



GEMEINSCHAFTS- DIAGNOSE

Gemeinschaftsdiagnose Frühjahr 2022: Klimaschutz ohne Produktionseinbußen: Die Rolle energiesparenden technischen Fortschritts

Kurzzusammenfassung

Deutschland hat sich verpflichtet, seine Treibhausgasemissionen in den kommenden Jahren deutlich zu reduzieren. Der Ausbau erneuerbarer Energien kann den Verbrauch fossiler Energieträger nur teilweise ersetzen, so dass insgesamt eine starke Reduktion des Energieverbrauchs notwendig ist. Dieser Beitrag erläutert das Vorgehen, das im Frühjahrsgutachten der Gemeinschaftsdiagnose 2022 herangezogen wurde, um den Anstieg der Wachstumsrate energiesparenden technischen Fortschritts abzuschätzen, der für eine produktionsneutrale Verringerung des Energieeinsatzes notwendig wäre. Diesem Ansatz liegt eine Produktionsfunktion zugrunde, in die Energie explizit als Produktionsfaktor eingeht. Auf dieser Basis werden verschiedene Projektionen des Primärenergieverbrauchs erstellt, die mit den Emissionszielen im Jahr 2030 bei unterschiedlichen Annahmen für den Ausbau erneuerbarer Energien kompatibel wären. Die Ergebnisse zeigen, dass eine ähnlich starke Steigerung der Wachstumsrate des energiesparenden technischen Fortschritts wie nach den Ölpreisschocks der 1970er Jahre erforderlich ist, um Produktionseinbußen zu verhindern. Ein doppelt so schneller Ausbau erneuerbarer Energie kann die notwendige Technologiesteigerung etwas senken. Jedoch selbst dann bleibt eine Erhöhung der Energieeffizienz der Produktion entscheidend. Somit sind erhöhte Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Energieeffizienz und Investitionen unerlässlich, um die Treibhausgasemissionsziele ohne Produktionseinbußen zu erreichen.

ANSPRECHPARTNER

Prof. Dr. Maik Wolters
Kiel Institut für Weltwirtschaft (IfW)
maik.wolters@ifw-kiel.de

www.gemeinschaftsdiagnose.de

Historische Betrachtung anhand der Ölkrise der 1970er Jahre

Zur Abschätzung des Einflusses von Energie als Produktionsfaktor auf die gesamtwirtschaftliche Produktion wird eine CES-Produktionsfunktion verwendet. In Anlehnung an Hassler et al. (2021) erweitert diese eine Cobb-Douglas Produktionsfunktion für die Produktionsfaktoren Kapital, K_t , und Arbeit, L_t , um den Produktionsfaktor Energie, E_t :¹

$$Y_t = F(A_t, K_t^\alpha L_t^{1-\alpha}, A_{Et} E_t) = \left[(1-\gamma)(A_t K_t^\alpha L_t^{1-\alpha})^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} + \gamma(A_{Et} E_t)^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} \right]^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}}. \quad (1)$$

ε ist die Substitutionselastizität zwischen Kapital/Arbeit und Energie, A_t ist das Technologielevel für den Einsatz von Kapital und Arbeit und A_{Et} das Technologielevel für den Einsatz von Energie, dessen Veränderung als energiesparender technischer Fortschritt interpretiert werden kann. Im Falle von $\varepsilon = 0$ wären Kapital/Arbeit und Energie perfekte Komplemente und im Fall $\varepsilon = \infty$ perfekte Substitute. Der auf makroökonomischen Daten basierenden Schätzung von Hassler et al. (2021) folgend wird ε auf den Wert 0,02 kalibriert, sodass kurzfristig Energie kaum durch Anpassungen des Kapitalstocks oder des Arbeitsvolumens in der Produktion substituiert werden kann. Der Parameter γ wird auf 0,023 kalibriert, was dem weiter unten berechneten durchschnittlichen Anteil des Produktionsfaktors Energie am gesamtwirtschaftlichen Einkommen entspricht. α wird auf 0,35, den Wert aus der Potenzialschätzung der Gemeinschaftsdiagnose, kalibriert und für die Variablen Y_t , K_t und L_t werden die der Gemeinschaftsdiagnose zugrundeliegenden Zeitreihen verwendet.

