

Working Paper Sustainability and Innovation
No. S 01/2018



Martin Wietschel, Patrick Plötz, Benjamin Pfluger,
Marian Klobasa, Anke Eßer, Michael Haendel,
Joachim Müller-Kirchenbauer, Johannes Kochems,
Lisa Hermann, Benjamin Grosse, Lukas Nacken,
Michael Küster, Johannes Pacem, David Naumann,
Christoph Kost, Robert Kohrs, Ulrich Fahl,
Simon Schäfer-Stradowsky, Daniel Timmermann,
Denise Albert

Sektorkopplung – Definition, Chancen und
Herausforderungen

Acknowledgement

Dieses Diskussionspapier entstand innerhalb des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Kopernikus-Projekt „Systemintegration“: Energiewende-Navigationssystem (ENavi) (Förderkennzeichen 03SFK4N0). Verschiedene Partner aus dem Arbeitspaket 8 „Integration der Sektoren Strom, Wärme, Mobilität“ sowie dem Arbeitspaket 4 „Rechtsetzung und Regulierung, institutionelle Analysen und Partizipation“ haben dieses Diskussionspapier zusammen erstellt.



Inhaltsverzeichnis

Seite

1	Einleitung und Motivation	1
2	Definition von Sektorkopplung aus verschiedenen Perspektiven	4
2.1	Zugang zu Sektorkopplung aus einer Sektorperspektive	4
2.2	Zugang zur Sektorkopplung aus einer technologischen Perspektive.....	7
2.3	Zugang zur Sektorkopplung aus einer System- und Infrastrukturperspektive	11
2.4	Zielsetzungen der Sektorkopplung	12
2.5	Definition der Sektorkopplung	13
2.6	Weitere Perspektiven auf die Sektorkopplung	16
2.6.1	Überblick	16
2.6.2	Energiewirtschaftlich-regulatorische Perspektive	16
2.6.3	Juristische Aspekte.....	24
2.6.4	IT-Aspekte der Sektorkopplung	31
3	Potentiale und Herausforderungen der Sektorkopplung von Angebots- und Nachfragesektoren	36
3.1	Potentiale der Sektorkopplung.....	36
3.1.1	Überblick	36
3.1.2	Beispielhafte Vertiefung der Potentiale für den Verkehrssektor	37
3.2	Erneuerbare Strombedarfsmengen und Systemherausforderungen	39
3.2.1	Überblick	39
3.2.2	Herausforderungen bei der Umsetzung der Sektorkopplung am Beispiel Erdgas.....	45
4	Zusammenfassung, Fazit und weiterer Forschungsbedarf	48
5	Quellen	51

1 Einleitung und Motivation

Sektorkopplung bzw. Sektorenkopplung ist in den letzten Jahren in der Energie- und Klimapolitik als neue Begrifflichkeit aufgetaucht. Der hohe politische Stellenwert der Sektorkopplung in der heutigen energiepolitischen Diskussion spiegelt sich unter anderem im Klimaschutzplan 2050 (BMUB 2016) und in dem Grünbuch Energieeffizienz (BMWi 2016a) wider. Sektorkopplung soll einen entscheidenden Beitrag zur Erreichung ambitionierter Klimaschutzziele durch den verstärkten Einsatz von erneuerbarem Strom in den Sektoren Verkehr, Wärme und Industrie zur Substitution von fossilen Energieträgern leisten (siehe BMWi 2016a; BMUB 2016; aber auch RP-Energie-Lexikon 2017; Wietschel 2015a). Auch in weiten Teilen der Energiewirtschaft besteht ein Interesse an Sektorkopplung zur Erschließung neuer Optimierungs- und Geschäftsmöglichkeiten innerhalb eines sich verändernden Energiesystems (vgl. BDEW 2017a; DVGW 2017). Nicht zuletzt widmet sich auch der wissenschaftliche Diskurs der Sektorkopplung. Gegenstand der Untersuchungen sind derzeit die Möglichkeiten und konkreten Ausgestaltungsformen einer Kopplung unterschiedlicher Sektoren bzw. Teilsysteme aus ökologischer, ökonomischer, technischer, regulatorischer und sozialwissenschaftlicher Sicht (u. a. IWES et al. 2015; Ecke et al. 2016, dena 2017a, Acatech 2017, Wietschel et al. 2015).

Wenngleich die Erforderlichkeit sowie die zukünftige Ausgestaltung der Sektorkopplung seitens Politik, Wirtschaft und Wissenschaft derzeit intensiv diskutiert werden, existiert bislang keine einheitliche und umfängliche Definition. Stattdessen liegen mitunter deutlich abweichende Auffassungen des Begriffs vor und es existieren eine Reihe von Definitionen bzw. Verständnisse des Begriffs Sektorkopplung nebeneinander. Eine Literatursichtung führt dazu, dass einige Autorinnen und Autoren Sektorkopplung eher sehr eng fassen und darunter nur die Umwandlung von Erneuerbaren (Überschuss-)Strom in Gase oder Flüssigkeiten fassen. Andere wiederum unter Sektorkopplung alle Aspekte der Verzahnung von energierelevanten Sektoren verstehen und hier lediglich eine Abgrenzung zu Lösungen sehen, die nur innerhalb eines Sektors auftreten, wie die Eigennutzung von einer Dach-PV-Anlage im Haus¹. Auch erfolgt der Zugang oft unter unterschiedlichen Perspektiven, wie z. B.

¹ Wenn aber der Strom aus der PV-Hausdachanlage zum Teil ins Stromnetz geliefert wird, stellt sich auch hier die Frage nach der Zugehörigkeit zur Sektorkopplung.

- über Technologien (Elektrofahrzeuge, Oberleitungs-Lkw, Elektrodenkessel in Industrie, Fernwärme, Mini-KWK und Gas-Wärmepumpe, ...)
- über Umwandlung in neue strombasierte Kraftstoffe (wie H₂, Methanol, Methan,)
- über Energieträger (Erneuerbare Strom, konventionelle Strom, Biomasse, ...)
- über politische Ziele (Treibhausgas (THG)-Minderung, Effizienzsteigerung, Beitrag zur Flexibilitätserhöhung, ...)
- über Systemintegration von Erneuerbaren (Flexibilität, Speicher, Gleichstromnetze...)
- über Sektorenvernetzung (Angebot- und Nachfragesektoren untereinander oder auch Nachfragesektoren miteinander)
- Umsetzungsanforderungen (Digitalisierung, Regulierung, juristische Fragen, ...).

Derart unterschiedliche Perspektiven lassen sich kaum miteinander vereinen, z. B.:

- Strombasierte, synthetische Flüssigkraftstoffe sind oft nicht energieeffizient.
- Oberleitungs-Lkw können kaum flexibel nach Anforderungen des Stromsystems gesteuert werden und erhöhen deshalb den Bedarf an Flexibilitätslösungen an anderer Stelle.
- Warum soll ein Brennstoffzellen (BZ)-Fahrzeug, betrieben mit H₂, über die Elektrolyse zur Sektorkopplung zählen, während das BZ-Fahrzeug, betrieben mit H₂ aus Biomasse, nicht dazu gehört?
- Warum ist ein Elektrofahrzeug eine Sektorkopplungsoption, aber ein Wasserkocher nicht?
- Wenn es um eine bessere Integration Erneuerbarer geht: Gehören Stromspeicher zur Sektorkopplung dazu oder nicht?

Die Unschärfen und unterschiedlichen Zugänge erlauben eine vielseitige Verwendung, führen aber zu Problemen, wenn unter dem Begriff Sektorkopplung Unterschiedliches verstanden wird oder unklar bleibt, was eigentlich genau darunter gefasst wird. Die existierenden Definitionsansätze greifen teilweise zu kurz und beleuchten jeweils nur spezifische Aspekte der Sektorkopplung. Ziel des vorliegenden Papiers ist es, diese definitorische Lücke durch eine Begriffsdefinition zu schließen, welche den Anspruch besitzt, ein möglichst allgemein gehaltenes und umfassendes Begriffsverständnis für Sektorkopplung zu entwickeln. Hierdurch soll eine einheitliche Diskussionsgrundlage für Wissenschaft,

Politik und Wirtschaft gebildet werden.² Dies schließt eine Beantwortung der nachfolgenden Leitfragen ein:

- *Wie grenzt sich Sektorkopplung von den existierenden Kopplungen im Energiesystem ab und warum wird eine neue Definition entwickelt?*
- *Welchen Beitrag können existierende Definitionsansätze für die Erarbeitung einer neuen Definition leisten und welche Schwachstellen weisen diese auf?*
- *Wie lässt sich Sektorkopplung definieren und welche Aussagen lassen sich zu zentralen Vertiefungsaspekten der Sektorkopplung treffen?*
- *Welche Chancen und Potentiale bietet die Sektorkopplung?*
- *Welche Herausforderungen existieren?*

In der deutschsprachigen Literatur werden die Begriffe „Sektorkopplung“ und „Sektorenkopplung“ verwendet. Unabhängig von möglichen Vorteilen der einzelnen Begriffe – wie etwa der sprachliche Hinweis auf die Verbindung mehrerer Teilbereiche oder Sektoren – werden beide für den vorliegenden Text als gleichwertig nebeneinanderstehend betrachtet. Der Einfachheit halber wird hier jedoch ohne Wertung durchgehend von „Sektorkopplung“ gesprochen.

In Kapitel 2 wird zuerst auf die Sektoren eingegangen, die bei der Sektorkopplung eine Rolle spielen. Dann werden verschiedene Zugänge zu der Thematik Sektorkopplung erörtert und energiewirtschaftliche Zielsetzungen, die mit der Sektorkopplung verfolgt werden können, diskutiert. Auf diese Vorarbeiten aufbauend wird eine Definition von Sektorkopplung aus einer technologischen Perspektive entwickelt. Dann werden regulatorische und juristische Aspekte sowie das Thema der Digitalisierung im Zusammenhang mit der Sektorkopplung erörtert.

