

Mathias Mier

Steuerung der Energiewende durch optimale Subventionen und Steuern für fluktuierende erneuerbare Energien und Speicher

IN KÜRZE

Die Kosten von Technologien zur Nutzung fluktuierender erneuerbarer Energien (EE) wie Windturbinen und Photovoltaik-Anlagen sind in den vergangenen 15 Jahren enorm gefallen. Waren solche Technologien anfangs nur durch substantielle Subventionen für Firmen wirtschaftlich anzuwenden, sind sie jetzt nahe der Marktreife und haben gleichzeitig einen beträchtlichen Marktanteil erobert. Die Fluktuation der Verfügbarkeit von Wind und Sonne über das Jahr und über den Tag birgt ganz neue Herausforderungen, die durch den Weg hin zur CO₂-Neutralität noch substantiell verstärkt werden. Wir modellieren ein Elektrizitätssystem, in dem Wettbewerbsfirmen CO₂-emittierende fossile Technologien, fluktuierende EE und Speicher nutzen. Eine Pigou-Steuer auf den CO₂-Ausstoß fossiler Technologien ist weiterhin effizient, weil Preisschwankungen aus der Fluktuation von EE ausreichend Investitionsanreize schaffen, um in Speicher zu investieren. Weil bisher keine CO₂-Steuern flächendeckend eingeführt bzw. auf das optimale Niveau angehoben wurden, analysieren wir den zweitbesten Politikmix unter Annahme zu geringer CO₂-Besteuerung.¹

Fossile Technologien wie Dampfkraftwerke auf Kohle- oder Braunkohlebasis oder erdgasbefeuerte Gaskraftwerke stoßen bei der Verbrennung fossiler Energieträger CO₂ aus und tragen demnach zur Verstärkung des Klimawandels mitsamt den korrespondierenden Schäden bei. Fluktuierende EE wie Windturbinen und Photovoltaik-Anlagen hingegen sind CO₂-neutral, aber ihr Angebot schwankt im Laufe des Jahres (insbesondere Wind) und Tages (insbesondere Sonne). Speicher können diesen Schwankungen begegnen, indem sie in Momenten mit viel Erzeugung aus Wind- und Sonnenenergie *einspeichern* und in Momenten mit wenig Erzeugung wieder *ausspeichern*.

DAS SPEICHEROPTIMIERUNGSPROBLEM

Wir vereinfachen das Speicherproblem durch die Annahme, dass sich identische Perioden der Verfügbar-

keit von EE aneinanderreihen, und optimieren daher nur diesen einen Zeitzyklus mit jeweils identischem Einspeicher- und Ausspeichermuster. Dies ermöglicht es, das Speicheroptimierungsproblem mathematisch zu lösen. Die Dynamik der optimalen Speichernutzung ist allerdings sehr intuitiv und wird durch Abbildung 1 vereinfacht dargestellt. Die obere Kurve bildet den Preis ab, die mittlere Kurve zeigt eine exemplarische Verfügbarkeit von EE, und die unterste Kurve illustriert den Speicherfüllstand über die Zeit t . Durch die Aneinanderreihung identischer Speicherperioden muss der Füllstand des Speichers zu Beginn und Ende identisch sein. Gleichzeitig wird der Speicher immer zu einem Zeitpunkt voll sein, d.h. an seine Kapazitätsgrenze stoßen.

Die Verfügbarkeit ist am Anfang minimal, steigt dann an und fällt schließlich wieder auf das Ausgangsniveau ab. Ist die Verfügbarkeit von EE am geringsten, werden Fossile voll benutzt, und der Marktpreis ist am höchsten, d.h., der Strom im Speicher ist gleichzeitig am wertvollsten. Als Konsequenz wird der Speicher sukzessive geleert. Während dieser Ausspeicherperiode verhindert ein optimales Fahren des Speichers Preisarbitrageeffekte, so dass der Preis während der Ausspeicherperiode konstant bleibt.