Steigt der Preis für Energie durch den Anstieg des Preises für CO₂-Emissionen, so müsste aufgrund der geringen Substituierbarkeit von Energie durch Kapital oder Arbeit bei einem gleichbleibenden Niveau des energiesparenden technischen Fortschrittes A_{Et} entweder durch eine Verringerung des Einsatzes von Energie weniger produziert werden oder bei gleichbleibendem Energieeinsatz ein größerer Teil des gesamtwirtschaftlichen Einkommens für Energie aufgewendet werden. Hassler et al. (2021) zeigen, dass bei den starken Preisanstiegen für fossile Energieträger in den 1970er Jahren in den USA der Einkommensanteil von Energie tatsächlich stark zunahm (vgl. Abbildung 1, oben links). Die Ölkrise induzierte allerdings auch eine Steigerung der Forschungsaktivitäten zum effizienteren Einsatz von Energie. Die Wachstumsrate des energiesparenden technischen Fortschritts zog an (vgl. Abbildung 1, oben rechts). Infolge dieser Effizienzsteigerung führten die Preisanstiege der fossilen Energieträger Öl, Gas und Kohle in den vergangenen 15 Jahren im Vergleich zur Ölkrise der 1970er Jahre zu einem deutlich geringeren Anstieg des Einkommensanteils von Energie.

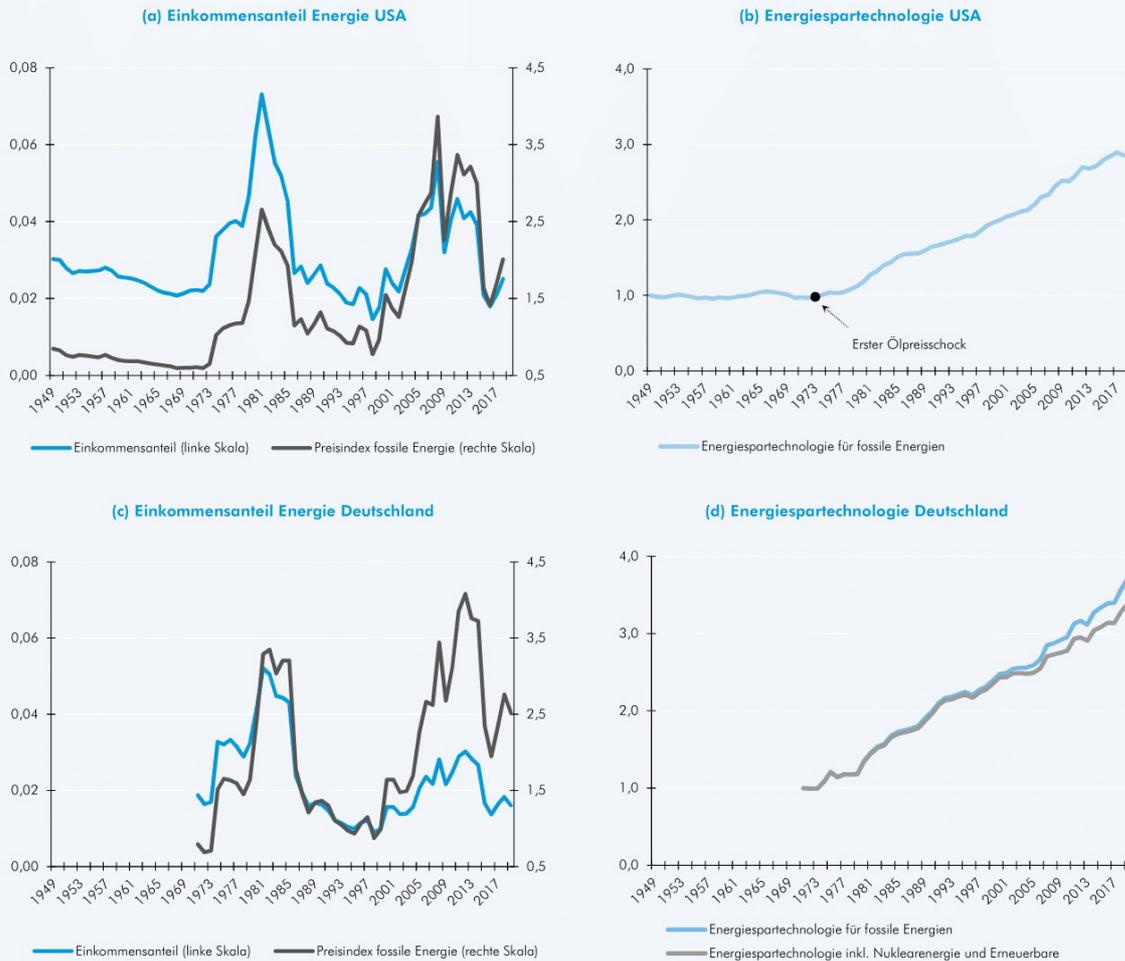
Im Folgenden wird gezeigt, dass es diese Entwicklungen auch in Deutschland gegeben hat. Die Produktionsfunktion enthält zwei Technologiemaße, die nicht direkt in den Daten beobachtbar sind. Unter der Annahme perfekten Wettbewerbs – die Produktionsfaktoren werden mit ihrem Grenzprodukt entlohnt – können A_t und A_{Et} berechnet werden:

$$A_t = \frac{Y_t}{K_t^\alpha L_t^{1-\alpha}} \left[\frac{w_t L_t / Y_t}{(1-\alpha)(1-\gamma)} \right]^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}}, \quad (2)$$

$$A_{Et} = \frac{Y_t}{E_t} \left[\frac{p_{Et} E_t / Y_t}{\gamma} \right]^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}}. \quad (3)$$

