

Sophia Appl Scorza, Johannes Pfeiffer, Alex Schmitt und Christoph Weissbart

Kurz zum Klima: »Sektorkopplung« – Ansätze und Implikationen der Dekarbonisierung des Energiesystems

Der deutsche Klimaschutzplan sieht vor, die Treibhausgasemissionen in Deutschland bis 2050 um 80 bis 95% gegenüber 1990 zu reduzieren. Auch wenn im Detail noch große Unsicherheit darüber besteht, wie dieses Ziel konkret erreicht werden soll, ist in jedem Fall davon auszugehen, dass die Nutzung erneuerbarer Energien nicht nur im Stromsektor erheblich ausgebaut werden muss. Abbildung 1 zeigt den heutigen Stand des Verbrauchs erneuerbarer Energien getrennt für den Strom-, Wärme- sowie den Verkehrssektor. Die Herausforderung, die die Vermeidungsziele bis zum Jahr 2050 mit sich bringen, ist trotz der dynamischen Entwicklung im Stromsektor über die vergangenen Jahre noch erheblich, vor allem im Wärme- und Verkehrssektor. In diesem Zusammenhang hat der Begriff der »Sektorkopplung« in den vergangenen Jahren in die energiepolitische Diskussion in Deutschland Einzug gehalten, nicht zuletzt durch eine Reihe von Studien, die zu diesem Thema veröffentlicht wurden (vgl. u.a. BDEW 2017; ESYS 2017; Wietschel et al. 2018). Dieser Artikel führt in das Thema »Sektorkopplung« ein. Er definiert zunächst den Begriff der Sektorkopplung und grenzt diesen ein, bevor einzelne Sektoren und Schlüsseltechnologien genauer betrachtet sowie aktuelle Kostenabschätzungen der Dekarbonisierung des Energiesystems diskutiert werden.

DEFINITION

So häufig der Begriff »Sektorkopplung« heutzutage in der energiepolitischen Diskussion vorkommt, so wenig eindeutig und einheitlich wird er verwendet. Gewisse Unterschiede bestehen dabei oft bereits bei dem jeweils zugrunde liegenden Sektorbegriff. Im Gegensatz zu der klassischen energiewirtschaftlichen Aufteilung nach den Verbrauchssektoren Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD), Industrie und Verkehr, wie sie sich auch in den Energiebilanzen wiederfindet, geht die Mehrzahl der vorliegenden Studien dabei von folgender Grobeinteilung aus: Auf der einen Seite steht der Stromsektor, in dem sowohl das Stromangebot (Stromerzeugung) als auch die bisherige Nachfrage (»originäre Stromanwendungen«) zusammengefasst werden, auf der anderen Seite die »Verbrauchssektoren« Verkehr, Industrie und Gebäude (vgl. DENA 2017; IWES 2015; ESYS 2017). Letzterer stellt keinen klassischen Verbrauchssektor im Sinne der

Energiebilanzen dar, sondern aggregiert die Nachfrage nach Niedertemperaturwärme von Haushalten und dem GHD-Sektor.

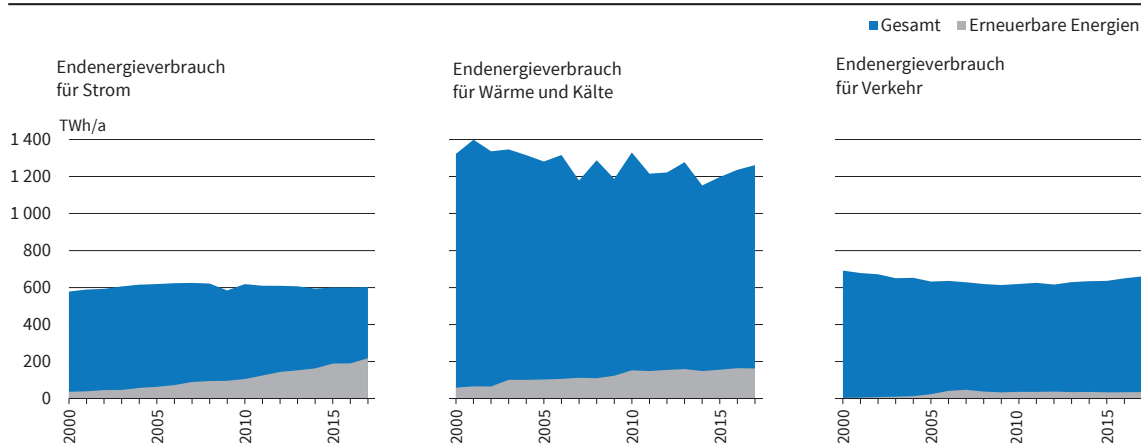
Ausgehend von dieser Einteilung, lassen sich nun unterschiedlich weit gefasste Auslegungen von Sektorkopplung finden:¹