Ist die Verfügbarkeit von EE etwas höher (bzw. ist der Speicher leer), dann hört die Speicherbenutzung auf. Nun teilen sich Fossile und EE den Markt. Hier gibt es drei mögliche Fälle, die durch die Knicke in der Preiskurve illustriert werden: (1) Fossile und EE werden voll benutzt (der Preis ist höher als die marginalen Kosten von fossilen Energien), (2) EE werden voll benutzt und Fossile nur noch teilweise, (3) EE werden voll benutzt und Fossile gar nicht mehr.

Es hängt von der Größe der Speicherkapazität – und diese wiederum von den Kosten – ab, an welchen der drei Fälle sich die Einspeicherperiode anschließt, zu deren Ende der Speicher komplett gefüllt ist. Während dieser Einspeicherperiode ist der Preis konstant und verhindert so Preisarbitrage. Ist die EE-Kapazität sehr hoch, dann kann es sein, dass innerhalb der Einspeicherperiode eine Unterperiode auftritt, in der die

¹ Der Beitrag fasst die Ergebnisse von Helm und Mier (2021) zusammen. Eine genaue Beschreibung des Modells und der Berechnungen sind in ebenfalls in Helm und Mier (2021) zu finden.

Erzeugung von fluktuierenden EE abgeriegelt werden muss.

PIGOU-STEUER

Es gibt Einigkeit darüber, dass Externalitäten optimal korrigiert (internalisiert) werden, wenn eine Steuer in Höhe des marginalen Schadens gesetzt wird (Van Der Ploeg und Withagen 2014, Golosov et al. 2014).² Hält dieser Zusammenhang immer noch, wenn fluktuierende EE und Speicher die Bildfläche betreten? Wir zeigen, dass dem so ist: Das soziale Optimum folgt aus der Implementierung einer Pigou-Steuer in Höhe des marginalen Schadens auf fossile Stromerzeugung

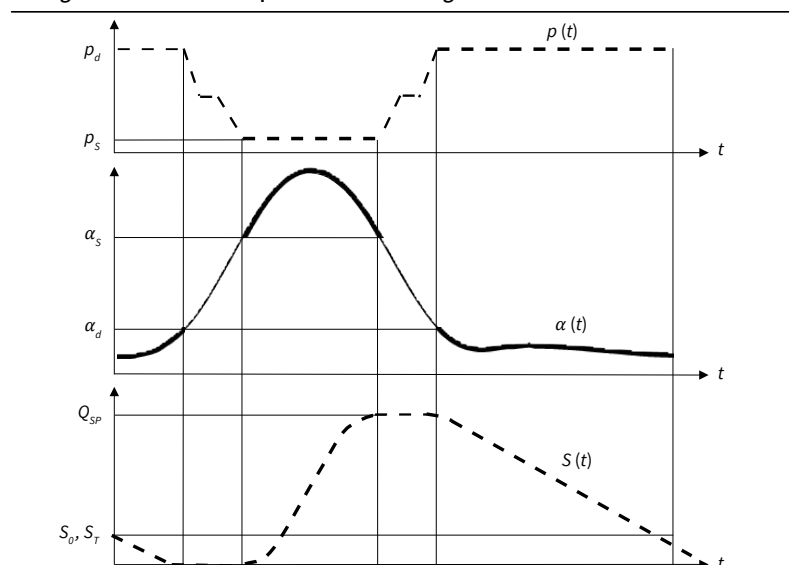
LEARNING-EXTERNALITÄT

Neben Externalitäten durch den Ausstoß von CO₂ gibt es noch weitere zu korrigierende Externalitäten. Angenommen die Kapazitätskosten von fluktuierenden EE und Speichern fallen bei steigender realisierter Gesamtkapazität.³ Wie subventioniert man nun fluk-

² Dies gilt jedenfalls solange, wie soziale und private Diskontraten als gleich angenommen werden (Mier, Adelowo und Weissbart 2021).
³ Helm und Mier (2021) nehmen an, dass fossile Technologien keiner weiteren Lernentwicklung unterliegen.