¹ Hassler, J.; Krussel, P.; Olovsson, C.: Directed Technical Change as a Response to Natural Resource Scarcity, in: [Journal of Political Economy](#), Vol. 129 (11), 2021, 3039–3072.

Abbildung 1
Energiepreise, Energieeinkommensanteil und Energiespartechnologie USA und Deutschland



Quellen: Internationale Energieagentur: World Energy Balances; Statistisches Bundesamt; IRENA; Hassler et al. (2021); Berechnungen der Institute.

© GD Frühjahr 2022

Zur Schätzung von A_{Et} muss der Energieeinkommensanteil $P_{Et}E_t/Y_t$ berechnet werden.² Daten für den Primärenergieverbrauch E_t für Deutschland sind von der Internationalen Energieagentur verfügbar. Berücksichtigt werden Öl, Gas, Kohle, nukleare Energie und erneuerbare Energien. Für die fossilen Energieträger werden Einfuhrpreise des Statistischen Bundesamtes verwendet. Für Nuklearenergie werden vom ifo Institut berechnete Stromerzeugungskosten für das Jahr 2015 mit Veränderungsraten von Uranium

² Während der berechnete Primärenergieverbrauch aufgrund der guten Datenverfügbarkeit und der etablierten Berechnungsmethoden relativ verlässlich ist, ist die Schätzung der Preisentwicklung mit sehr großer Unsicherheit behaftet und als grobe Approximation zu verstehen. Die Kosten für die Energieverwendung variieren stark nach Einsatz und es gibt große Unterschiede in den Preisdaten je nachdem, ob Einfuhrpreise, Erzeugerpreise oder Kosten in der Stromerzeugung verwendet werden. Darüber hinaus sind insbesondere die Preise für erneuerbare Energien aufgrund der Heterogenität der Energieträger und der Nutzung globaler Durchschnittspreise mit besonders großer Unsicherheit behaftet. Außerdem sind Preisdaten für erneuerbare Energie erst ab 2010 verfügbar. Für die Jahre davor wird vereinfacht der Preis von 2010 genutzt, da der Anteil erneuerbarer Energie vernachlässigbar gering war. Für Nuklearenergie wird ebenfalls vor 1999 der Preis aufgrund fehlender Daten als konstant angenommen. Die unten gezeigten Projektionen hängen jedoch sehr viel stärker von den Energieverbrauchsszenarien als von der Preisentwicklung ab, so dass diese in Bezug auf Messfehler der Energiepreise robust sind.

Preisdaten der Internationalen Energieagentur verknüpft. Für die erneuerbaren Energien wird ein Preisindex basierend auf globalen Stromerzeugungskosten für die verschiedenen Energieerzeugungsmethoden (Photovoltaik, On-shore Windenergie, Offshore Windenergie, Wasserkraft, Biogas und Erdwärme) und den Anteilen bei der Stromerzeugung in Deutschland gewichtet. Die Daten stammen von der International Renewable Energy Association (IRENA). Da die Preise für fossile Energie Rohstoffpreise sind, die keine Stromerzeugungskosten enthalten, wird abschließend der Preisindex für erneuerbare Energien transformiert, um ein Rohstoffäquivalenzpreisindex zu erhalten. Hierzu wird für jedes Jahr die Relation der Stromerzeugungskosten für erneuerbare Energie und fossile Energie berechnet und mit dem Preisindex für fossile Energie multipliziert. Abschließend wird ein aggregierter Energiepreisindex für fossile Energieträger, Nuklearenergie und erneuerbare Energie berechnet und durch den Deflator des Bruttoinlandsprodukts geteilt, um die Realpreisentwicklung darzustellen. Dabei wird zunächst von CO₂-Emissionspreisen abstrahiert, um den Zusammenhang von Energiepreisen, dem Energieeinsatz und dem Einkommensanteil für Energie historisch zu analysieren. Für den Vergleich mit den USA werden die Daten aus Hassler et al. (2021) verwendet. Diese beschränken sich auf fossile Energieträger, so dass nukleare und erneuerbare Energie für die USA nicht berücksichtigt werden.

