Fortschritt, der in der Zeit i gemacht wird, hat keine Auswirkung auf die Fortschritte danach. Auf diese Weise ignoriert das DICE-Modell die Trägheit und die Übergangskosten, d.h. die Tatsache, dass Änderungen Zeit benötigen und kostspielig sein können. Die einfachste Form der Trägheit ergibt sich aus der Lebensdauer des Grundkapitals und insbesondere der Infrastruktur. Kraftwerke können einige Jahrzehnte in Betrieb gehalten werden, während Straßen, Gebäude und Stadtformen noch länger bestehen bleiben. Strom- und Schienennetze haben in der Regel 25 bis 50 Jahre für ihre Phasen des großen Wachstums gebraucht und Transportnetze, noch länger, siehe GRUBB et al. [Gru20].

DUONG et al. [Duo97] haben in ihrer Arbeit zur Modellierung der optimalen Pfade unter Trägheit und Unsicherheit bewiesen, dass eine höhere Trägheit notwendigerweise einen risikoaverseren Pfad impliziert. Darüber hinaus unterstreicht die Arbeit, dass Trägheit in Kombination mit Unsicherheit eine klare Rechtfertigung für Vorsichtsmaßnahmen ergibt, die schwächer sind, wenn keine Trägheit vorliegt. Im Gegensatz dazu würde unter dem optimalen freien Temperaturzielszenario Abbildung 2.2 ((a)-Rotkurve) eine große Menge neuen kohlenstoffintensiven Kapitals bis 2045 aufgrund des Anstiegs der Emissionen aufgebaut, was eine risikoreiche Aussicht ist.

Induziertes Lernen und Kostensenkung

Ein zweites und noch wichtigeres Thema betrifft die Innovation. Grundlegender als die Frage, welche Technologiekostenprognosen in dem Modell gemacht wurden, ist, ob Kostensenkungen als exogen angesehen werden (d.h. extern durch die Modellannahmen spezifiziert sind) oder durch die kumulativen Auswirkungen von Politik, Investitionen und Marktwachstum innerhalb des Modells hervorgerufen werden. Das DICE-Modell behandelt die Innovation als exogene Größe, siehe (2.35).

Die Idee, dass kohlenstoffarme Innovationen von den Marktbedingungen und den relativen Preisen sowie der Marktskala der kohlenstoffarmen Technologien beeinflusst werden, ist nicht nur empirisch eindeutig festgestellt worden, sondern wurde auch von vielen Studien unterstützt, siehe GRUBB et al. [Gru20].

Unzählige empirische Studien haben die ursprüngliche These von HICKS [Hic63] bestätigt, dass man erwarten würde, dass die Richtung der Innovation von den relativen Preisen beeinflusst wird. Studien in den 1980er Jahren haben bereits gezeigt, dass der Anteil der privaten Forschungen und Entwicklungen, der für Energie aufgewendet wurde, nach den Ölpreisschocks der 1970er Jahre gestiegen ist, was in zahlreichen Patentstudien widerspiegelt wird, siehe GRUBB et al. [Gru20].

Die Kosten für kohlenstoffarme Energietechnologien in IAM wie DICE mit exogenen Technologieannahmen beruhen auf Kostenprognosen, die sich innerhalb weniger Jahre sehr radikal ändern. Z.B. liegen die durchschnittlichen globalen Photovoltaikanlagekosten bereits weit unter den Prognosen für 2030, die von einer Vielzahl von Institutionen im Jahr 2011/2012 gemacht wurden und in die meisten Modelle integriert wurden, einschließlich der im IPCC-Sonderbericht über erneuerbare Energien IPCC [IPC11] überprüften, siehe GRUBB et al. [Gru20]. Dies ist auch nicht einzigartig, denn für leichte Transporte sind Elektrofahrzeuge günstiger zu fahren als mit Benzin –oder Diesel angetriebene Fahrzeuge, und da die Batteriekosten noch schneller gesunken sind als die für Photovoltaikanlagen, werden sie voraussichtlich innerhalb weniger Jahre billiger zu kaufen sein, wenn der Markt wächst, siehe GRUBB et al. [Gru20]. Derartige Beispiele gibt es viele.

Pfad-Abhängigkeit

Zu jedem Zeitpunkt spiegelt der Zustand einer Volkswirtschaft ihre frühere Entwicklung wider. Eine Wirtschaft erbt und vererbt eine bestimmte Reihe von Infrastrukturen, Technologien, Industrien, Institutionen und sozialen Normen. Eine solche Pfadabhängigkeit, das dritte Element der zeitlichen Interdependenz, steht im Zusammenhang mit dem Klima-

wandel, der eng mit Bedenken hinsichtlich des „Carbon Lock-In“¹ UNRUH [Unr02], der ineinandergreifenden Systeme und der politischen Interessen in der Wirtschaft mit fossilen Brennstoffen verbunden ist, die es schwierig machen auf erneuerbare Energien zu wechseln. Umgekehrt kann der Übergang zu effizienteren und kohlenstoffarmen Systemen ihre eigenen Wege generieren. Annahmen über die zeitliche Unabhängigkeit im DICE-Modell stimmen daher per Definition nicht mit der Pfadabhängigkeit überein, vgl. GRUBB et al. [Gru20].

Die Pfadabhängigkeit hat offensichtlich eine enge Beziehung sowohl zur induzierten Innovation als auch zur Trägheit. Die Trägheit drückt die Übergangskosten für die Abkehr von einem bestimmten Standardpfad aus. Innovation durch Skaleneffekte und Learning-by-Doing machen einen etablierten Weg tendenziell attraktiver. Dies sind jedoch nur einige der Komponenten der Pfadabhängigkeit. Wie in GRUBB et al. [Gru20] erwähnt, gibt es mindestens fünf Determinanten der Pfadabhängigkeit:

- Wissensüberlauf – eine dokumentierte Tendenz, dass Innovationen kumulativ auf früheren, verwandten Innovationen aufbauen.
- Netzwerkeffekte – Wenn die Attraktivität einer Technologie von miteinander verbundenen Netzwerken anderer Benutzer oder Lieferanten abhängt.
- Wechselkosten – Die Kosten für den Wechsel zu einem anderen Pfad, z.B. aufgrund der Notwendigkeit einer unterschiedlichen Infrastruktur und der Überwindung der bestehenden Interessen.
- Positive Rückmeldungen – wenn Technologien von Skalierbarkeit profitieren.
- Komplementaritäten – wenn Technologien komplementär zueinander sind, z.B. erneuerbare Energien und Speicher.

Die Pfadabhängigkeit beinhaltet somit sowohl die Trägheit als auch die induzierte Innovation. Es gibt jedoch mehr Pfade. Dies impliziert, dass frühere Entscheidungen einen neuen Standard (oder in wirtschaftlicher Hinsicht „Gleichgewicht“ oder „Business as usual“) schaffen und dass es viele solcher möglichen Pfade geben kann.