Abb. 1

Verfügbarkeit von EE und Speicherentscheidungen



Anmerkung: t ist die Zeit; t_0, T markieren Beginn und Ende einer jeden Periode; $p(t)$ ist der Preis über die Zeit; p_d ist der Preis während der Ausspeicherperiode; p_s ist der Preis während der Einspeicherperiode; $\alpha(t)$ ist die Verfügbarkeit von EE über die Zeit; α_d ist die Verfügbarkeit am Anfang und Ende der Ausspeicherperiode; α_s ist die Verfügbarkeit am Anfang und Ende der Einspeicherperiode; $S(t)$ ist der Speicherstand über die Zeit; S_0, S_T sind die Speicherstände zu Beginn und Ende einer jeden Periode; Q_{sp} ist die maximale Speicherkapazität.
 Quelle: Darstellung des Autors.

© ifo Institut

METHODIK

In Helm and Mier (2021) benutzen wir die drei verschiedenen Technologien und lösen ein dreistufiges Optimierungsproblem per Rückwärtsinduktion. Im ersten Schritt werden die Produktionsentscheidungen fossiler Technologien und fluktuierender EE sowie Ein- und Ausspeicherentscheidungen für gegebene Kapazitätsentscheidungen maximiert. Wir benutzen »Value Functions« und »Karush-Kuhn-Tucker-Multiplier« für die ersteren beiden Technologien. Die Speicheroptimierung ist ungleich komplizierter. Wir beschreiben das dynamische Speicheroptimierungsproblem unter Zuhilfenahme der »Optimal Control Theory« und maximieren final die »Hamiltonian-Funktion« des Problems. Die jeweiligen Speicherentscheidungen kontrollieren den Speicherfüllstand. Unter der Annahme eines sich identisch und wiederholenden Zyklus der Verfügbarkeit von EE mit einem lokalen Maximal- und einem lokalen Minimalwert können wir das Problem mathematisch lösen. Insbesondere bestimmen wir implizit die Dauer von Ein- und Ausspeicherzyklus sowie die jeweiligen absoluten Ein- und Ausspeicherentscheidungen. Per implizitem Funktionentheorem kann auch die komparative Statik verschiedener Variablen bestimmt werden.

Als nächstes werden Kapazitätsentscheidungen optimiert. Unterstellt werden zwar nachfolgende,

aber bereits vorher optimierte Produktions- bzw. Speicherentscheidungen. Ebenso wird angenommen, dass CO₂-Emissionen fossiler Technologien und der Konsum besteuert werden und/oder Subventionen auf EE- und Speicherkapazitäten zu zahlen sind. Wir definieren das Maximierungsproblem erneut in der Form von Value Functions aus Sicht von Wettbewerbsfirmen, die jeweils nur in einer der drei Technologien aktiv sind.¹

Zum Abschluss werden optimale Subventionen und Steuern bestimmt. Dabei benutzen wir insbesondere die Bedingungen 1. Ordnung aus dem Kapazitätsentscheidungsproblem im zweiten Schritt, aber auch das abgeleitete Wissen über Produktions- und Speicherentscheidungen. »Kosten von Politiken« tauchen dabei nicht direkt in der Wohlfahrtsfunktion auf, weil die Kosten auf der einen Seite Profite für die andere Seite sind (die Firmen). Die Politiken werden also nur indirekt über das Profitmaximierungskalkül der Wettbewerbsfirmen im ersten und zweiten Optimierungsschritt in das Wohlfahrtskalkül eines sozialen Planers einbezogen.

¹ Wettbewerbsfirmen beziehen in ihrem Maximierungskalkül nicht mit ein, wie eigene Kapazitätsentscheidungen die jeweilige Gesamtkapazität einer der drei Technologien verändert.

tuierende EE und Speicher richtig? Die Antwort ist erstmal recht einfach: Eine Kapazitätssubvention in Höhe der »Learning-Externalität«! Firmen investieren in Kapazität und beachten bei ihrem Kalkül nur, wie ihre Kosten dadurch fallen, aber nicht wie die Kosten aller anderen Firmen fallen (Learning-by-Doing). Die Gesamtkapazität wiederum ergibt sich aus den einzelnen Kapazitäten von Firmen. Unter der zusätzlichen Annahme von Wettbewerbsmärkten beachten Firmen nicht, wie ihre einzelnen Kapazitätsentscheidungen die Gesamtkapazität verändern. Folglich beachten sie auch nicht, wie die marginalen Kapazitätskosten mit der Gesamtkapazität fallen. Als Konsequenz investieren Wettbewerbsfirmen zu wenig in Technologien mit fallenden marginalen Kapazitätskosten wie Windturbinen, Photovoltaik-Anlagen und Batteriespeicher. Die optimale Subvention korrigiert die Learning-Externalität, indem für den Gesamteffekt fallender marginaler Kosten korrigiert wird.