In Kapitel 3 steht die Frage im Mittelpunkt, wie groß die Herausforderung der Substitution der fossilen Energieträger durch Strom mengenmäßig ist. In diesem Kapitel werden auch kurz die Potentiale der Sektorkopplung thematisiert. Eine Zusammenfassung und ein Fazit (Kapitel 4) schließen das Papier ab.

Das Papier ist ein Diskussionspapier. Die Autoren sind für Kommentare und Anregungen dankbar. Eine Weiterentwicklung dieses Diskussionspapiers ist angedacht.

² Diese einheitliche Definitionsgrundlage kann unter anderem einen Beitrag zur Strukturierung der weiteren Arbeiten im Forschungsprojekt Kopernikus ENavi liefern (siehe zu ENavi BMBF (2018)).

2 Definition von Sektorkopplung aus verschiedenen Perspektiven

Generell lassen sich unterschiedliche Zugänge zum Begriff Sektorkopplung unterscheiden. Neben der in diesem Kapitel 2 fokussierten technologischen und der System- bzw. Infrastrukturperspektive, lassen sich mit der regulatorischen und juristischen Behandlung der Sektorkopplung, der ökonomischen Betrachtung von Kosten und Erlösmöglichkeiten, IT-Aspekten, angebots- und verbrauchsseitigen Potentialen, praktischen Umsetzungsherausforderungen sowie sozialwissenschaftlichen Aspekten weitere Perspektiven der Sektorkopplung gleichwertig berücksichtigen. Diese werden in diesem Papier in den folgenden Kapiteln untersucht. Insbesondere in Bezug auf die regulatorische Behandlung lässt sich eine eigenständige, enger gefasste, juristische Definition von Sektorkopplung formulieren.

2.1 Zugang zu Sektorkopplung aus einer Sektorperspektive

Im Rahmen der Definition von Sektorkopplung muss zunächst betrachtet werden, über welche Sektoren gesprochen wird bzw. wie „Sektoren“ definiert werden. Die klassischen (Verbrauchs-)Sektoren der Energiewirtschaft, welche sich z. B. in den Energiebilanzen wiederfinden, sind Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD), Industrie und Verkehr. Im Gegensatz zu dieser etablierten Einteilung ist die Verwendung des Begriffes „Sektor“ im Kontext der Sektorkopplung oft uneinheitlich. Das BMWi bezeichnet Sektorkopplung als die Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien in den „Sektoren“ Wärme, Mobilität und Industrie (BMWi 2017) bzw. zur Befriedigung der Nachfrage nach Energie in Haushalten (Wärme und Kälte), im Verkehr (Antrieb) sowie in Industrie und GHD (Wärme, Kälte und Antrieb) (BMWi 2016a). Eine ähnliche Sichtweise vertritt der BDEW: Dieser versteht unter Sektorkopplung die energietechnische und energiewirtschaftliche Verknüpfung von Strom, Wärme, Mobilität und industriellen Prozessen. Der Klimaschutzplan der Bundesregierung stellt ebenfalls auf die Verwendung erneuerbaren Stroms in den „Sektoren“ Wärme, Verkehr und Industrie ab (BMUB 2016). Ergänzend zu diesem Sektorenverständnis werden für die teilweise deckungsgleichen Handlungsfelder Energiewirtschaft, Gebäude, Verkehr, Industrie und Landwirtschaft spezifische Emissionsminderungsziele festgeschrieben (BMUB 2016, S. 26), welche häufig als „Sektorziele“ bezeichnet werden. Sterner (2016) versteht unter Sektorkopplung die Nutzung (und Speicherung) von Strom in den „Sektoren“ Wärme, Verkehr,

Gas und Chemie (nicht-energetischer Verbrauch). Quaschnig (2016) betrachtet im Rahmen der Sektorkopplung ebenfalls Strom, Wärme und Verkehr als „Sektoren“. Die dena (2017b) fokussiert sich bei der Betrachtung auf die „Sektoren“ Strom, Gebäude, Verkehr und Industrie und spricht statt von Sektorkopplung von einem integrierten Energiesystem.³

Die oben genannten Beispiele machen deutlich, dass aktuell noch kein einheitliches Verständnis darüber besteht, welche Sektoren im Rahmen der Sektorkopplung miteinander verzahnt werden. Gemeinsam haben alle Einordnungen, dass Strom, Wärme und Verkehr bzw. Mobilität immer inkludiert sind, während die klassischen Verbrauchssektoren, in denen Strom in der Anwendung auch heute schon dominant vertreten ist, seltener genannt werden. Die Begründung dafür, dass Wärme, Industrie und Verkehr immer als relevante Bereiche der Sektorkopplung genannt werden ist, dass in diesen die fossilen Energieträger heute sehr stark dominieren und erneuerbarer Strom bisher kaum eingesetzt wird.⁴ Dieser Aspekt wird auch in Kapitel 3.2 noch einmal aufgegriffen.

In vielen Fällen wird die Industrie als Verbrauchssektor gesondert aufgeführt, da die in diesem Verbrauchssegment liegenden technologischen Herausforderungen zur Dekarbonisierung nach derzeitigem Forschungsstand nur durch eine Verbindung von Strom und Wärme zu realisieren sind.

Eine zwischen den Sektoren realisierbare Dekarbonisierungsoption, wie die Nutzung industrieller Abwärme in Wärmenetzen, an den gewerblichen Letztverbraucher oder Haushalte angeschlossen sind, oder die Nutzung von Nebenproduktwasserstoff aus der Chlor-Alkali-Elektrolyse für den Verkehrssektor, ist in den existierenden Definitionen meist nicht inkludiert. Somit handelt es sich dem gängigen Verständnis von Sektorkopplung nach häufig eher um eine Kopplung von (Teil-)Energiesystemen als um eine tatsächliche Verbindung von Sektoren (vgl. auch IWES und E4Tech 2017). Da sich die Bezeichnung von Strom, Wärme, Verkehr bzw. Mobilität und Industrie – auch in wissenschaftlichen Publikationen – etabliert hat, erscheint es dennoch legitim, neben Sektorkopplung auch von „Sektorenkopplung“ zu sprechen.

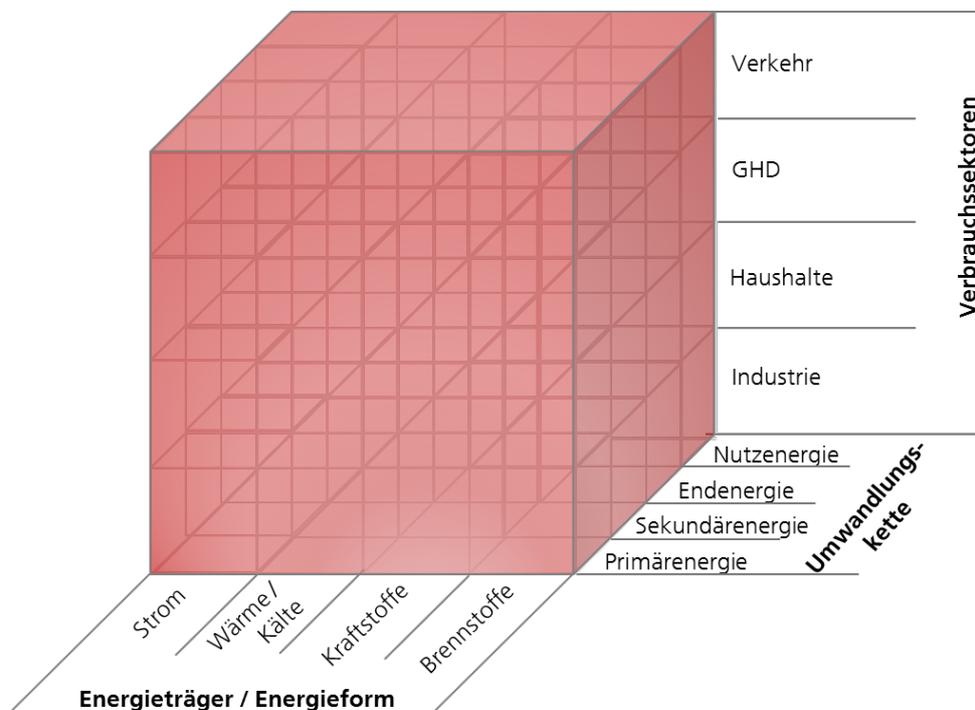
3 Vgl. zum Begriff „Sektor“ auch Acatech (2017, S. 19), die sich auf die Einteilung in die „Sektoren“ Strom, Wärme und Mobilität berufen.

4 So lag der Anteil erneuerbarer Energieträger am Endenergieverbrauch von Wärme im Jahr 2016 bei 13,4 % und am Endenergieverbrauch des Verkehrs bei 5,1 %, während der Anteil am Bruttostromverbrauch 31,7 % erreichte (UBA 2017).

Im Rahmen der in diesem Papier entwickelten Definition werden unter Sektorkopplung – bei Anlegung eines breiten Begriffsverständnisses – sowohl neuartige Verzahnungen der klassischen Verbrauchssektoren der Energiewirtschaft (Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistung, Industrie und Verkehr), als auch die der Energieträger und Endenergieformen (Strom, Wärme/Kälte sowie Kraft- und Brennstoffe) und der mit ihnen gekoppelten Infrastrukturen (Stromnetze, Gasnetze, Wärmenetze, Informations- und Kommunikationsnetze) verstanden. Dies kann in einer weiten Interpretation auch andere Erneuerbare außer Strom einschließen. So kann z. B. die Biomasse genutzt werden, um synthetische Kraftstoffe wie beispielweise Wasserstoff herzustellen. Oder die Nutzung von Sonnenenergie über Solarthermie in Wärmenetzen.