Die Pfadabhängigkeit fehlt jedoch in den Strukturen von DICE und den meisten anderen IAMs, die letztendlich auf der Annahme beruhen, dass es einen eindeutig bestimmten kosteneffizienten Weg für das globale Energiesystem gibt, der als Referenz dienen kann. Sowohl die Theorien als auch die empirischen Beweise legen nahe, dass dies unrealistisch ist. Trotz der Globalisierung der Energietechnologien und des Wissens bleiben Energie- und Emissionssysteme sehr unterschiedlich. So sind beispielsweise die Pro-Kopf-CO₂-Emissionen in Europa und Japan seit Jahrzehnten auf weniger als die Hälfte des Niveaus

1 Carbon Lock-In ist ein wirtschaftliches Konzept, das besagt, dass die Industrieländer durch einen Prozess der technologischen und institutionellen Koevolution, der von pfadabhängig steigenden Skalenerträgen angetrieben wird, an Energiesysteme auf der Basis fossiler Brennstoffe gebunden wurden. Diese Bedingung hat zu einem anhaltenden Markt- und Politikversagen geführt, das die Verbreitung kohlenstoffsparender Technologien trotz ihrer offensichtlichen ökologischen und wirtschaftlichen Vorteile hemmen könnte, siehe UNRUH [Unr02].

in Nordamerika geblieben, was mehr als nur die Geografie, sondern auch die Infrastruktur, Technologiesysteme und politische Entscheidungen widerspiegelt und keine Anzeichen zur Konvergenz dafür zeigt, siehe GRUBB et al. [Gru20].

Eine offensichtliche Frage ist, warum DICE und viele andere IAMs die nachweislich falsche Annahme einer zeitlichen Unabhängigkeit beinhaltet haben. Es gibt viele mögliche Antworten, aber laut GRUBB et al. [Gru20] gibt es zwei Hauptgründe: **Theorie** und **Nachvollziehbarkeit**.

Theorie

Das DICE-Modell und zugehörige Modelle werden als allgemeine Gleichgewichtsmodelle charakterisiert, da sie auf der allgemeinen Gleichgewichtstheorie basieren. Grundsätzlich geht es in der Theorie darum, das Gesamtangebot und die Gesamtnachfrage in Volkswirtschaften durch Märkte und Preise auszugleichen, wobei zeitliche Überlegungen abstrahiert werden. Zumindest in der IAM-Welt wurde dies jedoch so interpretiert, dass sie auch Gleichgewichtspfadlösungen im Laufe der Zeit impliziert, siehe GRUBB et al. [Gru20].

Darüber hinaus erlaubt das allgemeine Gleichgewichtsmodell mehrere Gleichgewichte und sagt nichts über intertemporale Trends aus. Das Wort „allgemein“ in der allgemeinen Gleichgewichtstheorie bedeutet einfach, Angebot und Nachfrage in der gesamten Wirtschaft in Einklang zu bringen. Laut GRUBB et al. [Gru20] ist die Kritik nicht, dass die allgemeine Gleichgewichtstheorie falsch ist, sondern im Gegenteil, dass sie fast alles zulässt und sicherlich keine der drei Komponenten der intertemporalen Pfadabhängigkeit ausschließt. Daher stellen DICE und andere allgemeine Gleichgewichtsmodelle, wie sie von der Gemeinschaft zur Bekämpfung des Klimawandels implementiert und verstanden werden, nur eine winzige Teilmenge der möglichen Formen des kosteneffizienten Pfades dar, die mit den Grundlagen der allgemeinen Gleichgewichtstheorie kompatibel sind.

Komplexität

Ein weiterer Grund, warum neben der Gewohnheit so vieles von der optimierenden IAM-Gemeinschaft DICE-ähnlichen Ansätzen folgt, liegt wahrscheinlich in ihrer Nachvollziehbarkeit. Relativ gesehen sind die Modelle einfach zu berechnen und verhalten sich gut. Dadurch wird ein globaler kostengünstiger optimaler Pfad für eine bestimmte Menge von Annahmen generiert, siehe GRUBB et al. [Gru20].

Dies steht im Gegensatz zu den verschiedenen Bemühungen, induzierte Innovationen aus einer Vielzahl von Forschungsanstrengungen in Modelle einzubeziehen. Es wurde eine Vielzahl endogener Wachstumsmodelle entwickelt, aber Parameter sind oft schwer abzuschätzen, obwohl Innovationen die Kosten für die Bekämpfung des Klimawandels radikal senken könnten, siehe GRUBB et al. [Gru20]. Gemeinsam mit evolutionären und stärker auf Technik basierenden Modellen, die Learning-by-Doing und Trägheit beinhalten, erzeugen diese Modelle daher tendenziell komplexeres Verhalten mit mehreren möglichen Lösungen

und manchmal kontraintuitive Ergebnisse, siehe GRUBB et al. [Gru20]. Die Ergebnisse können ziemlich uneindeutig erscheinen. Dies ist für Modellierer weniger zufriedenstellend, schwieriger zu kommunizieren und schwieriger rechnerisch zu implementieren.

2.5.2 Gelegenheit für weitere Forschungen: DICE-Modell mit zeitlich abhängiger Emissionsminderungskostenfunktion

Wir haben in Abschnitt 2.5.1 drei realistische dynamische Eigenschaften beschrieben, die eine Emissionsminderungskostenfunktion für einen Energieübergang von einer kohlenstoffreichen zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft beinhalten sollte. Wir haben gezeigt, dass das DICE-Modell eine Annahme der zeitlichen Unabhängigkeit zwischen aufeinanderfolgenden Perioden enthält, die mit der Realität unvereinbar ist. Als Konsequenz für die zukünftige Arbeit sollte die IAM-Gemeinschaft die funktionale Form der Emissionsminderungskostenfunktion so überarbeiten, dass sie diese drei Dynamikkomponenten enthält: Trägheit, Innovation und Pfadabhängigkeit. Um die Wichtigkeit dieses Vorschlags hervorzuheben, zitieren wir hier GRUBB et al. [Gru20]:

„Ein klar dynamischer Realismus ist sowohl für die Innovation als auch für die Trägheit von entscheidender Bedeutung. Wir müssen nicht nur lernen, dass unsere Kostenannahmen radikal falsch waren, sondern auch warum. Da die Zeiträume für Prognosen zum Klimawandel lang sind und die Modelle für Außenstehende oft unergründlich sind, hat es viele Jahre gedauert, bis die Technologiekostenprojektionen in früheren IAMs mit tatsächlichen Daten konfrontiert wurden, aber die Kluft zwischen früheren Annahmen und der Realität kann jetzt nicht ignoriert werden. Eine absolute Priorität muss es sein, es besser zu machen.