Auch für Deutschland zeigt sich, dass Energiepreisanstiege kurzfristig zu einem Anstieg des Energieeinkommensanteils führen (vgl. Abbildung 1, links unten). Die Preisanstiege in den 1970er Jahren bewirkten allerdings einen deutlichen höheren Anstieg des Energieeinkommensanteils als die Preisanstiege der vergangenen 15 Jahre. Diese Entwicklung liegt an dem Anstieg der Wachstumsrate energiesparenden technischen Fortschritts (vgl. Abbildung 1, unten rechts). Für die USA ist aufgrund der längeren Historie der Daten ersichtlich, dass es bis zur Ölkrise keinen energiesparenden technischen Fortschritt gab und dieser erst als Reaktion auf diese begonnen hat. Diese Entwicklung kann mit der Anwendung von „Directed Technological Change Modellen“ erklärt werden (Acemoglu, 1998, und Hassler et al., 2021).³ In Deutschland ist die Wachstumsrate energiesparenden technischen Fortschritts höher als in den USA, wenn man den vergleichbaren Fall mit fossilen Energieträgern betrachtet. Daher hat der Energiepreisanstieg der vergangenen 15 Jahre zu einem geringeren Anstieg des Energieeinkommensanteils als in den USA geführt. Berücksichtigt man zusätzlich für Deutschland Nuklearenergie und erneuerbare Energie, so fällt der Anstieg der Wachstumsrate energiesparenden technischen Fortschritts etwas geringer aus. Die Nutzung zusätzlicher Energieträger hilft, den Verbrauchsrückgang fossiler Energie etwas auszugleichen, insbesondere da im Zeitraum ab 2010 der Anteil erneuerbarer Energie stark gestiegen ist und gleichzeitig die Preise gefallen sind.

Die historische Analyse zeigt insgesamt, dass selbst ein zukünftig starker Anstieg der Preise für fossile Energie aufgrund der CO₂-Emissionsbepreisung nicht zwingend mit einem starken Anstieg des Einkommensanteils, der für Energie aufgewendet wird, oder einem Rückgang der Produktion einhergehen muss. Es könnte stattdessen einen weiteren Anstieg des energiesparenden technischen Fortschritts geben. Ein Ausbau erneuerbarer Energien könnte darüber hinaus den Rückgang des Einsatzes fossiler Energieträger partiell ersetzen.

³ Acemoglu, D.: Why Do New Technologies Complement Skills? Directed Technical Change and Wage Inequality, in: [Quarterly Journal of Economics](#), Vol. 113 (4), 1998, 1055–1089.

Wie stark muss der energiesparende technische Fortschritt gesteigert werden, damit die Energiewende zu keiner Produktionsverringerung führt?

Zur Projektion möglicher zukünftiger Entwicklungen für Deutschland werden zunächst die mittelfristig erwarteten Pfade für Y_t , K_t und L_t aus der Schätzung der Gemeinschaftsdiagnose bis 2030 als gegeben angenommen. Basierend auf Gleichung (3) wird berechnet, wie sich bei unterschiedlichen Szenarien bezüglich des Energieverbrauchs die Wachstumsrate des energiesparenden technischen Fortschritts entwickeln müsste, um den ohne die explizite Berücksichtigung von Energie von der Gemeinschaftsdiagnose projizierten Pfad für die Produktion Y_t zu erreichen. Hierzu sind Projektionen für den Primärenergieverbrauch und die Preisentwicklung der verschiedenen Energieträger notwendig.