- In einer engen Auslegung meint Sektorkopplung den Einsatz von Strom als Energieträger in den Verbrauchssektoren oder Anwendungen, in denen die Nutzung von Strom heutzutage noch eine geringe oder gar keine Rolle spielt. Ein naheliegender Beispielfall für diese Elektrifizierung ist der Einsatz von Fahrzeugen mit Elektromotor im Mobilitätssektor (anstelle von konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren). In diesem Fall werden die beiden Sektoren gekoppelt, indem der Elektrizitätssektor den primären Energieträger Strom für den Verkehrssektor liefert. Die Nutzung von Strom erfolgt dabei entweder direkt in batterieelektrischen Fahrzeugen oder indirekt, durch Wandlung des Stroms in einen anderen Energieträger (Power-To-X, siehe unten). Noch enger wird diese Auslegung des Sektorkopplungsbegriffs, wenn man nur den Überschussstrom miteinbezieht, der aus erneuerbaren Energien wie Windkraft und Photovoltaikanlagen stammt.
- Eine weiter gefasste Definition beschreibt Sektorkopplung als »den fortschreitenden Prozess der Substitution fossiler Energieträger durch überwiegend erneuerbar erzeugten Strom oder andere erneuerbare Energieträger und nachhaltige Energienutzungsformen, wie die Nutzung von Abwärme, in [...] sektorübergreifenden Anwendungen« (Wietschel et al. 2018). Während Strom auch in dieser Definition eine wichtige Rolle spielt, bezieht sich Sektorkopplung hier statt auf eine reine Elektrifizierung allgemeiner auf die Substitution fossiler Energieträger, die auch durch andere erneuerbare Energieträger wie den Einsatz von Biomasse in der Wärmeerzeugung erreicht werden kann. In diesem Fall kommt es nicht nur zwischen dem Stromsektor und den Verbrauchssektoren zu Kopplungen, sondern auch zwischen den Verbrauchssektoren untereinander, etwa wenn die Abwärme industri-

¹ Für einen Überblick über verschiedene Definitionen und Zugänge zum Begriff Sektorkopplung vgl. auch Wietschel et al. (2018).

Abb. 1

Historischer Energieverbrauch von 2000–2017
Gesamt und erneuerbare Energien



Quelle: BMWi, Zeitreihen der Erneuerbaren Energien in Deutschland, Stand: Februar 2018, Tabellen 1 und 7.

© ifo Institut

eller Prozesse als Wärmequelle für Gebäude eingesetzt wird.

- Noch weiter gefasst wird der Begriff Sektorkopplung etwa in einer Studie des Akademienprojekts »Energiesysteme der Zukunft« (ESYS 2017) oder in der »DENA-Leitstudie Integrierte Energiewende« (DENA 2017). Im Fokus steht hier eine »systemische« Perspektive, mit anderen Worten die »ganzheitliche Optimierung eines integrierten Energiesystems«. Im Vergleich zur vorangegangenen Definition schließt dies auch Maßnahmen wie die Integration von Speichern und Reservekraftwerken im Stromsektor sowie Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz ein.