KONSUMSTEUER

In der Realität sind CO₂-Steuern oft niedriger als der marginale Schaden (Douenne und Fabre 2021). Allerdings kann der fehlenden Internalisierung durch eine Konsumsteuer entgegengewirkt werden. Eine solche Steuer erhöht den Preis nach Strom und reduziert somit die Nachfrage, was zum effizienten CO₂-Ausstoß führen kann. Solch eine Konsumsteuer schadet allerdings fluktuierenden EE, so dass diese subventioniert werden müssen für entgangene Gewinne. Speicher hingegen müssen in der Regel besteuert werden. Da mehr als eine Einheit aus dem Speicher entnommen werden muss, um eine Einheit auf dem Markt zu verkaufen, und weniger als eine Einheit in den Speicher gepackt werden kann, sind Effizienzverluste eines Speicherzyklus fundamental. Zyklusverluste erhöhen die Stromerzeugung und insbesondere jene aus fossilen Energien und erhöhen somit den CO₂-Ausstoß (jedenfalls solange fossile Energien während Ein- und Ausspeichervorgang aktiv sind).

Sollten EE irgendwann so stark verfügbar sein, dass sie die gesamte Nachfrage (Konsumenten und Speicher) allein decken können, dann führt die Konsumsteuerlösung nicht mehr zum Wohlfahrtsoptimum. Auch die optimalen Subventionen für EE und Speicher verändern sich leicht. Dann könnte es so sein, dass Speicher nicht mehr zu mehr CO₂-Ausstoß führen, sondern in der Tat zu weniger (und dafür dann auch subventioniert werden sollten).

KAPAZITÄTSSUBVENTIONEN

Die Konsumsteuer scheint eine elegante Lösung für politökonomische Probleme (Lobbying, Verteilungskonflikte) zu sein, ist aber im Endeffekt nur eine Pigou-Steuer durch die Hintertür, komplementiert mit zusätzlichen Subventionen (für fluktuierende EE) und Steuern (für Speicher). Sobald aber fluktuierende EE

den gesamten Markt zu einem bestimmten Zeitpunkt decken können (also deren Anteile ungefähr so hoch sind wie derzeit in Deutschland, ca. 100 GW kombinierte Windturbinen- und Photovoltaik-Anlagen-Kapazität), dann müssen andere Lösungen gefunden werden. Anstatt der Konsumsteuer könnten dann zusätzliche Kapazitätssubventionen gezahlt werden. Wir berechnen diese für drei unterschiedliche Fälle: (1) fossile Technologien werden immer voll benutzt, (2) fossile Technologien werden immer benutzt, aber nicht immer voll, und (3) fossile Technologien werden nicht mehr während der Einspeicherperiode benutzt. Schlussendlich ist dies der entscheidende Faktor, ob Speicher entweder Steuern zahlen (müssten) oder Subventionen erhalten. EE hingegen erhalten immer eine Subvention. Die finale Höhe der Subvention hängt von vielen Faktoren ab (Preiselastizitäten zu unterschiedlichen Zeitpunkten sowie Technologieanteile). Kurz gesagt, werden die EE aber für ihren Vermeidungseffekt subventioniert, also wie viel von fossiler Erzeugung (und somit CO₂-Emissionen) sie indirekt vermeiden. Dieser Verfremdungseffekt und damit auch die Subvention fällt übrigens mit höheren Anteilen von EE.