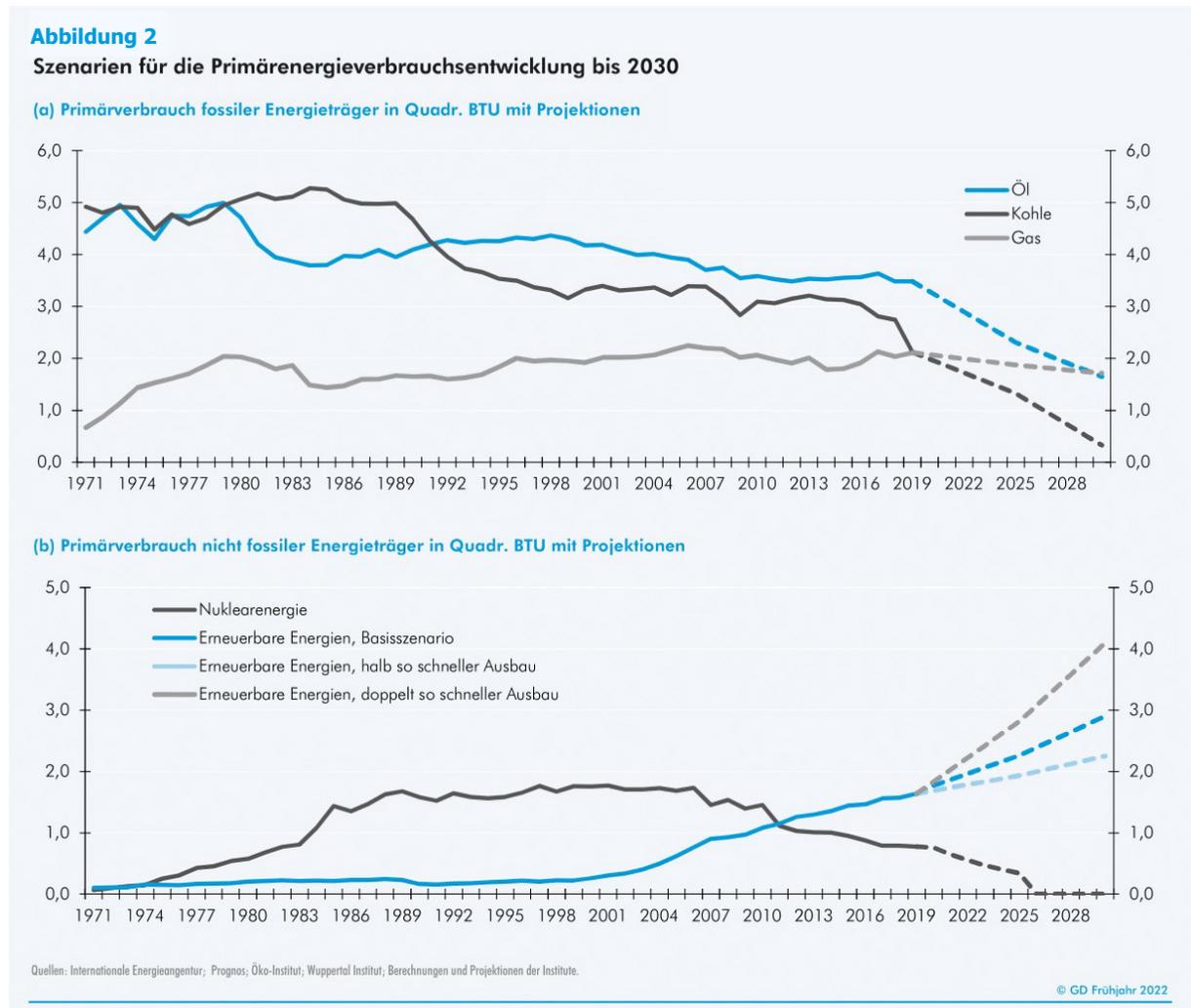
Bezüglich der Preisentwicklung wird angenommen, dass ausgehend von der jüngsten Beobachtung der in der historischen Analyse genutzten Preise reale Konstanz vorliegt, wobei eine Inflationsrate von 2% für den Projektionszeitraum angenommen wird. Für die fossilen Energieträger wird außerdem berücksichtigt, dass der CO₂-Emissionspreis zukünftig steigen wird. Projektionen für den CO₂-Emissionspreis des ifo Institutes, die aus den Klimazielen Deutschlands abgeleitet sind, werden dazu mit den Emissionsfaktoren der fossilen Energieträger Öl, Gas und Kohle verknüpft und somit ein CO₂-Emissionspreis pro fossilem Energieträger berechnet.⁴ Dabei wird berücksichtigt, dass der EU-Emissionshandel nur etwa 50% der CO₂-Emissionen in Deutschland abdeckt und ab 2021 der nationale Emissionshandel etwa weitere 35% erfasst. Da keine Daten verfügbar sind, wie sich diese Emissionen auf die verschiedenen fossilen Energieträger aufteilen, wird approximativ der berechnete CO₂-Emissionspreis der einzelnen fossilen Energieträger bis 2021 mit 0,5 (50%) multipliziert und ab 2022 mit 0,85 (50%+35%). Die daraus resultierenden CO₂-Preise werden den oben verwendeten Einfuhrpreisen zugeschlagen.

