

Arbeitspapiere zur Lateinamerikaforschung

Herausgegeben von Christian Wentzlaff-Eggebert und Martin Traine



Nr. III-29

Markus Rafael Paffhausen

Klimawandel in Mexiko – eine theoretische Analyse von Umweltregulierungen

Universität zu Köln
Philosophische Fakultät
Arbeitskreis Spanien – Portugal – Lateinamerika
ISSN 1616-9085



Arbeitspapiere zur Lateinamerikaforschung

Herausgegeben von Christian Wentzlaff-Eggebert und Martin Traine

ISSN 1616-9085

III-29 Wirtschaftswissenschaft

Redaktion: Martin Middelanis

Arbeitskreis Spanien – Portugal – Lateinamerika, 2018

Universität zu Köln

Philosophische Fakultät

Arbeitskreis Spanien – Portugal – Lateinamerika

Albertus-Magnus-Platz

D-50923 Köln

Download und weitere Informationen unter <http://www.lateinamerika.uni-koeln.de/publikationen.html>

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	i
Abbildungsverzeichnis.....	ii
1. Einleitung.....	1
2. Der Klimawandel.....	3
2.1 Beobachtete Veränderungen, ihre Ursachen und ihre Folgen.....	4
2.2 Zukünftige Veränderungen und Risiken.....	5
2.3 Klimawandel in Mexiko.....	8
3. Die Klimapolitik Mexikos.....	9
4. Die Umwelt und gerichteter technologischer Wandel.....	13
4.1 Rahmenbedingungen des Modells.....	16
4.2 Das Laissez-Faire-Gleichgewicht.....	19
4.3 Optimale Umweltregulierungen.....	23
4.4 Erschöpfbare Ressourcen.....	28
4.5 Verzögerungskosten.....	30
4.6 Alternative Modellierungen und Grenzen des Modells.....	31
4.7 Ergebnisse.....	31
5. Analyse: Optimale Umweltregulierungen in Mexiko.....	32
5.1 Kohlenstoffsteuer und Forschungssubventionen.....	32
5.2 Der kritische Faktor: Die Substitutionselastizität.....	35
6. Fazit und Ausblick.....	38
Anhang.....	40
Literaturverzeichnis.....	50

Abkürzungsverzeichnis

BAU: Business-as-usual

BIP: Bruttoinlandsprodukt

CCS: Carbon Capture and Storage

CEL: Saubere Energiezertifikate (Certificados de Energías Limpias)

CeMIE: Mexikanische Energieinnovationszentren (Centros Mexicanos de Innovación en Energía)

CH₄: Methan

CO₂: Kohlenstoffdioxid

ENCC: Nationale Klimawandelstrategie (Estrategía Nacional de Cambio Climático)

ETW: Endogener technologischer Wandel

F&E: Forschung und Entwicklung

IEPS: Sondersteuer über Dienstleistungen und Produkte (Impuesto Especial sobre Producción y Servicios)

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

IPF: Innovation Possibility Frontier

LABINNOVA: Innovationslabor für nachhaltige Energie (Laboratório de Innovación en Sustentabilidad Energética)

LAERFTE: Gesetz zu erneuerbaren Energien und Energiewende (Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y Financiamiento de la Transición Energética)

LASE: Gesetz des nachhaltigen Energiegebrauches (Ley para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía)

LBD: Learning-by-Doing

LGCC: Allgemeines Klimaschutzgesetz (Ley General de Cambio Climático)

LTE: Energiewendegesetz (Ley de Transición Energética)

MWh: Megawattstunden

N₂O: Lachgas

NDC: National festgelegte Beiträge (Nationally Determined Contributions)

PECíTI: Sonderprogramm für Wissenschaft, Technologie und Innovation (Programa Especial de Ciencia, Tecnología e Innovación)

PETE: Sonderprogramm der Energiewende (Programa Especial de Transición Energética)

PEV: Primärenergieverbrauch

RCP: Repräsentative Konzentrationspfade

SEMARNAT: Mexikanisches Sekretariat für Umwelt und natürliche Ressourcen (Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales)

tCO₂e: Tonne Kohlenstoffdioxidäquivalent

THG: Treibhausgase

UNFCCC: Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (United Nations Framework Convention on Climate Change)

WIOD: World Input-Output Database

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projizierte Änderungen des Meeresspiegels und der Oberflächentemperatur.....	5
Abbildung 2: THG-Emissionen Mexikos je Sektor.....	10
Abbildung 3: Primärenergieverbrauch in Mexiko 1973-2015.....	10
Abbildung 4: Stromerzeugung in Mexiko je Technologie.....	11

1. Einleitung

Im November 2015 wurde mit dem Pariser Klimaabkommen Geschichte geschrieben. 195 Staaten unterzeichneten einen völkerrechtlichen Vertrag, ein einmaliges Ereignis. Die erfolgreichen Verhandlungen demonstrieren die herrschende Übereinkunft innerhalb der Weltgemeinschaft über die globale Bedrohung, die vom Klimawandel ausgeht. Alle Mitgliedstaaten der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) einigten sich darauf, den globalen durchschnittlichen Temperaturanstieg auf 1,5°C über das vorindustrielle Niveau zu beschränken, mit einem maximalen oberen Limit von 2°C. Um dieses Ziel zu erreichen, muss jedes Land sogenannte national festgelegte Beiträge (Nationally Determined Contributions, NDCs) beim UNFCCC melden. Die NDCs sind unilaterale klimapolitische Maßnahmen, die angeben, wie jedes Land zur Reduktion der Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) beitragen soll (vgl. Salawitch et al. 2017, Kapitel 3).

Das Klimaabkommen beinhaltet zudem mehrere Mechanismen, um die internationale Kooperation zur Einhaltung der Ziele zu stärken und insbesondere Entwicklungsländer zu unterstützen, wie beispielsweise den Green Climate Fund¹. Jedoch ist letztlich jedes Land durch seine eigens festgelegten NDCs für die genaue Ausgestaltung der Maßnahmen verantwortlich. Die Wichtigkeit, die nationalen Umweltregulierungen bei der Umsetzung des Abkommens und somit für die Zukunft unseres Planeten zukommt, ist daher unbestreitbar. Umweltregulierungen und klimapolitische Maßnahmen betreffen oft ganze Wirtschaftssektoren wie beispielsweise den Energiesektor und sind somit mit tiefgreifenden makroökonomischen Auswirkungen verbunden. Aus diesem Grund besteht ein großes volkswirtschaftliches Interesse daran, Umweltregulierungen möglichst effizient zu gestalten. Effizient bedeutet in diesem Sinne, sowohl das Klima und somit die Umwelt und Gesellschaften zu schützen als auch langfristiges ökonomisches Wachstum zu gewährleisten. Zwei Ziele, die in der kurzen Frist getrennt voneinander erscheinen, jedoch gerade langfristig untrennbar miteinander verbunden sind. Bereits seit den frühen 1990er Jahren beschäftigen sich Ökonomen mit der Frage, welche Umweltregulierungen erforderlich sind, um den intertemporalen Nutzen in einer Welt zu maximieren, in welcher wirtschaftliche Aktivität einen Einfluss auf die Umwelt besitzt. Nordhaus (1994) leistete auf diesem Feld Pionierarbeit, indem er ein dynamisches makroökonomisches Modell unter Berücksichtigung des Weltklimas entwickelte. Aufbauend auf diesem Ansatz entstanden im Laufe der Jahre sehr viele integrierte Bewertungsmodelle, welche sich in ihren Eigenheiten zwar unterscheiden, jedoch eine Gemeinsamkeit aufweisen: Eine exogene Modellierung des technologischen Wandels.

¹ Der Fond wurde gegründet, um Geld für Projekte zur Minderung sowie zur Anpassung an den Klimawandel in Entwicklungsländern bereitzustellen (Green Climate Fund 2017).

Technologischer Wandel wird in diesem Kontext als die Zunahme an Output mit einem gegebenen Level an Inputs verstanden, welche durch Innovation, Erfindung und Diffusion möglich gemacht wird. Während exogener technologischer Wandel als Funktion ausschließlich abhängig von Zeit modelliert wird, berücksichtigen endogene Modellierungen technologischen Wandels vergangene, aktuelle sowie zukünftige Aktivitäten, Regulierungen und Preise. Dementsprechend hängen zukünftige technologische Produktionsmöglichkeiten von heutigen Maßnahmen ab. Dass eine exogene Modellierung die komplexe Natur der Interdependenzen von technologischen Wandel nicht in ausreichendem Maße berücksichtigt ist ein Standpunkt, der mittlerweile vielfach in der Literatur vertreten wird (Gillingham et al. 2008, S. 2734–2737). Dadurch, dass technologischer Wandel eine endogene Größe ist, kann seine Richtung bestimmt werden. Im Folgenden können die Begriffe „endogen“ und „gerichtet“ daher begrifflich ausgetauscht werden.

Eine der zentralen Arbeiten hinsichtlich der Umwelt und gerichtetem technologischen Wandel stammt von Acemoglu et al. (2012). Die Autoren entwickeln ein Wachstumsmodell mit Umweltrestriktionen und analysieren auf Basis einer endogenen Modellierung des technologischen Wandels die optimale Struktur von Umweltregulierungen, ihre Implikationen auf das langfristige ökonomische Wachstum sowie die Kosten, die bei einer Verzögerung der Implementierung der Maßnahmen entstehen. Das Modell unterscheidet zwischen zwei Inputs, „sauber“ und „schmutzig“, zur Herstellung eines finalen Gutes und liefert einen systematischen Analyserahmen für die Implikationen von verschiedenen Umweltregulierungen auf die Richtung des technologischen Wandels. In der vorliegenden Arbeit wird eine theoretische Analyse der bereits implementierten Umweltregulierungen Mexikos auf Basis der Kriterien von optimalen Umweltregulierungen gemäß Acemoglu et al. (2012) durchgeführt². Es wird dabei der Frage nachgegangen, ob die bestehende mexikanische Klimapolitik optimal ist und, falls nicht, welche Maßnahmen ergriffen oder modifiziert werden müssten, um im Sinne des Modells als optimal zu gelten. Die Analyse beschränkt sich auf den Energiesektor, da dieser für den mit Abstand größten Teil der Emissionen verantwortlich ist und sich sehr gut für eine Untersuchung anhand von Acemoglu et al. (2012) eignet, wie später eingehend erläutert wird. Der Anwendungsfall Mexiko ist aufgrund von mehreren Gesichtspunkten interessant: Mexiko verursacht THG-Emissionen, die weit über dem weltweiten Durchschnitt liegen und ist aufgrund von mehreren Faktoren stark vom Klimawandel gefährdet. Die Notwendigkeit von erheblichen Reduktionen der Emissionen wurde in den letzten Jahren wahrgenommen und führte dazu, dass Mexiko interessante klimapolitische Maßnahmen getroffen hat und ambitionierte Klimaziele besitzt. Schließlich ist der Fall Mexiko interessant, da das Land als Entwicklungsland qualifiziert wird. Während nämlich noch im Kyoto-

² Der Begriff „optimal“ in Verbindung mit Umweltregulierungen und Klimapolitik bezieht sich im Folgenden auf die in Kapitel 4 herausgearbeiteten Kriterien von optimalen Regulierungen gemäß Acemoglu et al. (2012).

Protokoll von 1997, welches dem Pariser Klimaabkommen vorausging, Entwicklungsländern vorerst keine Verpflichtungen zugeteilt wurden, betrifft das Pariser Abkommen von 2015 alle Vertragsnationen (Salawitch et al. 2017, S. 116). Insbesondere für Entwicklungsländer, welche sich großen gesellschaftlichen und ökonomischen Herausforderungen gegenübersehen, sind effiziente Umweltregulierungen mit Berücksichtigung von langfristigem wirtschaftlichem Wachstum besonders wichtig.

Um der formulierten Forschungsfrage nachzugehen, ist die Arbeit wie folgt strukturiert: Zu Beginn wird in Kapitel 2 ein Überblick über den Forschungsstand des Klimawandels und seinen erwarteten Auswirkungen gegeben und auf die besonderen Herausforderungen für Mexiko eingegangen. In Kapitel 3 wird die Klimapolitik Mexikos vorgestellt. Anschließend werden in Kapitel 4 die bisherigen Forschungsergebnisse zu gerichtetem technologischem Wandel und der Umwelt zusammengefasst, bevor die theoretische Grundlage der Arbeit, das Modell von Acemoglu et al. (2012), eingehend erläutert wird. Die herausgearbeiteten Kriterien von optimalen Umweltregulierungen werden schließlich in Kapitel 5 auf die mexikanische Klimapolitik angewendet. Kapitel 6 fasst die Ergebnisse der Arbeit zusammen und liefert ein Fazit.

2. Der Klimawandel

In diesem Kapitel wird der aktuelle Forschungsstand bezüglich des Klimawandels und seiner Auswirkungen vorgestellt. Aufgrund der hohen Aufmerksamkeit, die das Thema in der öffentlichen Debatte genießt und der Variabilität hinsichtlich der Sicherheit, mit der Aussagen getroffen werden können, ist es sinnvoll, die zentralen Forschungsergebnisse aufzuzeigen, bevor mit der Analyse von Umweltregulierungen begonnen wird. Als Quelle wird hierfür der fünfte Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) verwendet.³ Die Ergebnisse werden bezüglich des Gewissheitsgrades durch qualitative Vertrauensniveaus (sehr niedrig, niedrig, mittel, hoch, sehr hoch), und, wenn möglich, durch Wahrscheinlichkeitsniveaus (praktisch sicher bis sehr unwahrscheinlich), sowie teilweise mit verfügbarer Evidenz (limitiert, mittel, robust) und Grad an Übereinstimmung (niedrig, mittel, hoch) evaluiert⁴. Hierbei wird nur auf die zentralsten Ergebnisse eingegangen, für eine vollständige Analyse der Forschungslage siehe IPCC (2014a). Da der Klimawandel ein globales Phänomen ist, werden eingangs

³ Das IPCC, im Deutschen teils als „Weltklimarat“ bezeichnet, wurde 1988 von den Vereinten Nationen (UN) gegründet, 2007 mit dem Friedensnobelpreis ausgezeichnet und ist die wichtigste internationale Institution hinsichtlich der Aufarbeitung und Beurteilung des Forschungsstandes bezüglich des Klimawandels. Hunderte von Wissenschaftlern aus 195 Ländern, die Mitglied beim IPCC sind, tragen zum Sachstandsbericht bei (IPCC 2017).

⁴ Für die Wahrscheinlichkeitsniveau gilt: praktisch sicher (99-100%), sehr wahrscheinlich (90-100%), wahrscheinlich (66-100%), gleichsam wahrscheinlich wie unwahrscheinlich (33-66%), unwahrscheinlich (0-33%), sehr unwahrscheinlich (0-10%) (IPCC 2014b, S. 2).

Forschungsergebnisse ohne regionale Eingrenzung vorgestellt. Anschließend wird auf die für Mexiko besonders relevanten Risiken eingegangen.

2.1 Beobachtete Veränderungen, ihre Ursachen und ihre Folgen

Es gibt eindeutige Beweise für die Erwärmung des gesamten Klimasystems, den Anstieg von anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen und ihren Einfluss auf das Klima. Ebenso ist belegt, dass die jüngsten Klimaveränderungen weitverbreitete Folgen für natürliche und menschliche Systeme hatten. Jede der letzten drei Dekaden wies sukzessiv eine höhere Oberflächentemperatur als alle vorhergehenden Jahrzehnte seit 1850 auf. Der Zeitraum von 1983-2012 war *wahrscheinlich* die wärmste 30-Jahre-Periode der letzten 1400 Jahre auf der Nordhalbkugel (*mittleres Vertrauen*). Global gemittelte Oberflächentemperaturen zeigen für den Zeitraum zwischen 1880 bis 2012 eine Erwärmung von 0,85° C. Es ist *praktisch sicher*, dass sich der obere Ozean (0-700m) zwischen 1971-2010 um 0,11° C pro Jahr erwärmt hat. Seit Beginn des industriellen Zeitalters hat die Aufnahme von CO₂ durch den Ozean zu einer Versäuerung des Ozeans um 26% geführt (*hohes Vertrauen*). *Hohes Vertrauen* besteht darin, dass der grönländische und antarktische Eisschild von 1992 bis 2011 an Masse verloren haben, *wahrscheinlich* mit einer höheren Geschwindigkeit zwischen 2002 und 2011. Der globale mittlere Meeresspiegel ist zwischen 1901 und 2010 um 0,19m gestiegen, dabei war die Geschwindigkeit des Meeresspiegelanstiegs seit Mitte des 19. Jahrhunderts größer als die mittlere Geschwindigkeit in den vorausgegangen zwei Jahrtausenden (*hohes Vertrauen*) (IPCC 2014b, S. 2–4).

Es ist *äußerst wahrscheinlich*, dass die Hauptursache für die beobachtete Erwärmung seit Mitte des 20. Jahrhunderts die atmosphärischen Konzentrationen von Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) sind, welche in diesem Maß seit mindestens 800.000 Jahren noch nie vorgekommen sind. Die Hälfte der zwischen 1750 und 2011 erzeugten anthropogenen Emissionen wurde in den letzten 40 Jahren verursacht, wobei die Verbrennung fossiler Brennstoffe mit ca. 78% zum Anstieg der CO₂-Emissionen in diesem Zeitraum beigetragen hat (*hohes Vertrauen*). Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum sind die wichtigsten Treiber für anthropogene THG-Emissionen durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe, wobei der Beitrag des Wirtschaftswachstums über die letzten drei Jahrzehnte stark gestiegen ist. Es ist *sehr wahrscheinlich*, dass anthropogene Einflüsse zum Rückgang des arktischen Meereises sowie zum beobachteten Anstieg der oberen Ozeantemperatur und des Meeresspiegels beigetragen haben. Menschliche Antriebe haben *wahrscheinlich* seit 1960 den globalen Wasserkreislauf beeinflusst und wesentlich zum Anstieg der Oberflächentemperatur beigetragen (IPCC 2014b, S. 4–6).

Hohes bzw. sehr hohes Vertrauen besteht darin, dass natürliche Systeme vom Klimawandel beeinflusst werden, insbesondere maritime Organismen durch die Versäuerung der Ozeane. Ebenso wurden

negative Effekte auf Ernteerträge nachgewiesen (*hohes Vertrauen*). Hydrologische Systeme verändern sich durch Änderungen in Niederschlägen und das Schmelzen von Eis und Schnee, wodurch die Qualität und Quantität von Wasserressourcen in vielen Regionen beeinträchtigt wird (*mittleres Vertrauen*). Es ist *wahrscheinlich*, dass sich die Eintrittswahrscheinlichkeit für Hitzewellen in manchen Regionen durch den anthropogenen Einfluss verdoppelt hat und es besteht *mittleres Vertrauen*, dass die beobachtete Erwärmung hitzebedingte Todesfälle vermehrt hat. Unabhängig von der Ursache der Klimaveränderungen besteht *sehr hohes Vertrauen* in der Verwundbarkeit und Exposition menschlicher und natürlicher Systeme gegenüber derzeitigen Klimaschwankungen (IPCC 2014b, S. 6–8).

2.2 Zukünftige Veränderungen und Risiken

Da die mittlere Erwärmung der Erdoberfläche bis zum späten 21. Jahrhunderts maßgeblich von weiteren THG-Emissionen bestimmt sein wird, werden sogenannte Repräsentative Konzentrationspfade (RCP) verwendet, um Aussagen über zukünftige Klimaveränderungen zu treffen. RCPs beziehen die Hauptfaktoren anthropogener THG-Emissionen Bevölkerungsgröße, wirtschaftliche Aktivität, Lebensstil, Energienutzung, Landnutzungsmuster, Technologie und Umweltregulierungen mit ein und projizieren somit erwartete Niveaus an Emissionskonzentrationen und damit verbundene Folgen. Unter anderem schließen die RCPs ein sehr stringentes Minderungsszenario (RCP2.6), welches darauf ausgerichtet ist, das 2°C-Ziel zu erreichen, und ein Szenario mit sehr hohen THG-Emissionen (RCP8.5) ein (IPCC 2014b, S. 8). Im Folgenden stehen die zuerst genannten Projektionen für RCP2.6, gefolgt von RCP8.5.

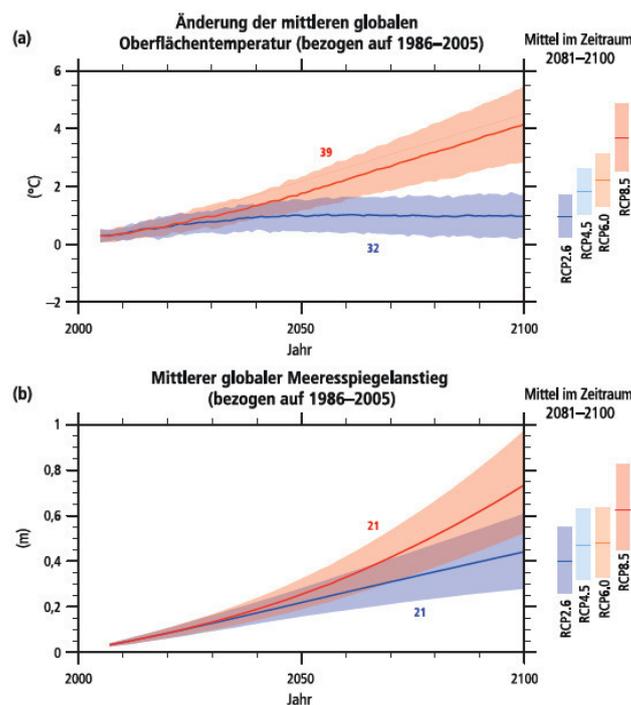


Abbildung 1: Projizierte Änderungen des Meeresspiegels und der Oberflächentemperatur. Quelle: IPCC 2014b, S.11.

Abbildung 1 zeigt den erwarteten Anstieg der mittleren globalen Oberflächentemperatur sowie des mittleren globalen Meeresspiegels für verschiedene RCPs. Wie zu erkennen ist, ergeben sich abhängig vom Emissionsgrad sehr unterschiedliche Ergebnisse für das Jahr 2100.

Eine Erwärmung der Erdoberfläche im Laufe des 21. Jahrhunderts wird für alle bewerteten Emissionsszenarien projiziert. Es ist *sehr wahrscheinlich*, dass Hitzewellen und extreme Niederschlagsereignisse an Häufigkeit, Dauer und Intensität in vielen Regionen zunehmen. Der mittlere globale Meeresspiegel wird bis 2100 um 0,26-0,55m bzw. 0,45-0,82m ansteigen, die Ozeane werden sich weiter erwärmen und um 15-17% bzw. 100-109% versauern (IPCC 2014b, S. 8–11).

Der Rückgang des oberflächennahen Permafrosts (obere 3,5m) gilt mit steigender Oberflächentemperatur als *praktisch sicher*. Der Rückgang wird auf 37% bis 85% projiziert (*mittleres Vertrauen*). Das globale Gletschervolumen (ausgenommen grönländischer und antarktischer Eisschild) wird um 15-55% bzw. 35-85% abnehmen (*mittleres Vertrauen*) (IPCC 2014b, S. 8–11).

Während des 21. Jahrhunderts erhöht sich das Risiko des Aussterbens für einen Großteil biologischer Arten aufgrund des Klimawandels, insbesondere durch die Wechselwirkung des Klimawandels mit anderen Stressfaktoren (*hohes Vertrauen*). Küstensysteme sowie niedrig gelegene Gebiete sind durch den Meeresspiegelanstieg gefährdet, der auch nach einer Stabilisierung der globalen Temperatur noch Jahrhunderte andauern wird (*hohes Vertrauen*). Laut den Projektionen wird der Klimawandel die Ernährungssicherheit gefährden. Dies betrifft die Fischereiproduktivität durch globale Neuverteilung der maritimen Arten und Rückgang der meeresbiologischen Vielfalt (*hohes Vertrauen*). Eine Erwärmung von über 2°C wird sich negativ auf die Produktion von Weizen, Reis und Mais auswirken, mit regionalen, positiven Ausnahmen (*mittleres Vertrauen*). Die erneuerbaren Oberflächen- und Grundwasserressourcen in trockenen subtropischen Regionen werden durch den Klimawandel verringert werden (*robuste Beweise, hohe Übereinstimmung*), wodurch der Wettbewerb um Wasser steigen wird (*begrenzte Belege, mittlere Übereinstimmung*). Der projizierte Klimawandel wird bis Mitte des Jahrhunderts hauptsächlich durch die Verschärfung bestehender Risiken die Gesundheit des Menschen negativ beeinflussen (*hohes Vertrauen*). Für urbane Zonen werden erhöhte Risiken für Menschen, Vermögenswerte, Ökonomien und Ökosysteme durch Hitzestress, Stürme, Extremniederschläge, Überschwemmungen, Erdbeben, Luftverschmutzung, Dürre, Wasserknappheit, Meeresspiegelanstieg und Sturmfluten projiziert (*sehr hohes Vertrauen*). Für ländliche Gebiete ergeben sich erhebliche Folgen bezüglich Wasserversorgung, Ernährungssicherheit, Infrastruktur und landwirtschaftlicher Einkommen (*hohes Vertrauen*). Es wird projiziert, dass der Klimawandel wirtschaftliche Entwicklung hemmen, Armutsbekämpfung erschweren und bestehende Armutfallen in urbanen Zonen und Hungerregionen weiterhin verstärken wird (*mittleres Vertrauen*). Zudem wird erwartet, dass die Vertreibung von Menschen

durch den Klimawandel verstärkt wird, insbesondere in Entwicklungsländern mit geringem Einkommen (*mittlere Belege, hohe Übereinstimmung*), wodurch sich das Risiko von gewaltsamen Konflikten erhöht (*mittleres Vertrauen*) (IPCC 2014b, S. 8–11).