Der enorme Rückgang der Kosten für kohlenstoffarme Technologien in den letzten 10 Jahren im Vergleich zu den meisten Prognosen lässt einfach darauf schließen, dass der θ_1 in der Gleichung (2.54) übertrieben war. In Verbindung mit eindeutigen Belegen für die Rolle des Einsatzes bei der Umsetzung bedeutet dies natürlich auch, dass die künftigen Kosten der Minderung von kumulativen Maßnahmen abhängen. Die Implikation ist nicht so sehr, dass θ_1 in (2.54) stark übertrieben wurde, sondern dass die strukturelle Form falsch ist.“

Aus dem DICE-Modell haben wir in diesem Kapitel den optimalen Wert einer internationalen und harmonisierten Kohlenstoffsteuer, auch soziale Kosten von Kohlenstoff (SKK) genannt, sowie bestimmte Schlüsselvariablen für jede Klimapolitik unter freiem und festem Temperaturziel. Zu diesem Zweck haben wir mit einer formalen Definition der SKK begonnen, die auf dem ersten Prinzip der Wohlfahrtsökonomie basiert. Als nächstes haben wir eine Tutorial-Beschreibung des DICE-Modells und des damit verbundenen optimalen Steuerungsproblem dargestellt. Ebenso haben wir in algorithmischer Form die Open-Source-MATLAB-Implementierung von DICE-IAM aus [Kel16] beschrieben. Mit der Version DICE2016R wurden die Hauptergebnisse des Modells in der Tabelle 2.1 zusammengefasst. Unter der Annahme, dass das internationale Kohlenstoffsteuersystem ab 2015 angewendet wurde, wird die optimale Kohlenstoffsteuer ohne Temperaturbeschränkung für den aktuellen Zeitraum im Jahr 2020 auf 36,72 \$/GtCO₂ geschätzt. Da bei einer optimalen Klimapolitik mit dem 2 °C-Ziel des Paris-Abkommens mit dieser Version des DICE-Modells nicht realisierbar ist, haben wir das weniger ehrgeizige 2,5 °C-Ziel von NORDHAUS [Nor16] betrachtet. Unter diesem Ziel beträgt die Kohlenstoffsteuer für den aktuellen Zeitraum im Jahr 2020 229,14 \$/GtCO₂. Wir haben jedoch betont, dass das Modell eine zeitliche Interdependenz für die Emissionsminderungskostenfunktion aufweist, was die Aussagekraft der Ergebnissen, die aus dem Modell gezogen werden könnten, verringert.

Fazit

Die tiefgreifende und anhaltende Reduzierung der Treibhausgasemissionen, die erforderlich ist, um unter einem Temperaturanstieg von 2°C des Pariser Abkommens zu bleiben, erfordert drei Arten von politischen Ansätzen, siehe STERN [Ste07]. Das erste ist die Preisgestaltung für Kohlenstoff. Die zweite ist die Politik zur Unterstützung von Innovationen und dem Einsatz kohlenstoffarmer Technologien. Und die dritte Maßnahme besteht darin, Hindernisse für die Energieeffizienz zu beseitigen und Einzelpersonen darüber zu informieren, aufzuklären und zu überzeugen, was sie tun können, um auf den Klimawandel zu reagieren.

Da wir den wirtschaftlichen Standpunkt vertreten haben, haben wir uns bei dieser Arbeit auf die CO₂-Bepreisung beschränkt. Die CO₂-Bepreisung als Instrument zur Bekämpfung des Klimawandels leitet seine wissenschaftliche Legitimität aus der Theorie des Marktversagens ab, die zusammenfassend besagt, dass der freie Markt bei bestimmtem „Versagen“ wie externen Effekten oder öffentlichen Gütern nicht in der Lage ist, Güter und Dienstleistungen effizient zuzuweisen, d.h. die sozialen Wohlfahrt zu maximieren. In der Tat ist der Klimawandel sowohl eine negative Externalität als auch ein öffentliches Gut. Die negative Externalität ergibt sich aus der Tatsache, dass die Treibhausgasemissionen nicht mit den vollen Folgen der Kosten ihrer Handlungen belastet werden und das Problem des öffentlichen Gutes ist die Folge des Fehlens von Eigentumsrechten auf das Klima.

Durch die Preisfestsetzung für Kohlenstoff schafft die Gesellschaft Anreize für den Übergang von einer kohlenstoffreichen zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft. Darüber hinaus erfordert der Klimawandel aufgrund seiner globalen Natur eine globale CO₂-Bepreisung, um eine kosteneffiziente Emissionsminderung zu gewährleisten. Für die globale CO₂-Preisgestaltung werden von Ökonomen zwei Arten von Instrumenten bevorzugt: CO₂-Steuer und handelbare Kohlenstoffrechte (Cap-and-Trade System).

Theoretisch sind diese beiden Instrumente gleichwertig. Wir haben jedoch eine internationale harmonisierte CO₂-Steuer, die national erhoben wird, bevorzugt. Wie wir bereits unterstrichen haben, muss jede Maßnahme gegen den Klimawandel global sein und eine solche globale Lösung muss zwischen allen Staaten der Welt ausgehandelt werden, da alle Staaten als souverän gelten. Aus dieser Perspektive ist eine Kohlenstoffsteuer ein einfacheres Verhandlungsinstrument als handelbare Kohlenstoffrechte, weil sie eine einzige Dimension haben, während das Cap-and-Trade System die Dimension der Anzahl der Länder hat.

Im Regime einer internationalen Kohlenstoffsteuer besteht die größte Herausforderung darin, die richtige Höhe der Kohlenstoffsteuer zu schätzen, die auch als soziale Kosten von

Kohlenstoff (SKK) bezeichnet wird. Um die SKK zu quantifizieren, haben wir das DICE-IAM verwendet, das mathematische Modelle von Phänomenen aus der Wirtschaft und der Geophysik enthält. Der Vorteil von DICE-IAM gegenüber seinen Wettbewerbern besteht darin, dass es zugänglich und transparent ist und es den politischen Entscheidungsträgern und allen Beteiligten ermöglicht, ein gemeinsames Verständnis der Preisgestaltung zu erlangen.

Unter der Annahme, dass das internationale Kohlenstoffsteuersystem ab 2015 angewandt wurde, haben wir mit der Version DICE2016R die optimale Kohlenstoffsteuer unter freiem und festem Temperaturziel geschätzt. Die optimale Kohlenstoffsteuer wird ohne Temperaturbeschränkung für den aktuellen Zeitraum im Jahr 2020 auf 36,72 \$/GtCO₂ geschätzt. Da bei einer optimalen Klimapolitik das 2 °C-Ziel des Paris-Abkommens mit dieser Version des DICE-Modells nicht realisierbar ist, haben wir das weniger ehrgeizige 2,5 °C-Ziel von NORDHAUS [Nor16] betrachtet. Unter diesem Ziel beträgt die Kohlenstoffsteuer für den aktuellen Zeitraum im Jahr 2020 229,14 \$/GtCO₂.

Bei der Interpretation dieser Ergebnisse müssen wir uns jedoch einer grundlegenden Einschränkung des DICE-Modells bewusst sein, die die Erkenntnisse, die aus diesen Ergebnissen gezogen werden könnten, eindeutig in Frage stellt. Diese Grenze bezieht sich auf die Spezifikation der Emissionsminderungskostenfunktion, die eine zeitliche Interdependenz voraussetzt, d.h. die Kosten für die Emissionsminderung über einen bestimmten Zeitraum werden von den früheren Emissionsminderungen nicht beeinflusst. Darüber hinaus beinhaltet diese Emissionsminderungskostenfunktion einerseits keine Trägheits- und Transaktionskosten, d.h. die Tatsache, dass Änderungen Zeit benötigen und kostspielig sein können, und andererseits Innovationen, die zu einer Reduzierung der Kosten emissionsarmer Technologien führen.