Für den zukünftigen Energieverbrauch werden Projektionen aus einer gemeinsamen Studie von Prognos, Öko-Institut und Wuppertal-Institut genutzt, in der berechnet wird, wie Deutschland entsprechend dem 2021 beschlossenen Klimaschutzgesetz die Emissionen bis 2030 um 65% im Vergleich zu 1990 senken und bis 2045 klimaneutral werden kann.⁵ Aus der Studie können direkt die projizierten Veränderungen des Verbrauchs der verschiedenen Energieformen bis 2030 entnommen werden. Um jährliche Daten zu erhalten, wird ausgehend vom Primärenergieverbrauch im Jahr 2019, in dem die historischen Daten der Internationalen Energieagentur enden, linear interpoliert. Insgesamt sinkt der Primärenergieverbrauch deutlich, wofür insbesondere massive Reduktionen des Öl- und Kohleeinsatzes wichtig sind, während die erneuerbaren Energien ausgebaut werden (vgl. Abbildung 2). Die Studie sieht die größten CO₂-Einsparungen in der Energiewirtschaft, im Verkehr und in der Industrie vor. Die Autoren der Studie betonen die wichtige Rolle des technologischen Fortschritts zur Erreichung der Klimaziele. Somit ergibt sich wie im oben skizzierten Modell eine zentrale Rolle für den energiesparenden technischen Fortschritt. Um die Rolle erneuerbarer Energien zu analysieren, werden außerdem zwei Alternativszenarien betrachtet. Im ersten wird die Auswirkung eines schnelleren Ausbaus der erneuerbaren Energien analysiert, in dem angenommen wird, dass bis 2030 der Primärverbrauch erneuerbarer Energien doppelt so stark wie im Basisszenario zunimmt.

⁴ Kalibrierung der CO₂-Preise basierend auf PACE CGE-Modell in Mier, M., K. Siala, K. Govorukha, and P. Mayer (2020): Costs and Benefits of Political and Physical Collaboration in the European Power Market (Revised May 2021). [ifo Working Paper No. 343](#).

⁵ Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021): [Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann](#). Zusammenfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende.

Das zweite Szenario betrachtet den Fall, dass der Ausbau der erneuerbaren Energien langsamer als geplant verläuft, so dass der Primärenergieverbrauch erneuerbarer Energien bis 2030 nur um die Hälfte des Basisszenarios steigt (vgl. Abbildung 2 unten).



Soll bis 2030 die gleiche Produktion wie von der Gemeinschaftsdiagnose bisher projiziert erreicht werden und dennoch der Energieverbrauch so sinken, dass bis 2030 die Emissionen im Vergleich zu 1990 um 65% abnehmen, ist ein starker Anstieg des energiesparenden technischen Fortschritts notwendig. Er müsste von 2,7% im Zeitraum 1973-2019 auf 5,6% steigen. Ausschlaggebend ist die starke Senkung des Primärenergieverbrauchs und nicht die Preiserhöhung fossiler Energieträger durch die CO₂-Emissionsbepreisung. Setzt man den CO₂-Aufschlag auf null, so ändert sich die notwendige Wachstumsrate von A_{Et} gerade mal um 0,04 Prozentpunkte im Projektionszeitraum.⁶ Ein Vergleich mit der Ölkrise der 1970er Jahre zeigt, dass ein solcher Anstieg der Wachstumsrate energiesparenden technischen Fortschritts nicht ausgeschlossen

⁶ Die Energiepreise haben geringe Auswirkungen auf die Modellrechnung. Sie fließen in die Berechnung des energiesparenden technischen Fortschritts ein, da hierfür unter der Annahme vollständigen Wettbewerbes die Grenzprodukte der Produktionsfaktoren den realen Faktorpreisen entsprechen (vgl. Gleichung (3)). Eine Änderung der Energiepreise hat aber aufgrund des Exponenten $\varepsilon/(\varepsilon - 1)$ sehr geringe Auswirkungen. Ausschlaggebend für die Ergebnisse ist der Rückgang des Energieeinsatzes, der zwar durch den CO₂-Preisanstieg induziert werden soll, aber dieser Zusammenhang wird hier nicht explizit modelliert, sondern Energieverbrauchsszenarien fließen exogen in die Analyse ein.

ist. In den USA war die Wachstumsrate vor der Ölkrise null (vgl. Abbildung 1, oben rechts). Nimmt man an, dass dies auch für Deutschland der Fall war, so entspricht der projizierte notwendige weitere Anstieg etwa dem, der in den 1970er Jahren zu beobachten war.

Ein doppelt so starker Ausbau der erneuerbaren Energie bis 2030 würde die Rate des energiesparenden technischen Fortschritts zur Erreichung derselben Produktionsmenge auf 4,7% verringern. In diesem Fall wäre der notwendige Anstieg sogar etwas kleiner als der, der laut Modellschätzung nach der Ölkrise der 1970er Jahre tatsächlich realisiert wurde. Sollte die Verbrauchsmenge erneuerbarer Energie bis 2030 nur um die Hälfte steigen, so müsste die durchschnittliche Rate energiesparenden technischen Fortschritts hingegen auf 6,1% steigen und damit einen halben Prozentpunkt höher als im Basisszenario ausfallen. Gelingt dies nicht, so würde die Produktion negativ beeinflusst werden. Alternativ könnte mehr fossile Energie genutzt werden, womit das Emissionsreduktionsziel für das Jahr 2030 verfehlt würde.