Für Speicher spielen, wie oben bereits gesagt, die Einspeicherverluste eine herausragende Rolle. Einspeicherung passiert, wenn der Preis von Strom (durch eine hohe Verfügbarkeit von EE) gering ist. Die Einspeicherentscheidung hat einen preishebenden Effekt, von dem natürlich auch die fossilen Technologien profitieren. Ausspeicherung passiert, wenn der Preis von Strom (durch eine geringe Verfügbarkeit von EE) hoch ist. Die Ausspeicherentscheidung hat einen preissenkenden Effekt. Zu diesem Zeitpunkt ist auch die Erzeugung von fossilen Technologien am wertvollsten und daher am höchsten. Schlussendlich werden fossile Technologien hier verdrängt und ihre Fähigkeit, Profite zu erwirtschaften, eingeschränkt, da Ausspeicherung den Preis drückt. Die Summe beider Effekte entscheidet, ob fossile Technologien nun durch die Existenz von Speichern gefördert werden oder nicht. Da der preishebende Einspeichereffekt durch die Effizienzverluste des Einspeichervorgangs (mehr Strom wird dem Markt entnommen als im Speicher ankommt) den preissenkenden Ausspeichereffekt durch die Effizienzverluste des Ausspeichervorgangs (mehr Strom muss dem Speicher entnommen werden als auf dem Markt angeboten wird) dominiert, müssen Speicher in der Regel besteuert werden. Diese Steuer ist konstant für verschiedene Anteile von EE, weil die Zyklusverluste per Speichereinheit konstant sind. Dies gilt aber nur solange, wie fossile Technologien während des Einspeichervorgangs aktiv sind. Sind diese durch fluktuierende EE vollständig verdrängt, dann fällt der für fossile Technologien positive preishebende Einspeichereffekt weg, und es verbleibt lediglich der für fossile Technologien negative preissenkende Ausspeichereffekt. Final müssen Speicher dann ebenfalls subventioniert werden.

ILLUSTRATION

Wir erweitern unsere theoretischen Ergebnisse um eine numerische Optimierung und kalibrieren das theoretische Modell mit deutschen Daten zur EE-Verfügbarkeit sowie sinnvollen Kosten. So können wir nicht nur die optimalen Subventionshöhen, sondern auch Kapazitätsentscheidungen bestimmen (vgl. Abb. 2). Auf der linken y-Achse sind Kapazitäten von EE (grüne Kreise), fossilen Technologien (graue Kreise) und Speichern (gelbe Kreise) sowie gesamte Subventionszahlungen (grünelbe Dreiecke) abgetragen. Die Kreise symbolisieren jeweils die Lösung unter optimalen Kapazitätssubventionen, wenn die CO₂-Steuer lediglich 50% des sozialen Schadens internalisiert.⁴ Auf der rechten y-Achse sind Kapazitätssubventionen für EE (grüne Vierecke) und Speicher (gelbe Vierecke) abgetragen. Kapazitäts- und Subventionsentscheidungen werden durch fallende Kapazitätskosten für EE und Speicher dynamisiert. Beide Kosten fallen mit derselben Rate von 800 EUR/kW bzw. 80 EUR/kWh auf 500 EUR/kW bzw. 50 EUR/kWh.⁵

Die Abbildung muss von rechts nach links gelesen werden. Bei hohen Kosten für EE und Speicher teilen sich fossile Technologien den gesamten Markt unter sich auf. EE diffundieren bei Kosten von 780 000 EUR/MW. Bei ca. 765 000 EUR/MW springt der EE Anteil.⁶ Mit diesem hohen Anteil von EE werden auch Speicher wirtschaftlich. Bei Kosten von 745 EUR/kW (bzw. 74,5 EUR/kWh) werden die ersten Speicher gebaut. Die Subvention für EE (grüne Vierecke) ist konstant bis zum Sprung (macht mehr als 20% der Kapazitätskosten aus). Danach fällt diese sukzessive ab. Auch die Subvention für Speicher ist konstant, allerdings viel länger und ihr Anteil an den Kapazitätskosten initial fast 50%. Es bestätigt sich das theoretische Resultat, dass die Speichersubvention (und auch die Steuer) konstant ist, bis Fossile den Markt (bei ca. 635 EUR/kW bzw. 63,5 EUR/kWh) verlassen. Alles was danach passiert, wurde im theoretischen Modell nicht weiter untersucht, ist aber von politischer Brisanz.