Ferner hat die Innovation eine exogene Dynamik für das Modell, d. h. sie wird nicht durch die kumulativen Auswirkungen von Richtlinien, Investitionen und Marktwachstum innerhalb des Modells induziert. Seit HICKS [Hic63] wissen wir jedoch, dass die Richtung der Innovation durch relative Preise beeinflusst werden kann. Ebenso unrealistisch ist die Tatsache, dass die Kostendynamik emissionsarmer Technologien exogen ist und ausschließlich auf Kostenprognosen beruht, da sie sich innerhalb weniger Jahre so drastisch ändert. Die Konsequenz dieses Mangels an dynamischem Realismus in DICE-IAM wird durch die folgende Analyse von GRUBB et al. [Gru20] verdeutlicht: „Das neueste DICE2016R-Version in seinen Standard-Basisannahmen führt zu einem optimalen Szenario¹ für einen Anstieg der globalen Temperatur auf 4 °C vor sinkenden Emissionen (was auf die Kombination steigender Klimaauswirkungen, exogen sinkender Minderungskosten und exogen angenommener Einschränkungen auf fossile Brennstoffe zurückzuführen ist) speist sich durch, was dazu führt, dass die globalen Temperaturen gesenkt werden. Abgesehen von den Annahmen über Klimaschäden wird jedoch im Wesentlichen alles von den Kosten der Energietechnologie bestimmt, die der Modellierer nicht nur über Jahrzehnte sondern über Jahrhunderte hinweg prognostiziert.“

1 Das entspricht dem freien Temperaturzielszenario unserer Arbeit.

Schließlich weisen diese Grenzwerte eindeutig auf einen der wichtigsten Forschungswege hin, denen die IAM-Gemeinschaft folgen sollte, um die Schätzung der Kohlenstoffsteuer zu verbessern. Mit anderen Worten, zukünftige Forschungsbemühungen sollten auf der Neuformulierung der Emissionsminderungskostenfunktion bestehen, indem die drei Dimensionen der zeitlichen Abhängigkeit einer kohlenstoffreichen Wirtschaft berücksichtigt werden: Trägheit, Innovation und Pfadabhängigkeit.

Literatur

- [And18] ANDERSSON, JOEL A. E., JORIS GILLIS, GREG HORN, JAMES B. RAWLINGS und MORITZ DIEHL: „CasADi – A software framework for nonlinear optimization and optimal control“. *Mathematical Programming Computation* (2018) (siehe S. 29).
- [Bun12] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT (BMU): „Emissions Trading: Basic Principles and Experiences in Europe and Germany“. (2012) (siehe S. 11, 12).
- [Coa60] COASE, RONALD: „The Problem of Social Cost“. *Journal of Law and Economics* (Okt. 1960) 3: S. 1–44 (siehe S. 10, 11).
- [Dal68] DALES, J. H.: „Land, Water, Ownership“. *Canadian Journal of Economics* (1968) 1: S. 791–804 (siehe S. 11).
- [Del09] DELBOSC, ANAÏS und CHRISTIAN DE PERTHUIS: „Les marchés du carbone expliqués“. (Juli 2009) (siehe S. 11).
- [Duo97] DUONG, MING HA, MICHAEL GRUBB und JEAN-CHARLES HOURCADE: „Influence of socioeconomic inertia and uncertainty on optimal CO₂-emission abatement“. *Nature* (Feb. 1997) 390 (siehe S. 39).
- [Gou94] GOULDER, LAWRENCE H.: *Environmental Taxation and the „Double Dividend“: A Reader’s Guide*. Working Paper 4896. National Bureau of Economic Research, Okt. 1994 (siehe S. 14).
- [Gou13] GOULDER, LAWRENCE H. und ANDREW SCHEIN: *Carbon Taxes vs. Cap and Trade: A Critical Review*. Working Paper 19338. National Bureau of Economic Research, Aug. 2013 (siehe S. 13, 14).
- [Gru20] GRUBB, MICHAEL und CLAUDIA WIENERS: „Modeling Myths: On the Need for Dynamic Realism in DICE and other Equilibrium Models of Global Climate Mitigation“. *Institute for New Economic Thinking Working Paper Series* (Feb. 2020): S. 1–29 (siehe S. 38–43, 46).
- [Haf17] HAFEEZ, SALMAN, STEVEN R. WELLER und CHRISTOPHER M. KELLETT: „Impact of Climate Model Parametric Uncertainty in an MPC Implementation of the DICE Integrated Assessment Model“. *IFAC-PapersOnLine* (2017) 50.1. 20th IFAC World Congress: S. 959–965 (siehe S. 17, 20).
- [Hai18] HAITES, ERIK: „Carbon taxes and greenhouse gas emissions trading systems: what have we learned?“ *Climate Policy* (Juli 2018) 18.8: S. 955–966 (siehe S. 12).

- [Hel10] HELD, ISAAC, MICHAEL WINTON, KEN TAKAHASHI, THOMAS DELWORTH und FANRONG ZENG: „Probing the Fast and Slow Components of Global Warming by Returning Abruptly to Preindustrial Forcing“. *Journal of Climate* (Mai 2010) 23: S. 2418–2427 (siehe S. 23).
- [Hic63] HICKS, JOHN: *The Theory of Wages*. Springer-Verlag, 1963 (siehe S. 22, 40, 46).
- [IPC13] IPCC: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom und New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013: S. 1535 (siehe S. 3, 37, 56).
- [IPC14] IPCC: *Climate Change 2014 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Part A: Global and Sectoral Aspects: Working Group II Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report*. Bd. 1. Cambridge University Press, 2014 (siehe S. 38).
- [IPC15] IPCC: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report*. Cambridge University Press, 2015 (siehe S. 37).
- [IPC18] IPCC: *Global Warming of 1.5 °. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. 2018 (siehe S. 3, 37).
- [IPC11] IPCC: *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. CAMBRIDGE, 1. Nov. 2011. 1076 S. (siehe S. 40).
- [Kau13] KAUL, INGE: *Global public goods a concept for framing the Post-2015 Agenda*. Bonn: DIE, 2013 (siehe S. 8).
- [Kau00] KAUL, INGE, ISABELLE GRUNBERG, MARC STERN und UNDP: „Global Public Goods: International Cooperation in the 21st Century“. [http://lst-iiiep.unesco.org/cgi-bin/wwwi32.exe/\[in=epidoc1.in\]/?t2000=010247/\(100\)](http://lst-iiiep.unesco.org/cgi-bin/wwwi32.exe/[in=epidoc1.in]/?t2000=010247/(100)) (Nov. 2000) 27 (siehe S. 9).
- [Kel18] KELLETT, CHRISTOPHER M., ELENA AYDOS, SVEN RUDOLPH und STEVEN R. WELLER: „The social cost of carbon dioxide: Policy and methods for pricing greenhouse gas emissions. In Our Changing World in the South Pacific: Australasian and German Perspectives.“ (2018) (siehe S. 4, 5).
- [Kel16] KELLETT, CHRISTOPHER M., TIMM FAULWASSER und STEVEN R. WELLER: „DICE2013R-mc: A Matlab / CasADi Implementation of Vanilla DICE 2013R“. (11. Aug. 2016) (siehe S. 4, 5, 17, 19, 21, 22, 28–30, 32, 44, 62–64).
- [Kel19] KELLETT, CHRISTOPHER M., STEVEN R. WELLER, TIMM FAULWASSER, LARS GRÜNE und WILLI SEMMLER: *Feedback, Dynamics, and Optimal Control in Climate Economics*. 2019 (siehe S. 5, 19–21, 24, 38).