Wie ändert sich die Produktion, bei verschiedenen Wachstumsraten energiesparenden technischen Fortschritts?

Bisher wurde berechnet, wie stark die Rate des energiesparenden technischen Fortschritts steigen muss, um die Emissionsziele ohne Einbußen beim Produktionspotenzial zu erreichen. Demnach würde das Bruttoinlandsprodukt bis zum Jahr 2030 um gut 10% zulegen (vgl. Abbildung 3, blaue Linie). Im Folgenden werden zur Illustration zwei davon abweichende Pfade für die Rate des energiesparenden technischen Fortschritts und des Energieverbrauchs betrachtet. Hierzu wird die Produktionsfunktion aus Gleichung (1) verwendet. Projektionen für A_t , K_t und L_t der Gemeinschaftsdiagnose werden als gegeben angenommen, und A_{Et} und E_t werden variiert.

Würde der Primärenergieverbrauch wie oben beschrieben verringert, aber die Rate des energiesparenden technischen Fortschritts nicht steigen, so würde die Wirtschaftsleistung bis zum Jahr 2030 im Vergleich zum Jahr 2021 um gut 15% schrumpfen (vgl. Abbildung 3, hellgraue Linie). In diesem Fall wird dem Wirtschaftsprozess ein wichtiger benötigter Produktionsfaktor – Energie – in drastischer Weise entzogen, der aufgrund der geringen Substitutionselastizität zwischen Energie und den anderen Produktionsfaktoren Kapital und Arbeit zu starken Produktionseinbußen führt.

Abbildung 3

Outputprojektionen bis 2030

Index 2021 = 100



Quelle: Berechnungen und Projektionen der Institute.

© GD Frühjahr 2022

Würde man die fossilen Energieträger wie bisher nutzen (Energieverbrauch auf dem Niveau des Jahres 2019, keine CO₂-Bepreisung und konstante Rate des energiesparenden technischen Fortschritts) würde das Bruttoinlandsprodukt bis zum Jahr 2030 um gut 25% zunehmen (vgl. Abbildung 3, dunkelgraue Linie). Dieses Szenario ist als Obergrenze zu interpretieren und erscheint als unwahrscheinlich, da ein Anstieg energiesparenden technologischen Fortschritts historisch mit einem Rückgang des Energieverbrauchs einhergeht. Hier wird stattdessen angenommen, dass der Energieeinsatz gleichbleibt, die Energieeffizienz aber steigt.

Im Durchschnitt ist der aggregierte Energieverbrauch hingegen in den Jahren 2000 bis 2019 jährlich um 0,54% gefallen. Schreibt man diese Entwicklung fort, so ergibt sich zusammen mit einer Fortschreibung der durchschnittlichen Rate des energiesparenden technologischen Fortschritts von 1971 bis 2019 von 2,7% ein Anstieg der Produktion bis 2030 um gut 23% (vgl. Tabelle). Berücksichtigt man zusätzlich, dass die Rate des energiesparenden technologischen Fortschritts in den vergangenen Jahren etwas geringer ausgefallen ist und schreibt die durchschnittliche jährliche Rate im Zeitraum 2000 bis 2019 von 1,84% fort, so würde die Produktion bis zum Jahr 2030 nur um knapp 15% steigen. All diese Berechnungen berücksichtigen allerdings keine aus dem Klimawandel resultierenden wirtschaftlichen Auswirkungen.

Tabelle

Produktion im Jahr 2030 bei verschiedenen Energieverbrauchs- und Energieeffizienzscenarien

Beschreibung	jährliche Wachstumsrate von A_{Et}	jährliche Veränderung des Energieeinsatzes	Veränderung der Produktion bis 2030 im Vergleich zu 2021
Energiewende mit starkem Anstieg der Wachstumsrate von A_{Et} (Produktionsanstieg entspricht bisheriger GD-Projektion)	+5,6%	-4,4%	+11,7%
Energiewende ohne Anstieg der Wachstumsrate von A_{Et}	+2,7%	-4,4%	-15,8%
Keine Energiewende: Konstanter Energieverbrauch wie im Jahr 2019, Wachstumsrate von A_{Et} wie im Durchschnitt von 2000-2019	+2,7%	0,0%	+26,9%
Keine Energiewende: Energieverbrauch sinkt jährlich wie im Durchschnitt von 2000-2019, Wachstumsrate von A_{Et} wie im Durchschnitt von 1971-2019	+2,7%	-0,5%	+23,7%
Keine Energiewende: Energieverbrauch sinkt jährlich wie im Durchschnitt von 2000-2019, Wachstumsrate von A_{Et} wie im Durchschnitt von 2000-2019	+1,8%	-0,5%	+14,8%