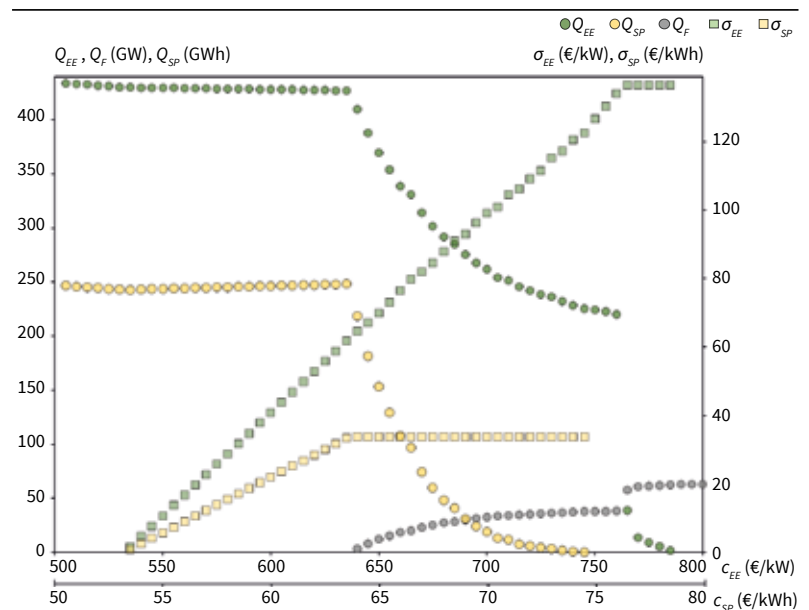
Sobald fossile Technologien aus dem Markt verdrängt sind, sollten auch alle Subventionen und Besteuerungen beendet werden. Dies ist aber falsch. Eine Pigou-Steuer würde die fossilen Technologien davon abhalten, wieder in den Markt einzutreten. Sie abzuschaffen, direkt nachdem die letzte fossile Technologie vom Markt gegangen ist, würde nur zu einem Wiedereintritt führen. Dasselbe geschieht mit den Subventionen. Die Subventionen für EE und Speicher direkt nach der Verdrängung der fossilen Technologien

zu stoppen, würde zu einem Wiedereintritt der Fossilen führen. Demnach müssen die Subventionen noch lange über die Marktverdrängung der Fossilen hinaus bezahlt werden, bis die Kosten soweit gefallen sind, dass sie ausreichen, um die fossilen Energien dauerhaft zu entfernen. Dabei ist noch nicht einmal klar, dass die Kosten tatsächlich so stark fallen. Und wir reden hier von Subventionen in Höhe von 25 Mrd. Euro zum Zeitpunkt der fossilen Verdrängung. Dies macht deutlich, was es für Regierungen bedeuten würde, wenn sie CO₂ nicht optimal (in Höhe des marginalen Schadens) besteuern. Es mag Gründe für die aktuelle Situation eines Mixes aus CO₂-Steuern und Subventionen für saubere Technologien geben, allerdings sollte die Situation zumindest nahe der fossilen Verdrängung hin zu alleiniger und optimaler CO₂-Besteuerung geändert werden.

Die Illustration scheint die Fälle, bei denen Speicher besteuert werden müssten, zu negieren. Und tatsächlich müssten die Eingangsparameter sehr geändert werden, um ein kleines Fenster der Speicherbesteuerung (im numerischen Optimierungsmodell) zu schaffen.

Wendet man allerdings die theoretischen Ergebnisse auf reale Strommärkte an, sieht es anders aus: So gut wie alle Märkte lassen fossile Technologien laufen, obwohl gleichzeitig Pumpspeicherkraftwerke ihre Arbeit verrichten. Diese müssten eigentlich besteuert werden (für ihre Wirkungsgradverluste und den Anstieg fossiler Erzeugung). Lediglich ein System mit sehr hohen Anteilen von EE (z.B. Norwegen) könnte von der Besteuerung ausgenommen werden. Darüber hinaus laden Elektroautos überall, egal wie hoch oder niedrig gerade das Stromangebot aus fluktuierenden EE ist.

Abb. 2
Marktdiffusion und optimale Kapazitätssubventionen



Anmerkung: Q_{EE} ist die Kapazität von EE; Q_{SP} ist die Kapazität von Speichern; Q_F ist die Kapazität von Fossilen; σ_{EE} ist die Kapazitätssubvention für EE; σ_{SP} ist die Kapazitätssubvention auf Speicher; c_{EE} sind die Kapazitätskosten von EE; c_{SP} sind die Kapazitätskosten von Speichern.
Quelle: Darstellung des Autors.