-
- [Man18] MANKIW, N.: *Principles of economics*. Boston, MA, USA: Cengage Learning, 2018 (siehe S. 7, 11).
- [Mic19] MICHAELIS, PETER und HEIKO WIRTHS: *DICE-RD: An Implementation of Rate-Related Damages in the DICE model*. Discussion Paper Series 337. Universität Augsburg, Institute for Economics, Juni 2019 (siehe S. 37).
- [Mor02] MORRISSEY, OLIVER, DIRK WILLEM TE VELDE und ADRIAN HEWITT: „Defining International Public Goods“. *International Public Goods: Incentives, Measurement, and Financing*. Hrsg. von FERRONI, MARCO und ASHOKA MODY. Boston, MA: Springer US, 2002: S. 31–46 (siehe S. 9).
- [Mur15] MURRAY, BRIAN und NICHOLAS RIVERS: „British Columbia’s revenue-neutral carbon tax: A review of the latest “grand experiment” in environmental policy“. *Energy Policy* (Nov. 2015) 86: S. 674–683 (siehe S. 14).
- [Nat17] NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE: *Valuing Climate Damages: Updating Estimation of the Social Cost of Carbon Dioxide*. Washington, DC: The National Academies Press, 2017 (siehe S. 4).
- [Nor07a] NORDHAUS, WILLIAM: „A Review of the Stern Review on the Economics of Climate Change“. *Journal of Economic Literature* (2007) 45.3: S. 686–702 (siehe S. 28).
- [Nor15] NORDHAUS, WILLIAM: „Climate Clubs: Overcoming Free-riding in International Climate Policy“. *American Economic Review* (Apr. 2015) 105.4: S. 1339–1370 (siehe S. 9, 10).
- [Nor14] NORDHAUS, WILLIAM: „Estimates of the Social Cost of Carbon: Concepts and Results from the DICE-2013R Model and Alternative Approaches“. (2014) 1: S. 273–312 (siehe S. 19).
- [Nor16] NORDHAUS, WILLIAM: *Projections and Uncertainties About Climate Change in an Era of Minimal Climate Policies*. Working Paper 22933. National Bureau of Economic Research, Dez. 2016 (siehe S. 5, 18, 19, 22, 24, 37, 44, 46).
- [Nor17a] NORDHAUS, WILLIAM: „Revisiting the social cost of carbon“. (2017) 114: S. 1518–1523 (siehe S. 19, 22, 37).
- [Nor17b] NORDHAUS, WILLIAM: *Scientific and Economic Background on DICE models*. Techn. Ber. Okt. 2017 (siehe S. 5, 18, 19, 22, 24, 27–29).
- [Nor07b] NORDHAUS, WILLIAM: „To Tax or Not to Tax: Alternative Approaches to Slowing Global Warming“. *Review of Environmental Economics and Policy* (Jan. 2007) 1.1: S. 26–44 (siehe S. 12–14).
- [Nor13] NORDHAUS, WILLIAM und PAUL SZTORC: *DICE 2013R: Introduction and User’s Manual*. 2. Aufl. Pearson Addison Wesley, 31. Okt. 2013 (siehe S. 5, 17–19, 22, 24, 26, 28).
- [Per03] PERMAN, ROGER: *Natural resource and environmental economics*. Harlow, England New York: Pearson Addison Wesley, 2003 (siehe S. 27, 28).

- [Fig13] PIGOU, ARTHUR C.: *The Economics of Welfare*. Palgrave Macmillan, 28. Nov. 2013. 876 S. (siehe S. 10).
- [Sta19] STAVINS, ROBERT N.: „Carbon Taxes vs. Cap and Trade: Theory and Practice“. *Paper, ES-09, Harvard Project on Climate Agreements* (Nov. 2019) (siehe S. 10–12).
- [Ste07] STERN, NICHOLAS: *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge University Press, 2007 (siehe S. 4, 7, 8, 28, 45).
- [Unr02] UNRUH, GREGORY C.: „Escaping carbon lock-in“. *Energy Policy* (2002) 30.4: S. 317–325 (siehe S. 41).
- [van16] VAN DEN BIJGAART, INGE, REYER GERLAGH und MATTI LISKI: „A simple formula for the social cost of carbon“. *Journal of Environmental Economics and Management* (2016) 77: S. 75–94 (siehe S. 17).
- [Wei15] WEITZMAN, MARTIN: „Internalizing the Climate Externality: Can a Uniform Price Commitment Help?“ *Economics of Energy & Environmental Policy* (Apr. 2015) 4.2 (siehe S. 4, 12–16).
- [Wei74] WEITZMAN, MARTIN: „Prices vs. Quantities“. *Review of Economic Studies* (1974) 41.4: S. 477–491 (siehe S. 13).
- [Wol13] WOLVERTON, ANN, ELIZABETH KOPITS, CHARLES griffiths charles, STEPHEN NEWBOLD und CHRISTOPHER MOORE: „A Rapid Assessment Model for Understanding the Social Cost of Carbon“. *Climate Change Economics* (Feb. 2013) 05 (siehe S. 17, 18).

Akronyme

Bezeichnung	Beschreibung
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
CasADi	Computer Algebra Systems for Algorithmic Differentiation
COP	Conference of the Parties
CTS	Cap-and-Trade System
DICE	Dynamic Integrated model of Climate-Economy
DICE-GC	DICE-GAMS-Code
DICE-MC	DICE-MATLAB-Code
EBM	Energiebilanzmodell
FUND	Climate Framework for Uncertainty
GAMS	General Algebraic Modeling System
GFP	Gesamtfaktorproduktivität
IAM	Integrated Assessment Model
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MATLAB	Matrix Laboratory
NLP	Nichtlineares Programm
OSP	Optimalsteuerungsproblem
PAGE	Policy Analysis of the Greenhouse Effect
SKK	Soziale Kosten von Kohlenstoff
SWF	Sozialwohlfahrtsfunktion
THG	Treibhausgase
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change

Symbolverzeichnis

Die Beschreibung der Variablen und Parameter des DICE-Modells wird im Anhang A gegeben.