Schlussfolgerung

Gemessen an historischen Trends sind die Emissionsziele aus dem Klimaschutzgesetz für Deutschland sehr ehrgeizig. Dazu kommen der Wegfall einer emissionsarmen Grundlasttechnologie durch den Atomausstieg und neue Unsicherheiten in Bezug auf das relativ emissionsarme Erdgas aufgrund der Spannungen mit dem Hauptlieferanten Russland. Erdgas war für einen vorgezogenen Kohleausstieg als Brückenenergieträger fest eingeplant, um während des Ausbaus erneuerbarer Energien Versorgungssicherheit garantieren zu können. Zweifellos stellt es daher eine Herausforderung dar, das deutsche Energiesystem rechtzeitig für die Erreichung der Emissionsziele zu transformieren.

Da die Reduktion der CO₂-Emissionen bis 2030 um 65% im Vergleich zum Jahr 1990 eine drastische Reduktion des Primärenergieverbrauchs fossiler Energieträger notwendig macht, der nur zu einem relativ geringen Teil durch den Ausbau erneuerbarer Energien ausgeglichen werden kann, ist eine Energiewende

ohne Produktionseinbußen nur mit deutlichen Technologiesteigerungen, die einen effizienteren Einsatz von Energie ermöglichen, durchführbar. Die historische Analyse zeigt, dass ein solches Szenario denkbar ist. Ausgelöst durch die starken Preissteigerungen fossiler Energieträger kam es ab den 1970er Jahren zu einem starken Anstieg der Wachstumsrate des energiesparenden technischen Fortschritts. Ein erneuter etwa ebenso starker Anstieg würde laut der Modellrechnung Produktionseinbußen verhindern. Dies ließe sich etwa durch erhöhte Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Energieeffizienz und Investitionen, die den bestehenden Kapitalstock durch klimafreundliche Alternativen substituieren, erreichen. Forschung, Substitution des Kapitalstocks und der Ausbau erneuerbarer Energien binden Ressourcen, die nicht für anderweitige Zwecke genutzt werden können. Einschränkungen beim Konsum sind somit nicht zu vermeiden, wenn nicht der volkswirtschaftliche Kapitalstock durch ausbleibende Ersatzinvestitionen an anderer Stelle geschwächt werden soll.

Das Zusammenwirken von technischem Fortschritt und Erneuerung des Kapitalstocks zeigt sich auch im Aufbau negativer Emissionstechnologien. Um bis zum Jahr 2045 Netto-Treibhausgasneutralität zu erreichen, gibt das Klimaschutzgesetz als Ziel vor, bis dahin 40 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente durch Negativemissionen aus Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft in natürlichen Senken zu binden, um nicht vermeidbare Restemissionen aus anderen Sektoren auszugleichen. Weitere Negativemissionen können durch technische Lösungen, wie die Entnahme von CO₂ aus der Luft und dessen Speicherung in geologischen Formationen oder die Umwandlung in festen Kohlenstoff, erreicht werden. Hier bestehen derzeit allerdings noch „substanzielle Innovationslücken“.⁷ Insofern sind über das Jahr 2030 hinaus weitere hohe Aufwendungen für Forschung und Investitionen notwendig, die nicht der Produktion, sondern ausschließlich der Emissionssenkung dienen. Dafür sollten bereits heute Forschungskapazitäten aufgebaut werden und zukünftig Investitionen zur weiteren technischen Verbesserung des Kapitalstocks getätigt werden.

⁷ *Wissenschaftsplattform Klimaschutz*. Auf dem Weg zur Klimaneutralität: Umsetzung des European Green Deal und Reform der Klimapolitik in Deutschland. [Jahresgutachten 2021 der Wissenschaftsplattform Klimaschutz](#), Berlin 2022.

Schwerpunktthema

Wissenschaftlicher Ansprechpartner

Prof. Dr. Stefan Kooths
Kiel Institut für Weltwirtschaft (IfW)
Tel +49 431 8814 579
Stefan.Kooths@ifw-kiel.de

www.gemeinschaftsdiagnose.de

Autor

Prof. Dr. Maik Wolters
Kiel Institut für Weltwirtschaft (IfW)
maik.wolters@ifw-kiel.de