SEKTORALE ANPASSUNGSPFADE

Nach dem Überblick über allgemeine Definitionen und Zugänge zum Begriff der Sektorkopplung im letzten Abschnitt soll im Folgenden auf Grundlage der bereits angesprochenen Studien näher auf die Entwicklungen in den einzelnen Sektoren im Zuge von Dekarbonisierung und Sektorkopplung eingegangen werden. Um die Diskussion möglichst knapp zu halten, beschränkt sie sich dabei auf Szenarien, die von einem Minderungsziel von 80% bis 85% (gegenüber 1990) ausgehen, und auf ausgewählte Ergebnisse und Schlüsseltechnologien.

Vergleichsweise geringe CO₂-Vermeidungskosten und noch relativ umfangreiche Potenziale führen zu einer überproportionalen Reduktion der CO₂-Emissionen von ca. 90% im Stromsektor (vgl. Öko-Institut 2015; BCG 2018). Zugleich wird zunehmend direkt oder indirekt über die Umwandlung in Wasserstoff, synthetische Brenn- oder Kraftstoffe oder Wärme erneuerbar erzeugter Strom in anderen Sektoren zu deren Dekarbonisierung eingesetzt. In Abhängigkeit von den jeweiligen Annahmen zu Effizienzfortschritten kommt es im Zuge dieser Entwicklung bei einem Großteil der Studien zu einem mehr oder weniger starken Anstieg des Strombedarfs bis 2050. Abbildung 2 zeigt die verschiedenen Szenarien zur Stromnachfrage für das Jahr 2050 und setzte diese in Relation zum Jahr 2016. Während in der BCG-Studie von einer nahezu konstanten Stromnachfrage (536 TWh/a im Jahr 2050) ausgegangen wird, rechnen die Analysen von DENA, ESYS, IWES und Öko-Institut mit einem Anstieg der Nachfrage auf ein Niveau zwischen 601 TWh/a (Öko-Institut) und bis zu 960 TWh/a (ESYS). Letzteres würde einem Anstieg der Stromnachfrage von fast 80% entsprechen, getrieben durch die Elektrifizierung von Anwendungen außerhalb des Stromsektors in Kombi-

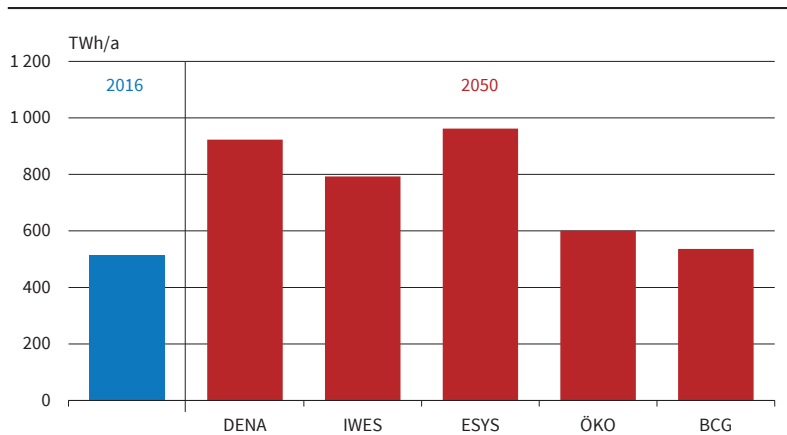
All diesen Definitionen ist gemein, dass Sektorkopplung zu einer Substitution von fossilen Energieträgern in den verschiedenen Sektoren führt, wenn auch in unterschiedlich starker Intensität. Für viele Studien ist die Verminderung von Treibhausgasemissionen, die mit dieser »Dekarbonisierung« der Verbrauchssektoren einhergeht, das übergeordnete Ziel von Sektorkopplung. Mit anderen Worten wird Sektorkopplung als Mittel angesehen, um die Reduktionsziele entlang eines Dekarbonisierungspfades zu erreichen.