Bezeichnung	Beschreibung
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
GtCO ₂	Gigatonnen CO ₂
GtC	Gigatonnen Kohlenstoff
ppm	parts per million (Anteile pro Million)
TC	Tonne Kohlenstoff
TCO ₂	Tonne CO ₂
USD	United States Dollar
Wm ⁻²	Watt pro Quadratmeter

Mathematische Notation

Wo wir eine Funktion einer einzelnen Variablen betrachten, wie:

$$Y = Y(X),$$

dann schreiben wir die erste Ableitung auf diese Art:

$$\frac{dY}{dX} = \frac{dY(X)}{dX}.$$

Wo wir eine Funktion mehrerer Variablen betrachten, wie die folgende Funktion zweier Variablen:

$$Z = Z(P, Q),$$

wir schreiben die erste partielle Ableitung auf diese Art:

$$\frac{\partial Z}{\partial P} = \frac{\partial Z(P, Q)}{\partial P}.$$

Wir indizieren die Komponente eines Vektors durch die Variable, die seinen Inhalt bezeichnet. Sei $X = [A \ B \ C \ D]^\top \in \mathbb{R}^4$ ein Vektor, dann bezeichnet X_A die erste Komponente X_1 , X_B die zweite Komponente X_2 , usw.

Ferner, für eine Funktion F , $F = [W \ X \ Y \ Z]^\top \in \mathbb{R}^4$ bezeichnet F_W, F_X, \dots mit dieser Indexierungskonvention nicht die erste Ableitung von F bezüglich W, X, \dots sondern die erste Komponente von F , die zweite Komponente von F , usw.

Glossar

Diese Definitionen stammen von IPCC [IPC13].

→

Ein Pfeil → gibt an, dass der folgende Begriff auch in diesem Glossar enthalten ist.

Aerosole

Eine Ansammlung fester oder flüssiger Partikel in der Luft mit einer typischen Größe zwischen 0,01 und 10 μm , die sich mindestens mehrere Stunden in der Atmosphäre befinden. Aerosole können entweder natürlichen oder anthropogenen Ursprungs sein. Aerosole können das Klima auf zwei Arten beeinflussen: direkt durch Streuung und Absorption von Strahlung und indirekt als Kondensationskerne für die Wolkenbildung oder durch die Veränderung der optischen Eigenschaften und der Lebensdauer von Wolken.

Der Begriff wurde auch fälschlicherweise mit dem in „Aerosolsprays“ verwendeten Treibmittel in Verbindung gebracht.

Albedo

Der Anteil der Sonnenstrahlung, der von einer Oberfläche oder einem Objekt reflektiert wird, wird häufig als Prozentsatz ausgedrückt. Schneebedeckte Oberflächen haben eine hohe Albedo; Die Albedo der Böden reicht von hoch bis niedrig. Vegetationsbedeckte Oberflächen und Ozeane haben eine niedrige Albedo. Die Albedo der Erde variiert hauptsächlich durch unterschiedliche Bewölkung, Schnee, Eis, Blattfläche und Landbedeckungsänderungen.

Anthropogen

Resultiert von oder produziert von Menschen.

Atmosphäre

Die gasförmige Hülle, die die Erde umgibt. Die trockene Atmosphäre besteht fast ausschließlich aus Stickstoff (78,1% Volumenmischungsverhältnis) und Sauerstoff (20,9% Volumenmischungsverhältnis) zusammen mit einer Reihe von Spurengasen wie Argon (0,93% Volumenmischungsverhältnis), Helium und strahlungsaktivem → Treibhausgasen wie → Kohlendioxid (0,035% Volumenmischungsverhältnis) und Ozon. Zusätzlich enthält die Atmosphäre Wasserdampf, dessen Menge stark variabel ist, aber typischerweise ein Volumenmischungsverhältnis von 1% aufweist. Die Atmosphäre enthält auch Wolken und → Aerosole.

Biomasse

Die Gesamtmasse lebender Organismen in einem bestimmten Gebiet oder Volumen; Kürzlich abgestorbenes Pflanzenmaterial wird häufig als tote Biomasse aufgenommen.

Biosphäre (terrestrisch und marin)

Der Teil des Erdsystems, der alle → Ökosysteme und lebenden Organismen in der Atmosphäre, an Land (terrestrische Biosphäre) oder in den Ozeanen (marine Biosphäre) umfasst, einschließlich abgeleiteter toter organischer Stoffe wie Abfall, organischer Bodensubstanz und ozeanischer Abfall.

Globales Erwärmungspotential

Ein Index, der die Strahlungseigenschaften gut gemischter → Treibhausgase beschreibt und den kombinierten Effekt der unterschiedlichen Zeiten, in denen diese Gase in der Atmosphäre verbleiben, und ihrer relativen Wirksamkeit bei der Absorption von ausgehender → Infrarotstrahlung darstellt. Dieser Index nähert sich dem zeitintegrierten Erwärmungseffekt einer Masseneinheit eines bestimmten Treibhausgases in der heutigen Atmosphäre im Vergleich zu dem von → Kohlendioxid an.

Halogenkohlenwasserstoffe

Verbindungen, die entweder Chlor, Brom oder Fluor und Kohlenstoff enthalten. Solche Verbindungen können als starke → Treibhausgase in der Atmosphäre wirken. Die Chlor- und Bromhaltigen Halogenkohlenwasserstoffe sind auch an der Abreicherung der → Ozonenschicht beteiligt.

Hydrosphäre

Die Komponente des Klimasystems umfasst flüssige Oberflächen und unterirdisches Wasser wie Ozeane, Meere, Flüsse, Süßwasserseen, Grundwasser usw.

Infrarotstrahlung

Strahlung, die von der Erdoberfläche, der Atmosphäre und den Wolken abgegeben wird. Es ist auch als terrestrische oder langwellige Strahlung bekannt. Infrarotstrahlung hat einen bestimmten Wellenlängenbereich („Spektrum“), der länger ist als die Wellenlänge der roten Farbe im sichtbaren Teil des Spektrums. Das Spektrum der Infrarotstrahlung ist praktisch unterschiedlich von der → solaren oder kurzwelligen Strahlung aufgrund des Temperaturunterschieds zwischen der Sonne und dem Erdatmosphärensystem.

Klimafeedback

Ein Interaktionsmechanismus zwischen Prozessen im Klimasystem wird als Klimarückkopplung bezeichnet, wenn das Ergebnis eines anfänglichen Prozesses Änderungen in einem zweiten Prozess auslöst, der wiederum den anfänglichen beeinflusst. Ein positives Feedback verstärkt den ursprünglichen Prozess und ein negatives Feedback reduziert ihn.

Kohlendioxid (CO₂)

Ein natürlich vorkommendes Gas, das auch ein Nebenprodukt der Verbrennung fossiler Brennstoffe und → Biomasse sowie Änderungen der Landnutzung und anderer industrieller Prozesse ist. Es ist das hauptsächliche anthropogene → Treibhausgas, das den Strahlungshaushalt der Erde beeinflusst. Es ist das Referenzgas, an dem andere Treibhausgase gemessen werden, und hat daher ein → globales Erwärmungspotential von 1.

Kryosphäre

Die Komponente des Klima-Systems besteht aus Schnee, Eis und Permafrost auf und unter der Erd- und Meeresoberfläche.