Für die Betrachtung der Energiesystemperspektive ist von Relevanz, auf welcher Stufe der energetischen Umwandlungskette die Kopplung stattfindet. Allgemein lässt sich sagen, dass die Kopplung bzw. infrastrukturelle Verzahnung verschiedener Energieträger/Energieformen/(Teil-)Energiesysteme im Umwandlungssektor auf der Ebene der Sekundärenergie stattfindet und die Kopplung verschiedener Verbrauchssektoren beim Übergang Sekundärenergie/Endenergie. Diese Verknüpfungen durch Sektorkopplungsanwendungen lassen sich als Vektorzug innerhalb des nachfolgenden Würfels darstellen (Abbildung 2-1).

Abbildung 2-1: Visualisierung der Kopplungselemente der Sektorkopplung (eigene Darstellung)



2.2 Zugang zur Sektorkopplung aus einer technologischen Perspektive

Die Herangehensweise über eine technologische Perspektive ist darin begründet, dass in einigen aktuellen Ausführungen zur Sektorkopplung die Thematik stark über die betrachteten Technologien einer Sektorkopplung definiert wird. Siehe z. B. IWES (2015), die unter Sektorkopplungsoptionen u. a. Elektrofahrzeuge, Oberleitungs-Lkw, Elektrodenkessel in Industrie, Fernwärme, Mini-KWK und Gas-Wärmepumpe verstehen. Stärker auf sektoraler Ebene fokussiert, sehen einige Autoren die Notwendigkeit einer Sektorkopplung darin, dass gerade im Wärmesektor und im Verkehrssektor die fossilen Energieträger dominieren und deshalb primär in den beiden Sektoren neue Anwendungen für den Einsatz erneuerbarer Energien realisiert werden müssen (siehe hierzu u. a. Weidenfeld 2016 oder BMUB 2016 sowie die Ausführungen in Kapitel 3.2). Dies ist notwendig, um die Energiewende, die streng genommen derzeit eher eine Stromwende ist, um eine Verkehrswende und eine Wärmewende, d. h. eine umfassende Dekarbonisierung in allen Teilenergiesystemen, zu ergänzen.

Um sich dem Verständnis von Sektorkopplung aus einer technologischen Perspektive zu nähern, lässt sich folgende erste, recht enge Definition formulieren, die nachfolgen diskutiert und in Kapitel 2.5 zu einer umfassenden Definition ausgeweitet werden soll:

Erneuerbare Energieträger (Wind, PV, Biomasse, Solar- oder Erdwärme, ...) substituieren in neuen Anwendungen oder durch verstärkte Nutzung von bekannten Anwendungen fossile Energieträger. Dies geschieht u.a. entweder durch direkte Stromnutzung oder die Umwandlung von Strom in synthetische Kraftstoffe (Power-to-Gas, Power-to-Liquid) oder in Wärme/Kälte (Power-to-Heat), die man als Power-to-X (PtX) zusammenfassen kann.⁵

In dieser ersten, engen Definition werden alle erneuerbaren Energieträger mit einbezogen. Oftmals steht aber gerade der erneuerbare Strom im Fokus. So wird im Klimaschutzplan für Deutschland (BMUB 2016) die Relevanz von erneuerbarem Strom bei der Sektorkopplung hervorgehoben. Erneuerbarer Strom dominiert bei den erneuerbaren Energieträgern derzeit die Energieerzeugung. Die Biomassepotentiale sind unter Einbezug der Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion und den Nachhaltigkeitsanforderungen deutlich beschränkt. Die Stromfokussierung kann auch damit begründet werden, dass für die Notwen-

5 Siehe hierzu auch Wietschel et al. (2018).

digkeit der Sektorkopplung stellenweise über die Verwendung des sogenannten „Überschussstroms“ argumentiert wird (siehe z. B. Agentur für Erneuerbare Energien e.V. 2016). Vereinfacht gesprochen, entsteht Überschussstrom in Zeiten, in denen die Erzeugung die Nachfrage übersteigt, und auch über Speicher oder sonstige Flexibilisierungsoptionen eine zeitliche Verlagerung nicht gelingt. Zu differenzieren ist hierbei zwischen Zeiten, in denen die bundesweite Erzeugung aus erneuerbaren Energien die Nachfrage übersteigt (bundesweite „Überschüsse“) und Situationen, in denen aufgrund lokaler Netzengpässe erneuerbare Strommengen nicht in das derzeitige Energiesystem integriert werden können. Bundesweite Überschüsse sind bislang im Stromsystem noch nicht aufgetreten, von einem Auftreten in den nächsten Jahren ist jedoch auszugehen.⁶

In Situationen, in denen erneuerbare Energien aufgrund von Netzengpässen nicht integrierbar sind, sind diese als Ultima Ratio von den Netzbetreibern abzuregulieren. Die durch regionale Netzengpässe nicht in das System integrierbare Überschussstrommenge ist derzeit in Deutschland recht gering. Nach BNetzA (2017a) betrug die Summe der Ausfallarbeit von EEG- und KWK-Anlagen rund 3,7 TWh in 2016. Dies waren 0,7 % der erzeugten Nettostrommenge. Sie wird auch künftig wohl kaum in größeren Mengen auftreten (siehe Abschätzungen im Netzentwicklungsplan ÜNB 2017).⁷

Ob man sich bei der Sektorkopplung ausschließlich auf Energie aus erneuerbaren Quellen beschränken sollte, kann und sollte durchaus kritisch hinterfragt werden (siehe Wietschel et al. 2015). Selbst die Verwendung des derzeitigen Strommixes in neuen Anwendungen kann zur Treibhausgassenkung beitragen, z. B. bei Elektro-Pkw (siehe die Berechnungen hierzu in Helms et al. 2016 oder in Dallinger 2013). Weiterhin spricht oftmals die wirtschaftliche Notwendigkeit dafür, nicht nur Strom aus erneuerbaren Quellen zu verwenden, sondern auch Strom aus konventionellen Kraftwerken zu nutzen. Dies gilt insbesondere dann, wenn der Strom zur Nutzung umgewandelt wird, beispielsweise in Wasserstoff (H₂). Dafür sind kapitalintensive Anlagen notwendig, die möglichst lange laufen müssen. Hierfür reicht Strom nur aus erneuerbaren Quellen wegen der zeitlichen Beschränktheit der Nutzungsstunden, beispielsweise bei Windkraft- oder

6 Am 30. Juli 2017 deckten erneuerbare Energien in der Spitze 95 % des deutschen Stromverbrauchs (BNetzA 2017c).

7 Acatech (2017) stehen einer Verwendung des Begriffs „Überschussstrom“ kritisch gegenüber und argumentieren, dass durch das Hinzukommen von Sektorkopplungstechnologien keine tatsächlichen Überschüsse entstehen.

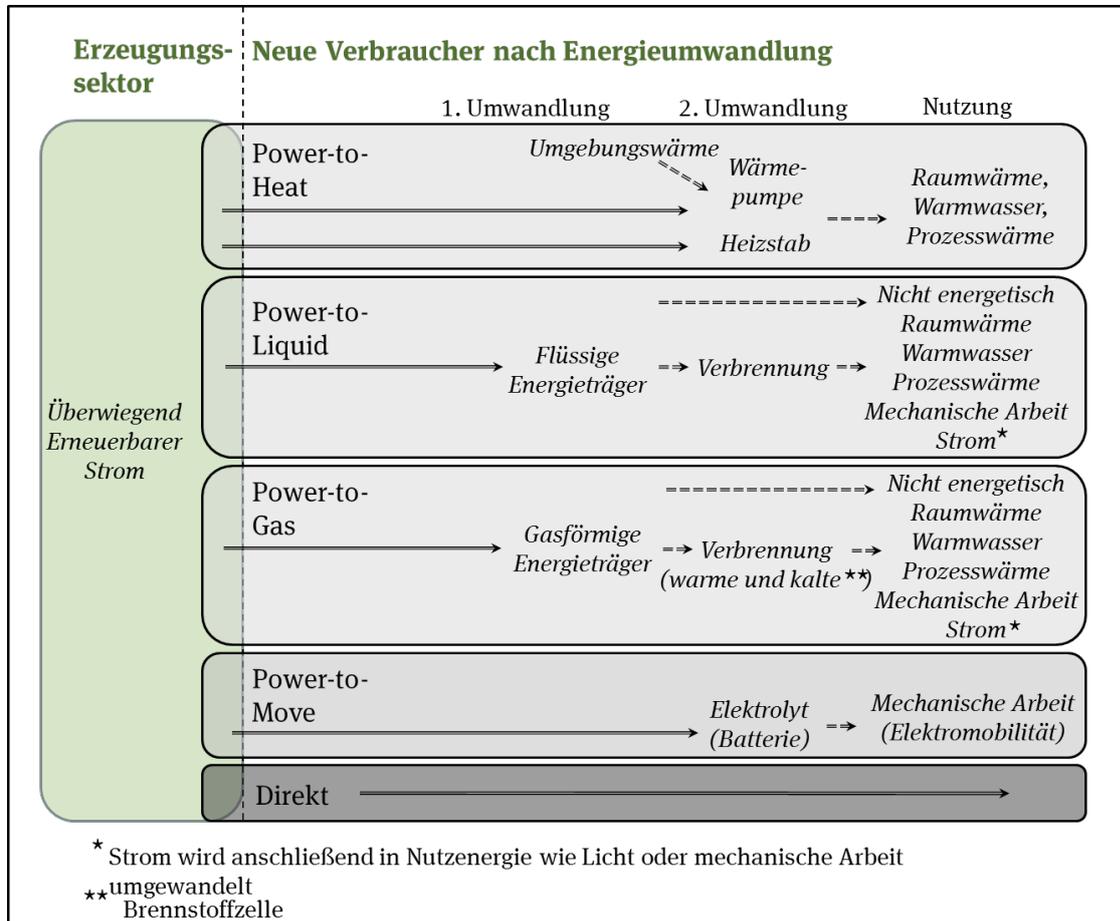
PV-Anlagen, i.d.R. nicht aus (siehe zu dieser Problematik beispielsweise Stolzenburg et al. 2014 und Michaelis et al. 2017).