Als weiteres Ziel von Sektorkopplung wird oft auch eine Steigerung der Flexibilität des Energiesystems und insbesondere der Stromnachfrage genannt (vgl. Wietschel et al. 2018). Diese ist nötig, da es im Zuge der »Energiewende« in den letzten Jahren bereits zu einem erheblichen Zubau von Anlagen zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, insbesondere Windkraft und Photovoltaik, kam. Wie weiter unten beschrieben, wird sich dieser Trend in Zukunft noch verstärken. Da die Stromerzeugung in solchen Anlagen und damit das Stromangebot je nach äußeren Umständen fluktuiert, muss auch die Stromnachfrage flexibler werden, um die Stabilität des Systems sicherzustellen.²

² Zu beachten ist allerdings, dass nicht alle Technologien, die zur Sektorkopplung beitragen, die Flexibilität der Stromnachfrage erhö-

hen. So senkt beispielsweise eine Elektrifizierung des Schwerlastverkehrs über Oberleitung-Lkws tendenziell eher die Flexibilität der Stromnachfrage (vgl. Wietschel et al. 2018).

Abb. 2
Tatsächliche Stromnachfrage im Jahr 2016 und Prognosen für das Jahr 2050



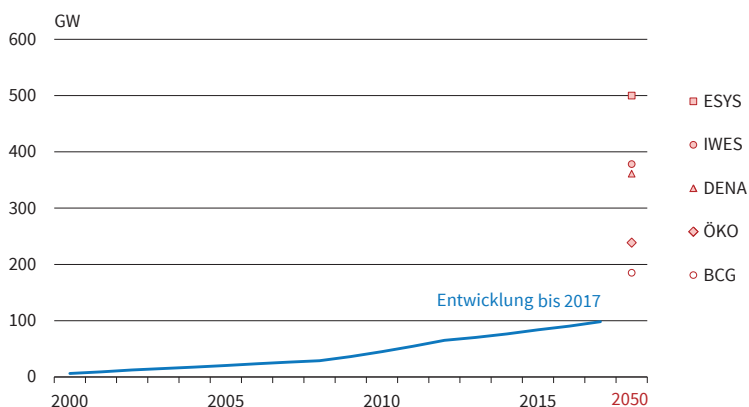
Quelle: Für 2016 Umweltbundesamt.

© ifo Institut

nation mit konservativen Annahmen zu den erzielbaren Effizienzfortschritten.

Erzeugungsseitig wird der Strombedarf im Zieljahr 2050 größtenteils durch erneuerbare Energien gedeckt. Dementsprechend beinhalten alle Studien den fortwährenden Ausbau von Wind- und Photovoltaikanlagen. Abbildung 3 zeigt sowohl die historische Entwicklung der erneuerbaren Erzeugungskapazitäten als auch ausgewählte Szenarien für das Jahr 2050. Hieraus ist ersichtlich, dass die vorliegenden Studien zu teils sehr unterschiedlichen Einschätzungen kommen. Die Szenarien von Öko-Institut und BCG rechnen mit einem moderaten Anstieg auf ungefähr 200 GW. Im Gegensatz dazu stehen die Einschätzungen von DENA und IWES mit 370 GW erneuerbarer Erzeugungskapazitäten, und vor allem die ESYS-Studie, in der die installierte erneuerbare Leistung insgesamt 500 GW im Jahr 2050 erreicht. Diesbezüglich stellt die DENA-Studie heraus, dass das bestehende Potenzial für Onshore-Windenergie bei einer Marktintegration von fast 200 GW fast komplett ausgeschöpft werden würde.

Abb. 3
Historische Entwicklung der akkumulierten Erzeugungskapazitäten für Wind und PV und Prognosen für das Jahr 2050



Quelle: BMWi, Zeitreihen der Erneuerbaren Energien in Deutschland (2018).

© ifo Institut

Die teils erheblichen Unterschiede zwischen den verschiedenen Studien, die Abbildungen 2 und 3 illustrieren, können auf den ersten Blick durchaus überraschen. Den einzelnen Studien liegen jedoch Modellrechnungen zugrunde, die sich auf teilweise unterschiedliche Annahmen stützen. So betrachten die Analysen von Öko-Institut und BCG beispielsweise auch die Wechselwirkungen zwischen Deutschland und dem europäischen Ausland, wodurch ein höherer Anteil von Stromimporten und entsprechend niedrigere inländischen Erzeugungskapazitäten als kosteneffizient angesehen werden.

Bei ESYS spielen Stromimporte in dem betrachteten Szenario (85%, »offen«) dagegen nur eine sehr geringe Rolle, was ein Hauptgrund für den hohen Anstieg der Erzeugungskapazitäten zu sein scheint. Darüber hinaus wird in der ESYS-Studie angenommen, dass sich die Stromnachfrage von Haushalten und der Industrie bis 2050 nicht verringert, während andere Studien zum Teil von einer erheblichen Steigerung der Energieeffizienz ausgehen.

Ein vergleichsweise einheitliches Bild ergibt sich hingegen bei der Rolle fossiler Kraftwerke. So wird das Ende der Kohleverstromung für das Jahr 2040 gesehen, danach verbleiben Kohlekraftwerke nur als gesicherte Leistung im Markt (BCG, DENA). Trotz des stark anwachsenden Kraftwerksparks insgesamt wird sich Deutschland nach Einschätzung von DENA und Öko-Institut von einem Nettoexporteur von Strom auf dem europäischen Markt bis 2050 zu einem Nettoimporteur wandeln.

Für den Verkehrssektor zeigen die betrachteten Studien, dass Effizienzsteigerungen für alle Arten der Mobilität notwendig sind. Weitgehend übereinstimmend wird im Personenverkehr zudem der Wechsel hin zu Elektroautos prognostiziert, die mit Batterien oder Brennstoffzellen betrieben werden. Unterschiedlich wird jedoch die zukünftige Entwicklung im Bereich des Schwerlast- und Langstreckenverkehrs beschrieben. So wird entweder die Verlagerung auf die Schiene (Öko-Institut), die Einführung von Oberleitungs-Lkws (BCG, IWES), oder die verstärkte Nutzung von synthetischen Kraftstoffen

(DENA, IWES) als optimal angesehen. Nur wenige Studien untersuchen auch mögliche Anpassungsmaßnahmen im internationalen Flug- und Schiffsverkehr. Für beide Märkte gelten synthetische Kraftstoffe als ökonomisch sinnvollste Alternative. Für den Schiffsverkehr könnte zusätzlich aber auch die Verwendung von Wasserstoff und Methan eine Option darstellen (ESYS).

Im Hinblick auf Wärme kann grundsätzlich zwischen Nieder- und Mitteltemperaturwärme sowie Hochtemperaturanwendungen vor allem in Prozessen der Industrie unterschieden werden. Der zukünftige Bedarf nach Niedrig- und Mitteltemperaturwärme von Haushalten, GHD und Industrie soll nach übereinstimmender Einschätzung der betrachteten Studien größtenteils durch den Einsatz von elektrischen Wärmepumpen bedient werden, woraus eine breite Marktdurchdringung mit ca. 14 Mio. Wärmepumpen resultiert (BCG). Parallel dazu wird eine merkliche Erhöhung der Sanierungsaktivitäten von Gebäuden mit einer jährlichen Sanierungsrate von ca. 2% als notwendig erachtet (Öko-Institut, BCG, DENA, ESYS). Ebenso wird der weitere Ausbau von Fernwärmenetzen und solarthermischen Anlagen als erforderlich angesehen (Öko-Institut, ESYS). Jedoch ist darauf hinzuweisen, dass es zumindest in den 80–85%-Szenarien aufgrund der Vielzahl von Wärmeanwendungen nicht zu der vollständigen Verdrängung von fossilen Energieträgern im Wärmesektor kommt (DENA, Öko-Institut).

Der Industriesektor, vor allem die Schwerindustrie, wird auch in Zukunft auf Hochtemperaturanwendungen zurückgreifen müssen. Die DENA-Studie stellt diesbezüglich heraus, dass geeignete Strategien zur vollständigen Dekarbonisierung dieser Anwendungen auf dem heutigen Stand der Technik noch nicht vorhanden sind. Dadurch ist hier sowohl die fortwährende Erhöhung der Energieeffizienz als auch der Wechsel zu CO₂-armen und synthetischen Brennstoffen notwendig. Die BCG-Studie, die annimmt, dass CCS-Technologien bei der Dekarbonisierung von Industrieprozessen zum Einsatz kommen können, sieht hingegen keine technischen Probleme bezüglich der Anpassungsfähigkeit der Schwerindustrie.

Zusätzlich ist darauf hinzuweisen, dass der vorliegende Beitrag ausschließlich die Anpassungsmöglichkeiten im Bereich der energiebezogenen Emissionen diskutiert. Mit Blick auf die gesamten Emissionen der deutschen Volkswirtschaft müssten zusätzliche die Emissionen aus Landwirtschaft und Abfallwirtschaft berücksichtigt werden, wie sie etwa in den Studien von BCG und Öko-Institut betrachtet werden.

Zur Einordnung der präsentierten Ergebnisse ist auch zu beachten, dass ambitioniertere Vermeidungspfade, die eine Minderung der CO₂-Emissionen von 90% oder mehr zum Ziel haben, noch wesentlich tiefgreifendere Änderungen des Energiesystems nach sich ziehen. Aufgrund der notwendigen Anpassungen der Infrastruktur und entsprechender Pfadabhängigkeiten erscheint ein Wechsel zwischen diesen unterschied-

lich ambitionierten Vermeidungspfaden nur in einem begrenzten Zeitfenster möglich.

Die in diesem Abschnitt beschriebenen sektoralen Entwicklungen implizieren einen starken Anpassungsbedarf des Energiesystems im Vergleich zum derzeitigen Technologie-Mix. Der nächste Abschnitt diskutiert, wie hoch die Kosten für diese Anpassung und damit für die Energiebereitstellung in der Zukunft ausfallen könnten.

KOSTEN

ESYS (2017) und BCG (2017) berechnen die »systemischen Gesamtkosten«, die für den Erhalt, Umbau und Betrieb des Energiesystems bis 2050 unter verschiedenen Emissionsreduktionspfaden anfallen. Dabei ist zu beachten, dass es sich dabei nicht nur um die Kosten von Sektorkopplung im engeren Sinne handelt, sondern um die Kosten einer umfassenden Energiewende. Berücksichtigt werden dementsprechend die Kosten für Investitionen in Neuanlagen und Ersatz von Altanlagen, Betriebs- und Wartungskosten sowie für wichtige Effizienzmaßnahmen und Gebäudesanierungen. Nicht enthalten sind Steuern und die Kosten negativer externer Effekte, die im Energiepreis nicht inbegriffen sind, aber soziale Kosten verursachen.

Grundsätzlich ist darüber hinaus anzumerken, dass solche Kostenschätzungen aufgrund der Ungewissheit bezüglich der Entwicklung neuer Technologien mit großer Unsicherheit behaftet sind. Sie sind Schätzungen nach dem heutigen Informationsstand. Kostendegressionen vollziehen sich erfahrungsgemäß in der Realität schneller als in den zumeist eher konservativen Annahmen der Studien.

Im Vergleich zu Referenzszenarien, die in beiden Studien von einer Emissionsminderung von ca. 60% im Jahr 2050 ausgehen, belaufen sich die Bruttomehrkosten für den 85% Pfad in der ESYS-Studie auf etwa 1,7 Billionen Euro, im Fall der BCG-Studie sind sie ähnlich hoch. Auf das Jahr gerechnet entspricht dies etwa 1,3% des deutschen BIP von 2016. Erhöht man die Reduktionsziele auf 90% bis 95%, sind überproportional höhere Investitionen notwendig, da fehlende Reduktionspotenziale in der Landwirtschaft durch den Einsatz teurerer Technologien, wie zum Beispiel synthetischer Kraftstoffe, in anderen Sektoren ausgeglichen werden müssen. In diesem Fall liegen die Kostenschätzungen von BCG und ESYS sehr weit auseinander: Mit etwa 4 Billionen Euro sind diese bei ESYS etwa doppelt so hoch wie die Schätzungen von BCG. Einen beträchtlichen Anteil daran haben die unterschiedlichen Annahmen bezüglich der Importe von synthetischen Kraftstoffen: BCG nimmt an, dass der Großteil dieser Kraftstoffe durch Stromimporte aus dem Ausland bereitgestellt wird. ESYS geht dagegen von einer wesentlich teureren heimischen Produktion aus, die mit hohen Infrastrukturkosten im Ausbau erneuerbarer Energien verbunden ist.

FAZIT

Um die Kosten einer Dekarbonisierung des Energiesystems so gering wie möglich zu halten, sollte unter »Sektorkopplung« mehr verstanden werden als die Elektrifizierung von Verbrauchssektoren, in denen Strom bisher nicht oder nur zu einem geringen Teil als Energieträger zum Einsatz kam. Entscheidend ist stattdessen eine gesamtsystemische Perspektive, die Kopplungspotenziale zwischen (Verbrauchs-)Sektoren genauso berücksichtigt wie sektorspezifische Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz oder der Flexibilität.

Neben einer allgemeinen Definition von Sektorkopplung wurden in diesem Beitrag spezifische Dekarbonisierungsszenarien diskutiert, die auf verschiedenen Studien und Modellrechnungen basieren. Dabei zeigt sich eine beträchtliche Streuung der Ergebnisse, sowohl im Hinblick auf individuelle Messgrößen, zum Beispiel beim Stromverbrauch, als auch im Aggregat auf die Kosten einer umfassenden Sektorkopplung und Energiewende. Dies ist vor allem dem Umstand geschuldet, dass verschiedene Studien unterschiedliche Annahmen in der Modellierung treffen, was ihre Vergleichbarkeit erschwert.

Ausgeblendet wurde bislang in diesem Beitrag die gleichwohl bedeutsame Frage, welche politischen Instrumente und regulatorischen Maßnahmen erforderlich sind, um den für die Umsetzung der Klimaziele nötigen Grad von Sektorkopplung bis 2050 und zugleich aus Systemsicht optimalen Mix von Technologien zu erreichen. Als wichtiger Schritt wird hierbei die Schaffung eines einheitlichen CO₂-Preissignals angesehen (ESYS, DENA), damit der Preis jedes Energieträgers dessen Kosten, inklusive seiner Emissionsintensität, über alle Sektoren hinweg gleich abbildet

und so ein direkter, unverzerrter Wettbewerb um die optimalen Dekarbonisierungsansätze zwischen verschiedenen Technologien und Verfahren möglich wird. Ein solcher einheitlicher CO₂-Preis könnte auf europäischer Ebene durch eine Reform und Ausweitung des EU-Emissionshandels ETS etabliert werden (vgl. Schmitt 2017). Da eine solche Entwicklung angesichts des Widerstands vieler EU-Länder aber unwahrscheinlich erscheint, wäre auch die Ergänzung des bestehenden EU-ETS durch eine nationale CO₂-Steuer denkbar. Für die erfolgreiche Dekarbonisierung des Energiesystems sind darüber hinaus sind weitere Maßnahmen zu diskutieren und zu prüfen, wie etwa zur Schaffung von Anreizen zur Flexibilisierung der Stromnachfrage, zur Förderung und/oder Finanzierung von Investitionen in Infrastruktur und mögliche Schutzmaßnahmen gegen »Carbon Leakage«. Diesem Thema wird sich die Reihe »Kurz zum Klima« in einer späteren Ausgabe im Detail widmen.

LITERATUR

- BDEW (2017), »10 Thesen zur Sektorkopplung«, Positionspapier, Berlin.
- BGC (2018), »Klimapfade für Deutschland«, Berlin.
- Dena (2017), *dena-Leitstudie Integrierte Energiewende: Impulse und Erkenntnisse aus dem Studienprozess – Zwischenfazit*, Berlin.
- ESYS (2017), *Sektorkopplung – Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems*, Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft, München.
- IWES (2015), *Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr*, bearbeitet durch die Institute Fraunhofer IWES, Fraunhofer IBP, IFEU, Stiftung Umweltenergierecht, Kassel.
- Öko-Institut (2015), *Klimaschutzszenario 2050*, 2. Endbericht, Berlin.
- Schmitt, A. (2017). »Kurz zum Klima: Der EU-Emissionshandel«, *ifo Schnelldienst* 70(9), 48–50.
- Wietschel, M. et al. (2018), »Sektorkopplung – Definition, Chancen, Herausforderungen«, Working Paper Sustainability and Innovation Nr. S 01.