⁴ Die Lösungen aus der Pigou-Steuer und der Konsumsteuer werden der Übersichtlichkeit halber nicht gezeigt.
⁵ Die Kosten von EE reflektieren optimistische Szenarien für Kostenentwicklungen von 2020 bis 2050. Die Kosten für Speicher hingegen sind deutlich unter den optimistischsten Kostenschätzungen. Dies ist notwendig, um einen relevanten Speicheranteil zu erhalten, und gibt einen Hinweis darauf, ab welchen Kosten Speicherlösungen wirtschaftlich werden.
⁶ Dieser Sprung ist in Helm und Mier (2019) tiefergehend analysiert und erklärt.

Auch diese müssten besteuert werden. Hier sind zwar auch die Wirkungsgradverluste äußerst gering (Pumpspeicherkraftwerke haben 19% in obiger Kalibrierung, Elektroautos ca. 1% pro Zyklus). Jedoch fällt bei allen Elektroautos der preissenkende (fossile Technologien unterminierende) Ausspeichereffekt weg, weil der gespeicherte Strom zum Autofahren verbraucht wird.

POLITIKIMPLIKATIONEN

Pigou-Steuern auf CO₂-Ausstoß sind einfacher zu implementieren als komplizierte und schwieriger durchsetzbare Subventions-Steuer-Systeme für fluktuierende EE und Speicher. Der Zielkonflikt »hohe CO₂-Steuern vs. komplizierte Subventions-Steuer-Systeme« ist hier vor allem in Verteilungsfragen und potenziellen Wahlmisserfolgen zu suchen. Es ist einfacher, als Politikgestalter Geld zu verteilen, als Wähler durch Steuererhöhungen zu verprellen. Sollte allerdings der Preis für den Ausstoß von CO₂ entweder per Steuer oder Mengenziel auf das sozial optimale Niveau erhöht werden, beklagen sich Auto- und Heizlobby und zitieren insbesondere Geringverdiener als Opfer der Energiewende.

Wir entwickeln hier eine Blaupause, wie mit Subventionen (und wiederum Steuern) gegensteuert werden sollte. Allerdings werden auch Steuern

auf Speicher und ebenso auf die Einspeicherung von Elektroautos unpopulär sein. Vielleicht sollte man sich, nachdem man sich durch die Formeln in Helm und Mier (2021) gewühlt hat, fragen, warum die optimale Steuer nicht einfach gleich dem marginalen Schaden gesetzt wird. Verteilungsfragen könnten, solange der CO₂-Ausstoß und somit das Steuereinkommen aus der CO₂-Besteuerung noch hoch sind, durch Revenue Recycling adressiert werden. Insbesondere wenn man bedenkt, welche enorme Kosten eine Nachsubventionierung von EE und Speichern über den Punkt der fossilen Verdrängung hinaus verursacht.

LITERATUR

- Douenne, T. und A. Fabre (2021), »Yellow Vests, Pessimistic Beliefs, and Carbon Tax Aversion«, *American Economic Journal: Economic Policy* (im Erscheinen).
- Golosov, M., J. Hassler, P. Krusell und A. Tsyvinski (2014), »Optimal Taxes on Fossil Fuel in General Equilibrium«, *Econometrica* 82(1), 41–88.
- Helm, C. und M. Mier (2019), »On the Efficient Market Diffusion of Intermittent Renewable Energies«, *Energy Economics* 80, 812–830.
- Helm, C. und M. Mier (2021), »Steering the Energy Transition in a World of Intermittent Electricity Supply: Optimal Subsidies and Taxes for Renewables and Storage«, *Journal of Environmental Economics and Management* 109, 102497.
- Mier, M., J. Adelowo und C. Weissbart (2021), »Taxation of Carbon Emissions and Local Air Pollution in Intertemporal Optimization Frameworks with Social and Private Discount Rates«, ifo Working Paper No. 360.
- Van Der Ploeg, F. und C. Withagen (2014), »Growth, Renewables, and the Optimal Carbon Tax«, *International Economic Review* 55(1), 283–311.