

Monatsbericht

April 2024

76. Jahrgang
Nr. 4

Energieeffizienzgewinne: Folgen für CO₂-Emissionen und Wirtschaftsleistung in Deutschland

Um dem Klimawandel zu begegnen, hat sich Deutschland zum Ziel gesetzt, seine Treibhausgasemissionen bis 2030 stark zu senken. Es besteht Einigkeit darüber, dass dafür neben dem Umstieg auf CO₂-arme Energieträger auch der Energieverbrauch reduziert werden muss. Die CO₂-Bepreisung ist ein Hauptinstrument der Klimapolitik, um den Klimakosten des fossilen Energieverbrauchs besser Rechnung zu tragen und Anreize zu setzen, diesen einzuschränken. Energieeffizienzsteigerungen könnten dazu beitragen, den Energieverbrauch ohne gesamtwirtschaftliche Produktionseinbußen zu senken. Sie bedeuten, dass die gleiche Menge unter sonst gleichen Bedingungen mit weniger Energieeinsatz produziert werden kann, oder dass mit der bisher genutzten Energie mehr produziert werden kann.

In den letzten drei Jahrzehnten stieg die gesamtwirtschaftliche Energieeffizienz in Deutschland, gemessen am energiesparenden technologischen Fortschritt, laut Schätzungen um 2,8 % pro Jahr. Allerdings stieg die Energieeffizienz in den einzelnen wirtschaftlichen Sektoren sehr unterschiedlich.

Anhand von Modellsimulationen kann abgeschätzt werden, inwieweit Energieeffizienzsteigerungen die Emissionen mindern und die Wirtschaftsaktivität anregen können. Sie erlauben zudem, die Rolle des CO₂-Preises für die Produktionskosten und die damit verbundene Aktivitätsdämpfung und Emissionseinsparung zu simulieren. Es ist zu vermuten, dass eine ambitionierte CO₂-Bepreisung auch Anreizeffekte für Effizienzsteigerungen setzt und so stärkere Emissionseinsparungen verursacht. Dies wiederum könnte dämpfend auf den CO₂-Preis zurückwirken. Solche wichtigen Wechselwirkungen zwischen CO₂-Preis und Effizienzverbesserungen können mit dem vorhandenen Analyserahmen noch nicht abgebildet werden. Sie würden die Kernaussagen der Analyse jedoch nicht grundlegend ändern.

Demnach senken Energieeffizienzsteigerungen die gesamtwirtschaftliche Energieintensität und begünstigen die gesamtwirtschaftliche Produktion. Sie wirken auch aktivitätsdämpfenden Beiträgen entgegen, die zumindest vorübergehend von der Verteuerung von CO₂-Emissionen ausgehen dürften. Ein stärkerer energiesparender technologischer Fortschritt würde auch eine striktere Ausrichtung der Klimapolitik, wie etwa einen höheren CO₂-Preis, erleichtern. Energieeffizienzsteigerungen sind also ein wichtiger Faktor, um die Klimaziele zu erreichen.

Ohne Änderungen am geplanten CO₂-Preispfad und bei Fortschreibung der Energieeffizienzsteigerungen der letzten 30 Jahre erreicht die Emissionsminderung laut den Simulationsergebnissen nicht die politisch gesteckten Ziele. Die Analysen legen nahe, dass sich der energiesparende technische Fortschritt, auch in Antwort

auf die ergriffenen klimapolitischen Maßnahmen, erheblich verstärken müsste, um die geplante Emissionseinsparung zu erreichen.

Es zeigt sich auch, dass die Emissionsziele beispielsweise durch einen stärkeren Anstieg des CO₂-Preises erreichbar sind. Dabei hängt es unter anderem von der Stärke des energiesparenden technologischen Fortschritts ab, mit welchen Produktionsverlusten oder -gewinnen dies einhergeht. Ein höherer CO₂-Preis dürfte nicht zuletzt die Anreize für solche Fortschritte stimulieren.

1 Energieeffizienz im Kontext von Klimapolitik

Die geplanten Einsparungen der Treibhausgasemissionen in Deutschland laufen über mehrere Wege. Laut dem Bundesklimaschutzgesetz müssen in Deutschland bis 2030 noch circa 35 % der Treibhausgasemissionen gegenüber 2023 eingespart werden.^[1] Die angestrebte Emissionsminderung liegt über den Einsparzielen der Europäischen Kommission für die EU.^[2] Für die Eindämmung der Treibhausgasemissionen sind die Besteuerung von Emissionen (CO₂-Preis) oder Investitionen in erneuerbare Energien und kohlenstoffarme Technologien wichtige Instrumente. Steigerungen der Energieeffizienz erleichtern es, die Klimaziele zu erreichen (Internationale Energieagentur (2023), Weltklimarat (2018)). So bieten Steigerungen der Energieeffizienz die Möglichkeit, ein gegebenes Produktionsniveau mit einem niedrigeren Energieeinsatz oder ein höheres Produktionsniveau bei einem gegebenen Energieeinsatz zu erreichen.^[3] Auch die Beschlüsse der 28. Weltklimakonferenz der Vereinten Nationen (COP 28) in Dubai im Dezember 2023 hoben dies hervor.

Die CO₂-Bepreisung ist ein sinnvolles Instrument zur wirksamen Emissionsenkung. Für sich genommen erhöht die CO₂-Bepreisung unter sonst gleichen Bedingungen die Kosten für den Einsatz fossiler Energie. Dies kann kurzfristig zu Produktionsverlusten führen.^[4] Langfristig dürfte die Transition zu einem globalen Netto-Null-Kohlenstoffausstoß jedoch zu einer höheren gesamtwirtschaftlichen Produktion führen als ein Szenario ohne jegliche klimapolitische Maßnahmen, da potenzielle, durch den Klimawandel bedingte Schäden vermieden würden.^[5]

Energieeffizienzsteigerungen hängen über den Energieverbrauch unmittelbar mit geringeren Treibhausgasemissionen zusammen. Eine effizientere Nutzung von Energie senkt unter sonst gleichen Bedingungen den Energieverbrauch und dadurch die Emissionen. Somit ist die Energieeffizienz für die Begrenzung von Treibhausgasemissionen ein Schlüsselfaktor. Energieeffizienzsteigerungen lenken den Blick auf eine zusätzliche Komponente: den energiesparenden technologischen Fortschritt. Da er das BIP-Wachstum stärkt, spielt er beim angestrebten Übergang zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft eine wichtige Rolle.

Zwischen CO₂-Bepreisung und energiesparendem technologischen Fortschritt gibt es Wechselwirkungen, die im hier gewählten Modellrahmen bislang nicht unmittelbar abgebildet werden können. Da ein höherer CO₂-Preis tendenziell den Energieeinsatz verteuert, haben Unternehmen bei steigenden CO₂-Preisen ein erhöhtes Interesse daran, energiesparende Technologien schneller zu entwickeln und einzusetzen.^[6] Dies steigert den Effekt der CO₂-Bepreisung auf die Emissionsminderungen.^[7] Gleichzeitig könnte eine stärkere Minderung der Emissionen auf den CO₂-Preis zurückwirken. Allerdings sind empirische Befunde zur Stärke des Einflusses von CO₂-Bepreisung auf Energieeffizienzsteigerungen rar.^[8] Im Folgenden wird ein Modellrahmen verwendet, in welchem die Energieeffizienzsteigerungen exogen sind. Sie werden in dem Modell nicht direkt von makroökonomischen Entwicklungen oder wirtschaftspolitischen Maßnahmen wie einem CO₂-Preis beeinflusst. Stattdessen werden auf Basis von Annahmen Szenarien zu verschiedenen Verläufen von Energieeffizienz und Emissionsbepreisung spezifi-

ziert. Dies zeigt die beiden Triebkräfte der Emissionsminderung isoliert klarer, lässt allerdings vermutlich wichtige Wechselwirkungen zunächst unberücksichtigt.

Im Folgenden wird untersucht, wie Energieeffizienzsteigerungen in Verbindung mit dem CO₂-Preisfad zur Emissionsminderung bis 2030 beitragen können und welche gesamtwirtschaftlichen Folgen sich daraus ergeben. Simulationen mit dem in der Bundesbank entwickelten Mehrsektoren-Umwelt-DSGE-Modell EMuSe können hierüber Aufschluss geben.^[9] Dazu werden sowohl die aus heutiger Sicht absehbare Verteuerung fossiler Energie durch den geplanten CO₂-Preisfad als auch Energieeffizienzsteigerungen gemäß der historischen Entwicklungen in das Modell eingespeist.^[10] Simulierte Änderungen beider Pfade ermöglichen es, abzuschätzen, wie sehr sie jeweils zur Emissionsminderung bis zum Jahr 2030 beitragen und welche Auswirkungen sie bis dahin auf die gesamtwirtschaftliche Produktion haben.