Die globalen wirtschaftlichen Folgen des Klimawandels sind derzeit schwer einzuschätzen, jedoch sind sie in Ländern mit niedrigem Einkommen größer (Yohe und Schlesinger 2002). Mehrere Arbeiten hinsichtlich der Schätzung der Kosten, wie Nordhaus (1994), Nordhaus und Boyer (2000) und Tol (1995, 2009) kommen jedoch zum Schluss, dass die aggregierten ökonomischen Verluste mit steigender Temperatur wachsen.

Viele der genannten Aspekte und Folgen des Klimawandels, wie Meeresspiegelanstieg und Versäuerung der Ozeane werden noch über Jahrhunderte andauern, selbst wenn anthropogene THG-Emissionen gestoppt werden (*praktisch sicher, hohes Vertrauen*). Der genaue Grad an Klimaänderung, um abrupte und irreversible Änderungen auszulösen, bleibt unsicher, jedoch steigt das Risiko des Überschreitens solcher Grenzen mit steigender Temperatur (*mittleres Vertrauen*) (IPCC 2014b, S. 13). Abrupte Klimaveränderungen werden eingehend in National Academy of Science (2002) erläutert, und treten ein, sobald das Klimasystem eine bestimmte Grenze überschreitet und so ein Übergang in einen neuen Zustand ausgelöst wird, dessen Geschwindigkeit schneller als die der Ursache ist. Chaotische Prozesse innerhalb des Klimasystems können dazu führen, dass die Ursache eines solchen abrupten Übergangs unbestimmbar klein ist (National Academy of Science 2002, S. 14). Solche abrupten und irreversiblen Änderungen, auch tipping points genannt, beinhalten auf globaler Ebene den Kollaps der grönländischen und antarktischen Eisschilde und den damit verbunden extremen Meeresspiegelanstieg, tiefgreifenden Veränderungen in den Ozeanströmen sowie Feedback-Prozesse, bei denen Erwärmung weitere Erwärmung verursacht. Beispiele für diese Prozesse sind die Verringerung des Albedo-Effektes⁵ der Erde durch den Rückgang der Eismassen, die limitierte Aufnahmekapazität von CO₂ des Ozeans sowie die Emissionen von großen, im Permafrost eingeschlossenen Mengen an Methan und Kohlenstoff (Nordhaus 2013, S. 58). Für die mittleren bis hohen Emissionsszenarien verursacht der Klimawandel hohe Risiken für tipping-points auf regionaler Ebene hinsichtlich Zusammensetzung, Struktur und Funktion von marinen, terrestrischen und Süßwassersystemen (*mittleres Vertrauen*) sowie Warmwasser-Korallenriffe (*hohes Vertrauen*) innerhalb des 21. Jahrhunderts (IPCC 2014b, S. 77).

⁵ Albedo gibt an, wie viel Strahlung eine Oberfläche reflektiert. Helle Oberflächen reflektieren mehr Strahlung (und so Wärme) als dunkle. Weniger Eismassen bedeuten eine dunklere Erdoberfläche, wodurch sich die Erde weiter erhitzt und mehr Eismassen schmelzen (Nordhaus 2013, S. 44).

2.3 Klimawandel in Mexiko

Wie aus dem vorhergegangenen Kapitel ersichtlich wurde, gestaltet sich die genaue Vorhersage von Auswirkungen des Klimawandels als schwierig und die Genauigkeit der Aussagen nimmt mit eingrenzendem geografischem Rahmen ab. Dies begründet sich unter anderem darin, dass konkrete Risiken und Auswirkungen nicht nur von globalen Klimafaktoren (wie dem Anstieg der durchschnittlichen Oberflächentemperatur), sondern sehr stark von kontextspezifischen Faktoren abhängen. Dazu zählen die jeweiligen Eigenschaften und Dynamiken der betroffenen Systeme. Beispielsweise ist das Auftreten und Ausmaß von Überflutungen sehr stark vom Grad der Urbanisierung abhängig. Ein anderes Beispiel ist, dass bereits gesundheitlich vorbelastete und/oder ärmere Bevölkerungsschichten empfindlicher auf Hitzestress reagieren. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Möglichkeit zur Anpassung. Einkommensverteilung, technologische Innovation, Institutionen und kulturelle Aspekte haben einen substantiellen Einfluss auf das Niveau von Risiko und Toleranz der einzelnen sozialen und ökologischen Systeme gegenüber dem Klimawandel (Romero-Lankao et al. 2014, S. 1476-77).

Um eine Vorstellung über die Verwundbarkeit und Gefährdung Mexikos zu erhalten, ist es daher hilfreich, einige Daten über das Land zu kennen. Das Land besitzt ca. 123 Millionen Einwohner, ist damit das zwölftbevölkerungsreichste Land der Welt und liegt auf der Rangliste des BIP ebenfalls auf Platz zwölf. Allerdings herrscht eine hohe wirtschaftliche Ungleichheit im Land, der Gini-Index beträgt 48,30 (Platz 26 auf der Liste der Länder mit der höchsten Ungleichheit) und 52,3% der Bevölkerung lebt unterhalb der nationalen Armutsgrenze. Bezüglich des Human Development Index belegt Mexiko Platz 77 (Deutschland belegt Platz 4) (Lexas 2017). Es lässt sich daraus erkennen, dass ein großer Teil der mexikanischen Bevölkerung stark begrenzte Möglichkeiten zur Anpassung an Klimafolgen besitzt.

Bezogen auf die genauen Folgen des Klimawandels ist die Forschungslage für Mexiko, besonders im Vergleich zu anderen Ländern und Regionen, noch recht dünn. Es lassen sich dennoch einige Tendenzen für das Land erkennen: Für ganz Mexiko (außer dem tropischen Süden) werden Dürren vorhergesagt, die in Frequenz und Länge zunehmen werden, sowie eine zunehmende Wasserknappheit aufgrund von schnell ansteigendem Bevölkerungswachstum und Landwirtschaft. Für die Hauptstadt Mexiko-Stadt wird ein Rückgang der pro-Kopf-Wasserverfügbarkeit von 10-17% bis 2050 projiziert (Romero-Lankao et al. 2014, S. 1472). Bis 2040 werden Niederschlagsrückgänge um bis zu 30% erwartet, wobei der Norden und Nordwesten, die trockensten Gebiete des Landes, am stärksten betroffen sein werden. Gemeinsam mit dem erwarteten Temperaturanstieg hätte dies gravierende Folgen für die Landwirtschaft. So wird in einigen Regionen ein Rückgang der Kaffeeerträge, ein vor allem für die indigene Bevölkerung

äußerst wichtiges Agrarprodukt, von 34% bis 2020 erwartet. Der landwirtschaftliche Sektor ist besonders gefährdet, da er hauptsächlich durch Kleinbauern mit sehr hoher Sensibilität und/oder limitierter Anpassungsfähigkeit charakterisiert ist. Bereits seit 1999 konnten in ganz Nordamerika Verluste bei Ernteerträgen aufgrund von klimarelevanten Faktoren nachgewiesen werden. 17,6% der mexikanischen Bevölkerung hat keine Ernährungssicherheit und ist durch die erwarteten Rückgänge in der landwirtschaftlichen Produktion besonders gefährdet. Ein großes Risiko besteht auch für indigene Gemeinden, welche hauptsächlich auf Subsistenzwirtschaft angewiesen sind (Romero-Lankao et al. 2014, S. 1462-63).

Mexiko ist aufgrund seiner geografischen Lage und des hohen Küstenanteils durch extreme Ereignisse wie Wirbelstürme, extreme Regenfälle und Dürren stark gefährdet. Eine solche Gefährdung betrifft die kritische Infrastruktur, Landwirtschaft, Bergbau sowie den Manufaktursektor. Zusätzlich zur dünnen Forschungslage ist eine genaue Vorhersage von Klimaschäden auf einzelne Sektoren oder Industrien sehr schwierig, da Studien oftmals isolierte Bereiche untersuchen. Klimaveränderungen interagieren jedoch mit weiteren physikalischen und sozialen Prozessen und sorgen so dafür, dass Schocks und Auswirkungen auf einen Bereich aufgrund von Interdependenzen verschiedenster Art mehrere Bereiche betreffen. Insbesondere auf diese Komplexität bezogen gibt es sehr wenige Arbeiten (Romero-Lankao et al. 2014, S. 1477). Es ist daher zu beachten, dass das genaue Ausmaß von Folgen des Klimawandels nicht ausreichend projiziert werden kann und tendenziell eher unterschätzt wird.

Wie in diesem Kapitel gezeigt wurde, existieren eindeutige Beweise für den anthropogenen Einfluss durch THG-Emissionen auf das Klimasystem mit damit verbundenen negativen Folgen für Ökonomie und Ökologie. Mexiko ist aufgrund seiner geografischen, sozialen und wirtschaftlichen Gegebenheiten durch den Klimawandel stark gefährdet. Da mögliche Folgen durch Anpassung und Minderung jedoch verringert und bewältigt werden können, sollten entsprechende Strategien unverzüglich und wirksam umgesetzt werden. Tatsächlich existiert eine Vielzahl an möglichen Strategien, welche in Umweltregulierungen artikuliert werden. Im folgenden Kapitel wird auf diese Maßnahmen daher näher eingegangen.

3. Die Klimapolitik Mexikos

An dieser Stelle wird ein Überblick über die Klimapolitik und Umweltregulierungen Mexikos gegeben. Aus Relevanzgründen hinsichtlich der Analyse auf Grundlage des Modells von Acemoglu et al. (2012) werden dabei insbesondere Regulierungen, die den Energiesektor betreffen, näher beleuchtet.

Mexiko befindet sich weltweit auf Platz 13 (Deutschland belegt Platz 6) der Länder mit den meisten THG-Emissionen, welche seit 1990 um 33% gewachsen sind. Der allergrößte Teil entsteht dabei

im Energiesektor (ca. 85%), wie in Abbildung 2 zu sehen ist (Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) 2013b).

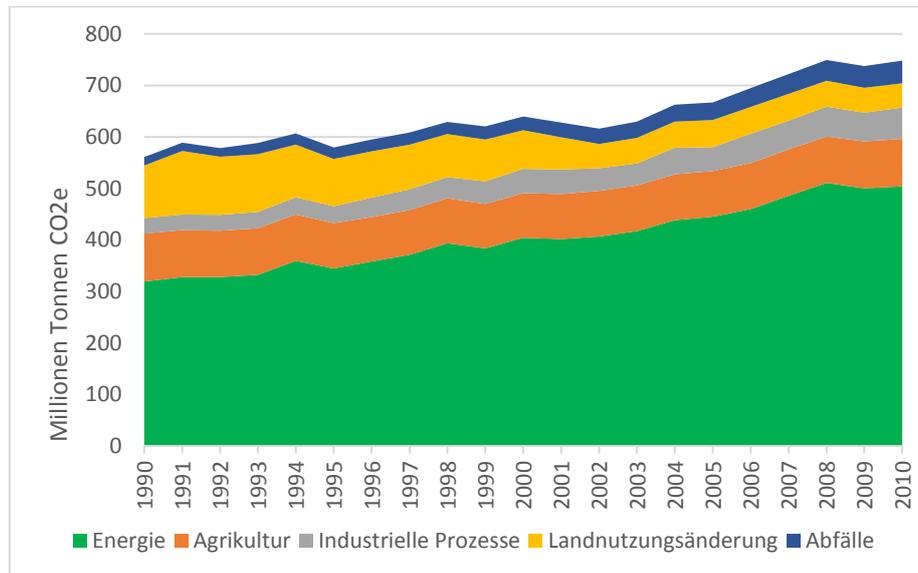
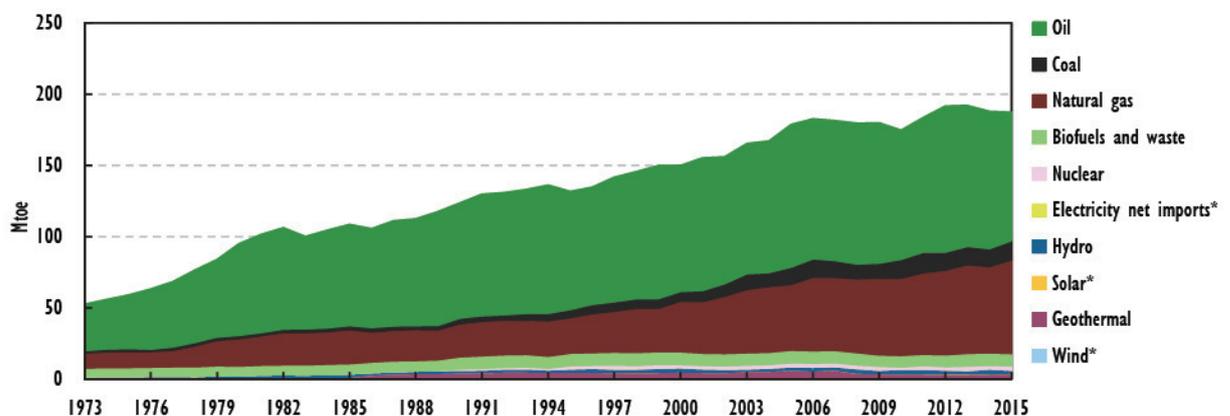


Abbildung 2: THG-Emissionen Mexikos je Sektor. Quelle: SEMARNAT (2013b)

Abbildung 3 zeigt den Primärenergieverbrauch (PEV) in Mexiko sowie die Anteile der einzelnen Technologien. 2015 machten fossile Brennstoffe 90,4% des PEV aus, wobei die größten Anteile von Öl (48,1%), Erdgas (35,1%) und Kohle (7,3%) stammen. Der Anteil von erneuerbaren Energien ist seit 2005 von 6,5% auf 8,3% gestiegen (IEA 2017, S. 20).



Note: Data for 2015 are estimated.

* Negligible.

Abbildung 3: Primärenergieverbrauch in Mexiko 1973-2015. Quelle: (IEA 2017, S. 20)

Abbildung 4 zeigt den Beitrag der verschiedenen Technologien zur Stromerzeugung in Mexiko bis 2012. Wie zu erkennen ist, ist der Anteil von Erdgas seit 2000 rapide angestiegen, und es wird projiziert, dass dieser Anteil weiterhin steigen wird, insbesondere wenn die Emissionsziele eingehalten werden sollen (Veysey et al. 2016, S. 592). Erdgas gilt, insbesondere im Vergleich zu

Kohle, als emissionsarmer⁶ fossiler Brennstoff und besitzt hohes Entwicklungspotential hinsichtlich Dekarbonisierung (Nordhaus 2013, S. 278).

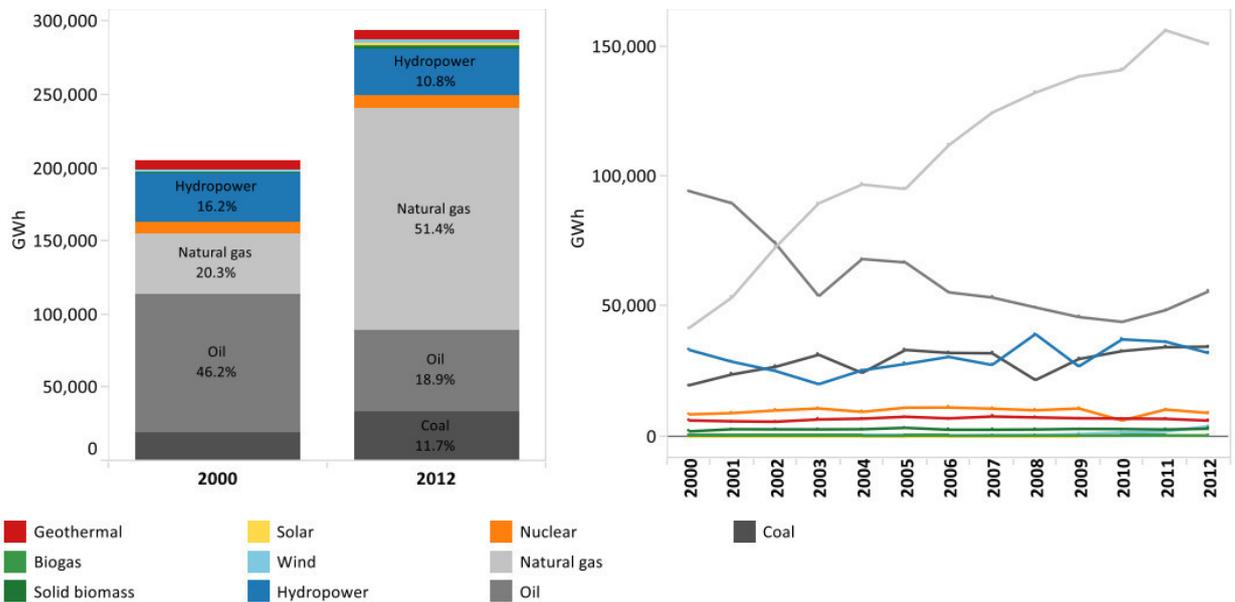


Abbildung 4: Stromerzeugung in Mexiko je Technologie. Quelle: IRENA (2015).

Neben den hohen THG-Emissionen besitzt Mexiko ambitionierte Reduktionsziele. Es ist eines der aktivsten Entwicklungsländer bezüglich der nationalen THG-Inventurberichte des UNFCCC, welches eine wichtige Maßnahme zur Einhaltung des Emissionshandels im Kyoto-Protokoll darstellt. Darüber hinaus war es das erste Entwicklungsland, das der UNFCCC seine NDCs meldete (IEA 2017, S. 45). Die bedeutendsten Ziele Mexikos sind eine Reduktion der Emissionen bis 2020 um 30% im Vergleich zu einem Business-as-usual-Szenario (BAU) sowie eine Reduktion bis 2050 um 50% im Vergleich zum Emissionslevel des Jahres 2000 (Nachmany et al. 2015, S. 3). Um diese Ziele zu erreichen, wurden folgende Regulierungen und Gesetze verabschiedet:

Das Allgemeine Klimaschutzgesetz⁷ (Ley General de Cambio Climático, LGCC; 2012) bildet den juristischen Rahmen und ist Grundlage für die gesamte Klimapolitik Mexikos. In ihm werden die oben genannten Emissionsziele festgelegt sowie die Zuständigkeiten der einzelnen Staatsorgane geregelt. Das Gesetz begründet einen Klimawandelfond, in den private und öffentliche Gelder aus dem In- und Ausland gelenkt werden sollen, um Anpassungs- und Minderungsstrategien zu fördern, wie bspw. Forschungsprojekte, technische Entwicklung und Transfer. Ebenso wird ein freiwilliger Emissionshandelsmarkt eingeführt. Die genauen Einzelheiten werden durch die

⁶ Erdgas mit ausgereifter CCS-Technologie verursacht ca. 0,06tCO₂ pro Tonne, Kohle 1,06tCO₂ (Nordhaus 2013, S. 278).

⁷ Eigene Übersetzung. Alle Namen der erwähnten mexikanischen Gesetze, Programme und Institutionen wurden vom Autor übersetzt; nicht jedoch die Abkürzungen.

ationale Klimawandelstrategie, das Sonderprogramm zum Klimawandel und das Sonderprogramm zur Nutzung erneuerbarer Energien festgelegt (Gobierno de la República 2012). Die nationale Klimawandelstrategie (Estrategia Nacional de Cambio Climático, ENCC; 2013) folgte aus dem LGCC und definiert acht Aktionslinien, um die im LGCC gesetzten Ziele zu erreichen und die Herausforderungen des Klimawandels zu bewältigen. Unter diesen Aktionslinien befinden sich unter anderem die Beschleunigung der Energiewende durch institutionelle und ökonomische Anreize und die Verringerung des Energieverbrauches durch Effizienzsteigerung (Gobierno de la República 2013, S. 48).

Durch das Energiewendegesetz (Ley de Transición Energética, LTE; 2015) wird eine graduelle Zunahme von sauberer Energie in der Stromerzeugung festgeschrieben. Der Begriff „saubere Energie“ wird im Gesetz der Elektrizitätsindustrie (Ley de Industria Eléctrica, LIE; 2014) definiert und schließt alle erneuerbaren Energien sowie Atomenergie und emissionsarme Hybridtechnologien mit CCS-Technologie⁸, worunter Erdgas fällt, mit ein (Gobierno de la República 2014a, S. 3–4). Das LTE ersetzt die zuvor erlassenen Gesetze zu erneuerbaren Energien und Energiewende (Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y Financiamiento de la Transición Energética, LAERFTE; 2008) sowie das Gesetz des nachhaltigen Energiegebrauches (Ley para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía, LASE; 2008). Die genauen Ziele hinsichtlich sauberer Energie sind durch das vom LTE begründete Sonderprogramm der Energiewende (Programa Especial de la Transición Energética, PETE; 2015) festgeschrieben und orientieren sich an den zuvor im LAERFTE formulierten Ziele mit einem Anteil von 25% bis 2018, 30% bis 2021, 35% bis 2024 sowie 50% bis 2050 von sauberer Energie bei der Stromerzeugung. Die Maßnahmen des PETE beinhalten die Ausweitung und Verbesserung der Netzinfrastruktur, Förderung von Forschung und Entwicklung im Sektor der sauberen Energien sowie die Demokratisierung des Zugangs zur Elektrizität. Im Jahr 2015 betrug der Anteil von sauberer Energie in der installierten Gesamtkapazität 28,31% und machte einen Anteil von 20,34% der Stromerzeugung aus (Secretaria de Energía 2017, S. 16–17).

Das LIE kreiert einen Markt für „saubere Energiezertifikate“ (Certificados de Energías Limpías, CEL), um den Anteil sowie die Investitionsanreize für saubere Energien zu erhöhen. 1 CEL entspricht 1 MWh Energie aus sauberen Quellen, die ins Netz eingespeist werden. Für das Jahr 2018 müssen 5% der entnommenen Energie einer Ladestelle mit Zertifikaten abgedeckt werden, für 2019 erhöht sich der Anteil auf 5.8%. Die Zertifikate können gehandelt werden und stellen das primäre ökonomische Instrument zur Einhaltung der formulierten Ziele der Energiewende dar (Secretaria de Energía 2017, S. 36–37).

⁸ Carbon Capture and Storage.

Durch eine Steuerreform im Jahr 2013 wurde die bereits bestehende Sondersteuer über Produkte und Dienstleistungen (Impuesto Especial sobre Producción y Servicios, IEPS; 1980) reformiert, wodurch sie zu einer Kohlenstoffsteuer wurde (Muñoz Piña 2015). Sie umfasst alle fossilen Brennstoffe außer Erdgas und Flugzeugtreibstoff und beträgt 3,21US\$ pro Tonne CO_{2e} (tCO_{2e}). Die genauen Raten für die einzelnen Brennstoffe werden jährlich neu festgelegt und orientieren sich am nationalen Konsumentenpreisindex (OECD 2014). Ab 2018 soll es einen Markt für Emissionshandel in Mexiko geben, für den im Jahr 2017 eine freiwillige Testphase läuft (World Bank 2017, S. 14).

Die in diesem Kapitel beschriebenen Regulierungen und Gesetze geben einen Überblick über die, insbesondere im Vergleich zu anderen Entwicklungsländern, ambitionierte Klimapolitik Mexikos.⁹ In Kapitel 5 wird in größerer Ausführlichkeit auf einzelne Maßnahmen eingegangen. Da mit Hinblick auf die folgende Analyse selektiv vorgegangen wurde, bleibt noch zu erwähnen, dass es in Mexiko weit umfassendere Klimaschutzstrategien gibt, die über den Energiesektor hinausgehen und an dieser Stelle nicht genannt wurden. Für einen umfassenden Einblick in die gesamte Klimapolitik siehe Gobierno de la República (2013) und SEMARNAT (2013a).

4. Die Umwelt und gerichteter technologischer Wandel

Wie in den vorausgegangenen Kapiteln gezeigt wurde, bringt der Klimawandel mehrere ernstzunehmende Bedrohungen mit sich, auf welche mit entsprechenden Umweltregulierungen reagiert wird. In diesem Kapitel soll ein kurzer Überblick über die Forschungsliteratur zu endogenem technologischen Wandel (ETW) und Umweltregulierungen gegeben werden, bevor das theoretische Kernstück der vorliegenden Arbeit, ein Modell von Acemoglu et al. (2012), erläutert wird.

Das Einbeziehen von ETW in Modellen zu Umweltregulierungen bedeutet, einen Feedback-Mechanismus zu modellieren, durch welchen Regulierungen technologischen Wandel hin zu emissionssparenden Technologien steuern. Dieser Feedback-Prozess ereignet sich durch Energiepreise, Spezialisierung in Forschung und Entwicklung (F&E) oder niedrigere Kosten durch akkumulierte Erfahrung (Learning-by-Doing, LBD) (Gillingham et al. 2008, S. 2735). Frühe Arbeiten stammen von Bovenberg und Smulders (1995). Sie entwickeln ein Zwei-Sektoren-Wachstumsmodell, in welchem ein einziges finales Gut mithilfe von physischem Kapital und allgemeiner Umweltqualität, welche als erneuerbare Ressource modelliert wird, hergestellt wird. Produktion verursacht stets Verschmutzung, jedoch kann ETW im Modell das respektive Niveau

⁹ Mexiko befindet sich weltweit auf Platz 28 des Climate Change Performance Index, eine Liste der aktivsten Ländern zur Bewältigung des Klimawandels. Es gibt nur vier Entwicklungsländer (Marokko, Ägypten, Indonesien, Indien), welche eine bessere Platzierung erzielen (Burck et al. 2016).

durch F&E reduzieren. Die Autoren untersuchen die benötigten Maßnahmen, um das sozial optimale Gleichgewicht zu erhalten und ermitteln eine Kohlenstoffsteuer sowie eine Forschungssubvention als optimale Umweltregulierungen. Goulder und Mathai (2000) untersuchen den Effekt von endogenem technologischem Wandel auf das optimale Timing sowie das Ausmaß von Umweltregulierungen und analysieren dabei Wissenstransfer sowohl durch LBD als auch durch F&E. Die Autoren kommen zum Schluss, dass ETW die Kosten von Umweltregulierungen stark herabsetzt. Zu einem ähnlichen Schluss kommt Popp (2004), welcher in seiner Arbeit das von Nordhaus entwickelte DICE-Modell erweitert und ermittelt, dass das Ignorieren der Endogenität des technologischen Fortschritts zu einer starken Überschätzung der Wohlfahrtskosten von Kohlenstoffsteuern führt. Van der Zwaan et al. (2002) entwickeln ein Zwei-Sektoren-Modell, in welchem zwischen emissionsfreien (sauberen) und emissionsreichen (schmutzigen) Technologien unterschieden und Wissen über LBD transferiert wird. Sie konkludieren, dass Maßnahmen unter Berücksichtigung von ETW schneller ergriffen werden müssen als unter exogenen Modellierungen und ermitteln die Entwicklung von emissionsarmen Produktionsmöglichkeiten als wichtigste klimapolitische Strategie. Grimaud und Rouge (2008) folgen einem ähnlichen Ansatz, jedoch untersuchen sie den Technologietransfer anhand von F&E. Umweltverschmutzung hat in ihrem Modell einen negativen Einfluss auf den Nutzen des repräsentativen Konsumenten und Verschmutzung resultiert aus der Förderung einer erschöpfbaren Ressource. Sie orientieren sich bei ihrer Analyse hinsichtlich der Neigung (Bias) des technologischen Wandels an Acemoglu (2002) und ermitteln eine Kohlenstoffsteuer sowie zwei Forschungssubventionen als optimale Umweltregulierungen. Ihr Hauptaugenmerk liegt dabei auf einer Wohlfahrtsanalyse. Gans (2012) untersucht die Auswirkungen von Umweltregulierungen auf Innovationsprozesse in verschiedenen Technologiesektoren. Er unterscheidet dabei zwischen drei „grünen“ Technologien: solche, die die Energieeffizienz steigern, Alternativen zu fossilen Energieträgern sowie Offset-Technologien. Umweltregulierungen sind in seiner Arbeit als Emissionsobergrenze mit entsprechenden Lizenzen modelliert. Er kommt zu dem Schluss, dass eine stringenter Emissionsregulierung lediglich Innovation in Offset-Technologien eindeutig fördert. Für die anderen Sektoren ergeben sich keine eindeutigen positiven Innovationseffekte durch strengere Umweltregulierungen.

Dass unterschiedliche relative Preise von verschiedenen Inputs Innovationen steuern und Umweltregulierungen diese Prozesse so beeinflussen, wurde empirisch nachgewiesen. Popp (2002) verwendet Patentdaten von mehreren Jahrzehnten, um die Effekte von Energiepreisen auf energieeffiziente Maßnahmen zu untersuchen und weist einen signifikanten Zusammenhang nach. Aghion et al. (2016) analysieren Daten der Autoindustrie aus über 80 Ländern und mehreren Jahrzehnten, um zu zeigen, dass Kohlenstoffsteuern saubere Innovation fördern. Ein weiterer

empirischer Beitrag stammt von Calel und Dechezleprêtre (2016), welche in ihrer Arbeit den Einfluss des europäischen Emissionsmarktes auf saubere Innovationen untersuchen und ebenfalls einen positiven Zusammenhang beweisen.

Neben den genannten theoretischen und empirischen Arbeiten existiert eine umfangreiche Literatur hinsichtlich der wirtschaftlichen Dimension des Klimawandels. Ein großer Forschungszweig beschäftigt sich mit der Bezifferung der Kosten des Klimawandels und optimaler Minderungsstrategien, siehe dazu beispielsweise Nordhaus (1994), Nordhaus und Boyer (2000), Stern (2007), Nordhaus (2007), Tol (2009). Die kritischen Faktoren in diesen Arbeiten sind Unsicherheit, Risiko sowie die Diskontrate. Mit Basis auf ETW und Umweltregulierungen wurden einige Arbeiten hinsichtlich globaler Klimapolitik und ihren Auswirkungen auf Innovationsprozesse in verschiedenen Ländern verfasst, siehe dazu beispielsweise Acemoglu et al. (2014), Hémous (2016) und van den Bijgaart (2017). Selbstverständlich stellen die genannten Arbeiten lediglich eine Auswahl aus der extensiven Forschungsliteratur hinsichtlich Klimawandel und Ökonomie dar. Für einen guten Literaturüberblick in diesem weiten Forschungsfeld siehe Dobes et al. (2014).

Im Folgenden soll das theoretische Kernstück der Arbeit, das Modell von Acemoglu et al. (2012) vorgestellt werden. Aufgrund des begrenzten Umfangs dieser Arbeit wird dabei lediglich auf die für die Beantwortung der Frage relevanten Ergebnisse und Modellierungen eingegangen.

Es handelt sich um ein Zwei-Faktoren-Wachstumsmodell mit endogenem, gerichtetem technologischen Wandel und Umweltrestriktionen, ähnlich wie in van der Zwaan et al. (2002) und Grimaud und Rouge (2008). Ein einziges finales Gut wird unter Verwendung von Inputs aus zwei Sektoren („sauber“ und „schmutzig“) hergestellt, wobei der schmutzige Sektor umweltschädliche Maschinen einsetzt. Die Umweltqualität hat einen direkten Einfluss auf den Nutzen des repräsentativen Haushaltes. Für die Umweltqualität existiert eine untere Grenze und eine Unterschreitung dieser führt zu einer „Umweltkatastrophe“. Gewinnmaximierende Wissenschaftler¹⁰ nutzen zuvor erbrachte Innovationen, um durch F&E die Qualität der Maschinen in einem Sektor zu erhöhen. In dem Modell kommt die zentrale Bedeutung des Marktgrößeneffektes und des Preiseffektes bezüglich der Richtung des technologischen Fortschritts zum Ausdruck. Die beiden Effekte, die von Acemoglu (1998, 2002) beschrieben wurden, verhalten sich wie folgt: Der Marktgrößeneffekt fördert Innovation im Sektor mit einem größeren Inputangebot, während der Preiseffekt Innovation im Sektor mit höheren Preisen fördert. Ihre relativen Stärken werden von drei Faktoren bestimmt: (i) Der Substitutionselastizität der

¹⁰ Um die Notation zu vereinfachen, werden in dieser Arbeit keine geschlechterspezifischen Anpassungen vorgenommen. Der Begriff Wissenschaftler beinhaltet hier auch Wissenschaftlerinnen. Dies gilt für alle weiteren Begriffe wie Forscher etc.

beiden Sektoren; (ii) dem relativen Grad an technologischer Entwicklung in den beiden Sektoren; (iii) ob schmutzige Inputs mit einer erschöpfbaren Ressource erzeugt werden. Das dezentrale Gleichgewicht ist aufgrund der Umweltexternalitäten nicht optimal. Darüber hinaus führt das Laissez-faire-Gleichgewicht immer zu einer Umweltkatastrophe (Acemoglu et al. 2012, S. 132).

Das Modell bietet einen Analyserahmen, um die Implikationen von Umweltregulierungen auf die Richtung des technologischen Wandels zu untersuchen. Die zentralen Ergebnisse des Modells befassen sich mit der Struktur von optimalen Umweltregulierungen und ihrer Implikationen für langfristiges Wachstum sowie für die Richtung des technologischen Wandels. Ebenso werden die Kosten, die bei einer Verzögerung der Implementierung solcher Regulierungen entstehen, untersucht. Die in dem Modell entwickelten Kriterien von optimalen Umweltregulierungen werden im darauffolgenden Kapitel auf die Klimapolitik Mexikos angewendet.

Der Aufbau dieses Kapitels ist wie folgt: Erstens werden die Rahmenbedingungen des Modells dargelegt. Im zweiten Schritt wird der Fall ohne eine erschöpfbare Ressource erläutert und das Laissez-faire-Gleichgewicht charakterisiert. Der dritte Teil des Kapitels beschäftigt sich mit der Struktur von optimalen Umweltregulierungen. Anschließend wird in verkürztem Maße auf den Fall mit einer erschöpfbaren Ressource eingegangen. Abschließend werden die zentralen Ergebnisse des Modells zusammengefasst. Der strukturelle Aufbau dieses Kapitels orientiert sich damit an dem von Acemoglu et al. (2012).

4.1 Rahmenbedingungen des Modells

Das folgende Kapitel bezieht sich auf die Ausführungen von Acemoglu et al. (2012, S. 134–138). Zu Grunde liegt eine Wirtschaft mit unendlichem diskretem Zeithorizont, in welchem ein Kontinuum an Haushalten, bestehend aus Arbeitern, Unternehmern und Wissenschaftlern, mit folgenden Präferenzen lebt:

$$(1) \sum_{t=0}^{\infty} \frac{1}{(1+\rho)^t} u(C_t, S_t).$$

C_t steht dabei für den Konsum des einzelnen finalen Gutes zum Zeitpunkt t und $\rho > 0$ für die Diskontrate. S_t beschreibt die Umweltqualität zum Zeitpunkt t und es sei $S_t \in [0, \bar{S}]$, wobei \bar{S} die Umweltqualität ohne jeglichen menschlichen Einfluss sowie das Ausgangsniveau der Umweltqualität angibt, sprich $S_0 = \bar{S}$.

S_t kann zunächst als allgemeine Umweltqualität verstanden werden, Acemoglu et al. (2012) verwenden in ihrer beispielhaften Simulation dafür jedoch die Kohlenstoffkonzentration in der Atmosphäre und den damit verbunden globalen Temperaturanstieg (vgl. Acemoglu et al. 2012, S. 155).

Für die Nutzenfunktion $u(C, S)$ gelten folgende Bedingungen:

$$(2) \frac{\partial u(C,S)}{\partial C} > 0, \quad \frac{\partial u(C,S)}{\partial S} > 0, \quad \frac{\partial^2 u(C,S)}{\partial C^2} < 0, \quad \frac{\partial^2 u(C,S)}{\partial S^2} < 0, \quad \lim_{C \downarrow 0} \frac{\partial u(C,S)}{\partial C} = \infty, \\ \lim_{S \downarrow 0} \frac{\partial u(C,S)}{\partial S} = \infty, \quad \lim_{S \downarrow 0} u(C,S) = -\infty$$

Durch die beiden letzten Bedingungen wird ausgedrückt, dass es fatale Konsequenzen für den Nutzen hat, wenn die Umweltqualität ihre untere Grenze erreicht. Darüber hinaus wird angenommen, dass

$$(3) \frac{\partial u(C,\bar{S})}{\partial S} = 0.$$

Ist die Umweltqualität also auf dem höchsten Niveau, gibt es keine positiven Nutzeneffekte einer Verbesserung dieser.

Es gibt ein einzelnes finales Gut, welches kompetitiv unter Verwendung von „sauberen“ und „schmutzigen“ (fortan notiert mit c bzw. d für „clean“ und „dirty“) Inputs, Y_c und Y_d , gemäß der aggregierten Produktionsfunktion

$$(4) Y_t = \left(Y_{ct}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} + Y_{dt}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} \right)^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}}$$

hergestellt wird, wobei $\varepsilon \in (0, +\infty)$ die Substitutionselastizität der beiden Sektoren angibt. Die beiden Sektoren werden als Substitute betrachtet, wenn $\varepsilon > 1$, und als Komplemente, wenn $\varepsilon < 1$. Der Cobb-Douglas-Fall ($\varepsilon = 1$) wird von den Autoren nicht behandelt. Mit Hinblick auf die Empirie erscheint ersterer Fall als relevanteste Option, da davon ausgegangen werden kann, dass effiziente saubere Technologien umweltschädliche Technologien vollständig ersetzen können. Daher wird, falls nicht anders erwähnt, fortan $\varepsilon > 1$ angenommen.

Die beiden Inputs Y_c und Y_d werden mithilfe von Arbeit L und einem Kontinuum von sektorspezifischen Maschinen erzeugt. Y_d kann ggf. unter Verwendung einer erschöpfbaren natürlichen Ressource erzeugt werden:

$$(5) Y_{ct} = L_{ct}^{1-\alpha} \int_0^1 A_{cit}^{1-\alpha} x_{cit}^{\alpha} di \quad \text{und} \quad Y_{dt} = R_t^{\alpha_2} L_{dt}^{1-\alpha} \int_0^1 A_{dit}^{1-\alpha_1} x_{dit}^{\alpha_1} di.$$

Es gilt $\alpha, \alpha_1, \alpha_2 \in (0,1)$, $\alpha_1 + \alpha_2 = \alpha$; A_{jit} gibt die Qualität der Maschine i , die in Sektor $j \in \{c, d\}$ eingesetzt wird, x_{jit} die Quantität dieser Maschine und R_t die Konsumrate der erschöpfbaren Ressource zum Zeitpunkt t an. Diese Ressource verhält sich gemäß der Differentialgleichung:

$$(6) Q_{t+1} = Q_t - R_t$$

Hier gibt Q_t den Ressourcenbestand zum Zeitpunkt t an und $c(Q_t)$ gibt als monoton fallende Funktion von Q_t die Extraktionskosten an.

In dieser Arbeit wird in ausführlicher Weise nur auf den Fall ohne den Einsatz einer erschöpfbaren Ressource, in dem also $\alpha_2 = 0$ und damit $\alpha_1 = \alpha$, eingegangen. Der andere Fall und seine Implikationen werden in Kapitel 4.4 kurz diskutiert.

Für den Arbeitsmarkt gilt, dass die Nachfrage kleiner als das Angebot ist, welches auf eins normiert ist:

$$(7) L_{ct} + L_{dt} \leq 1$$

Entsprechend der Forschungsliteratur zu endogenem technologischem Wandel (vgl. Acemoglu 2009, S. 426) werden die Maschinen für beide Sektoren von monopolistisch kompetitiven Firmen angeboten. Unabhängig von ihrer Qualität und dem Sektor, in dem sie eingesetzt werden, betragen die Produktionskosten einer Maschine ψ Einheiten des finalen Gutes. Weiterhin gilt die Normierung $\psi \equiv \alpha^2$.

Die Markträumungsbedingung für das finale Gut lautet:

$$(8) C_t = Y_t - \psi \left(\int_0^1 x_{cit} di + \int_0^1 x_{dit} di \right) - c(Q_t)R_t.$$

Technische Innovation findet im Modell gemäß einer Fortschrittmöglichkeitenfunktion (innovation possibility frontier, IPF) statt. Das Konzept der IPF wurde von Kennedy (1964) eingeführt und gehört zum Standardinventar der Literatur zu endogenem technologischen Fortschritt. Die IPF kann als „meta-Produktionsfunktion“ verstanden werden, die angibt, wie neue Technologien abhängig von Inputs wie mehr Investitionen, Anstrengungen und Forschung generiert werden (Acemoglu 2009, S. 413).

Die IPF hier ist wie folgt charakterisiert: Zu Beginn jeder Periode entscheidet sich jeder Wissenschaftler, ob er seine Forschung sauberer oder schmutziger Technologien widmen möchte. Dann wird er zufällig einer Maschine zugeteilt und seine Innovation hat mit einer Wahrscheinlichkeit von $\eta_j \in (0,1)$ Erfolg. Bei erfolgreicher Innovation verbessert sich die Qualität der Maschine von A_{jit} zu $A_{jit}(1 + \gamma)$ mit $\gamma > 0$. Ein erfolgreicher Wissenschaftler erhält durch seine Qualitätsverbesserung an Maschine i in Sektor j ein Patent über eine Periode und wird so zum Produzenten von Maschine i in der laufenden Periode. Wenn die Innovation scheitert, werden die Monopolrechte zufällig an einen Unternehmer aus einem Pool von möglichen Kandidaten vergeben, der dann die alte Technologie benutzt.

Die Masse der Wissenschaftler s sei auf eins normiert, und die Masse der Wissenschaftler, die in Sektor j zum Zeitpunkt t arbeiten werde mit s_{jt} bezeichnet. Die Markträumungsbedingung für Wissenschaftler ergibt dann:

$$(9) s_{ct} + s_{dt} \leq 1.$$

Die durchschnittliche Produktivität in Sektor j zum Zeitpunkt t sei definiert als:

$$(10) A_{jt} \equiv \int_0^1 A_{jit} di,$$

woraus sich ergibt, dass A_{ct} für „saubere Technologie“ und A_{dt} für „schmutzige Technologie“ steht. Die oben genannten Eigenschaften der IPF implizieren, dass sich A_{jt} entlang des Zeitpfades entsprechend der folgenden Differentialgleichung entwickelt:

$$(11) A_{jt} = (1 + \gamma\eta_j S_{jt})A_{jt-1}.$$

Die Umweltqualität S_t verhält sich gemäß dieser Differentialgleichung:

$$(12) S_{t+1} = -\xi Y_{dt} + (1 + \delta)S_t.$$

Dabei gilt, dass $S_{t+1} = 0$, wenn die rechte Seite von (12) negativ ist und $S_{t+1} = \bar{S}$, wenn die rechte Seite größer als \bar{S} ist. Der Parameter ξ gibt die Rate der Umweltzerstörung, die durch die Produktion von schmutzigem Input entsteht, und δ die Regenerationsrate der Umwelt an.

(12) beschreibt die Umweltexternalität und verkörpert viele zentrale Charakteristika des Klimawandels, die näher bereits in Kapitel 2.2 erläutert wurden: Durch die exponentielle Regenerationsrate δ werden die sogenannten Feedback-Prozesse modelliert, denn eine höhere Umweltverschmutzung führt zu einer geringeren Regenerationsrate des Planeten. Beispiele dafür sind die zunehmende Verringerung des Albedo-Effektes durch das Abschmelzen der Polkappen, welche atmosphärisches CO_2 absorbieren oder zunehmende Abholzung. Ebenso wird das Überschreiten der sogenannten „tipping-points“, die oft mit den Feedback-Prozessen einhergehen, ausgedrückt: Für $S_t = 0$, bleibt S_v stets 0 für alle $v > t$, was bedeutet, dass unumkehrbare, wohlfahrtsschädigende Prozesse eintreten. Hier sei an Annahme (2) $\lim_{S \downarrow 0} u(C, S) = -\infty$ erinnert.

Diese extremen Auswirkungen auf die Wohlfahrt werden fortan Umweltkatastrophe genannt. Es sei folglich definiert: Eine Umweltkatastrophe tritt ein, wenn $S_t = 0$ für $t < \infty$.

4.2 Das Laissez-Faire-Gleichgewicht

An dieser Stelle wird das Laissez-Faire-Gleichgewicht beschrieben und es wird gezeigt, dass dieses Gleichgewicht immer zu einer Umweltkatastrophe führt. Es soll nochmals daran erinnert werden, dass hierbei der Fall ohne erschöpfbare Ressource, also mit $\alpha_2 = 0$ ($\alpha_1 = \alpha$) betrachtet wird. Dieses Kapitel bezieht sich auf Acemoglu et al. (2012, S. 138–143, 160).

Das Gleichgewicht ist wie folgt definiert: Im Gleichgewicht verhalten sich Löhne, Inputpreise, Maschinenpreise, Maschinennachfrage, Inputnachfrage, Arbeitsnachfrage, Allokation der Wissenschaftler und Umweltqualität so, dass in jeder Periode t : (i) (p_{jit}, x_{jit}) die Gewinne der Maschinenproduzenten maximiert; (ii) L_{jt} die Gewinne der Inputproduzenten maximiert; (iii) Y_{jt} die Gewinne der Produzenten des finalen Gutes maximiert; (iv) (s_{ct}, s_{dt}) die erwarteten Gewinne

der Forscher maximiert, (v) Löhne ω_t und Preise p_{jt} den Arbeits- bzw. Inputmarkt räumen und (vi) S_t sich gemäß (12) entwickelt.

Es wird angenommen, dass der saubere Sektor gegenüber dem schmutzigen Sektor anfangs soweit unterentwickelt ist, dass die Innovation im unregulierten Gleichgewicht im schmutzigen Sektor startet. Dies wird durch folgende Annahme formuliert:

$$(13) \frac{A_{c0}}{A_{d0}} < \min \left\{ (1 + \gamma\eta_c)^{-\frac{\varphi+1}{\varphi}} \left(\frac{\eta_c}{\eta_d}\right)^{\frac{1}{\varphi}}, (1 + \gamma\eta_d)^{\frac{\varphi+1}{\varphi}} \left(\frac{\eta_c}{\eta_d}\right)^{\frac{1}{\varphi}} \right\}, \text{ mit } \varphi \equiv (1 - \alpha)(1 - \varepsilon).$$

Dadurch, dass das finale Gut unter Wettbewerbsbedingungen produziert wird, gilt für die relativen Preise der Inputs folgende Bedingung:

$$(14) \frac{p_{ct}}{p_{dt}} = \left(\frac{Y_{ct}}{Y_{dt}}\right)^{-\frac{1}{\varepsilon}}; \text{ mit } \frac{d\frac{p_{ct}}{p_{dt}}}{d\frac{Y_{ct}}{Y_{dt}}} = -\frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{Y_{ct}}{Y_{dt}}\right)^{-\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} < 0.$$

Der relative Preis des sauberen Inputs sinkt also mit steigendem relativem Angebot. Aus (14) lässt sich weiterhin entnehmen, dass die relative Preiselastizität gleich der inversen Substitutionselastizität zwischen den beiden Sektoren ist. Der Preis des finalen Gutes ist für jeden Zeitpunkt auf 1 normiert:

$$(15) [p_{ct}^{1-\varepsilon} + p_{dt}^{1-\varepsilon}]^{\frac{1}{1-\varepsilon}} = 1.$$

Um ermitteln zu können, in welche Richtung sich der technologische Fortschritt entwickelt, müssen die erwarteten Gewinne der Wissenschaftler für beide Sektoren bestimmt werden. Dafür ist es im ersten Schritt notwendig, das Optimierungsproblem der Maschinenproduzenten zu formulieren:

$$(16) \max_{L_{jt}, x_{jit}} \left\{ p_{jt} L_{jt}^{1-\alpha} \int_0^1 A_{jit}^{1-\alpha} x_{jit}^\alpha di - w_t L_{jt} - \int_0^1 p_{jit} x_{jit} di \right\}$$

Die Bedingung erster Ordnung hinsichtlich x_{jit} in Verbindung mit der Gewinnfunktion $\pi_{jit} = (p_{jit} - \psi)x_{jit}$ ergibt folgende Gleichgewichtsgewinne (ausführlicher Rechenweg siehe Anhang):

$$(17) \pi_{jit} = (1 - \alpha)\alpha p_{jt}^{\frac{1}{1-\alpha}} L_{jt} A_{jit}$$

Um die erwarteten Gewinne eines Wissenschaftlers, der zu Zeit t in Sektor j beschäftigt ist, Π_{jt} , zu ermitteln, kombiniert man (17) mit der Wahrscheinlichkeit für eine erfolgreiche Innovation η_j und verwendet die Definition von durchschnittlicher Produktivität aus (10). So erhält man:

$$(18) \Pi_{jt} = \eta_j (1 + \gamma) (1 - \alpha) \alpha p_{jt}^{\frac{1}{1-\alpha}} L_{jt} A_{jt-1}$$

Wie im Anhang ausführlich gezeigt wird, sind Inputs, die mit einer relativen besseren Technologie produziert werden, relativ billiger bzw. herrschen im relativ unterentwickelten Sektor höhere Inputpreise:

$$(19) \frac{p_{ct}}{p_{dt}} = \left(\frac{A_{ct}}{A_{dt}} \right)^{-(1-\alpha)}, \text{ mit } \frac{d \frac{p_{ct}}{p_{dt}}}{d \frac{A_{ct}}{A_{dt}}} = -(1-\alpha) \left(\frac{A_{ct}}{A_{dt}} \right)^{-(2-\alpha)} < 0.$$

Hinsichtlich des Verhältnisses von Beschäftigung und durchschnittlicher Produktivität bzw. technischem Entwicklungsstand ergibt sich (Rechnung siehe Anhang):

$$(20) \frac{L_{ct}}{L_{dt}} = \left(\frac{A_{ct}}{A_{dt}} \right)^{-\varphi}, \text{ mit } \frac{d \frac{L_{ct}}{L_{dt}}}{d \frac{A_{ct}}{A_{dt}}} = -\varphi \left(\frac{A_{ct}}{A_{dt}} \right)^{-\varphi-1} > 0 \text{ für } \varepsilon > 1,$$

Anhand dieser Gleichung ist zu erkennen, dass im Sektor mit höherer durchschnittlicher Produktivität eine höhere Beschäftigung herrscht.

Nachdem nun die Zusammenhänge zwischen relativen Inputpreisen, relativer Beschäftigung und dem relativen Niveau an technologischer Entwicklung erörtert wurden, kann der relative Gewinn von Innovationen im sauberen Sektor gegenüber dem Schmutzigen ermittelt werden. Dafür verwendet man Gleichung (18) und erhält (siehe Anhang):

$$(21) \frac{\Pi_{ct}}{\Pi_{dt}} = \frac{\eta_c}{\eta_d} \times \left(\frac{p_{ct}}{p_{dt}} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \times \frac{L_{ct}}{L_{dt}} \times \frac{A_{ct-1}}{A_{dt-1}}.$$

Je größer dieses Verhältnis ist, umso rentabler sind Investitionen für Forschung und Entwicklung im sauberen Sektor. Es existieren drei Effekte, die die Anreize zur Innovation im sauberen Sektor beeinflussen:

- (i) Der direkte Produktivitätseffekt, der im Term $\frac{A_{ct-1}}{A_{dt-1}}$ ausgedrückt wird. Dieser Effekt lenkt die Innovation in den Sektor mit einer höheren Produktivität bzw. einem höheren technologischen Entwicklungsstand.
- (ii) Der Preiseffekt, der im Term $\left(\frac{p_{ct}}{p_{dt}} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}}$ ausgedrückt wird. Der Preiseffekt reizt Innovation im Sektor mit höheren Preisen, was gleichzeitig einen niedrigeren Entwicklungsstand bedeutet.
- (iii) Der Marktgrößeneffekt, ausgedrückt durch $\frac{L_{ct}}{L_{dt}}$, der Forschung und Entwicklung im Sektor mit höherer Beschäftigung anreizt., welcher im vorliegenden Fall mit $\varepsilon > 1$ der Sektor mit höherer durchschnittlicher Produktivität ist. Wie im Anhang gezeigt wird, kann (21) umgeschrieben werden zu:

$$(22) \frac{\Pi_{ct}}{\Pi_{dt}} = \frac{\eta_c}{\eta_d} \times \left(\frac{1+\gamma\eta_c s_{ct}}{1+\gamma\eta_d s_{dt}} \right)^{-\varphi-1} \times \left(\frac{A_{ct-1}}{A_{dt-1}} \right)^{-\varphi}.$$

Aus (22) lässt sich folgendes Lemma formulieren, unter welchen Umständen Innovation im Laissez-Faire-Gleichgewicht in den jeweiligen Sektoren stattfindet (eine genauere Charakterisierung des Gleichgewichts findet sich im Anhang):

Lemma 1:

- (1) Nur im sauberen Sektor ($s_{ct} = 1$) nur dann, wenn $\eta_c A_{ct-1}^{-\varphi} > \eta_d (1 + \gamma \eta_c)^{\varphi+1} A_{dt-1}^{-\varphi}$
- (2) Nur im schmutzigen Sektor ($s_{dt} = 1$) nur, wenn $\eta_d A_{dt-1}^{-\varphi} > \eta_c (1 + \gamma \eta_d)^{\varphi+1} A_{ct-1}^{-\varphi}$.
- (3) Es gibt Innovation in beiden Sektoren, wenn $\eta_d (1 + \gamma \eta_c)^{\varphi+1} A_{dt-1}^{-\varphi} = \eta_c (1 + \gamma \eta_d)^{\varphi+1} A_{ct-1}^{-\varphi}$ mit $s_{ct} + s_{dt} = 1$.

Hieraus geht hervor, dass Innovation im relativ weiterentwickelten Sektor stattfindet, wenn $\varepsilon > 1$. Die Produktion der Inputs sowie des finalen Gutes im Gleichgewicht können ausgedrückt werden als:

$$(23) Y_{ct} = (A_{ct}^{\varphi} + A_{dt}^{\varphi})^{-\frac{\alpha+\varphi}{\varphi}} A_{ct} A_{dt}^{\alpha+\varphi}, \quad Y_{dt} = (A_{ct}^{\varphi} + A_{dt}^{\varphi})^{-\frac{\alpha+\varphi}{\varphi}} A_{ct}^{\alpha+\varphi} A_{dt} \text{ und}$$

$$Y_t = (A_{ct}^{\varphi} + A_{dt}^{\varphi})^{-\frac{1}{\varphi}} A_{ct} A_{dt}.$$

Dadurch, dass der schmutzige Sektor anfangs relativ weiterentwickelt (Annahme (13)) und $\varepsilon > 1$ ist, findet nur dort Innovation statt ($s_{ct} = 0, s_{dt} = 1$). Dann wächst durch die in (11) beschriebene IPF nur A_{dt} mit der Rate $\gamma \eta_d$, während A_{ct} konstant bleibt. Dadurch wird der Abstand der technologischen Entwicklung in den beiden Sektoren weiterhin vergrößert, sodass für die nächste und alle darauffolgenden Perioden ebenfalls $s_{ct+1} = 0$ und $s_{dt+1} = 1$ gilt. Daraus folgt, dass es ohne Regulierungen ein einziges Gleichgewicht mit $s_{ct} = 0$ und $s_{dt} = 1$ für alle t gibt. Dies bedeutet, dass die Produktion des schmutzigen Inputs langfristig unbegrenzt mit der Rate $\gamma \eta_d$ wächst. Verbunden mit der Tatsache aus (12), dass auf $Y_{dt} > (1 + \delta) \xi^{-1} \bar{S}$ eine Katastrophe in der nächsten Periode folgt, ergibt sich folgende Aussage:

Satz 1: Es gelte (13) und $\varepsilon > 1$. Dann existiert ein einziges Laissez-Faire-Gleichgewicht, in dem Innovation ausschließlich im schmutzigen Sektor stattfindet, die Produktion des schmutzigen Inputs langfristig mit der Rate $\gamma \eta_d$ wächst und in welchem eine Umweltkatastrophe stattfindet (Acemoglu et al. 2012, S. 141).

Aus diesem Satz folgt, dass Interventionen vonnöten sind, um eine Katastrophe abzuwenden. Diese könnten die Form einer proportionalen Profitsubvention für den sauberen Sektor annehmen, die durch eine lump-sum-Steuer finanziert wird.

Mit einer solchen Subvention q_t sind die erwarteten Gewinne im sauberen Sektor gegeben durch:

$$(24) \Pi_{ct} = (1 + q_t) \eta_c (1 + \gamma) (1 - \alpha) \alpha p_{ct}^{\frac{1}{1-\alpha}} L_{ct} A_{ct-1},$$

während die erwarteten Gewinne für den schmutzigen Sektor weiterhin durch (18) gegeben sind. Daraus ergibt sich, dass eine ausreichend hohe Subvention q_t Innovation vollständig in den sauberen Sektor leiten kann. Weiterhin wächst das Verhältnis A_{ct}/A_{dt} mit der Rate $\gamma \eta_c$ während die Subvention in Kraft ist. Für den vorliegenden Fall, indem die Sektoren Substitute ($\varepsilon > 1$)

zueinander darstellen, wird A_{ct}/A_{dt} durch die Subvention so groß, dass es für die Wissenschaftler profitabel ist, auch ohne Subvention nur noch im sauberen Sektor zu forschen. Abhängig vom Grad der Substituierbarkeit der Sektoren, muss die Subvention temporär oder permanent eingesetzt werden, um eine Umweltkatastrophe abzuwenden:

Satz 2: Wenn die Sektoren stark substituierbar sind, das heißt, $\varepsilon \geq 1/(1 - \alpha)$ bzw. $\alpha + \varphi \leq 0$, dann gilt $\lim_{A_{ct} \rightarrow \infty} Y_{dt} = (A_{ct}^\varphi + A_{dt}^\varphi)^{-\frac{\alpha+\varphi}{\varphi}} A_{ct}^{\alpha+\varphi} A_{dt} = 0$. Mit einem ausreichend hohen \bar{S} genügt eine temporäre Subvention, um eine Katastrophe abzuwenden. Sind sie hingegen nur schwach substituierbar, dementsprechend $\varepsilon \in (1, 1/(1 - \alpha))$ bzw. $\alpha + \varphi > 0$, wächst Y_{dt} mit der gleichen Rate wie $A_{ct}^{\alpha+\varphi}$, also mit $(1 + \gamma\eta_c)^{\alpha+\varphi} - 1 > 0$, und folglich muss q_t permanent eingesetzt werden (Acemoglu et al. 2012, S. 142).

An dieser Stelle sind zwei der anfangs genannten Effekte zu erkennen. Der Marktgrößeneffekt sorgt dafür, dass es mit steigendem A_{ct} mehr Beschäftigung im sauberen Sektor gibt. Der Preiseffekt sorgt dafür, dass die Produktion des schmutzigen Inputs trotz konstantem A_{dt} gefördert wird. Wie oben zu sehen ist, dominiert der Marktgrößeneffekt im Fall der starken Substitute, wobei der Preiseffekt im Fall der schwachen Substitute stärker wirkt. Ebenso wird hier die Wichtigkeit von gerichtetem technologischem Wandel deutlich, denn er ist in der Lage, jegliche Innovation in den sauberen Sektor zu lenken. Mit einem ausreichend hohen Grad an Substituierbarkeit und ausreichend hoher anfänglicher Umweltqualität sorgen profitmaximierende Innovation und Produktion automatisch dafür, dass nur noch im sauberen Sektor geforscht wird, sobald die entsprechenden Technologien weit genug entwickelt sind. So kann eine Katastrophe ohne weitere Eingriffe abgewendet werden (vgl. Acemoglu et al. 2012, S. 138–143, 160).

Diese Aussage, die sich aus Satz 2 ergibt, ist die optimistischste, die aus dem Modell hervorgeht.

4.3 Optimale Umweltregulierungen

Nachdem nun das Gleichgewicht ohne Eingriffe, die damit verbundenen negativen Konsequenzen für die Gesellschaft sowie die Möglichkeiten zur Abwehr einer Umweltkatastrophe beschrieben wurden, soll im Folgenden das sozial optimale Gleichgewicht charakterisiert werden. Die Ausführungen in diesem Kapitel sind entlehnt aus Acemoglu et al. (2012, S. 147–150, 162–64).

Die effiziente Allokation im Modell zeichnet sich dadurch aus, dass die externen Effekte der Umweltzerstörung, der Monopolverzerrung sowie die Externalitäten, die im Forschungsprozess entstehen, internalisiert werden. Letztere gehen aus dem Umstand hervor, dass Wissenschaftler im unregulierten Gleichgewicht die positiven Auswirkungen ihrer Forschung auf zukünftige Produktivität nicht berücksichtigen. In der effizienten Verteilung der Ressourcen sind $Y_t, Y_{jt}, C_t,$

$x_{jit}, L_{jt}, S_{jt}, S_t$ und A_{jit} so gewählt, dass der intertemporale Nutzen des repräsentativen Haushaltes (1) unter den Nebenbedingungen (4), (5), (7), (8), (9), (11) und (12) maximiert wird (da es keine erschöpfbaren Ressourcen gibt ist $R_t = 0$ und $\alpha_2 = 0$). Wie im Folgenden gezeigt wird, ergibt sich daraus folgende Aussage:

Satz 3: Die effiziente Allokation kann erreicht werden, indem eine Steuer auf den schmutzigen Input erhoben, eine Subvention für saubere Forschung, sowie eine Subvention für den Gebrauch aller Maschinen eingeführt wird (Acemoglu et al. 2012, S. 147).

Es soll mit Y_t begonnen werden. Dafür bezeichne Λ_t den Lagrange-Multiplikator für (4) und drücke folglich den Schattenwert einer Einheit des finalen Gutes aus. Das Optimierungsproblem lautet dann

$$\max_{Y_t} L = \frac{1}{(1+\rho)^t} u(C_t(Y_t), S_t) + \Lambda_t \left(\left(Y_{ct}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} + Y_{dt}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} \right)^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}} - Y_t \right).$$

Aus der Bedingung erster Ordnung ergibt sich, dass der Schattenwert einer Einheit des finalen Gutes gleich dem Grenznutzen einer Konsumeinheit ist (Rechnung im Anhang):

$$(25) \Lambda_t = \frac{1}{(1+\rho)^t} \frac{\partial u(C_t, S_t)}{\partial C}$$

Als nächstes wird der Schattenwert einer Einheit der Umweltqualität S_t bestimmt. Der Lagrange-Multiplikator für (12) sei mit ω_t bezeichnet, wobei berücksichtigt werden muss, dass der Grad der Umweltqualität zum Zeitpunkt t Auswirkungen auf die nächste Periode hat:

$$\max_{S_t} L = \frac{1}{(1+\rho)^t} u(C_t, S_t) + \omega_{t+1}(-\xi Y_{dt} + (1 + \delta)S_t - S_{t+1}) + \omega_t(-\xi Y_{dt-1} + (1 + \delta)S_{t-1} + S_t)$$

Für den Schattenwert ω_t ergibt sich dann aus der Bedingung erster Ordnung (siehe Anhang):

$$(26) \omega_t = \frac{1}{(1+\rho)^t} \frac{\partial u(C_t, S_t)}{\partial S} + \omega_{t+1}(1 + \delta)I_{S_t < \bar{S}}.$$

Die Variable $I_{S_t < \bar{S}}$ nimmt für alle $S_t < \bar{S}$ den Wert 1, für $S_t = \bar{S}$ den Wert 0 an. Dies folgt aus Annahme (3). (26) impliziert, dass der Schattenwert der Umweltqualität zum Zeitpunkt t gleich ihrem Grenznutzen in dieser Periode plus dem Schattenwert von $(1 + \delta)$ Einheiten, den sie in der nächsten Periode generiert, ist. Damit wird ausgedrückt, dass zukünftige Generationen einen Nutzen aus einer höheren Umweltqualität zum jetzigen Zeitpunkt ziehen. Über eine Rekursion lässt sich (26) umschreiben zu (siehe Anhang):

$$(27) \omega_t = \sum_{v=t}^{\infty} (1 + \delta)^{v-t} \frac{1}{(1+\rho)^v} \frac{\partial u(C_v, S_v)}{\partial S} I_{S_t, \dots, S_v < \bar{S}}$$

Der Lagrange-Multiplikator für (5) sei mit Λ_{jt} bezeichnet. Das Verhältnis Λ_{jt}/Λ_t kann dann als Schattenpreis (des Produzenten) von Input j zum Zeitpunkt t relativ zum Preis des finalen Gutes interpretiert werden. Dieses Verhältnis soll fortan als \hat{p}_{jt} bezeichnet werden. Die Bedingungen erster Ordnung bezüglich Y_{ct} bzw. Y_{dt} ergeben dann (siehe Anhang):

$$(28) \hat{p}_{ct} = Y_{ct}^{-\frac{1}{\varepsilon}} \left(Y_{ct}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} + Y_{dt}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} \right)^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}} \quad \text{und} \quad \hat{p}_{dt} = Y_{dt}^{-\frac{1}{\varepsilon}} \left(Y_{ct}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} + Y_{dt}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} \right)^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}} - \frac{\omega_{t+1}\xi}{\Lambda_t}$$

An (28) wird deutlich, dass der soziale Planer einen Keil in Höhe von $\frac{\omega_{t+1}\xi}{\Lambda_t}$ zwischen das Grenzprodukt des schmutzigen Inputs und dessen Preis einführt. Der Keil entspricht den Umweltkosten einer weiteren Einheit schmutzigen Inputs (gemessen relativ zu Einheiten des finalen Gutes zum Zeitpunkt t). Dabei gilt es zu beachten, dass eine Einheit schmutzigen Inputs zum Zeitpunkt t ξ Umwelteinheiten zum Zeitpunkt $t+1$ zerstört. Um diese verursachte Umweltexternalität auszugleichen, wird der Keil in eine Steuer auf die Verwendung des schmutzigen Inputs transformiert:

$$(29) \tau_t = \frac{\omega_{t+1}\xi}{\Lambda_t \hat{p}_{dt}}$$

Wie eindeutig an (29) zu erkennen, ist diese Steuer umso größer, je höher der Schattenwert der Umweltqualität ist; je höher der Grenznutzen des Konsums ist und je niedriger der Preis des schmutzigen Inputs ist. Diese Gleichung lässt sich umschreiben zu (siehe Anhang):

$$(30) \tau_t = \frac{\xi}{\hat{p}_{dt}} \frac{\frac{1}{(1+\rho)} \sum_{v=t+1}^{\infty} \left(\frac{1+\delta}{1+\rho} \right)^{v-(t+1)} \frac{\partial u(C_v, S_v)}{\partial S} I_{S_{t+1}, \dots, S_v < \bar{S}}}{\partial u(C_t, S_t) / \partial C}$$

Anhand dieser Darstellung der Steuer ist zu erkennen, dass im Optimum die Grenzkosten, die bei der Reduktion einer Einheit des schmutzigen Inputs entstehen, gleich dem Grenznutzen einer höheren Umweltqualität in allen darauffolgenden Perioden sein müssen.

Durch die Umweltsteuer τ_t werden die externen Effekte durch die Umweltverschmutzung internalisiert. Nun wird die Monopolverzerrung korrigiert. Die Bedingung erster Ordnung hinsichtlich x_{jit} ergibt (siehe Anhang):

$$(31) x_{jit} = \left(\frac{\alpha}{\psi} \hat{p}_{jt} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} L_{jt} A_{jit}$$

Vergleicht man (31) mit der inversen Nachfrage im unregulierten Gleichgewicht, (A.1), fällt auf, dass in der sozial geplanten Allokation bestehende Maschinen intensiver genutzt werden. Man kann dieses Ausgleichen der Monopolverzerrung auch so interpretieren, als dass der soziale Planer eine Subvention m in Höhe von $1 - \alpha$ für Maschinen einführt, sodass ihr Preis den Grenzkosten entspricht: $(1 - m)p_{jit} = MC = (1 - (1 - \alpha)) \psi / \alpha = \psi \equiv \alpha^2$. Die Auswirkungen dieser Subvention sind auch in der Inputproduktion zu erkennen (Rechnung siehe Anhang):

$$(32) Y_{jt} = \left(\frac{\alpha}{\psi} \hat{p}_{jt} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} L_{jt} A_{jt}.$$

Verglichen mit dem Laissez-Faire-Gleichgewicht wird hier jeder Input mit dem Faktor $\alpha^{\frac{-\alpha}{1-\alpha}} \geq 1$ multipliziert, was durch den intensiveren Einsatz der Maschinen geschieht. Durch die Subvention m auf den Gebrauch aller Maschinen wird die Monopolverzerrung korrigiert, was bedeutet, dass nun noch die Wissensexternalität vom sozialen Planer berücksichtigt werden muss. Wie bereits oben erwähnt, müssen dafür die positiven Auswirkungen der Forschung auf die nächste Periode internalisiert werden. Dafür bezeichne μ_{jt} den Lagrange-Multiplikator für (11) und folglich damit den Schattenwert von durchschnittlicher Produktivität in Sektor j zum Zeitpunkt t . Die Bedingung erster Ordnung hinsichtlich A_{jt} ergibt (siehe Anhang):

$$(33) \mu_{jt} = \Lambda_t \left(\frac{\alpha}{\psi} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} (1 - \alpha) \hat{p}_{jt}^{\frac{1}{1-\alpha}} L_{jt} + \mu_{jt+1} (1 + \gamma \eta_j s_{jt+1}).$$

μ_{jt} gibt also den Schattenwert einer weiteren Einheit durchschnittlicher Produktivität an und ist gleich ihrem Grenznutzen zum Zeitpunkt t plus dem Schattenwert zum Zeitpunkt $t + 1 \times (1 + \gamma \eta_j s_{jt+1})$ (den zusätzlichen Produktivitätszuwachs, den sie zum Zeitpunkt $t + 1$ generiert). Dieser letzte Term beschreibt die Wissensexternalität, welche nun vom sozialen Planer internalisiert wird.

Im sozial optimalen Gleichgewicht richtet sich die Allokation der Wissenschaftler gemäß dem höheren sozialen Nutzenzuwachs durch Innovation, welcher mit $\gamma \eta_j \mu_{jt} A_{jt-1}$ gemessen wird, wobei hingegen im Laissez-Faire-Gleichgewicht der private Nutzenzuwachs ausschlaggebend ist. In der effizienten Allokation forschen Wissenschaftler im sauberen Sektor, wenn (Rechnung siehe Anhang):

$$(34) \frac{\eta_c (1 + \gamma \eta_c s_{ct})^{-1} \sum_{v \geq t} \frac{\partial u(C_v, S_v) / \partial C}{(1 + \rho)^v} \hat{p}_{ct}^{\frac{1}{1-\alpha}} L_{cv} A_{cv}}{\eta_d (1 + \gamma \eta_d s_{dt})^{-1} \sum_{v \geq t} \frac{\partial u(C_v, S_v) / \partial C}{(1 + \rho)^v} \hat{p}_{dv}^{\frac{1}{1-\alpha}} L_{dv} A_{dv}} > 1.$$

Um das effiziente Gleichgewicht zu erreichen, kann der soziale Planer eine Subvention für saubere Forschung q_t einführen. Äquivalent zu Gleichung (22) im Laissez-Faire-Gleichgewicht werden nun die relativen erwarteten Gewinne gebildet (Rechnung siehe Anhang):

$$(35) \frac{\Pi_{ct}}{\Pi_{dt}} = (1 + q_t) \frac{\eta_c}{\eta_d} \left(\frac{1 + \gamma \eta_c s_{ct}}{1 + \gamma \eta_d s_{dt}} \right)^{-\varphi - 1} \left(\frac{A_{ct-1}}{A_{dt-1}} \right)^{-\varphi} (1 + \tau_t)^\varepsilon.$$

Schließt die optimale Allokation $s_{ct} = 1$ und somit $s_{dt} = 0$ ein, kann man q_t so wählen, dass der obige Ausdruck größer als eins wird (siehe Anhang):

$$(36) q_t \geq \hat{q}_t \equiv \frac{\eta_d}{\eta_c} (1 + \gamma \eta_c)^{\varphi + 1} \left(\frac{A_{ct-1}}{A_{dt-1}} \right)^\varphi (1 + \tau_t)^{-\varepsilon} - 1.$$

Wie an der formellen Beschreibung der sozial geplanten Allokation zu erkennen ist, werden drei Instrumente verwendet, um die Ineffizienzen des unregulierten Gleichgewichtes zu korrigieren: Die Subvention auf alle Maschinen m , die Steuer auf schmutzige Inputs („Kohlenstoffsteuer“) τ_t und die Subvention für saubere Forschung q_t . Dass sowohl eine Kohlenstoffsteuer als auch eine Subvention vonnöten sind, folgt aus der intertemporalen Wohlfahrtsmaximierung: Die Steuer internalisiert die aktuellen negativen externen Umwelteffekte durch eine Reduktion der schmutzigen Inputproduktion, wobei die Subvention zukünftige Externalitäten berücksichtigt, indem Forschung im sauberen Sektor gefördert wird. Die Kohlenstoffsteuer verringert durch eine geringere Produktion im schmutzigen Sektor darüber hinaus auch die Anreize für Innovation in diesem Sektor. Es ist jedoch wichtig hervorzuheben, dass es suboptimal wäre, ausschließlich eine Kohlenstoffsteuer einzusetzen, um Innovation in den sauberen Sektor zu steuern. Denn dies würde eine höhere Steuer bedeuten, welche durch ein geringeres Konsumniveau in der aktuellen Periode starke Verzerrungen durch verringerten Konsum verursachen würde.

Wie in Kapitel 4.1 gezeigt wurde, kann eine temporäre Subvention, um die Forschung vollständig in den sauberen Sektor zu leiten, eine Umweltkatastrophe abwenden. Die in diesem Kapitel beschriebenen Regulierungen sind (abgesehen von der Monopolsteuer m) unter gewissen Umständen ebenfalls nur temporär anzuwenden:

Satz 4: Angenommen $\varepsilon > 1$ und ρ ist ausreichend klein. Dann verlagert sich alle Forschung in finiter Zeit in den sauberen Sektor, die Wirtschaft wächst asymptotisch mit der Rate $\gamma\eta_c$ und die Subvention für saubere Forschung q_t ist temporär. Wenn $\varepsilon > 1/(1 - \alpha)$, ist die Steuer τ_t ebenfalls temporär (Acemoglu et al. 2012, S. 149).

Diese Aussage kann folgendermaßen belegt werden: Da die optimale Regulierung eine Umweltkatastrophe verhindern muss, muss Y_{dt} unter ein bestimmtes Niveau begrenzt sein, genauer gesagt $Y_{dt} \leq (1 + \delta)\bar{S}/\xi$. Diese Begrenzung ist möglich, da die beiden Inputs substituierbar sind. Ist die Diskontrate ausreichend klein, maximiert langfristiges Wachstum unter ausschließlichem Einsatz des sauberen Inputs die intertemporale Wohlfahrt. Eine unvollständige Verlagerung der Forschung in finiter Zeit in den sauberen Sektor würde bedeuten, dass weniger Inputs produziert werden und dies würde eine geringere intertemporale Wohlfahrt implizieren. Eine optimale Subvention q_t lenkt die gesamte Forschung in den sauberen Sektor, wodurch A_{ct} soviel größer als A_{dt} wird, dass Innovation im sauberen Sektor auch ohne Subvention rentabel genug ist, um weiterhin nur dort stattzufinden. Folglich muss q_t nur temporär eingesetzt werden. Die Wirtschaft wächst langfristig dementsprechend mit der gleichen Rate wie A_{ct} , $\gamma\eta_c$. Wenn $\varepsilon > 1/(1 - \alpha)$ ist, konvergiert Y_{dt} langfristig gegen 0, was wiederum bedeutet, dass die Umweltqualität

ihre Obergrenze \bar{S} wegen positiver Regeneration in finiter Zeit erreicht. Wie in (30) zu erkennen ist, führt dies aufgrund von $I_{S_t=\bar{S}} = 0$ zu $\tau_t = 0$, was bedeutet, dass die Kohlenstoffsteuer ebenfalls nur temporär erhoben wird. Ist hingegen $\varepsilon < 1/(1 - \alpha)$, würde Y_{dt} auch mit $s_{dt} = 0$ weiterhin wachsen, weshalb in diesem Fall eine permanente Kohlenstoffsteuer vonnöten wäre (Acemoglu et al. 2012, S. 149–150).

4.4 Erschöpfbare Ressourcen

An dieser Stelle soll nun kurz der Fall diskutiert werden, bei dem der schmutzige Input unter Verwendung einer erschöpfbaren Ressource verwendet wird ($\alpha_2 > 0$). Dieses Kapitel bezieht sich auf Acemoglu et al. (2012, S. 150–154).

Da die Implikationen recht ähnlich zum bereits untersuchten Fall sind, werden hierbei vor allem die grundlegenden Unterschiede betont. Dafür wird wieder das Laissez-Faire-Gleichgewicht dem sozial geplanten Gleichgewicht gegenübergestellt. Weiterhin wird zwischen einem Fall ohne klar definierte Eigentumsrechte, bei dem die Nutzungskosten der Ressource nur durch die Extraktionskosten bestimmt werden, und einem Fall mit definierten Rechten, bei dem der Preis nach der Hotelling-Regel bestimmt wird, unterschieden.

Bei $\alpha_2 > 0$ verändert sich die Struktur des Laissez-Faire-Gleichgewichtes nur geringfügig, da die relative Profitabilität von Innovation noch immer von den eingangs genannten Effekten bestimmt wird: dem direkten Produktivitätseffekt, dem Marktgrößeneffekt und dem Preiseffekt. Nun bestimmt der Ressourcenbestand jedoch die Stärke des Marktgrößen- und Preiseffektes: Mit abnehmendem Bestand sinkt die effektive Produktivität des schmutzigen Inputs und erhöht seinen Preis; der Anteil an Beschäftigung im sauberen Sektor sinkt mit steigenden Extraktionskosten. Die Implikationen des Laissez-Faire-Gleichgewichtes für den vorliegenden Fall ergeben folgende Aussage, welche im Folgenden näher erläutert wird:

Satz 5: Wenn $\varepsilon > 1$, findet Forschung langfristig nur im sauberen Sektor statt und die Wirtschaft wächst mit der Rate $\gamma\eta_c$. Ist \bar{S} ausreichend groß, wird eine Umweltkatastrophe ohne Regulierungen abgewendet (Acemoglu et al. 2012, S. 151).

Um diese Aussage zu belegen, untersucht man das Verhältnis der erwarteten Gewinne:

$$(37) \quad \frac{\Pi_{ct}}{\Pi_{dt}} = \kappa \frac{\eta_c c(Q_t)^{\alpha_2(\varepsilon-1)} (1+\gamma\eta_c s_{ct})^{-\varphi-1} A_{ct-1}^{-\varphi}}{\eta_d (1+\gamma\eta_d s_{dt})^{-\varphi_1-1} A_{dt-1}^{-\varphi_1}},$$

mit $\kappa \equiv \frac{(1-\alpha)\alpha}{(1-\alpha_1)\alpha_1^{(1+\alpha_2-\alpha_1)/(1-\alpha_1)}} \left(\frac{\alpha^{2\alpha}}{\psi^{\alpha_2} \alpha_1^{2\alpha_1} \alpha_2^{\alpha_2}} \right)^{(\varepsilon-1)}$ und $\varphi_1 \equiv (1 - \alpha_1)(1 - \varepsilon)$.

Vergleicht man (37) mit (22) aus dem Fall ohne erschöpfbare Ressource, ist zu erkennen, dass der Hauptunterschied im Term $c(Q_t)^{\alpha_2(\varepsilon-1)}$ liegt. Da $c(Q_t)$ monoton fallend in Q_t ist, steigen mit abnehmenden Ressourcenbestand die Anreize, im sauberen Sektor zu forschen. Daraus lässt sich

folgern, dass es langfristig nur Forschung im sauberen Sektor gibt, da entweder der Preis des schmutzigen Inputs durch die Extraktionskosten ausreichend gestiegen ist oder der Ressourcenbestand aufgebraucht ist. Da $\varepsilon > 1$ und die Inputs somit substituierbar sind, wächst die Wirtschaft langfristig mit der Rate $\gamma\eta_c$ und eine Umweltkatastrophe kann abgewendet werden, wenn die Ausgangsumweltqualität ausreichend groß ist. Wie zu erkennen ist, werden in diesem Fall Anreize zur sauberen Forschung vom Markt geschaffen, welche unter gewissen Umständen ausreichen, um eine Umweltkatastrophe zu verhindern. Diese Erkenntnis unterscheidet sich vom Fall ohne erschöpfbare Ressource, bei welchem eine Umweltkatastrophe ohne Regulierungen unausweichlich ist. Dennoch ist das Laissez-Faire-Gleichgewicht im vorliegenden Fall aufgrund der Umwelt- und Wissensexternalitäten pareto-suboptimal. Daher soll nun kurz das sozial optimale Gleichgewicht beschrieben werden:

Die effiziente Allokation maximiert (1) unter den Nebenbedingungen (4), (5), (6), (7), (8), (9), (11), (12), sowie der Ressourcenrestriktion $Q_t \geq 0$ für alle t . Wie auch in Kapitel 4.2 werden die Monopolverzerrungen über eine Subvention korrigiert, die Umweltexternalität über eine Steuer und die Wissensexternalitäten über eine Subvention zur sauberen Forschung internalisiert. Darüber hinaus führt der soziale Planer eine „Ressourcensteuer“ ein, da die Extraktionskosten die Endlichkeit der Ressource und damit die sozialen Kosten nicht vollständig abbilden. Diese Ressourcensteuer muss permanent bestehen.

Werden die Eigentumsrechte über die erschöpfbaren Ressourcen klar definiert, wird ihr Preis über die Hotelling-Regel bestimmt. Dies bedeutet, dass der Preis so gewählt werden muss, dass der Grenznutzen einer heute geförderten Einheit dem diskontierten Grenznutzen einer Einheit, die morgen gefördert wird, entsprechen muss. Die Implikationen für diesen Fall hängen dementsprechend stärker von der Diskontrate ρ ab als in den zuvor besprochenen Szenarios. Sind ρ und ε ausreichend groß, wird eine Umweltkatastrophe ohne Eingriffe abgewendet. Sind sie jedoch zu niedrig, tritt eine Katastrophe im Laissez-Faire-Gleichgewicht ein. Die formelle Erläuterung dieses Falles wird aus Relevanzgründen ausgelassen. Die sozial optimale Regulierung ist identisch zum beschriebenen Fall ohne definierte Eigentumsrechte, nur dass die Ressourcensteuer hier nicht existiert.

Wie zu erkennen ist, ändern sich die Implikationen für die optimale Umweltregulierung unter Verwendung einer erschöpfbaren Ressource nur geringfügig. Die zentrale Erkenntnis ist hierbei, dass eine solche Ressource unter Umständen eine Umweltkatastrophe ohne zusätzliche Interventionen verhindern kann. Dennoch ergeben sich für die effiziente Allokation die gleichen Maßnahmen wie im eingangs beschriebenen Fall.

4.5 Verzögerungskosten

Dass Verzögerung von Interventionen Kosten verursacht, ist einleuchtend, wenn man an die Konsequenzen für die Umwelt und damit die Wohlfahrt unter Abwesenheit von Regulierungen denkt. In diesem Modell entstehen durch Verzögerung jedoch weitere Kosten, deren Modellierung im Folgenden kurz erläutert werden soll (vgl. Acemoglu et al. 2012, S. 143–144):

Es wird davon ausgegangen, dass der schmutzige Sektor anfangs weiter entwickelt ist (Annahme (13)). Verlagert sich Innovation nun vollständig in den sauberen Sektor, wächst die Wirtschaft langsamer im Vergleich zum Fall, in dem nur im weiter entwickelten, schmutzigen Sektor geforscht wird. Diese Kosten werden als Anzahl von Perioden T gemessen, die die Wirtschaft mit Regulierungen benötigt, um das gleiche Produktionsniveau ohne Regulierungen zu erreichen. Diese Übergangsphase, oder auch Phase des langsamen Wachstums, beginnend im Zeitpunkt t , wird folgendermaßen berechnet:

$$(38) T_t = \left[\frac{\ln\left(((1+\gamma\eta_d)^{-\varphi}-1)\left(\frac{A_{ct-1}}{A_{dt-1}}\right)^\varphi + 1 \right)}{-\varphi \ln(1+\gamma\eta_c)} \right].$$

Aus (38) folgt, dass für jedes $t \geq 1$, $T_t \geq 2$, was bedeutet, dass die Wirtschaft im Szenario mit jeglicher Forschung im sauberen Sektor mehr als eine Periode braucht, um das gleiche Outputniveau zu erreichen, dass sie in einer Periode unter Laissez-Faire erzielt hätte. Ebenso ist zu erkennen, dass T_t größer ist, je größer der anfängliche Unterschied zwischen dem Technologielevel, A_{dt-1}/A_{ct-1} , und je höher die Substitutionselastizität zwischen den beiden Sektoren, ε , ist. Je höher ε , umso stärker sind die beiden Sektoren substituierbar, und umso mehr verwendet die Produktion des finalen Gutes nur den produktiveren Input. Dies wiederum bedeutet, dass Produktivitätsverbesserungen im sauberen Sektor weniger Auswirkungen auf die Produktion des finalen Gutes haben, bis die saubere Technologie weiterentwickelt als die Schmutzige ist. Ein höherer Unterschied im Entwicklungsstand hat zur Folge, dass Innovation im sauberen Sektor länger braucht, um den Produktivitätsrückstand aufzuholen. Damit verlängert sich die Übergangsphase. Verzögerung von Intervention verursacht demnach Kosten, da das Verhältnis A_{dt-1}/A_{ct-1} in der Zwischenzeit stärker anwächst und so eine längere Übergangsphase mit langsamem Wachstum verursacht. Diese Modellierung, zusätzlich zur fortschreitenden Umweltzerstörung, impliziert, dass Interventionen und Regulierungen mit sofortiger Wirkung ergriffen werden sollten.

4.6 Alternative Modellierungen und Grenzen des Modells

In den vorhergehenden Kapiteln wurde das von Acemoglu et al. (2012) entwickelte Wachstumsmodell beschrieben, wobei insbesondere auf den Fall von substituierbaren Inputs sowie nicht erschöpfbarer Ressourcen eingegangen wurde. Die Autoren stellen in ihrem Modell allerdings weitere alternative Modellierungen vor, die jedoch an dieser Stelle nicht näher erläutert werden sollen. Es sei an dieser Stelle lediglich darauf hingewiesen, dass folgende Alternativen ebenfalls von Acemoglu et al. (2012) behandelt werden: der empirisch eher irrelevante Fall mit komplementären Inputs; alternative Modellierungen der Umweltqualität; Fälle, in denen die Umweltqualität die aggregierte Produktion beeinflussen und nicht den Nutzen; sowie der Fall, in dem die Nutzung der erschöpfbaren Ressource allein für die Umweltzerstörung verantwortlich ist. Abgesehen vom Fall mit komplementären Inputs ergeben sich aus diesen Alternativen jedoch fast identische Implikationen zu denen des Baseline-Modells.

Das Modell besitzt einige Grenzen sowie kritikwürdige Aspekte: Eine klare Trennung von sauberen und schmutzigen Inputs wird mit Hinblick auf den realen Energiesektor kontrovers diskutiert (Beispiel Atomenergie). Ebenso berücksichtigt das Modell keinen Wissenstransfer durch LBD und klassifiziert sich aufgrund der exogen festgelegten Menge an Wissenschaftlern nicht als „vollständiges endogenes Wachstumsmodell“ (Hourcade et al. 2011, S. 5). Hinzu kommt, dass die Implikationen des Modells sehr stark von der Substitutionselastizität der Inputs abhängen und die von den Autoren verwendeten beispielhaften Werte wohl nicht realistisch sind (vgl. Hourcade et al. 2011). In Kapitel 5.2 wird auf die Rolle dieses kritischen Faktors näher eingegangen.

4.7 Ergebnisse

Um die folgende Analyse der Umweltregulierungen in Mexiko auf der theoretischen Grundlage des beschriebenen Modells klar zu strukturieren, werden an dieser Stelle die herausgearbeiteten zentralen und relevanten Erkenntnisse zusammengefasst.

Die optimale Umweltregulierung besteht aus einer Kohlenstoffsteuer und einer Subvention für saubere Forschung, welche abhängig von der Substitutionselastizität jeweils nur temporär eingesetzt werden müssen. Eine Subvention für alle Maschinen muss ständig eingesetzt werden, um die Monopolverzerrungen zu korrigieren. Die Verwendung einer erschöpfbaren Ressource kann unter Umständen eine Umweltkatastrophe ohne Eingreifen verhindern. Die optimale Umweltregulierung beinhaltet für diesen Fall jedoch die gleichen Maßnahmen wie im Fall ohne erschöpfbare Ressource, zusätzlich zu einer Ressourcensteuer. In jedem Fall sollten die Maßnahmen unverzüglich ergriffen werden, da Verzögerung von Interventionen kostspielig ist. Die optimale Strategie beinhaltet eine sofortige Verlagerung aller Forschungsaktivitäten in den sauberen Sektor sowie eine graduelle, vollständige Umstellung auf saubere Inputs. Der kritische

Parameter, von dem die Implikationen in diesem Modell abhängen, ist die Substitutionselastizität der beiden Inputsektoren. Acemoglu et al. (2012) verwenden in ihrer illustrativen Simulation verschiedene Werte für diesen Parameter, um dies zu verdeutlichen. Da sich die Subvention für alle Maschinen nicht auf die Umweltexternalität bezieht, wird in der Analyse lediglich auf die Kohlenstoffsteuer und Forschungssubvention Bezug genommen.

5. Analyse: Optimale Umweltregulierungen in Mexiko

Nun soll der Frage nachgegangen werden, ob die existierende Klimapolitik Mexikos gemäß den Kriterien von Acemoglu et al. (2012) optimal ist und, falls nicht, welche zusätzlichen Maßnahmen erforderlich wären. Im Zuge dessen werden einige Eingrenzungen getroffen: Im beschriebenen Modell wird ein einzelnes finales Gut hergestellt, wobei saubere und schmutzige Inputs verwendet werden können und die Wahl des Inputs allein über den Zustand der Umweltqualität entscheidet. Um diese Modellierung auf Mexiko anwenden zu können, wird nur der Energiesektor betrachtet, wobei Energie das finale Gut darstellt und mithilfe von sauberen und schmutzigen Inputs erzeugt werden kann. Diese Eingrenzung auf den Energiesektor erscheint sinnvoll, erwägt man den überproportional großen Anteil des Sektors an den gesamten THG-Emissionen Mexikos (siehe Kapitel 3). Ebenso kann die Modellierung der sauberen und schmutzigen Inputs leicht übertragen werden, indem die in Kapitel 3 beschriebene Unterscheidung zwischen „sauberer“ und „schmutziger“ Energietechnologie verwendet wird. Selbstverständlich sind die realen Bedingungen in Mexiko wesentlich komplexer, dennoch verspricht eine Analyse auf Basis dieser Modellierungen robuste qualitative Schlussfolgerungen.

5.1 Kohlenstoffsteuer und Forschungssubventionen

Eine optimale Klimapolitik sieht eine graduelle, vollständige Umstellung von umweltschädlichen Energietechnologien auf saubere Technologien sowie eine sofortige Verlagerung aller Forschungsaktivitäten zu sauberen Energien vor. Zu ersterem existieren solide Hinweise, dass dies (zumindest in der Stromerzeugung) in Mexiko geschehen kann: Durch das Energiewendegesetz LTE wird eine schrittweise Erhöhung des Anteils von sauberer Energie in der Stromerzeugung von 50% bis 2050 festgeschrieben, über diesen Zeithorizont hinaus existieren keine Ziele. Dieser Zeithorizont ist jedoch üblich für Ziele der Energiewende im internationalen Vergleich, wie auch in Deutschland (vgl. Bundesregierung 2017). Ob Mexiko plant, den Anteil nach 2050 auf 100% zu steigern ist ungewiss, jedoch ist es theoretisch denkbar, dass dies in der näheren Zukunft (im Verlauf des 21. Jahrhunderts) geschehen kann. Auf den gesamten Primärenergieverbrauch bezogen gestaltet sich eine solche Maßnahme gegebenenfalls als etwas schwieriger. Zwar werden im Sonderprogramm des Klimawandels PECC Maßnahmen beschrieben, die zur Reduzierung des

Anteils von fossilen Brennstoffen mit hohem THG-Emissionen beispielsweise im Transportsektor führen sollen, jedoch gibt es bisher keine festen Ziele dafür (vgl. Gobierno de la República 2014b, S. 55–60). Um die angestrebten Anteile von sauberer Energie an der Stromversorgung zu erzielen, werden in Mexiko mehrere Instrumente eingesetzt. Zum einen gibt es die sauberen Energiezertifikate CEL, deren obligatorischer Anteil jedes Jahr sukzessiv erhöht wird, um die Zunahme sauberer Energie zu garantieren. Zum anderen gibt es eine Kohlenstoffsteuer, welche auch explizit von Acemoglu et al. (2012) als Bestandteil einer optimalen Umweltregulierung genannt wird. Kohlenstoffsteuern bzw. die Bepreisung von Kohlenstoff stellen eine der wichtigsten Instrumente zur Einhaltung von Klimazielen dar, so auch für das Klimaabkommen von Paris im Jahr 2015. Seit 2014 gilt in Mexiko ein Preis von ca. 3,21US\$/tCO_{2e} für flüssige Brennstoffe, ausgenommen Erdgas, und ca. 1US\$/tCO_{2e} für Kohle. Die genauen Raten werden inflationsbedingt jedes Jahr neu festgesetzt und betragen maximal 3% des Preises des Gutes (Muñoz Piña 2015). Dieser Wert ist im internationalen Vergleich sehr niedrig (World Bank 2016, S. 17). Jedoch gibt es in Hinblick auf die mexikanische Kohlenstoffsteuer eine Besonderheit, die sich in der Struktur der Energiepolitik Mexikos begründet. Bis zur Energiereform 2013 wurden die Preise für Benzin und Diesel am Anfang eines Jahres festgesetzt und etwaige Schwankungen vom internationalen Ölpreis wurden vom Fiskus ausgeglichen. Dies bedeutet, dass die mexikanische Regierung Benzin und Diesel subventionierte, wenn der internationale Ölpreis über dem festgelegten nationalen Preis lag. Dies war seit 2006 beinahe durchgehend der Fall, wodurch im Zeitraum von 2007 bis 2011 schätzungsweise 1,2% des BIP für eine Subvention für fossile Brennstoffe aufgewendet wurden (Anton-Sarabia und Hernandez-Trillo 2014, S. 565). Eine solche Preispolitik war aufgrund des staatlichen Monopols von PEMEX bezüglich Import und Produktion von Öl möglich. Durch die Energiereform 2013 wurde der Markt für Wettbewerber geöffnet und die Preise sollen nach einer schrittweisen Annäherung ab 2018 von Markt bestimmt werden (Reynoso und Montes 2016, S. 26). Weltweit existieren verschiedene Subventionen für fossile Brennstoffe, welche neben den negativen Umwelteffekten auch dazu führen, dass Innovation in alternative Infrastrukturen gehemmt werden (World Bank 2016, S. 74). Durch die Eliminierung dieser Subvention wird der Preis für fossile Brennstoffe angehoben, womit schließlich das gleiche Ergebnis erzielt wird wie mit einer Steuer. Diese Maßnahme in Zusammenhang mit der Kohlenstoffsteuer qualifizieren als Bestandteile einer optimalen Klimapolitik gemäß Acemoglu et al. (2012). Dennoch gibt es auch hier Verbesserungsbedarf: Ein Preis von ca. 3\$/tCO_{2e} ist sehr wahrscheinlich zu gering, um die negativen externen Effekte zu internalisieren und den Preis dieses schmutzigen Inputs in ausreichendem Maße anzuheben, um Innovation im sauberen Sektor zu fördern. Darüber hinaus sollte Erdgas ebenfalls von der Steuer betroffen sein. Zwar besitzt Erdgas, vor allem im Vergleich zu Kohle, eine geringe CO₂-Intensität,

jedoch nur, wenn es unter optimalen Bedingungen gefördert und genutzt wird. Eine Besteuerung der Emissionen von Erdgas würde Innovation zur Steigerung der Umwelteffizienz dieser Technologie führen, da niedrigere Emissionen geringere Kosten verursachen würden. Es lässt sich dementsprechend sagen, dass die im LTE formulierten Ziele zur Steigerung des Anteils von sauberer Energie in der Stromerzeugung trotz Fehlen eines formulierten 100%-Zieles als Maßnahme einer optimalen Klimapolitik gelten können. Betrachtet man als finales Gut jedoch die gesamte Energie und untersucht dementsprechend den PEV, müssten ähnlich klar artikulierte Ziele gemeinsam mit entsprechenden Strategien formuliert und umgesetzt werden.

Was lässt sich darüber hinaus bezüglich der Forschungsaktivitäten in den einzelnen Sektoren und entsprechender staatlichen Förderung sagen? Mexiko befindet sich hinsichtlich Investitionsausgaben für Forschung und Entwicklung im Energiebereich im Vergleich zu den restlichen OECD-Ländern auf den niedrigsten Rängen. Die Notwendigkeit von mehr Ausgaben in diesem Bereich, um die artikulierte Klimaziele einhalten zu können, führte zu einem starken Anstieg von ca. 13,9 Mio. US\$ auf 53,8 Mio. US\$ von öffentlichen Forschungsausgaben im Jahr 2013 (IEA 2017, S. 187). Zusätzlich wurden einige Institutionen und Programme geschaffen, um Innovation zu fördern. Im Sonderprogramm für Wissenschaft, Technologie und Innovation 2014-2018 (PECITI; 2014) wird unter anderem festgeschrieben, die Forschungsausgaben auf 1% des BIP bis 2018 anzuheben. Für den Energiebereich werden als oberste Prioritäten erneuerbare Energien sowie die Förderung von Kohlenwasserstoffen festgelegt (Gobierno de la República 2014c, S. 51). Die öffentlichen Ausgaben für Forschung und Entwicklung im Energiesektor werden durch Energiefonds finanziert. Seit 2008 existieren diese von der mexikanischen Regierung gegründeten Fonds und erhalten ihre Mittel aus einer Steuer in Höhe von 0,65% auf gefördertes Öl und Gas. 65% dieses Steueraufkommens gehen an den Fond für Kohlenwasserstoffe, 20% an den Fond für nachhaltige Energie sowie 15% an das mexikanische Petroleuminstitut. Der Fond für Kohlenwasserstoffe fördert F&E bei Extrahierung, Raffinerie und Produktion von Kohlenwasserstoffen, Entwicklung von Technologien im Bereich der Kohlenwasserstoffe sowie die Ausbildung von Humankapital in der Ölindustrie. Die Prioritäten des Fonds für nachhaltige Energie lauten Energieeffizienz, erneuerbare Energien, Gebrauch von saubereren Technologien und Diversifizierung der Energiematrix. 2014 wurden dem Fond für nachhaltige Energie zusätzlich 150 Mio. US\$ für den Zeitraum von 2014-2020 zur Schaffung von mehreren Forschungszentren gewährt (IEA 2017, S. 190). Unter diesen befindet sich das Innovationslabor der nachhaltigen Energie (LABINNOVA) sowie die Mexikanischen Energieinnovationszentren (CeMIE), welche Forschung im Bereich nachhaltiger Energien in Zusammenarbeit mit dem privatwirtschaftlichen Sektor fördern und finanzieren sollen (Secretaria de Energía 2017, S. 30). Zusätzlich stellen die Energiefonds Mittel für Stipendien zur Promotion bereit, jedoch auch mit einer Neigung zu

Kohlenwasserstoffen: Seit der Schaffung der Fonds wurden 605 Stipendien für diesen Bereich gewährt, für den Bereich Nachhaltigkeit hingegen nur 219 (IEA 2017, S. 194). Neben den nationalen Bestrebungen, Innovation hinsichtlich sauberer Energie zu fördern, ist Mexiko Mitglied bei der internationalen Initiative Mission Innovation, welche sich auf der Weltklimakonferenz in Paris 2015 dazu verpflichtet hat, nachhaltige Energieinnovationen weltweit zu fördern. Mexiko hat sich im Rahmen dieser Initiative das Ziel gesetzt, seine Ausgaben für diesen Bereich bis 2020 mehr als zu verdreifachen (von ca. 20 Mio. US\$ auf 67 Mio. US\$ jährlich) (Mission Innovation 2017). Es ist folglich zu erkennen, dass die öffentlichen Forschungsausgaben insgesamt und besonders hinsichtlich sauberer Energie stark angestiegen sind. Eine direkte Forschungssubvention, wie im Modell beschrieben, gibt es nicht, jedoch kann man die öffentlichen Ausgaben für Innovation durch die Energiefonds als eine Maßnahme verstehen, die einer Subvention sehr nahe kommt. Wie im Modell beschrieben, wird die Innovationsrichtung vom erwarteten Gewinn der Wissenschaftler bestimmt. Durch Maßnahmen wie Stipendien und weitere finanzielle Unterstützung, auch von Projekten von Privatunternehmen, wird der erwartete Gewinn eines Forschers gesteigert und beeinflusst so die Richtung des technologischen Fortschrittes. Dementsprechend ist die jetzige Klimapolitik Mexikos in dieser Hinsicht nicht optimal, da umweltschädliche Technologien (Kohlenwasserstoffe wie Erdöl) noch immer mit einem viel zu hohen Anteil gefördert werden, was beispielsweise durch die ungleiche Aufteilung der Gelder für die Energiefonds zugunsten der fossilen Brennstoffe zu erkennen ist. Um nach den in Kapitel 4 erläuterten Kriterien als optimale Klimapolitikmaßnahme zu gelten, sollten die aus der Öl- und Gassteuer finanzierten Mittel vollständig in den Fond der nachhaltigen Energie fließen und es sollten nur nachhaltige Projekte durch öffentliche Mittel gefördert werden. Diese Maßnahmen sollten mit sofortiger Wirkung ergriffen werden. Wie oben erläutert wurde, ist eine Verzögerung der Implementierung von optimalen Umweltregulierungen aus zweierlei Sicht kostspielig: Aufgrund der entstehenden Umweltexternalitäten und der wachsenden Technologielücke zwischen sauberen und schmutzigen Inputs. Die bestehende Förderung von Innovation im Bereich der Kohlenwasserstoffe vergrößert die Phase des langsamen Wachstums, die eintritt, sobald nur noch saubere Inputs zur Produktion verwendet werden. Daher sollte unverzüglich die gesamte Forschungsaktivität in den sauberen Sektor geleitet werden.

5.2 Der kritische Faktor: Die Substitutionselastizität

Es wurde festgestellt, dass sich Ansätze von im Sinn von Acemoglu et al. (2012) optimalen Umweltregulierungen in der Klimapolitik Mexikos finden. Nun soll auf den kritischen Faktor, die Substitutionselastizität, eingegangen werden. Wie in Kapitel 4 beschrieben, spielt die Substitutionselastizität zwischen den beiden Inputs eine entscheidende Rolle bezüglich der

Implikationen des Modells. Beispielsweise wäre im Fall von $\varepsilon < 1$ langfristiges Wachstums nicht möglich. Doch auch für den Fall, dass sie größer als eins ist, entscheidet die Größe dieses Parameters über die Struktur der Umweltregulierungen. In ihrem Kapitel 5 demonstrieren Acemoglu et al. (2012) anhand von Simulationen mit unterschiedlichen Werten für ε die Sensibilität des Modells hinsichtlich der Substitutionselastizität. Ohne empirische Nachweise zu erbringen, nehmen die Autoren an, dass man von einem Wert ausgehen kann, der deutlich über eins liegt, da saubere und schmutzige Energieträger gut zu substituieren seien. Daher werden für die Simulationen die Werte $\varepsilon = 3$ und $\varepsilon = 10$ gewählt. Die Implikationen, die sich aus einer Simulation mit dem größeren Wert ergeben, sind sehr optimistisch: So wäre eine Forschungssubvention für nicht einmal 20 Jahre vonnöten und die globale Durchschnittstemperatur würde nach weniger als 100 Jahren das vorindustrielle Niveau erreichen (Acemoglu et al. 2012, S. 155). Sind diese Werte auf realistisch? Aktuelle Forschungsergebnisse lassen Zweifel daran aufkommen. Hourcade et al. (2011) kommentieren Acemoglu et al. (2012) diesbezüglich kritisch und argumentieren, die angenommenen Werte seien zu hoch.¹¹ Dies begründe sich unter anderem darin, dass die aktuellen technischen Möglichkeiten für eine beinahe perfekte Austauschbarkeit zwischen Energieinputs nicht vorhanden seien. Hourcade et al. (2011) bezweifeln grundsätzlich, dass das Bestimmen der Substitutionselastizität zwischen sauberen und schmutzigen Inputs möglich ist. Die am nächsten gelegene Größe ist nach Ansicht der Autoren die Preiselastizität der Nachfrage von Benzin, wofür sie einen Wert von 0,5 ermitteln (Hourcade et al. 2011, S. 3).

Für die ökonometrisch anspruchsvolle Aufgabe der Bestimmung der Substitutionselastizität zwischen verschiedenen Brennstoffen existiert eine Fülle an empirischer Literatur. Stern (2012) führt eine Metaanalyse von 47 Studien durch und erhält Werte, die stets größer als eins sind. Außerdem kommt er zu dem Ergebnis, dass die Elastizitäten abnehmen, je höher der Grad an ökonomischer Aggregation ist, also auf makroökonomischer Ebene am kleinsten sind (Stern 2012, S. 327). Jedoch untersucht Stern (2012) die Substituierbarkeit der einzelnen Energiequellen Kohle, Gas, Benzin und Elektrizität und trifft weder eine Unterscheidung zwischen sauberer und schmutziger Technologie, noch untersucht er die Elastizitäten innerhalb der Stromerzeugung, wo eine solche Unterscheidung durchaus plausibel wäre.

Arbeiten, die sich mit der Bestimmung der Substitutionselastizität zwischen sauberen und schmutzigen Inputs befassen, sind rar. Pelli (2011) erweitert eine frühere Version von Acemoglu et al. (2012) zu einem Multisektorenmodell, wobei er seine Analyse nur auf den Elektrizitätssektor

¹¹ Es sei darauf hingewiesen, dass Hourcade et al. (2011) eine frühere Version von Acemoglu et al. (2012) in Form eines Working Papers kommentieren. Die Kritikpunkte unterscheiden sich jedoch nicht zur veröffentlichten Endversion.

bezieht. Unter der Annahme perfekter Mobilität von Kapital in diesem Sektor bestimmt er die Substitutionselastizität zwischen sauberen und schmutzigen Inputs hinsichtlich der Stromerzeugung in 21 Ländern und erhält einen durchschnittlichen Wert von 0,51 (Pelli 2011, S. 1). Ein solcher Wert würde komplementäre Inputs bedeuten und hätte somit zur Folge, dass ein vollständiger Umstieg auf saubere Inputs mit langfristigem Wachstum unmöglich wäre.

Die bisher einzige Arbeit, die versucht, die Substitutionselastizität zwischen sauberen und schmutzigen Inputs auf makroökonomischer Ebene für den Elektrizitätssektor und Non-Energie-Sektor zu bestimmen, stammt von Papageorgiou et al. (2013). Die Autoren verwenden ebenfalls das in Kapitel 4 beschriebene Modell als Ausgangsbasis für die ökonometrische Analyse, jedoch beziehen sie Daten von der recht neuen World Input-Output Database (WIOD) von 26 Ländern über den Zeitraum von 1995-2009. Die Autoren erhalten Ergebnisse, die sich stark von den bisherigen Arbeiten unterscheiden: Alle ermittelten Werte für die Substitutionselastizität zwischen sauberen und schmutzigen Inputs sind signifikant größer als eins. Für den Elektrizitätssektor ergeben sich Werte von 1,8 bis zwei, für den Non-Energie-Sektor sogar Werte von bis zu drei. Es wird dabei jedoch betont, dass ein sehr hoher Wert wie $\varepsilon = 10$ unplausibel erscheint. Die unterschiedlichen Ergebnisse im Vergleich zu früheren Studien begründen Papageorgiou et al. (2013) in ihrer gewählten Methodologie, da sie ihre Analyse nicht, wie sonst üblich, anhand von Preisdaten strukturieren und zudem Zugriff auf neue Daten der WIOD besitzen (Papageorgiou et al. 2013, S. 30).

Die Substitutionselastizität, sowohl zwischen sauberen und schmutzigen Inputs als auch innerhalb von fossilen Brennstoffen, spielt eine zentrale Rolle hinsichtlich der Implikationen, die sich aus ökonomischen Modellen des Klimawandels ergeben (vgl. Antimiani et al. 2015). Die empirische Forschungslage diesbezüglich ist noch recht dünn und es existieren keine ausschließlich auf Mexiko bezogenen Werte. Dennoch lassen sich Tendenzen herausarbeiten. Eine Substitutionselastizität in Höhe von zehn ist nicht plausibel und etwaige optimistische Implikationen aus entsprechenden Simulationen sind nicht realistisch. Die empirisch gut fundierten Ergebnisse von Papageorgiou et al. (2013) lassen den Schluss zu, dass der Fall von komplementären Inputs ($\varepsilon < 1$) ebenso unplausibel ist und davon ausgegangen werden kann, dass die tatsächlichen Werte definitiv größer als eins sind. Wie in Kapitel 4 beschrieben, sind die Kohlenstoffsteuer und die Forschungssubvention nur temporär einzusetzen, wenn die Substitutionselastizität größer als die Inverse des Arbeitsanteils ist ($\varepsilon > \frac{1}{1-\alpha}$). Bei einem Standardwert von $\frac{2}{3}$ müsste dementsprechend $\varepsilon > 1,5$ sein. Ein solcher Wert ist denkbar, jedoch reichen die bisherigen empirischen Nachweise nicht aus, um robuste Schlussfolgerungen darüber zu treffen, ob die Kohlenstoffsteuer und Forschungssubvention in Mexiko nur temporär eingesetzt werden müssten. Es sei daran erinnert,

dass diese zeitliche Eingrenzung basierend auf der Substitutionselastizität ausschließlich für optimale Maßnahmen gilt, spricht für eine Forschungssubvention exklusiv für saubere Forschung und eine ausreichend hohe Kohlenstoffsteuer. Wie bereits oben erläutert, trifft dies im Fall von Mexiko nicht vollständig zu, weshalb davon ausgegangen werden kann, dass die implementierten Maßnahmen permanent eingesetzt werden müssen.

6. Fazit und Ausblick

Die vorliegende Arbeit ging der Frage nach, ob die gegenwärtige Klimapolitik Mexikos im Sinne von Acemoglu et al. (2012) optimal ist. Als theoretische Grundlage wurde dafür das Modell mit endogenem technologischen Wandel hinsichtlich optimaler Umweltregulierungen von Acemoglu et al. (2012) verwendet und die Analyse auf den mexikanischen Energiesektor eingegrenzt. Um der formulierten Frage nachzugehen, wurde eingangs in die Forschungslage des globalen Klimawandels sowie in die spezifischen Herausforderungen für Mexiko eingeführt. Es wurde gezeigt, dass anthropogene THG-Emissionen für tiefgreifende klimatische Veränderungen verantwortlich sind und Mexiko durch die entsprechenden Auswirkungen besonders gefährdet ist. Die implementierten klimapolitischen Maßnahmen und Ziele Mexikos wurden in Kapitel 3 dargestellt. Kapitel 4 widmete sich der Forschungslage zu Umweltregulierungen und ETW sowie der detaillierten Erläuterung des Modells von Acemoglu et al. (2012). Es wurden dabei einige klare Implikationen für optimale Umweltregulierungen herausgearbeitet. Das Laissez-Faire-Gleichgewicht führt im Fall ohne erschöpfbare Ressource stets zu einer Umweltkatastrophe mit extrem negativen Auswirkungen für die Wohlfahrt. Gerichteter technologischer Wandel jedoch ist in der Lage, eine solche Katastrophe abzuwenden, wobei seine Richtung durch den Marktgrößen- sowie den Preiseffekt bestimmt wird. Die optimale Strategie beinhaltet eine sofortige Verlagerung aller Forschungen in den sauberen Sektor sowie eine graduelle Umstellung auf saubere Inputs in der Produktion. Die optimalen Maßnahmen dafür sind eine Kohlenstoffsteuer sowie eine Forschungssubvention für saubere Technologien. Diese Regulierungen sollten unverzüglich eingesetzt werden, da Verzögerung Kosten verursacht. Der kritische Faktor, von dem die Implikationen des Modells signifikant abhängen, ist die Substitutionselastizität der beiden Inputsektoren.

Die Analyse der energetischen Aspekte der mexikanischen Klimapolitik in Hinblick auf diese Kriterien hat einige qualitative Ergebnisse hervorgebracht: Es existieren Ansätze von optimalen Umweltregulierungen gemäß des Modells, jedoch bedürfen sie in den meisten Fällen einer Anpassung. Die von der Regierung festgesetzten Ziele bezüglich der sauberen Energiewende stellen einen wichtigen Ausgangspunkt für eine optimale Klimapolitik dar. Die Einführung der Kohlenstoffsteuer qualifiziert als optimale Umweltregulierung, es ist jedoch sehr wahrscheinlich,

dass sie zu gering ist, um die gewünschten Effekte hinsichtlich Externalitäten und Richtung des Innovationsprozesses zu erzielen. Es muss allerdings zusätzlich zur jetzigen Höhe der Steuer die Steuerreform und damit einhergehende Abschaffung der Benzinsubventionen beachtet werden. Hinsichtlich der Forschungssubvention wurde festgestellt, dass die Einrichtung des Fonds für Forschung in nachhaltiger Energie als Ansatz einer optimalen Umweltregulierung zu verstehen ist, Forschungen im schmutzigen Sektor jedoch in einem noch viel zu hohem Maße vom Staat gefördert werden. Mexiko sollte seine öffentlichen Ausgaben für Forschung ausschließlich an den sauberen Sektor richten. Diese Schritte sollten unverzüglich eingeleitet werden, da ein größerer Abstand im Entwicklungsstand zwischen sauberer und schmutziger Technologie zusätzlich zur Umweltexternalität kostspielig ist.

Eine Analyse der empirischen Forschungen zur Substitutionselastizität für Mexiko ist aufgrund der stark limitierten Literatur schwierig. Auf Basis der verfügbaren quantitativen Daten lässt sich sagen, dass die von Acemoglu et al. (2012) vorgeschlagenen Werte zu hoch sind. Es existieren robuste Hinweise, dass saubere und schmutzige Energietechnologien substituierbar sind ($\varepsilon > 1$), jedoch in einem moderateren Ausmaß. Für die Umweltregulierungen hat dies zur Folge, dass sie sehr lange bzw. permanent eingesetzt werden müssen, um nachhaltiges Wachstum zu gewährleisten.

Die Implikationen von Modellen mit ETW hängen in erheblichem Maße von der Substitutionselastizität ab. Verlässliche empirische Forschungen diesbezüglich erscheinen folglich als vielversprechend.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass sich Mexiko - insbesondere als Entwicklungsland - auf einem guten Weg zu einer nachhaltigen und emissionsarmen Zukunft befindet. Die ambitionierten Klimaziele und Maßnahmen sprechen dafür. Dennoch besteht in vielerlei Hinsicht Handlungsbedarf und es bleibt zu hoffen, dass die in dieser Arbeit ermittelten Aktionspunkte in Zukunft beachtet werden.

Anhang

In diesem Anhang finden sich die ausführlichen Rechnungen zu den Ausführungen in Kapitel 4. Die Ausführungen hier beziehen sich damit auf die jeweiligen im Fließtext verwiesenen Stellen in Acemoglu et al. (2012).

Rechnungen zu Gleichung (17) im Text

Die BEO der Gewinnfunktion (16) $\max_{L_{jt}, x_{jit}} \left\{ p_{jt} L_{jt}^{1-\alpha} \int_0^1 A_{jit}^{1-\alpha} x_{jit}^\alpha di - w_t L_{jt} - \int_0^1 p_{jit} x_{jit} di \right\}$

hinsichtlich x_{jit} ergibt:

$$\text{BEO: } 0 = \alpha p_{jt} L_{jt}^{1-\alpha} A_{jit}^{1-\alpha} x_{jit}^{1-\alpha} - p_{jit} \quad | + p_{jit} \quad | : \alpha p_{jt} L_{jt}^{1-\alpha} A_{jit}^{1-\alpha}$$

$$\Rightarrow x_{jit}^{1-\alpha} = \frac{p_{jit}}{\alpha p_{jt} L_{jt}^{1-\alpha} A_{jit}^{1-\alpha}} \quad | \left(\cdot \right)^{\frac{1}{1-\alpha}}$$

$$\Rightarrow x_{jit} = \left(\frac{\alpha p_{jt} L_{jt}^{1-\alpha} A_{jit}^{1-\alpha}}{p_{jit}} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}}$$

$$\Rightarrow (\text{A.1}) \quad x_{jit} = \left(\frac{\alpha p_{jt}}{p_{jit}} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} L_{jt} A_{jit}$$

Es handelt sich hierbei um eine iso-elastische Nachfrage:

$$\varepsilon_{x_{jit}, p_{jit}} = \frac{dx_{jit}}{dp_{jit}} \frac{p_{jit}}{x_{jit}} = (\alpha p_{jt})^{\frac{1}{1-\alpha}} \left(\frac{1}{\alpha-1} \right) p_{jit}^{\frac{2-\alpha}{\alpha-1}} L_{jt} A_{jit} \frac{p_{jit}}{\left(\frac{\alpha p_{jt}}{p_{jit}} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} L_{jt} A_{jit}} = \frac{1}{\alpha-1}$$

Da die Maschinenproduzenten als Monopolisten ihre Preise gemäß der Markup-Regel setzen, ist folglich $p_{jit} = \left(\frac{1}{1+\frac{1}{\varepsilon}} \right) \psi = \frac{\psi}{\alpha}$. Eingesetzt in (A.1) ergibt dies

$$(\text{A.2}) \quad x_{jit} = p_{jt}^{\frac{1}{1-\alpha}} L_{jt} A_{jit}.$$

Setzt man (A.2) in die Gewinnfunktion $\pi_{jit} = (p_{jit} - \psi)x_{jit}$ ein, erhält man (17) im Text.

Rechnungen zu Gleichung (19) im Text

Nun wird der Zusammenhang zwischen den relativen Inputpreisen und dem relativen Niveau an technologischer Entwicklung hergestellt. Dafür bildet man die Bedingung erster Ordnung von (16) hinsichtlich L_{jt} und kombiniert diese mit (A.2):

$$\text{BEO: } 0 = (1 - \alpha) p_{jt} L_{jt}^{-\alpha} \int_0^1 A_{jit}^{1-\alpha} x_{jit}^\alpha di - \omega_t = \omega_t = (1 - \alpha) p_{jt} L_{jt}^{-\alpha} \int_0^1 A_{jit}^{1-\alpha} x_{jit}^\alpha di$$

$$\Rightarrow \omega_t = (1 - \alpha) p_{jt} L_{jt}^{-\alpha} \int_0^1 A_{jit}^{1-\alpha} p_{jt}^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} L_{jt}^\alpha A_{jit}^\alpha di$$

$$\begin{aligned}
\Rightarrow \omega_t &= (1 - \alpha) p_{jt}^{1 + \frac{\alpha}{1-\alpha}} \int_0^1 A_{jit} di & | \text{ setze ein (10) } = A_{jt} = \int_0^1 A_{jit} di \\
\Rightarrow \omega_t &= (1 - \alpha) p_{jt}^{\frac{1}{1-\alpha}} A_{jt} & | : p_{jt}^{\frac{1}{1-\alpha}} \\
\Rightarrow \omega_t p_{jt}^{\frac{1}{\alpha-1}} &= (1 - \alpha) A_{jt} & | : \omega_t \\
\Rightarrow p_{jt}^{\frac{1}{\alpha-1}} &= \frac{1-\alpha}{\omega_t} A_{jt} & | (\)^{\alpha-1} \\
\Rightarrow p_{jt} &= A_{jt}^{\alpha-1} \left(\frac{1-\alpha}{\omega_t} \right)^{\alpha-1}
\end{aligned}$$

Bildet man nun das Verhältnis der beiden Inputpreise p_{ct} und p_{dt} , erhält man Gleichung (19) im Text.

Rechnungen zu Gleichung (20) im Text

Die Produktion von Input j im Gleichgewicht erhält man, indem man (A.2) in (5) einsetzt:

$$\begin{aligned}
(5) Y_{jt} &= L_{jt}^{1-\alpha} \int_0^1 A_{jit}^{1-\alpha} x_{jit}^\alpha di, & (A.2) x_{jit} &= p_{jt}^{\frac{1}{1-\alpha}} L_{jt} A_{jt}, & (10) A_{jt} &= \int_0^1 A_{jit} di \\
\Rightarrow Y_{jt} &= L_{jt}^{1-\alpha} \int_0^1 A_{jit}^{1-\alpha} p_{jt}^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} L_{jt}^\alpha A_{jit}^\alpha di \\
\Rightarrow Y_{jt} &= L_{jt} p_{jt}^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \int_0^1 A_{jit} di & | \text{ setze (10) ein} \\
&& \Rightarrow (A.3) Y_{jt} &= L_{jt} p_{jt}^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} A_{jt}
\end{aligned}$$

Das Verhältnis von relativer Beschäftigung zu relativer Produktivität ergibt sich, indem man die Gleichungen (A.3) in (13) einsetzt. Anschließend benutzt man Gleichung (19) und die Definition $\varphi \equiv (1 - \varepsilon)(1 - \alpha)$

$$(13) \quad \frac{p_{ct}}{p_{dt}} = \left(\frac{Y_{ct}}{Y_{dt}} \right)^{-\frac{1}{\varepsilon}} \quad | \text{ setze (A.3) ein}$$

$$\begin{aligned}
\frac{p_{ct}}{p_{dt}} &= \left(\frac{A_{ct} L_{ct} p_{ct}^{\frac{\alpha}{1-\alpha}}}{A_{dt} L_{dt} p_{dt}^{\frac{\alpha}{1-\alpha}}} \right)^{-\frac{1}{\varepsilon}} = \frac{p_{ct}}{p_{dt}} = \left(\frac{A_{ct}}{A_{dt}} \right)^{-\frac{1}{\varepsilon}} \left(\frac{L_{ct}}{L_{dt}} \right)^{-\frac{1}{\varepsilon}} \left(\frac{p_{ct}}{p_{dt}} \right)^{-\frac{\alpha}{(1-\alpha)\varepsilon}} & | : \left(\frac{p_{ct}}{p_{dt}} \right)^{-\frac{\alpha}{(1-\alpha)\varepsilon}} \left(\frac{A_{ct}}{A_{dt}} \right)^{-\frac{1}{\varepsilon}} \\
\Rightarrow \left(\frac{L_{ct}}{L_{dt}} \right)^{-\frac{1}{\varepsilon}} &= \left(\frac{A_{ct}}{A_{dt}} \right)^{-\frac{1}{\varepsilon}} \left(\frac{p_{ct}}{p_{dt}} \right)^{1 + \frac{\alpha}{(1-\alpha)\varepsilon}} = \left(\frac{A_{ct}}{A_{dt}} \right)^{-\frac{1}{\varepsilon}} \left(\frac{p_{ct}}{p_{dt}} \right)^{\frac{\varepsilon - \varepsilon\alpha + \alpha}{\varepsilon - \varepsilon\alpha}} & | \varphi = \varepsilon\alpha - \alpha - \varepsilon + 1 \\
\Rightarrow \left(\frac{L_{ct}}{L_{dt}} \right)^{-\frac{1}{\varepsilon}} &= \left(\frac{A_{ct}}{A_{dt}} \right)^{-\frac{1}{\varepsilon}} \left(\frac{p_{ct}}{p_{dt}} \right)^{\frac{-\varphi + 1}{(1-\alpha)\varepsilon}} & | (\)^{-\varepsilon} \\
\Rightarrow \frac{L_{ct}}{L_{dt}} &= \left(\frac{A_{ct}}{A_{dt}} \right)^{-1} \left(\frac{p_{ct}}{p_{dt}} \right)^{\frac{\varphi - 1}{(1-\alpha)}} & | \text{ setze (19) } \quad \frac{p_{ct}}{p_{dt}} = \left(\frac{A_{ct}}{A_{dt}} \right)^{-(1-\alpha)} \text{ ein} \\
\Rightarrow \frac{L_{ct}}{L_{dt}} &= \left(\frac{A_{ct}}{A_{dt}} \right)^{-1} \left(\left(\frac{A_{ct}}{A_{dt}} \right)^{-(1-\alpha)} \right)^{\frac{\varphi - 1}{(1-\alpha)}}
\end{aligned}$$

$$\Rightarrow \frac{L_{ct}}{L_{dt}} = \left(\frac{A_{ct}}{A_{dt}}\right)^{-1} \left(\frac{A_{ct}}{A_{dt}}\right)^{1-\varphi}$$

$$\Rightarrow (20) \quad \frac{L_{ct}}{L_{dt}} = \left(\frac{A_{ct}}{A_{dt}}\right)^{-\varphi}, \text{ mit } \frac{d\frac{L_{ct}}{L_{dt}}}{d\frac{A_{ct}}{A_{dt}}} = -\varphi \left(\frac{A_{ct}}{A_{dt}}\right)^{-\varphi-1} > 0 \text{ f\"ur } \varepsilon > 1$$

Rechnungen zu Gleichung (21) im Text

$$(18) \quad \Pi_{jt} = \eta_j(1 + \gamma)(1 - \alpha)\alpha p_{jt}^{\frac{1}{1-\alpha}} L_{jt} A_{jt-1}$$

$$\frac{\Pi_{ct}}{\Pi_{dt}} = \frac{\eta_c(1 + \gamma)(1 - \alpha)\alpha p_{ct}^{\frac{1}{1-\alpha}} L_{ct} A_{ct-1}}{\eta_d(1 + \gamma)(1 - \alpha)\alpha p_{dt}^{\frac{1}{1-\alpha}} L_{dt} A_{dt-1}} = \frac{\eta_c p_{ct}^{\frac{1}{1-\alpha}} L_{ct} A_{ct-1}}{\eta_d p_{dt}^{\frac{1}{1-\alpha}} L_{dt} A_{dt-1}}$$

\Rightarrow

Rechnungen zu Gleichung (22) im Text und Beweis f\"ur Lemma 1

$$(17) \quad \frac{\Pi_{ct}}{\Pi_{dt}} = \frac{\eta_c}{\eta_d} \times \left(\frac{p_{ct}}{p_{dt}}\right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \times \frac{L_{ct}}{L_{dt}} \times \frac{A_{ct-1}}{A_{dt-1}}$$

$$(19) \quad \frac{p_{ct}}{p_{dt}} = \left(\frac{A_{ct}}{A_{dt}}\right)^{-(1-\alpha)}$$

$$(20) \quad \frac{L_{ct}}{L_{dt}} = \left(\frac{A_{ct}}{A_{dt}}\right)^{-\varphi}$$

$$(11) \quad A_{jt} = (1 + \gamma\eta_j s_{jt}) A_{jt-1}$$

$$\Rightarrow \frac{\Pi_{ct}}{\Pi_{dt}} = \frac{\eta_c}{\eta_d} \times \left(\left(\frac{A_{ct}}{A_{dt}}\right)^{-(1-\alpha)}\right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \times \left(\frac{A_{ct}}{A_{dt}}\right)^{-\varphi} \times \frac{A_{ct-1}}{A_{dt-1}}$$

$$\Rightarrow \frac{\Pi_{ct}}{\Pi_{dt}} = \frac{\eta_c}{\eta_d} \times \left(\frac{A_{ct}}{A_{dt}}\right)^{-\varphi-1} \times \frac{A_{ct-1}}{A_{dt-1}} \quad | \text{ setze (11) ein}$$

$$\Rightarrow \frac{\Pi_{ct}}{\Pi_{dt}} = \frac{\eta_c}{\eta_d} \times \left(\frac{1+\gamma\eta_c s_{ct}}{1+\gamma\eta_d s_{dt}}\right)^{-\varphi-1} \times \left(\frac{A_{ct-1}}{A_{dt-1}}\right)^{-\varphi-1} \times \frac{A_{ct-1}}{A_{dt-1}}$$

$$\Rightarrow (22) \quad \frac{\Pi_{ct}}{\Pi_{dt}} = \frac{\eta_c}{\eta_d} \times \left(\frac{1+\gamma\eta_c s_{ct}}{1+\gamma\eta_d s_{dt}}\right)^{-\varphi-1} \times \left(\frac{A_{ct-1}}{A_{dt-1}}\right)^{-\varphi}$$

Um die gleichgewichtige Allokation von Forschung in den beiden Sektoren zu bestimmen, wird (22) umgeschrieben zu:

$$(A.4) \quad f(s) \equiv \frac{\eta_c}{\eta_d} \left(\frac{1+\gamma\eta_c s}{1+\gamma\eta_d(1-s)}\right)^{-\varphi-1} \left(\frac{A_{ct-1}}{A_{dt-1}}\right)^{-\varphi} \text{ mit } s \in [0,1].$$

Es existieren drei Gleichgewichte:

- (i) wenn $f(1) > 1$, dann ist $s = 1$ ein Gleichgewicht;
- (ii) wenn $f(0) < 1$ dann ist $s = 0$ ein Gleichgewicht;
- (iii) wenn $f(s^*) = 1$ mit $s^* \in (0,1)$, dann ist $s = s^*$ ein Gleichgewicht.

Abhängig von der Substitutionselastizität ε liegen drei mögliche Fälle für $f(s)$ vor:

- (1) $f(s)$ ist monoton steigend für s , wenn $\varphi + 1 < 0$ (bzw. $\varepsilon > (2 - \alpha)/(1 - \alpha)$)
- (2) $f(s)$ ist monoton fallend für s , wenn $\varphi + 1 > 0$ (bzw. $\varepsilon < (2 - \alpha)/(1 - \alpha)$)
- (3) $f(s)$ ist konstant, wenn $\varphi + 1 = 0$.

An dieser Stelle soll auf den relevanteren Fall (1) eingegangen werden, für eine Charakterisierung des Gleichgewichts für alle Fälle siehe Acemoglu et al. (2012, S. 161).

Es gilt (1). Wenn $1 < f(0) < f(1)$, dann ist $s = 1$ das einzige Gleichgewicht. Wenn $f(0) < f(1) < 1$, dann ist $s = 0$ das einzige Gleichgewicht. Und schließlich existieren für $f(0) < 1 < f(1)$ drei Gleichgewichte: zwei Randlösungen $s = 0, s = 1$ und $s = s^* \in (0,1)$ mit $f(s^*) = 1$ (Acemoglu et al. 2012, S. 161).

Diese drei Gleichgewichte finden sich im Absatz zu Gleichung (22).

Rechnung zu Gleichung (25)

$$\max_{Y_t} L = \frac{1}{(1+\rho)^t} u(C_t, S_t) + \Lambda_t \left(\left(Y_{ct}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} + Y_{dt}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} \right)^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}} - Y_t \right)$$

$$\text{BEO: } \frac{\partial L}{\partial Y_t} = 0 = \frac{1}{(1+\rho)^t} \frac{\partial u(C_t, S_t)}{\partial C} \frac{\partial C_t}{\partial Y_t} - \Lambda_t \quad | \quad \frac{\partial C_t}{\partial Y_t} = 1$$

$$\Rightarrow \Lambda_t = \frac{1}{(1+\rho)^t} \frac{\partial u(C_t, S_t)}{\partial C}$$

Nun sei λ_t der Lagrange-Multiplikator für (8):

$$\max_{C_t} L = \frac{1}{(1+\rho)^t} u(C_t, S_t) + \lambda_t \left(Y_t - \psi \left(\int_0^1 x_{cit} di + \int_0^1 x_{dit} di \right) - C_t \right)$$

$$\text{BEO: } \frac{\partial L}{\partial C_t} = 0 = \frac{1}{(1+\rho)^t} \frac{\partial u(C_t, S_t)}{\partial C} - \lambda_t$$

Wie unschwer zu erkennen ist, ist der Schattenwert einer Konsumeinheit gleich ihrem Grenznutzen sowie gleich dem Schattenwert einer Einheit des finalen Gutes.

$$\Rightarrow (25) \quad \lambda_t = \Lambda_t = \frac{1}{(1+\rho)^t} \frac{\partial u(C_t, S_t)}{\partial C}$$

Rechnungen zu Gleichung (26)

$$\max_{S_t} L = \frac{1}{(1+\rho)^t} u(C_t, S_t) + \omega_{t+1}(-\xi Y_{dt} + (1+\delta)S_t - S_{t+1}) + \omega_t(-\xi Y_{dt-1} + (1+\delta)S_{t-1} + S_t)$$

$$\text{BEO: } \frac{\partial L}{\partial S_t} = 0 = \frac{1}{(1+\rho)^t} \frac{\partial u(C_t, S_t)}{\partial S} + \omega_{t+1}(1+\delta)I_{S_t < \bar{S}} - \omega_t$$

$$\Rightarrow (26) \quad \omega_t = \frac{1}{(1+\rho)^t} \frac{\partial u(C_t, S_t)}{\partial S} + \omega_{t+1}(1+\delta)I_{S_t < \bar{S}}$$

Rechnungen zu Gleichung (27)

Um (26) zu (27) umzuschreiben, wird (26) rekursiv gelöst:

$$\omega_t = \frac{1}{(1+\rho)^t} \frac{\partial u(C_t, S_t)}{\partial S} + \omega_{t+1}(1+\delta)I_{S_t < \bar{S}}$$

$$\Rightarrow \omega_t = \frac{1}{(1+\rho)^t} \frac{\partial u(C_t, S_t)}{\partial S} + (1+\delta)I_{S_t < \bar{S}} \left(\frac{1}{(1+\rho)^{t+1}} \frac{\partial u(C_{t+1}, S_{t+1})}{\partial S} + I_{S_{t+1} < \bar{S}}(1+\delta)\omega_{t+2} \right)$$

$$\Rightarrow \omega_t = \frac{(1+\delta)^0}{(1+\rho)^t} \frac{\partial u(C_t, S_t)}{\partial S} + I_{S_t < \bar{S}} \frac{(1+\delta)^1}{(1+\rho)^{t+1}} \frac{\partial u(C_{t+1}, S_{t+1})}{\partial S} + I_{S_t < \bar{S}} \frac{(1+\delta)^2}{(1+\rho)^{t+2}} \frac{\partial u(C_{t+2}, S_{t+2})}{\partial S} + \dots$$

$$\Rightarrow (27) \quad \omega_t = \sum_{v=t}^{\infty} (1+\delta)^{v-t} \frac{1}{(1+\rho)^v} \frac{\partial u(C_v, S_v)}{\partial S} I_{S_t, \dots, S_v < \bar{S}}$$

Rechnungen zu Gleichung (28)

$$\max_{Y_{ct}} L = \frac{1}{(1+\rho)^t} u(C_t, S_t) + \Lambda_{ct} \left(L_{ct}^{1-\alpha} \int_0^1 A_{cit}^{1-\alpha} x_{cit}^\alpha di - Y_{ct} \right) + \Lambda_t \left(\left(Y_{ct}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} + Y_{dt}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} \right)^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}} - Y_t \right)$$

$$\text{BEO: } \frac{\partial L}{\partial Y_{ct}} = 0 = -\Lambda_{ct} + \Lambda_t \frac{\varepsilon}{\varepsilon-1} \left(Y_{ct}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} + Y_{dt}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} \right)^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}} \frac{\varepsilon-1}{\varepsilon} Y_{ct}^{-\frac{1}{\varepsilon}}$$

$$\Rightarrow \Lambda_{ct} = \Lambda_t Y_{ct}^{-\frac{1}{\varepsilon}} \left(Y_{ct}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} + Y_{dt}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} \right)^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}}$$

$$\Rightarrow \frac{\Lambda_{ct}}{\Lambda_t} = \hat{p}_{ct} = Y_{ct}^{-\frac{1}{\varepsilon}} \left(Y_{ct}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} + Y_{dt}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} \right)^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}}$$

$$\begin{aligned} \max_{Y_{dt}} L &= \frac{1}{(1+\rho)^t} u(C_t, S_t) + \Lambda_{dt} \left(L_{dt}^{1-\alpha} \int_0^1 A_{dit}^{1-\alpha} x_{dit}^\alpha di - Y_{dt} \right) \\ &\quad + \Lambda_t \left(\left(Y_{ct}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} + Y_{dt}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} \right)^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}} - Y_t \right) + \omega_{t+1}(-\xi Y_{dt} + (1+\delta)S_t - S_{t+1}) \end{aligned}$$

$$\text{BEO: } \frac{\partial L}{\partial Y_{dt}} = 0 = -\Lambda_{ct} + \Lambda_t \frac{\varepsilon}{\varepsilon-1} \left(Y_{ct}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} + Y_{dt}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} \right)^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}} \frac{\varepsilon-1}{\varepsilon} Y_{dt}^{-\frac{1}{\varepsilon}} - \omega_{t+1} \xi$$

$$\Leftrightarrow \frac{\Lambda_{dt}}{\Lambda_t} = \hat{p}_{dt} = Y_{dt}^{-\frac{1}{\varepsilon}} \left(Y_{ct}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} + Y_{dt}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} \right)^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}} - \frac{\omega_{t+1} \xi}{\Lambda_t}$$

Die aus den BEOs ermittelten Teilergebnisse werden in Gleichung (28) zusammengefasst:

$$(28) \quad \hat{p}_{ct} = Y_{ct}^{-\frac{1}{\varepsilon}} \left(Y_{ct}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} + Y_{dt}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} \right)^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}}$$

$$\hat{p}_{dt} = Y_{dt}^{-\frac{1}{\varepsilon}} \left(Y_{ct}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} + Y_{dt}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} \right)^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}} - \frac{\omega_{t+1} \xi}{\Lambda_t}$$

Rechnungen zu Gleichung (30)

Um von (29) zu (30) zu gelangen, werden (25) und (27) in (29) eingesetzt:

$$(27) \quad \omega_t = \sum_{v=t}^{\infty} (1+\delta)^{v-t} \frac{1}{(1+\rho)^v} \frac{\partial u(C_v, S_v)}{\partial S} I_{S_t, \dots, S_v < \bar{S}}$$

$$(25) \quad \Lambda_t = \frac{1}{(1+\rho)^t} \frac{\partial u(C_t, S_t)}{\partial C}$$

$$(29) \quad \tau_t = \frac{\xi}{\hat{p}_{dt}} \frac{\omega_{t+1}}{\Lambda_t} = \frac{\xi}{\hat{p}_{dt}} \frac{\omega_{t+1} (1+\rho)^t}{\partial u(C_t, S_t) / \partial C}$$

$$= \frac{\xi}{\hat{p}_{dt}} \frac{(1+\rho)^t \sum_{v=t+1}^{\infty} (1+\delta)^{v-(t+1)} \frac{1}{(1+\rho)^v} \frac{\partial u(C_v, S_v)}{\partial S} I_{S_{t+1}, \dots, S_v < \bar{S}}}{\partial u(C_t, S_t) / \partial C}$$

$$= \frac{\xi}{\hat{p}_{dt}} \frac{\sum_{v=t+1}^{\infty} \frac{1}{(1+\rho)^{v-t}} (1+\delta)^{v-(t+1)} \frac{\partial u(C_v, S_v)}{\partial S} I_{S_{t+1}, \dots, S_v < \bar{S}}}{\partial u(C_t, S_t) / \partial C}$$

| erweitern mit $\frac{1+\rho}{1+\rho}$

$$= \frac{\xi}{\hat{p}_{dt}} \frac{(1+\rho) \sum_{v=t+1}^{\infty} \frac{1}{(1+\rho)^{v-t}} (1+\delta)^{v-(t+1)} \frac{\partial u(C_v, S_v)}{\partial S} I_{S_{t+1}, \dots, S_v < \bar{S}}}{(1+\rho) \partial u(C_t, S_t) / \partial C}$$

$$= (30) \quad \tau_t = \frac{\xi}{\hat{p}_{dt}} \frac{\frac{1}{(1+\rho)} \sum_{v=t+1}^{\infty} \left(\frac{1+\delta}{1+\rho} \right)^{v-(t+1)} \frac{\partial u(C_v, S_v)}{\partial S} I_{S_{t+1}, \dots, S_v < \bar{S}}}{\partial u(C_t, S_t) / \partial C}$$

Rechnungen zu Gleichung (31)

$$\max_{x_{jit}} L = \frac{1}{(1+\rho)^t} u(C_t, S_t) + \Lambda_t \left(Y_t - \psi \left(\int_0^1 x_{cit} di + \int_0^1 x_{dit} di \right) - C_t \right)$$

$$+ \Lambda_{jt} \left(L_{jt}^{1-\alpha} \int_0^1 A_{jit}^{1-\alpha} x_{jit}^\alpha di - Y_{jt} \right)$$

$$\text{BEO: } \frac{\partial L}{\partial x_{jit}} = -\Lambda_t \psi + \Lambda_{jt} \alpha L_{jt}^{1-\alpha} A_{jit}^{1-\alpha} x_{jit}^{\alpha-1} = 0$$

$$\Leftrightarrow \Lambda_t \psi = \Lambda_{jt} \alpha L_{jt}^{1-\alpha} A_{jit}^{1-\alpha} x_{jit}^{\alpha-1} \quad | : \Lambda_{jt} \alpha L_{jt}^{1-\alpha} A_{jit}^{1-\alpha}$$

$$\Leftrightarrow \frac{\Lambda_t \psi}{\Lambda_{jt} \alpha} L_{jt}^{\alpha-1} A_{jit}^{\alpha-1} = x_{jit}^{\alpha-1} \quad | \frac{\Lambda_{jt}}{\Lambda_t} = \hat{p}_{jt}$$

$$\Leftrightarrow \frac{\psi}{\alpha} \hat{p}_{jt}^{-1} L_{jt}^{\alpha-1} A_{jit}^{\alpha-1} = x_{jit}^{\alpha-1} \quad | (\)^{\frac{1}{\alpha-1}}$$

$$(31) \quad x_{jit} = \left(\frac{\alpha}{\psi} \hat{p}_{jt} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} L_{jt} A_{jit}$$

Rechnungen zu Gleichung (32)

Setze (31) in (5) ein:

$$Y_{jt} = L_{jt}^{1-\alpha} \int_0^1 A_{jit}^{1-\alpha} \left(\left(\frac{\alpha}{\psi} \hat{p}_{jt} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} L_{jt} A_{jit} \right)^\alpha di$$

$$\Leftrightarrow Y_{jt} = L_{jt} \left(\frac{\alpha}{\psi} \hat{p}_{jt} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \int_0^1 A_{jit} di \quad | \text{ setze (10) ein}$$

$$\Leftrightarrow (32) \quad Y_{jt} = \left(\frac{\alpha}{\psi} \hat{p}_{jt} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} L_{jt} A_{jt}$$

Rechnung zu Gleichung (33)

Nutzt man die Formel für den Gewinn $\pi_{jit} = (p_{jit} - \psi)x_{jit}$ und verwendet für den Preis vor Steuern $p_{jit} = \alpha; \psi \equiv \alpha^2$, sowie die Gleichung (31) erhält man den Gewinn vor Steuern: $\pi_{jit} =$

$$(\alpha - \alpha^2)x_{jit} = (1 - \alpha) \frac{\psi}{\alpha} x_{jit}$$

$$\Leftrightarrow \pi_{jit} = (1 - \alpha) \frac{\psi}{\alpha} \left(\frac{\alpha}{\psi} \hat{p}_{jt} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} L_{jt} A_{jit}$$

$$\Leftrightarrow \pi_{jit} = (1 - \alpha) \left(\frac{\alpha}{\psi} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \left(\hat{p}_{jt} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} L_{jt} A_{jit}$$

Nun wird die Lagrange-Funktion für die Nebenbedingung (11) aufgestellt. Für die erste Nebenbedingung kann hier die oben ermittelte Formel für den Gewinn verwendet werden, da in dem Modell jeglicher Überschuss konsumiert wird:

$$\max_{A_{jt}} L = \frac{1}{(1+\rho)^t} u(C_t, S_t) + \Lambda_t \left(\int_0^1 (1 - \alpha) \left(\frac{\alpha}{\psi} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \left(\hat{p}_{jt} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} L_{jt} A_{jit} di - C_t \right) +$$

$$\mu_{jt} \left((1 + \gamma \eta_j S_{jt}) A_{jt-1} - A_{jt} \right) + \mu_{jt+1} \left((1 + \gamma \eta_j S_{jt+1}) A_{jt} - A_{jt+1} \right) \quad | \text{ setze (10) ein}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \max_{A_{jt}} L &= \frac{1}{(1+\rho)^t} u(C_t, S_t) + \Lambda_t \left((1-\alpha) \left(\frac{\alpha}{\psi}\right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} (\hat{p}_{jt})^{\frac{1}{1-\alpha}} L_{jt} A_{jt} - C_t \right) + \\ &\mu_{jt} \left((1 + \gamma \eta_j s_{jt}) A_{jt-1} - A_{jt} \right) + \mu_{jt+1} \left((1 + \gamma \eta_j s_{jt+1}) A_{jt} - A_{jt+1} \right) \\ \Rightarrow \text{BEO: } \frac{\partial L}{\partial A_{jt}} &= (1-\alpha) \left(\frac{\alpha}{\psi}\right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} (\hat{p}_{jt})^{\frac{1}{1-\alpha}} L_{jt} - \mu_{jt} + \mu_{jt+1} (1 + \gamma \eta_j s_{jt+1}) = 0 \\ \Rightarrow (33) \quad \mu_{jt} &= \Lambda_t \left(\frac{\alpha}{\psi}\right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} (1-\alpha) \hat{p}_{jt}^{\frac{1}{1-\alpha}} L_{jt} + \mu_{jt+1} (1 + \gamma \eta_j s_{jt+1}) \end{aligned}$$

Rechnungen zu Gleichung (34)

In der optimalen Allokation werden die Forscher in den Sektor mit dem höheren sozialen Nutzenzuwachs $\gamma \eta_j \mu_{jt} A_{jt-1}$ zugeteilt. Nun setzt man (33) dort ein:

$$\gamma \eta_j A_{jt-1} \Lambda_t \left(\frac{\alpha}{\psi}\right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} (1-\alpha) \hat{p}_{jt}^{\frac{1}{1-\alpha}} L_{jt} + \mu_{jt+1} (1 + \gamma \eta_j s_{jt+1})$$

Aus (11) ergibt sich: $A_{jt-1} = A_{jt} (1 + \gamma \eta_j s_{jt})^{-1}$

$$\Rightarrow \gamma \eta_j A_{jt} (1 + \gamma \eta_j s_{jt})^{-1} \left(\Lambda_t \left(\frac{\alpha}{\psi}\right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} (1-\alpha) \hat{p}_{jt}^{\frac{1}{1-\alpha}} L_{jt} + \mu_{jt+2} (1 + \gamma \eta_j s_{jt+1}) \right)$$

$$\Rightarrow \gamma \eta_j A_{jt} (1 + \gamma \eta_j s_{jt})^{-1} \Lambda_t \left(\frac{\alpha}{\psi}\right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} (1-\alpha) \hat{p}_{jt}^{\frac{1}{1-\alpha}} L_{jt} + \gamma \eta_j A_{jt} (1 + \gamma \eta_j s_{jt})^{-1} \mu_{jt+2} (1 + \gamma \eta_j s_{jt+1})$$

Über eine rekursive Lösung lässt sich nun ein Term für alle Perioden fortlaufend ab t aufstellen, sodass man auf das Verhältnis des sozialen Nutzenzuwachses in den beiden Sektoren c und d kommt, welches im Optimum größer als 1 sein soll, damit der soziale Planer die Forscher in den sauberen Sektor zuteilt:

$$(A.5) \quad \frac{\eta_c (1 + \gamma \eta_c s_{ct})^{-1} \sum_{v \geq t} \Lambda_v \hat{p}_{ct}^{\frac{1}{1-\alpha}} L_{cv} A_{cv}}{\eta_d (1 + \gamma \eta_d s_{dt})^{-1} \sum_{v \geq t} \Lambda_v \hat{p}_{dv}^{\frac{1}{1-\alpha}} L_{dv} A_{dv}} > 1$$

Nun setzt man hier Gleichung (25) $\Lambda_t = \frac{1}{(1+\rho)^t} \frac{\partial u(C_t, S_t)}{\partial C}$ ein und erhält:

$$(34) \quad \frac{\eta_c (1 + \gamma \eta_c s_{ct})^{-1} \sum_{v \geq t} \frac{\partial u(C_v, S_v) / \partial C}{(1+\rho)^v} \hat{p}_{ct}^{\frac{1}{1-\alpha}} L_{cv} A_{cv}}{\eta_d (1 + \gamma \eta_d s_{dt})^{-1} \sum_{v \geq t} \frac{\partial u(C_v, S_v) / \partial C}{(1+\rho)^v} \hat{p}_{dv}^{\frac{1}{1-\alpha}} L_{dv} A_{dv}} > 1.$$

Rechnungen zu Gleichung (35)

Um die erwarteten Gewinne mit Berücksichtigung der Steuer sowie der Subvention zu erhalten, sei in einem ersten Schritt darauf hingewiesen, dass im Optimum gilt (Acemoglu et al. 2012, S. 164):

$$(A.6) \quad \hat{p}_{ct} \frac{1}{1-\alpha} A_{ct} = \hat{p}_{dt} \frac{1}{1-\alpha} A_{dt} = \frac{\hat{p}_{ct}}{\hat{p}_{dt}} = \left(\frac{A_{ct}}{A_{dt}} \right)^{\alpha-1}$$

Man verwendet nun die Gleichungen (28), (29), (32) und (A.6), um folgendes zu erhalten:

$$(32) \quad Y_{jt} = \left(\frac{\alpha}{\psi} \hat{p}_{jt} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} L_{jt} A_{jt} \quad | : \left(\frac{\alpha}{\psi} \hat{p}_{jt} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} A_{jt}$$

$$\Rightarrow L_{jt} = Y_{jt} \left(\frac{\alpha}{\psi} \hat{p}_{jt} \right)^{\frac{\alpha}{\alpha-1}} A_{jt}^{-1}$$

$$\Rightarrow \frac{L_{ct}}{L_{dt}} = \frac{Y_{ct}}{Y_{dt}} \left(\frac{p_{ct}}{p_{dt}} \right)^{\frac{\alpha}{\alpha-1}} \left(\frac{A_{ct}}{A_{dt}} \right)^{-1} \quad | \text{ setze (A.6) ein}$$

$$\Rightarrow \frac{L_{ct}}{L_{dt}} = \frac{Y_{ct}}{Y_{dt}} \left(\left(\frac{A_{ct}}{A_{dt}} \right)^{\alpha-1} \right)^{\frac{\alpha}{\alpha-1}} \left(\frac{A_{ct}}{A_{dt}} \right)^{-1}$$

$$\Rightarrow (32^\circ) \quad \frac{L_{ct}}{L_{dt}} = \frac{Y_{ct}}{Y_{dt}} \left(\frac{A_{ct}}{A_{dt}} \right)^{\alpha-1}$$

$$\text{Aus (28) ergibt sich: } \hat{p}_{dt} + \frac{\omega_{t+1}\xi}{\Lambda_t} = Y_{dt}^{\frac{1}{\varepsilon}} \left(Y_{ct}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} + Y_{dt}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} \right)^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}} \quad | : \left(Y_{ct}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} + Y_{dt}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} \right)^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}}$$

$$\Rightarrow (28.1) \quad Y_{dt}^{-\frac{1}{\varepsilon}} = \hat{p}_{dt} (1 + \tau) Y_{dt}^{-\frac{1}{\varepsilon}} \left(Y_{ct}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} + Y_{dt}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} \right)^{\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}}$$

$$\Rightarrow (28.2) \quad Y_{ct}^{-\frac{1}{\varepsilon}} = \hat{p}_{ct} \left(Y_{ct}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} + Y_{dt}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} \right)^{\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}} \quad | (28.2): (28.1)$$

$$\Rightarrow \left(\frac{Y_{ct}}{Y_{dt}} \right)^{-\frac{1}{\varepsilon}} = \frac{\hat{p}_{ct}}{\hat{p}_{dt}(1+\tau_t)} = \left(\frac{Y_{ct}}{Y_{dt}} \right)^{-\frac{1}{\varepsilon}} = \left(\frac{\hat{p}_{ct}}{\hat{p}_{dt}} \right) \left(\frac{1}{(1+\tau_t)} \right) \quad | ()^{-\varepsilon}$$

$$\Rightarrow \frac{Y_{ct}}{Y_{dt}} = \left(\frac{\hat{p}_{ct}}{\hat{p}_{dt}} \right)^{-\varepsilon} \left(\frac{1}{(1+\tau_t)} \right)^{-\varepsilon} = \frac{Y_{ct}}{Y_{dt}} = \left(\frac{\hat{p}_{ct}}{\hat{p}_{dt}} \right)^{-\varepsilon} (1 + \tau_t)^\varepsilon \quad | \text{ setze in (32}^\circ \text{) ein}$$

$$\Rightarrow \frac{L_{ct}}{L_{dt}} = \left(\frac{\hat{p}_{ct}}{\hat{p}_{dt}} \right)^{-\varepsilon} (1 + \tau_t)^\varepsilon \left(\frac{A_{ct}}{A_{dt}} \right)^{\alpha-1} \quad | \text{ setze (A.6) ein}$$

$$\Rightarrow \frac{L_{ct}}{L_{dt}} = \left(\left(\frac{A_{ct}}{A_{dt}} \right)^{\alpha-1} \right)^{-\varepsilon} (1 + \tau_t)^\varepsilon \left(\frac{A_{ct}}{A_{dt}} \right)^{\alpha-1}$$

$$\Rightarrow \frac{L_{ct}}{L_{dt}} = (1 + \tau_t)^\varepsilon \left(\frac{A_{ct}}{A_{dt}} \right)^{\varepsilon(1-\alpha)} \left(\frac{A_{ct}}{A_{dt}} \right)^{\alpha-1}$$

$$\Rightarrow \frac{L_{ct}}{L_{dt}} = (1 + \tau_t)^\varepsilon \left(\frac{A_{ct}}{A_{dt}} \right)^{\varepsilon-\varepsilon\alpha+\alpha-1} \quad | \varphi = \varepsilon\alpha - \varepsilon - \alpha + 1$$

$$\Rightarrow (A.7) \quad \frac{L_{ct}}{L_{dt}} = (1 + \tau_t)^\varepsilon \left(\frac{A_{ct}}{A_{dt}} \right)^{-\varphi}$$

Wie bei Gleichung (22) wird nun das Verhältnis der erwarteten Gewinne in den Sektoren bestimmt.

Hierfür wird der Gewinn gemäß $\pi_{jit} = (1 - \alpha) \left(\frac{\alpha}{\psi}\right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} (\hat{p}_{jt})^{\frac{1}{1-\alpha}} L_{jt} A_{jit}$ verwendet:

$$\frac{\Pi_{ct}}{\Pi_{dt}} = \frac{\eta_c}{\eta_d} \times \left(\frac{p_{ct}}{p_{dt}}\right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \times \frac{L_{ct}}{L_{dt}} \times \frac{A_{ct-1}}{A_{dt-1}} \quad | \text{ setze (A.7) ein und (11) } A_{jt} = (1 + \gamma\eta_c s_{ct}) A_{jt-1}$$

$$\Leftrightarrow \frac{\Pi_{ct}}{\Pi_{dt}} = \frac{\eta_c}{\eta_d} \left(\frac{p_{ct}}{p_{dt}}\right)^{\frac{1}{1-\alpha}} (1 + \tau)^\varepsilon \left(\frac{1 + \gamma\eta_c s_{ct}}{1 + \gamma\eta_d s_{dt}}\right)^{-\varphi} \left(\frac{A_{ct-1}}{A_{dt-1}}\right)^{-\varphi+1} \quad | \text{ setze (A.6) ein}$$

$$\Leftrightarrow \frac{\Pi_{ct}}{\Pi_{dt}} = \frac{\eta_c}{\eta_d} \left(\frac{1 + \gamma\eta_c s_{ct}}{1 + \gamma\eta_d s_{dt}}\right)^{-\varphi} \left(\frac{A_{ct}}{A_{dt}}\right)^{-1} \left(\frac{A_{ct-1}}{A_{dt-1}}\right)^{-\varphi+1} (1 + \tau_t)^\varepsilon \quad | \text{ setze (11) ein}$$

$$\Leftrightarrow \frac{\Pi_{ct}}{\Pi_{dt}} = \frac{\eta_c}{\eta_d} \left(\frac{1 + \gamma\eta_c s_{ct}}{1 + \gamma\eta_d s_{dt}}\right)^{-\varphi-1} \left(\frac{A_{ct-1}}{A_{dt-1}}\right)^{-\varphi} (1 + \tau_t)^\varepsilon$$

Nun bezieht man noch die Subvention q_t in die erwarteten Gewinne mit ein und erhält Gleichung (35) im Text.

Rechnungen zu Gleichung (36)

Schließt die optimale Allokation $s_{ct} = 1$ und somit $s_{dt} = 0$ ein, kann man q_t so wählen, dass das in (35) ausgedrückte Verhältnis größer als eins wird:

$$1 \leq (1 + q_t) \frac{\eta_c}{\eta_d} \left(\frac{1 + \gamma\eta_c s_{ct}}{1 + \gamma\eta_d s_{dt}}\right)^{-\varphi-1} \left(\frac{A_{ct-1}}{A_{dt-1}}\right)^{-\varphi} (1 + \tau_t)^\varepsilon \quad | s_{ct} = 1; s_{dt} = 0$$

$$\Leftrightarrow 1 \leq (1 + q_t) \frac{\eta_c}{\eta_d} (1 + \gamma\eta_c)^{-\varphi-1} \left(\frac{A_{ct-1}}{A_{dt-1}}\right)^{-\varphi} (1 + \tau_t)^\varepsilon \quad | : \frac{\eta_c}{\eta_d} (1 + \gamma\eta_c)^{-\varphi-1} \left(\frac{A_{ct-1}}{A_{dt-1}}\right)^{-\varphi} (1 + \tau_t)^\varepsilon$$

$$\Leftrightarrow \frac{\eta_d}{\eta_c} (1 + \gamma\eta_c)^{\varphi+1} \left(\frac{A_{ct-1}}{A_{dt-1}}\right)^\varphi (1 + \tau_t)^{-\varepsilon} = 1 + q_t$$

$$\Leftrightarrow (36) \quad q_t \geq \hat{q}_t \equiv \frac{\eta_d}{\eta_c} (1 + \gamma\eta_c)^{\varphi+1} \left(\frac{A_{ct-1}}{A_{dt-1}}\right)^\varphi (1 + \tau_t)^{-\varepsilon} - 1$$

Schließt die optimale Allokation $s_{ct} \in (0, 1)$ ein, muss q_t so gewählt werden, dass $\frac{\Pi_{ct}}{\Pi_{dt}} = 1$, um das gewünschte Ergebnis zu erhalten.

Literaturverzeichnis

Acemoglu, Daron (1998): Why do New Technologies Complement Skill? Directed Technical Change and Wage Inequality. In: *Quarterly Journal of Economics* 113 (4), S. 1055–1089.

Acemoglu, Daron (2002): Directed Technical Change. In: *Review of Economics Studies* 69 (4), S. 781–809.

Acemoglu, Daron (2009): Introduction to Modern Economic Growth. New York: Princeton University Press.

Acemoglu, Daron; Aghion, Philippe; Bursztyn, Leonardo; Hemous, David (2012): The Environment and Directed Technical Change. In: *American Economic Review* 102 (1), S. 131–166, zuletzt geprüft am 08.05.2017.

Acemoglu, Daron; Aghion, Philippe; Hemous, David (2014): The Environment and Directed Technical Change in a North-South Model. In: *Oxford Review of Economic Policy* 30 (3), S. 513–530.

Aghion, Philippe; Dechezleprêtre, Antoine; Hemous, David; Martin, Ralf; van Reenen, John (2016): Carbon Taxes, Path Dependency, and Directed Technical Change: Evidence from the Auto Industry. In: *Journal of Political Economy* 124 (1), S. 1–51.

Antimiani, Alessandro; Constantini, Valeria; Paglialonga, Elena (2015): The sensitivity of climate-economy CGE models to energy-related elasticity parameters: Implications for climate policy design. In: *Economic Modelling* 51, S. 38–52.

Anton-Sarabia, Arturo; Hernandez-Trillo, Fausto (2014): Optimal Gasoline Tax in Developing, Oil-Producing Countries: The Case of Mexico. In: *Energy Policy* 67, S. 564–571.

Bovenberg, A. Lans; Smulders, Sjak (1995): Environmental quality and pollution-augmenting technological change in a two-sector endogenous growth model. In: *Journal of Public Economics* 57, S. 369–391.

Bundesregierung (2017): Energiewende. Online verfügbar unter https://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiewende/Fragen-Antworten/1_Allgemeines/1_warum/_node.html, zuletzt geprüft am 07.07.2017.

Burck, Jan; Marten, Franziska; Bals, Christoph (2016): Climate Change Performance Index. Results 2017. Bonn: Germanwatch Nord-Süd Initiative e.V.

Calel, Raphael; Dechezleprêtre, Antoine (2016): Environmental policy and directed technological change. Evidence from the European carbon market. In: *Review of Economics and Statistics* 98 (1), S. 173–191.

Dobes, Leo; Jotzo, Frank; Stern, David I. (2014): The Economics of Global Climate Change: A Historical Literature Review. In: *Review of Economics* 65 (3), S. 281–320.

Gans, Joshua S. (2012): Innovation and Climate Change Policy. In: *American Economic Journal: Economic Policy* 4 (4), S. 125–145. DOI: 10.1257/pol.4.4.125.

- Gillingham, Kenneth; Newell, Richard G.; Pizer, William A. (2008): Modelling endogenous technological change for climate policy analysis. In: *Energy Economics* 30, S. 2734–2753.
- Gobierno de la República (2012): Ley General de Cambio Climático. LGCC. Online verfügbar unter http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC_010616.pdf, zuletzt geprüft am 04.07.2017.
- Gobierno de la República (2013): Estrategia Nacional de Cambio Climático. ENCC.
- Gobierno de la República (2014a): Ley de la Industria Eléctrica. LIE. Online verfügbar unter http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LIElec_110814.pdf, zuletzt geprüft am 06.07.2017.
- Gobierno de la República (2014b): Programa Especial de Cambio Climático 2014-2018. PECC.
- Gobierno de la República (2014c): Programa Especial de Ciencia, Tecnología e Innovación 2014-2018. PECiTI. Online verfügbar unter https://www.conacyt.gob.mx/images/conacyt/PECiTI_2014-2018.pdf, zuletzt geprüft am 11.07.2017.
- Goulder, Lawrence H.; Mathai, Koshy (2000): Optimal CO₂ Abatement in the Presence of Induced Technological Change. In: *Journal of Environmental Economics and Management* 39 (1), S. 1–38.
- Green Climate Fund (2017): About the fund. Online verfügbar unter <http://www.greenclimate.fund/who-we-are/about-the-fund>, zuletzt geprüft am 01.08.2017.
- Grimaud, Andre; Rouge, Luc (2008): Environment, Directed Technical Change and Economic Policy. In: *Environmental and Resource Economics* 41 (4), S. 439–463.
- Hémous, David (2016): The dynamic impact of unilateral environmental policies. In: *Journal of International Economics* 103, S. 80–95. DOI: 10.1016/j.jinteco.2016.09.001.
- Hourcade, Jean-Charles; Pottier, Antonin; Espagne, Etienne (2011): The Environment and Directed Technical Change: Comment. Hg. v. Fondazione Eni Enrico Mattei. CIRED, Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (Working Papers: 2011.95).
- IEA (2017): Energy Policies Beyond IEA Countries. Mexico 2017. International Energy Agency. Online verfügbar unter <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EnergyPoliciesBeyondIEACountriesMexico2017.pdf>, zuletzt geprüft am 08.07.2017.
- IPCC (2014a): Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Unter Mitarbeit von Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer. Genf.
- IPCC (2014b): Klimaänderung 2014: Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC). Unter Mitarbeit von R. K. Pachauri, L. A. Meyer und Hauptautoren. Genf.

- IPCC (2017): History. Online verfügbar unter http://www.ipcc.ch/organization/organization_history.shtml, zuletzt geprüft am 14.08.2017.
- IRENA (2015): Renewable Energy Policy Brief: Mexico. Abu Dhabi.
- Kennedy, C. (1964): Induced bias in innovation and the theory of distribution. In: *The Economic Journal* 74 (295), S. 541–547.
- Lexas (2017): Mexiko. Online verfügbar unter <http://www.lexas.de/nordamerika/mexiko/index.aspx>, zuletzt aktualisiert am 25.07.2017.
- Mission Innovation (2017): Member Participation: Mexico. Online verfügbar unter <http://mission-innovation.net/participating-countries/mexico/>, zuletzt geprüft am 16.07.2017.
- Muñoz Piña, Carlos (2015): Fossil Fuel Subsidy Reform in Mexico. Online verfügbar unter http://www.ewg.apec.org/documents/Session_2_Munoz.pdf, zuletzt geprüft am 07.07.2017.
- Nachmany, Michal; Frankhauser, Sam; Davidová, Jana; Kingsmill, Nick; Landesman, Tucker; Roppongi, Hitomi; Schleifer, Philip et al. (2015): Climate Change Legislation in Mexico. An Excerpt from The 2015 Global Climate Change Mitigation Study: A Review of Climate Change Legislation in 99 Countries. Grantham Research Institute on Climate Change and Environment; GLOBE; Inter-Parliamentary Union.
- National Academy of Science (2002): Abrupt Climate Change. Inevitable Surprises. Washington D.C.: National Academy Press.
- Nordhaus, William (1994): Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change. Cambridge: MIT Press.
- Nordhaus, William (2013): The Climate Casino. Risk, Uncertainty, and Economics for a Warming World: Yale University Press.
- Nordhaus, William; Boyer, Joseph G. (2000): Warming the World: Economic Models of Global Warming. Cambridge: MIT Press.
- Nordhaus, William D. (2007): A Review of the Stern Review on the Economics of Climate Change. In: *Journal of Economic Literature* 45 (3), S. 686–702. DOI: 10.1257/jel.45.3.686.
- OECD (2014): Mexican Fiscal Reform Environmental Taxes: Carbon Tax, Tax on Pesticides. Online verfügbar unter <https://www.oecd.org/tax/tax-global/Session%203%20-%20LUNA.pdf>, zuletzt geprüft am 07.07.2017.
- Papageorgiou, Chris; Saam, Marianne; Schulte, Patrick (2013): Elasticity of Substitution between Clean and Dirty Energy Inputs - A Macroeconomic Perspective. ZEW (Discussion Paper, 13-087). Online verfügbar unter <https://www.econstor.eu/handle/10419/100414>, zuletzt geprüft am 05.07.2017.
- Pelli, Martino (2011): The Elasticity of Substitution between Clean and Dirty Inputs in the Production of Electricity. Università della Svizzera Italiana (Discussion Paper). Online verfügbar unter <http://works.bepress.com/mpelli/3/>, zuletzt geprüft am 05.07.2017.

- Popp, David (2002): Induced Innovation and Energy Prices. In: *American Economic Review* 92 (1), S. 160–180. DOI: 10.1257/000282802760015658.
- Popp, David (2004): ENTICE. Endogenous technological change in the DICE model of global warming. In: *Journal of Environmental Economics and Management* 48 (1), S. 742–768.
- Reynoso, Luis Huesca; Montes, Alejandra López (2016): Impuestos ambientales al Carbono en México y su progresividad: una revisión analítica. In: *Economía Informa* 398, S. 23–39.
- Romero-Lankao, P.; Smith, J. B.; Davidson, D. J.; Diffenbaugh, N. S.; Kinney, P. L.; Kirshen, P. et al. (2014): 2014: North America. IPCC. New York (Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change). Online verfügbar unter http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/WGIIAR5-Chap26_FINAL.pdf, zuletzt geprüft am 23.07.2017.
- Salawitch, Ross J.; Canty, Timothy P.; Hope, Austin P.; Tribett, Walter R.; Bennett, Brian F. (2017): Paris Climate Agreement: Beacon on Hope: Springer Climate.
- Secretaría de Energía (2017): Programa Especial de la Transición Energética 2017-2018. PETE. Online verfügbar unter <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/213322/PETE.pdf>, zuletzt geprüft am 07.07.2017.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2013a): Programa Especial de Cambio Climático. PECC.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2013b): Resumen del Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Online verfügbar unter http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_AIRE02_01&IBIC_usuario=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce, zuletzt geprüft am 07.06.2017.
- Stern, David I. (2012): Interfuel Substitution: A Meta-analysis. In: *Journal of Economic Surveys* 26 (2), S. 307–331.
- Stern, Nicholas (2007): The Economics of Climate Change. The Stern Review. New York: Cambridge Univ. Press.
- Tol, Richard S. J. (1995): The Damage Costs of Climate Change Toward More Comprehensive Calculations. In: *Environmental and Resource Economics* 5 (4), S. 353–374.
- Tol, Richard S. J. (2009): The Economic Effects of Climate Change. In: *Journal of Economic Perspectives* 23 (2), S. 29–51.
- van den Bijgaart, Inge (2017): The Unilateral Implementation of a Sustainable Growth Path with Directed Technical Change. In: *European Economic Review* 91, S. 305–327.
- van der Zwaan, B.C.C.; Gerlagh, R.; Klaassen, G.; Schrattenholzer, L. (2002): Endogenous technological change in climate change modelling. In: *Energy Economics* 24, S. 1–19.

Veysey, Jason; Octaviano, Claudia; Calvin, Katherine; Herreras Martinez, Sara; Kitous, Alban; McFarland, James; van der Zwaan, Bob (2016): Pathways to Mexico's climate change mitigation targets: A multi model analysis. In: *Energy Economics* 56, S. 587–599.

World Bank (2016): States and Trends of Carbon Pricing 2016. Washington D.C. Online verfügbar unter <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/25160/9781464810015.pdf?sequence=7&isAllowed=y>, zuletzt geprüft am 07.07.2017.

World Bank (2017): Carbon Pricing Watch 2017. Online verfügbar unter <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/26565/9781464811296.pdf?sequence=4&isAllowed=y>, zuletzt geprüft am 07.07.2017.

Yohe, Gary W.; Schlesinger, Michael E. (2002): The Economic Geography of the Impacts of Climate Change. In: *Journal of Economic Geography* 2 (3), S. 311–341.