Landnutzung

Die Summe der Vorkehrungen, Aktivitäten und Eingaben, die in einem bestimmten Landbedeckungstyp durchgeführt wurden (eine Reihe menschlicher Handlungen). Die sozialen und wirtschaftlichen Zwecke, für die Land verwaltet wird (z. B. Beweidung, Holzgewinnung und Erhaltung).

Landnutzungsänderung

Eine Änderung der Nutzung oder Bewirtschaftung von Land durch Menschen, die zu einer Änderung der Landbedeckung führen kann. Landbedeckung und Landnutzungsänderungen können sich auf die Treibhausgasen oder andere Eigenschaften des Klimasystems auswirken und somit das Klima lokal oder global beeinflussen.

Ozon

Ozon, die triatomische Form von Sauerstoff (O₃), ist ein gasförmiger atmosphärischer Bestandteil. In der → Troposphäre entsteht es sowohl auf natürliche Weise als auch durch photochemische Reaktionen mit Gasen, die durch menschliche Aktivitäten entstehen („Smog“). Troposphärisches Ozon wirkt als → Treibhausgas. In der → Stratosphäre entsteht es durch die Wechselwirkung zwischen ultravioletter Sonnenstrahlung und molekularem Sauerstoff (O₂). Stratosphärisches Ozon spielt eine entscheidende Rolle für das stratosphärische Strahlungsgleichgewicht. Seine Konzentration ist in der → Ozonschicht am höchsten.

Ozonschicht

Die → Stratosphäre enthält eine Schicht, in der die Ozonkonzentration am größten ist, die sogenannte Ozonschicht. Die Schicht erstreckt sich von etwa 12 bis 40 km. Die Ozonkonzentration erreicht ein Maximum zwischen etwa 20 und 25 km. Diese Schicht wird durch menschliche Emissionen von Chlor- und Bromverbindungen geschwächt. Während des Frühlings der südlichen Hemisphäre findet jedes Jahr ein sehr starker Abbau der Ozonschicht in der Antarktis statt, der auch durch

vom Menschen hergestellte Chlor- und Bromverbindungen in Kombination mit den spezifischen meteorologischen Bedingungen dieser Region verursacht wird. Dieses Phänomen wird als *Ozonloch* bezeichnet.

Sonnenstrahlung

Von der Sonne emittierte Strahlung. Es wird auch als kurzwellige Strahlung bezeichnet. Sonnenstrahlung hat einen bestimmten Wellenlängenbereich (Spektrum), der durch die Temperatur der Sonne bestimmt wird. Siehe auch: → Infrarotstrahlung.

Strahlungsantrieb

Der Strahlungsantrieb ist die Änderung der vertikalen Nettobestrahlungsstärke (ausgedrückt in Watt pro Quadratmeter: Wm^{-2}) in der → Tropopause aufgrund einer internen Änderung oder einer Änderung des externen Antriebs des Klimasystems, wie z. B. eine Änderung der Konzentration von → Kohlendioxid oder der Leistung der Sonne. Normalerweise wird der Strahlungsantrieb berechnet, nachdem die stratosphärischen Temperaturen wieder an das Strahlungsgleichgewicht angepasst wurden, wobei jedoch alle troposphärischen Eigenschaften auf ihren ungestörten Werten festgehalten wurden. Strahlungsantrieb wird als augenblicklich bezeichnet, wenn keine Änderung der Stratosphärentemperatur berücksichtigt wird.

Stratosphäre

Die stark geschichtete Region der Atmosphäre über der → Troposphäre erstreckt sich von etwa 10 km (von 9 km in hohen Breiten bis durchschnittlich 16 km in den Tropen) bis etwa 50 km.

Treibhauseffekt

→ Treibhausgase absorbieren effektiv → Infrarotstrahlung, die von der Erdoberfläche, von der Atmosphäre selbst aufgrund derselben Gase und von Wolken emittiert wird. Atmosphärische Strahlung wird nach allen Seiten emittiert, auch nach unten zur Erdoberfläche. So speichern Treibhausgase Wärme im Oberflächen-Troposphärensystem. Dies wird als *natürlicher Treibhauseffekt* bezeichnet.

Atmosphärische Strahlung ist stark an die Temperatur des Niveaus gekoppelt, bei dem sie emittiert wird. In der → Troposphäre nimmt die Temperatur im Allgemeinen mit der Höhe ab. Tatsächlich stammt die in den Weltraum emittierte Infrarotstrahlung aus einer Höhe mit einer Temperatur von durchschnittlich -19°C im Gleichgewicht mit der einfallenden Netto-Sonnenstrahlung, während die Erdoberfläche auf einer viel höheren Temperatur von durchschnittlich $+14^{\circ}\text{C}$ gehalten wird.

Eine Erhöhung der Konzentration von Treibhausgasen führt zu einer erhöhten Infrarotopazität der Atmosphäre und damit zu einer effektiven Strahlung aus einer höheren Höhe bei niedrigerer Temperatur in den Weltraum. Dies verursacht einen Strahlungsantrieb, ein Ungleichgewicht, das nur durch eine Erhöhung der Temperatur des Oberflächen-Troposphären-Systems ausgeglichen werden kann. Dies ist der *verstärkte Treibhauseffekt*.

Treibhausgase

Treibhausgase sind jene gasförmigen Bestandteile der Atmosphäre, sowohl natürliche als auch anthropogene, die Strahlung mit bestimmten Wellenlängen innerhalb des Spektrums der Infrarotstrahlung absorbieren und emittieren, die von der Erdoberfläche, der Atmosphäre und den Wolken emittiert wird. Diese Eigenschaft verursacht den → Treibhauseffekt. Wasserdampf (H_2O), Kohlendioxid (CO_2), Lachgas (N_2O), Methan (CH_4) und Ozon (O_3) sind die primären Treibhausgase in der Erdatmosphäre. Darüber hinaus gibt es eine Reihe von vollständig vom Menschen verursachten Treibhausgasen in der Atmosphäre, wie die → Halogenkohlenwasserstoffe und andere chlor- und bromhaltige Substanzen, die im Rahmen des Montreal-Protokolls behandelt werden. Neben CO_2 , N_2O und CH_4 befasst sich das Kyoto-Protokoll mit den Treibhausgasen Schwefelhexafluorid (SF_6), Fluorchlorkohlenwasserstoffen (HFKW) und Perfluorkohlenwasserstoffen (PFC).

Tropopause

Die Grenze zwischen der → Troposphäre und der → Stratosphäre.

Troposphäre

Der unterste Teil der Atmosphäre von der Oberfläche bis zu einer Höhe von etwa 10 km in mittleren Breiten (von 9 km in hohen Breiten bis durchschnittlich 16 km in den Tropen), wo Wolken und Wetterphänomene auftreten. In der Troposphäre nehmen die Temperaturen im Allgemeinen mit der Höhe ab

Ökosystem

Ein System der Interaktion lebender Organismen mit ihrer physischen Umgebung. Die Grenzen eines sogenannten Ökosystems sind je nach Schwerpunkt oder Studie etwas willkürlich. Das Ausmaß eines Ökosystems kann daher von sehr kleinen räumlichen Maßstäben bis zur gesamten Erde reichen.