Insbesondere stellt sich die Frage, ob die deutschen Emissionsminderungsziele mit dem geplanten CO₂-Preisfad bei einem unveränderten Pfad der Energieeffizienzsteigerungen erreicht werden können. Sowohl der CO₂-Preisfad des nationalen als auch derjenige des europäischen Emissionshandelssystems tragen zur Reduktion von Emissionen bei. Offen ist, wie nah die Emissionen unter dem Status quo der CO₂-Preisfaden ihrem Zielwert kommen. Anhand von Alternativszenarien kann eingeschätzt werden, welche Anpassungen des Emissionspreises oder welche zusätzlichen Steigerungen der Energieeffizienz gegebenenfalls nötig wären, um die Emissionsminderungsziele zu erreichen. Dies gibt auch Hinweise darüber, wie stark die Anreizwirkungen klimapolitischer Maßnahmen, wie etwa dem CO₂-Preis, sein müssten, um die für die geforderte Emissionsminderung notwendigen Energieeffizienzsteigerungen zu generieren.

2 Die Bedeutung von Energieeffizienz und ihr Zusammenhang mit der Energieintensität

Der Zusammenhang zwischen Emissionseinsparungen und geringerem Energieverbrauch ist recht eindeutig. Da Treibhausgasemissionen durch die Verbrennung fossiler Energieträger entstehen, muss für die Eindämmung der Emissionen der fossile Energieverbrauch fallen. Durch Effizienzgewinne bei der Nutzung von Energie fällt der Energieverbrauch für ein gegebenes Produktionsniveau geringer aus. Somit könnten niedrigere Emissionen ohne Produktionsverluste erreicht werden.^{[11][12]}

Aus produktionstheoretischer Sicht bezeichnet der Begriff der Energieeffizienzsteigerungen den energiesparenden technologischen Fortschritt. Im Rahmen einer herkömmlichen Produktionsfunktion geht Energieeffizienz als technologische Variable ein, ähnlich wie die Totale Faktorproduktivität. Allerdings ist diese Art der Technologie an den Einsatz von Energie gekoppelt. Für die Unternehmen bedeutet energiesparender technologischer Fortschritt, dass sie bei der Produktion Energie mit einer höheren Effektivität nutzen. Beispiele hierfür sind neue Maschinen, die weniger Strom bei gleicher Leistung benötigen oder die Weiterverwertung der durch die Nutzung fossiler Energie entstandenen Wärme für Produktionsprozesse. In diesen Fällen wird so für ein gegebenes Produktionsniveau der Primärenergieverbrauch gesenkt. Das Hauptaugenmerk bei Energieeffizienz im Sinne des technologischen Fortschritts richtet sich also auf die Effektivität der Energienutzung bei der Produktion.

Aus gesamtwirtschaftlicher Sicht bezieht sich Energieeffizienz häufig auf die Energieintensität, also das Verhältnis des gesamtwirtschaftlichen Energieverbrauchs zum BIP. Insbesondere die Beschlüsse der COP 28 hinsichtlich Energieeffizienz stellen auf die Energieintensität ab. Wenn in diesem Fall von einer Steigerung der Energieeffizienz gesprochen wird, ist damit eine geringere Energieintensität gemeint. Folglich geht es nicht ausschließlich um die Effektivität, mit der Energie genutzt werden kann, sondern allgemein um die Reduktion des Energieverbrauchs relativ zur Produktion. Dabei ist die Quelle dieser Verschiebung für die Bestimmung der Energieintensität nicht maßgeblich. Diese Größe ist also keine technologische Variable, sondern eine beobachtbare Messgröße für Energieeffizienz.

Veränderungen der gesamtwirtschaftlichen Energieintensität spiegeln nicht zwangsläufig Änderungen der Energieeffizienz im Sinne des technologischen Fortschritts wider. Zum Beispiel kann es durch sektorale Verschiebungen zu einer Reduktion der gesamtwirtschaftlichen Energieintensität kommen, ohne dass innerhalb der Produktionsprozesse Effizienzgewinne beim Energieeinsatz generiert wurden. Dies geschieht etwa, wenn der Dienstleistungssektor gegenüber energieintensiveren Wirtschaftszweigen an Gewicht gewinnt. Ein anderer Faktor, der zur Reduktion der Energieintensität durch eine geringere Energienutzung führen kann, ist die Substitution der Energie durch andere Güter im Produktionsprozess.^[13] Dennoch ist Energieeffizienz im Sinne der energiesparenden Technologie

eng mit der Energieintensität verbunden. Energiesparender technologischer Fortschritt heißt, dass bei gleichbleibender Produktion weniger Energie verwendet wird. Folglich sinkt die Energieintensität. Somit kann der energiesparende technologische Fortschritt zu niedrigerer Energieintensität führen, aber eine Reduktion der Energieintensität setzt nicht zwangsläufig eine Steigerung des energiesparenden technologischen Fortschritts voraus.

3 Energieeffizienzsteigerungen in Deutschland

Um die Größenordnung möglicher zukünftiger Energieeffizienzsteigerungen einzuschätzen, hilft ein Blick auf die Entwicklung der Energieeffizienzsteigerungen der letzten Jahrzehnte. Dies gibt Hinweise darauf, welches Tempo der Energieeffizienzsteigerung in unterschiedlichen Wirtschaftsbereichen basierend auf der Vergangenheit zukünftig erreicht werden könnte.

Mithilfe eines produktionstheoretischen Ansatzes können die Energieeffizienzsteigerungen im Sinne des energiesparenden technologischen Fortschritts der letzten drei Jahrzehnte bestimmt werden. Die Formulierung einer Produktionsfunktion mit einem energiespezifischen technologischen Fortschritt ermöglicht es, die verfügbaren Daten in eine Struktur zu bringen, um den energiesparenden Fortschritt zu berechnen (vgl. auch die Ausführungen zur Messung des energiesparenden technologischen Fortschritts).^[14] Energieeffizienzsteigerungen können so auch für die verschiedenen Sektoren einer Volkswirtschaft ermittelt werden. Darauf aufbauend können sowohl der gesamtwirtschaftliche Trend als auch sektorale Besonderheiten analysiert werden. Hier werden Energieeffizienzsteigerungen für zehn Sektoren basierend auf der europäischen Systematik der Wirtschaftszweige für die Jahre 1991 bis 2019 berechnet.^[15]

Messung des energiesparenden technologischen Fortschritts

Eine maßgebliche Triebkraft gesamtwirtschaftlicher Energieeinsparungen sind Verbesserungen der energiesparenden Technologie im Produktionsprozess. Das Niveau der energiesparenden Technologie gibt an, wie effizient Energie im Produktionsprozess eingesetzt wird. Die energiesparende Technologie ist keine beobachtbare Größe und muss folglich geschätzt werden. Die Bezifferung der energiesparenden Technologie und ihrer Veränderung im Zeitablauf ist wichtig, um ihren Beitrag zur Entwicklung von Produktion und Emissionen zu bestimmen.

Die energiesparende Technologie kann mithilfe eines produktionstheoretischen Ansatzes ermittelt werden.^[1] Einer theoretischen Produktionsfunktion zufolge werden Produktionsfaktoren miteinander kombiniert, um den Output herzustellen. Die Wirkung des Einsatzes der einzelnen Produktionsfaktoren hängt dabei auch von deren Effizienzgrad ab. Um Energieeffizienzverbesserungen auf der sektoralen Ebene abzuschätzen, fließt in den vorliegenden Rechnungen die sektorale Produktionsstruktur von EMuSe ein. Im Modellrahmen von EMuSe hängt die Produktion ($y_{s,t}$) in Sektor s zum Zeitpunkt t von den Einsatzfaktoren

Arbeit ($N_{s,t}$) und Kapital ($K_{s,t}$) sowie den Vorleistungen ($H_{s,t}$) ab:

$$y_{s,t} = \left(K_{s,t}^{1-\alpha_{N,s}} N_{s,t}^{\alpha_{N,s}} \right)^{1-\alpha_{H,s}} H_{s,t}^{\alpha_{H,s}}$$

Die Vorleistungen setzen sich aus Energie- ($E_{s,t}$) und Nichtenergievorleistungen ($NE_{s,t}$) zusammen:

$$H_{s,t} = \left[\alpha_{NE,s}^{1-\sigma_H} NE_{s,t}^{\sigma_H} + (1 - \alpha_{NE,s})^{1-\sigma_H} (\epsilon_{s,t} E_{s,t})^{\sigma_H} \right]^{\frac{1}{\sigma_H}}$$

Die Parameter $\alpha_{N,s}$, $\alpha_{H,s}$ und $\alpha_{NE,s}$ in beiden Gleichungen geben Auskunft darüber, wie sensibel die Produktion auf Änderungen bezüglich der einzelnen Produktionsfaktoren reagiert.^[2] Der Parameter σ_H gibt an, wie leicht sich Energie- durch Nichtenergievorleistungen ersetzen lassen.^[3] Die Variable $\epsilon_{s,t}$ beschreibt das Technologieniveau, das die Effizienz von Energie im Produktionsprozess beeinflusst. Ein Anstieg von $\epsilon_{s,t}$ kann dabei als energiesparender technologischer Fortschritt interpretiert werden.