Generell wird in einigen Ausführungen die direkte Stromnutzung nicht zur Sektorkopplung hinzugezählt. Sterner (2016) definiert Power-to-X als Wandlung von Strom als Primärenergie in einen Energieträger, Wärme, Kälte, Produkt, Kraft- oder Rohstoff. Power-to-X wird dabei mit Sektorkopplung gleichgesetzt.

Strom wird in vielen Anwendungen im Verkehrs- und Wärmesektor natürlich schon seit Jahrzehnten eingesetzt, z. B. im Wärmebereich durch Nachtspeicherheizungen oder im Mobilitätsbereich durch elektrische Züge und Straßenbahnen. Dies sind klassische Stromverbraucher. Sektorkopplung fokussiert sich dagegen nach obiger Definition auf neue Anwendungen, wie den Einsatz von Strom in Fernwärmenetzen zur Gassubstitution bei der Wärmeerzeugung oder den energie- und klimapolitisch motivierten und angereizten deutlich verstärkten Einsatz bei bekannten Anwendungen, z. B. die vermehrte Substitution von Hochofenstahl durch Elektrostahl, die i.d.R. mit Produkt- oder Prozessinnovation bzw. organisatorischen Innovationen einhergehen. Im RP-Lexikon (2017) wird so auch die KWK zur Sektorkopplung dazu gezählt.

Neben dem direkten verstärkten Stromeinsatz, beispielsweise durch Elektrokessel in Wärmenetzen, besteht auch die Option, Strom in flüssige Energieträger (Methanol, Kerosin, Benzin und weitere höhere Kohlenwasserstoffe) umzuwandeln (sogenanntes Power-to-Liquid/PtL; siehe Abbildung 2-2). Dabei kann dann eine energetische Nutzung beispielweise als Kraftstoff im Verkehrssektor oder eine nicht energetische Nutzung, z. B. bei den höheren Kohlenwasserstoffen in der Petrochemie, erfolgen. Weiterhin existiert die Option, Strom in Gas (Wasserstoff, Methan) für eine energetische oder nicht energetische Nutzung umzuwandeln (sogenanntes Power-to-Gas/PtG). Dies kann in den Anwendungssektoren erfolgen (wie der Wasserstoffherzeugung bei der Ammoniakherstellung) oder im Angebotssektor. Dann kann auch eine Einspeisung in das Erdgasnetz erfolgen. Im letzteren Fall kann dann natürlich nachfrageseitig nicht mehr zwischen klassischen und neuen Anwendungen unterschieden werden, eine energetische Aufteilung kann dann nur noch bilanziell vorgenommen werden.

Abbildung 2-2: Überblick der Sektorkopplungsoptionen entsprechend ihrer Umwandlung, eigene Darstellung (Quelle: Wietschel et al. 2015)



Die Lösungen für einige der sektoralen Kopplungen wie Elektrofahrzeuge, Plasmaverfahren existieren schon länger, waren aber nicht wirtschaftlich und gewinnen nun mit der Dekarbonisierung wieder neu an Bedeutung.

Diese technologische Perspektive mit Fokus auf neuen Anwendungen wird in Tabelle 2-1 dargestellt und mit Beispielen erläutert.

Tabelle 2-1: Beispiele verschiedener Sektorkopplungstechnologien in verschiedenen Anwendungssektoren (in Anlehnung und Erweiterung von Wietschel et al. 2015)

Energieumwandlung	Sektoren Haushalte/GHD	Wärmenetze	Verkehr	Industrie
<i>Power-to-Heat (PtH)</i>	Wärmepumpen, direktelektrische Heizung	Großwärmepumpe, Elektrodenkessel, Solarthermie		Prozesswärmeerzeugung in Elektrodenkesseln, Heizstab, Lichtbogen etc.
<i>Power-to-Gas (PtG)</i>	Verbrennung in Heizkesseln und KWK-Anlagen	Verbrennung in Heizkesseln und KWK-Anlagen	Brennstoffzelle, Verbrennungsmotor, Gasturbine	Prozesswärmeerzeugung, stoffliche Nutzung (Ammoniak, Methanol, ...)
<i>Power-to-Liquid (PtL)</i>	Verbrennung in Heizkesseln		Verbrennungsmotor, Gasturbine	Stoffliche Nutzung
<i>Direktelektrische Antriebe</i>			Elektro-Pkw, Oberleitungs-Lkw, Oberleitungs-Busse, Elektrifizierung von Bahnstrecken	
<i>Strombasierte neue Verfahren</i>				Neue Verfahren (Plasma etc.)
<i>Biomasse (hier findet die Sektorkopplung im Wesentlichen über die begrenzte Verfügbarkeit statt)</i>	Verbrennung in Heizkesseln und KWK-Anlagen	Verbrennung in Heizkesseln und KWK-Anlagen	Biokraftstoffe für Flug- und Schiffsverkehr, Biodiesel	Wärmeerzeugung, stoffliche Nutzung
<i>Sonstige</i>	Biogas aus Erdgasnetz			

2.3 Zugang zur Sektorkopplung aus einer System- und Infrastrukturperspektive

Neben dem technologischen Zugang zur Sektorkopplung kann auch ein Zugang über die Systemperspektive bzw. Infrastrukturperspektive gehen. Dabei geht es generell eher um die Verzahnung der Sektoren Strom, Wärme/Kälte und Mobilität sowie industrieller Prozessen mit deren Infrastruktur. Die intelligente Verknüpfung von den Sektoren unter einer stark integrierten Betrachtung steht hier im Zentrum (siehe Ausführungen in dena 2017).

Bei einem derartigen Zugang zur Sektorkopplung werden auch Themen wie die Nutzung von Abwärme in einem Bereich, beispielsweise der Eisen- und Stahlindustrie, und die Nutzung in einem anderen Bereich, beispielsweise über Wärmenetze, auch unter Sektorkopplung bzw. -integration gefasst. Die oben dargestellte Verknüpfung von angebots- und nachfrageseitigen Sektoren wird

somit auch um eine intelligenterere und neuartige Verzahnung von nachfrageseitigen Sektoren über Netze/Infrastrukturen untereinander ergänzt.

Schließlich geht auch eine stärkere Vernetzung der leitungsgebundenen Energieträger Strom, Fern-/Nahwärme, Gas und Wasserstoff damit einher. Hier können durch eine Integration Synergien gehoben (siehe Brodecki et al. 2014) und neue Anwendungen erschlossen werden. In diesem Zusammenhang wichtig ist eine stärkere informations- und datenseitige Verknüpfung der einzelnen Märkte.

2.4 Zielsetzungen der Sektorkopplung

Die Zielsetzung der Sektorkopplung kann unterschiedlich betont werden. In den obigen Ausführungen stand bisher der Beitrag der Sektorkopplung zur Treibhausgasminde rung im Zentrum, der in der Regel die wesentliche Motivation darstellt. Viele der Sektorkopplungsoptionen können aber auch zu einer Flexibilitätserhöhung der Stromnachfrage beitragen. Sie sorgen somit für eine bessere Systemintegration von fluktuierenden erneuerbaren Energien, wie Wärmepumpen. Für eine Nutzung dieses Flexibilitätspotentials müssen jedoch entsprechende Maßnahmen ergriffen werden (z. B. eine flexible intelligente Steuerung von Batch-Prozessen oder die Einführung von Speichern, bspw. Wärmespeichern bei Wärmepumpen). Diese sind genauso systemdienlich ausgerichtet wie Demand Side Management von klassischen Anwendungen, wie z. B. die flexible Steuerung von Nachtspeicherheizungen oder andere Flexibilisierungsoptionen, wie Kurzzeitstromspeicher.

In den Ausführungen der Agentur für Erneuerbare Energien e.V. (2016) wird untersucht, wie der Bedarf an Flexibilität im (künftigen) Stromsystem gedeckt werden kann und welche Ausgleichsmöglichkeiten durch die Nutzung von Strom in den Bereichen Wärme, Verkehr und durch die Erzeugung strombasierter Brennstoffe (Power-to-Gas und Power-to-Liquid) bestehen. Dabei geht es einerseits um die Nutzung von zeitweiligen Stromüberschüssen und andererseits um Rückkopplungseffekte auf den Stromverbrauch bzw. die notwendigen Erzeugungskapazitäten, wenn Strom aus erneuerbaren Energien (EE) zunehmend fossile Energieträger in den Bereichen Wärme und Verkehr ersetzen soll.

Allerdings gilt nicht für alle Maßnahmen der Sektorkopplung, dass sie zur Flexibilitätserhöhung beitragen. So stellen Oberleitungs-Lkw einen sehr unflexiblen Nachfrager dar, deren Integration in das Energiesystem durchaus herausfor-

dernd sein kann (siehe Wietschel et al. 2017). Derartige Optionen erhöhen eher den Bedarf nach Flexibilitätsoptionen.

Sektorkopplungstechnologien können im Zusammenspiel mit klassischen Energieeffizienzmaßnahmen und der direkten Erzeugung von Wärme und Antriebsenergie (z. B. durch Biomasse oder Solarthermie) zur Senkung von Treibhausgasemissionen und Primärenergieverbrauch beitragen (siehe BMWi 2016a). Allerdings nutzt nicht jede Sektorkopplungstechnologie Strom oder Biomasse immer sehr effizient. Insbesondere die Technologien, die mehrere Umwandlungsschritte voraussetzen, wie etwa die Umwandlung von Strom, Gas oder flüssige Kraftstoffe, sind derzeit weniger effizient. Sie stehen damit dem Energieeffizienzziel entgegen.