A Alle Variablen, Anfangsbedingungen und Parameterwerte des DICE-Modells

Tabelle A.1: Beschreibung der Variablen der DICE-Dynamik

Variable	Beschreibung	Einheit
Endogene Zustandsvariablen des Modells		
Wirtschaftsmodell		
K	Globales Kapital	Billionen USD
Kohlenstoffmodell		
M_{AT}	Kohlenstoffkonzentration in der Atmosphäre	GtC
M_{UP}	Kohlenstoffkonzentration im oberen Ozean	GtC
M_{LO}	Kohlenstoffkonzentration im unteren Ozean	GtC
Klimamodell		
T_{AT}	Atmosphärische Temperaturerhöhung	°C
T_{LO}	Ozeanische Temperaturerhöhung	°C
Exogene Zustandsvariablen des Modells		
L	Weltbevölkerung	Millionen von Menschen
A	Gesamtfaktorproduktivität	
σ	Emissionsintensität der Wirtschaftstätigkeit	GtCO ₂ pro Billionen USD
E_{Land}	Emissionen aus den Landnutzungsänderungen	GtCO ₂
F_{EX}	Strahlungsantriebe aus Nicht-CO ₂ -Treibhausgasen	Wm ⁻²
θ_1	Kosten für Emissionsminderung	Billionen USD
Entscheidungsvariablen des Modells		
μ	Emissionsminderungsrate	
s	Sparquote	
Zwischengrößen des Modells		
Y	Globaler Brutto-Output	Billionen USD
Ω	Schadensfunktion	% von Y
Λ	Emissionsminderungskostenfunktion	% von Y
Q	Globaler Netto-Output	Billionen USD
E	Emissionen	GtCO ₂
$E_{Industrie}$	Emissionen aus der Wirtschaftstätigkeit	GtCO ₂
F	Strahlungsantrieb	Wm ⁻²

Quelle: Hergestellt von uns aus KELLETT et al. [Kel16].

Tabelle A.2: Anfangsbedingungen der endogenen Variablen für DICE2013R und DICE2016R

	$T_{AT}(0)$	$T_{LO}(0)$	$M_{AT}(0)$	$M_{UP}(0)$	$M_{LO}(0)$	$K(0)$
2013R	0,8	0,0068	830,4	1527	10010	135
2016R	0,85	0,0068	851	460	1740	223

Quelle: KELLETT et al. [Kel16].

Tabelle A.3: Standardparameterwerte für DICE2013R und DICE2016R

Parameter	DICE2013R Werte	DICE2016R Werte*	Beschreibung	Einheit
Δ	5		Zeitschritt in Jahren	
t_0	2010	2015	Anfangsjahr	
N	60	100	Horizontlänge	
μ_0	0,039	0,03	Anfangsemissionsminderungsrate	
Klimadiffusionsparameter				
ϕ_{11}	0,8630	0,8718		
ϕ_{12}	0,0086	0,0088		
ϕ_{21}	0,025	0,025		
ϕ_{22}	0,975	0,975		
Kohlenstoffkreislauf-Diffusionsparameter				
ζ_{11}	0,912	0,88		
ζ_{12}	0,03833	0,196		
ζ_{21}	0,088	0,12		
ζ_{22}	0,9592	0,797		
ζ_{23}	0,0003375	0,001465		
ζ_{32}	0,00250	0,007		
ζ_{33}	0,9996625	0,99853488		
Andere geophysikalische Parameter				
η	3.8		Strahlungsantrieb der CO ₂ - Verdoppelung im Gleichgewicht	Wm ⁻²
ξ_1	0,098	0,1005	Multiplikator für η	
ξ_2	5/3.666		Umrechnungsfaktor für Emissionen	(GtC/GtCO ₂)
$M_{AT,1750}$	588		Vorindustrieller Kohlenstoff in der Atmosphäre	GtC
f_0	0,25	0,5	2010 Strahlungsantriebe von Nicht-CO ₂ -Treibhausgasen	Wm ⁻²
f_1	0,70	1,0	2100 Strahlungsantriebe von Nicht-CO ₂ -Treibhausgasen	Wm ⁻²

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle A.3 – Fortsetzung von vorheriger Seite

Parameter	DICE2013R Werte	DICE2016R Werte*	Beschreibung	Einheit
t_f	18	17	Anzahl der Perioden, in denen exogene Strahlungsantriebe zunehmen	
E_{L_0}	3,3	2,6	Anfängliche Landnutzungsemissionen	GtCO ₂ /Jahr
δ_{EL}	0,2	0,115		
Sozioökonomische Parameter				
γ	0,3		Kapitalelastizität in der Produktionsfunktion	
θ_2	2,8	2,6	Exponent der Kontrollkostenfunktion	
a_2	0,00267	0,00236	Schadensmultiplikatorfaktor	
a_3	2		Schadensexponent	
δ	0,1		Abschreibungssatz auf Kapital	
α	1,45		Elastizität des Grenznutzens des Konsums	
ρ	0,015		Anfängliche Rate der sozialen Zeitpräferenz	
L_0	6838	7403	Weltbevölkerung im Jahr 2010	Millionen Menschen
L_a	10500	11500	Asymptotische Weltbevölkerung	Millionen Menschen
l_g	0,134	0,134	Bevölkerungswachstumsrate	
A_0	3,80	5,115	Anfängliche Gesamtfaktorproduktivität (GFP)	
g_A	0,079	0,076	Anfängliches GFP-Wachstum	
δ_A	0,079	0,076	Abnahmerate von GFP	
σ_0	0,5491	0,3503	Anfangsemissionsintensität	GtC/Billionen 2010USD
g_σ	0,01	0,0152	Basisrate der Emissionsintensität	
δ_σ	0,01	0,0152	Abnahmerate der Emissionsintensität	
p_b	344	550	Kosten der Backstop-Technologie	2010USD/TCO ₂
δ_{p_b}	0,025	0,025		
$scale1$	0,016408662	0,030245527	Nutzenmultiplikator	
$scale2$	3855,106895	10993,704	Nutzensgleichfaktor	2010USD

* Leerzeichen in dieser Spalte bedeuten, dass sich der Parameter zwischen der beiden Versionen DICE2013R und DICE2016R nicht geändert hat.

Quelle: KELLETT et al. [Kel16].

Erklärung
gem. §14 Abs. 2 Prüfungsordnung vom 22.02.2006
und Änderunen PO 2009/2011

Hiermit erkläre ich, dass ich die von mir eingereichte Abschlussarbeit (Bachelor–Thesis) selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Stellen der Abschlussarbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen wurden, in jedem Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht habe.

Wuppertal, den 30. November 2020

Patrick Ngaggou Donfack

Erklärung

Hiermit erkläre ich mich damit einverstanden, dass meine Abschlussarbeit (Bachelor–Thesis) wissenschaftlich interessierten Personen oder Institutionen und im Rahmen von externen Qualitätssicherungsmaßnahmen des Studienganges zur Einsichtnahme zur Verfügung gestellt werden kann. Korrektur–oder Bewertungshinweise in meiner Arbeit dürfen nicht zitiert werden.

Wuppertal, den 30. November 2020

Patrick Ngaggou Donfack