Ausgehend von dem produktionstheoretischen Ansatz lassen sich von beobachtbaren Größen Schlüsse auf die nicht beobachtbare energiesparende Technologie ziehen. Den Überlegungen zufolge besteht ein Zusammenhang zwischen der energiesparenden Technologie und den relativen Entwicklungen von Vorleistungsgütern und Energieverbrauch sowie dem Energiekostenanteil der Produktion. Dabei liegt die Annahme zugrunde, dass auf Güter- und Faktormärkten vollkommener Wettbewerb herrscht.^[4] Steigt der preisbereinigte Energieverbrauch langsamer als der preisbereinigte Vorleistungsgütereinsatz, spricht das für sich genommen für eine Steigerung der energiesparenden Technologie, also einen effizienteren Einsatz der Energie im Produktionsprozess. Zudem ist ein höherer Anteil der Energiekosten am Produktionswert laut Modell mit einem Rückgang der energiesparenden Technologie verbunden.^[5] Solch ein Rückgang kann beispielsweise durch organisatorische Veränderungen innerhalb von Unternehmen entstehen, welche die Effizienz des Energieeinsatzes in der Produktion verringern.

Ergebnisse für die Entwicklung der energiesparenden Technologie zwischen 1991 und 2019 lassen sich auf Basis sektoraler Daten von Destatis berechnen.

Angaben für den Produktionswert und die Vorleistungen (inklusive der zugehörigen Preisindizes) kommen aus den Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen. Angaben zu den Energiekosten stammen aus der Input-Output-Rechnung. Die Umweltökonomische Gesamtrechnung stellt Daten zum sektoralen Energieverbrauch zur Verfügung. Der sektorale Energiepreis (Kosten pro verbrauchter Einheit Energie) wird berechnet, indem die sektorspezifischen Energiekosten in Relation zum

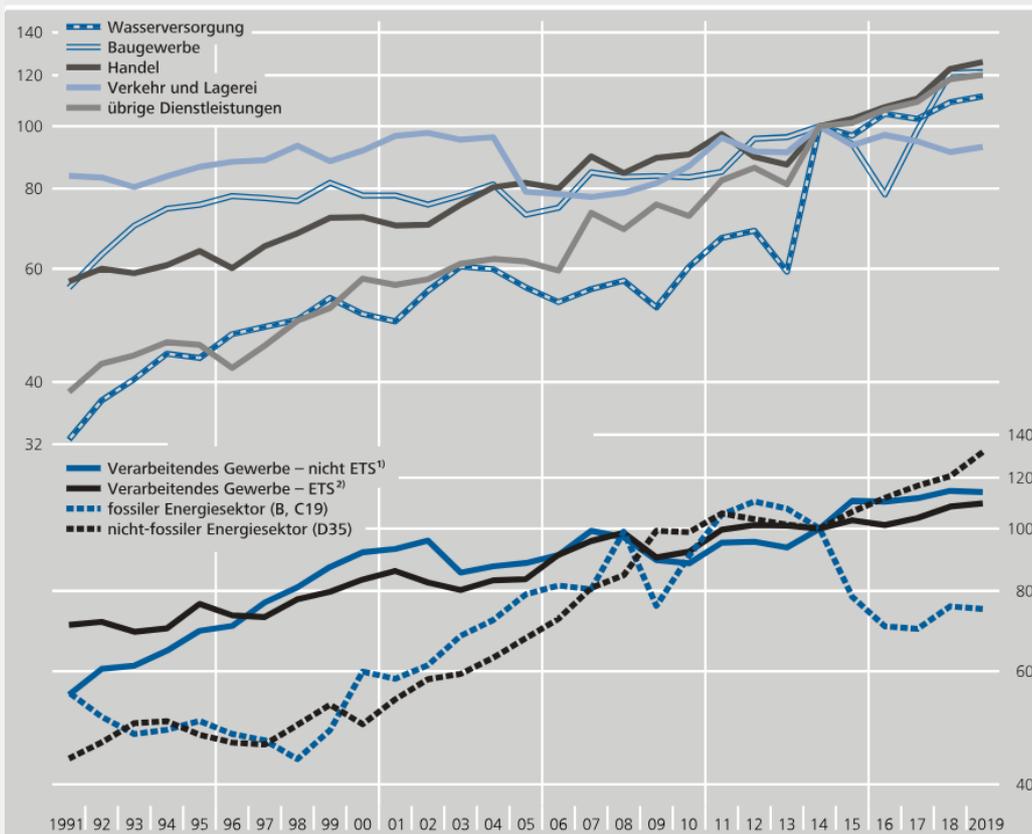
Energieverbrauch gesetzt werden. Aus diesen Angaben lässt sich die energiesparende Technologie für die Jahre 1991 bis 2019 berechnen.^[6]

Neben dem modell- beziehungsweise produktionstheoretischen Ansatz gibt es alternative Methoden, Energieeffizienzänderungen zu messen. In der empirischen Literatur werden Energieeffizienzshocks auch mittels struktureller Vektorautoregressionen (SVAR) identifiziert.^[7] Beispielsweise interpretieren Jo und Karzinoва (2021) Energieeffizienzsteigerungen als ökonomische Schocks, die eine gegenläufige Bewegung von BIP und Emissionen hervorrufen.^[8] Allerdings lassen sich in diesem Analyserahmen – im Gegensatz zum produktionstheoretischen Ansatz – keine historischen Trendentwicklungen bei der Energieeffizienz untersuchen. Zudem sind die mithilfe des produktionstheoretischen Ansatzes berechneten Energieeffizienzsteigerungen konsistent mit der Produktionsstruktur im EMuSe Modell, das zur Analyse von Energieeffizienzsteigerungen im Haupttext verwendet wird.

Sektorale Entwicklung der Energieeffizienz in Deutschland¹⁾

Schaubild 3.1

2014 = 100, log. Maßstab



Quelle: Eigene Berechnungen anhand des produktionstheoretischen Ansatzes von Hassler et al. (2021) basierend auf der Produktionsfunktion aus dem in der Bundesbank entwickelten Mehrsektoren-Umwelt-DSGE-Modell EMuSe. * Sektoren gemäß NACE-Klassifikation. Die sektorspezifische Energieeffizienz entspricht dem sektoralen energiesparenden Technologieniveau. 1 Bereiche des Verarbeitenden Gewerbes, die nicht unter das europäische Emissionshandelssystem (ETS) fallen. 2 ETS-Bereiche ohne den Sektor C19 (C17, C20, C23, C24).