2.5 Definition der Sektorkopplung

Fasst man die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Ausführungen zusammen, so lässt sich aus einer technologischen und einer Systemperspektive die Sektorkopplung wie folgt sehr breit definieren:

Sektorkopplung bezeichnet den fortschreitenden Prozess der Substitution fossiler Energieträger durch weit überwiegend erneuerbar erzeugten Strom oder durch andere erneuerbare Energieträger und nachhaltige Energienutzungsformen, wie die Nutzung von Abwärme, in neuen sektorenübergreifenden Anwendungen oder durch verstärkte Nutzung bekannter sektorenübergreifender Anwendungen.

Bei Strom geschieht dies zum einen durch eine direkte Stromnutzung⁸, die auch eine strombasierte Wärme/Kälteerzeugung (Power-to-Heat⁹) einschließt. Zum anderen über die Umwandlung von Strom in synthetischen Kraftstoffe (Power¹⁰-to-Gas, Power-to-Liquid)¹¹. Die indirekte Stromnutzung über Power-

⁸ Beispielsweise Elektromobilität, bei der natürlich letztlich auch Strom in eine andere Energieform wie mechanische Energie transformiert wird, aber ohne die Umwandlungsschritte über Gase oder Flüssigkeiten.

⁹ Wärme und Kälte kann auch über die Erzeugung von synthetischen Kraftstoffen erfolgen, wird dann aber hier als Power-to-Gas oder Power-to-Liquid-Anwendung gefasst. Hier sind Anwendung wie ein Heizstab in einem Wärmenetz gemeint.

¹⁰ Power wird in diesem Papier immer mit Strom gleichgesetzt.

¹¹ Die weitere Nutzungsform als Kraft-, Brennstoff oder auch als Produktnutzung wird hier nicht weiter differenziert, aber lässt natürlich eine weitere Klassifizierung zu, die auch in einigen Ausführungen entsprechend vorgenommen wird.

to-Liquid und Power-to-Gas werden zusammen als Power-to-X (PtX¹²) bezeichnet und bilden eine Teilmenge der Sektorkopplung. Synthetische Kraftstoffe können aber auch aus anderen (erneuerbaren) Quellen hergestellt werden.

Neben sektorenübergreifenden Anwendungen zwischen Angebots- und Nachfragesektoren durch die Kopplung der Energieträger¹³ kann Sektorkopplung auch in Form einer neuartigen Verzahnung zwischen den klassischen Verbrauchssektoren (Haushalte, Gewerbe/Handel/Dienstleistung, Industrie und Verkehr) über Netzinfrastrukturen gegeben sein.

Primäres Ziel der Sektorkopplung ist die Senkung der Treibhausgasemissionen durch Substitution fossiler Energieträger, weshalb bei den Energieträgern primär die Erneuerbaren im Fokus stehen. Sekundäre Ziele (Co-Benefits) können in der Nutzung von Freiheitsgraden der Optimierung innerhalb eines zunehmend und perspektivisch vollständig dekarbonisierten Energie- und Wirtschaftssystems sowie durch einen Beitrag zur Flexibilisierung und Energieeffizienzsteigerung entstehen.¹⁴

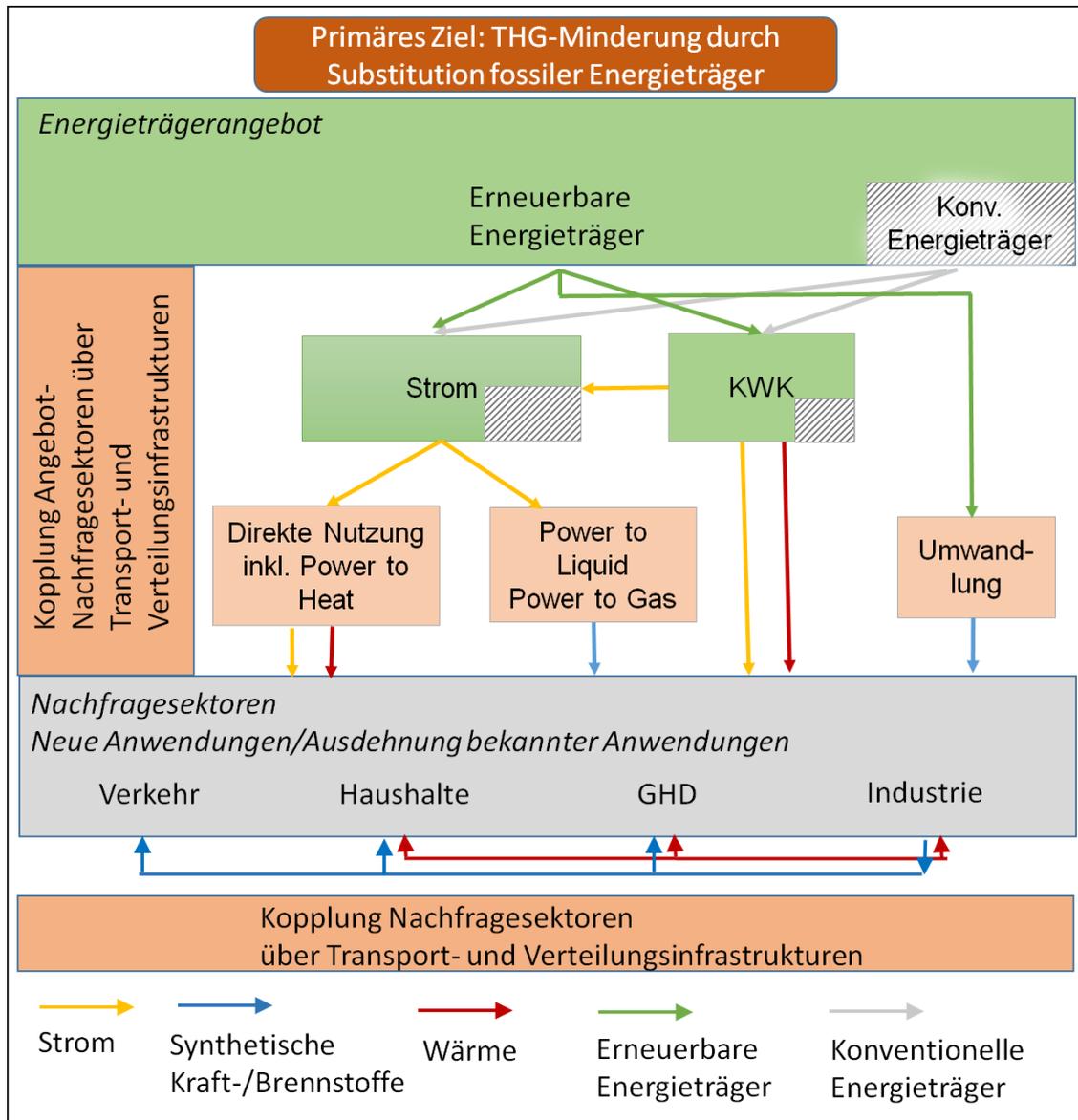
Abbildung 2-3 stellt wesentliche Aspekte der Definition noch einmal grafisch dar. Diese weit gefasste Definition geht von neuartigen Anwendungen in den Nachfragesektoren aus. Um Angebots- und Nachfragesektoren gerade vor den Herausforderungen des Zuwachses an fluktuierenden Erneuerbaren Energien besser miteinander zu koppeln zu können, sind eine Reihe von anderen technischen Maßnahmen ebenfalls möglich. So können beispielsweise verstärkt Speicher in das System integriert werden, Lastmanagementmaßnahmen ergriffen werden oder die Stromnetzinfrastuktur ausgebaut werden. Derartige Themen lassen sich ebenfalls unter den Begriff der Sektorkopplung fassen, führen aber zu einer extrem breiten Auslegung der Sektorkopplungsdefinition und man kann sich fragen, wo dann die Unterschiede zur Energiewende (bzw. zur Systemintegration der Erneuerbaren) liegen und der Begriff Sektorkopplung dann nicht zu unscharf wird. Hier sind aber weitere Diskussionen zu führen.

¹² In einigen Ausführungen wird PtH auch hierzu gezählt, aber in der vorliegenden Definition zählt PtH zur direkten Stromnutzung, da wie oben erwähnt, die Nutzungsformen in den Anwendungssektoren nicht weiter differenziert werden.

¹³ Z. B. Abwärme die ins Wärmenetze eingespeist wird oder Wasserstoff als Nebenprodukt aus der Industrie für mobile oder stationäre Energieerzeugung.

¹⁴ Siehe hierzu auch Wietschel et al. 2018.

Abbildung 2-3: Wesentliche Elemente einer weitgefassten Definition der Sektorkopplung (eigene Darstellung)



2.6 Weitere Perspektiven auf die Sektorkopplung

2.6.1 Überblick

Die heutigen regulatorischen Rahmenbedingungen sind nicht auf den verstärkten Einsatz von Strom in den Sektoren Verkehr, Wärme und Industrie ausgerichtet. Eine erfolgreiche Umsetzung der Sektorkopplung erfordert deshalb entsprechende Anpassungen. Dies wird in Kapitel 2.6.2 thematisiert. Im anschließenden Kapitel 2.6.3 wird weiterhin auf juristische Aspekte der Sektorkopplung eingegangen. Hier wird aufgezeigt, dass auch aus einer juristischen Perspektive eine Notwendigkeit besteht, Sektorkopplung als Begrifflichkeit eher restriktiv und trennscharf zu definieren, um Rechtssicherheit zu gewährleisten und unerwünschte Mitnahmeeffekte zu unterbinden.

Zur Realisierung einer intelligenten Sektorverknüpfung ergibt sich weiterhin ein erhöhter Bedarf an Digitalisierung, beispielsweise um die Flexibilitätspotentiale durch ein Demand Side Management nutzen zu können. Die Digitalisierung der Energiewirtschaft, also die informationstechnische Durchdringung von Stromangebots- und -nachfrageseite, wird deshalb als zentrale Voraussetzung einer umfassenden Energiewende angesehen (siehe zur sogenannten digitalen Sektorkopplung Wikipedia 2017 sowie BMUB 2016). Auf die Digitalisierung wird deshalb ausführlich in Kapitel 2.6.4 eingegangen.

Die Ausführungen in den folgenden Kapiteln beziehen sich stark auf das Thema Strom und berücksichtigen andere Energieträger und -formen nicht.

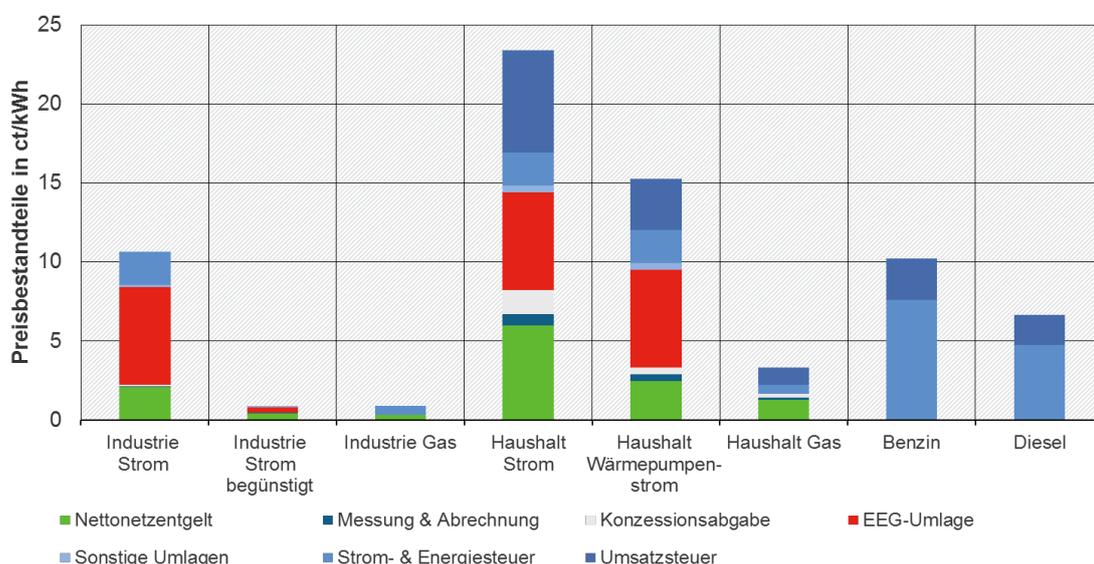
2.6.2 Energiewirtschaftlich-regulatorische Perspektive

Wie in Kapitel 2.3 herausgearbeitet wurde, ist die Substitution von fossilen Energieträgern durch erneuerbare in den Sektoren Verkehr, Wärme und Industrie das wesentliche Ziel der Sektorkopplung, um zu einer Dekarbonisierung beizutragen. Damit werden die genannten Sektoren stärker technisch und ökonomisch verknüpft. Vor diesem Hintergrund ist es notwendig, auch die regulatorischen und ökonomischen Rahmenbedingungen sektorenübergreifend zu betrachten, um sicherzustellen, dass langfristig die richtigen und effizienten Anreize gesetzt werden. Der Einsatz, die Wirtschaftlichkeit und damit die Verbreitung von Sektorkopplungstechnologien hängen dabei von den jeweils gültigen regulatorischen Rahmenbedingungen ab, die in der Vergangenheit im Regelfall sektorspezifisch definiert waren. Nachfolgend sollen daher die wichtigsten regulatorischen Aspekte der Sektorkopplung und die damit verbundenen Zielsetzungen

dargestellt und diskutiert werden. Es ist jedoch klar herauszustellen, dass lediglich Anpassungsoptionen für den regulatorischen Rahmen diskutiert werden, welche insbesondere längerfristig an Relevanz gewinnen könnten. Das Schaffen neuer expliziter oder impliziter Fördertatbestände stellt keinen Selbstzweck dar und ist immer sorgfältig sowie kritisch in Bezug auf mögliche Aus- und Wechselwirkungen zu untersuchen. Eine derart vertiefte Untersuchung der diskutierten Optionen ist nicht Gegenstand dieses Papiers und wäre in tiefergehenden Analysen durchzuführen.

Im Zentrum der Diskussion zu den regulatorischen Rahmenbedingungen stehen die verschiedenen Abgaben, Umlagen und Steuern auf Strom, Gas und andere Energieträger, die in ihrer Höhe zum Teil sehr unterschiedlich ausfallen (vgl. z. B. Agora Energiewende 2017). Dabei wird häufig kritisiert, dass es durch eine unterschiedliche Belastung von einzelnen Energieträgern zu einer Marktverzerrung zwischen den einzelnen Sektoren kommt. Erschwerend kommt hinzu, dass heutige regulatorische Rahmenbedingungen verschiedene Zielsetzungen verfolgen, die zu einer hohen Komplexität der Rahmenbedingungen führen.

Abbildung 2-4: Staatlich veranlasste Preisbestandteile für Strom, Gas und Kraftstoffe (eigene Darstellung mit Zahlen aus Monitoringbericht BNetzA 2015 und European Commission 2016a)



Bestehende Abgaben, Umlagen, Entgelte und Steuern bzw. auch Befreiungstatbestände davon lassen sich in der Regel folgenden Zielsetzungen zuordnen:

- Refinanzierung von Fördermöglichkeiten (z. B. EEG-Umlage, KWK-Umlage)

- Refinanzierung von sektorspezifischer Infrastruktur (z. B. Netzentgelte, Mineralölsteuer)
- Ökologische Lenkungswirkung (z. B. Strom- bzw. Ökosteuern, Emissionshandel)
- Fiskalische Instrumente ohne Lenkungswirkung (z. B. Konzessionsabgaben)
- Technologieförderung (z. B. abschaltbare Lasten)
- Industriepolitische Wirkung (z. B. „besondere Ausgleichsregelung bei der EEG-Umlage“).

Eine Anpassung der regulatorischen Rahmenbedingungen wird im Kontext Sektorkopplung vor allem dort diskutiert, wo bestehende Abgaben, Entgelte, Umlagen und Steuern dazu führen, dass die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit bestimmter Sektorkopplungstechnologien nicht gegeben ist. Ein mögliches Zielmodell für die regulatorischen Rahmenbedingungen sollte daher sowohl zu einem ökonomisch effizienten Gesamtsystem als auch zu einer weitgehenden Internalisierung von Umweltkosten (u. a. durch CO₂-Emissionen) führen. Neben einem effizienten Gesamtsystem und der Internalisierung von Umweltwirkungen sind durch die regulatorischen Rahmenbedingungen ggf. weitere Anforderungen wie Technologieförderung oder das Vermeiden von Carbon Leakage zu erfüllen.

Internalisierung von Umweltwirkungen

Die Nutzung von Strom im Wärmesektor beispielsweise ist nur dann wettbewerbsfähig, wenn die verschiedenen Energieträger unter Berücksichtigung ihrer CO₂-Emissionen bzw. anderer Emissionen ähnlich behandelt werden (d. h. besteuert und reguliert). So sollte insbesondere ein verstärkter Wettbewerb zwischen verschiedenen – möglichst CO₂-armen – Technologien geschaffen werden. Ein wichtiger Bestandteil dieser Weiterentwicklung ist die Internalisierung von Umweltwirkungen, die auf Basis der ausgestoßenen CO₂-Emissionen bestimmt wird, die durch eine Energienachfrage und den Einsatz der jeweiligen Technologie ausgelöst wird. Die daraus resultierenden Preissignale sollten in allen Sektoren einheitlich wirken, sodass der Ausstoß von CO₂-Emissionen in allen Sektoren mit einem gleichen Preis belegt wird. Die Umsetzung kann von einer Ausweitung des ETS-Emission Trading System (vom Stromsektor auf alle Sektoren) bis hin zu einer Besteuerung von CO₂-Emissionen reichen.

Neben der Internalisierung von externen Effekten durch CO₂ können auch externe Effekte durch andere Emissionen in die Betrachtung einbezogen werden.

Refinanzierung von Förderkosten bzw. sektorspezifischer Infrastruktur

Eine Vielzahl an regulatorischen Fragen betreffen die Refinanzierung von Förderzusagen als auch die Refinanzierung von sektorspezifischer Infrastruktur. Die daraus resultierenden Abgaben und Umlagen können zu Verzerrungen zwischen den Sektoren führen. Daher sollte die bestehende Verteilung von Abgaben bzw. Umlagen innerhalb der Sektoren und auf die verschiedenen Energieträger geprüft werden, um Anreize für ein effizientes sektorübergreifendes System zu schaffen und Umweltwirkungen (insbesondere CO₂-Emissionen) entsprechend ihrer tatsächlichen Wirkung zu berücksichtigen. Die Umsetzung wird jedoch erschwert, da die Sektoren Strom, Wärme, Industrie und Verkehr unter verschiedene gesetzliche Regelungen fallen und auch die Zuständigkeiten für Regulierungsfragen und Gesetzesvorhaben auf unterschiedliche Akteure verteilt sind.

Technologieförderung

Bei fehlender Internalisierung von Umweltwirkungen und bei einer erwarteten Kostendegression von umwelt- bzw. klimaschutzrelevanten Technologien sind in der Vergangenheit regulatorische Maßnahmen umgesetzt worden, um einzelne Technologien zu fördern (z. B. erneuerbare Energien im Rahmen des EEG). Auch für Sektorkopplungstechnologien ergeben sich hier Anknüpfungspunkte und regulatorische Aspekte, um einzelne Technologien gezielt zu fördern.

Aufgrund eines hohen Infrastrukturbedarfs sowie Pfadabhängigkeiten von Technologien können sich hohe Markteintrittsbarrieren für einige Sektorkopplungstechnologien ergeben. Eine Stromladesäuleninfrastruktur oder ein Wasserstoffversorgungsnetz beispielsweise bedarf hoher Anfangsinvestitionen (ohne hohe Nutzungszahlen in den Anfangsjahren). Auch bei gegebenen Kostenvorteilen aus Gesamtsystemsicht kann sich die Diffusion von Sektorkopplungstechnologien daher verzögern. An dieser Stelle sind regulatorische Eingriffe zur Technologieförderung denkbar und sollten geprüft werden.

Eine weitere Herausforderung stellt die gezielte Technologieförderung für eine erfolgreiche Markteinführung und Umsetzung von Sektorkopplung dar, um weitere Innovationen und Kostenreduktionen zu realisieren. Als Anwendungsbeispiele sei etwa das Elektroauto genannt, das insbesondere im Bereich der Batterie- und Ladetechnologien noch Entwicklungssprünge benötigt. Dieses Beispiel soll zeigen, dass die regulatorischen Maßnahmen auch Entwicklung und Forschung betreffen sowie Förderprogramme für den flächendeckenden Markt-

eintritt umfassen, um vielversprechende Technologien, die noch nicht voll wettbewerbsfähig sind, aber zu einer kostenminimalen CO₂-Vermeidung beitragen können, zu fördern.

Auf der anderen Seite gibt es auch Bereiche der Sektorkopplung, die weniger von der wirtschaftlichen Effizienz, sondern von einer erhöhten Akzeptanz und einer einfachen und breiteren Beteiligung getrieben werden. Ein wichtiges Feld ist hierbei die Gebäude- und Quartiersversorgung mit Strom und Wärme. Insbesondere PV-Systeme gekoppelt mit Speichern und/oder Wärmepumpen sind ein Beispiel, wo Sektorkopplung stattfinden kann und gleichzeitig nicht die direkte Wettbewerbsfähigkeit von Energieträgern eine Rolle spielt. Regulatorische Anknüpfungspunkte ergeben sich dabei durch die Eigennutzung von Strom und die damit verbundene Einsparung von Netzentgelten und Abgaben, die aktuell und auch zukünftig zu einem Marktwachstum führen können. Regulatorische Fragen stellen sich hier insbesondere in Bezug auf eine effiziente Ausgestaltung der Anreize sowie auf die Wechselwirkungen im Gesamtsystem.

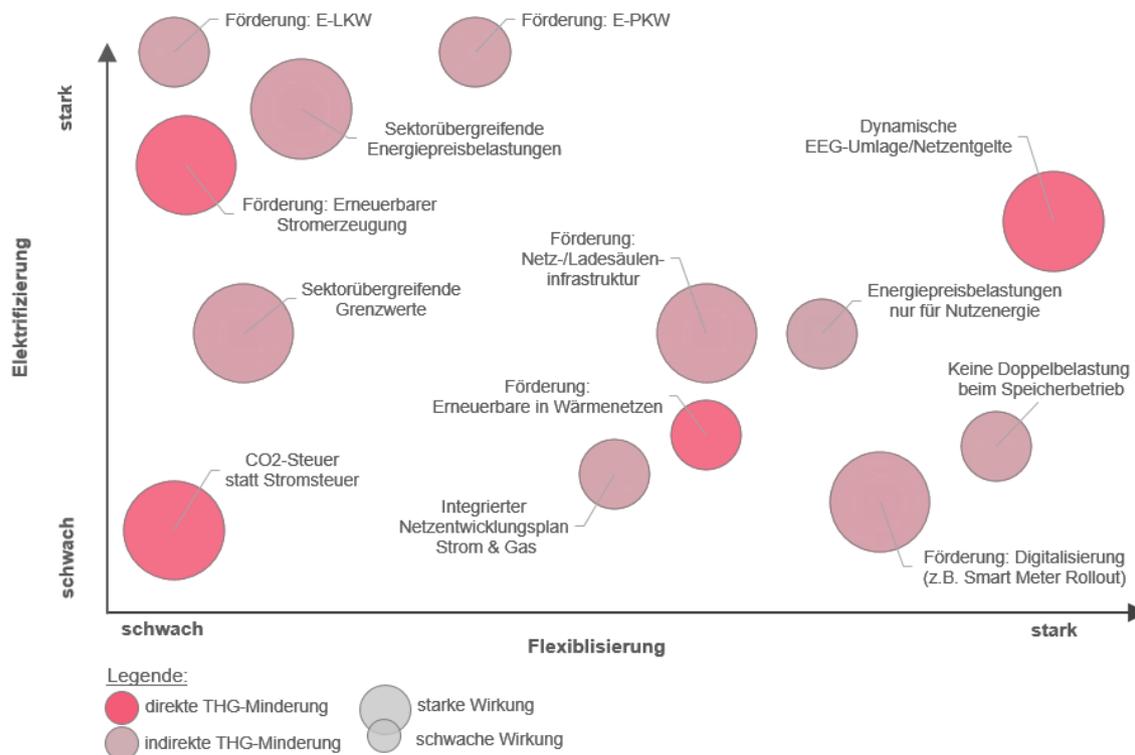
Industriepolitische Wirkung

Weiterhin müssen regulatorische Rahmenbedingungen auch immer industriepolitische Effekte oder internationale Wettbewerbssituationen für bestimmte Technologien berücksichtigen. Zum einen können sich durch eine frühzeitige Technologieentwicklung Wettbewerbsvorteile und Exportchancen und damit positive industriepolitische Effekte ergeben. Zum anderen stehen Industriebetriebe im internationalen Wettbewerb, sodass in der Vergangenheit verschiedene Regelungen und Ausnahmetatbestände definiert wurden, um Belastungen für Unternehmen zu reduzieren.

Mögliche Instrumente zur Förderung der Sektorkopplung

Wie bereits oben beschrieben, gibt es verschiedene Anknüpfungspunkte, den rechtlichen Rahmen anzupassen, damit das Potential der Sektorkopplung erschlossen werden kann. Dabei ist die Wirkungsweise möglicher Instrumente und Maßnahmen sehr unterschiedlich und wird nachfolgend beschrieben.

Abbildung 2-5: Einordnung von regulatorischen Maßnahmen in drei Zieldimensionen der Sektorkopplung (in Anlehnung an und Erweiterung von IWES et al. 2015 und IWES und E4Tech 2017)



CO₂-Steuer und Förderung Erneuerbarer Stromerzeugung

Eine Förderung des EE-Stromangebots bewirkt eine direkte Treibhausgasverminderung im Stromsektor Deutschlands. Außerdem ist die EE-Stromdurchdringung und der dadurch bedingt verringerte CO₂-Emissionsfaktor des Stromerzeugungsmixes die Grundvoraussetzung für eine sinnvolle Elektrifizierung der anderen Verbrauchssektoren. Es hätte ebenfalls einen direkten, relativ starken THG-Minderungseffekt, die bestehende Stromsteuer aufkommensneutral durch eine CO₂-Steuer zu ersetzen. Die Wettbewerbssituation für Erneuerbare verbessert sich und damit können diese in sektorkoppelnden Stromanwendungen genutzt werden.

Förderung erneuerbarer Energien in Wärmenetzen

Die angesprochenen Stromanwendungen bzw. die Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmesektor sollten besonders in Nah- und Fernwärmenetzen gefördert werden. Dadurch werden Flexibilitäts- und Effizienzpotentiale (Skaleneffek-

te) genutzt, weil eine höhere Anlagenauslastung und eine räumliche Verbrauchsverlagerung möglich werden.

Förderung von Netz-/Ladeinfrastruktur

Den gleichen Effekt hat die Förderung von Netz-/Ladesäuleninfrastrukturen. Hierbei kommt eine THG-Minderung allerdings nur in Abhängigkeit von dem Anteil der Erneuerbaren an der Energieerzeugung zustande.

Förderung von Elektromobilität

Eine Förderung von Oberleitungs-Lkw wird die Flexibilität der Stromnachfrage nicht erhöhen, wohl aber den Stromverbrauch insgesamt. Elektromobilität dagegen kann mit einer Flexibilisierung einhergehen, wenn die Pkw für ein entsprechend marktdienliches Ladeverhalten bereitstehen. Mit beiden Maßnahmen kann das Potential erschlossen werden, EE-Strom für den Verkehrssektor zu nutzen und dadurch indirekt die Treibhausgasemissionen in diesem zu senken. Letzteres ist u. a. abhängig vom angesprochenen CO₂-Emissionsfaktor.

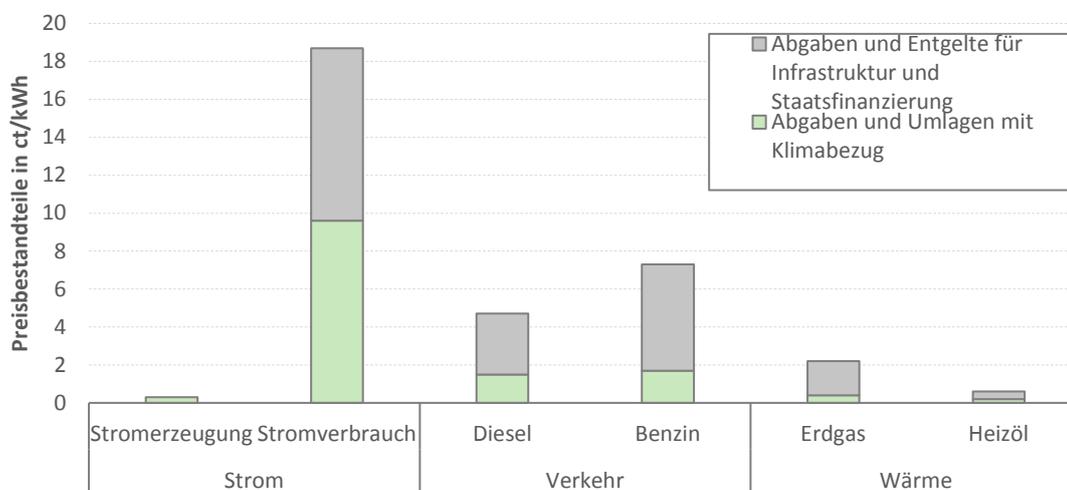
Dynamische EEG-Umlagen bzw. Netzentgelte

Die dynamische EEG-Umlage/Netzentgelte kann an den Spotmarktpreis oder den regionalen Netzzustand gekoppelt sein. In Zeiten eines regionalen – durch ein hohes Wind- oder Sonneneinstrahlungsaufkommen bedingten – Stromüberangebotes sinken die Strompreisbelastungen. Wenn das Angebot knapp ist, steigen sie. Dadurch wird ein flexibles Nachfrageverhalten angereizt, welches den Marktwert von Erneuerbaren erhöht, die Häufigkeit der Zwangsabregelungen und die Kosten für Redispatchmaßnahmen reduziert. Damit begünstigt eine dynamische Umlage- bzw. ein dynamisches Entgelt die Flexibilisierung und Elektrifizierung aller Sektoren. In diesem Kontext sind die Konflikte zwischen Spotmarktpreissignal und Netzknappheiten sowie die Komplexität des Entgeltsystems und Liquiditätseffekte zu berücksichtigen.

Sektorübergreifende Energiepreisbelastungen und Grenzwerte

Aktuell ist die Belastung mit Entgelten, Steuern, Abgaben und Umlagen der Letztverbraucherpreise für Strom, Verkehr und Wärme ungleich verteilt (siehe Abbildung 2-5 und Abbildung 2-6).

Abbildung 2-6: Regulierte Energiepreisbestandteile in Deutschland (in Anlehnung an Agora Energiewende 2017)



Sowohl die unterschiedlichen Belastungen insgesamt, als auch in Bezug auf den Anteil der klimapolitisch bedingten Belastungen verhindern einen anwendungs- und technologieoffenen Wettbewerb. Für einen verstärkten übergreifenden Wettbewerb kann das dargestellte Ungleichgewicht korrigiert werden, wodurch beispielsweise elektrische Wärmepumpen konkurrenzfähiger werden. Wenn bestimmte Umlagen (EEG-Umlage), Abgaben, Steuern (CO₂-Steuer) sowie Grenzwerte vereinheitlicht oder eingeführt werden, wird dies eine verstärkte Elektrifizierung und indirekte Dekarbonisierung der Sektoren ermöglichen.

Energiepreisbelastungen nur für Nutzenergie

Darüber hinaus kann geprüft werden, Energiepreisbelastungen (Umlagen, Abgaben, Steuern und Infrastrukturentgelte) an der Stelle zu erheben, wo jeweils Endenergie zur Umwandlung in Nutzenergie und Bereitstellung von Energiedienstleistungen aus den sektorengestellten Systemen entnommen wird. Ein positives Beispiel in diese Richtung ist, dass im Zuge der EEG-Novelle 2017 die zweifache Belastung des Speicherbetriebs mit der EEG-Umlage weitgehend beseitigt wurde. Ansonsten ist es für die rechtliche Umsetzbarkeit eventuell notwendig Sektorkopplungstechnologien als eigenständige Kategorie im Regulierungsrahmen zu verankern (vgl. hierzu Kapitel 2.6.3).

Integrierter Netzentwicklungsplan Strom und Gas

Wie bereits bei den vorherigen beiden Punkten deutlich wird, ist es wichtig, bei der Gesetzgebung sektorübergreifend vorzugehen. Ein Beispiel dafür wäre ein

integrierter, gemeinsamer Netzentwicklungsplan für Strom und Gas. Dieser hätte eine verbesserte Abstimmung der beiden Sektoren zur Folge, woraus eine verbesserte Flexibilität resultiert.

Förderung von Digitalisierungskonzepten

Die Mehrzahl der angesprochenen sektorenkoppelnden Technologien setzt eine ausgezeichnete IKT-Struktur voraus, mit welcher ein markt- oder systemdienliches Verhalten ermöglicht oder begünstigt wird. Es ist zu prüfen, inwieweit die Digitalisierung im Sinne der Sektorkopplung über bestehende Maßnahmen, wie den Smart-Meter-Rollout, hinaus gefördert werden kann.

2.6.3 Juristische Aspekte

Juristisches Grundverständnis des Begriffs der Sektorkopplung

Neben der technischen und wirtschaftlichen Perspektive sollte der Blick auf die Sektorenkopplung auch aus der juristischen Perspektive gerichtet werden.

Der heutigen Rechtsrahmen greift partiell die Sektorenkopplung, zumeist an einzelne Technologien anknüpfend, auf. Dieses Vorgehen, über die Regelung einzelner Spezialfälle und konkreter Technologien führt zu einem Klein-Klein des Rechtsrahmens, der nicht für neue Technologien offen ist und so den Marktzutritt für Innovationen erheblich erschwert. Zudem wird die Rechtsanwendung zunehmend verkompliziert.

In einem ersten Schritt könnte daher eine Teilmenge der Sektorkopplung herausgegriffen und im Gesetz legal definiert werden, damit im gesamten Rechtsrahmen auf diesen Begriff verwiesen werden kann und damit eine einheitliche Terminologie zugrunde gelegt wird. Eine Sektorkopplungsdefinition anstelle der Bezugnahme auf einzelne Technologien ermöglicht die Subsumtion neuer Technologien unter den Begriff, sodass die Integration von Innovationen keiner Wortlautanpassung bedarf und das Rechtssystem so technologieoffener wird. Zentrales Ziel der Definition ist dabei die Festlegung einer Marktrolle der Sektorenkopplungstechnologien im regulierten Bereich der Energiewirtschaft.

In einem nächsten Schritt könnte die Sektorenkopplung im weiten Sinne als Ausgangspunkt der Regulierung normiert werden. Dies umfasste eine vollständige Integration der verschiedenen Sektoren hin zu einem Gesamtenergiesystem, das nicht mehr anhand des Einsatzstoffes differenziert, sondern ein gemeinsamer Rechtsrahmen für „Energie“ entsteht. Für diesen zweiten Schritt

müssen jedoch hohe Hürden genommen werden. Der gesamte Normenbestand des deutschen Energierechts müsste überarbeitet und neu gefasst werden. Zudem wären voraussichtlich Verfassungsänderungen u.a. im Bereich Finanzverfassung erforderlich, die eine Zwei-Drittel-Stimmenmehrheit im Bundestag voraussetzen. Da zudem das EU Recht einen (teils recht engen) Rahmen für die nationale Energierechtsetzung vorgibt, müsste es auch hier Anpassungen geben, die nicht nur das EU Sekundär- sondern auch das Primärrecht betreffen, da fraglich ist, ob die Kompetenzen der Energie-Union ausreichend sind.

Die Integration einer zunächst nicht umfassenden Legaldefinition in den Rechtsrahmen leitet sich aus rechtswissenschaftlichen Annahmen ab und trifft insofern keine Aussagen darüber, was technisch oder ökonomisch optimal ist. Aus diesen Blickwinkeln mag es sinnvoll erscheinen, direkt den Rechtsrahmen an eine weite Definition der Sektorenkopplung anzupassen. Legislatorsch erscheint es aber geboten, zeitnah zunächst einen Ausschnitt der Sektorenkopplung zu definieren und die vollumfängliche Umstrukturierung des Energierechts als längerfristiges Ziel zu definieren.

Technologisch ist die Sektorkopplung wie oben dargestellt ein sehr wichtiges Instrument, um alle Sektoren „auf grün zu stellen“ und somit die politischen Klimaschutzziele zu erreichen. Dabei kann sie – wie ausgeführt – sehr breit verstanden werden und die Kopplung aller Sektoren umfassen. Kernelement wäre dann die Substitution fossiler Energieträger. Zur Wahrung der Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit der Energieversorgung sollte sie zudem einen Beitrag zur Systemsicherheit leisten, indem sie system-, netz- und marktdienlich eingesetzt wird.

Juristisch sollte sich einer Sektorkopplungsdefinition über die Ziele des Gesetzgebers genähert werden. Der Gesetzgeber verfolgt die Treibhausgasreduzierung als übergeordnetes Ziel. Auf dem Weg dorthin rückt Strom aus erneuerbaren Energien in den Blickpunkt. Gangbar erscheint es somit, die Sektorkopplung zunächst im engeren Sinne mit Strom aus erneuerbaren Energien als Ausgangsprodukt zu definieren. Insofern weicht der Begriff durchaus vom technischen Begriff ab, was darin begründet liegt, dass es sinnvoll erscheint, bestimmte Rechtsfolgen nicht an den Betrieb von Sektorkopplungsanlagen mit fossilem Strom zu knüpfen. Eine Begrenzung der Definition ermöglichte es den Betrieb der Anlagen mit Strom aus erneuerbaren Quellen anzureizen.

Gesetzliche Anknüpfungspunkte

§ 1a Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) formuliert die Grundsätze des Strommarktes. § 1a Abs. 3 Satz 2 EnWG ist recht neu in das EnWG aufgenommen worden und fordert, dass „ein Wettbewerb zwischen effizienten und flexiblen Erzeugungsanlagen, Anlagen zur Speicherung elektrischer Energie und Lasten, eine effiziente Kopplung des Wärme- und des Verkehrssektors mit dem Elektrizitätssektor sowie die Integration der Ladeinfrastruktur für Elektromobile in das Elektrizitätsversorgungssystem“ entstehen sollen. Hierdurch werden bereits wichtige Elemente der Sektorkopplung angesprochen. Als Grundsatz allein entfalten sie aber kaum rechtliche Durchschlagskraft, hierfür bedarf es einer Definition und eines Anwendungsbereichs. Die Formulierung zeigt jedoch die Blickrichtung des EnWG, die Sektorkopplung ausgehend vom Stromsektor zu definieren.

Auf die technologische Sektorkopplung nimmt das Gesetz gegenwärtig im Wesentlichen über Normen zum Ausgleich bestehender Nachteile (Steuer-, Abgaben- und Umlagenreduktion) und Normen mit Gebotscharakter (Quoten) Bezug. