

12 Technologische Effekte in der langen Frist (agentenbasiertes Modell)

12.1 Einführung

12.1.1 Vorüberlegungen

Geänderte finanzielle Anreize können nicht nur eine Verschiebung der Nachfrage zwischen den Sektoren bedeuten, sondern in der langen Frist auch die technologische Entwicklung in eine andere Richtung lenken.

Die Frage, ob technologische Entwicklungen durch staatliche Interventionen wie zum Beispiel durch Subventionen induziert werden können, wurde in Deutschland mit der Einführung des EEG im Jahr 2000 öffentlich diskutiert. Im EEG aus dem Jahr 2000 wurde unter anderem die Subventionierung der Stromeinspeisung durch Solarkraftanlagen geregelt. Eine vom Bundestag eingesetzte Expertenkommission konnte im Jahr 2014 keine „messbare Innovationswirkung“ feststellen.¹⁵² Dem widersprachen daraufhin sowohl das Bundeswirtschaftsministerium als auch mehrere Wissenschaftler im Rahmen eines Expertenstatement des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung: „Die Unterzeichner kommen dabei zu dem Schluss, dass das EEG sehr wohl Innovationswirkung erzeugt und die Erneuerung der Energiesysteme unterstützt hat.“¹⁵³ Auch Samadi et al. (2013) kommen bspw. zum Schluss, dass diese Subvention ein zentraler Grund für die schnelle Verbesserung der Effizienz der PV-Module ab 2000 waren. Diese öffentliche Debatte zeigt nicht nur die Uneinigkeit, sondern auch die Wichtigkeit dieser Thematik.

Für den Blick auf die sektoralen Effekte sowie auf die Kostenerhöhungen und -senkungen und den Wechselwirkungen im Außenhandel wurde im vorherigen Kapitel ein Input-Output-Modell erstellt, technologische Veränderungen wurden jedoch ausgenommen. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel der Frage der Auswirkungen der ÖSR auf technologische Entwicklungen in der langen Frist nachgegangen.

¹⁵² Siehe Frankfurter Allgemeine Zeitung (<https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/wirtschaftspolitik/oekostrom-regierungsberater-wollen-eeg-abschaffen-12820227.html>, 27.03.2024) und Bundeswirtschaftsministerium (<https://www.bmwk-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2014/05/Meldung/bundesregierung-weist-eeg-kritik-der-expertenkommission-forschung-innovation-zurueck.html>, 27.03.2024).

¹⁵³ Siehe Webarchiv (ursprünglich Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, 2014): <https://web.archive.org/web/20140519002224/http://www.isi.fraunhofer.de/isi-de/service/presseinfos/2014/EFI-Expertenstatement.php> (27.03.2024).

12.1.2 Forschungsfragen und -hypothesen

Die übergreifende Fragestellung ist, wie sich die Technologie im Sinne der Input-Output-Verhältnisse verändert, wenn sich die Anreize für technologische Entwicklungen aufgrund der Einführung der ÖSR verändern. In drei Teilen werden drei unterschiedliche Themen bearbeitet. Jeder dieser Teile hat eigene Forschungshypothesen. Folgende Forschungsfragen werden mithilfe der Szenarioanalyse adressiert:

Szenarien A:

Wie unterscheidet sich die Wirkung auf technologische Entwicklungen bei den folgenden Szenarien: keine Reform, ÖSR und Ökobonus? Die folgenden Forschungshypothesen gilt es zu prüfen:

- A.i Durch die Preissteigerungen der ÖSR und des Ökobonus⁴ wird erwartet, dass die Unternehmen auf diese finanziellen Anreize reagieren, die technologische Entwicklung beeinflusst wird und eine größere Reduktion der THG-Emissionen erzielt wird (vgl. unter anderem Samadi et al., 2013; Jin et al.; 2022).
- A.ii Die Effekte auf die THG-Emissionen werden bei der ÖSR und dem Ökobonus ähnlich erwartet, da in beiden Fällen die gleichen THG-Preise eingeführt werden.
- A.iii Die Effekte auf die Arbeitsnachfrage werden der ÖSR-Literatur entsprechend (vgl. unter anderem Bosquet, 2000; Maxim & Zander, 2019; van der Ploeg et al., 2022) bei der ÖSR am günstigsten erwartet, da in diesem Szenario die Arbeitskosten reduziert werden und gleichzeitig die THG-Emissionen verteuert werden. Diese Wirkung wird in abgeschwächter Form auch beim Ökobonus erwartet, da auch hier eine relative Kostenverschiebung zugunsten der Arbeit stattfindet.

Szenarien B:

Das Modell dieses Kapitels hat einen Schwerpunkt auf technologischer Entwicklung. Mit den Szenarien B soll der Frage nachgegangen werden, ob einzelne Modellannahmen der technologischen Entwicklung signifikante Unterschiede verursachen können. Dazu gehört auch die Frage, unter welchen Annahmen über die technologische Entwicklung die THG-Emissionen entsprechend den nationalen Klimazielen reduziert werden können. Die folgende Forschungshypothese gilt es zu prüfen:

- B.i Die Veränderung der Kostenanreize über die THG-Steuer und den Arbeitskosten ist nicht ausreichend, um die THG-Reduktionen den Klimazielen entsprechend zu erreichen (vgl. Amendola et al., 2024), so dass es zusätzlich einer Steigerung der grundsätzlichen Geschwindigkeit der technologischen Entwicklungsfähigkeit bedarf.

Szenarien C:

Wie unterscheidet sich die Wirkung auf technologische Entwicklungen bei unterschiedlichen Arten der Erhöhung der THG-Steuer in der langen Frist? Ist ein linearer, quadratischer oder beschränkt-wachsender Kurvenverlauf der THG-Steuererhöhung günstiger im Sinne der Reduktion der THG-Emissionen und der Effekte auf Arbeit? Als Forschungshypothese ist daher zu formulieren:

- C.i Es wird erwartet, dass die Anreize dann am stärksten sind, wenn frühzeitig hohe THG-Steuersätze vorliegen. Die größten Effekte der technologischen Entwicklung werden daher beim beschränkt-wachsenden Kurvenverlauf erwartet, die kleinsten Effekte beim quadratischen Kurvenverlauf, die Effekte des ansonsten angenommen linearen Pfads dazwischen.

Da technologische Veränderungen mit anderen Größen in Interaktion stehen, sind auch die Effekte auf die Produktion, den Umsatz und die resultierenden Größen, THG-Emissionen und Beschäftigung, in den Blick zu nehmen.

In diesem Kapitel werden mögliche Effekte der oben genannten Fragestellungen modellbasiert mithilfe der Szenarioanalyse untersucht. Das Zusammenspiel von Technologie bzw. technologischen Verbesserungen, Wettbewerb und Verhaltensweisen der Akteure auf Mikroebene wird simuliert, um die Makroeffekte in der langen Frist sichtbar zu machen. Hierfür erweist sich die agentenbasierte Modellierung als besonders geeignet. Diese Modellierungsart wird daher eingeführt und die zentralen Charakteristika erläutert.

Der Schwerpunkt der Fragestellungen und der Modellierung liegt auf qualitativen Aspekten, das heißt im Speziellen der Richtung des technologischen Fortschritts. Das Ausmaß der Wirkung einer ÖSR ist nichtsdestotrotz von Relevanz, weshalb zusätzlich die quantitativen Entwicklungen anhand von deskriptiven Statistiken in den Blick genommen werden. Daraus sollen Abschätzungen und Einordnungen der Größen ermöglicht werden.

Nachfolgend wird zunächst auf die wissenschaftliche Literatur an der Schnittstelle der Themenbereiche Technologie, Wettbewerb und Klima insbe-

sondere mittels agentenbasierter Modellierung eingegangen. Der Modellierung wird ein Teilkapitel vorangestellt, in dem die bereits erwähnten deskriptiven Statistiken zur technologischen Entwicklung verschiedener Länder erörtert werden.

12.2 Forschungsstand: gelenkte technologische Entwicklung

12.2.1 Technologie in ökonomischen Modellen

Zunächst stellt sich die Frage, was unter Technologie und technologischer Entwicklung zu verstehen ist. In ökonomischen Modellen wird Technologie häufig, wie unter anderem dem neoklassischen Wachstumsmodell (auch als Ramsey-Cass-Koopmans-Modell bekannt, siehe Ramsey, 1928) und vielen Modellen, die auf dieser Grundstruktur aufbauen, über Parameter in der Produktionsfunktion erfasst (vgl. Vetter, 2016, S. 4–33). Eine auf die zwei Inputfaktoren Kapital und Arbeit aufbauende Produktionsfunktion $F(K, L)$ kann Technologie an verschiedenen Stellen berücksichtigen:

$$Y = a_Y \cdot F(a_K K, a_L L),$$

wobei a_Y , a_K und a_L mögliche Technologieparameter sind. Dabei ist eine kapitalerweiternde Technologie a_K (das heißt, $Y = F(a_K K, L)$), eine arbeitserweiternde Technologie a_L (das heißt, $Y = F(K, a_L L)$) und eine neutrale Technologie (das heißt, $Y = a_Y \cdot F(K, L)$) möglich, wobei die letztgenannte Variante keine große Verbreitung aufweist.

Der wesentliche Teil der herkömmlichen Modelle implementiert Technologie als exogenen Faktor, davon abweichend existieren jedoch ebenfalls Modelle mit endogenem Wachstum (Romer, 1987, 1994). Je nach Modellierungsrichtung und Modelltypologie unterscheidet sich die Art und Weise der Implementierung von Technologie und technologischer Entwicklung. In neoklassischen Modellen wurde Barro und Sala-i-Martin (1995, S. 18) zufolge in den 1950er und 1960er Jahren Technologie als Residuum eingeführt, um neben Kapitalakkumulation eine weitere Ursache für langfristiges Wachstum zu erhalten.

Aufgrund der Flexibilität bestehen bei agentenbasierten Modellen zahlreiche Möglichkeiten, Technologie zu etablieren (vgl. unter anderem Gerst et al., 2013; Wolf et al., 2013; Hötte, 2020; Lamperti et al., 2020), wobei die oben dargestellte Variante ebenfalls möglich ist. Die Substitution von Inputfaktoren der Produktion ist ein Unterschied zwischen herkömmlichen neoklassischen Modellen,

etwa bei einer Cobb-Douglas-Produktionsfunktion mit hohen Substitutionsmöglichkeiten, und agentenbasierten Modellen, in denen häufig feste Verhältnisse der Inputfaktoren verwendet werden.

Es gibt grundsätzliche Kritik technologischer Entwicklung als Lösung aller Umweltprobleme, so unter anderem aus wachstumskritischer Perspektive (vgl. Paech, 2012; Schmelzer & Vetter, 2019). In einer Übersicht resümieren Parrique et al. (2019, S. 49–52), dass die bisherige technologische Entwicklung unzureichend und unangemessen ist, um die zur Lösung der Umweltprobleme erforderliche Entkopplung des BIP vom Umweltverbrauch zu erreichen. Darüber hinaus konstatieren Parrique et al. (2019, S. 40ff), dass technologische Entwicklung zur Verschiebung von Problemen führen kann, da die technische Lösung des einen Problems, ein anderes Umweltproblem generieren kann. Daher ist auch der Frage nachzugehen, inwieweit die aktuelle technologische Entwicklung ausreichend ist bzw. inwieweit sie gesteigert werden müsste, um anspruchsvolle Klimaziele zu erreichen.

12.2.2 Verschiedene Arten von Technologiemodellen

Neben unterschiedlichen Modellierungstraditionen gibt es verschiedene Aspekte und Fragerichtungen, die beim Überthema technologische Entwicklung verfolgt werden können. Einerseits gibt es eher mikroökonomisch orientierte Themen, wie zum Beispiel die Fragen der Pfadabhängigkeit von technologischer Entwicklung inkl. möglicher Lock-in-Situationen (vgl. Dosi, 1982; Arthur, 1988; Unruh, 2000). In diesen mikroökonomischen Bereich sind auch die Themen von Absorptionsfähigkeit von Organisationen oder Unternehmen, das heißt, der Fähigkeit externe Informationen aufzunehmen und zu verarbeiten, von Cohen und Levinthal (1990) zu zählen. Über das Thema der Absorptionsfähigkeit können die Hintergründe konkreter technologischer Entwicklung als Such- und Lernprozess gefasst werden.

Andererseits gibt es eher makroökonomisch orientierte Themen. Hier ist die Transitionforschung zu nennen, die die erforderlichen Voraussetzungen für *Transitions* und Wandel untersucht und mögliche Übergangspfade in den Blick nimmt (vgl. Geels & Schot, 2007; Jacobsson & Bergek, 2011). Auch der Themenstrang *Technology Diffusion and Adoption* mit den Fragen der Einführung, Verbreitung und Übernahme von neuen Technologien in verschiedenen Volkswirtschaften (bspw. Comin & Hobijn, 2010) ist eher makroökonomisch einzuordnen.

Gräbner et al. (2021) adressieren die Thematik der technologischen Verbesserungen insbesondere auf Unternehmensebene mit dem Begriff der Fähigkeitsakkumulation (engl. „Capability Accumulation“), das heißt der Anhäufung neuer technologischer Fähigkeiten von Unternehmen. Dabei geben sie eine Übersicht der umgesetzten Varianten von technologischer Entwicklung bzw. Fähigkeitsakkumulation in endogenen Wachstumsmodellen und agentenbasierten Modellen (Gräbner et al., 2021, S. 3ff). In endogenen Wachstumsmodellen wird demzufolge bspw. bei Grossman and Helpman (1991b, 1991a) und Aghion and Howitt (1992) in F&E investiert, um temporäre Monopoleinkünfte zu erzielen. Im Modell von Rivera-Batiz and Romer (1991) können durch Investitionen in bessere Inputs Produktionskosten gesenkt werden. Bei Romer (1990) dagegen hängt die Fähigkeitsakkumulation an Wissenschaftler:innen, die benötigt werden, um die Produktivität zu steigern.

Die von Gräbner et al. (2021, S. 5) zusammengestellten agentenbasierten Modellen enthalten alle probabilistische Elemente, wie bspw. bei Dosi et al. (2019) und Caiani et al. (2019), in deren Modelle in F&E investiert wird, um die Wahrscheinlichkeit von Arbeitsproduktivitätssteigerungen zu erhöhen. Auch bei Ciarli et al. (2018) wird in F&E investiert, um die probabilistische Innovationsstätigkeit zu steigern und damit die erwarteten Gewinne zu maximieren; die Innovationen der unterschiedlichen Unternehmenstypen haben dabei unterschiedliche Effekte (höhere Arbeitsproduktivität und höhere Produktqualität). Im Modell von Rengs et al. (2020) kann zwischen zwei Investitionsmöglichkeiten gewählt werden: zum einen gibt es Investitionen in grüne F&E zur Senkung der Kohlenstoffintensität, zum anderen gibt es Investitionen in braune F&E zur Steigerung der Arbeitsproduktivität.

Vor dem Hintergrund der in diesem Papier erarbeiteten Strategien zur Integration von „Prozessen der Fähigkeitsakkumulation“ in makroökonomische Modelle halten Gräbner et al. den Rahmen der agentenbasierten Modellierung für „am vielversprechendsten“, um empirische Erkenntnisse besser in makroökonomische Modelle zu integrieren (Gräbner et al., 2021, S. 15).

Das Interesse der vorliegenden Arbeit ist vor allem die Richtung und das Ausmaß der technologischen Entwicklung und die Frage, wie diese gelenkt werden können. Hier sind die Arbeiten von Acemoglu unter dem Begriff *Directed Technological Change* bzw. *Directed Technical Change* zu nennen (Acemoglu, 1998b, 2002a, 2002b, 2003; Acemoglu et al., 2012) und aufgrund ihrer zentralen Rolle in diesem Themenfeld näher zu betrachten.

12.2.3 Gelenkte technologische Entwicklung

Im Allgemeinen erscheint klar, dass es bei technologischen Entwicklungen mehrere Möglichkeiten und Pfade gibt. Dosi (1982, 1988) zufolge wird die Richtung des technologischen Wandels vom technologischen Paradigma vorgegeben, welches seinerseits dadurch bestimmt ist, was gesellschaftlich unter den zu lösenden technologischen Problemen verstanden wird. In Bezug auf die Klimathematik kann dieses Problemverständnis bspw. durch das zunehmende Bewusstsein, THG-Emissionen zu reduzieren, verändert werden. Diese verschiedenen Richtungen gilt es auch auf Modellebene zu integrieren. Im neoklassischen Wachstumsmodell gibt es bspw. nur eine Variable für den technologischen Fortschritt, womit es nur schlechtere oder bessere Technologie geben kann, nicht aber verschiedene Richtungen. Das heißt, um Technologiepfade auf Modellebene zu ermöglichen, muss es mindestens zwei Technologievariablen geben. Dann stellen sich nicht nur die Fragen, welches Ausmaß die technologische Entwicklung hat und wie es gesteigert werden kann, sondern auch die Fragen, welche Richtungen möglich und wünschenswert sind und über welche Bedingungen eine Lenkung erreicht werden kann. Zur Umsetzung dieser Mehrdimensionalität ist ein naheliegender Ansatz, einen zweiten Technologieparameter einzuführen, sodass ein Feld an Möglichkeiten aufgespannt wird. Hierbei sind die Arbeiten von Acemoglu (1998b, 2002a, 2003) grundlegend.

Vetter (2016, S. 18–23) fasst den Mechanismus des technologischen Fortschritts verschiedener Modelle von Acemoglu (1998b, 2002a, 2003) folgendermaßen zusammen: Es gibt zwei symmetrische Sektoren A und B mit zwei Produktionsfaktoren a und b und zwei korrespondierenden Technologieparametern. Sektor A produziert produktionsfaktor-a-intensive Güter (zum Beispiel arbeitsintensiv), Sektor B produziert produktionsfaktor-b-intensive Güter (zum Beispiel kapitalintensiv).

Für diese zwei Produktionsfaktoren lassen sich je nach Fragestellung unterschiedliche Variablen einsetzen. So gibt es Modelle zu den Inputfaktorpaaren Kapital/Arbeit, gering/hoch qualifizierte Arbeit und Arbeit/natürliche Ressourcen. Die technologische Entwicklung wird dabei von Profitabilitätsaspekten geleitet. Um auf den Absatzmärkten möglichst als Monopolist aufzutreten, haben Unternehmen den Anreiz in die Entwicklung zu investieren. Da es für jeden Inputfaktor eine Technologievariable gibt, spannt sich ein Feld für die technologische Entwicklung auf. Tendenziell lohnt es sich mehr, in die Technologie des knapperen Gutes

zu investieren. Darüber hinaus lohnt es sich für Sektor A tendenziell mehr in die Technologie des produktionsfaktor-a-intensiven Gutes zu investieren.

Mit der dargestellten Modellmechanik kann auch die Frage gestellt werden, wie ein Pfad von hohem ressourcen-erweiternden technologischen Wandel eingeschlagen werden kann, wenn für die Produktionsfaktoren das Paar Ressourcen/Arbeit gewählt wird (Acemoglu et al., 2012). Für die Ergebnisse des Modells ist hierbei erneut die Frage zentral, ob die Inputfaktoren natürliche Ressourcen und Arbeit Substitute oder Komplemente sind. Nimmt man Komplemente an, was bei diesem Paar realistischer erscheint, dann hat ein höheres Arbeitsangebot weniger Innovationen im arbeitsintensiven Sektor und damit mehr Innovationen im ressourcenintensiven Sektor zur Folge.

Im Kontext von Umweltthemen wird die Steigerung der ressourcen-erweiternden Technologie gegenüber der arbeits-erweiternden Technologie angestrebt, um den Ressourcenverbrauch zu reduzieren. In diesem Fall könnte im Modell von Acemoglu et al. (2012) das Ressourcenangebot reduziert werden, um relative Knappheit auch beim ressourcenintensiven Gut und damit eine Preissteigerung herzustellen. Damit würden zwei Anreize entstehen: zum einen würde die Investition in die ressourcen-erweiternden Technologie attraktiver werden. Zum anderen würde es Anreize geben, den Inputfaktor Arbeit zu erhöhen, was bedeutet, dass es Anreize für höhere Beschäftigung gibt. Diese Mechanik ist bemerkenswert, da die Senkung des Umweltverbrauchs bei gleichzeitiger Erhöhung der Beschäftigung auch das Ziel der ÖSR ist (doppelte Dividende). Das Modell von Acemoglu et al. (2012) deutet darauf hin, dass die Beschäftigung selbst dann zunehmen könnte, wenn durch die Reform der Faktor Arbeit nicht entlastet wird, sondern ausschließlich eine Zusatzbelastung im Umweltbereich besteht.

Der Zusammenhang, dass die Investitionen zur Verbesserung der Technologie eher in das knappere Gut eingesetzt werden, existiert allgemein und firmiert unter der *Hypothese der induzierten Innovation* (engl. „Induced Innovation Hypothesis“), welche auf Hicks (1932) zurückgeht. Naqvi und Stockhammer (2018) zufolge stützen sich endogene Wachstumsmodelle in der Regel auf die Hypothese der induzierten Innovation, welche sie wie folgt beschreiben:

A key theory behind this is the induced innovation hypothesis (Hicks, 1932) which states that inputs with rising costs will see higher R&D investment to improve input-specific productivity gains, which, for profit-maximizing firms, imply lower costs. (A. Naqvi & Stockhammer, 2018, S. 169)

Bei mehreren Dimensionen der technologischen Entwicklung, stellt sich die Frage, welche technologische Richtung eingeschlagen wird. Dosi (1982) zufolge kommt einem technologischen Paradigma dabei eine gewichtige Rolle zu: Denn das Paradigma definiert die Probleme, die dann die Technologie lösen soll. Marktbedingungen können hierbei einerseits zu Beginn in das Paradigma mit einfließen und entscheiden andererseits am Ende, welche neue Technologie rentabel ist und sich schließlich bewährt.

12.2.4 Technologie als Wettbewerbsfaktor

Technologische Entwicklung ist ein wesentlicher Wettbewerbsfaktor (Dasgupta, 1986; Fagerberg, 1996; Bhawsar & Chattopadhyay, 2015). Hier ist anzumerken, dass in ökonomischen Modellen Technologie eine abstraktere Rolle einnimmt als Forschung und Entwicklung im engeren Sinne; so spielen in den Begriff der Technologie je nach Modell und Abstraktionsebene unter anderem Produktivitäten von Unternehmen, die Qualität der Infrastruktur, kulturelle Errungenschaften mit Blick auf Arbeitsabläufe oder natürlich die Investition in Forschung und Entwicklung mit hinein.

In Kapitel 11.2.2 wurde bereits darauf hingewiesen, wie schwierig das Konzept der Wettbewerbsfähigkeit zu greifen ist (vgl. auch Bhawsar & Chattopadhyay, 2015, S. 669ff), beim Konzept der Technologie verhält es sich ähnlich. Beides sind beliebte „buzz-words“ (Fagerberg, 1996, S. 39), die dennoch hohe Relevanz haben.

Über zufällige Innovationen kann technologische Entwicklung als evolutorischer Prozess beschrieben werden, wie es insbesondere Dosi tut, bei dem es deshalb Abhängigkeitspfade gibt (vgl. Dosi, 1982, 1988; Dosi et al., 2010; Dosi & Nelson, 2010). Dosi (1988, S. 1120) beschreibt den Prozess der Innovation wie folgt: Private gewinnorientierte Akteure setzen Mittel ein, wenn sie ungenutzte wissenschaftliche und technische Möglichkeiten vermuten, die neue Produkte und Verfahren ermöglichen, die sich vermarkten lassen, sodass den Akteuren ein finanzieller Vorteil entsteht. Technologie ist nicht nur auf Mikroebene ein Wettbewerbsfaktor, sondern auch auf Makroebene für Volkswirtschaften als Ganze von Relevanz und es gibt politische Bemühungen, durch Innovationspolitik die Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten.¹⁵⁴

¹⁵⁴ Siehe Europäisches Parlament (<https://www.europarl.europa.eu/factsheets/de/sheet/67/innovationspolitik>, 27.03.2024) und die deutsche Bundesregierung (<https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/forschung/zukunftsstrategie-forschung-innovation-2163454>, 27.03.2024).

12.2.5 Die Porter-Hypothese

Die durch Rentabilität beeinflusste technologische Entwicklung ist von den Produktionsbedingungen, den Preisen und Kosten und in der Konsequenz auch von preisverändernden Reformen abhängig. Prinzipiell findet durch jede Steuer eine Preisverschiebung und damit eine Anreizverschiebung statt. Im Rahmen der ÖSR wird durch die Preisverschiebung langfristig ein technologischer Vorteil erhofft, welcher teilweise als dritte Dividende bezeichnet wird, aber nicht zwangsläufig als Veränderung der Richtung der technologischen Entwicklung zu begreifen ist. Verallgemeinert kann die dritte Dividende als positive, langfristige ökonomische Wirkung verstanden werden, wozu insbesondere technologische Effekte zählen. Diese dritte Dividende wird auch als Porter-Hypothese bezeichnet (Porter, 1990).

Enevoldsen et al. (2009) definieren die Porter-Hypothese wie folgt: „The original Porter hypothesis states that high national environmental standards will encourage domestic industries to innovate and hence improve competitiveness“ (Enevoldsen et al., 2009, S. 100). Als Porter seine Hypothese 1990 postulierte, widersprach er damit der konventionellen Meinungen (Andersen, 2009, S. 5f). Andersen zufolge war Porters Hypothese in einen breiteren theoretischen Rahmen zum Thema Wettbewerbsfähigkeit eingebettet, zusammenfassend würden Unternehmen auf den äußeren Druck der neuen Preise reagieren und nach Verbesserungen streben. Die Porter-Hypothese wird bis heute uneinheitlich beantwortet: Zhao et al. (2022) führen bestätigende Beiträge (Jaffe & Stavins, 1995; Jaffe & Palmer, 1997; Campbell, 2003) sowie kritische Arbeiten auf, die keine signifikante Steigerung des technologischen Fortschritts nachweisen (Gray & Shadbegian, 1995; Lanoie et al., 2008; H. Wu et al., 2020). Bemerkenswert ist, dass sich Forschungsaktivität, wie bei den Thematiken der ÖSR und der DD (siehe Kapitel 7.2.3), in Europa und den USA abgenommen hat, während sie sich in China verstärkte. Beispielsweise bestätigen Wu und Lin (2022) die Porter-Hypothese für die chinesische Eisen- und Stahlindustrie. Mit Blick auf die Emissionshandelssysteme auf Erhebungsseite der THG-Bepreisung ist Europa auf die Arbeit von Jin et al. (2022) hinzuweisen, die die Porter-Hypothese in Bezug auf die Wirksamkeit im Rahmen des Emissionshandels untersuchen und die Effekte ebenfalls bestätigt sehen, wobei die Verstärkung der Wirkungen unter anderem durch eine strengere Durchsetzung der Vorschriften möglich sei.

12.2.6 Die Frage der Substituierbarkeit

Bei Modellierungen mit Arbeit und Energie bzw. THG-Emissionen spielt die Frage der Substituierbarkeit eine zentrale Rolle. Was das Thema Klima und Energie angeht, ist grundsätzlich eine Verschiebung festzustellen: Zunächst – und teilweise bis heute – lag der Fokus auf Energie, welche als Inputfaktor in Modelle integriert wird (vgl. Kemfert & Welsch, 2000; Su et al., 2012; Liu et al., 2018; D’Alessandro et al., 2020; Lamperti et al., 2020). Da Energieverbrauch aber nicht im direkten Zusammenhang mit dem Klimawandel steht – beim Stromverbrauch wird bspw. eine deutliche Erhöhung für sinnvoll erachtet –, sind stattdessen die THG-Emissionen mehr in den Blick gerückt, welche dann nicht mehr als Inputfaktor, jedoch als Nebenprodukt und Kostenfaktor berücksichtigt werden können. Dieser Zusammenhang ist in der wissenschaftlichen Literatur allerdings nicht gleichermaßen umfassend bearbeitet wie das Zusammenspiel von Energie und Arbeit als Inputfaktoren. Eine Alternative darüber hinaus wäre, Ressourcen als Inputfaktor zu integrieren (vgl. A. Naqvi & Stockhammer, 2018; King, 2022), aber auch hier ist festzuhalten, dass Emissionen sich ontologisch von Ressourcen unterscheiden, denn die Verwendung aller Ressourcen in Bezug auf Treibhausgase würde ein Verfehlen der Klimaziele bedeuten. Davon abgesehen ist es auch möglich, sowohl (Energie-)Ressourcen als auch THG-Emissionen zu implementieren (vgl. D’Alessandro et al., 2020).

Das Thema der Substitution von Arbeit als Inputfaktor und THG-Emissionen als Nebenprodukt hat insofern konzeptionelle Schwierigkeiten, da ontologisch unterschiedliche Ebenen angesprochen werden, ist aber von hoher Relevanz, weil durch die ÖSR gerade eine solche Veränderung der Einsatzfaktoren bzw. des Einsatzfaktors Arbeit und des Nebenprodukts THG-Emissionen angeregt werden soll.

THG-Emissionen anstelle von Energie zu verwenden, widerspricht einer Handhabung der Produktionsfunktion, welche zwar mehrere Inputfaktoren berücksichtigt, aber nicht mehrere Outputfaktoren vorsieht. So ist es verbreitet, die Inputfaktoren etwa auf Arbeit L , Kapital K und Energie E zu erweitern (vgl. Kemfert & Welsch, 2000), beim Output Y aber nur einen Faktor beizubehalten:

$$Y = F(L, K, E).$$

THG-Emissionen GHG würden in dieser Gleichung einen weiteren Output bedeuten:

$$Y + GHG = F(L, K).$$

Die THG-Emissionen entstehen hier unbeabsichtigt als Kuppelprodukt mit dem Output. Diese zwangsläufige Kuppelproduktion ist in der Fachliteratur unter *Joint Production* bekannt (Baumgärtner et al., 2001, 2006; Mishra, 2007). Der Gedanke von mehreren Outputs ist nicht neu. Kurz (1986) zeigt auf, dass es Ansätze zur Kuppelproduktion von klassischen und frühen neoklassischen Ökonomen gibt. Auch in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde dieser Gedanke aufgegriffen, ohne große Verbreitung zu finden (Mishra, 2007, S. 9f). Im Kontext von Umweltproblemen als ungewünschtes Nebenprodukt der Produktion erneut von Baumgärtner et al. (2001, 2006).

Energieeinsatz und THG-Emissionen stehen zwar in Verbindung, haben aber kein festes Austauschverhältnis. Energie kann auf unterschiedliche Weise produziert werden: THG-intensiv und weniger THG-intensiv durch erneuerbare Energien.

Grundsätzlich hat das Thema der Substitution eine hohe Relevanz. Liu et al. (2018) zeigen, dass durch Substitution immens THG-Emissionen eingespart werden können. Ihren Modellierungsergebnissen folgend werden ca. 46% der CO₂-Emissionsreduktionen den Substitutionen von Energie mit Arbeit oder Kapital zugeschrieben. Beispielsweise Wesseh et al. (2013) greifen die Debatte um die Substitution bzw. Komplementation auf und untersuchen unter anderem die Beziehungen von Energie zu Arbeit und Kapital. Das Verhältnis von Kapital und Energie ist Wesseh et al. zufolge umstritten, da es sowohl Befunde gibt, die die These stützen, dass Kapital und Energie Komplemente sind, als auch Ergebnisse, dass Kapital und Energie Substitute sind. Bei Arbeit und Energie ist es dagegen klarer, da sie für Substitute befunden werden, so auch von den Autoren selbst (Wesseh et al., 2013, S. 128).

12.2.7 Technologische Entwicklung und Klima in agentenbasierten Modellen

Im Hinblick auf die agentenbasierte Modellierung der durch die ÖSR induzierten technologischen Entwicklung dieses Kapitels sind die Arbeiten von Gerst et al. (2013), Wolf et al. (2013), Rengs et al. (2015), Lamperti et al. (2018, 2020), Hötte (2020) und Amendola et al. (2024) sowohl methodisch als auch inhaltlich besonders relevant und hervorzuheben. Ohne Bezug zum Klimawandel ist außerdem das *K+S-Modell* von Dosi et al. (2022) zu erwähnen, da es sich ebenfalls auf Grundlage von agentenbasierter Modellierung vertieft mit Arbeitsplatzschaffung

und -zerstörung durch technologische Entwicklung beschäftigt und das Aufkommen technologischer Paradigmen sowie neuer Sektoren erlaubt.

Gerst et al. (2013) entwickeln einen mehrstufigen Modellrahmen ENGAGE, der mithilfe der agentenbasierten Methodik einige übliche Modellannahmen lockert. Unter anderem kann die Annahme von rationalen und homogenen Akteur:innen abgemildert werden und somit zum Beispiel die Entscheidungen von weniger rationalen, heterogenen Akteur:innen auf die Wirksamkeit von Politiken untersucht werden. Eine Besonderheit des Modells ist, dass es Verhandlungsführer auf internationaler Ebene gibt, die durch die heterogenen Akteur:innen der nationalen Ebene eingeschränkt werden. Somit gibt es Feedbacks von der internationalen zur nationalen Ebene und vice versa.

Die zentralen technologischen Aspekte werden auf Ebene der Energieerzeugung realisiert: Es gibt drei konkurrierende Unternehmen („kohlenstofflastig“, „kohlenstoffarm“ und „kohlenstofffrei“), die die Energietechnologie probabilistisch weiterentwickeln, um sie dem einen Energieerzeugungsunternehmen anzubieten. Die Energieerzeugungstechnologie ist abhängig von verschiedenen Produktivitäten: die Arbeitsproduktivität bei der Energieerzeugung, die Arbeitsproduktivität bei der Herstellung der Energietechnologie, die Energieintensität bei der Herstellung der Energietechnologie und die Wärmerate bei der Energieerzeugung (Gerst et al., 2013, S. 68).

Auf Ebene der Konsumgüter- und Kapitalgüterunternehmen gibt es darüber hinaus technologische Parameter in Form von Produktivitäten (zum Beispiel die Arbeitsproduktivität der Bedarfsproduktion, Energieintensität der Bedarfsproduktion oder die Arbeitsproduktivität der Maschinenproduktion), sodass sich auf Ebene der Technologie ein Netz aus wechselseitigen Abhängigkeiten bildet.

Gerst et al. (2013, S. 70) resümieren, dass eine CO₂-Steuer die technologische Entwicklung auf zwei Weisen beeinflusst: Zum einen über die Investitionsentscheidung des Energieerzeugungsunternehmens, welches kohlenstoffintensive oder kohlenstoffärmere Technologien auswählen kann. Zum anderen durch die Nachfrage der Konsumgüterunternehmen. Bemerkenswert ist, dass wenn das Aufkommen der CO₂-Steuer für die Entlastung der Haushalte verwendet wird, nur eine geringe Verbesserung gegenüber des Baseline-Szenarios entsteht, eine höhere Wirkung jedoch zustande kommt, wenn die technologische Entwicklung subventioniert wird (Gerst et al., 2013, S. 70).

Wolf et al. (2013) entwickeln ein regionales, agentenbasiertes Modell Lagom regiO, welches zur Familie der Lagom-Modelle zählt, mit dem Ziel, Win-Win-Möglichkeiten für die Klimapolitik zu identifizieren. Eine Besonderheit ist, dass die Agent:innen regional kategorisiert sind und Fragestellungen von räumlicher Interaktion adressiert werden können.

Technologische Entwicklung findet sich über das Lernen von Unternehmen und Haushalten im Modell wieder und betreffen verschiedene Parameter (unter anderem Technologie- oder Konsumkoeffizienten und Mark-ups). Hierbei gibt es zwei Möglichkeiten: die Akteur:innen können zum einen zufällige Veränderungen der Variablen erzeugen (Mutation) und zum anderen Parameter von anderen Unternehmen nachahmen (Imitation).

Zufallsprozesse spielen daher bei der Wahl der Interaktionspartner und bei der erwähnten Mutation und Imitation eine Rolle. Auf diese Weise können Pfadabhängigkeiten entstehen, sowohl auf Akteursebene als auch auf gesamtgesellschaftlicher Ebene. Auch aufgrund der detaillierten Modelldokumentation bieten Wolf et al. (2013) einen Modellrahmen an, der zur Übertragung auf weitere, insbesondere mit regionalen Aspekten verbundenen Fragestellungen nützlich erscheint.

Rengs et al. (2015) konstatieren, dass zur Untersuchung von Klimapolitiken vorwiegend Modelle mit repräsentativen, rationalen Agent:innen verwendet wurden und adressieren deshalb diese Forschungslücke mit einem Modell mit verschiedenen heterogenen Agent:innen, welche begrenzte Rationalität und soziale Präferenzen aufweisen. Um Verteilungseffekte simulieren zu können, sind nicht nur eine hohe Anzahl Haushalte implementiert, sondern die Haushalte sind auch in verschiedene Kategorien unterteilt, die eigene Verhaltensregeln aufweisen. Zwei Arten von technologischer Entwicklung sind in ihrem Modell möglich: die Erhöhung der Arbeitsproduktivität sowie die Senkung der Kohlenstoffintensität durch grüne Innovationen. In diesem Modell werden unter anderem die Auswirkungen von staatlichen Subventionen für grüne Innovationen simuliert, welche aus einer CO₂-Steuer finanziert werden.

Die besten Ergebnisse in Bezug auf Arbeitslosigkeit werden erzeugt, wenn Arbeitssteuern reduziert werden (Rengs et al., 2015, S. 22). Das Szenario der Steuerverschiebung von Arbeit zu CO₂-Emissionen produziert allerdings keine guten Ergebnisse in Bezug auf die Reduktion der Emissionen (Rengs et al., 2015, S. 23). Die Ergebnisse von Rengs et al. (2015) weisen deutliche Unterschiede zu Modellierungen mit repräsentativen, rationalen Agent:innen auf. Als Beispiel können

nachfrageorientierte Subventionen genannt werden, welche bessere makroökonomische Effekte aufweisen, aber geringere Emissionsreduktionen als Modellierungen mit repräsentativen, rationalen Agent:innen.

In der Tradition der *Dystopischen Schumpeter-trifft-Keynes-Modelle* (engl. „Dystopian Schumpeter meeting Keynes“, DSK) entwickeln Lamperti et al. (2018) ein agentenbasiertes IAM als Alternative zu CGE-IAM. Laut den Autor:innen handelt es sich dabei um das erste agentenbasierte IAM im globalen Maßstab (Lamperti et al., 2018, S. 317).

Grundsätzlich ist die Verwendung von IAM bei der Betrachtung von Klimaszenarien sinnvoll, da auch die Klimaschäden, das heißt, die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wirtschaft, berücksichtigt wird. Tatsächlich werden die Klimaschäden in der wissenschaftlichen Literatur zu komplexen Systemen oft übersehen oder vage nur auf Makroebene berücksichtigt (Greiner et al., 2014). Klimaschäden verstärken die Konsequenzen von Simulationen tendenziell, da durch ihre Berücksichtigung noch schnelleres Handeln sinnvoll wird. Die entscheidenden Mechanismen der Forschungsfrage dieses Kapitels lassen sich jedoch besser in einem weniger komplexen, analytischen Modell verstehen.

Technischen Fortschritt gibt es sowohl im Energiesektor als kostensenkenden Faktor als auch in den anderen Sektoren, unter anderem was den Umgang mit Klimaschäden betrifft. Klimaschäden haben Auswirkungen auf die Mikroebene, das heißt insbesondere auch auf die Pfade der technologischen Entwicklung (Lamperti et al., 2018, S. 316). Das umfassende Modell zeigt, dass es mithilfe eines agentenbasierten Modells möglich ist, die Mikro- und Makroebene zu verknüpfen, sowohl in Bezug auf wirtschaftliche als auch in Bezug auf klimatische Zusammenhänge, und erzeugt höhere Klimaschäden als andere aktuelle Standard-IAM, welche folglich den Autor:innen zufolge die Schäden unterschätzen (Lamperti et al., 2018, S. 329).

Die DSK-Modelle gehören zur Familie der evolutionären Keynes-und-Schumpeter-Modelle (K+S-Modelle). Eine Stärke der DSK-Modelle ist, dass Schocks auf Makro- sowie auf Mikroebene simuliert werden können und nicht-isomorphe (gleichgeschaltete) Entwicklungen möglich sind. Nach Dosi et al. (2017) gibt es eine Modellfamilie der evolutionären Keynes-und-Schumpeter-Modelle, die das Schumpetersche Wachstumsparadigma in ein komplexes System von heterogenen, interagierenden Akteur:innen mit Elementen von Keynes und Minsky in die Meso- und Makrodynamik integrieren, womit zentrale Aspekte von Schumpeter, Keynes und Minsky komplementär verbunden werden.

Diese Gruppe der agentenbasierten Modelle eignen sich besonders um die Auswirkungen von Innovationen, industriellen Dynamiken und makroökonomischen Politiken auf das langfristige Wachstum und die kurzfristigen Schwankungen der Wirtschaft untersuchen (Dosi, Napoletano, et al., 2017, S. 63f).

Lamperti et al. (2020) verwenden ein agentenbasiertes IAM, um Klimaschäden berücksichtigen zu können und untersuchen die Wahrscheinlichkeit eines Übergangs zu grünem, nachhaltigem Wachstum. Technologie spielt im Energiesektor eine Rolle. Hier konkurrieren fossile (braune) und erneuerbare (grüne) Anlagen, wobei braune Anlagen höhere Produktionskosten haben, aber im Gegensatz zu grünen Anlagen keine Installationskosten.

In diesem IAM ist zu bemerken, dass mikroökonomische Klimaschocks (Klimaschäden) zu Beeinträchtigungen der Arbeits- und Energieeffizienz führen können, die wiederum makroökonomische Folgen haben. Eine Besonderheit dieses agentenbasierten Ansatzes ist, dass Klimaschäden der Ebene der Einzelakteur:innen zugeordnet werden, und nicht als Abzug von der Gesamtproduktion berücksichtigt werden (wie unter anderem in den IAM von Nordhaus & Sztorc, 2013; Nordhaus, 2014).

Das Ergebnis der Simulation sind zwei statische Gleichgewichte: eine kohlenstoffintensive Blockade und ein nachhaltiger Wachstumspfad. Ein Resultat des Modells von Lamperti et al. (2020) ist außerdem, dass die durch Schocks verringerte Energieeffizienz makroökonomisch geringere Auswirkungen hat als die Auswirkungen auf die Arbeitsproduktivität.

Hötte (2020) adressiert explizit das Thema technologischer Fortschritt mit der Verbreitung von neuen Technologien und weist darauf hin, dass eine Beschleunigung der technologischen Entwicklung notwendig und entscheidend ist, um die globale Erwärmung auf ein beherrschbares Niveau zu begrenzen. Um der Frage nachzugehen, wie die Verbreitung grüner Technologien beschleunigt werden kann, verwendet Hötte das agentenbasierte Eurace@unibi-Modell (Dawid et al., 2019) mit endogenen Innovationen, welches zwei Technologien aufweist: Grüne Bewerber und herkömmliche Teilnehmer konkurrieren jeweils mit ihren eigenen Technologien.

Der Kapitalstock besteht aus unterschiedlichen Jahrgängen, die sich nach der Art der Technologie und der Produktivität unterscheiden. Technologie kann dabei auf zwei Arten adaptiert werden, entweder durch „Learning by Using“ (aufgrund einer Lernkurve) oder durch „Cross-technology Spillovers“, das heißt, je besser das Vorwissen ist, desto leichter kann die Technologie adaptiert wer-

den. Ein Ergebnis ist, dass die zögerliche Verbreitung grüner Technologien durch technologische Pfadabhängigkeiten zu erklären sind.

Im agentenbasierten Modell von Amendola et al. (2024) werden verschiedene mögliche Politiken zur Steigerung der Energieeffizienz untersucht: von steuerlichen Anreizen und Subventionen bis hin zu der staatlichen Investition in ein öffentliches Forschungslabor.

Kapitalgüterunternehmen nutzen Arbeit und Energie, um Kapitalgüter für Konsumgüterunternehmen herzustellen. Die produzierten Maschinen sind ähnlich wie bei Gerst et al. (2013) durch Koeffizienten für Arbeitsproduktivität und Energieeffizienz gekennzeichnet und benötigen bei Herstellung ihrerseits ebenfalls eine bestimmte Menge an Arbeit und Energie, sodass Technologie im Wesentlichen durch Arbeitsproduktivität und Energieeffizienz der produzierten Maschinen und der Kapitalproduktion definiert ist (Amendola et al., 2024, S. 118). Die technologische Entwicklung findet damit in beiderlei Hinsicht im Kapitalgüterunternehmen statt.

Zur Verbesserung dieser vier Parameter gibt es zwei Möglichkeiten: Innovation und Imitation. Ein Anteil des Umsatzes wird in Forschung und Entwicklung investiert, im Unternehmen werden diese Mittel für Angestellte eingesetzt, die die Forschung und Entwicklung betreiben. Es findet immer nacheinander sowohl Innovation als auch Imitation statt – beides wird durch stochastische Prozesse modelliert. Innovationen finden stochastisch um die bisherige Technologie zentriert statt. Für die Imitation gilt, dass die Übernahme von Technologien von technologisch näheren Unternehmen wahrscheinlicher ist. Ist die neue Technologie nicht in allen vier Dimensionen besser als die alte, greift eine Regel nach dem „erwarteten potenziellen Erfolg“ (Amendola et al., 2024, S. 120).

Das Ergebnis der Modellierung von Amendola et al. (2024) ist, dass zur Steigerung der Energieeffizienz ohne negative Auswirkungen auf makroökonomische Bedingungen und öffentliche Finanzen das Forschungslabor am effektivsten ist. Diese langfristige Strategie sei aber durch sofort einsetzbare Maßnahmen zu ergänzen.

Im Gegensatz zu den vorgestellten Modellen und ihrer Implementierung von technologischer Entwicklung legt das in diesem Kapitel erarbeitete agentenbasierte Modell den Fokus auf die Richtung der technologischen Entwicklung – ob Arbeit oder Emissionen eingespart werden – und die Frage, wie die ÖSR diese Richtung beeinflusst, wenn Unternehmen nur auf der Grundlage von finanziellen Erwägungen die Technologie auswählen. Gegenüber anderen

Arbeiten liegt aufgrund der Reformidee der Entlastung der Arbeit ebenfalls ein Schwerpunkt auf dem Faktor Arbeit bzw. der Arbeitsnachfrage, während der Bezugsrahmen Deutschland ist, wie in der kompletten Arbeit. Im Hinblick auf die Modellkomplexität geht es darum, die Annahme von rationalem und homogenem menschlichem Verhalten aufzuweichen, während gleichzeitig mit der Fokussierung auf wenige Schlüsselmechanismen die Überschaubarkeit und Transparenz des Modells zu gewährleisten ist.

12.3 Deskriptive Statistiken zum technologischen Potenzial

12.3.1 Einführung

In diesem Kapitel wird mittels deskriptiver Statistiken eine grobe quantitative Abschätzung darüber vorgenommen, welches Ausmaß der technologischen Verschiebungen durch die ÖSR realistisch ist und welche Potenziale darin liegen. Dies hat zum Ziel, neben den qualitativen Fragen auch die quantitativen Aspekte grob einordnen und Schlussfolgerungen für die darauffolgende Modellierung ableiten zu können. Von diesen Ergebnissen kann bei der Validierung der Geschwindigkeit der aktuellen technologischen Entwicklung Gebrauch gemacht werden.

Bei dieser Einordnung geht es im ersten Schritt um die Technologie, repräsentiert durch die Arbeitsproduktivität und die THG-Output-Relation, welche im Folgenden definiert wird. Mit dem Vergleich verschiedener Länder werden zwei Aspekte verfolgt: Zum einen stellt sich die Frage, wie diese Technologieparameter von Deutschland im Vergleich zu anderen Ländern sind (siehe 12.3.2 Statischer Vergleich verschiedener Länder). Zum anderen ist zu fragen, welches Ausmaß die Fortschritte dieser Parameter in den letzten Jahren hatte, um einen Eindruck für den aktuellen Trend und die mögliche zukünftige Entwicklung zu erhalten (siehe 12.3.3 Trend vergangener Jahre). Anknüpfend an die Überlegungen zu den technologischen Parametern geht es im zweiten Schritt auch darum, die Auswirkungen auf die Beschäftigung und die THG-Emissionen in den Blick zu nehmen.

12.3.2 Statischer Vergleich verschiedener Länder

Die Weltbank veröffentlicht die jährlichen Werte für das BIP (in aktuellen USD sowie kaufkraftbereinigt), die Bevölkerung, das Verhältnis von den Erwerbstätigen zur Gesamtbevölkerung und die THG-Emissionen einer Vielzahl von Län-

dern. Insbesondere von 1991 bis 2019 steht eine breite Datenbasis zur Verfügung.¹⁵⁵ Dafür wurden die folgenden Variablen der Datenbank der Weltbank verwendet:

Tabelle 11: Daten der Weltbank

Indikatorname	Code
GDP, PPP (current international \$)	NY.GDP.MKTP.PP.CD
Population, total	SP.POP.TOTL
Employment to population ratio, 15+, total (%) (modeled ILO estimate) ¹⁵⁶	SL.EMP.TOTL.SP.ZS
Total greenhouse gas emissions (kt of CO2 equivalent)	EN.ATM.GHGT.KT.CE

Diese Daten wurden zur Ermittlung der Arbeitsproduktivität und der THG-Output-Relation verwendet. Die Arbeitsproduktivität definiert sich als Quotient von BIP und der Anzahl der Erwerbstätigen (das heißt, das BIP dividiert durch die Anzahl der Erwerbstätigen; zum Beispiel in USD/Tsd. Erwerbstätige), die THG-Output-Relation als Quotient von BIP und THG-Emissionen (das heißt, das BIP dividiert durch die THG-Emissionen eines Jahres; zum Beispiel in USD/t CO₂e).

Üblicherweise wird anstelle der THG-Output-Relation von der THG-Intensität gesprochen, was sein Kehrwert ist. In diesem Kapitel wird jedoch von THG-Output-Relation gesprochen, um methodisch die gleiche Konstruktion für die beiden Technologieparameter zu erhalten. Auf diese Weise erzielen Unternehmen dann Einsparungen, wenn die Arbeitsproduktivität und die THG-Output-Relation erhöht werden.

Über die Gesamtbevölkerung („Population, total“) und die Erwerbstätigenquote („Employment to population ratio, 15+, total (%)“) wurde die erwerbstätige Bevölkerung in absoluten Zahlen ermittelt. Zum Vergleich zwischen Ländern ist das BIP in der kaufkraftbereinigten Version notwendig („GDP, PPP (current international \$)“). Zum intertemporalen Vergleich sind die realen Werte heranzuziehen. Hierbei handelt es sich um eine grobe Einordnung, da

155 Letztes Update seitens der Weltbank: 18.12.2023. Die aktuellen Daten der Weltbank sind online abrufbar: <https://data.worldbank.org/> (18.01.2024).

156 Es ist darauf hinzuweisen, dass die Weltbank eine weite Definition von Beschäftigung bei diesem Indikator verwendet: „Employment to population ratio is the proportion of a country's population that is employed. Employment is defined as persons of working age who, during a short reference period, were engaged in any activity to produce goods or provide services for pay or profit, whether at work during the reference period (i.e. who worked in a job for at least one hour) or not at work due to temporary absence from a job, or to working-time arrangements. Ages 15 and older are generally considered the working-age population.“ Siehe <https://data.worldbank.org/indicator/SL.EMP.TOTL.SP.ZS> (18.01.2024).

eine geringe Arbeitsproduktivität aufweisen tendenziell auch eine geringe THG-Output-Relation haben. Die beiden Parameter sind linear korreliert mit einem R^2 -Wert von 38,8% (OLS-Methode).¹⁵⁸

Je weiter rechts oben in Abbildung 11, desto lichter wird das Feld, sodass es möglich ist, einzelne auffällige Punkte anzusprechen. Die Schweiz und Schweden haben hohe λ_{GHG} -Werte, was bemerkenswert ist, da beide Länder im europäischen Vergleich einen hohen Anteil der Industrie am BIP aufweisen.¹⁵⁹ Die Schweizer Ökonomie ist allerdings unter anderem durch einen ausgeprägten Finanzplatz charakterisiert, was ihre wirtschaftliche Struktur von der deutschen Wirtschaft unterscheidet.¹⁶⁰ Der schwedische Fall ist dagegen bemerkenswert, da die geografisch angrenzenden Länder Finnland und Norwegen deutlich höhere Emissionen im Verhältnis zum BIP aufweisen. Schweden belegte beim *Climate Change Performance Index* (CCPI), welcher jährlich von der nicht Regierungsorganisation Germanwatch herausgegeben wird, kontinuierlich einen der vorderen Plätze.¹⁶¹ So erreichte Schweden in den Jahren 2018–2021 den höchsten vergebenen Platz, anzumerken ist, dass die ersten drei Plätze noch nie vergeben wurden.¹⁶²

Insgesamt ist auffällig, dass die mit hohen Werten herausstechenden Punkte (rechts oben in Abbildung 11) häufig kleine und sehr kleine Länder repräsentieren; so unter anderem Singapur, der Inselstaat Malta oder Luxemburg, das zwar eine sehr hohe Arbeitsproduktivität, aber auch weniger als eine Million Einwohner hat. Diese Länder sind daher nur bedingt mit Deutschland vergleichbar.

Frankreich (FRA) und Italien (ITA) sind hingegen von Interesse, da beides große Volkswirtschaften sind, die bei ähnlich hohen Arbeitsproduktivitäten λ_L höhere λ_{GHG} -Werte als Deutschland (DEU) aufweisen. Bemerkenswert ist auch

158 OLS-Schätzungen auf der Grundlage von anderen funktionalen Formen erzielen geringere R^2 -Werte, so unter anderem: „lin-log“ (32,0%) oder „log-log“ (33,7%), wobei Arbeitsproduktivität die abhängige Variable (y) und THG-Output-Relation die unabhängige Variable (x) ist.

159 Die Anteile des Industriesektors der jeweiligen Länder waren 2022: Deutschland 26,7%, Schweden 23,7%, Schweiz 24,2%, siehe Weltbank: <https://data.worldbank.org/indicator/NV.IND.TOTL.ZS> (18.01.2024).

160 Schweizer Finanzunternehmen tragen ca. 10% zum BIP bei, Deutschland 3,6% im Jahr 2022, siehe Statista <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/308823/umfrage/anteil-des-schweizer-finanzen-sektors-am-bip/> und <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/309545/umfrage/anteil-des-finanzen-sektors-am-deutschen-bip/> (beide 18.01.2024).

161 Siehe Germanwatch (<https://www.germanwatch.org/>, 20.01.2024) und Climate Change Performance Index (<https://ccpi.org>, 20.01.2024).

162 Schweden weist zum Beispiel bei der Stromproduktion einen hohen Anteil nicht-fossiler Energieträger auf (aufgrund von hohen Anteilen der Kern- und Wasserkraft). Schwedens Erfolg beim Klimaschutz insgesamt hat jedoch auch mit den wirtschaftlichen Tätigkeiten zu tun und wäre in einem anderen Rahmen zu vertiefen.

das Vereinigte Königreich (GBR), das einen höheren λ_{GHG} -Wert und eine niedrigere Arbeitsproduktivität hat als Deutschland.

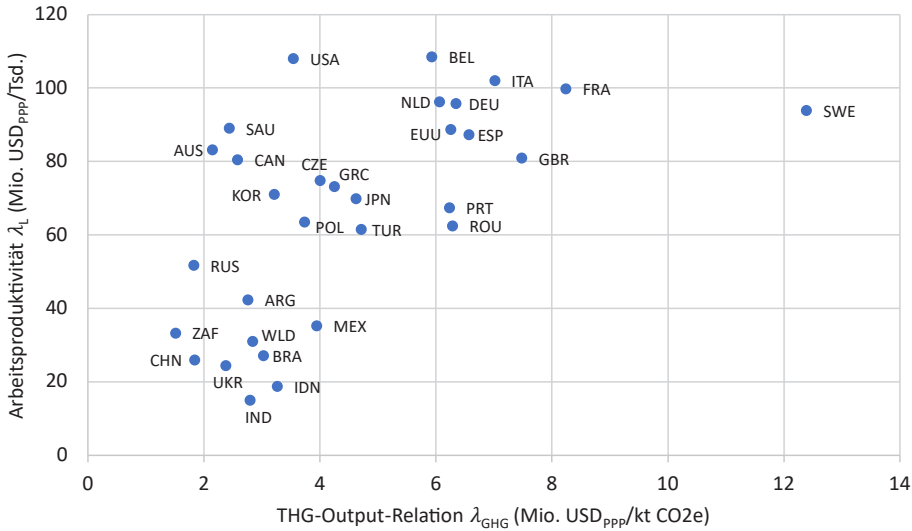


Abbildung 12: Technologieparameter Auswahl („G20+Europa“) (2019)

Um die Ergebnisse differenzierter zu betrachten, sind in Abbildung 12 ausgewählte Länder abgebildet. Diese Auswahl enthält alle G20-Staaten und für die europäische Perspektive die europäischen Länder mit mehr als 10 Mio. Einwohner:innen.

Als Bezugsrahmen wäre im Allgemeinen auch eine andere Auswahl denkbar. Diese würde allerdings zu ähnlichen Ergebnissen gelangen:

1. Die Selektion nach der Kategorisierung der Marktwirtschaft: In der politischen Ökonomie gibt es das Cluster nordeuropäische, exportorientierte, koordinierte Marktwirtschaften (siehe unter anderem Iversen et al., 2016, S. 162), die einen engeren Fokus auf ähnliche europäische Länder böten. Die Auswahl enthielte Österreich, Belgien, Finnland, Deutschland und die Niederlande und grenzt sich von den europäischen Volkswirtschaften in der Peripherie ab (Iversen et al., 2016, S. 162).
2. Die Selektion nach ähnlichen Werten im *Economic Complexity Index* (ECI). Der ECI beschreibt die Diversität von Produktionsstrukturen von Regionen oder Ländern.¹⁶³ Für den vorliegenden Zweck böte sich insbesondere der Teilindex *ECI Technology* des Jahres 2021 an. Deutschland

¹⁶³ Mathematisch wird der ECI über den Eigenwert von Produktionsmatrizen definiert. Siehe

liegt hier auf Platz 2, Schweden auf Platz 1, weitere Länder sind Österreich (Rang 3), Italien (Rang 5), Frankreich (Rang 7), Vereinigtes Königreich (Rang 14), USA (Rang 25).¹⁶⁴

In der Länderauswahl von Abbildung 12 ist eine hohe Korrelation der beiden abgebildeten Größen zu beobachten. Der Vergleich von Ländern mit hohem Einkommen zeigt jedoch ein anderes Bild: Werden bei dieser Auswahl nur die Länder mit einem Pro-Kopf-BIP nach KKP von über 30.000 USD_{PPP} (2019) ausgewählt, ist festzustellen, dass diese Korrelation nicht mehr vorliegt (siehe Abbildung 13).¹⁶⁵

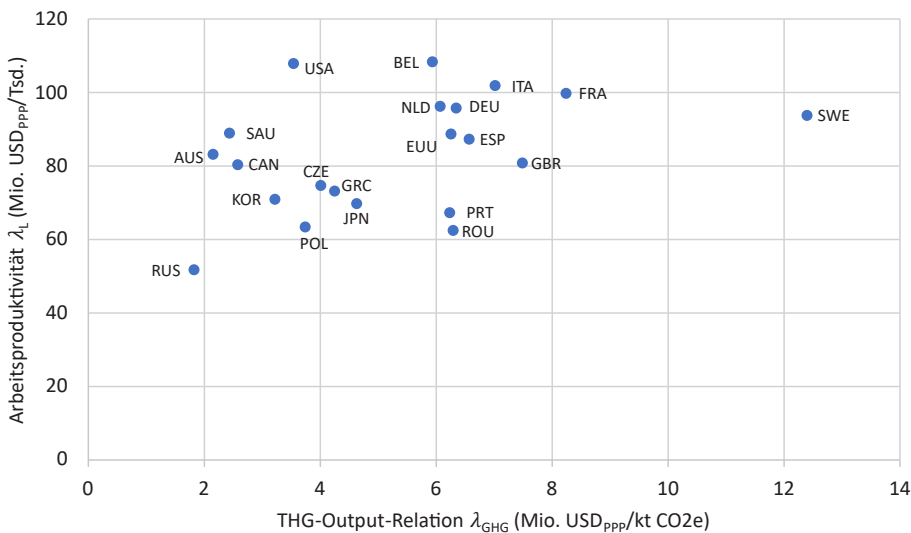


Abbildung 13: Technologieparameter Auswahl II („G20+Europa+BIP“) (2019)

Hidalgo (2021) und Hausmann et al. (2011) zum theoretischen Hintergrund des ECI. Von der Tendenz her lässt sich sagen: Ein Land mit einem hohen ECI produziert vielfältige Produkte (viele Sektoren weisen relevante Umsätze auf) und nutzen Vorprodukte aus vielen Ländern, welche tendenziell selbst einen hohen ECI aufweisen. Länder mit niedrigem ECI beziehen wenig unterschiedliche Produkte aus wenigen Ländern mit tendenziell geringem ECI. Metriken für ökonomische Komplexität wie der ECI können eignen sich unter anderem zur Vorhersage von ökonomischem Wachstum (BIP), Einkommensungleichheit und THG-Emissionen eingesetzt werden (Hidalgo, 2021, S. 92).

¹⁶⁴ Das aktuelle Ranking ist auf der Website des Observatory of Economic Complexity (OEC): <https://oec.world/en/rankings/eci/hs6/hs96?tab=ranking> (19.01.2024).

¹⁶⁵ Die Gleichung der linearen Regression ist $y = 2,4968x + 69,952$, bei $R^2 = 15,5\%$. Das gilt umso mehr für die Auswahl der Länder mit einem Pro-Kopf-BIP nach KKP von über 35.000 USD_{PPP} (2019), da hier $R^2 = 8,5\%$ und der Steigungsparameter noch geringer sind ($y = 1,4651x + 79,798$).

Zur Verdeutlichung dieser unterschiedlichen ökonomischen Strukturen der Länder ist im Gedankenexperiment zu überlegen, was passiert, wenn Deutschland die Technologiekombinationen anderer Länder annehmen würde. Hierbei werden für einen Moment die realen Widrigkeiten außer Acht gelassen, zum Beispiel die Tatsache, dass die Länderspezifikationen auch geografisch und historisch begründet liegen und sich die Geografie und Historie nicht verändern lassen. Die Annahme ist hierbei, dass die Technologie im Sinne der Arbeitsproduktivität und THG-Output-Relation anderer europäischer Länder prinzipiell für Deutschland erreichbar wäre. Das heißt, durch Umstellung der Volkswirtschaft – ob strukturell oder technologisch – würde angenommen, dass auch die anderen Punkte der Wolke erreichbar wären. Folgende Werte werden in den Blick genommen:

Tabelle 12: Durchschnittliche Veränderung der Technologieparameter pro Jahr

	λ_{GHG} (Mio. USD _{PPP} /Tsd. t CO ₂ e)	λ_L (Mio. USD _{PPP} /Tsd. Erwerbstätige)
Deutschland (DEU)	6,3	95,7
Vereinigtes Königreich (GBR)	7,5	80,8
Schweden (SWE)	12,4	93,8

Im Rahmen des Gedankenexperiments lassen sich die Implikationen für Emissionen und Beschäftigung ableiten, wenn sich der deutsche volkswirtschaftliche Aufbau hin zur Struktur anderer Länder verändern würden.

Wenn Deutschland die Technologieparameter von Schweden hätte, dann

- würden die THG-Emissionen bei gleichem BIP lediglich 51% der aktuellen betragen (=6,3/12,4),
- während die Beschäftigung mit einer Reduktion von 2% etwa gleich wäre (=95,7/93,8).

Wenn Deutschland die Technologieparameter des Vereinigten Königreichs hätte, dann

- würden die THG-Emissionen bei gleichem BIP auf 85% reduziert sein (=6,3/7,5)
- und wäre die Beschäftigung um 18% erhöht (=95,7/80,8).

Im Ergebnis ist zu konstatieren: Würde man davon ausgehen, dass die Arbeitsproduktivitäten und THG-Output-Relationen existierender Werte anderer Länder erreichbar wären, wären zwar positive Effekte auf die Beschäftigung (siehe

Vereinigtes Königreich) genauso wie deutlich reduzierte THG-Emissionen vorstellbar (siehe Schweden), eine ausreichende Reduktion der THG-Emissionen im Sinne der Pariser Klimaziele wäre aber auch hier nicht gegeben.

Dennoch zeigen sich gerade durch die Beispiele Vereinigtes Königreich und Schweden Potenziale. Im Sinne der ÖSR ist insbesondere die Substitution, das heißt die Reduktion der Arbeitsproduktivität bei gleichzeitiger Erhöhung der THG-Output-Relation von Relevanz. Der Punkt des Vereinigten Königreichs in Abbildung 13 deutet an, dass eine solche Bewegung nach rechts unten möglich sein könnte, auch wenn gleichzeitig festzuhalten ist, dass sich Deutschland gegenüber den Niederlanden, Belgien und den USA bereits weiter rechts unten in diesem Diagramm befindet.

Vor dem Hintergrund des Pariser Abkommens ist festzuhalten, dass sich alle Länder technologisch deutlich verbessern müssen. Die mehrjährige Betrachtung der Parameter zeigt eine anhaltende Verbesserung in den vergangenen Jahren, die genau dafür einen Anhaltspunkt geben. Diese zeitliche Perspektive wird deshalb nachfolgend untersucht.

12.3.3 Trend vergangener Jahre

Zur Abbildung der zeitlichen Perspektive ist eine zusätzliche Dimension hinzuzufügen. Um die Darstellbarkeit zu gewährleisten ist demzufolge eine stärkere Selektion auf weniger Länder nötig. Hierfür wurden in Abbildung 14 die zuvor schon erwähnten europäischen Länder aufgegriffen, die sich bereits zum Vergleich anboten, und um die USA ergänzt.

Für alle ausgewählten Länder ist für die Jahre von 1991 bis 2019 eine Bewegung nach rechts oben zu verzeichnen, das heißt eine Verbesserung beider Parameter. Schweden fällt mit großen Sprüngen in Richtung hoher THG-Output-Relation auf. Die USA bewegte sich als großes Land weniger sprunghaft. Auffallend ist bei der größten Volkswirtschaft der Welt außerdem die nur geringe Entwicklung bei der THG-Output-Relation.

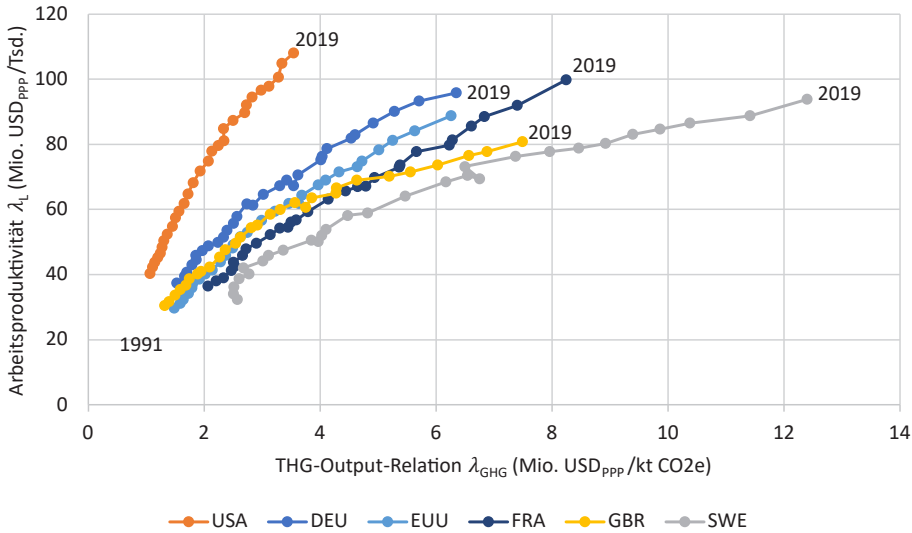


Abbildung 14: Technologieparameter-Verbesserung ausgewählter Länder 1991–2019

Zwischen den beiden Ländern sind die drei großen, europäischen Volkswirtschaften zu finden: das Vereinigte Königreich, Frankreich, Deutschland und passenderweise auch die Europäische Union (in Abbildung 14 mit EUU abgekürzt) als Ganze. Augenscheinlich war die Geschwindigkeit der Verbesserung der Parameter in den späteren Jahren durchschnittlich höher, was die nachfolgende Tabelle belegt. In Tabelle 13 sind die jährlichen Verbesserungen der Parameter λ_{GHG} und λ_L für zwei unterschiedliche Zeiträume (1991–2019 und 2001–2019) angegeben.

Der Eindruck bestätigt sich, denn alle zwölf Werte sind im Zeitraum 2001–2019 höher – teilweise erheblich höher – als im Zeitraum 1991–2019. Damit wird eine Unterschiedlichkeit zwischen den 1990er Jahren einerseits und den 2000er und 2010er Jahren andererseits deutlich. Um den aktuellen Trend zur erschließen, empfiehlt sich deshalb der Zeitraum ab 2001.

An Tabelle 13 wird auch eine große Heterogenität in den durchschnittlichen jährlichen Verbesserungen erkennbar. Am oberen Ende der Arbeitsproduktivitätssteigerung steht die USA in den Jahren 2001–2019 mit einer Steigerung von 2,7 Mio. USD_{PPP}/Tsd. Erwerbstätige pro Jahr. Deutschland verzeichnet im gleichen Zeitraum eine Steigerung von 2,3 Mio. USD_{PPP}/Tsd. Erwerbstätige. Weit abgeschlagen ist die Steigerung der Arbeitsproduktivität weltweit von 0,77 Mio. USD_{PPP}/Tsd. Erwerbstätige pro Jahr seit 2001.

Tabelle 13: Durchschnittliche Veränderung der Technologieparameter pro Jahr

	λ_{GHG} (Mio. USD _{PPP} /Tsd. t CO ₂ e)		λ_L (Mio. USD _{PPP} /Tsd. Erwerbstätige)	
	Differenz p.a. 19919	Differenz p.a. 2001–2019	Differenz p.a. 1991–2019	Differenz p.a. 2001–2019
Deutschland (DEU)	0,17	0,22	2,09	2,34
Frankreich (FRA)	0,22	0,27	2,26	2,53
Vereinigtes Königreich (GBR)	0,22	0,28	1,80	1,85
Schweden (SWE)	0,35	0,47	2,20	2,43
Europäische Union (EUU)	0,17	0,22	2,11	2,38
USA (USA)	0,09	0,11	2,41	2,70
Welt (World)	0,07	0,07	0,77	0,95

Am oberen Ende der Verbesserung der THG-Output-Relation steht Schweden mit einer jährlichen Besserungsrate von 0,47 Mio. USD_{PPP}/Tsd. t CO₂e seit 2001. Der entsprechende weltweite Durchschnittswert liegt auch hier deutlich abgeschlagen bei ca. einem Siebtel (0,07 Mio. USD_{PPP}/Tsd. t CO₂e). Deutschland findet sich mit einer jährlichen Verbesserung der THG-Output-Relation von 0,22 Mio. USD_{PPP}/Tsd. t CO₂e im Zeitraum von 2001–2019 auch hier im Mittelfeld wieder und entspricht dem Mittel der Europäischen Union.

Im Hinblick auf die Validierung der nachfolgenden agentenbasierten Modellierung empfehlen sich die deutschen Werte daher aus verschiedenen Gründen. Hierfür sind für das Ausgangsszenario die deutschen Technologieparameter fortzuschreiben. Ziel der Validierung ist es, diese fortgeschriebenen Werte im Baseline-Szenario (keine Reform) am Ende des Simulationszeitraums zu erreichen. In Tabelle 14 wurden diese Fortschreibungen der Arbeitsproduktivität λ_L und der THG-Output-Relation λ_{GHG} für 15 Jahre vorgenommen.

Tabelle 14: Trendfortschreibung der Technologieparameter von Deutschland

	λ_{GHG} (Mio. USD _{PPP} /Tsd. t CO ₂ e)	λ_L (Mio. USD _{PPP} /Tsd. Erwerbstätige)
Wachstum p.a. (2001–2019)	0,22	2,34
Startwert 2019: ¹⁶⁶	6,35	95,7
Fortschritt in 15 Jahren:	3,30	35,2
Zielwert 2034:	9,64	130,9

Die im Trend fortgeschriebenen deutschen Werte befinden sich im Rahmen der Werte anderer Länder heute. Die Arbeitsproduktivität λ_L würde dann zwar die Werte der vier anderen Vergleichsländer aus Tabelle 13 überschreiten, die THG-Output-Relation λ_{GHG} dagegen den schwedischen Wert von 2019 deutlich verfehlen: Dieser liegt bei 12,4 Mio. USD_{PPP}/Tsd. t CO₂e, der fortgeschriebene Wert von Deutschland ist mit 9,6 Mio. USD_{PPP}/Tsd. t CO₂e deutlich geringer. Selbst wenn Deutschland bereits heute die höhere schwedische Geschwindigkeit hätte, würde dies nur dafür ausreichen, die heutigen Werte der THG-Output-Relation von Schweden innerhalb von 15 Jahren etwa zu erreichen.

Diese Trendfortschreibung macht klar, dass zur Erreichung der Klimaziele eine deutliche Steigerung dieser jährlichen Verbesserungen nötig ist und sich die Geschwindigkeit der technologischen Entwicklung erhöhen muss. Als Gesamtfazit ist zu ziehen, dass langfristig sowohl die anderen Länder mit ihrem heutigen Parameter für die THG-Output-Relation nicht als langfristiges Vorbild dienen können als auch die derzeitige Verbesserungsgeschwindigkeit dieses Parameters von Deutschland keine Option darstellt, um in den nächsten 15 Jahren im Klimaschutz ausreichend voranzukommen.

Die Einschätzungen dieses Kapitels können nichtsdestoweniger zur Orientierung und späteren Validierung des Status quo der technologischen Entwicklung dienen. Ersichtlich wird allerdings, dass eine deutliche Steigerung der technologischen Entwicklung im Klimaszenario der agentenbasierten Modellierung nötig sein wird.

¹⁶⁶ Das Jahr 2019 ist das letzte vollständig verfügbare Jahr und wird deshalb herangezogen.

12.4 Methodik der agentenbasierten Modellierung

12.4.1 Grundlagen

Da unterschiedliche Modellierungsansätze unterschiedliche Grundannahmen aufweisen, wird im Folgenden die Methodologie der agentenbasierten Modellierung erläutert und begründet, warum sich diese für den vorliegenden Anwendungsfall besonders eignet.

Die agentenbasierte Modellierung (engl. „Agent-based Modelling“, teilweise auch „Agent-based Computational Modelling“¹⁶⁷) ist eine computergestützte Modellierungs- und Simulationsmethode, die auf einzelne Agent:innen zur Modellbildung zurückgreift. Diese Individuen oder Akteur:innen verhalten sich nach vorab definierten Regeln, welche bei der Simulation agentenweise angewandt werden. Auf diese Weise können Dynamiken von komplexen Systemen simuliert werden, deren langfristige Entwicklung *ex ante* nicht absehbar ist. Eine hohe Zahl von Agent:innen verschiedener Agentengruppen können interagieren und somit Verbindungen zwischen der Mikro- und der Makro-Ebene sichtbar machen. Die Methode der agentenbasierten Modellierung hat eine lange Tradition in den naturwissenschaftlichen Disziplinen wie etwa der Biologie, ihre Anwendung in der Volkswirtschaftslehre ist dagegen neuer und demnach einer größeren und zunehmenden Dynamik ausgesetzt. Erste Modellierungen wurden laut Dawid (2019, S. 775) im Bereich der Finanzmärkte Ende der 1990er eingesetzt – so zum Beispiel die Arbeiten von Arthur et al. (1996) und Lux und Marchesi (1999). Laut Dawid „handelt es sich zweifellos nach wie vor um ein sehr junges und auch relativ kleines Forschungsgebiet“ (Dawid, 2019, S. 778).

Wesentliche Charakteristiken von agentenbasierter Modellierung sind (vgl. Dawid & Gatti, 2018; Dawid, 2019; Dosi & Roventini, 2019; Axtell & Farmer, 2022):

1. Heterogenität: Agentenbasierte Modelle sind darauf ausgelegt, die Heterogenität der Akteur:innen einer Volkswirtschaft zu berücksichtigen. Somit können unterschiedliche Eigenschaften, Präferenzen und Verhaltensregeln modelliert werden. So kann etwa beschränkte Rationalität oder nicht vollständige Information der Akteur:innen Berücksichtigung finden.
2. Flexibilität: Hohe Flexibilität geht mit der Heterogenität einher. Damit können die Entscheidungsregeln und Interaktionsmuster nahe an die

¹⁶⁷ Teilweise wird „Agent-based Modelling“ auch als Überkategorie des „Agent-based Computational Modelling“ gesehen (Tessfatsion, 2017, S. 385).

Realität heranrücken. Die Methode ist keinem bestimmten Modellierungsparadigma verpflichtet (Dawid, 2019, S. 776). Allgemeine Gleichgewichte sind wie auch zentrale Planer nicht erforderlich.

3. Interaktion und Adaptation: Im Mittelpunkt steht die Interaktion der verschiedenen Einzelakteur:innen. Bei allen Entscheidungen dieser Akteur:innen werden Resultate der vorherigen Entscheidungen anderer Akteur:innen berücksichtigt und bauen auf sie auf. Die Adaption hängt eng mit der Interaktion zusammen: Vorherige Ergebnisse können zu Verhaltensänderungen der bislang gezeigten Verhaltensweisen führen.
4. Nicht-Linearität und stochastische Dynamik: Bei der agentenbasierten Modellierung ist es möglich, differenzierte und damit nichtlineare Verhaltensregeln zu definieren. Kleine Veränderungen einer Variable können große Auswirkungen auf andere Variablen haben. Darüber hinaus konvergieren agentenbasierte Modelle nicht zwangsläufig zu einem schon vorab definierten Gleichgewicht, sondern die Applikation der Verhaltensweisen und die teilweise implementierten Zufallsereignisse führen möglicherweise zu keinem statischen Endpunkt.
5. Zusammenspiel von Mikro-, Meso- und Makroebene: Das Verhalten des Systems als Ganzes (Makroebene) resultiert aus einer Vielzahl von Interaktionen auf der Ebene der Einzelakteur:innen (Mikroebene) (vgl. Lamperti et al., 2018, S. 329). Individuelle Rationalität kann von makroökonomischen Entwicklungen entkoppelt werden (Epstein, 1999, S. 48f). So eignen sie sich bspw. gut, um systemische Risiken etwa zwischen Real- und Finanzmärkten zu simulieren.

Damit bringen agentenbasierte Modelle verschiedene Stärken mit sich (vgl. Dawid, 2019, S. 776ff; Dosi & Roventini, 2019, S. 20–23; Axtell & Farmer, 2022). So können verschiedene Aspekte meist ohne große Schwierigkeiten angepasst und zusätzliche, verfeinerte Annahmen durch eine Erweiterung des Codes implementiert werden. Bei gleichgewichtsbasierten neoklassischen Modellen dagegen kann dies schwieriger sein und es kann vorkommen, dass aufgrund von Lösbarkeitsproblemen, Annahmen nicht oder nur auf eine bestimmte Weise getroffen werden können. In der agentenbasierten Modellierung ist es nicht notwendig, aus Umsetzungsgründen auf Standardannahmen zurückzugreifen. Diese Flexibilität birgt die Chance, eine Vielzahl von Annahmen realitätsnah und passgenau zu treffen.

Der Aspekt der Flexibilität wird allerdings auch als zentraler Kritikpunkt an der agentenbasierten Modellierung genannt, da durch die detaillierten

Annahmen der Agent:innen viele Variablen und damit Freiheitsgrade bei der Validierung entstehen können (Fagiolo & Roventini, 2016). Im vorliegenden Modell wird deshalb die Bildung zusätzlicher Variablen mit Bedacht vorgenommen und auf ihren möglichen zusätzlichen Nutzen hin eingeschätzt.

Eine andere Kritik an agentenbasierter Modellierung ist, dass sie sich nicht gut für Vorhersagen eignet. Dies ist aber vor dem Hintergrund von Modellen wie von Poledna et al. (2023) in der Zwischenzeit als nicht mehr zutreffend zu bewerten, da Out-of-Sample-Forecasts mithilfe von agentenbasierten Modellen gegenüber anderen Modellen konkurrenzfähig sind und zudem im Gegensatz zu DSGE-Modellen eine höhere Disaggregation aufweisen und stock-flow-konsistent sein können.

Die agentenbasierte Modellierung zählt zu den algorithmischen Modellen. Auch wenn sich mathematische und algorithmische Modellierungsarten ontologisch nicht unterscheiden, ergeben sich aus der Tatsache, dass mathematische Modelle aus mathematischen Objekten bestehen, während der grundlegende Baustein in algorithmischen Modellen Prozeduren sind, wichtige epistemologische Unterschiede ergeben (Gräbner, 2018, Punkt 2.20). So liegt eine Stärke der agentenbasierten Modellierung auf der Erklärung der Interaktion von Akteur:innen.

Bei agentenbasierten Modellen kommt der Modellverifikation, das heißt der internen Überprüfung der Konsistenz des Modells, eine besondere Bedeutung zu. Verifikation adressiert die Frage, ob das Modell mit Blick auf die Prozesse und Zusammenhänge das tut, was es tun soll (Gräbner, 2018, Punkt 3.3). Das zu beschreibende Zielsystem spielt hierbei keine Rolle, stattdessen geht es um die Vergewisserung, ob der Algorithmus den Prozess bzw. Zusammenhang beschreibt, der intendiert war. Aufgrund von zum Teil langen Codes, in denen inhaltliche Fehler auftreten können, die nicht zwangsläufig zu einer Fehlermeldung führen, ist die Verifikation eine besondere Angelegenheit der agentenbasierten Modellierung, die es durch die klare Darstellung des Programmcodes sowie der Einhaltung von Programmiernormen und -gepflogenheiten zu adressieren gilt.

Die Validierung adressiert die Frage, wie gut das Modell das zu beschreibende Zielsystem repräsentiert. Tesfatsion (2017, S. 392f) unterscheidet vier Arten der Validierung:

1. Inputvalidierung (Abgleich der Annahmen des Ausgangsmodells mit der Realität)
2. Prozessvalidierung (Abgleich der Prozesse des Modells mit der Realität)

3. Outputvalidierung (Abgleich der Ergebnisse des Modells mit der Realität)
4. Vorhersagende Outputvalidierung (Abgleich der vorhergesagten Ergebnisse mit der Realität)

Bei der Implementierung von festen Buchhaltungsregeln oder Steuergesetzen, wie sie häufig und so auch in der vorliegenden agentenbasierten Modellierung angewandt werden, handelt es sich um Inputvalidierung. Verbreitet ist darüber hinaus auch die Prozessvalidierung, die aufgrund der Frage nach der Richtung und Beschaffenheit technologischer Entwicklungen im vorliegenden Fall ebenfalls in Frage kommt. Dawid (2019, S. 772) zufolge werden typischerweise die zentralen Parameter des Modells direkt aus Daten abgeleitet, die verbleibenden Parameter werden graduell angepasst, um die stilisierten Fakten zu reproduzieren. Die Fähigkeit, eine hohe Anzahl empirischer Fakten zu reproduzieren, wird als Stärke gesehen (Dawid, 2019, S. 777).

Es gibt eine lebendige Debatte darüber, welche Methoden zur Verifikation und Validierung adäquat sind, und neue Methoden werden entwickelt (vgl. J.-S. Lee et al., 2015; Ten Broeke et al., 2016; Schulze et al., 2017). Zunehmend bilden sich Standards heraus, auch wenn es grundlegende Uneinigkeit darüber gibt, inwieweit die Modellverifikation und Validierung notwendig und machbar sind (vgl. Gräbner, 2018, Punkte 1.5 und 1.6).

Die Herausforderungen liegen Dawid (2019, S. 778f) zufolge in der Entwicklung und Verbreitung von Standards, um stärkere Transparenz und Vergleichbarkeit zu erreichen. Die methodologische Entwicklung sei „bei weitem noch nicht abgeschlossen“ (Dawid, 2019, S. 779), Dawid erwartet nichtsdestotrotz, dass die agentenbasierte Modellierung eine zunehmend wichtige Rolle spielen wird.

12.4.2 Eignung der agentenbasierten Modellierung

Bei der vorliegenden Fragestellung der Richtung und möglichen Lenkung der technologischen Entwicklung erscheinen die genannten Vorteile und Charakteristika der agentenbasierten Modellierung besonders zutreffend.

Zur Modellierung des Zusammenspiels von inkrementellen Veränderungen der Produkte durch technologische Entwicklungen erweist sich eine Vielzahl von simulierten und potenziell unterschiedlichen Akteur:innen als sinnvoll, wie sie in der agentenbasierten Modellierung abbildbar sind. Diese Mikroeffekte durch Innovation und der daran anknüpfende Wettbewerbsdruck ha-

ben Auswirkungen auf die Makroebene und bestimmen welcher Technologiepfad langfristig insgesamt eingeschlagen wird. Agentenbasierte Modelle eignen sich, heterogene Effekte zwischen der Mikro- und Makroebene zu berücksichtigen (Dosi et al., 2018; vgl. Dosi, Pereira, et al., 2017; Lamperti et al., 2018). Mit dieser Stärke können die Variablen der Makroebene (Steuern und Sozialversicherungen) auf die Mikroebene gebracht werden (die Interaktion von Unternehmen und Konsument:innen), um dann wiederum – wie bereits beschrieben – die Effekte auf der Makroebene in den Blick zu nehmen (Beschäftigung, THG-Emissionsreduktion und technologische Entwicklung).

Auch beim Aspekt der Technologie bietet sich die agentenbasierte Modellierung an. Um technologische Entwicklung in der langen Frist zu modellieren, gilt es unter anderem Unsicherheit und das Zusammenspiel begrenzt rationaler, heterogener Akteur:innen zu integrieren, wofür sich agentenbasierte Modelle eignen (vgl. Farmer et al., 2015). Die Berücksichtigung dieser Aspekte ist für lange Betrachtungsrahmen von erheblicher Bedeutung (Pindyck, 2013; Farmer et al., 2015).

12.5 Das Modell

12.5.1 Grundstruktur

Im Folgenden werden die Mechanismen mit den dafür notwendigen Variablen des Modells eingeführt.¹⁶⁸ Ergänzend wird das agentenbasierte Modell im technischen Anhang beschrieben. Der zugrundeliegende Code ist darüber hinaus online abrufbar.¹⁶⁹

Dem Ansatz der vorliegenden Arbeit folgend, dass es sich um eine weitreichende und graduell umgesetzte Reform handeln soll, werden für die Umsetzungsphase der Reform 15 Jahre angesetzt. Um mögliche Effekte beim Maßnahmenbeginn sichtbar machen zu können, werden diesen 15 Jahren drei Jahre vor der Reform vorangestellt. Um die Effekte nach Beendigung ebenfalls in den Blick nehmen zu können, werden weitere drei Jahre ohne Reform angehängt. Der Betrachtungszeitraum beträgt damit 21 Jahre, was bspw. von 2024 bis 2045 sein könnte, wobei 2045 dem aktuellen Zieljahr für THG-Neutralität der deutschen Bundesregierung entspricht.

168 In der agentenbasierten Modellierung sind die einzelnen Funktionen als Methoden implementiert – entlang dieser Methoden wird das Modell im technischen Anhang differenzierter beschrieben. Methoden sind in der objektorientierten Programmierung Prozeduren, die von übergeordneten Objekten ausgeführt werden können. Haushalte und Unternehmen sind im vorliegenden Fall die Objekte bzw. Klassen, von denen die Methoden ausgeführt werden können.

169 Siehe Github: <https://github.com/HannesVetter> (27.03.2024).

Die Modellierung findet in diskreter Zeit statt. Als Zeitschritt bzw. Periode wird ein Monat gewählt. Die 21-jährige Hauptphase der Simulation besteht somit aus 252 Zeitschritten bzw. Monaten. Die davorgestellte Burn-in-Phase (s.u.) besteht aus 21 Zeitschritten, sodass es insgesamt 273 Zeitschritte sind.

Die Makrostruktur des Modells orientiert sich an der VGR. Hierbei ist die deutsche Volkswirtschaft Zielobjekt der Validierung (vgl. die Makrostruktur von Poledna et al., 2023, S. 5, die der österreichischen volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung folgt).

12.5.2 Ablauf des Modells

Das Modell durchläuft mehrere Phasen. Am Anfang steht die Initialisierung, in der die Haushalte und Unternehmen generiert werden. Darauf folgt die Burn-in-Phase. In dieser wird das Modell eingeführt, sodass mögliche Anfangsverzerrungen nicht die Ergebnisse der Hauptphase beeinflussen. Die 21-jährige Hauptphase und eigentliche Simulationsphase beginnt daher erst mit Abschluss der Burn-in-Phase. Mit ihr setzt die Entwicklung der Technologie ein. Schließlich werden die Ergebnisse aller Modelldurchläufe gespeichert und zur weiteren Verarbeitung aufbereitet.

Für jedes Szenario werden zehn Durchläufe generiert und Mittelwerte gebildet. Ziel dieses Monte-Carlo-Verfahren ist es sicherzustellen, extreme, ggf. nichtrepräsentative Durchläufe, die grundsätzlich entstehen können, nicht überzubewerten. Die zehn Durchläufe sind außerdem im Einzelnen zu prüfen, um Auffälligkeiten zu identifizieren, da die Simulation an zentralen Stellen auf Zufallsvariablen aufbaut (vgl. Dosi et al., 2013; Dafermos et al., 2018; Lamperti et al., 2018, 2020; Hötte, 2020). Diese Prüfung wurde für alle vorgestellten Ergebnisse durchgeführt und kann anhand der abgebildeten Schaubilder im Anhang nachvollzogen werden. Aus Übersichtsgründen wird auf die Durchschnittswerte dieser zehn Durchläufe zurückgegriffen.

In jedem Szenario erfolgt in jedem Zeitschritt nacheinander die Produktion und der Handel der Güter, die Durchführung der Reform zur Festlegung der Rahmenbedingungen des darauffolgenden Zeitschritts, sofern eine Reform modelliert wird, und schließlich die Vorbereitung der Unternehmen auf den nächsten Zeitschritt.

12.5.3 Akteure des Modells

Das Modell umfasst zwei Akteursgruppen: Haushalte und Unternehmen. Die staatlichen Einnahmen werden aufgrund der Aufkommensneutralität der betrachteten Reformen unmittelbar weitergeleitet, sodass der Staat nicht als eigenständiger Akteur in Erscheinung tritt. Grundsätzlich kaufen Haushalte bei Unternehmen homogene, aber im Preis verschiedene Güter. Haushalte haben zu Beginn ein Startbudget und erhalten ab der zweiten Periode ihr Einkommen von den Unternehmen. Die Produktionskosten der Unternehmen sind auf den Zweck des Modells fokussiert und bestehen lediglich aus den Komponenten: Arbeits-, Betriebs- und Investitionskosten sowie THG-Steuern.

In den Arbeitskosten ist alles enthalten, was für die Unternehmen als Ausgaben für Arbeit entsteht, das heißt auch arbeitsbedingte Steuern und Abgaben. Jenseits der THG-Steuern und der Arbeitskosten gibt es die Betriebskosten. Jegliche Steuern sind somit entweder in Arbeitskosten, Betriebskosten oder THG-Steuern enthalten.

Überschüssige Unternehmensgewinne werden als Dividende an die Haushalte zurückgeführt. Das gleiche gilt für die THG-Steuern, die dem Staat zugehen. Da dieser aber nicht in Erscheinung tritt, werden sie direkt den Haushalten zu gleichen Teilen zugeführt. Verteilungsaspekte bleiben unberücksichtigt.

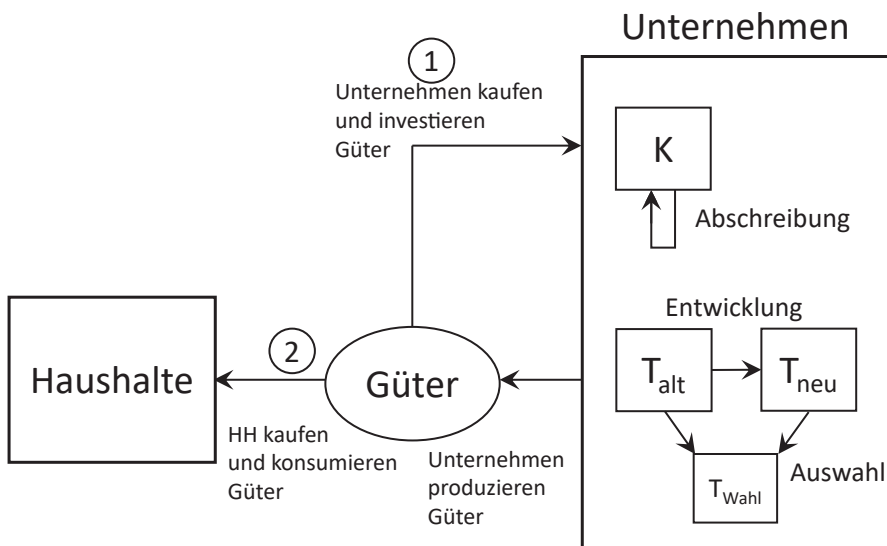


Abbildung 15: Schematische Darstellung des Modells

Investitionen sind ebenfalls Käufe von Gütern, die dann jedoch als Investitionsgüter verwendet werden, um Kapital K zu bilden (siehe Abbildung 15). Diese führen die Unternehmen am allgemeinen Gütermarkt selbst durch. Im ersten Schritt kaufen Unternehmen am Markt Güter als Investitionsgüter, wobei ausgeschlossen wird, dass ein Unternehmen bei sich selbst Güter kauft. Im zweiten Schritt kaufen Haushalte am Markt Güter als Konsumgüter. Die Kapazitäten der Unternehmen innerhalb eines Zeitschritts sind beschränkt und können nur langfristig gesteigert werden. Aufgrund dessen ist diese eben beschriebene Reihenfolge von Relevanz. Übersteigt die Nachfrage das Angebot, können nicht alle Haushalte ihre Bedarfe bedienen.

Außenhandel wird im Modell nicht berücksichtigt. Die Nettoexporte werden als Null angenommen. Tatsächlich lägen sie laut VGR bei 76.300 Mio. EUR im Jahr 2022, was 2,0% des BIP entspricht, sodass mögliche Verzerrungen gering sind (Statistisches Bundesamt [Hrsg.], 2023a, S. 9). Der in Abbildung 15 skizzierte technologische Prozess wird in einem eigenen Kapitel erläutert.

12.5.3.1 Haushalte

Haushalte stellen einen von zwei Akteursgruppen im Modell dar. Sie haben ein festes verfügbares Einkommen und kaufen damit zu gleichen Teilen (zu je einem Fünftel des verfügbaren Einkommens) bei Unternehmen homogene Güter. Das heißt, diese Güter unterscheiden sich nicht, selbst wenn sie mit unterschiedlichen Produktionsweisen hergestellt wurden. Die Innovationen der Unternehmen sind daher als Prozessinnovationen, nicht als Produktinnovationen zu verstehen. Die Haushalte führen eine *Auftragsliste* (auch *Shortlist* oder *Liste der engeren Wahl*), auf der die fünf aktuell präferierten Unternehmen stehen (vgl. Lengnick, 2013; Rengs et al., 2015).¹⁷⁰ Zunächst werden die Unternehmen auf ausreichend Kapazität hin geprüft und ggf. ersetzt. Zusätzlich wird in jedem Zeitschritt von den fünf Unternehmen der Auftragsliste eines Haushalts das teuerste Unternehmen ersetzt. Auf diese Weise wird einerseits kurzfristig einer Produkttreue entsprochen, da ein höherer Preis nicht zwangsläufig zur Wahl eines anderen Herstellers führt. Andererseits wird langfristig einem Preiswettbewerb entsprochen, da die teuersten Güter aussortiert werden und am Markt nicht bestehen werden können.

¹⁷⁰ Eine Alternative zu diesem Vorgehen ist, dass die Agenten, etwa die Haushalte, nur eine Teilmenge aller Unternehmen im Blick haben und aus diesen die für sie beste Wahl treffen (vgl. Caiani et al., 2016, S. 9). Der Vorteil der Shortlist ist jedoch, dass Haushalte nicht immer alle Unternehmen neu wählen und damit das System rigide ist: Ein hoher Preis führt nicht sofort zum vollständigen Umsatzverlust.

Obwohl es sich um eine langfristige Simulation handelt, wird kein nominales Wachstum etwa der Nachfrage der Haushalte angenommen. Das Wachstum des nominalen Umsatzes, der Nachfrage und anderer Modellvariablen versprechen keinen Mehrwert beim Blick auf die Forschungsfragen. Um zu vermeiden, dass Wachstum die Interpretation der verschiedenen Modellierungsszenarien erschwert, wird auf exogenes, nominales Wachstum verzichtet. Endogen wird allerdings über die Verbesserung der Technologie reales Wachstum erzeugt: Durch die fortschreitende Senkung der Produktionskosten können für die gleichen Mittel mehr Produkte (nach Stück) gekauft werden.

Es wird von 46 Mio. Erwerbstätigen zu Beginn ausgegangen (Statistisches Bundesamt [Hrsg.], 2023a). Dieser Startwert kann sich im Simulationsverlauf verändern, da die Anzahl der Erwerbstätigen von der Nachfrage von Unternehmen nach Arbeit abhängt. Die relative Zunahme der Erwerbstätigen ist im Modell ein Indikator für eine positive ökonomische Entwicklung. Allerdings wird immer das vollständige Einkommen der Erwerbstätigen auf alle Haushalte aufgeteilt, Arbeitslosigkeit oder andere Verteilungsaspekte werden insofern nicht berücksichtigt.

Das verfügbare Einkommen C der Haushalte entspricht als Quotient von Konsum und BIP gemäß der VGR ca. 75% des BIP (Statistisches Bundesamt [Hrsg.], 2023a). Der Konsum hängt direkt am verfügbaren Einkommen (vgl. D'Alessandro et al., 2020, S. 5). Sofern Unternehmen ausreichend Kapazitäten aufweisen, konsumieren die Haushalte vollständig ihr Einkommen, andernfalls wird der Konsum auf die nächste Periode verschoben. Grundsätzlich kann sich das verfügbare Einkommen verändern, denn es hängt von den Ausgaben der Unternehmen ab. Steigen etwa die Arbeitskosten, steigt auch das Einkommen der Haushalte. In jedem Zeitschritt wird das Einkommen daher neu berechnet. Die Haushalte geben es dann zu gleichen Teilen bei den fünf Unternehmen der Shortlist aus. Wird es nicht vollständig ausgegeben, verbleibt es bei den Haushalten und erhöht die Ausgaben im nächsten Zeitschritt. Jenseits dessen kann sich das verfügbare Einkommen durch den Ökobonus verändern. In diesem Fall wird das Aufkommen der THG-Steuer an die Haushalte als Einkommen geleitet.

Bevor es zum Kauf kommt, prüfen die Haushalte die Unternehmen ihrer Shortlist. Zuerst wird das teuerste Unternehmen auf der Shortlist durch ein zufälliges Unternehmen der Liste der vorhandenen Unternehmen mit Kapazität ersetzt. Darüber hinaus wird unmittelbar vor jedem Kauf die Kapazität der Unternehmen der Auftragsliste einzeln geprüft. Das heißt, sind die Kapazitäten der

präferierten Hersteller erschöpft, wird ein neues Unternehmen mit potenziell ausreichenden Kapazitäten ausgewählt und somit die Shortlist umgestellt. Dieser Schritt wird so oft wie notwendig durchgeführt, um ein Unternehmen mit Kapazitäten zu finden. Gibt es keine Unternehmen mit Kapazitäten mehr bzw. – auf Modellebene – ist die permanent geführte Liste der Unternehmen mit Kapazitäten leer, wird die Suche abgebrochen und das zuletzt ausgewählte Unternehmen verwendet. In diesem Fall könnte der betroffene Haushalt in dieser Periode seine Nachfrage nicht vollständig stillen.¹⁷¹

12.5.3.2 Unternehmen

Unternehmen sind der zentrale Akteur im Modell. Sie investieren in Kapital, entwickeln neue Technologien und wählen die kostengünstigere Technologie aus. Für die Produktion der Güter ist der Produktionsfaktor Arbeit L erforderlich, sodass durch die Unternehmen Arbeitsnachfrage entsteht. Bei der Produktion entstehen jedoch auch THG-Emissionen GHG , die zu Ausgaben aufgrund der THG-Steuern führen. Die Kosten eines Unternehmens setzen sich aus vier Komponenten zusammen:

- Arbeitskosten L_{cost}
- Betriebskosten und Steuern B
- Investitionsausgaben I
- THG-Steuern GHG_{cost}

Die Summe dieser Komponenten stellt den Gesamtumsatz Y dar. Ergänzt werden sie lediglich durch die Dividende, die als Überschuss entsteht und an die Haushalte abgegeben werden, da die Unternehmen im Besitz der Haushalte liegen (vgl. Caiani et al., 2016, S. 8). Eine Anhäufung von monetärem Vermögen findet nicht statt. Für alle Unternehmen aggregiert entspricht der Gesamtumsatz dem BIP, weshalb $Y = 3.876.800 \text{ Mio. EUR}$ bzw. ein monatlicher Wert von 323.100 Mio. EUR gewählt wird (Statistisches Bundesamt [Hrsg.], 2023a, S. 9). Durch die Reformen kommen den Arbeitskosten L_{cost} und den THG-Steuern GHG_{cost} zentrale Rollen zu.¹⁷² Sie berechnen sich durch:

¹⁷¹ In den folgenden Simulationen ist durchgängig festzustellen, dass dies nicht der Fall ist. Das heißt, die Nachfrage kann immer bedient werden.

¹⁷² Für L_{cost} ist der Begriff Arbeitskosten gewählt (vgl. Herzog-Stein & Stein, 2023, S. 9f), da für die vorliegende Modellierung ein breiter Begriff verwendet werden soll, der alle Kosten im Zusammenhang mit Arbeit beinhaltet (bspw. inkl. Lohnnebenkosten). Alternative Begriffe wären gewesen: Lohnkosten (enger als Arbeitskosten), Arbeitnehmerentgelt (Begriff aus der VGR) oder Personalkosten (Begriff aus der Unternehmensperspektive).

$$L_{cost} = w \cdot L,$$

$$GHG_{cost} = \tau \cdot GHG,$$

wobei w der Arbeitskostensatz und τ der THG-Steuersatz ist. Über die Arbeitskosten und den Gesamtumsatz definiert sich die Lohnquote $\xi = \frac{L_{cost}}{Y}$. Über die Arbeitskosten L_{cost} ergibt sich eine Lohnquote von ca. 50%.¹⁷³

Investitionen I sind ein weiterer Kostenfaktor, den Unternehmen proportional zur Höhe des Umsatzes der letzten Periode wählen (vgl. Investitionen in Technologie bei Lamperti et al., 2020). Dieser anteilige Faktor berechnet sich aus der VGR und beträgt gerundet 25% (Statistisches Bundesamt [Hrsg.], 2023a).¹⁷⁴

$$I_t = \psi Y_{t-1}.$$

Sind die finanziellen Mittel dafür nicht ausreichend vorhanden, werden die verbleibenden Finanzmittel investiert. Dabei gibt es keine zusätzlichen Investitionsgüter, sondern die getätigten Investitionen werden in der nächsten Periode am Gütermarkt erworben, wo ebenfalls die Konsumgüter gehandelt werden. Nicht zwischen Konsum- und Investitionsgut zu unterscheiden, ist insbesondere in Input-Output-Modellen üblich, in denen die Outputs der Sektoren gleichermaßen als Konsumgut (letzte Verwendung), als Investitionsgut oder als Vorprodukt weiterer Produkte verwendet werden (vgl. Modelle mit Input-Output-Tabellen von D'Alessandro et al., 2020; King, 2022; Poledna et al., 2023), wird aber auch in Modellen ohne Input-Output-Tabellen derart gehandhabt (vgl. Bovari et al., 2018).

Unternehmen haben ebenfalls eine Auftragsliste mit fünf Unternehmen, um Investitionsgüter zu erwerben. Auch hier wird wie beim Kauf durch die Haushalte angestrebt, die gesamten Investitionsausgaben gleichmäßig auf die

¹⁷³ Aus den Werten der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung: Das Arbeitnehmerentgelt (2.023.600 Mio. EUR) dividiert durch das BIP (3.876.800 Mio. EUR) ergibt eine Lohnquote von 52,2%, was auf 50% gerundet wird (Statistisches Bundesamt [Hrsg.], 2023). Hier ist anzumerken, dass Lohnquote auf der Grundlage der Arbeitskosten analog breit gefasst ist – die Definition der bereinigten und unbereinigten Lohnquote des Statistischen Bundesamtes weicht davon ab (2023, S.23). Es ist darauf hinzuweisen, dass in die Modellierung keine verketteten Vorprodukte einfließen, sondern die Haushalte kaufen die Endprodukte direkt bei den Unternehmen, die diese Produkte vollständig produziert haben (Prinzip der zusätzlichen Wertschöpfung, bei der vom Produktionswert die Vorleistungen abgezogen werden). In der Modellierung und deshalb auch in dieser Lohnquote sind daher hintereinandergeschaltete Verkaufsprozesse nicht berücksichtigt, weshalb sich ein hoher Anteil der Ausgaben für Arbeit ergibt.

¹⁷⁴ Die Bruttoinvestitionen (970.300 Mio. EUR) dividiert durch das BIP (3.876.800 Mio. EUR) ergibt 25,0% (Statistisches Bundesamt [Hrsg.], 2023).

fünf Unternehmen aufzuteilen. Dafür wird die erforderliche Menge geprüft: Liegt sie nicht vor, wird das Unternehmen auf der Auftragsliste durch ein anderes ersetzt. Kann die Nachfrage am Markt von keinem Unternehmen bedient werden, wird sie in den nächsten Zeitschritt verschoben.

Der vierte Kostenfaktor sind die Betriebskosten B . Zu diesen zählen allgemeine betriebliche Kosten (zum Beispiel Miete, Zinszahlungen, Vorprodukte und kleinere Anschaffungen, die nicht zu den Investitionskosten zählen) sowie andere Steuern (zum Beispiel Umsatzsteuer und Gewinnsteuern). Sie sind als sowohl von den Arbeitsentgelten L_{cost} als auch von den THG-Steuern GHG_{cost} unabhängiger Bestandteil erforderlich und stellen damit eine weitere Säule dar. Es wird angenommen, dass die Betriebskosten B ein fester, exogener Anteil μ des Gesamtumsatzes Y eines Unternehmens sind. Dieser feste Anteil μ ergibt sich als Restgröße und liegt bei 25%, da 50% für Lohn und 25% für Investitionen vom Gesamtumsatz abgehen. Die Betriebskosten berechnen sich daher als:

$$B = \mu Y.$$

Das Kapital K bestimmt sich durch das Kapital der vorherigen Periode abzüglich eines anteiligen Verfalls gemäß der Abschreibungsrate δ , zuzüglich der Investitionshöhe I :

$$K_t = (1 - \delta)K_{t-1} + I_t.$$

Die Abschreibungsraten variieren je nach abzuschreibendem Gut.¹⁷⁵ Laut Baldwin et al. (2005, S. 71) eignet sich ein Mittelwert von 10% per anno (0,83% pro Monat), wobei sich die Abschreibungsraten nicht sehr stark nach der Wahl der Methode unterscheiden. Die Höhe des Kapitals konvergiert in der langen Frist bei ausreichender und konstanter Nachfrage.¹⁷⁶

Die Senkung des Preises p ist der Indikator für die Steigerung der Produktivität durch die bessere Technologie bei Arbeit (λ_L) und THG-Emissionen (λ_{GHG}), denn die Preissenkung ist proportional zur Gesamtproduktivitätssteigerung, welche durch die Verbesserung der Variablen λ_L und λ_{GHG} induziert wird.

¹⁷⁵ So wird laut Bundesfinanzministerium Gebäuden teilweise eine Nutzungsdauer von über 40 Jahren zugeschrieben, was bei linearer Abschreibung eine Abschreibungsrate von 2,5% ergibt. Für einfachere Güter mit kürzerer Lebensdauer wie Kaffeeautomaten gilt eine Abschreibungsdauer von 5 Jahren, was eine Abschreibungsrate von 20% ergibt. Siehe https://www.bundesfinanzministerium.de/Web/DE/Themen/Steuern/Steuerverwaltung/Steuerrecht/Betriebsprüfung/AfA_Tabellen/afa_tabellen.html (17.02.2024).

¹⁷⁶ Diese Konvergenz ist in den Ergebnissen zu beobachten, wenn auch der konvergierte Wert noch deutlich nicht erreicht sein wird.

Die Produktionsfunktion ist eine Leontief-Produktionsfunktion mit festen Input-Output-Verhältnissen. Derartige feste Input-Output-Faktoren sind in agentenbasierten Modellierungen verbreitet (vgl. D'Alessandro et al., 2020; Poledna et al., 2023); technologische Verbesserungen sind – allgemein wie auch im vorliegenden Modell – durch Verbesserungen dieser Faktoren implementierbar. Diese Verhältnisse werden durch die Kapitalproduktivität λ_K und die Arbeitsproduktivität λ_L repräsentiert. Darüber hinaus entsteht ein Nebenprodukt, nämlich THG-Emissionen GHG , mit der THG-Output-Relation λ_{GHG} , die als Verhältnis von THG-Emissionen zu Output y definiert ist. Damit ergibt sich als Produktionsfunktion der Output y (in Stück):

$$y = F(K, L) = \min\{\lambda_L L; \lambda_K K\}.$$

Das heißt im Umkehrschluss, dass die Beschäftigung von der Arbeitsproduktivität und dem Outputniveau bestimmt wird (vgl. D'Alessandro et al., 2020, S. 5). Arbeit L wird zunächst als verfügbarer, nicht limitierter Faktor angenommen. Das heißt, dass der produktionsbedingten Arbeitsnachfrage am Arbeitsmarkt immer entsprochen werden kann (vgl. Jackson & Victor, 2020). Die Implikation dieser Annahme ist am konkreten Ausmaß der Arbeitsnachfrage im späteren Verlauf zu plausibilisieren. Eine Lagerung von Gütern findet nicht statt, da die Produktion jede Periode auf Nachfrage erfolgt.

Die maximale Kapazität der Produktionsfunktion hängt somit am Kapital sowie an der Kapitalproduktivität. Die Kapitalproduktivität λ_K bestimmt, wie viel Output y durch das vorhandene Kapital produziert werden kann.

Durch die Verbesserung der Technologie, das heißt der Verbesserung der Arbeitsproduktivität λ_L und der THG-Output-Relation λ_{GHG} , sinkt in der langen Frist der Preis p und steigt das Produktionspotenzial. Aus diesem Grund wird für die Kapitalproduktivität λ_K eine Steigerung proportional zur durchschnittlichen Arbeitsproduktivität λ_L angenommen.

Grundsätzlich wird angenommen, dass sich technologische Verbesserungen auf den gesamten Kapitalstock auswirken, nicht allein auf das durch die Investition neu hinzugewonnene Kapital. Theoretisch lässt sich sowohl die Auswirkung auf den gesamten als auch nur auf den neuen Kapitalstock begründen: Technologien können einzelne Arbeitsschritte verbessern, während alle anderen gleichbleiben (zum Beispiel eine Maschine, die einen abgetrennten Arbeitsschritt erledigt). Genauso können Technologien die Produktivität insgesamt verbessern

(zum Beispiel durch eine neue Software oder neue Arbeitsabläufe, die eine insgesamt Verbesserung induzieren). Beide Begründungen werden in der Praxis herangezogen. Im vorliegenden Fall wird der Begründung gefolgt, dass sich durch den Fortschritt die Arbeitsabläufe insgesamt verbessern.

Die beiden Parameter Arbeitsproduktivität λ_L und THG-Output-Relation λ_{GHG} können durch technologische Entwicklung verändert bzw. verbessert werden (siehe Kapitel 12.5.4 Technologische Entwicklung). Die marginalen Kosten (MC) berechnen sich als Summe der Produktionskosten je Stück und lassen sich vereinfachen zu:

$$MC = \frac{1}{y}(wL + \tau GHG),$$

wobei für Arbeit $L = \frac{y}{\lambda_L}$ und für THG-Emissionen $GHG = \frac{y}{\lambda_{GHG}}$ gilt. Output y wird in Stück bemessen, im Gegensatz zum Umsatz Y , welcher die Einheit EUR aufweist. Daraus folgt:

$$MC = \frac{w}{\lambda_L} + \frac{\tau}{\lambda_{GHG}}.$$

Der Preis berechnet sich durch die marginalen Kosten (MC) und einem festen Aufschlag (*markup*, vgl. Caiani et al., 2016, S. 11):

$$p = MC \cdot \text{markup}.$$

Dieses Markup ist in der langen Frist notwendig, da bei der Berechnung der marginalen Kosten und des Preises weder die Betriebskosten noch die Investitionsausgaben berücksichtigt werden und Unternehmen ohne Markup ihre Gesamtkosten nicht decken könnten. Das Markup ist dementsprechend in der Höhe zu wählen, dass die Betriebskosten und Investitionen getragen werden können. Eine solche Markup-Regel ist in der Volkswirtschaftslehre verbreitet. Die Höhe des Aufschlags kann aus Maximierung der allgemeinen Gewinnfunktion $\Pi = p(y) \cdot y - c(y)$ abgeleitet werden (LeRoy Miller, 1982), wobei $c(y)$ die Kosten in Abhängigkeit der Quantität y sind. Daraus folgt:

$$p = \frac{\epsilon}{1+\epsilon} \cdot MC = \frac{1}{1+\eta} \cdot MC,$$

wobei $\frac{1}{\epsilon}$ als Marktmacht interpretiert werden kann und η die Preiselastizität der Nachfrage ist. Das bedeutet, je geringer die Marktmacht, desto näher liegt der Preis an den marginalen Kosten der Produktion. Im vorliegenden Modell wird

von etwas Marktmacht ausgegangen, welche deshalb die marginalen Kosten um einen prozentual festen Aufschlag erhöht.

Die Berechnung der Produktionskapazitäten y_{capa} der nächsten Periode findet am Ende jedes Zeitschritts für jedes Unternehmen statt:

$$y_{capa,t+1} = \lambda_K K_t.$$

Es gibt eine feste Anzahl von Unternehmen. Liquiditätsprobleme können nichtsdestoweniger auftreten, denn im Allgemeinen ist es möglich, dass Unternehmen keine Erfolge bei der technologischen Entwicklung haben, in der langen Frist deshalb zu hohe Preise aufweisen und folglich am Markt wenig Nachfrage erfahren. In diesem Fall kann es aufgrund der fehlenden finanziellen Mittel zur Investition dazu kommen, dass der Kapitalstock abschmilzt. Dieser Entwicklung wird eine Grenze gesetzt: Sinkt der Kapitalstock auf ein Minimalniveau (konkret: 50% des Startniveaus), wird das Kapital auf diesem Niveau gehalten und sinkt nicht weiter. Das kann sowohl als Insolvenz und gleichzeitige Neugründung interpretiert werden als auch als staatliches Unterstützungsprogramm für kleine Unternehmen. Die Technologie bleibt erhalten, aber ein weiteres Abrutschen ist nicht möglich. Auf diese Weise kann das Unternehmen durch mögliche zukünftige technologische Entwicklungen erneut Nachfrage am Markt generieren und potenziell nach einer Phase ohne Umsätze wieder kompetitiv werden.

Wie bei den Haushalten prüfen auch Unternehmen die Auftragsliste und ersetzen ggf. Unternehmen, wenn sie nicht genügend Kapazität aufweisen. Statt des verfügbaren Einkommens setzen die Unternehmen Beiträge ein, die für die Kapitalinvestition zuvor anteilig vom Umsatz reserviert wurden. Investitionen sind ein exogener Anteil ψ des Umsatzes $Y_{sales,t-1}$ der letzten Periode. Kann diese Investitionshöhe nicht erreicht werden, werden zumindest alle übrigen verfügbaren Mittel (CA) eingesetzt:

$$I_t = \min\{\psi Y_{t-1}, CA_t\}.$$

Dieser Betrag wird gleichmäßig für die fünf Unternehmen auf der Auftragsliste eingesetzt. Kann eine Nachfrage nicht bedient werden, wird der Betrag aufgespart und in der nächsten Periode zum Kauf von Investitionsgütern eingesetzt.

Der Bruttogewinn Π_{brutto} berechnet sich aus den Erlösen Y_{sales} abzüglich der Betriebskosten B und den variablen Kosten (die Stückzahl y_{sales} multipliziert mit den marginalen Kosten MC), das heißt Gewinne durch den Verkauf ohne

Abzug der Investitionen in Kapital.¹⁷⁷ Der Nettogewinn Π_{netto} definiert sich als Bruttogewinn abzüglich der Investitionskosten I :

$$\Pi_{\text{brutto}} = Y_{\text{sales}} - B - y_{\text{sales}} \cdot MC,$$

$$\Pi_{\text{netto}} = \Pi_{\text{brutto}} - I.$$

Der Prozess der technologischen Entwicklung findet zwar innerhalb der Unternehmen statt, dennoch wird er im Folgenden in einem eigenen Unterkapitel beschrieben, da es sich um einen zentralen Baustein des Modells handelt.

12.5.4 Technologische Entwicklung

Alle Inputfaktoren haben eine eigene Produktivität bzw. einen eigenen Technologieparameter λ (vgl. A. Naqvi & Stockhammer, 2018). Bei der technologischen Entwicklung geht es um die Verbesserung der Faktoren λ_L , λ_{GHG} und λ_K . Die Kapitalproduktivität wurde bereits thematisiert, sodass es nachfolgend um die Entwicklung der Parameter λ_L und λ_{GHG} geht. Die Verwendung von zwei oder mehr separaten Technologie-Parametern ist in Modellen mit Fokus auf Technologie nicht unüblich (Acemoglu, 1998b, 2002b, 2003; Acemoglu et al., 2012; D'Alessandro et al., 2020) und ist auch in agentenbasierten Modellen wiederzufinden (Hötte, 2020). Es wird angenommen, dass sich das Tupel $(\lambda_L, \lambda_{GHG})$ eines jeden Unternehmens ohne Entstehung von zusätzlichen Kosten zufällig verändert. Der Mechanismus der technologischen Verbesserung ist ähnlich wie im Eurogreen-Modell von D'Alessandro et al. (2020, S. 4f). Im Eurogreen-Modell gibt es ebenfalls zufällige technologische Entwicklungen, die dann auf Grundlage von finanziellen Anreizen ausgewählt werden. Im Unterschied zum vorliegenden Modell wird jedoch statt der THG-Output-Relation die Energieproduktivität verwendet, sodass das Tupel im Eurogreen-Modell aus Arbeits- und Energieproduktivität besteht und Anreize zur Entwicklung für Arbeit und zur Energiereduktion bestehen.

Die grundsätzliche Ansicht, dass es monetäre Anreize sind, die die technologische Entwicklung oder konkreter die Entwicklung neuer Produkte vorantreiben, um sie monetär zu vermarkten, wird in der wissenschaftlichen Literatur seit Jahrzehnten vertreten (vgl. Dosi, 1982; Cohen & Levinthal, 1990).

¹⁷⁷ Die verkaufte Stückzahl y_{sales} wird von der maximalen Produktionskapazität y_{capa} differenziert.

Dass Innovationen nicht nur durch große Ausgaben entstehen können und dass es auch kleinen Unternehmen möglich ist, innovativ und konkurrenzfähig zu sein, wird damit Rechnung getragen. Investitionen sind für die Skalierung der Technologie zur Vergrößerung der Produktionskapazitäten weiterhin notwendig.

In jedem Zeitschritt findet in jedem Unternehmen separat die Entwicklung einer neuen Technologie statt, die allerdings nicht zwangsläufig besser als die alte sein muss: Es wird ein neues Tupel $(\lambda_L, \lambda_{GHG})$ erzeugt, das daraufhin geprüft wird, ob mit diesem im folgenden Zeitschritt unter den neuen Rahmenbedingungen eine kostengünstigere Produktion als mit den bis dahin verwandten Parametern möglich wird. Nur im zutreffenden Fall wird die neue Technologie angenommen, im anderen Fall wird die bereits bekannte Technologie weiter genutzt. Technologie wird so zum entscheidenden Wettbewerbsfaktor, auch in der Fachliteratur wird Technologie als relevanter Wettbewerbsfaktor benannt (vgl. Fagerberg, 1996; Bhawsar & Chattopadhyay, 2015).

Um auch Substitution eine Rolle zukommen zu lassen, wird angenommen, dass die Entwicklung der beiden Parameter λ_L und λ_{GHG} voneinander abhängig ist. Bildlich bedeutet dies, dass ein stochastischer Prozess um die bisherige Technologie zentriert stattfindet (vgl. Amendola et al., 2024, S. 120).

Die beiden Dimensionen spannen zusammen ein Möglichkeitsfeld auf, das durch drei Beschränkungen limitiert wird, sodass eine Fläche um die momentane Technologie $(\lambda_L, \lambda_{GHG})$ entsteht, in der die neue Technologie entstehen kann (siehe Abbildung 16). Diese Bedingungen sind:

$$\sqrt{\delta_{GHG,\%}^2 + \delta_{L,\%}^2} < 1 \text{ (Bedingung 1: Kreis),}$$

$$|\delta_{GHG,\%} + \delta_{L,\%}| < \omega_0 \text{ (Bedingung 2: Schlauch),}$$

$$\delta_{GHG,\%} \geq 0 \text{ (Bedingung 3: Positivität),}$$

wobei sich $\delta_{GHG,\%}$ und $\delta_{L,\%}$ durch Zufallsvariablen bestimmen:

$$\delta_{GHG,\%} = (2 \cdot \text{random} - 1),$$

$$\delta_{L,\%} = (2 \cdot \text{random} - 1),$$

und *random* eine auf $[0, 1]$ gleichverteilte Zufallsvariable ist.

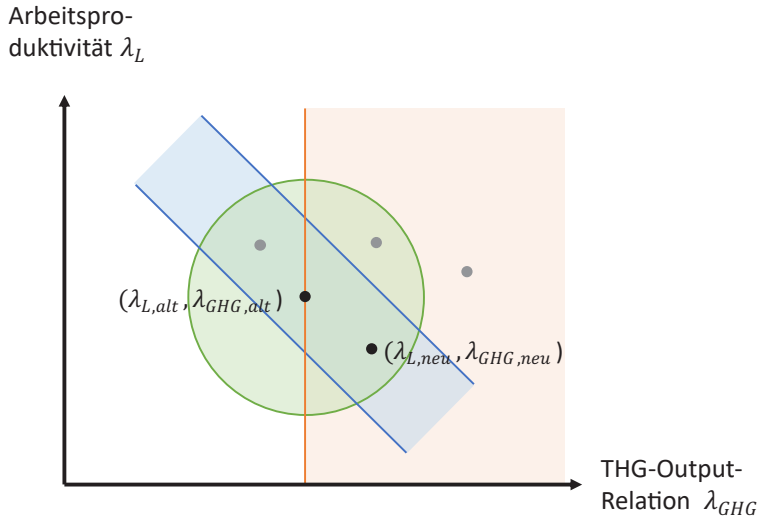


Abbildung 16: Möglichkeitsfeld für technologische Entwicklungen

Für die neue Technologie müssen alle drei Bedingungen erfüllt sein. Ist dies durch die Zufallsereignisse nicht der Fall, wird so lange weitergesucht, bis alle Beschränkungen eingehalten werden. Die dadurch entstehende Fläche der möglichen Tupel $(\lambda_L, \lambda_{GHG})$ ist in Abbildung 16 farblich markiert: Sie ist durch die orange Vertikale (rechts davon, Bedingung 3), durch die blauen Parallelen (innerhalb, Bedingung 2) und durch den grünen Kreis (innerhalb, Bedingung 1) abgegrenzt. Ein neues zufälliges Tupel innerhalb dieser Fläche wird deshalb angenommen. Tupel außerhalb des Kreises, des Schlauchs oder der vertikalen Geraden sind nicht zulässig (graue Punkte).

Die erste Bedingung stellt einen Kreis um die momentane Technologie dar, in dem die neue Technologie aufgrund dieser Beschränkung liegen muss. Sie stellt sicher, dass keine großen Sprünge von einer Periode zur nächsten entstehen können. Die zweite Bedingung hat die Form eines Schlauchs und beschneidet dieses Möglichkeitsfeld weiter.¹⁷⁸ Der offene Parameter $\omega_0 \in (0,1]$ bestimmt

178 Eine alternative Variante wäre hier denkbar: Wie in der obigen Gleichung (Bedingung 2: Schlauch) zu sehen ist, sind in der gewählten Variante die anteiligen Entwicklungsmöglichkeiten von λ_L und λ_{GHG} gleich gewählt: beide Parameter haben die gleiche Chance sich in diesem Schritt prozentual zu erhöhen. Hier ist auch eine andere Wahl denkbar: anstelle der hier angewandten Steigung von -1 wurde auch eine flachere Neigung dieses Schlauchs untersucht, unter anderem die Steigung von $-1/3$. In diesem Fall ergibt sich im ersten Schritt ein anderer Wahrscheinlichkeitsraum und andere Zufallsereignisse. Bei der Kalibrierung, dem zweiten Schritt, wird dieser Effekt dann jedoch wieder annulliert. Das Ergebnis dieser alternativen Variante unterscheidet sich deshalb qualitativ und im Wesentlichen auch quantitativ nicht (abhängig von der

dabei das Verhältnis vom Kreis zum Schlauch (siehe Abbildung 16): Je kleiner ω_0 ist, desto mehr entspricht die Fläche einem diagonalen Schlauch. Je größer ω_0 , desto mehr entspricht die Fläche einem Kreis. Ab $\omega_0 = 1$ enthält der Schlauch den Kreis vollständig und stellt keine zusätzliche Limitierung dar. Technologische Entwicklung kann in diesem Modell damit sowohl „echte technologische Entwicklung“ im Sinne der Verbesserung beider Parameter als auch Substitution im Sinne einer Vergrößerung des einen und einer Verkleinerung des anderen Parameters bedeuten. Zweck der Einschränkung durch den Schlauch ist, die Substitution wahrscheinlicher zu machen als eine Verbesserung beider Parameter.¹⁷⁹ Geschieht dies nicht, werden Unternehmen vor allem Verbesserungen beider Parameter annehmen und Substitution wird bedeutungslos. Deshalb werden starke absolute Verbesserungen unterbunden und gleichzeitig Kombinationen zugelassen, die eine Querverschiebung bedeuten, das heißt, eine Erhöhung des einen und eine Senkung des anderen Faktors.

Die dritte Bedingung stellt sicher, dass sich die THG-Output-Relation nicht verringern kann. Eine Verringerung würde eine Verschlechterung des Verhältnisses von BIP und THG-Emissionen darstellen, was im Angesicht der aktuellen Diskussionen und der vorhandenen Reglementierungen im Klimaschutzbereich unrealistisch erscheint.

Die relativen Veränderungsrate $\delta_{L,\%}$ und $\delta_{GHG,\%}$ werden mit den Kalibrierungsparametern ω_L und ω_{GHG} multipliziert und erweitern so die bisherige Technologie (vgl. Amendola et al., 2024, S. 119f). Die neuen Technologieparameter $(\lambda_{L,new}, \lambda_{GHG,new})$ werden schließlich mittels der Kalibrierung an die Daten ermittelt:

$$\lambda_{L,new} = \lambda_{L,old} + \delta_{L,\%} \cdot \omega_L,$$

$$\lambda_{GHG,new} = \lambda_{GHG,old} + \delta_{GHG,\%} \cdot \omega_{GHG},$$

wobei ω_L und ω_{GHG} als technologisches Potenzial bezeichnet werden können. Das Ausmaß der Veränderung der Parameter λ_L und λ_{GHG} wird über die Para-

konkreten Wahl der Steigung). Aus diesem Grund wurde auf eine solche Variante verzichtet. Die Wahl der Steigung erweist sich als nicht sensitiv.

¹⁷⁹ Die untere Abgrenzungslinie des Schlauches ist nicht unbedingt erforderlich, da hier nur Technologiekombinationen abgeschnitten werden, die zu höheren Kosten führen und deshalb im Vergleich mit der vorhandenen Technologie nicht ausgewählt werden. Diese untere Abgrenzungslinie ist dennoch hilfreich, um weniger Durchläufe zur Entwicklung neuer Technologien zu benötigen. Modelltheoretisch ist der Unterschied nicht relevant, da er durch die spätere Kalibrierung ausgeglichen wird.

meter ω_L und ω_{GHG} so kalibriert, dass in der langen Frist im Baseline-Szenario (keine Reform) die technologische Verbesserung der vergangenen Jahre eintreten (siehe Kapitel 12.5.7 Validierung).

Da es nicht zwangsläufig der Fall sein muss, dass sich beide Parameter verbessern, sondern sich auch beide verschlechtern können oder sich einer verbessern und einer verschlechtern kann, bedarf es einer Auswahlregel nach dem zu erwartenden Nutzen (vgl. Amendola et al., 2024, S. 120). Zur Wahl der Technologie ermitteln Unternehmen, welche Technologie in der unmittelbar nächsten Periode die kostengünstigere darstellt. Dafür ist die Berechnung beider marginalen Kosten notwendig. Es werden der THG-Steuersatz τ und die Arbeitskosten w jeweils der unmittelbar nächsten Periode herangezogen. Die Kombination, die zu den niedrigeren marginalen Kosten führt, wird ausgewählt:

$$MC_{old} = \frac{w_{t+1}}{\lambda_{L,old}} + \frac{\tau_{t+1}}{\lambda_{GHG,old}},$$

$$MC_{new} = \frac{w_{t+1}}{\lambda_{L,new}} + \frac{\tau_{t+1}}{\lambda_{GHG,new}}.$$

Durch die vollständig zufälligen Innovationen kann nicht davon gesprochen werden, dass es ein richtungsweisendes Paradigma für die technologische Entwicklung gibt, die Motivation der Verbesserung der Rentabilität und der Bewährung am Markt entsprechen dagegen der grundsätzlichen Beschreibung der technologischen Entwicklung von Dosi (1982).

12.5.5 Aufbau eines Zeitschritts

Die Struktur jedes Zeitschritts der Hauptphase ist nachkommend zusammengefasst:

1. Produktion und Handel von Unternehmen und Haushalten

Zunächst geht es um die Unternehmen, die Güter am Markt zur Investition in Kapital kaufen wollen. Dafür aktualisieren Unternehmen ihre Shortlist dahingehend, dass sie am Markt Unternehmen mit verfügbaren Kapazitäten suchen. Bei diesem Schritt werden Güter produziert, gehandelt und im Falle der Unternehmen für den Aufbau von Kapital eingesetzt.

Im darauffolgenden Schritt geht es um Haushalte, die Güter am Markt zum Konsum kaufen wollen. Hierbei handelt es sich um die gleichen, homogenen Güter, die sowohl zur Investition als auch zum Konsum genutzt werden können. Die Haushalte aktualisieren ihre Shortlist ebenfalls dahingehend, dass sie am

Markt Unternehmen mit verfügbaren Kapazitäten suchen. Die Haushalte kaufen bei Unternehmen die homogenen Güter allerdings als Konsumgüter. Hier kann es nun vorkommen, dass auf dem Markt keine Unternehmen mehr mit Kapazitäten sind. In diesem Fall könnte die Güternachfrage der Haushalte nicht entsprochen werden. Aufgrund der Produktion der Güter entstehen nicht nur THG-Emissionen, sondern auch Nachfrage nach Arbeit.

2. Durchführung der Reform:

Für die drei unterschiedlichen Varianten werden unterschiedliche Szenarien erstellt:

1. ÖSR: Bei dieser Reform wird das Gesamtaufkommens der THG-Steuer-einnahmen verwendet, um die Kosten für Arbeit zu reduzieren. Konkret bedeutet das für diesen Schritt, dass die Arbeitskostenhöhe w in dem Ausmaß reduziert wird, dass das voraussichtliche Steueraufkommen der THG-Steuern des nächsten Zeitschritts gerade dem Volumen der Arbeitskosten entspricht. Etwaige Abweichungen finden dann im nächsten Zeitschritt wieder Berücksichtigung.
2. Ökobonus: Hierbei werden die Mittelverwendung im Sinne des Ökobonus verwendet. Das heißt, das Aufkommen wird gleichmäßig an die Haushalte aufgeteilt, was die Kaufkraft der Haushalte in der nächsten Runde erhöht.
3. Keine Steuer: Bei dieser Variante gibt es keine Erhöhung der THG-Steuer und somit keine Mittel, für die man eine Verwendung finden müsste.

Auf Grundlage der jeweiligen Variante werden die Steuersätze für die nächste Periode aktualisiert.

3. Vorbereitungen der Unternehmen für den folgenden Zeitschritt:

Nachdem die unternehmerische Produktion und der Handel einerseits und die politische Bestimmung der zukünftigen Steuern bzw. Rückzahlungsmechanismen abgeschlossen sind, bereiten sich die Unternehmen auf den nächsten Zeitschritt vor. Dafür erneuern Unternehmen ihren Kapitalstock durch die getätigten Investitionen. Darüber hinaus versuchen Unternehmen unabhängig voneinander ihre Technologie zu verbessern. Hierzu entwickelt jedes Unternehmen eine eigene, neue Produktionstechnologie, bei der zunächst unklar ist, ob sie besser als die alte Technologie ist. Deshalb werden von jedem Unternehmen die marginalen Kosten der

alten und neuen Technologie berechnet, verglichen und darüber die kostengünstigere Option für den nächsten Zeitschritt gewählt. Daraus leiten sich die Preise und Produktionskapazitäten des nächsten Zeitschritts bzw. Monats ab.

12.5.6 Szenarien

12.5.6.1 Die Szenarioanalyse

Um verschiedene Varianten von THG-Besteuerungen zu modellieren, zu untersuchen und zu vergleichen, eignet sich die Szenarioanalyse. Die Szenarioanalyse wird in vielen, auch nicht-wissenschaftlichen Bereichen eingesetzt: So etwa in der Außenpolitik, um strategische Entscheidungen treffen zu können, bei der militärischen Planung, um sich auf verschiedene Fälle einzustellen, oder in der Ökonomik, um zum Beispiel bei nicht vorhersehbaren Entscheidungen von Zentralbanken verschiedene Möglichkeiten in den Blick zu nehmen oder um bei der Erreichung von ökologischen Zielen verschiedene Reformmöglichkeiten zu vergleichen. Der letztgenannte Einsatzbereich liegt bei der Untersuchung der ÖSR vor. Flaute et al. (2022, S. 6f) beschreiben die Szenarioanalyse wie folgt:

Die Szenarioanalyse ist eine Methode zum Umgang mit den verschiedenen Arten von Ungewissheiten in der Zukunft. Es können verschiedene Annahmen darüber, wie sich die Zukunft entwickeln könnte, getestet werden. Szenarien zeigen mögliche Entwicklungspfade auf, welche die Reaktionen auf die für das jeweilige Szenario getroffenen Annahmen widerspiegeln. (Flaute et al., 2022, S. 6f)

Ein Szenario sei dabei ein in sich konsistentes Bündel von quantifizierten Annahmen (Flaute et al., 2022, S. 7). Gemäß Meinert (2014) ist die Auswahl der Szenarien auf eine Anzahl von zwei bis drei zu reduzieren, um diese Szenarien adäquat ausarbeiten zu können. Mit den Szenarien im Rahmen der agentenbasierten Modellierung werden verschiedene Fragestellungen untersucht, sodass für die verschiedenen Fragestellungen jeweils zwei bis drei Varianten untersucht werden.

Im Nachfolgenden werden mit den Szenarien A, B und C in drei Abschnitten drei unterschiedliche Fragestellungen adressiert. Die wichtigste Frage nach den Auswirkungen der verschiedenen Reformen wird in den Szenarien A untersucht. Darüber hinaus werden mit den Szenarien B und C zwei weitere Aspekte verfolgt.

12.5.6.2 Szenarien A: Reformen im Vergleich

Zentral für diese Arbeit ist die ÖSR. Darüber hinaus wird das Szenario Ökobonus untersucht. Insofern werden die folgenden drei Varianten in den Blick genommen:

- Szenario A.1: keine Reform (Baseline-Szenario)
- Szenario A.2: ÖSR (ÖSR-Szenario)
- Szenario A.3: Ökobonus (Ökobonus-Szenario)

Die zentrale Frage der Szenarien A ist:

- Forschungsfrage A: Welche Auswirkungen haben verschiedene Reformen auf die technologische Entwicklung? Welche Effekte sind insbesondere bei der Arbeitsproduktivität, der THG-Output-Relation, der Arbeitsnachfrage und den THG-Emissionen zu beobachten?

Hierbei liegt der Fokus auf der Richtung der technologischen Entwicklung, das Ausmaß wird jedoch auch in den Blick genommen. Es wird die THG-Steuer in Höhe von 400 EUR/t CO_{2e} simuliert, um deutliche Veränderungen erkennen zu können. Für die Einführung dieser Steuer wird ein linearer Pfad angenommen. Das Aufkommen wird vollständig zur Senkung der Arbeitskosten für Unternehmen verwendet, um den Fokus auf die ökonomischen Aspekte legen. Damit befindet sich die hier modellierte ÖSR im Rahmen der Definition der ÖSR im engeren Sinne, bei der das Aufkommen ganz oder teilweise zur Finanzierung von Sozialversicherungsbeiträgen verwendet wird (vgl. Kapitel 2). Die Grundlage für diese Szenarien ist die Kalibrierung der technologischen Entwicklung anhand der technologischen Entwicklung der Jahre 2001–2019 (siehe Kapitel 12.5.7).

12.5.6.3 Szenarien B: Variation der Technologieannahmen

Der technologischen Entwicklung und insofern auch der Wahl der Technologieparameter ω_0 , ω_L und ω_{GHG} kommt im vorliegenden Modell womöglich eine zentrale Rolle zu. Die Parameter des technologischen Potenzials ω_L und ω_{GHG} wurden in den Szenarien A durch die Kalibrierung bestimmt. Für den Parameter ω_0 sind allerdings auch andere Werte möglich. Klar ist, dass für ω_0 keines der Extreme in Frage kommt: Ein sehr großer Wert würde bedeuten, dass Substitution kaum eine Rolle spielt (die beiden Parallelen schneiden wenig vom Kreis ab); technologische Entwicklung würde nur als Verbesserung beider Werte λ_L und λ_{GHG} stattfinden. Dies trifft auch für mittlere bis große Werte von ω_0 (größer

50%) zu, da damit die Verbesserung beider Technologien häufig auftritt. Für Unternehmen kann es lukrativer sein, eine kleine strikte Verbesserung der Substitution vorzuziehen. Aus diesem Grund sollten Werte in den unteren 50% gewählt werden. Ein sehr kleiner Wert für ω_0 würde bedeuten, dass fast nur Substitution stattfinden kann (die beiden Parallelen schneiden dann viel vom Kreis ab, sodass ein schmaler Schlauch entsteht); technologische Entwicklung im Sinne der Verbesserung beider Werte λ_L und λ_{GHG} würde fast keine Rolle spielen.

Dennoch können für ω_0 grundsätzlich unterschiedliche Werte gewählt werden. In diesen Szenarien sollen deshalb für ω_0 folgende Werte exploriert und verglichen werden:

- Szenario B.1 $\omega_0 = 10\%$ (Baseline)
- Szenario B.2 $\omega_0 = 20\%$ (Baseline) (entspricht Szenario A.1)
- Szenario B.3 $\omega_0 = 30\%$ (Baseline)

Die Parameter des technologischen Potenzials ω_L und ω_{GHG} sind in diesem Zuge für jedes Szenario erneut so zu kalibrieren, dass für das Baseline-Szenario ohne zusätzliche THG-Steuern die Verbesserung der Werte λ_L und λ_{GHG} fortgeschrieben wird (vgl. Szenarien A). Die erste Forschungsfrage in diesem Abschnitt ist deshalb:

- Forschungsfrage B: Reagiert die Simulation auf die Variation des Parameters ω_0 sensitiv?

Darüber hinaus gibt es einen zweiten Aspekt, der in diesem Zuge untersucht wird: Mit den Szenarien A werden die für die Klimaziele erforderlichen Reduktionen der THG-Emissionen nicht erreicht. Die Unternehmen entscheiden im vorliegenden Modell lediglich auf dieser Grundlage von finanziellen Aspekten, wie sich die Technologie entwickelt. Grundsätzlich ist es jedoch denkbar, dass sich in den nächsten Jahren – ob mit oder ohne hohe THG-Steuern – das technologische Potenzial aus anderen Gründen verbessert (so etwa durch direkte öffentliche Forschung, durch staatliche Subventionen, durch die Verbesserung der Infrastruktur und des Rechtsrahmens etc.). Eine solche Erhöhung des technologischen Potenzials kann im Modell über den Parameter ω_{GHG} abgebildet werden. Durch diese Steigerung können unter Umständen entsprechend der Klimaziele Emissionen reduziert werden. Konkret bedeutet dies, dass in den 15 Jahren der Reformumsetzung eine Reduktion der Emissionen um 60% erreicht werden soll.

Es stellt sich somit die Frage, um wie viel dieses technologische Potenzial gesteigert werden muss und ob sich dies in den Szenarien B.1-B.3 unterscheidet.

Wenn der Einfluss des Parameters ω_0 tatsächlich gering ist, dürften sich keine großen Unterschiede bemerkbar machen.

Die Forschungsfrage in diesem Abschnitt ist somit:

- Forschungsfrage B+: Um wie viel muss das technologische Potenzial der THG-Reduktion ω_{GHG} in den jeweiligen Szenarien B.1-B.3 gesteigert werden, damit im Fall der ÖSR die THG-Emissionen den Klimazielen entsprechend reduziert werden?

Damit entstehen die Szenarien:

- Szenario B.1+ $\omega_0 = 10\%$ (ÖSR, ω_{GHG} erhöht)
- Szenario B.2+ $\omega_0 = 20\%$ (ÖSR, ω_{GHG} erhöht)
- Szenario B.3+ $\omega_0 = 30\%$ (ÖSR, ω_{GHG} erhöht)

12.5.6.4 Szenarien C: Variation der Struktur der THG-Steuererhöhung

Es gibt verschiedene Möglichkeiten und Geschwindigkeiten eine Steuerreform umzusetzen. Insbesondere sind die Varianten zu unterscheiden: ein linearer Anstieg des Steuersatzes; ein zunächst steiler, dann flacher Anstieg und schließlich ein zunächst allmählicher, flacher und dann steiler Anstieg. Gerade beim Blick auf die technologische Entwicklung stellt sich die Frage, in welcher Form die Anreize besonders vorteilhaft sind: Könnte es sein, dass es zunächst nur geringe Anreize benötigt und eine zu schnelle weitreichende Reform keine zusätzlichen Vorteile, vielleicht sogar Nachteile bringt? Ist vielleicht aus diesen Gründen ein langsamer Anstieg sinnvoll? Oder ist das Gegenteil vorteilhafter: Ein schneller Anstieg zu Beginn, um die gewünschte Richtung klar vorzugeben, wodurch ein weiterer Anstieg im späteren Verlauf nicht mehr erforderlich ist?

Die Forschungsfrage ist daher:

- Forschungsfrage C: Welche Auswirkungen hat die Variation der Struktur der Steuererhöhung auf die technologische Entwicklung?

Berücksichtigt werden die folgenden Steuererhöhungskurven, die am Ende der Reform jeweils die gleiche Steuerhöhe $\tau = 400$ EUR/t CO₂e erreichen:

- Szenario C.1: Linearer Anstieg (entspricht Szenario A.2)
- Szenario C.2: Begrenztes Wachstum für einen zunächst steilen, dann flachen Anstieg
- Szenario C.3: Quadratisches Wachstum für einen zunächst flachen und dann steilen Anstieg

Ausgegangen wird von der ÖSR, vom erhöhten technologischen Potenzial ω_{GHG} der Szenarien B wird allerdings nicht ausgegangen, da es lediglich um die steuerinduzierten Effekte geht.

Um die Hypothese C.i aus der Einführung aufzugreifen: Es wird erwartet, dass die zunächst steile Erhöhung besser geeignet ist, um die Richtung vorzugeben und somit zu einer stärkeren Lenkung der technologischen Entwicklung hin zu einer Reduktion der THG-Emissionen führt. Das heißt, die THG-Output-Relation dürfte hier höher als im Szenario mit linearem Steueranstieg sein, die Arbeitsproduktivität niedriger. Als Folge sind deshalb auch niedrigere Emissionen und eine höhere Arbeitsnachfrage zu erwarten. Mit der gleichen Begründung ist die Hypothese für das Szenario der quadratischen Steuererhöhung, dass eine geringere THG-Output-Relation und höhere Arbeitsproduktivität erreicht wird als im Szenario mit linearem Steueranstieg.

12.5.7 Validierung

Detaillierte Angaben zur Validierung aller Parameter sind im Anhang dokumentiert. In diesem Kapitel wird darüber hinaus auf zentrale Aspekte eingegangen, um die Wahl von wichtigen Entscheidungen der Modellierung zu erläutern und transparent zu machen.

Für die Szenarien A und C werden die derzeitigen Geschwindigkeiten des Wachstums der Technologieparameter für Deutschland benötigt. Um diese zu erhalten, werden – ähnlich wie im Kapitel 12.3 – die Durchschnittswerte für das jährliche Wachstum von λ_{GHG} und λ_L der Jahre 2001–2019 ermittelt (siehe Tabelle 15).¹⁸⁰ Da es sich hierbei um reales Wachstum handelt, welches im Modell als Stückzahl angegeben wird, werden die Einheiten im Modell transferiert zu: λ_{GHG} in Stück/Tsd. t CO₂e und λ_L in Stück/Tsd. Erwerbstätige.

Mit diesen jährlichen Wachstumsraten der Technologieparameter lässt sich berechnen, welche Höhe λ_{GHG} und λ_L nach 21 Jahren haben, wenn die Verbesserung weiterhin die gleiche Geschwindigkeit behält. Im Baseline-Szenario werden diese Werte durch Kalibrierung des technologischen Potenzials ω_{GHG} und ω_L angenähert: $\lambda_{GHG,21\text{ Jahre}} = 6,24$ und $\lambda_{L,21\text{ Jahre}} = 92,1$.¹⁸¹ Für

180 Grundlage für das BIP ist das reale BIP mit Basisjahr 2019, siehe Statistisches Bundesamt [Hrsg.] (2023). Grundlage für THG-Emissionen und die Erwerbstätigenzahlen sind die jeweiligen Jahreswerte der Weltbank, siehe <https://data.worldbank.org/> (27.03.2024).

181 $\lambda_{GHG,21\text{ Jahre}} = \text{Startwert (2022)} + 21 \text{ Jahresschritte} = 4,91 + 21 \cdot 0,063 = 6,24$ und $\lambda_{L,21\text{ Jahre}} = 84,28 + 21 \cdot 0,330 = 92,1$.

die Fragestellungen in den Szenarien B werden diese Annahmen aufgehoben, um eine Geschwindigkeit der technologischen Verbesserung zu erreichen, die die Zielerfüllung ermöglicht.

Tabelle 15: Wachstum der Technologieparameter in Deutschland

	λ_{GHG} (Mio. EUR ₂₀₁₉ /Tsd. t CO ₂ e)	λ_L (Mio. EUR ₂₀₁₉ /Tsd. Erwerbstätige)
Wachstum p.a. (2001–2019)	0,063	0,330

Grundsätzlich werden die Werte von Deutschland des vollständig vorhandenen Jahres 2022 verwendet, das gilt etwa für das BIP, die THG-Emissionen und die Erwerbstätigenzahlen. Für das Wachstum der Technologieparameter in Deutschland (siehe Tabelle 15) ist jedoch die Geschwindigkeit, das heißt, eine Veränderungsgröße zu ermitteln, wofür prinzipiell mehrere Jahre nötig sind. Hier wird aufgrund der durchgängigen Datenverfügbarkeit auf die Jahre 2001–2019 zurückgegriffen.

Die Größen der Arbeitsproduktivität λ_L und der THG-Output-Relation λ_{GHG} ergeben sich aus dem BIP, der Anzahl der Erwerbstätigen und den jährlichen THG-Emissionen. Darüber hinaus sind jedoch zur Kalibrierung der derzeitigen Verbesserungsgeschwindigkeit dieser Variablen weitere Parameter nötig. Hier kommen ω_L und ω_{GHG} ins Spiel, die derart gewählt werden, dass die in Tabelle 15 angegebenen Werte erreicht werden (siehe Anhang für die genauen Werte).

Darüber hinaus gibt es den Technologieparameter ω_0 , der als Verhältnis bei der Generierung neuer Werte für die Arbeitsproduktivität λ_L und die THG-Output-Relation λ_{GHG} benötigt wird.¹⁸² Ähnlich wie für ω_L und ω_{GHG} wird ω_0 derart kalibriert, dass die oben beschriebene Verbesserungsgeschwindigkeit der technologischen Entwicklung erreicht wird. Die explorierten Modelldurchläufe zeigen hierbei, dass die Größenordnung von ω_0 keinen entscheidenden Einfluss auf die Modellergebnisse im Sinne der Richtung der technologischen Entwicklung haben, da es bei der Kalibrierung auf das Zusammenspiel aller drei Technologieparameter ω_0 , ω_L und ω_{GHG} ankommt (siehe Szenarien B).

182 Der Parameter ω_0 steht für das Verhältnis der Schlauchbreite zur Kreisgröße im Feld der relativen technologischen Veränderung, siehe Kapitel 12.5.4 zur technologischen Entwicklung.

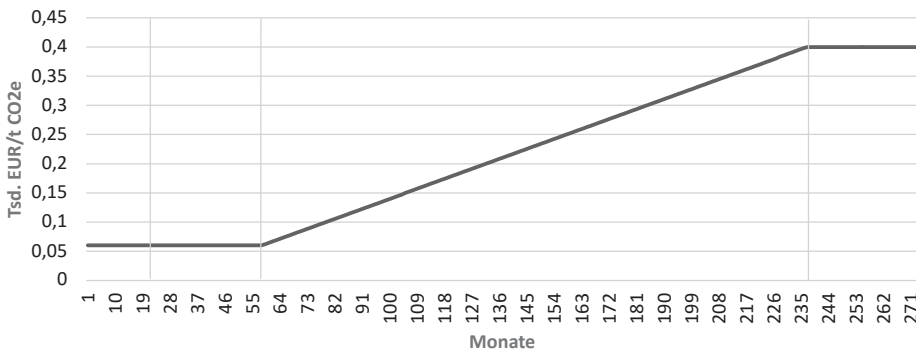


Abbildung 17: Steuersatz der THG-Emissionen im Reformverlauf

Für den Steuersatz der THG-Emissionen werden die bereits in der vorherigen Modellierung verwendeten Werte genutzt. Um die Effekte deutlicher sichtbar zu machen, wird im vorliegenden Modell mit dem Steuersatz von 400 EUR/t CO_{2e} gearbeitet, der Ausgangswert für vor der Reform ist 60 EUR/t CO_{2e}.¹⁸³ Im Basisfall wird von einem linearen Anstieg ausgegangen (siehe Abbildung 17), in den Szenarien C wird von dieser Annahme abgewichen.

12.5.8 Ergebnisse

12.5.8.1 Ergebnisse der Szenarien A: Reformen im Vergleich

Die Burn-in-Phase umfasst die Startperiode und 20 weitere Monate. In dieser Zeit sind die Innovationen ausgesetzt. Das Modell erweist sich in dieser Phase als sehr stabil. Da die technologische Entwicklung ausgesetzt ist, ändert sich auch der Preis nicht. Die daran anknüpfende Simulationsphase besteht aus drei Jahren (36 Monate) Phase vor der Reform, aus einer Reformphase von 15 Jahren (180 Monate) und einer Phase nach der Reform von drei Jahren (36 Monate). Alles zusammen inkl. der Burn-in-Phase ergeben sich 273 Perioden. Für die folgenden Abbildungen ist anzumerken, dass ein Zeitschritt einem Monat entspricht und die Angaben – wie der Umsatz, THG-Emissionen etc. – deshalb Monatswerte sind.

¹⁸³ Preise für THG-Emissionen im Rahmen der Emissionshandelssysteme schwanken stark: der EU ETS von 100 EUR/t CO_{2e} Anfang 2023 bis unter 60 EUR/t CO_{2e} im März 2024 und der nEHS von 30 EUR/t CO_{2e} im Jahr 2022 bis 45 EUR/t CO_{2e} im Jahr 2024. Die gemittelten, gesamtgesellschaftlichen Werte liegen dazwischen. Ein solcher mittlerer Wert wird als Startwert auf 60 EUR/t CO_{2e} gesetzt. Siehe Rahmendaten für den Projektionsbericht 2023 (Datentabelle), siehe: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/rahmendaten-fuer-den-projektionsbericht-2023> (14.02.2024).

Der Gesamtumsatz Y aller Unternehmen je Monat ist im Zeitverlauf in Abbildung 18 dargestellt. Y kann als nominales BIP interpretiert werden, welches sich nach Verteilung aufgliedern lässt, wie es in Abbildung 18 für das Baseline-Szenario vorgenommen wurde.

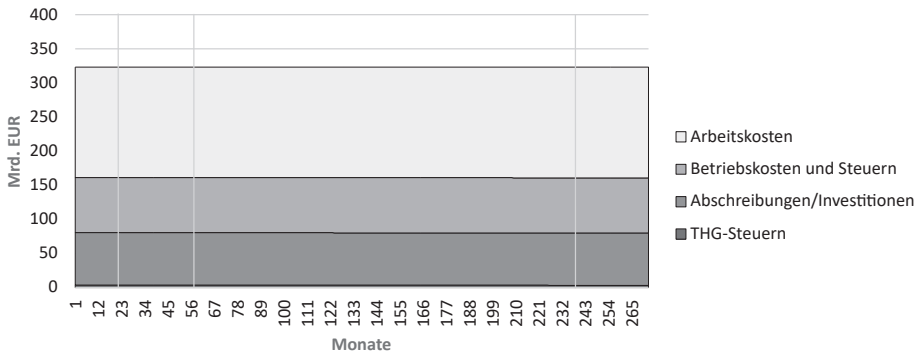


Abbildung 18: Umsatz Y nach Verteilung (nominales BIP) [Baseline]

Durch die vertikalen Striche sind – in dieser wie auch in den übrigen Abbildungen – die Abschnitte kenntlich gemacht: bis zum ersten Querstrich läuft die Burn-in-Phase, vom ersten bis zum zweiten Querstrich die dreijährige Phase vor der Reform, vom zweiten bis zum dritten Querstrich die 15-jährig Reformphase und schließlich ab dem dritten Querstrich die dreijährige Phase nach der Reform.

Im Baseline-Szenario bleiben die vier Anteile des Umsatzes über den vollen Zeitraum unverändert. Der größte Anteil sind die Arbeitskosten mit ca. 50% des Gesamtumsatzes. Gefolgt wird diesem von den Betriebskosten und Steuern und – mit nur einem kleinen Anteil – von den THG-Steuern.

Im ÖSR-Szenario wird die Konstanz durch die zunehmenden THG-Steuern mit dem Beginn der Reform durchbrochen (siehe Abbildung 19). Damit verschiebt sich die Gesamtverteilung, denn der Gesamtumsatz Y bleibt aufgrund der Aufkommensneutralität auf Ebene der Unternehmen gleich. Nach der Reform sind die Anteile erneut konstant.

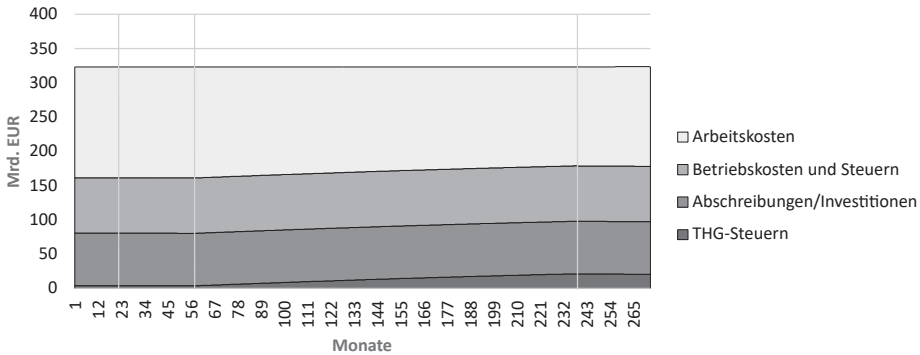


Abbildung 19: Umsatz Y nach Verteilung (nominales BIP) [ÖSR]

Im Ökobonus-Szenario verändern sich ebenfalls mit dem Beginn der Reform die Anteile (siehe Abbildung 20). Der wesentliche Effekt ist allerdings, dass der THG-Steueranteil zunimmt. Die anderen Anteile bleiben etwa unverändert. Das liegt an dem Rückfluss der Steuern an die Haushalte, die dadurch ein höheres Einkommen haben. Zu bemerken ist allerdings, dass der Umsatz aufgrund von möglichen Preisveränderungen nicht proportional zur Stückzahl ist. Wie dieser erhöhte Umsatz insgesamt zu bewerten ist, ist später zu thematisieren.

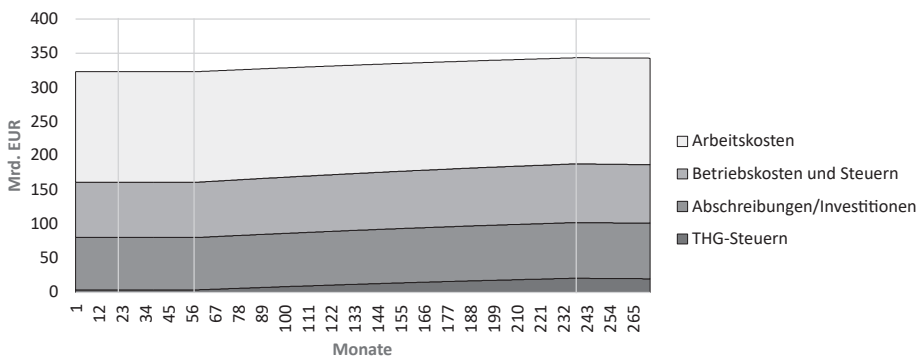


Abbildung 20: Umsatz Y nach Verteilung (nominales BIP) [Ökobonus]

Abbildung 21 zeigt die Entwicklung des Preises über den gesamten Zeitraum. Bis zum Ende der Burn-in-Phase ist der Preis konstant, da für diese Einfindungsphase technologischer Fortschritt noch nicht zugelassen ist. Mit Beginn der Hauptphase ab dem ersten Querstrich reduziert sich zunächst der Preis aufgrund der technologischen Entwicklung, die zur Steigerung von Produktivitäten führt. Anhand der blauen Kurve ist sichtbar, dass sich der Preis im Baseline-Szenario

sich am stärksten reduziert, dicht gefolgt von der grünen Kurve, dem Preis der ÖSR. Damit kann festgehalten werden, dass sich der Preis aufgrund von Kostensenkungen mittels technologischer Entwicklung am besten entwickelt, wenn keine zusätzliche Steuer eingeführt wird.

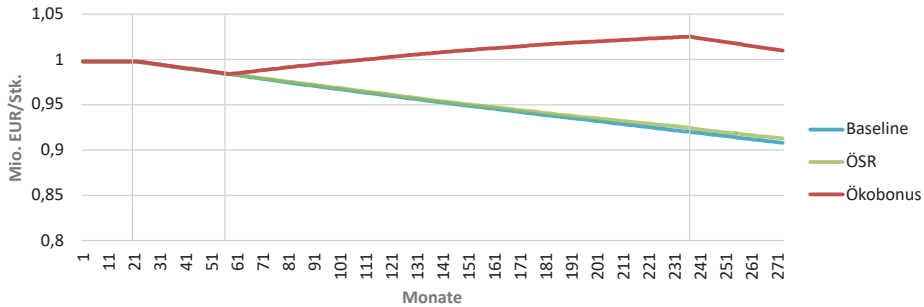


Abbildung 21: Preis p

Innerhalb der Reformphase erhöht sich der Preis im Ökobonus-Szenario im Gegensatz zu den Phasen davor und danach. Hintergrund ist hier, dass durch die THG-Emissionen für Unternehmen zusätzliche Kosten entstehen, die nicht – wie bei der ÖSR – an anderer Stelle entlastet werden. Der Preis ist allerdings nicht ausschließlich ausschlaggebend, da in diesem Szenario die Haushalte auch ein höheres Einkommen haben.

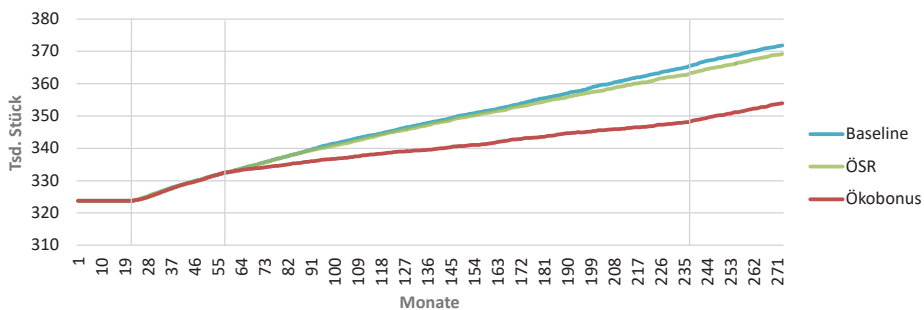


Abbildung 22: Stückzahl y

Die Menge oder Stückzahl y (siehe Abbildung 22) erhöht sich in der Hauptphase der Modellierung, das heißt ab dem ersten vertikalen Strich bis zum Ende, in allen Szenarien sukzessive. Analog zum geringsten Preis ist die größte Erhöhung der Stückzahl im Baseline-Szenario zu beobachten, dicht gefolgt vom ÖSR-Szenario.

Die Stückzahl beim Ökobonus erhöht sich dagegen deutlich weniger. Besonders hier sind Knicke in der Kurve festzustellen: Jeweils vor und nach der Reform ist die Kurve steiler als während der Reform. Offensichtlich reduziert die Ökobonusreform die Stückzahl gegenüber den beiden anderen Szenarien.

Die Menge oder Stückzahl y kann als reales BIP interpretiert werden, da es im Modell nur ein homogenes Gut gibt, das sich, wenn es erstmal hergestellt ist, nur über den Preis unterscheidet. Das Wachstum der Menge bedeutet folglich ein reales Wachstum. Der Umsatz Y ist dagegen als nominales BIP zu interpretieren, da hinter dem Wachstum des Umsatzes lediglich eine Preiserhöhung stehen kann. In dieser Kategorie schneiden demnach das Baseline- und das ÖSR-Szenario am günstigsten ab.

Wie im Kapitel 12.5.2 zum Ablauf des Modells beschrieben, handelt es sich bei den Kurven, wie etwa in Abbildung 21 oder Abbildung 22 dargestellt, um Mittelwerte. Hinter jedem Szenario stehen zehn Durchläufe des Modells mit den gleichen Annahmen. Diese zehn Durchläufe sind in Abbildung 23 für die Stückzahl y des Baseline-Szenarios exemplarisch dargestellt.

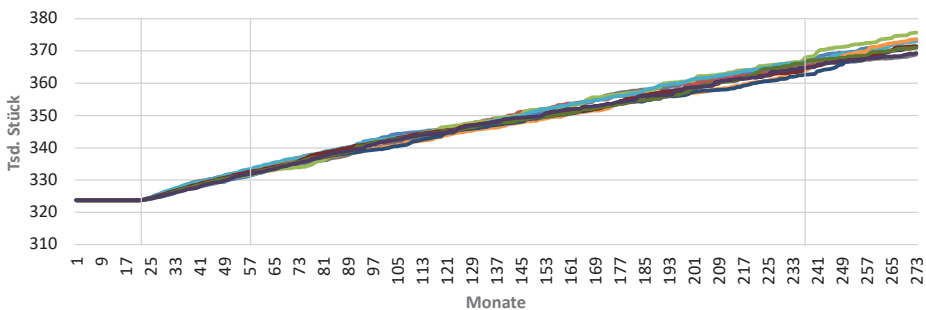
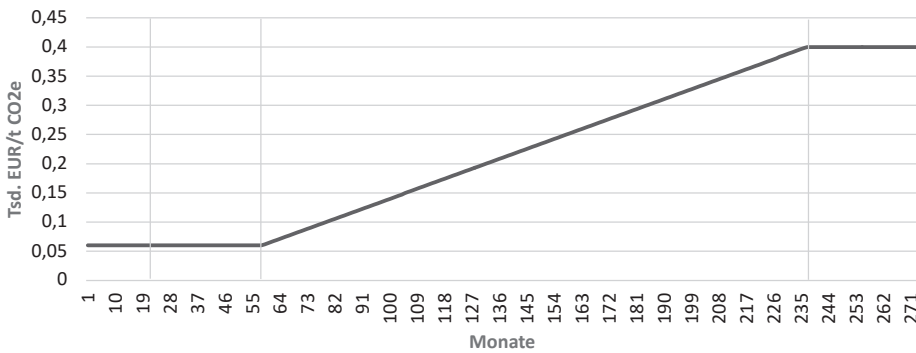


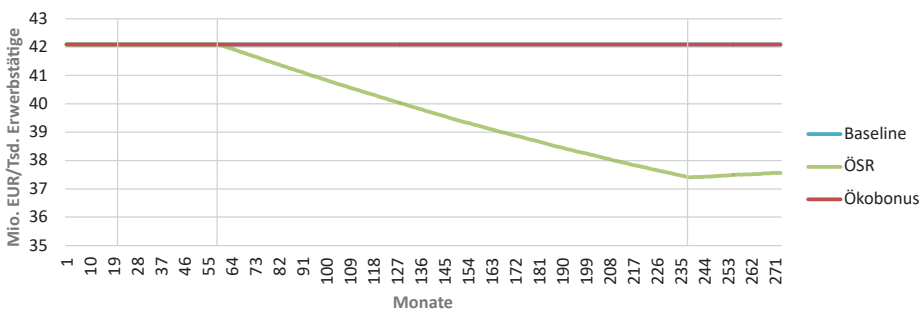
Abbildung 23: Stückzahl y [Baseline]

Die zehn Kurven weisen zwar Unterschiede auf, sind jedoch nicht grundverschieden, sodass das Ergebnis plausibilisiert werden kann. Weitere derartige Aufschlüsselungen der dargestellten Mittelwerte sind im Anhang abgebildet.

Der THG-Steuersatz τ wird in den beiden Szenarien ÖSR und Ökobonus mit Beginn der Reform linear von 60 EUR/t CO₂e auf 400 EUR/t CO₂e erhöht (Abbildung 24). Im Baseline-Szenario verbleibt die Steuerhöhe bei 60 EUR/t CO₂e.

Abbildung 24: THG-Steuersatz τ

Der Arbeitskostensatz w bleibt im Baseline- und Ökobonus-Szenario unangestastet und verbleibt somit beim Ausgangswert von 42,1 Mio. EUR/Tsd. Erwerbstätige im Monat (Abbildung 25). Bei der ÖSR allerdings werden die neu erhobenen Steuern genutzt, um die Arbeitskosten für die Unternehmen zu senken. Dies geschieht über die Reduktion des Arbeitskostensatzes w und ist in der Reformphase der ÖSR zu erkennen.

Abbildung 25: Arbeitskostensatz w ¹⁸⁴

Nach der Durchführung der ökologischen Reform fällt auf, dass sich die Arbeitskosten wieder leicht erhöhen, obwohl die eingeführten THG-Steuern erhalten bleiben. Der Grund dafür ist, dass auch nach der Reform die Emissionen weiter reduziert werden, womit auch weniger Steueraufkommen generiert wird und weniger an die Arbeitskosten umverteilt werden kann.

Das Kapital entwickelt sich in allen Szenarien ähnlich und nimmt keine Schlüsselrolle im Modell ein. Grundsätzlich ist eine Konvergenz zu beobachten

¹⁸⁴ Hinweis: Die blaue Kurve verläuft unter der roten.

(siehe Abbildung 26), was sich auch auf Theorieebene durch einen Zufluss in absoluten Zahlen und einen Abfluss über einen relativen Anteil (Abschreibungsrate) erklären lässt (Konvergenz zu $\bar{K} = \frac{\bar{I}}{\delta}$).

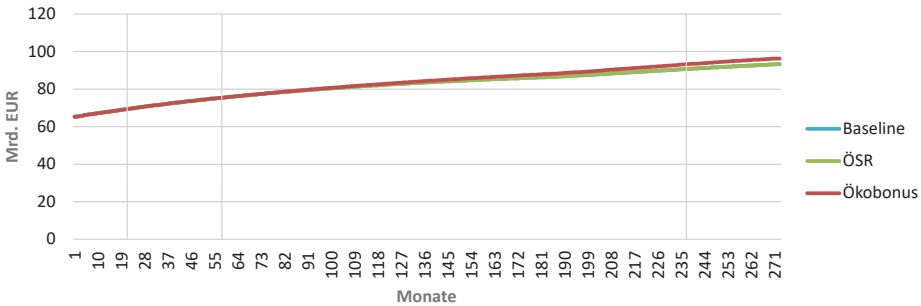


Abbildung 26: Kapital K ¹⁸⁵

Abbildung 27 zeigt die THG-Output-Relation λ_{GHG} im Zeitverlauf. In allen drei Szenarien verbessert sich diese über die Zeit. In den Szenarien mit Reform (grüne und rote Kurve) ist diese Verbesserung gesteigert: Vom Anfangswert von 4,91 erhöht sich die THG-Output-Relation auf 6,28 (keine Reform), 6,84 (ÖSR) und 6,76 (Ökobonus). Die Lenkungswirkung ist demnach bei der ÖSR am größten, wenn auch nur leicht größer als beim Ökobonus.

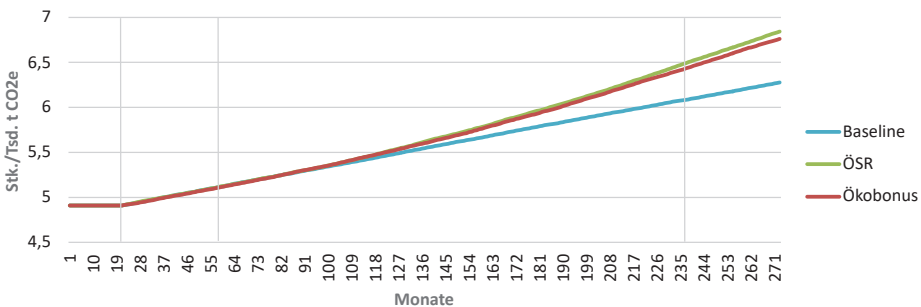


Abbildung 27: THG-Output-Relation λ_{GHG}

Auffällig ist auch, dass die Kurven der Szenarien mit Reform keinen Knick nach Beendigung der Reform aufweisen: Die Steigung der beiden Kurven ist unverändert hoch. Während der Reformphase ist darüber hinaus festzustellen, dass die Kurven der ÖSR und des Ökobonus konvex sind, die Kurve des Baseline-

¹⁸⁵ Hinweis: Die blaue Kurve verläuft unter der grünen.

Szenarios dagegen verläuft linear. Der Grund dafür könnte sein, dass die Steuern sich zwar linear erhöhen, der Lenkungseffekt aber nicht von der Erhöhung abhängt, sondern von der Höhe der THG-Steuer. Die größte Lenkung besteht demnach bei der vollständigen Realisierung der 400 EUR/t CO₂e. Das würde auch erklären, warum die Entwicklungsgeschwindigkeit von λ_{GHG} auch in den drei Jahren nach der Reform erhöht bleibt.

Die Arbeitsproduktivität λ_L (Abbildung 28) entwickelt sich in allen drei Szenarien ähnlich, nur geringe Unterschiede sind zu erkennen. Das Szenario ohne Reform (Baseline) weist die höchsten Werte auf, die anderen beiden Szenarien sind fast identisch.

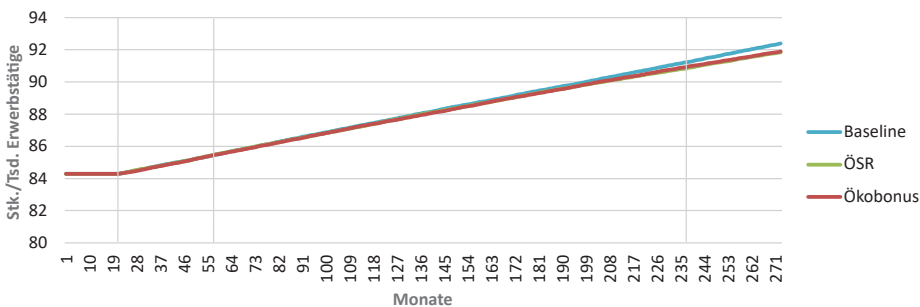


Abbildung 28: Arbeitsproduktivität λ_L ¹⁸⁶

Anders als bei der THG-Output-Relation ist die Bewertung dieser Ergebnisse komplexer. Aus Sicht der Unternehmen ist eine Steigerung von λ_L wünschenswert, weil damit Kosten gespart werden können. Aus gesamtgesellschaftlicher Sicht kann eine Reduktion oder ein stabiles Niveau wünschenswert sein, weil damit eine höhere Beschäftigung korrespondiert. In jedem Fall jedoch sind die Unterschiede gering. Im Baseline-Szenario erhöht sich die Arbeitsproduktivität um 9,6%, im ÖSR- und Ökobonus-Szenario um 9,0%.

Als Folge der bisher beschriebenen Ergebnisse, insbesondere der Entwicklung der technologischen Parameter λ_{GHG} und λ_L , steht die Reduktion der THG-Emissionen in allen drei Szenarien. Bei den emittierten THG-Emissionen gibt es zwei entgegengewirkende Kräfte: Preissenkung und damit eine erhöhte Nachfrage je Produkt und Effizienzsteigerung und damit geringere Emissionen je Produkt. Die Effizienzsteigerung überwiegt allerdings, sodass die absoluten THG-Emissionen sinken (Abbildung 29).

¹⁸⁶ Hinweis: Die grüne Kurve verläuft unter der roten.

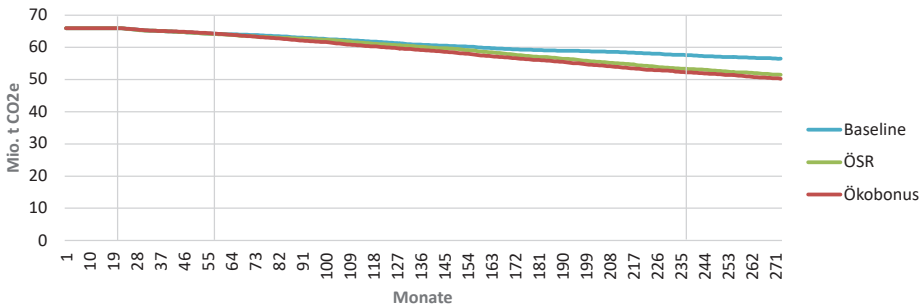


Abbildung 29: THG-Emissionen GHG

Die höchste Reduktion wird durch den Ökobonus erreicht, was über die technologische Entwicklung und die geringere Stückzahl zu erklären ist. Die ÖSR erzielt jedoch ein ähnlich gutes Ergebnis und generiert dazu eine größere Menge. Der Anfangswert von ca. 65.900 Mio. t CO₂e wird im Ökobonus-Szenario auf ca. 50.300 Mio. t CO₂e am Ende der Simulation reduziert.

Im Baseline-Szenario findet eine Reduktion auf ca. 56.500 Mio. t CO₂e statt, was ca. 60% der Reduktion des Ökobonus-Szenarios entspricht. Vor dem Hintergrund einer 15-jährigen Reformphase erscheinen die Reduktionen jedoch auch unzureichend zur Erreichung der Klimaziele. Dieser Frage wird in den Szenarien B weiter nachgegangen.

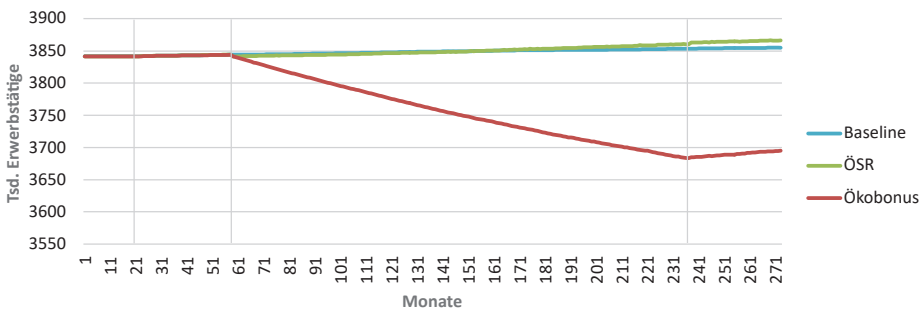


Abbildung 30: Arbeitsnachfrage L

Die Veränderung der Arbeit L in Abbildung 30 ist ein weiteres zentrales Ergebnis. Insgesamt bleibt die Arbeitsnachfrage auf einem ähnlichen Niveau. Hier annullieren sich die beiden Effekte: geringerer Preis und damit höheren Umsatz (nach Stück) einerseits und Effizienzsteigerung durch höhere Arbeitsproduktivität und damit geringere Arbeitsnachfrage seitens der Unternehmen andererseits.

Das Baseline- und das ÖSR-Szenario entwickeln sich sehr ähnlich. Die Arbeitsnachfrage erhöht sich im ÖSR-Szenario geringfügig um 0,7%. Das Ökobonus-Szenario dagegen zeigt im Gegensatz dazu während der Reformphase eine leichte Reduktion der Arbeitsnachfrage (rote Kurve), die durch die Produktion entsteht. Dieses Ergebnis geht grundsätzlich mit einer gesteigerten Arbeitsproduktivität einher, welche im Gegensatz zu den anderen Szenarien nicht nur durch Mehrbeschäftigung kompensiert werden kann: Die Stückzahl steigt zwar, jedoch nicht ausreichend stark. An dieser Stelle ist jedoch auf die Effektstärke hinzuweisen, da auch durch den Ökobonus die Arbeitsnachfrage insgesamt nur um 3,8% zurückgeht.

12.5.8.2 Diskussion der Szenarien A

Rückblickend ist festzuhalten: Durch die Reformen, sowohl durch die ÖSR als auch durch den Ökobonus, kann eine Lenkung der technologischen Entwicklung auf Basis von finanziellen Anreizen eintreten. Unternehmen haben einen Anreiz, die Kosten zu senken, und wenn Arbeit und THG-Emissionen Kostenverursacher sind, liegt es nahe, dass Wege gesucht werden, diese Faktoren zu minimieren.

Abbildung 31 zeigt, dass die Lenkung durch die ÖSR den größten Effekt hat, dicht gefolgt von der Entwicklung des Ökobonus-Szenarios. Beide Reformen erfüllen damit zumindest teilweise das Ziel der Lenkung der technologischen Entwicklung. Mehr Substitution, das heißt ein stärker abflachender oder sogar sinkender Verlauf, wäre denkbar gewesen. Auf dieser Aggregationsebene gilt jedoch für beide Reformen, dass es zu keiner Trendumkehr kommt: Beide Kurven bewegen sich weiterhin von links unten nach rechts oben.

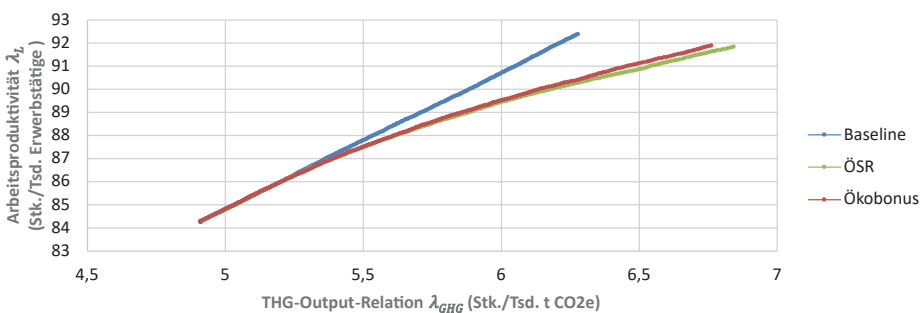


Abbildung 31: Durchschnittliche technologische Entwicklung

Die Werte von Abbildung 31 sind doppelt aggregiert: Zum einen steht jeder Punkt für den Durchschnitt von zehn Simulationsdurchläufen. Zum anderen

handelt es sich bei den einzelnen Simulationsdurchläufen um Mittelwerte der 100 Unternehmen. Individuelle Verläufe können deutlich von diesen Kurven abweichen, auf dieser Aggregationsebene sind jedoch nur strikte Verbesserungen zu verzeichnen, keine Substitution.

Im ÖSR-Szenario verhält sich der Preis bemerkenswerterweise ähnlich wie im Baseline-Szenario. Dahinter steht ein zunehmender THG-Steuersatz τ , aber auch ein abnehmender Arbeitskostensatz w , sodass der Preis konstant bleibt. In der Folge steigt die Stückzahl y ebenfalls in ähnlicher Ausprägung wie im Baseline-Szenario. Die THG-Output-Relation λ_{GHG} erhöht sich im ÖSR-Szenario mehr als ohne Reform. Die Arbeitsproduktivität λ_L erhöht sich dagegen weniger als zuvor. Dies ist auf die Kostenanreize der ÖSR zurückzuführen: Innovationen entwickeln sich verstärkt in Richtung Reduktion der THG-Emissionen und etwas weniger zur Reduktion der Arbeitskosten.

Im Ökobonus-Szenario reduziert sich der Preis weniger als in den anderen beiden Szenarien. Der Grund ist, dass eine Steuer erhöht wird, die Entlastung aber nicht bei den Unternehmen ansetzt, sondern bei den Haushalten. Gegenüber den anderen beiden Szenarien erhöht sich der nominelle Umsatz Y , welcher zuvor konstant war. Dies liegt an der Realisation des Ökobonus, da die zusätzlichen Ausgaben der Unternehmen für die THG-Steuer den Haushalten als zusätzliches Einkommen zukommen und deren Konsum steigern. Die aussagekräftigere Stückzahl y erhöht sich jedoch weniger als in den anderen beiden Szenarien. Die Ökobonus-Reform wirkt demnach real leicht wachstumshemmend, was auch an der leicht reduzierten Arbeitsnachfrage L (gegenüber den beiden anderen Szenarien) abzulesen ist. Das ist auch ein Grund, warum sich die THG-Emissionen durch den Ökobonus am stärksten reduzieren.

Hypothese A.i, dass die ÖSR und der Ökobonus höhere Anreize für die technologische Entwicklung im Sinne der Reduktion der THG-Emissionen setzen, wird von den Ergebnissen gedeckt. Auch Hypothese A.ii, dass die THG-Emissionsreduktion in den Szenarien ÖSR und Ökobonus ähnlich verlaufen, hat sich bestätigt. Das ÖSR-Szenario weist am Ende der Simulation 9% weniger Emissionen als das Baseline-Szenario auf; das Ökobonus-Szenario 11% weniger. Hinter dem besseren Abschneiden des Ökobonus steht die geringere Stückzahl, denn die THG-Output-Relation λ_{GHG} ist bei der ÖSR sogar etwas höher.

Die ähnlichen Größen des Parameters λ_L der beiden Reformszenarien werfen die Frage auf, ob die ÖSR gegenüber dem Ökobonus überhaupt eine zusätzliche Lenkungswirkung erzeugt. Die Vermutung war, dass durch die ÖSR der Faktor

Arbeit entlastet und somit kostengünstiger wird und es für Unternehmen einen Anreiz gibt, eher Technologien mit höherer Arbeitsproduktivität und geringer THG-Output-Relation anzunehmen. Hierauf gibt Abbildung 31 eine Antwort: Durch die ÖSR ist die Verbesserung von λ_{GHG} größer gegenüber des Ökobonus-Falls. Das liegt daran, dass Unternehmen die Technologie insgesamt bewerten und die Vergünstigung von Arbeit zur Folge hat, dass THG-Emissionen relativ dazu teurer werden, was den Effekt verstärkt, THG-Emissionen vermeiden zu wollen.

Hypothese A.iii postulierte, dass mit Blick auf Arbeit im ÖSR-Szenario die günstigsten Effekte erzeugt werden. Abbildung 30 bestätigt diese Vermutung, wenn der Unterschied zum Baseline-Szenario auch sehr gering ist (+0,3%). Das Ökobonus-Szenario dagegen hat eine reduzierte Arbeitsnachfrage. Der Unterschied des Ökobonus-Szenarios zum Baseline-Szenario beträgt 4,1%, was Hypothese A.iii nicht entspricht. Ursächlich ist, dass zwar durch den Ökobonus eine relative Kostenverschiebung zugunsten der Arbeit stattfindet, was die Technologieparameter bestätigen, jedoch eine insgesamt Reduktion der Stückzahl vorliegt (siehe Abbildung 22).

Insgesamt fällt auf, dass das Ausmaß der Reduktion der THG-Emissionen gemessen an der hohen THG-Steuer in Höhe von 400 EUR/t CO_{2e} gering ist. So verdeutlicht Abbildung 30 (siehe oben), dass die THG-Emissionen lediglich um 22% (ÖSR) und 24% (Ökobonus) reduziert werden, was nicht den erforderlichen Reduktionen der Klimaziele der Bundesregierung entspricht. Allerdings hängt die technologische Entwicklung womöglich auch von anderen, nicht preislichen Faktoren ab. Bisher wurde die Annahme getroffen, dass die Potenziale der technologischen Veränderungsgeschwindigkeit bestehen bleiben (Kalibrierung an historischen Werten). Vor dem Hintergrund der unzureichenden technologischen Entwicklung erscheint es jedoch sinnvoll, diese Annahme aufzulösen und den Technologieparameter zu ermitteln, welcher notwendig ist, um die Klimaziele erreichen zu können. Dies erfolgt mit den Szenarien B.

12.5.8.3 Ergebnisse der Szenarien B: Variation der Technologieannahmen

Mit den Szenarien B wird ω_0 variiert. Die technologische Entwicklung findet grundsätzlich kreisförmig um einen Punkt statt (Bedingung 1: Kreis, siehe Kapitel 12.5.4), der jedoch von zwei Parallelen zusätzlich begrenzt wird (Bedingung 2: Schlauch). Für ω_0 wurde bisher ein Wert von 20% angenommen, was bedeutet,

dass das Verhältnis von der Schlauchbreite zum Kreisdurchmesser 1:5 bzw. 20% ist. Nun werden zusätzlich die Szenarien für die Werte $\omega_0 = 10\%$ und $\omega_0 = 30\%$ simuliert. Dafür wird die Anpassung der nachfolgend kalibrierten Parameter ω_L und ω_{GHG} notwendig. Tabelle 16 stellt dar, welche Parameter für ω_L und ω_{GHG} erforderlich werden, um die Verbesserungsgeschwindigkeit von λ_L und λ_{GHG} der vergangenen Jahre zu erreichen.¹⁸⁷

Die Variation des offenen Technologieparameters ω_0 und die deshalb notwendige Neu-Kalibrierung der anderen Parameter ändert an den Ergebnissen wenig, was beispielhaft am Preis p in Abbildung 32 dargestellt ist. Beide Preise (B.1 und B.3) weichen am Ende der Simulation vom Preis von B.2, dem ansonsten verwendeten Szenario, um weniger als 0,3% ab, was innerhalb des Rahmens der Kalibrierungsgenauigkeit (für λ_L und λ_{GHG}) liegt.

Tabelle 16: Annahmen der Technologieparameter (Szenarien B)

Technologieparameter		
$\omega_0 = 10\%$	$\omega_L^{188} = \dots$	$\frac{0,330}{12} \cdot 970$
	$\omega_{GHG}^{189} = \dots$	$\frac{0,063}{12} \cdot 770$
$\omega_0 = 20\%$	$\omega_L = \dots$	$\frac{0,330}{12} \cdot 250$
	$\omega_{GHG} = \dots$	$\frac{0,063}{12} \cdot 195$
$\omega_0 = 30\%$	$\omega_L = \dots$	$\frac{0,330}{12} \cdot 109$
	$\omega_{GHG} = \dots$	$\frac{0,063}{12} \cdot 86$

¹⁸⁷ Die Parameter dieser Tabelle werden so gewählt, dass die technologischen Verbesserungen fortgeschrieben werden – es sind insofern „eindimensionale“ Zahlenwerte. Zur besseren Lesbarkeit wurden hierfür allerdings die monatlichen Verbesserungsraten genommen und um einen Multiplikator ergänzt.

¹⁸⁸ Der Faktor ω_L für die Modellierung ist lediglich als Gesamtzahl entscheidend. Zur besseren Nachvollziehbarkeit wird dieser jedoch als Produkt der monatlichen Rate (0,330 dividiert durch zwölf Monate, siehe Tabelle 13) und dem darauffolgenden Faktor (970) dargestellt.

¹⁸⁹ Der Faktor ω_{GHG} für die Modellierung ist lediglich als Gesamtzahl entscheidend. Zur besseren Nachvollziehbarkeit wird dieser jedoch als Produkt der monatlichen Rate (0,063 dividiert durch zwölf Monate, siehe Tabelle 13) und den darauffolgenden Faktoren (770 bzw. 770 und 3,7) dargestellt.

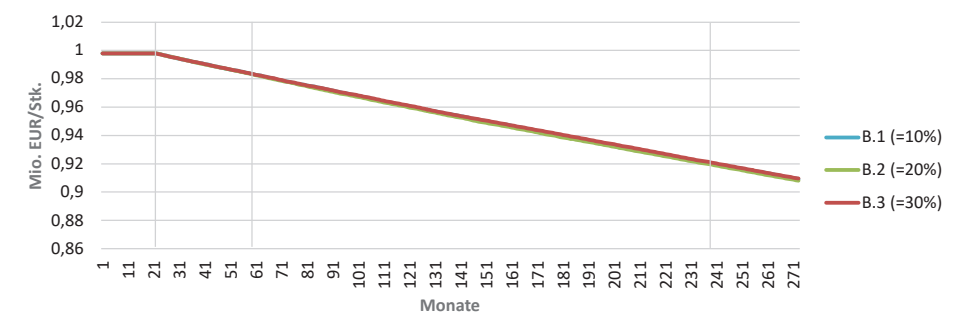


Abbildung 32: Preis p

Auch die Abweichungen der THG-Emissionen GHG und der Arbeitsnachfrage befinden sich in diesem Rahmen, was Abbildung 33 und Abbildung 34 zeigen.

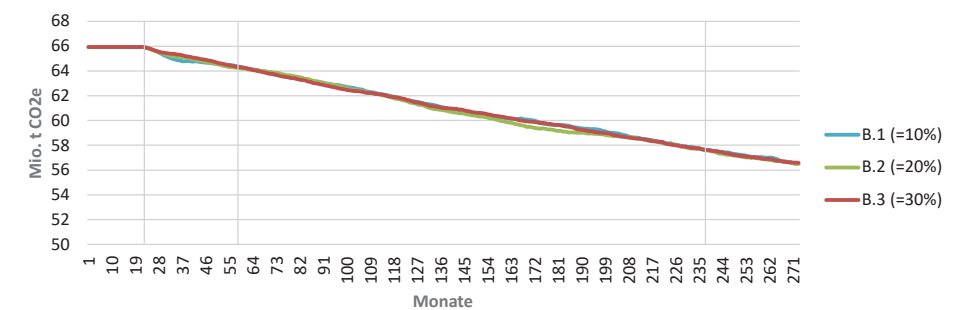


Abbildung 33: THG-Emissionen GHG

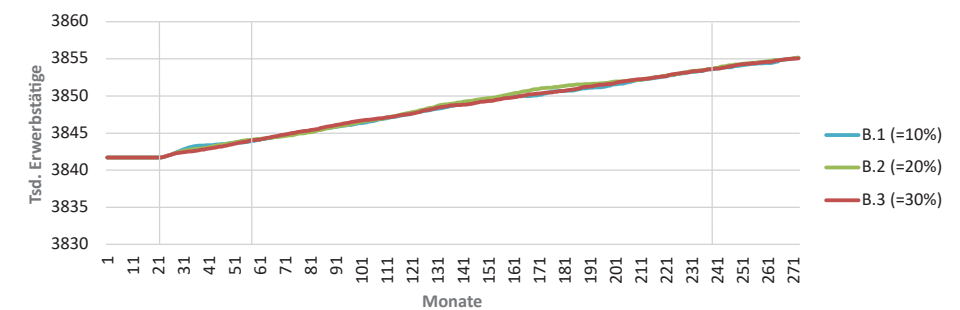


Abbildung 34: Arbeitsnachfrage L

Lediglich die Entwicklung der Stückzahl y der drei Szenarien variiert um bis zu 2% am Ende des Simulationszeitraums (siehe Anhang). Jedoch kann auch dies an Zufallsereignissen liegen, wenn etwa eine abweichende Entwicklung zu Beginn

der Hauptphase der Simulation entsteht, wird dieser relative Unterschied im weiteren Verlauf fortgeschrieben. Als Fazit ist daher festzuhalten, dass die Ergebnisse weitestgehend unabhängig von der Wahl des Parameters ω_0 sind.¹⁹⁰

In den folgenden Szenarien B+ sind die Technologieparameter derart angepasst, dass für das ÖSR-Szenario mit 400 EUR/t CO₂e etwa die Ziele der Bundesregierung erreicht werden. Die Kalibrierung an die vergangenen Werte ist mit dem Argument aufgehoben, dass zum Erreichen der Klimaziele nicht nur die Anpassung von Kostenanreizen erforderlich ist, wie die Ergebnisse der Szenarien A nahelegen, sondern zeitgleich andere Maßnahmen zur Steigerung der Geschwindigkeit des technologischen Wandels zu realisieren sind. Ein realweltliches Pendant dieser Modellmodifikation könnten weitere Maßnahmen sein, wie bspw. die Subventionen und Regulationen zur Steigerung der Energieeffizienz (vgl. Technologiefond der ÖSR in der Schweiz Diekmann & Bruderer Enzler, 2019, S. 272). Das heißt, für die Szenarien B wird in einer strategischen Vorausschau Backcasting angewandt – eine Methode, bei der die Bedingungen ermittelt werden, mit denen ein gesetztes Ziel zu erreichen ist. Angenommen wird, dass das THG-Reduktionsziel mittels der ÖSR erreicht wird. Dafür ist die Technologie-Variable ω_{GHG} so gewählt, dass die Ziele erreicht werden. Für die anderen beiden Szenarien wird der neu gefundene Technologieparameter gleichermaßen angewandt, um so auch diese Szenarien vergleichbar zu machen.

Vor dem Hintergrund dieser neuen Annahme sind zwei Aspekte von Interesse: Einerseits stellt sich die Frage, um welchen Faktor λ_{GHG} gesteigert werden muss, um die Klimaziele zu erreichen. Andererseits werden die Wirkungen der verschiedenen Reformen mit der Annahme dieser gesteigerten Geschwindigkeit des technologischen Wandels neu untersucht und mit den vorherigen Ergebnissen verglichen.

Der Zeithorizont der Reform beträgt 15 Jahre. Das Reduktionsziel der Bundesregierung für 2020 lag bei 60% Restemissionen (gegenüber 1990) und liegt für 2040 bei 12% Restemissionen.¹⁹¹ Die relative Reduktion in diesem 20-jährigen Zeitraum beträgt damit 80%.¹⁹² Für den mit dieser Reform anvisierten 15-jährigen

190 Das gleiche Ergebnis ist für die Reformen ökologische Steuerreform und Ökobonus festzuhalten. Aus Platzgründen wurde auf die Darstellung im Detail verzichtet.

191 Siehe Umweltbundesamt zu den Treibhausgasminderungszielen Deutschlands: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgasminderungsziele-deutschlands>

192 Das ist eine Reduktion auf 20%, entspricht 12% dividiert durch 60%.

Zeitraum ist demnach eine Reduktion um 60% erforderlich. Diese Reduktionsgeschwindigkeit wird mit der nachfolgenden Anpassung anvisiert.

Die Werte der Szenarien A wurden kalibriert, um die Werte der vergangenen Jahre zu erreichen. Für die Szenarien B bleibt der mit der Arbeitsproduktivität assoziierte Wert ω_L bestehen, der Wert ω_{GHG} wird für die Kalibrierung der THG-Output-Relation jedoch angepasst. Das Ziel ist, dass die Modellierung des ÖSR-Szenarios die am Ende vollständigen Simulationsphase von 21 Jahren eine Reduktion der THG-Emissionen um 60% erreicht hat. Tabelle 17 fasst die Resultate zusammen.

Tabelle 17: Annahmen der Technologieparameter (erweitert)

Technologieparameter		Szenarien B	Szenarien B+
$\omega_0 = 10\%$	$\omega_L^{193} = \dots$	$\frac{0,330}{12} \cdot 970$	$\frac{0,330}{12} \cdot 970$
	$\omega_{GHG}^{194} = \dots$	$\frac{0,063}{12} \cdot 770$	$\frac{0,063}{12} \cdot 770 \cdot 3,7$
$\omega_0 = 20\%$	$\omega_L = \dots$	$\frac{0,330}{12} \cdot 250$	$\frac{0,330}{12} \cdot 250$
	$\omega_{GHG} = \dots$	$\frac{0,063}{12} \cdot 195$	$\frac{0,063}{12} \cdot 195 \cdot 3,7$
$\omega_0 = 30\%$	$\omega_L = \dots$	$\frac{0,330}{12} \cdot 109$	$\frac{0,330}{12} \cdot 109$
	$\omega_{GHG} = \dots$	$\frac{0,063}{12} \cdot 86$	$\frac{0,063}{12} \cdot 86 \cdot 3,7$

Das Ergebnis ist, dass der Multiplikator für das Verbesserungspotenzial im Bereich der THG-Output-Beziehung ca. um den Faktor 3,7 gesteigert werden muss, um die Reduktion von 60% zu erreichen. Ein Unterschied der Szenarien B.1+, B.2+ und B.3+ liegt nicht vor. Auch hier wird also deutlich: Die Wahl des Parameters ω_0 beeinflusst das Ergebnis, das heißt die Größe des Faktors, nicht wesentlich.

193 Der Faktor ω_L für die Modellierung ist lediglich als Gesamtzahl entscheidend. Zur besseren Nachvollziehbarkeit wird dieser jedoch als Produkt der monatlichen Rate (0,330 dividiert durch zwölf Monate, siehe Tabelle 13) und dem darauffolgenden Faktor (970) dargestellt.

194 Der Faktor ω_{GHG} für die Modellierung ist lediglich als Gesamtzahl entscheidend. Zur besseren Nachvollziehbarkeit wird dieser jedoch als Produkt der monatlichen Rate (0,063 dividiert durch zwölf Monate, siehe Tabelle 13) und den darauffolgenden Faktoren (770 bzw. 770 und 3,7) dargestellt.

Der Vergleich der Szenarien B+ untereinander verhält sich analog zum Vergleich der Szenarien B: Geringe Abweichungen sind lediglich bei der Stückzahl y erkennbar. Die Unterschiede der THG-Output-Relation λ_{GHG} und der Arbeitsproduktivität λ_L sind unerheblich, ebenso wie die Unterschiede der resultierenden THG-Emissionen GHG und Arbeitsnachfrage L (siehe Anhang).

12.5.8.4 Diskussion der Szenarien B

Zunächst analysieren die Szenarien B die Sensibilität des Modells auf Variationen der Technologieparameter. Hierbei ist zu resümieren, dass die Variation von ω_0 keine wesentlichen Unterschiede produziert und sich das Technologiemodul des Modells als robust beweist.

Im Rahmen der Szenarien B+ zeigt sich außerdem, dass eine erhebliche Steigerung des technologischen Potenzials ω_{GHG} erforderlich ist. Hypothese B.i, die eine Steigerung der grundsätzlichen Geschwindigkeit der technologischen Entwicklungsfähigkeit für notwendig hält, wird damit bestätigt. Die Änderung dieses Technologieparameters erzielt größere Effekte als die Variation der Reformen selbst. Im ÖSR-Szenario (A.2) sind am Ende der Simulation die jährlichen THG-Emissionen gegenüber dem Baseline-Szenario (A.1) um 9% reduziert. Im ÖSR-Szenario mit gesteigertem technologischem Potenzial (B.2+) werden dagegen 53% weniger THG-Emissionen ausgestoßen als im Baseline-Szenario (A.1). Daraus lässt sich zweierlei ableiten: Die Steigerung ist wichtig und notwendig zur Erreichung der Klimaziele, aber die Implementierung der Reform selbst hilft bei der Zielerreichung.

Durch das geänderte Verhältnis von ω_0 ändert sich die Anpassungsmöglichkeit für Unternehmen: Das Möglichkeitsfeld ist länglicher (vgl. Abbildung 16). Es stellt sich die Frage, warum trotz großer Veränderungen hier die ausgewählten Technologien in der langen Frist ähnlich bleiben. Ein Grund könnte sein, dass eine strikte Verbesserung einen relevanten Vorteil darstellt und in der Regel beim Innovationsprozess ausgewählt wird. Arbeit L macht an den Gesamtausgaben zu Beginn ca. 50% aus und ist damit hoch relevant; bis zum Ende der Simulation reduziert sich der Anteil, bleibt aber hoch (bspw. 45% im Szenario A.2). Der Anteil der THG-Steuern an den Gesamtausgaben aller Unternehmen nimmt im Simulationsverlauf zu und beträgt am Ende dennoch nur ca. 6% aus (A.2 und A.3).

Das bedeutet, dass die Vergrößerung der Substitutionsmöglichkeiten, was bildlich gesprochen heißt, die Fläche der möglichen Innovationen weiter nach

rechts unten zu verlängern (vgl. Abbildung 16), nicht ausschlaggebend ist. Zwar kann eine Innovation einen großen und finanziell attraktiven Sprung in Richtung Substitution bedeuten (höhere THG-Output-Relation, geringere Arbeitsproduktivität), die Verbesserung der Arbeitsproduktivität spielt jedoch hier immer auch eine Rolle, sodass große Sprünge nicht die Regel sind, was der Blick auf die Entwicklungspfade einzelner Unternehmen belegt. Für Unternehmen ist es immer von großer Bedeutung, Arbeitskosten zu reduzieren. Um über diesen Kosten-Mechanismus THG-Steuern zu reduzieren, müsste der Steuersatz sehr hoch sein.

Zur Verbesserung des Verhältnisses von THG-Steuerausgaben zu Arbeitskosten könnten deshalb Steuersätze über 400 EUR/t CO₂e sinnvoll sein. An dieser Stelle ist an den Spezialbericht des IPCC zu erinnern (Rogelj et al., 2018), der für das Jahr 2050 im Szenario Unter-1,5-Grad-Ziel-Pfad (ohne Abzinsung, in Preisen von 2010) eine Bandbreite von notwendigen THG-Steuersätzen von 245–14.300 USD₂₀₁₀/t CO₂e ermittelt (vgl. Kapitel 6.7). Mit 400 EUR/t CO₂e erscheint daher das Limit einer sinnvollen THG-Steuerhöhe nicht erreicht.

Der Aussage des Modells folgend liegt die Zielerreichung der Reduktionsziele somit weniger an Kostenanreizen (THG-Steuern) als mehr an weiteren Aspekten wie etwa der technischen Seite der Transformation zu einer THG-neutralen Wirtschaft. Wie oben aufgeführt gibt es eine Vielzahl von politischen Klimaschutzmaßnahmen. Die Ergebnisse legen nahe, dass selbst bei einer THG-Steuer von 400 EUR/t CO₂e diesen weiteren Maßnahmen eine hohe Wichtigkeit zukommt. Der Schluss, dass die Kostenanreize keine Bedeutung haben, wäre auf Grundlage der Modellkonstruktion jedoch unzulässig.

Als Fazit ist zweierlei festzuhalten: Zum einen ist die Simulation nicht entscheidend von der Wahl des Parameters ω_0 abhängig und die Technologiekomponente des Modells beweist sich als robust. Zum anderen bietet die Modellierung Orientierung, wie viel Steigerung des technologischen Potenzials λ_{GHG} jenseits der finanziellen Aspekte erforderlich ist. Zwar hat das Modell einen Fokus auf Richtungsvorgaben und qualitative Aussagen, aber vor dem Hintergrund der offenbarten Belastbarkeit des Technologiemoduls bleibt die Aussage der hohen erforderlichen Steigerung (3,7-fach) nicht ohne Gewicht. Eine Politik, die lediglich die Steuerung mittels eines THG-Preises bis zur Höhe von 400 EUR/t CO₂e vornehmen will, ist der Modellierung zufolge unzureichend.

12.5.8.5 Ergebnisse der Szenarien C: Variation der Struktur der THG-Steuererhöhung

Die nachfolgend untersuchten Szenarien gehen alle von der Einführung der ÖSR aus, unterscheiden sich aber, was die Erhöhung der THG-Steuer angeht. Das Szenario C.1 erhöht die Steuern linear (entspricht Szenario A.2). Die Steuerstrukturkurven der Szenarien C.2 und C.3 sind begrenztes und quadratisches Wachstum (siehe Abbildung 35). In der langen Frist beträgt die THG-Steuerhöhe τ in allen Szenarien 400 EUR/t CO₂e.

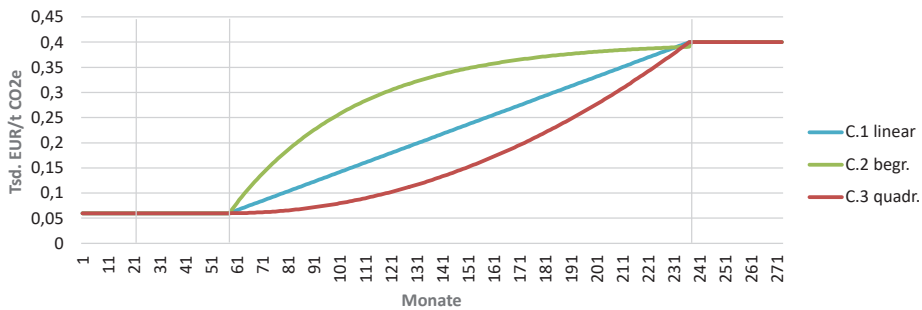


Abbildung 35: THG-Steuersatz τ

Da die Steuern in allen drei Szenarien aufgrund der ÖSR zur Entlastung der Arbeit genutzt werden, reduziert sich der Arbeitskostensatz w , was in Abbildung 36 erkennbar ist. Über das begrenzte Wachstum (C.2) wird in der Anfangsphase das größte Aufkommen generiert, weshalb auch beim Arbeitskostensatz die höchste Entlastung vorliegt.

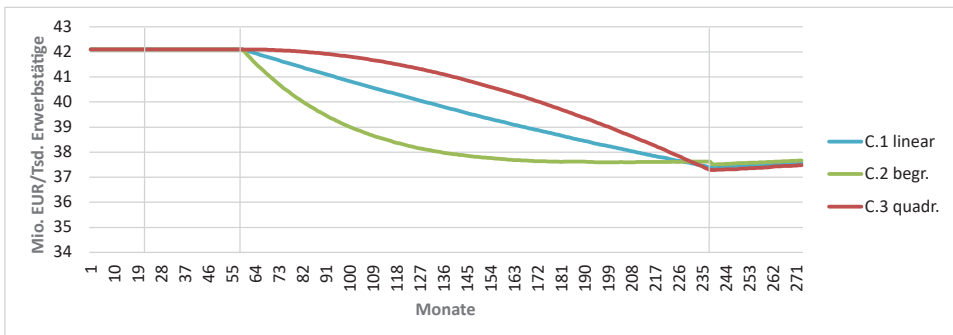


Abbildung 36: Arbeitskostensatz w

Die Effekte sind in Abbildung 37 bei der THG-Output-Relation λ_{GHG} erkennbar: Bei einer frühen starken Erhöhung (C.2) erhöht sich die THG-Output-Relation stärker als bei einer linearen Erhöhung (C.1). Die quadratische Erhöhung der Steuer dagegen führt zu den geringsten Verbesserungen von λ_{GHG} .

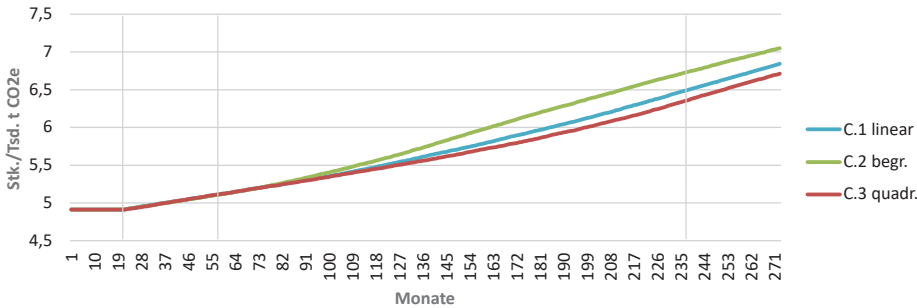


Abbildung 37: THG-Output-Relation λ_{GHG}

Analog sind die Entwicklungen bei der Arbeitsproduktivität λ_L (Abbildung 38). Auch hier lässt sich diese Reihenfolge erkennen: die stärksten Effekte liegen beim Szenario C.3 vor, dicht gefolgt von C.1. Die geringste Steigerung der Arbeitsproduktivität liegt im Szenario C.2 durch das begrenzte Wachstum vor, wobei die Unterschiede aller drei Varianten gering sind. Die Richtung der technologischen Entwicklung wird demnach durch das begrenzte Wachstum am stärksten im Sinne der ÖSR eingeschlagen.

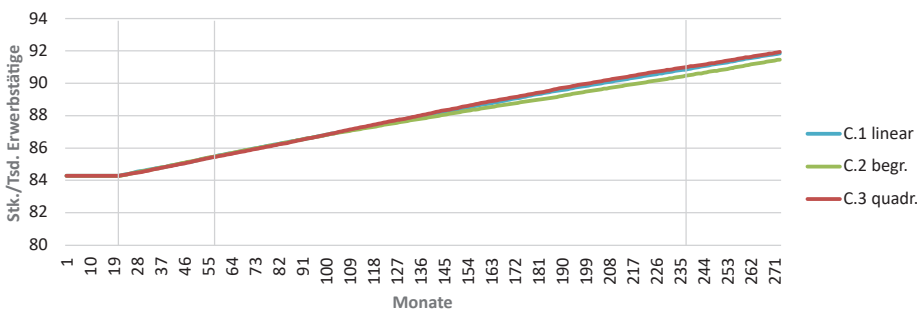


Abbildung 38: Arbeitsproduktivität λ_L ¹⁹⁵

Abbildung 39 zeigt schließlich, dass die größten Emissionsreduktionen am Ende des Simulationszeitraums folgerichtig beim begrenzten Wachstum bestehen

¹⁹⁵ Die blaue Kurve verläuft unter der roten.

(2,3% niedriger als beim linearen Wachstum), die kleinsten beim quadratischen Wachstum (2,1% höher als beim linearen Wachstum). Die Arbeitsnachfrage unterscheidet sich in allen drei Szenarien nicht wesentlich, was unter anderem an den geringen Unterschieden der Arbeitsproduktivität λ_L liegt. Jedoch trifft auch hier die Tendenz zu, dass die höchste Arbeitsnachfrage durch das begrenzte Wachstum (0,1% höher als beim linearen Wachstum) und die niedrigste Arbeitsnachfrage durch das quadratische Wachstum (0,1% niedriger als beim linearen Wachstum) erzeugt wird. Diese Effektstärken sind jedoch zu vernachlässigen.

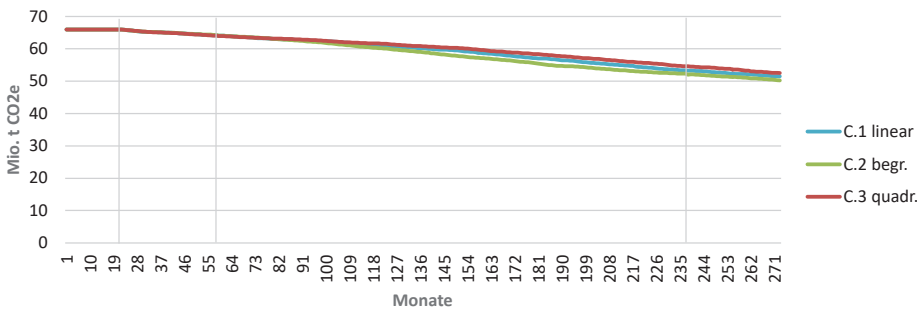


Abbildung 39: THG-Emissionen GHG

12.5.8.6 Diskussion der Szenarien C

Am erfolgreichsten zur Senkung der THG-Emissionen ist die zunächst starke Erhöhung. Eine beträchtliche Lenkung wird auch durch den linearen Anstieg erreicht. Der quadratische zunächst flache Anstieg dagegen führt dazu, dass zu Beginn wenig zusätzliche Entwicklung passiert (siehe Abbildung 37). Die Hypothese C.i wird damit bestätigt.

Bemerkenswert ist, dass in allen drei Szenarien nur ein leichter Knick nach Beendigung der Reform bei der Arbeitsproduktivität und der THG-Output-Relation zu beobachten ist. Die Reform wirkt daher auch nach Beendigung noch nach. Die Anreize durch die erhöhten, wenn auch nicht mehr sich erhöhenden Steuern sind weiterhin gegeben und scheinen auszureichen, um in die eingeschlagene Richtung grob weiterzugehen. Die Entwicklungsgeschwindigkeit der THG-Output-Relation λ_{GHG} scheint daher vor allem von der Höhe der Steuern abzuhängen: Je höher der THG-Steuersatz τ , desto steiler ist die Entwicklungskurve von λ_{GHG} . Dass die Entwicklung nach Beendigung der Reform in der letzten Phase nicht stagniert, bestätigt diesen Verdacht. Der aktuelle

Entwicklungsstand, das heißt die absolute Höhe von λ_{GHG} scheint nicht relevant zu sein, was sich dadurch bestätigt, dass in der letzten Phase ohne Reform, wenn die Steuerhöhe in allen Szenarien 400 EUR/t CO_{2e} beträgt, die Entwicklung annähernd parallel ist.¹⁹⁶

Was die Ergebnisse beeinflussen könnte, ist die Vorausschau der Unternehmen, welche in der vorliegenden Simulation nicht variiert wurde. Die Erhöhung der THG-Steuer könnte als öffentlich angegeben und weit im Voraus bekannt angenommen werden. Die Unternehmen könnten demnach die Preise nicht nur für einen Monat im Voraus berücksichtigen, sondern für mehrere, viele oder alle Monate des Reformzeitraums. Wenn mehrere Jahre berücksichtigt werden (bspw. fünf Jahre), verändert das die Optimierung der Unternehmen und auch das Szenario mit dem zunächst allmählichen Anstieg der Steuern könnte ähnliche Ergebnisse generieren, wie die beiden anderen Szenarien oder zumindest dürften die Unterschiede geringer werden. Für weitere Arbeiten würde sich hierbei die Frage stellen, welche Planungshorizonte der Unternehmen plausibel sind.

12.6 Diskussion und Fazit

12.6.1 Reflexion der Ergebnisse

Insgesamt zeigte sich, dass im gegebenen Setting die technologische Entwicklung über steuerliche Anreize gelenkt werden kann. Die stärkste Lenkung wird durch die ÖSR erreicht, gefolgt vom Ökobonus (siehe Abbildung 31). Im Hinblick auf die Arbeitsproduktivität schneidet das Ökobonus-Szenario ähnlich ab wie das ÖSR-Szenario, im Hinblick auf die THG-Output-Relation scheidet es jedoch schlechter ab. Das geringe Ausmaß beider simulierten Reformen wirft jedoch Fragen auf. Weitere nicht-preisliche Maßnahmen erscheinen erforderlich, insbesondere vor dem Hintergrund der hohen Steigerung des technologischen Potenzials in Form von ω_{GHG} , welches um den Faktor 3,7 erhöht werden muss, um eine 60%-Reduktion der Emissionen zu ermöglichen. Beim Blick auf die Strukturkurve der Steuererhöhung bestätigen sich schließlich die Vermutungen, dass es besser im Sinne der Lenkung der technologischen Entwicklung ist, wenn frühzeitig hohe Steuern den Weg weisen.

¹⁹⁶ Die Steigungen sind: 0,010 Stück/Tsd. t CO_{2e} je Monat für C.1 und C.3 und 0,009 Stück/Tsd. t CO_{2e} je Monat für C.2. Zumindest tendenziell sind Aufholeffekte abzulesen.

Die Stärke des Modells ist, dass technologischer Fortschritt endogen ist und von verschiedenen Aspekten des Gesamtmodells abhängt. Außerdem besteht mittels der beiden Komponenten Arbeitsproduktivität und THG-Output-Relation eine Richtung der technologischen Entwicklung, die sich durch die finanziellen Anreize im Modell verändern kann, was in den Szenarien ÖSR und Ökobonus auch geschieht.

Technologie über die Parameter der Produktivitäten abzubilden ist eine vereinfachte Darstellung, die nur einen Teil der Komplexität von technologischer Entwicklung treffen kann (vgl. D'Alessandro et al., 2020, S. 6). Technologische Veränderungen können auf unterschiedliche Art im wirtschaftlichen Prozess eine Rolle spielen. Deshalb sind die Interventionen und Einflussnahmen auf die technologische Entwicklung ebenfalls unterschiedlich. Mit der vorliegenden Technologieausgestaltung ist es jedoch möglich, die Größenordnungen über die Kalibrierung im Griff zu halten und diesbezüglich makroökonomisch belastbare Tendenzen abzuleiten.

Dennoch handelt es sich um ein analytisches Modell, das einen Fokus auf Richtungswirkungen hat, da es aufgrund der Simplizität nicht alle ökonomischen Wirkmechanismen abbilden kann, was im Folgenden an verschiedenen Stellen noch zur Sprache kommen wird. Im vorliegenden Modell werden so unter anderem Verteilungseffekte nicht in den Blick genommen. Auf Haushaltsebene bestehen diese nicht, da alle Haushalte jeden Monat das gleiche Einkommen erhalten. Auf Unternehmensebene bestehen zwar Unterschiede, diese haben jedoch zufälligen Charakter und eine nähere Betrachtung erscheint nicht zweckdienlich. In diesem Zuge ist auch darauf hinzuweisen, dass es im Modell keinen Staat als eigenständigen Akteur gibt. Steuern werden zwar erhoben und erhöht, diese jedoch direkt an die Haushalte weitergegeben, was aufgrund der Aufkommensneutralität möglich ist. Eine Erweiterung um den Staat könnte sinnvoll sein, wenn staatliche Reaktionen näher betrachtet werden sollen. Ein Vorteil dieses analytischen Modelltyps liegt jedoch darin, dass aufgrund der weniger zahlreichen Annahmen die Wirkzusammenhänge sichtbarer werden und somit Annahmen variiert werden und transparent diskutiert werden können.

12.6.2 Weitere Aspekte

12.6.2.1 Zur Substituierbarkeit von Arbeit und THG-Emissionen

Vor dem Hintergrund, dass THG-Emissionen für den Klimawandel entscheidend sind (nicht Energieverbräuche), ist zur Beurteilung der technologischen Entwicklung die Substituierbarkeit der Faktoren der Arbeit und THG-Emissionen zu berücksichtigen. In der Fachliteratur werden zwar die Substituierbarkeit von Inputfaktoren wie Arbeit und Energie adressiert (in der Regel über Elastizitäten), aber die Substituierbarkeit von Arbeit und Emissionen ist wenig im Blickfeld. Diese ist trotz der verschiedenen Ebenen, die Arbeit als Inputfaktor und THG-Emissionen als Nebenprodukt aufweisen, von hoher Relevanz.

Eine grobe Annahme wird im vorliegenden Modell implizit über die Wahl der Parameter ω_0 , ω_L und ω_{GHG} getroffen und ist somit für die Entwicklung der vergangenen Jahre validiert. Dennoch liegt die Stärke des Modells weniger in der Prognose der tatsächlichen Werte der Arbeitsproduktivität oder der THG-Output-Relation, sondern mehr in der Richtung der Entwicklung dieser Parameter. Die Richtung wird von den Unternehmen auf Grundlage von Kostenentscheidungen eingeschlagen und kann wertvolle Orientierung bieten, für welche Entwicklung Kostenanreize bestehen.

Insgesamt reagiert die Arbeitsproduktivität wenig auf die veränderten Kostenanreize. Grund dafür ist, dass die Steigerung der Arbeitsproduktivität sehr lohnend ist, da die Arbeitskosten auf Unternehmensebene mit 45–50% einen hohen Anteil der Gesamtkosten ausmachen. Die Anreize zur Steigerung der Arbeitsproduktivität sind insofern immer gegeben – auch dann, wenn THG-Emissionen deutlich teurer werden und bis zu 6% der Ausgaben ausmachen. Dieses Ungleichgewicht gilt es im Blick zu behalten.

Neoklassische Produktionsfunktionen wie zum Beispiel die Cobb-Douglas-Produktionsfunktion erlauben starke Substitutionen, das heißt, den Ersatz eines Produktionsfaktors durch einen anderen, ohne zeitlichen Einsatz. Folgt man diesem Prinzip, müssten sich die Technologieparameter λ_L und λ_{GHG} gemeinsam stark verändern können, wenn einer der Parameter abnimmt und sich der andere erhöht. Im vorliegenden Modell wird dieses Entweder-oder von Substitution einerseits oder technologische Verbesserung beider Parameter andererseits durch eine Fläche der Möglichkeiten aufgelöst. Mithilfe einer eher schlauchförmigen Fläche werden einerseits Substitutionen die besseren Verbesserungschancen ein-

geräumt und andererseits der Gegebenheit Rechnung getragen, dass auch Substitution ein Umstellungsprozess ist, der in der Regel Zeit benötigt.

Abbildung 40 zeigt die durchschnittliche technologische Entwicklung um das Szenario B.2+: ÖSR inkl. der Steigerung des technologischen Potenzials ω_{GHG} um den Faktor 3,7 (lila Kurve). Der Zufallsprozess ist hierbei unverändert, die Ergebnisse werden jedoch um ein Vielfaches multipliziert und damit Substitutionsvarianten vor der Technologiewahl der Unternehmen attraktiver. Zwei Aspekte sind zu bemerken: Zum einen ist festzustellen, dass trotz dieser Steigerung die Arbeitsproduktivität weiterhin zunimmt, die Kurve also grundsätzlich die gleiche Form hat (von links unten nach rechts oben). Zum anderen ist der am Ende realisierte Wert der Arbeitsproduktivität beachtenswert, da dieser nur wenig geringer ausfällt als die Realisationen der anderen Szenarien: 91,3 Stück/Tsd. Erwerbstätige (Szenario B.2+) gegenüber 91,9–92,4 Stück/Tsd. Erwerbstätige (Szenarien A.1, A.2 und A.3).

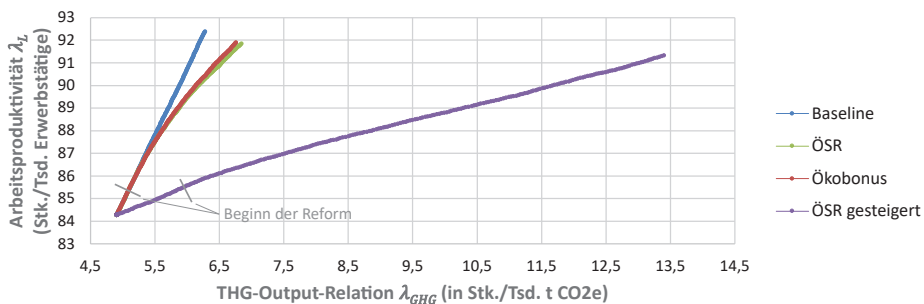


Abbildung 40: Durchschnittliche technologische Entwicklung (inkl. Steigerung)

In Abbildung 40 ist am Knick der lila Kurve visuell erkennbar, dass die Reform trotz des gesteigerten technologischen Potenzials von der ÖSR profitiert. Insgesamt wird das Bemühen der Unternehmen, die Arbeitsproduktivität zu steigern, und die hohe Bedeutung der Arbeitskosten erkennbar.

12.6.2.2 Zur Dominanz der Arbeitskosten

Die anfänglichen beträchtlichen Arbeitskosten in Höhe von ca. 50% des Gesamtumsatzes sind auf Grundlage der Angaben des statistischen Bundesamtes validiert. Auch betriebswirtschaftliche durchschnittliche Angaben liegen in diesen Größenordnungen: Andere Quellen geben ähnlich hohe oder höhere Werte für den

Anteil der Arbeitskosten bzw. der Personalkosten an.¹⁹⁷ Der Blick in die Input-Output-Tabellen des Modells des vorherigen Kapitels zeugt von einer ähnlichen Größenordnung. Der Anteil der Arbeitnehmerentgelte im Inland an der Bruttowertschöpfung beträgt sektorübergreifend 59% (für das Jahr 2019, Statistisches Bundesamt [Hrsg.], 2023b), mit Variationen von 29% im Sektor „Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Fischerei“ bis 76% im Sektor „Öffentliche und sonstige Dienstleistungen einschließlich Waren privater Haushalte“ und 78% im Sektor „Nahrungs- und Futtermittel, Getränke und Tabakerzeugnisse“. Der Anteil der Arbeitnehmerentgelte im Inland am Produktionswert ist zumindest geringer und liegt sektorübergreifend bei 28%. Die Änderung der Basis, ob Bruttowertschöpfung oder Produktionswert, macht einen deutlichen Unterschied aus. Diese Differenz begründet sich durch die Berücksichtigung bzw. Nicht-Berücksichtigung der Vorleistungen. Mit Blick auf das agentenbasierte Modell stellt sich also die Frage, was die Gesamtproduktion Y im Modell ist. Um keine Redundanzen zu erhalten, die auch im BIP unberücksichtigt sind, ist die Bruttowertschöpfung heranzuziehen und die Arbeitnehmerentgelte in Höhe von 59% wären zutreffend.

Um derartige relative Kostenverschiebungen auf Modellebene greifen zu können, müssten die Sektoren differenziert werden und Vorprodukte implementiert werden. Hierbei könnte es sich um eine gewinnbringende Erweiterung handeln, da Unternehmen dann umfänglicher die neuen Kosten durch eine Reform berücksichtigen könnten. In einem solchen erweiterten Modell könnten die Input-Faktoren der Sektoren ebenfalls durch zufällige Entwicklungen variiert werden und somit weitere variable Technologieparameter etabliert werden. Die Richtung der technologischen Entwicklung könnten bspw. alle Sektoren, Arbeit und THG-Emissionen berücksichtigen und wäre in diesem Fall multidimensional. Aufgrund der zahlreichen Inputfaktoren bzw. Vorprodukte unterschiedlicher Sektoren würde Arbeit eine geringe Rolle erhalten und der starke Fokus der Unternehmen, die Arbeitsproduktivität zu steigern, würde in solch einem Modell abgeschwächt werden. Allerdings liegt auch der Anteil der

¹⁹⁷ Laut dem Clockodo-Lexikon betragen die Personalkosten 30–40% der Gesamtkosten (<https://www.clockodo.com/de/lexikon/personalkosten/>, 09.03.2024). eagle-control.de zufolge liegt der Anteil der Personalkosten bei ca. 40–60% vom Umsatz (<https://www.eagle-control.de/kunden-partner/personalkosten-absolut-und-prozentual/>, 09.03.2024). Laut Personalwissen.de ist der Anteil für Löhne, Gehälter und Lohnnebenkosten in personalintensiven Unternehmen sogar über 50% der Ausgaben (<https://www.personalwissen.de/betriebsausgaben/>, 09.03.2024). Das Statistische Bundesamt gibt Lohnquoten für 2022 von 70,0% (unbereinigt) und 69,6% (bereinigt) an (Statistisches Bundesamt [Hrsg.], 2023a, S. 23).

Arbeitnehmerentgelte im Inland am Produktionswert (= Bruttowertschöpfung + Vorleistungen) bei 28%: Die Steigerung der Arbeitsproduktivität spielt insofern in jedem Fall eine zentrale Rolle für Unternehmen.

12.6.2.3 Zur Insuffizienz der Steuerung über den THG-Preis

Da die simulierten Reformen nicht ausreichen, bietet es sich an, das Modell dahingehend zu erweitern, dass weitere Maßnahmen (neben den preislichen Anreizen) simuliert werden können und somit das Abstraktionsniveau reduziert wird. Zwar werden im Modell keine weiteren Maßnahmen untersucht, dennoch wird deutlich, dass die preislichen Anreize in Höhe von 400 EUR/t CO₂e in keiner der Simulationen der Szenarien A, B und C ausreichend sind – die gezielte Steigerung des technologischen Potenzials in den Szenarien B+ stellt hier die Ausnahme dar.

Die Struktur des agentenbasierten Modells weist ein hohes Abstraktionsniveau auf. Das heißt, dass die konkrete Umsetzungsfrage über dieses Vorgehen zunächst ausgeblendet wird. In der Praxis gibt es jedoch je nach Themenbereich zahlreiche weitere Strategien und Maßnahmen zur Reduktion der Emissionen (vgl. Energiewende, Verkehrswende, Landwirtschaftswende etc.).

Neben den Kostenanreizen aufgrund von THG-Bepreisungen sind auch andere Strategien zu nennen, die zu technologischen Verbesserungen bzw. zur Reduktion der THG-Emissionen führen. Beispiele dieser Strategien können wie folgt kategorisiert werden:

1. Konsistenz: Zum Beispiel auf Seite der Energieerzeugung, welche einen Großteil der Emissionen ausmacht, gibt es rechtliche Vorgaben zum Ausbau der erneuerbaren Energien, die die Emissionen reduzieren (Ausbauziele, Verpflichtungen von PV-Anlagen auf Neubauten etc.). Auch das Abkommen des Kohleausstiegs bis 2030 ist hier zu nennen.
2. Effizienz: Darüber hinaus gibt es Vorschriften zur Erreichung von Effizienzrichtlinien.¹⁹⁸ Im Bauwesen und im Bereich von Heizungsanlagen etwa über das Gebäudeenergiegesetz¹⁹⁹, auf Produktebene zum Beispiel

¹⁹⁸ Siehe Energieeffizienz-Richtlinie der Europäischen Union: <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2023/07/25/council-adopts-energy-efficiency-directive/> (09.03.2024).

¹⁹⁹ Siehe Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen: <https://www.bmwsb.bund.de/Web/BMWSB/DE/themen/bauen/energieeffizientes-bauen-sanieren/gebaeudeenergiegesetz/gebaeudeenergiegesetz-node.html> (09.03.2024).

über die Kennzeichnung des Energieverbrauchs mittels Energieeffizienzklassen²⁰⁰.

3. Suffizienz: Schließlich gibt es auf individueller Ebene Bemühungen, einen emissionsärmeren Lebensstil zu leben. Dies kann auf verschiedene Wege erreicht werden. Zum Beispiel durch den Verzicht auf besonders energieintensive Güter. Suffizienz ist auch in öffentlichen Institutionen zu finden, wenn es darum geht, die Raumtemperatur zu senken.²⁰¹

Es gibt Anreize, technologiepolitische Maßnahmen umzusetzen und eine hohe, effektive THG-Bepreisung zu vermeiden (Goulder et al., 1999; Austen-Smith et al., 2019; Landis et al., 2019; Rausch & Yonezawa, 2023). Zu dem Schluss, dass rein preisliche Anreize nicht ausreichen, kommen jedoch auch bspw. Amendola et al. (2024). Nach der Untersuchung verschiedener Varianten wird ihrer Modellierung zufolge die Energieeffizienz, was einer der Technologieparameter in ihrem Modell ist, am effektivsten durch die langfristige Förderung eines Forschungszentrums gesteigert.

Festzuhalten ist, dass die Reduktion der THG-Emissionen und der Ausbau der erneuerbaren Energien nicht allein an der Bepreisung von THG-Emissionen, sondern auch an anderen Faktoren liegt, insbesondere der Umsetzung technologiepolitischer Maßnahmen. Es stellt sich die Frage, wie diese Ebene der induzierten Technologieveränderung in die Modellierung aufgenommen werden kann. Das bereits im Modell umgesetzte technologische Potenzial könnte durch die staatlichen Subventionen beeinflusst werden. Die Errichtung eines Forschungszentrums bspw. könnte den Faktor ω_{GHG} erhöhen und darüber staatliche Anreize zur Erreichung der Klimaziele implementieren. Welches Spannungsfeld daraus wiederum für Unternehmen entsteht, wäre Teil einer weiteren Untersuchung.

Generell ist zu überlegen, ob sich technologische Entwicklungen ausschließlich an finanziellen Anreizen orientieren, oder ob es nicht noch weitere relevante Einflussfaktoren gibt. Dosi (1982) prägte bspw. den Begriff des technologischen Paradigmas, das für die Entwicklung entscheidend ist. Eventuell gibt es andere technologische Pfade, die entsprechend auch auf Modellebene

200 Siehe Übersicht des Umweltbundesamts zur Energieverbrauchskennzeichnung: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energiesparen/energieverbrauchskennzeichnung> (09.03.2024).

201 Wie es in der Folge der Energiekrise 2023 durch die Bundesregierung zeitweise praktiziert wurde: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/energiesparmassnahmen-2078224> (09.03.2024).

umgesetzt werden müssten. Die Erwartungshaltung einer nationalen oder bestenfalls europäischen Reform sollte allerdings gerade vor dem Hintergrund internationaler Entwicklungen und Abhängigkeiten nicht sein, dass die Mechanismen des technologischen Fortschritts in ihrem Kern grundlegend verändert werden können. Die Beschränkung auf die monetären Anreize bei gleichzeitiger Berücksichtigung vergangener Verbesserungsgeschwindigkeiten der Technologieparameter erscheint zumindest als ein gangbarer Weg und lässt technologisch keine Fehlentwicklungen befürchten, da die Adressierung des Klimawandels ein globales Anliegen ist.

12.6.2.4 Emissionen durch den Energiesektor oder die Produktion insgesamt

Im Modell werden die THG-Emissionen der Produktion insgesamt zugeschrieben, nicht sektoral aufgegliedert oder getrennt nach Energiegewinnungssektor und verarbeitenden Sektoren. Der Vorteil hierbei ist, dass der Blick auf die Makrogrößen gerichtet wird und hier über die Jahrzehnte der technologischen Entwicklung Kennwerte berechnet werden können, die vor dem Hintergrund der Empirie als plausibel bezeichnet werden können. Auf einen Energiesektor zu verzichten, bringt jedoch das Problem mit sich, dass es die Transformationsprozesse, die bei der Energiegewinnung nötig sind (Stichwort Energiewende und Umstellung auf erneuerbare Energien), nicht einzeln abgebildet werden können. Die Energieerzeugung macht einen großen Teil der gesamten THG-Emissionen aus, sodass mithilfe eines Energiesektors ein Hauptproblem zur THG-Emissionsreduktion adressiert wird. Die Reduktion auf Emissionen im Energiesektor würde jedoch vernachlässigen, dass es sich bei der Reduktion der Emissionen um eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe mit in allen Bereichen erforderlichen Reduktionen handelt, sodass auch diese Variante Nachteile mit sich bringen würde.

12.6.2.5 Zur geringen Stückzahl im Ökobonus-Szenario

Im Modell wirft das schlechte Abschneiden mit Blick auf den Umsatz in Stück im Ökobonus-Szenario Fragen auf. An dieser Stelle lohnt sich ein Blick auf die Modellstruktur, die angebotsorientiert ist. Die Nachfrage, das heißt insbesondere der Konsum, spielt keine gewichtige Rolle, da sie immer als gegeben angenommen wird. Das bedeutet, die unterschiedlichen Reformwirkungen sind besser mit Blick auf die Angebotsseite, die Produktion, zu erklären.

Beim Ökobonus schafft die Steuererhöhung einen Nachteil für die Unternehmen. Die höheren Ausgaben für die Produktion steigern die Stückkosten. Zwar haben die Haushalte ein erhöhtes Einkommen, dieses reicht allerdings nicht aus, um die erhöhten Preise zu kompensieren, sodass unterm Strich reduzierter Umsatz nach Stück steht. Das Modell kommt hier an seine Grenzen. Dass über den Ökobonus das Einkommen gesteigert wird, während es sonst im ganzen Modell keine Möglichkeit gibt, das Einkommen der Haushalte zu erhöhen, kann kritisch gesehen werden. Aufgrund der Simplität wurde das Ökobonus-Szenario auf diese Weise implementiert und ist zu rechtfertigen, in erweiterten Modellierungen könnte hierauf jedoch ein Augenmerk liegen. Der Grundmechanismus, dass durch die ÖSR den Unternehmen ein Vorteil entsteht, der bei guten Marktbedingungen auch an die Haushalte weitergegeben wird, während beim Ökobonus den Unternehmen nur ein Nachteil entsteht, der über den Preis ebenfalls an die Haushalte weitergegeben wird, und teilweise durch die höheren Einkommen kompensiert wird, ist plausibel im Modell abgebildet.

Aus Klimaperspektive kann dieser Effekt bei der Weitergabe des Aufkommens im Fall des Ökobonus als Rebound-Effekt bezeichnet werden, denn der eigentlich verteuerten Produktion widerfährt durch die Einkommen neue Nachfrage. Im Gegensatz zu Zhong und Su (2021) wird dieser Effekt nicht über die höhere Kaufkraft von nicht mehr arbeitslosen Personen erzeugt, die im vorliegenden Modell keine Rolle spielt, sondern über das zusätzliche Einkommen, das den Haushalten zukommt. Dem entgegen stehen Amendola et al. (2024), deren Modellierung zufolge bei sehr unterschiedlichen Politiken (von CO₂-Steuer bis hin zum öffentlichen Forschungszentrum zur Beschleunigung der Energieeffizienz) kaum Rebound-Effekte auftreten und Rebound-Effekte somit überschätzt würden.

12.6.3 Anknüpfende Forschungsfragen und Modellerweiterungen

Verschiedene Erweiterungsmöglichkeiten wurden in der bisherigen Diskussion bereits erwähnt, so etwa die sektorale Erweiterung des Modells, um sektorspezifische Aussagen treffen zu können und um auf Ebene der Abhängigkeiten von Vorprodukten technologische Entwicklung implementieren zu können. Eine Kombination dieses Modells mit dem vorherigen Input-Output-Modell erscheint denkbar, um technologische Anpassungsmöglichkeiten von Anfang an zu berücksichtigen.

Eine andere Frage ergibt sich aus der Diskussion der weiteren begleitenden Maßnahmen, wie bspw. technologiepolitischer Maßnahmen, die im vorliegenden Modell nicht untersucht wurden. Staatliche Subventionen, welche über die THG-Steuer finanziert werden, könnten ein weiteres Szenario bilden (vgl. Rengs et al., 2015). Diese Subventionen könnten zusätzliche Anreize bieten, im Möglichkeitsraum der technologischen Entwicklung eher die Varianten hoher THG-Reduktionen zu wählen oder ggf. den Möglichkeitsraum zu erweitern. Eine solche Erweiterung könnte sich als relevant und praktikabel erweisen, da es in die aktuelle Modellstruktur passt und staatliche direkte Subventionen effektiv sein könnten (vgl. Amendola et al., 2024).

Im vorliegenden Modell wurden die Anreize für Investitionen nicht untersucht. Es stellt sich die Frage, ob bzw. inwiefern diese von den veränderten Anreizen durch die Einführung einer ÖSR beeinflusst werden. Auf Modellebene müssten hierfür die Investitionen in F&E zunächst einen Preis bekommen bzw. die Investitionen in Kapital mit dem Ausmaß der möglichen technologischen Entwicklung verknüpft werden. Die Frage nach dem Ausmaß der Investitionen ist der eine Aspekt, mit der Frage nach der Richtung verschiedener Investitionsmöglichkeiten könnte ein weiterer Aspekt hinzugenommen werden. Hiermit könnten die veränderten Anreize durch die ÖSR auf Ebene der Investitionsmöglichkeiten untersucht werden. Konkret könnten zwei Investitionsmöglichkeiten für zwei Technologien implementiert werden: Eine günstigere Variante zum Erhalt der bisherigen Technologie und zur Reduktion der Produktionskosten („braune Technologie“) und eine andere, teurere Investitionsmöglichkeit zur Emissionsreduktionen („grüne Technologie“). Es könnten auf Grundlage der Kostenanreize unterschiedliche Reformen untersucht werden, um günstige Szenarien zur Emissionsreduktion zu eruieren.

Schließlich stellt sich auch die Frage, wie die Erwartungsbildung auf Haushaltsebene die technologische Entwicklung beeinflussen könnte, da die Haushalte im vorliegenden Modell versuchen, ihr vollständiges Einkommen auszugeben. Die Erwartungsbildung könnte adressiert insgesamt werden, denn im Modell werden auch auf Unternehmensebene Erwartungen mit wenig Unsicherheit modelliert, da lediglich die Preisentwicklungen der nächsten Periode berücksichtigt werden. Hier könnte eine Erweiterung ansetzen, um fundamentale Unsicherheit der Agent:innen zu implementieren (vgl. Poledna et al., 2023, S. 6). Diese Erwartungsbildungen spielen bei den Fragen eine wichtige Rolle, wie konjunk-

turelle Aspekte die technologische Entwicklung beeinflussen oder welche Relevanz langfristige Steuerfahrpläne gegenüber kurzfristigeren Reformen mit wenig Vorbereitungsphase haben. Methodisch könnten diese Unsicherheiten mittels Autoregressionen umgesetzt werden (Poledna et al., 2023, S. 2f).

12.6.4 Fazit

Für zukünftige Reformen, ob mit oder ohne Berücksichtigung des Produktionsfaktors Arbeit, erscheint die Lenkung der technologischen Entwicklung möglich und sinnvoll zu sein. Die Vergünstigung des Faktors Arbeit findet sich in den aktuellen Debatten nicht ausdrücklich wieder und die Idee der ÖSR scheint marginalisiert.

Zwar gibt es Bemühungen von arbeitgebernahen Verbänden, die Produktionskosten insgesamt niedrig zu halten.²⁰² Dennoch spielt die Möglichkeit, Unternehmen über die Senkung bzw. staatliche Finanzierung der Sozialversicherungsbeiträge zu entlasten kaum eine Rolle. Doch die Modellierung zeigt, dass diese Möglichkeit lohnend sein kann. Da damit insgesamt Kosten gesenkt werden, wäre auf unternehmerischer Seite grundsätzlich Unterstützung zu erwarten – der Wettbewerbsdruck durch die gestiegenen Energiepreise liefert genug Argumente dafür. Der Nutzen im Sinne der ökologischen Reform wäre allerdings der, dass damit gemäß den Modellierungsergebnissen, zusätzlich THG-Emissionen eingespart werden können. THG-Emissionen werden zwar nicht in absoluten Zahlen teurer, etwa im Vergleich mit dem Ökobonus, aber die relativen Kosten für THG-Emissionen erhöhen sich gegenüber Arbeit und führen zu einer zusätzlichen Lenkung zugunsten der Emissionsreduktionen und des Klimas.

Bei einer Entlastung des Produktionsfaktors Arbeit etwa über den Arbeitgeberanteil der Sozialversicherungsbeiträge reduzieren sich bei Einhaltung der Schuldenbremse die finanziellen Spielräume des Staates. Nicht nur aus diesen Gründen, gilt es die Reform in einen größeren Kontext zu setzen, in dem verschiedene Maßnahmen in Bündeln diskutiert werden, damit neben den ökologischen Zielen auch die Branchen mit ihren jeweiligen Besonderheiten im Einzelnen oder die Einkommensverteilung der Haushalte berücksichtigt werden können. Denn die Modellierung dieses Kapitels gibt Indizien, dass die Erhöhung der THG-Steuer allein nicht ausreichend ist – selbst in Höhe von 400 EUR/t CO₂e.

²⁰² Beispielsweise fordert Siegfried Russwurm, Präsident des Bundesverbands der Deutschen Industrie (BDI), Entlastungen für Unternehmen, um wettbewerbsfähig bleiben zu können und um nicht „nach hinten durchgereicht“ zu werden. Siehe Tagesschau: <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/bdi-klimakongress-industrie-100.html> (14.03.2024).