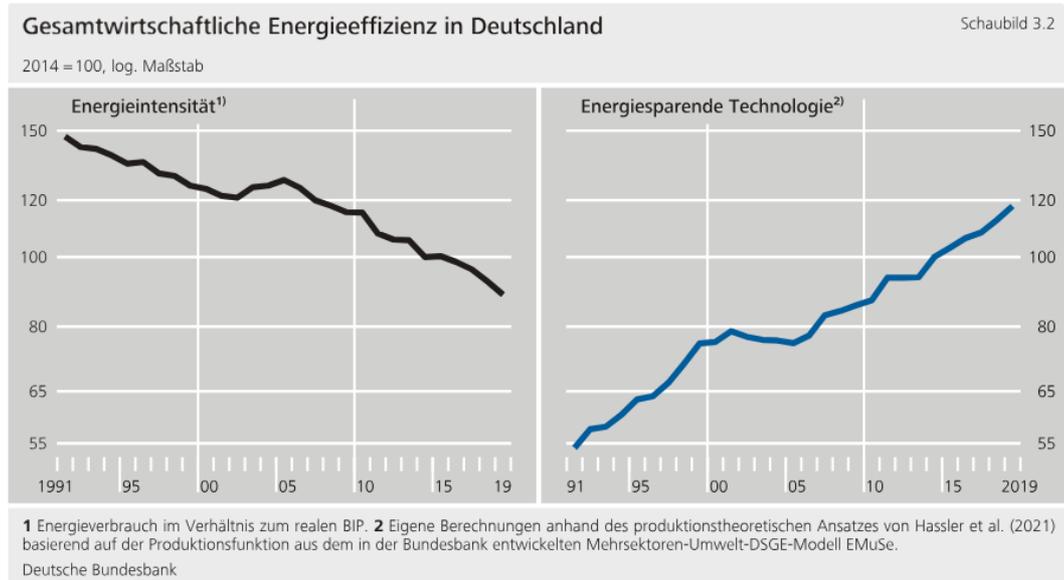
Deutsche Bundesbank

1. Vgl.: Hassler et al. (2021). Auch die Gemeinschaftsdiagnose (2022, 2023) berechnet die energiesparende Technologie für Deutschland mittels eines Ein-Sektoren-Modells, welches eine andere Produktionsstruktur als EMuSe hat. Die energiesparende Technologie kann ähnlich zum Solow-Residuum als Restgröße berechnet werden. Hierzu dienen die Faktornachfragefunktionen für Energie und Vorleistungsgüter allgemein. Diese Gleichungen ergeben sich aus dem Optimierungsproblem der Unternehmen.
2. Der Parameter $\alpha_{H,s}$ entspricht der Produktionselastizität der Vorleistungen und dem langfristigen Anteil des Produktionsfaktors H an der Produktion in Sektor s . Die Produktionselastizität der Arbeit entspricht hingegen $(1 - \alpha_{H,s})\alpha_{N,s}$ und dem langfristigen Anteil des Faktors Arbeit an der Produktion in Sektor s . Der Parameter $\alpha_{NE,s}$ wiederum entspricht dem langfristigen Anteil an Nichtenergievorleistungsgütern an den gesamten verwendeten Vorleistungsgütern in Sektor s .
3. Für negative Werte von σ_H sind Energie- und Nichtenergievorleistungsgüter in der Produktion schwer ersetzbar, während sie bei positiven Werten leicht austauschbar sind.
4. Im Rahmen einer mittelfristigen Analyse der Auswirkungen von technologischem Fortschritt auf die Realwirtschaft ist vollständiger Wettbewerb auf Faktor- und Gütermärkten eine Standardannahme. Vgl. zum Beispiel: Hassler et al. (2021).
5. In den Rechnungen gilt annahmegemäß $\sigma_H = -9$, basierend auf Erkenntnissen der empirischen Literatur (Atalay (2017), Barrot und Sauvagnat (2016) sowie Boehm et al. (2019)).
6. Die Input-Output-Tabellen sind bis 2020 verfügbar. Da 2020 stark durch Pandemieeffekte beeinflusst ist, wird die energiesparende Technologie in diesem Fall nur bis 2019 berechnet.
7. Vgl.: Bruns et al. (2021) sowie Jo und Karnizova (2021).
8. Diese Definition ist nicht trennscharf, da es auch ohne Energieeffizienzsteigerungen möglich ist, die Emissionen zu senken, ohne das BIP zu belasten. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn sich der Energiemix hin zu emissionsärmeren oder nichtfossilen Energien verschiebt. Bruns et al. (2021) lassen den Energieverbrauch als Variable in die Schätzung einfließen, um Energieeffizienzshocks verlässlicher abzuschätzen. Allerdings werden Emissionen in deren Analyse nicht als weitere Variable in der Schätzung berücksichtigt. Dadurch lassen sich keine Rückschlüsse auf die Auswirkungen von Energieeffizienzsteigerungen auf Emissionen treffen.

Insgesamt stieg die Energieeffizienz in den letzten drei Jahrzehnten kontinuierlich an, mit allerdings teilweise erheblichen Unterschieden zwischen den Sektoren. Im Ergebnis hat sich das Niveau der energiesparenden Technologie in Deutschland in diesem Zeitraum mehr als verdoppelt. Gesamtwirtschaftlich stieg sie um knapp 2,8 % pro Jahr.^[16] Über die verschiedenen Wirtschaftsbereiche variierte ihre jährliche Steigerung im Zeitraum 1991 bis 2019 zwischen ½ % und 5 %. Die größten Energieeffizienzgewinne erreichte der Sektor der Wasserversorgung. Aber auch der übrige Dienstleistungssektor und der Sektor für Strom- und Gasversorgung steigerten ihre Energieeffizienz deutlich. Hingegen waren die Energieeffizienzgewinne im Sektor Verkehr und Lagerei und im fossilen Energiesektor gering. Seit 2012 ging der energiesparende technologische Fortschritt im fossilen Energiesektor sogar zurück. Im Verlauf veränderte sich zudem die Rangfolge. Während der Sektor Verkehr und Lagerei in den späten 1990er Jahren noch starke Energieeffizienzgewinne im Vergleich zum übrigen Dienstleistungssektor und dem Verar-

beitenden Gewerbe verzeichnete, konnten die beiden letztgenannten Sektoren nach 2014 überholen.

Der Fortschritt bei der energiesparenden Technologie schlug sich nicht im gleichen Maße in verringerter Energieintensität nieder.^[17] Zwischen 1991 und 2019 sank die Energieintensität in Deutschland zwar kontinuierlich. Allerdings verminderte sie sich lediglich um knapp 2 % pro Jahr. Ein Grund hierfür dürften Rebound-Effekte sein.^[18] Insgesamt kam es zu einem Rückgang um 40 %.



4 Die Bedeutung von Energieeffizienz aus dem Blickwinkel des Modells EMuSe

Grundsätzlich lässt sich die Bedeutung von Energieeffizienz mit verschiedenen Modelltypen analysieren. Zum einen können die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen von Energieeffizienzsteigerungen mithilfe empirischer Ansätze wie beispielsweise struktureller Vektorautoregressionen (SVAR) ermittelt werden.^[19] Diese Ansätze haben den Vorteil, dass keine Annahmen bezüglich einer bestimmten Produktionsstruktur erforderlich sind. Allerdings sind auch in diesem Fall bestimmte Annahmen über den Zusammenhang der zugrunde liegenden Triebkräfte nötig, um Aussagen über die gesamtwirtschaftlichen Effekte treffen zu können. Zum anderen kommen modelltheoretische Ansätze wie allgemeine stochastische Gleichgewichtsmodelle (DSGE-Modelle) infrage. Der große Vorteil dieser Modellklasse gegenüber rein ökonometrischen Schätzverfahren ist, dass sie durch ihre Struktur unterschiedliche Wirkungskanäle der Ergebnisse gut beleuchten kann. Mit Blick auf die Fragestellung hier können neben der möglichen Analyse von Trendentwicklungen auch weitere Besonderheiten wie die sektorale Heterogenität, Verflechtungen bei der Produktion oder Emissionen berücksichtigt werden.^[20] Außerdem sind sie in der Lage, Mechanismen wirken zu lassen, die in der Vergangenheit schwach oder gar nicht ausgeprägt waren. Dies ist vor allem für die Wirkung des insbesondere seit 2021 deutlich angehobenen CO₂-Preises relevant.

Das in der Bundesbank entwickelte Modell EMuSe ist ein Mehrsektoren-Umwelt-DSGE-Modell. Mit EMuSe können insbesondere klimapolitische Anpassungsprozesse analysiert werden, und das Modell kann flexibel an den jeweiligen Untersuchungszweck angepasst werden. EMuSe wurde speziell dafür entwickelt, die Wechselwirkungen von Wirtschaft und Klimapolitik vergleichsweise detailliert und mit Blick auf den geldpolitisch relevanten Zeitraum zu untersuchen. Dieser ist typischerweise wesentlich kürzer als derjenige in den herkömmlichen Klimafolgenmodellen mit gesamtwirtschaftlichen Größen wie die Integrated Assessment Models (IAM).^[21]

Eine Besonderheit des Modells EMuSe ist, dass es Verflechtungen in der Produktion zwischen verschiedenen Wirtschaftszweigen enthält. Im EMuSe-Modell setzen die Unternehmen neben den Faktoren Kapital und Arbeit auch Vorleistungen für die Produktion ein. Diese können sie aus allen Branchen beziehen, wobei die verschiedenen Vorleistungen nur begrenzt substituierbar sind. Die Zusammensetzung der Vorleistungsgüterbündel variiert je nach Wirtschaftszweig. Wird zum Beispiel der CO₂-Preis wie gegenwärtig geplant nicht in allen Sektoren gleichzeitig erhoben oder hat ein Sektor einen höheren technologischen Fortschritt, hat dies nicht nur Auswirkungen auf den jeweiligen Sektor. Da die Güter als Vorleistungen in andere Sektoren einfließen, überträgt sich dies durch Relativpreisänderungen auf andere Sektoren. Außerdem enthält die Produktionsstruktur sektorspezifische Energie- und Nichtenergievorleistungsgüter. Somit ist auch der energiesparende technologische Fortschritt sektorspezifisch. Außerdem bildet das Modell die besondere Rolle von Energie in der Produktion ab, insbesondere aufgrund ihrer schwachen Substituierbarkeit mit Nichtenergievorleistungsgütern.^[22]

Das Modell enthält darüber hinaus Treibhausgasemissionen, die aus der Nutzung fossiler Energie entstehen.^[23]

Modellsimulationen mit EMuSe liefern Szenarien für den zukünftigen Verlauf der Emissionen und der Produktion bis 2030 unter verschiedenen Konstellationen von CO₂-Preispfad und Energieeffizienzsteigerungen.^[24] Diese Simulationen illustrieren Emissions- und Produktionsentwicklungen, die sich aus Sicht des Modells aus der Kombination einer trendmäßigen Fortschreibung der historischen Energieeffizienzsteigerungen sowie der CO₂-Bepreisung ergeben könnten. Darüber hinaus lässt sich so einschätzen, wie der CO₂-Preispfad und Energieeffizienzsteigerungen dazu beitragen, die gesetzten Klimaschutzziele zu erreichen.

Dabei ist zu betonen, dass der energiesparende technologische Fortschritt im Modellrahmen exogen ist. Er lässt sich in dem Modell nicht auf relative Preisänderungen oder wirtschaftspolitische Instrumente, beispielsweise Ausgaben für Forschung und Entwicklung, zurückführen. Dies betrifft auch die CO₂-Bepreisung, die in dem hier gewählten Modellrahmen die Entwicklung der energiesparenden Technologie nicht beeinflusst. Dabei wäre es grundsätzlich plausibel zu erwarten, dass mit steigendem CO₂-Preis auch die Anreize und der Ressourceneinsatz zur Steigerung der Energieeffizienz zunehmen. Somit dürfte der Einfluss des CO₂-Preises auf die Emissionseinsparungen tendenziell unterschätzt werden und eher eine Untergrenze der zu erwartenden Effekte darstellen. Andererseits ist zu beachten, dass in der vorliegenden Analyse die Effizienzverbesserungen kostenneutral eingespeist werden.^[25] Hier wird von einer detaillierten Modellierung dieser Zusammenhänge abgesehen, auch weil es schwierig abzuschätzen ist, wie und mit welchen Verzögerungen Ausgaben in Forschung und Entwicklung in energiesparende Technologien umgewandelt werden.^[26] Ein Vorteil der hier genutzten vereinfachten Modellierung liegt darin, dass sich besser bestimmen lässt, wie sich die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen einer Verteuerung von CO₂-Emissionen durch Energieeffizienzsteigerungen ändern können. Zudem lassen sich die jeweiligen Zugkräfte besser abgrenzen.^[27] Andere wirtschaftspolitische Maßnahmen als der CO₂-Preis, wie zum Beispiel ein verstärkter Ausbau erneuerbarer Energien, werden im Modell nicht betrachtet.

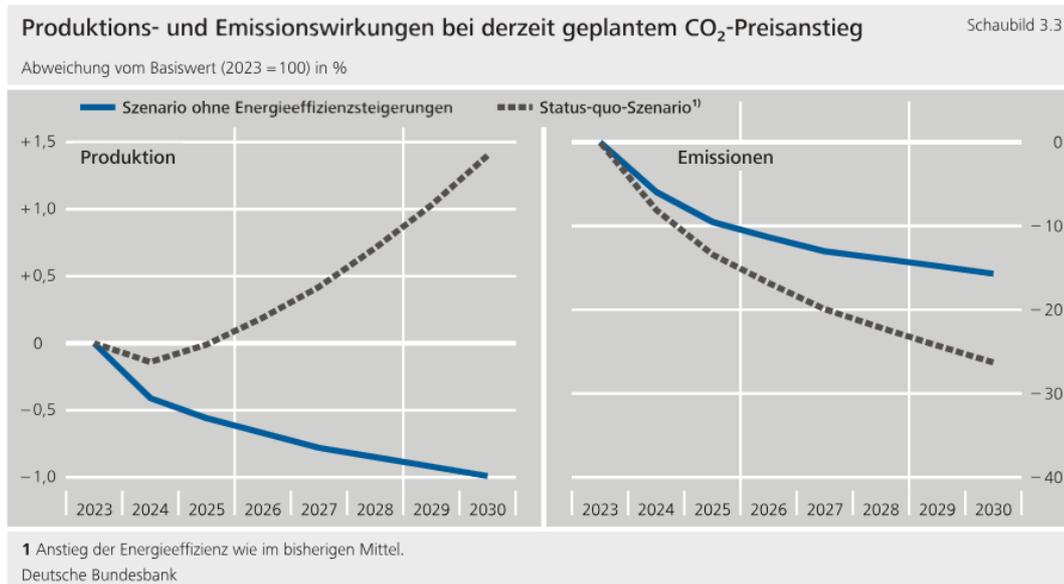
Ausgangspunkt der Überlegungen ist eine hypothetische Situation ohne Energieeffizienzsteigerungen. Dieses Szenario legt die Grundlage dafür, den Beitrag des CO₂-Preispfades zur Produktions- und Emissionsentwicklung von demjenigen der Energieeffizienzsteigerungen abzugrenzen. Der CO₂-Preispfad in dieser Modellvariante entspricht der aus heutiger Sicht geplanten Entwicklung des CO₂-Preises. Der CO₂-Preispfad gilt im Modell im Sektor Verkehr und Lagerei, im fossilen Energiesektor und in den energieintensiven Branchen des Verarbeitenden Gewerbes. Dies spiegelt die tatsächliche Abdeckung der Sektoren, die entweder im nationalen oder europäischen Emissionshandelssystem (EHS) einen CO₂-Preis zahlen müssen, wider.^[28] Im Modell werden die Einnahmen aus der CO₂-Bepreisung direkt und pauschal an die Haushalte zurückgegeben. Zu beachten ist, dass in den Simulationen lediglich der Beitrag des CO₂-Pfades zur Entwicklung der Emissionen und gesamtwirtschaftlichen Produktion betrachtet wird. Weitere Faktoren, wie die Entwicklung der Totalen Faktorproduktivität oder auch Energieeffizienzsteigerungen aufgrund des höheren CO₂-Preises, bleiben außen vor.

Laut den Simulationen reicht die Emissionsminderung allein aufgrund des aktuell geplanten CO₂-Preispfades nicht aus, um Emissionen und Energieintensität wie angestrebt zu drücken. Das Modell legt bis 2030 einen Rückgang der Emissionen um 15,7 % relativ zu 2023 nahe. Das Bundesklimaschutzgesetz sieht indes vor, dass weitere 19,2 % an Emissionen relativ zu 2023 eingespart werden müssten. Zudem verteuert sich in denjenigen Sektoren, in denen der Emissionspreis ansteigt, die Produktion. Durch die sektorale Verflechtung steigen auch die Produktionskosten der anderen Sektoren. Daher geht die Emissionsminderung im Vergleich zu einem Referenzszenario ohne CO₂-Bepreisung mit einem Produktionsrückgang einher.^[29] Der aktivitätsdämpfende Effekt der CO₂-Bepreisung fällt jedoch gering aus. Insgesamt sinkt die gesamtwirtschaftliche Erzeugung bis 2030 (bei sonst gleichen Bedingungen) lediglich um 1 %.^[30] Da der Emissionspreis den Energieverbrauch und die Produktion in ähnlichen Größenordnungen drosselt, bleibt die Energieintensität nahezu unverändert. Daher geht die Energieintensität in diesem Szenario nicht, wie in den COP 28-Beschlüssen angestrebt, stärker zurück als bisher. Diese Befunde sprechen keineswegs gegen die CO₂-Bepreisung. Sie ist im Modell durchaus eine wirksame Maßnahme zur Emissionsminderung.^[31] Laut Modellsimulationen ist der aktuell geplante CO₂-Preisfad für sich genommen jedoch nicht ausreichend, um die Klimaziele zu erreichen. Außerdem zeigt sich, dass sich die gesamtwirtschaftliche Energieintensität kaum verringert, wenn es nicht zusätzlich zu Energieeffizienzsteigerungen kommt.

In einem zweiten Szenario kommen im Modell zu dem aus heutiger Sicht geplanten CO₂-Preisfad Energieeffizienzsteigerungen hinzu. Diesem Szenario (Status-quo-Szenario) liegen die zu erwartende Entwicklung des CO₂-Preises und eine Fortschreibung der Energieeffizienzsteigerungen der Vergangenheit zugrunde. Die Ergebnisse sind also als Beiträge dieser beiden Größen zur gesamtwirtschaftlichen Emissions- und Produktionsentwicklung zu interpretieren und stellen keine BIP-Prognose dar. Die angenommene Steigerungsrate der Energieeffizienz in den Wirtschaftssektoren entspricht dabei der durchschnittlichen sektoralen Steigerungsrate der energiesparenden Technologie im Zeitraum 1991 bis 2019.^[32] Da der energiesparende technologische Fortschritt per Annahme exogen ist, sind diese Energieeffizienzgewinne kostenneutral. Die meisten Sektoren steigern in diesen Modellsimulationen ihre Produktion und verringern den Einsatz von Energie. Die Produktion wächst, aber die Emissionen sinken wegen des rückläufigen Energieeinsatzes. Dafür sorgen die Energieeffizienzsteigerungen. Kurzfristig dominiert zwar der dämpfende Einfluss des CO₂-Preispfades auf die Produktion. Im weiteren Verlauf legt der Wachstumsbeitrag der Energieeffizienzsteigerung jedoch zu, und die Produktion liegt 2030 um etwa 1½ % höher als ohne CO₂-Bepreisung und Energieeffizienzsteigerungen. Folglich kann der Übergang zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft, den die CO₂-Bepreisung auslöst, aktivitätsfördernd sein, sofern er mit Energieeffizienzsteigerungen einhergeht. Da zusätzlich zum CO₂-Preisfad die Energieeffizienz steigt, sinken die Emissionen stärker als ohne den Beitrag der Effizienzsteigerungen.^[33]

Auch die Emissionsreduktion im Status-quo-Szenario kommt nicht an die Zielvorgaben des Bundesklimaschutzgesetzes heran. Die Emissionen sinken in diesem Szenario um nahezu 26,3 %. Somit bleibt auch in diesem Szenario eine Lücke von fast 9 Prozentpunkten im Vergleich zu den Emissionseinsparungen bestehen, die bis 2030 vorgesehen sind. Die Energieintensität sinkt im Status-quo-Szenario

zwar beträchtlich, aber nicht so stark wie angestrebt. Sie geht bis 2030 im Durchschnitt um 2 % pro Jahr zurück. Die Minderung liegt damit unter dem von der COP 28 beschlossenen globalen Ziel von 4 %.



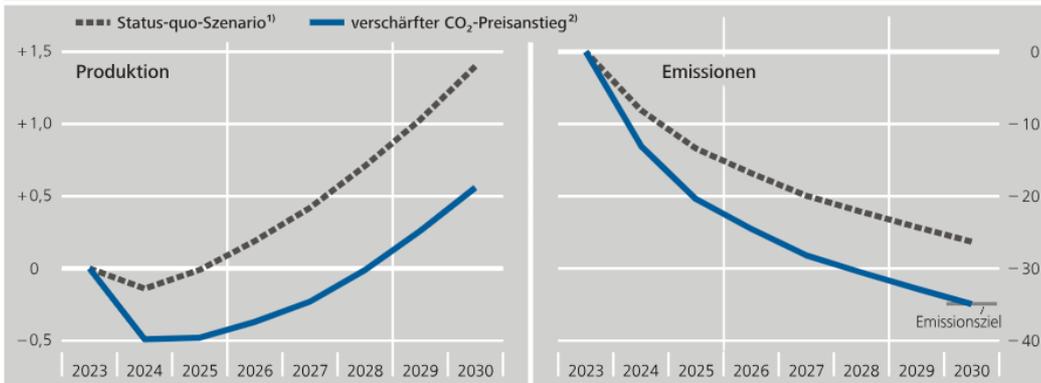
Nach diesen Modellrechnungen wäre also ein stärkerer Anstieg des CO₂-Preises als derzeit geplant notwendig, um die Emissionsziele des Bundesklimaschutzgesetzes zu erreichen. Die CO₂-Bepreisung senkt Emissionen im Modell sehr wirksam. Aber auch wenn man die Fortschreibung des Trends der Energieeffizienzsteigerungen mit ins Kalkül zieht, müsste sich der CO₂-Preispfad im gesamten Simulationszeitraum verdoppeln.^[34] Eine derartige Anhebung des CO₂-Preispfades würde für sich genommen gemäß den Modellsimulationen zwar für eine gewisse Zeit Produktionsverluste nach sich ziehen. Die steigende Energieeffizienz wirkt dem aber entgegen. Sie verbilligt den Energieeinsatz, und die Produktion erholt sich trotz des recht steilen CO₂-Preispfades beträchtlich, sodass sie 2030 auf etwas höherem Niveau als ohne CO₂-Bepreisung und Energieeffizienzsteigerungen liegt. Die gesamtwirtschaftliche Energieintensität sinkt gegenüber dem Status-quo-Szenario allerdings kaum. Denn auch in diesem Fall rührt die Effizienzverbesserung annahmegemäß von demselben energiesparenden technologischen Fortschritt wie zuvor her. Der steilere CO₂-Preispfad wirkt gleichermaßen dämpfend auf Energieverbrauch und Produktion und führt somit nicht zu einer zusätzlichen Reduktion der Energieintensität.

Bleibt der CO₂-Preispfad wie derzeit geplant, müsste es zu einer erheblichen Verstärkung des energiesparenden technologischen Fortschritts kommen, um das Emissionsziel zu erreichen. Die Fortschrittsrate müsste unter dem derzeitigen CO₂-Preispfad in jedem Sektor um fast das Zweieinhalbfache steigen. Fortschritte in dieser Größenordnung gab es in den letzten drei Jahrzehnten zwar in einzelnen Jahren und Sektoren. Allerdings ist es fraglich, ob von dem bisher vorgesehenen CO₂-Preispfad hinreichend starke Anreizwirkungen ausgehen, sodass solche Effizienzsteigerungen flächendeckend und anhaltend erreicht werden. Hier gibt es noch erheblichen Analysebedarf.

Produktions- und Emissionswirkungen von CO₂-Bepreisung bei steigender Energieeffizienz

Schaubild 3.4

Abweichung vom Basiswert (2023 = 100) in %



1 Derzeit geplanter CO₂-Preisanstieg und Anstieg der Energieeffizienz wie im bisherigen Mittel. **2** CO₂-Preisanstieg so, dass die Emissionsziele des Bundesklimaschutzgesetzes erreicht werden können, und Anstieg der Energieeffizienz wie im bisherigen Mittel.

Deutsche Bundesbank

5 Fazit

Laut der Modellergebnisse sind Energieeffizienzsteigerungen ein zentraler Faktor, um die Klimaziele ohne größere Produktionsverluste zu erreichen. Energieeffizienzsteigerungen senken die gesamtwirtschaftliche Energieintensität und begünstigen die gesamtwirtschaftliche Produktionsentwicklung. Folglich ist die Steigerung der Energieeffizienz ein wichtiger Faktor – wenn auch kein direkt steuerbarer –, um mögliche gesamtwirtschaftliche Beeinträchtigungen durch andere klimapolitische Maßnahmen einzudämmen. Dabei besteht ein wechselseitiger Zusammenhang zwischen höherem technischen Fortschritt bei der Energieeinsparung und einer strikteren Ausrichtung der Klimapolitik – zum Beispiel einem höheren CO₂-Preis als derzeit angelegt. Dies bleibt hier ausgeblendet, sodass historische Entwicklungen eher eine Untergrenze für das Potenzial von Effizienzsteigerungen sein könnten.

Eine Kombination aus verstärkten Energieeffizienzsteigerungen und strikten klimapolitischen Maßnahmen erleichtert aus Sicht des Modells, die Emissionsziele erreichbar zu machen. Laut Simulationsergebnissen müsste sich die energiesparende Technologie allerdings erheblich verbessern, um die geplante Emissionseinsparung allein zu erreichen. Es erscheint fraglich, ob der derzeit angelegte CO₂-Preis bereits die dafür notwendigen Anreize schafft. Falls sie nicht ausreichen, wären laut Modell weitere Maßnahmen wie ein steilerer CO₂-Preis notwendig, um die Klimaziele zu erreichen. Begleitet von einem stärkeren energiesparenden technologischen Fortschritt könnte ein höherer CO₂-Preis auch im gesamten Zeitverlauf mit Produktionszuwächsen einhergehen. Energieeffizienzsteigerungen könnten auch über eine stärkere Förderung der Forschung und Entwicklung in diesem Bereich angeregt werden. Um die Emissionsziele zu erreichen, sind neben Effizienzsteigerungen auch andere Faktoren wichtig – wie ein Ausbau der erneuerbaren Energien, Netze und Speicher. So sind laut den aktuellen Treibhausgas-Projektionen der Bundesregierung die Klimaziele für 2030 erreichbar, wofür allerdings ein sehr viel schnellerer Ausbau der erneuerbaren Energien eine wichtige Rolle spielt.^[35] Der Erfolg solcher Maßnahmen hängt auch stark davon ab, ob mit den Zielen konsistente Maßnahmen umgesetzt und fortgeführt werden. Im Zuge von Energiewende und Klimapolitik kommt der Politik vor allem die Aufgabe zu, verlässliche Rahmenbedingungen zu setzen.

Literaturverzeichnis

ADAC (2024), Spritpreis-Entwicklung: Benzin- und Dieselpreise seit 1950, Stand: 2. Januar 2024.

Acemoglu, D., P. Aghion, L. Bursztyn und D. Hemous (2012), The environment and directed technical change, *American economic review*, 102 (1), S. 131 – 166.

Aghion, P., A. Dechezleprêtre, D. Hémous, R. Martin und J. Van Reenen (2016), Carbon Taxes, Path Dependency, and Directed Technical Change: Evidence from the Auto Industry, *Journal of Political Economy*, 124 (1), S. 1 – 51.

Andrés, J., J. E. Bosca, R. Doménech und J. Ferri (2024), Transitioning to Net-Zero: Macroeconomic Implications and Welfare Assessment, Stand: Januar 2024.

Atalay, E. (2017), How important are sectoral shocks?, *American Economic Journal: Macro-economics*, 9 (4), S. 254 – 280.

Barrot, J. N. und J. Sauvagnat, (2016), Input specificity and the propagation of idiosyncratic shocks in production networks, *The Quarterly Journal of Economics*, 131 (3), S. 1543 – 1592.

Boehm, C. E., A. Flaaen und N. Pandalai-Nayar (2019), Input linkages and the transmission of shocks: Firm-level evidence from the 2011 Tōhoku earthquake, *Review of Economics and Statistics*, 101(1), S. 60 – 75.

Bönke, T., G. Dany-Knedlik und W. Roeger (2023), Erfüllung der Klimaziele kann nur bei richtiger Kombination der Maßnahmen Wachstumsimpulse geben, *DIW Wochenbericht Nr. 34+35/2023*, S. 453 – 468.

Brand, C., G. Coenen, J. Hutchinson und A. Saint Guilhem (2023), How will higher carbon prices affect growth and inflation?, *The ECB Blog*, 25. Mai 2023.

Bruns, S. B., A. Moneta und D. I. Stern (2021), Estimating the economy-wide rebound effect using empirically identified structural vector autoregressions, *Energy Economics*, 97, 105158.

Bundesfinanzministerium (2022), Fragen und Antworten zum Klimaschutz, Stand: 30. August 2022, Fragen und Antworten zum Klimaschutz.

Bundesregierung (2023), Ein Plan fürs Klima, Informationen zur Neufassung des Klimaschutzgesetzes, Stand 21. Juni 2023, Neufassung des Klimaschutzgesetzes.

D’Arcangelo, F. Maria, G. Pavan und S. Calligaris (2022), The Impact of the European Carbon Market on Firm Productivity: Evidence from Italian Manufacturing Firms, *FEEM Working Papers* 324170.

Deutsche Bundesbank (2022), Klimawandel und Klimapolitik: Analysebedarf und -optionen aus Notenbanksicht, *Monatsbericht*, Januar 2022, S. 33 – 62.

Gemeinschaftsdiagnose (2023), Inflation im Kern hoch – Angebotskräfte jetzt stärken, *Gemeinschaftsdiagnose Frühjahr 2023*.

Gemeinschaftsdiagnose (2022), Klimaschutz ohne Produktionseinbußen: Die Rolle energiesparenden technischen Fortschritts, Hintergrundpapier zur Gemeinschaftsdiagnose Frühjahr 2022.

Hassler, J., P. Krusell und C. Olovsson (2021), Directed Technical Change as a Response to Natural Resource Scarcity, *Journal of Political Economy*, 129 (11), S. 3039 – 3072.

Hinterlang, N., A. Martin, O. Röhe, N. Stähler und J. Strobel (2023), The Environmental Multi-Sector DSGE model EMuSe: A technical documentation, Bundesbank Technical Paper, 03/2023.

Hinterlang, N., A. Martin, O. Röhe, N. Stähler und J. Strobel (2022), Using energy and emissions taxation to finance labor tax reductions in a multi-sector economy, *Energy Economics*, Vol. 115 (106381).

Hulten, C. R. (2001), Total factor productivity: a short biography, in: *New developments in productivity analysis*, S. 1 – 54.

Internationale Energieagentur (2023), Energy Efficiency 2023, International Energy Agency.

Jo, S. und L. Karnizova (2021), Energy Efficiency and Fluctuations in CO2 Emissions, Bank of Canada, Staff Working Papers, 2021-47.

Joltreau, E. und K. Sommerfeld (2019), Why does emissions trading under the EU Emissions Trading System (ETS) not affect firms' competitiveness? Empirical findings from the literature. *Climate Policy* 19 (4), S. 453 – 471.

Jüppner, M., A. Martin und L. Radke-Arden (2024), The Effects of Energy Efficiency on GDP and CO2 Emissions in Germany, Bundesbank Technical Paper, im Erscheinen.

Känzig, D. R. (2023), The unequal economic consequences of carbon pricing, National Bureau of Economic Research, Working Paper No. 31221.

Karmaker, S. C., S. Hosan, A.J. Chapman und B.B. Saha (2021), The role of environmental taxes on technological innovation, *Energy*, 232, Artikel 121052.

Kriegler, E., J. P. Weyant, G. J. Blanford, V. Krey, L. Clarke, J. Edmonds, A. Fawcett, G. Luderer, K. Riahi, R. Richels, S.K. Rose, M. Tavoni und D. P. van Vuuren (2014), The role of technology for achieving climate policy objectives: overview of the EMF 27 study on global technology and climate policy strategies, *Climatic Change*, Vol. 123 (3-4).

Metcalf, G. E. und J. H. Stock (2023), The macroeconomic impact of Europe's carbon taxes, *American Economic Journal: Macroeconomics*, Vol. 15 (3), S. 265 – 286.

Network for Greening the Financial System (2023a), NGFS Scenarios for central banks and supervisors.

Network for Greening the Financial System (2023b), NGFS Climate Scenarios Technical Documentation.

Newell, R. G. und A. B. Jaffe (1999), The induced innovation hypothesis and energy-saving technological change, *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 114 (3), S. 941 – 975.

Nordhaus, W. D. (2013), The climate casino: Risk, uncertainty, and economics for a warming world.

Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (2022), Energy Efficiency, Definition of Energy Efficiency by the Office of Energy Efficiency and Renewable Energy.

Popp, D. (2002), Induced innovation and energy prices, *American Economic Review*, 92 (1), S. 160 – 180.

Stern, D. I. (2019), Energy and economic growth, in: *Routledge Handbook of Energy Economics*, S. 28 – 46.

Umweltbundesamt (2024), Treibhausgas-Projektionen 2024 – Ergebnisse kompakt, Stand März 2024.

Umweltbundesamt (2023), Der Europäische Emissionshandel, Preisentwicklung für Emissionsberechtigungen (EUA) seit 2008, Stand: 23. November 2023.

Weltklimarat, IPCC (2018), Global Warming of 1.5°C, Special Report.

1. Bis 2030 sollen die Emissionen gegenüber 1990 um 65 % sinken. Bis 2023 wurden bereits circa 46 % eingespart.
2. Die Europäische Kommission sieht im „Fit für 55“-Paket eine Emissionsminderung um 55 % bis 2030 gegenüber 1990 in der EU vor. Wie streng die Ziele in den einzelnen Ländern sind, hängt von deren Wirtschaftskraft ab.
3. Vgl.: Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (2022).
4. Die empirische Literatur ist sich allerdings bei den gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen höherer CO₂-Preise noch uneins. Während Metcalf und Stock (2023) die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen höherer CO₂-Preise gering einschätzen, weist Känzig (2023) auf einen dämpfenden Effekt für die Wirtschaftsaktivität hin.
5. Vgl.: Acemoglu et al. (2012) sowie Network for Greening the Financial System (2023a).
6. Newell et al. (1999) sowie Popp (2002) zeigen, dass höhere Energiepreise den Anreiz zur Entwicklung von energiesparenden Technologien erhöhen. Für eine strukturelle Analyse siehe: Acemoglu et al. (2012).
7. Dies könnte noch verstärkt werden, indem der Staat neben der CO₂-Bepreisung auch die Entwicklung von Technologien fördert, die zur Emissionsreduktion beitragen. Vgl.: Acemoglu et al. (2012). Auch dieser Kanal wird in der Analyse annahmegemäß ausgeblendet.
8. Empirische Studien weisen auf eine positive Anreizwirkung von CO₂-Bepreisung auf Innovationen hin. Vgl.: Karmaker et al. (2021), Aghion et al. (2016). Es ist jedoch schwierig, die Stärke zusätzlicher Energieeffizienzgewinne über diesen Kanal abzuschätzen.
9. Das EMuSe-Modell wurde in der Bundesbank entwickelt und gehört zur Klasse der dynamischen stochastischen allgemeinen Gleichgewichtsmodelle (DSGE-Modelle), ergänzt um eine multisektorale Produktionsstruktur und ein Umweltmodul. Vgl. Hinterlang et al. (2023) für die technische Dokumentation des Modells.
10. Beide Komponenten werden in den Modellrechnungen getrennt voneinander betrachtet. Sie können grundsätzlich miteinander verbunden sein.

-
11. Studien für die USA zeigen beispielsweise, dass Veränderungen in der energiesparenden Technologie eine wichtige Triebkraft für die Entwicklung der Emissionen sind (Nordhaus (2013) sowie Jo und Karnizova (2021)).
 12. Vgl.: Kriegler et al. (2014) oder Bönke et al. (2023)
 13. Die wissenschaftliche Diskussion darüber, wie gut Energie mit anderen Produktionsfaktoren innerhalb der Produktionsprozesse eingespart werden kann, ist zwar sehr vielfältig. Grundsätzlich gilt aber, dass Energie einen besonderen Stellenwert für den Produktionsprozess hat und ihr Grad an Substituierbarkeit zumindest kurzfristig sehr begrenzt ist (Stern (2019)).
 14. Dieser Ansatz wird in Hassler et al. (2021) genau beschrieben.
 15. Auf der Grundlage der NACE-Klassifikation werden folgende Sektoren unterschieden: Landwirtschaft (A), Bereiche des Verarbeitenden Gewerbes, die nicht unter das EU-EHS (europäisches Emissionshandelssystem) fallen, EU-EHS-Bereiche des Verarbeitenden Gewerbes ohne Kokerei und Mineralölverarbeitung (C17, C20, C23, C24), Wasserversorgung (E), Baugewerbe (F), Handel (G), Verkehr und Lagerei (H), übrige Dienstleistungen (I-N, R, S) sowie zwei Energiesektoren. Zum einen ein fossiler Energiesektor, der Bergbau (B) sowie Kokereien und Mineralölverarbeitung (C19) umfasst und zum anderen die Strom- und Gasversorgung (D35).
 16. Dieser Wert deckt sich mit den Ergebnissen in: Gemeinschaftsdiagnose (2022) sowie Bönke et al. (2023).
 17. Die Energieintensität wird, analog zu der Definition von COP 28, als Primärenergieverbrauch im Verhältnis zum BIP gemessen.
 18. Rebound-Effekte können die Minderung bei der Energieintensität im Vergleich zu Energieeffizienzsteigerungen abschwächen, sodass nicht alle Energieeinsparungen, die technisch möglich wären, realisiert werden. Sobald Energie effektiver genutzt werden kann, können Produktionskosten eingespart werden. Denn der Verbrauch von Energie und auch ihr Preis sinken. Diese Kosteneinsparungen ermöglichen es, die Produktion zu steigern. Dadurch steigt die Nachfrage nach Energie relativ zu anderen Produktionsfaktoren wieder etwas an, und die Energieintensität sinkt gegenüber dem Fall unmittelbar nach der Energieeffizienzsteigerung etwas weniger.
 19. Vgl. beispielsweise: Bruns et al. (2021) sowie Jo und Karnizova (2021).
 20. Die Bedeutung von sektoralen Verflechtungen für gesamtwirtschaftliche Auswirkungen, vor allem im Fall der Einführung eines CO₂-Preises, wurde in Deutsche Bundesbank (2022) dargelegt.
 21. Vgl. zum Beispiel: Network for Greening the Financial System (2023b).
 22. Diese Unterscheidung stützt sich auf die Modellvariante in: Hinterlang et al. (2022).
 23. In der Analyse wird von volkswirtschaftlichen Schäden aus einer zu hohen Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre abgesehen. Da die Treibhausgasemissionen aus dem Rest der Welt in dieser Analyse nicht berücksichtigt werden und die deutschen Treibhausgasemissionen (und deren Einsparungen) nur einen Bruchteil der Gesamtemissionen darstellen, ist davon auszugehen, dass der Einfluss in der betrachteten Zeitspanne zu vernachlässigen ist. Die Analyse in Deutsche Bundesbank (2022) zu physischen Auswirkungen des Klimawandels auf die Gesamtwirtschaft zeigt bis 2020 einen sehr geringen Effekt der graduellen Erderwärmung auf die deutsche Wirtschaft. Dabei wurden Auswirkungen von weiteren physischen Risiken, wie Extremwetterereignissen, nicht untersucht.
 24. Die Ergebnisse hier beziehen sich auf: Jüppner et al. (2024).
 25. Gesamtwirtschaftliche Auswirkungen durch Allokation von Ressourcen – beispielsweise hin zu Forschung und Entwicklung von energiesparenden Technologien – werden dabei ausgeklammert. Hulten (2001) bezeichnet technologischen Fortschritt solch exogener Natur als „Manna vom Himmel“.

-
26. Es gibt Studien, die den Einfluss von CO₂-Bepreisung im Rahmen des Europäischen Emissionshandels auf den allgemeinen technologischen Fortschritt (TFP) von Unternehmen oder Sektoren analysieren. Dabei werden teilweise nur kleine oder insignifikante Effekte gefunden (vgl. zum Beispiel: D’Arcangelo et al. (2022) sowie Joltreau und Sommerfeld (2019)). Die Evidenz zum Einfluss von CO₂-Preisen auf den energiesparenden technologischen Fortschritt wurde bisher noch wenig untersucht. Im Rahmen von Simulationsrechnungen kann dem dadurch Rechnung getragen werden, dass Szenarien mit unterschiedlichen Annahmen zur Entwicklung der Energieeffizienz betrachtet werden. So geht beispielsweise das NGFS vor (vgl.: Network for Greening the Financial System (2023b)).
 27. Es wird hier auch nicht untersucht, wie die Einnahmen aus der CO₂-Bepreisung für klimafreundliche Investitionen genutzt werden können. Dazu siehe etwa: Andrés et al. (2024). Auch analysieren wir nicht die Implikationen internationaler Verflechtungen, wie etwa die Ausstrahleffekte energiesparender Technologien oder der in- und ausländischen CO₂-Bepreisung.
 28. Der CO₂-Preis im Modell bezieht sich zunächst auf den vorgegebenen Preispfad des nationalen Emissionshandelssystems (nEHS) bis 2026. Der CO₂-Preis im Modell wird so gesetzt, dass der Preis für fossile Energie im Jahr nach der Erhebung des Preises den prozentualen Preisanstieg fossiler Energieträger durch den CO₂-Preis widerspiegelt. Die Erhebung des CO₂-Preises in Höhe von 45 € in Deutschland verursachte einen Anstieg der Kraftstoffpreise relativ zu 2019 um 6,75 % (Bundesfinanzministerium (2022) sowie ADAC (2024)). Da im Jahr 2020 die Preise insbesondere durch die Auswirkungen der Pandemie verzerrt waren, wurde 2019 als Referenzjahr vor der Einführung des CO₂-Preises gewählt. Der CO₂-Preis in Deutschland wurde bereits 2021 auf einem niedrigeren Niveau eingeführt. Da die Modellsimulationen aber erst ab 2024 ansetzen und das Modell im Referenzszenario 2023 keinen CO₂-Preis berücksichtigt, wird der CO₂-Preis im Modell auf dem höheren Niveau eingeführt und der Preisanstieg der fossilen Energieträger durch den höheren CO₂-Preis ab 2024 berücksichtigt. Weiterhin steigt der CO₂-Preis im Modell gemäß dem tatsächlichen Preispfad bis 2026. Die Steigerungsraten betragen für 2025 und 2026 jeweils 22 % und 18 %. Da für nEHS-Sektoren ab 2027 ein eigenes europäisches Emissionshandelssystem eingeführt werden soll, orientiert sich der Preispfad an den Preisen der EU-EHS-Emissionszertifikate. Ab 2027 steigt der CO₂-Preis mit einer jährlichen Rate von 7,8 % bis 2030, um den fortgeschriebenen Wert von circa 88 € zu erreichen, der dem Durchschnittspreis für Emissionszertifikate 2023 entspricht (Umweltbundesamt (2023)). Bei dem Preispfad ergeben sich noch kleinere Einschränkungen: Es gibt Sektoren, die unter das EU-EHS fallen und bereits den höheren CO₂-Preis zahlen. Somit ist für diese Sektoren der CO₂-Preis 2024 bis 2026 etwas niedriger. Auf der anderen Seite wird der fossile Energiesektor in den Simulationen besteuert. Dieser setzt sich aus dem Sektor C19 und B zusammen. Während der Sektor C19 einen CO₂-Preis zahlen muss, fällt der Sektor B bislang unter keines der beiden Emissionshandelssysteme.
 29. Weitere Beträge aus der Literatur, die einen Produktionsrückgang nach Einführung eines CO₂-Preises vorhersagen, sind zum Beispiel: Hinterlang et al. (2022) oder Bönke et al. (2023).
 30. In den Modellsimulationen werden keine weiteren Annahmen zur Wirtschaftsentwicklung bis 2030 gemacht. Es ist zu betonen, dass es sich hier nicht um eine Wirtschaftsprognose handelt. Die Simulationen widmen sich ausschließlich dem Beitrag der beiden Komponenten Energieeffizienzsteigerungen und CO₂-Bepreisung.
 31. Der CO₂-Preis hat bei der Umsetzung erhebliche Vorteile. Er ist einfach zu implementieren und wirkt wie eine Steuer auf Emissionen, die fossile Energieträger verteuert. Somit entfacht er seine Anreizwirkung auf die Reduktion der fossilen Energienachfrage beziehungsweise der Emissionen direkt. Es sind keine Investitionen oder Förderprogramme vorab notwendig, und die Wirkung des Instruments entfaltet sich so gut wie unmittelbar nach dessen Einführung (vgl.: Brand et al. (2023)). Außerdem kann er je nach Wirkungsgrad flexibel angepasst werden. Letztendlich dürfte er auch eine positive Anreizwirkung auf Investitionen in emissionsärmere Technologien haben.
 32. In den Modellsimulationen gibt es energiesparende Technologie lediglich im Unternehmenssektor. Die Energieeffizienz beim Konsum der Haushalte ändert sich annahmegemäß nicht. Sie ist weitaus schwieriger zu ermitteln. Somit liegt der Wert für die gesamtwirtschaftliche energiesparende Technologie eher am unteren Rand. Grundsätzlich könnten die Effizienzgewinne im Haushaltssektor auch zur Reduktion der gesamtwirtschaftlichen Energienachfrage und somit der Energieintensität beitragen.

-
33. In den Simulationen wird von weiteren Innovationen, wie neutralem technologischen Fortschritt, abgesehen. Er kann einen Anstieg der Energienachfrage auslösen und somit auch die Nachfrage nach fossiler Energie erhöhen. Die Emissionen würden steigen. Werden die Unternehmen in dem Fall bei der Energieverwendung nicht effizienter, würden weniger Emissionen als im Status-quo-Szenario eingespart.
 34. Die ähnliche Studie von Bönke et al. (2023) kommt ebenfalls zu dem Ergebnis, dass zur Erreichung der Emissionsziele eine relativ hohe CO₂-Bepreisung notwendig ist, falls sich der energiesparende technologische Fortschritt wie in der Vergangenheit entwickelt.
 35. Vgl.: Umweltbundesamt (2024).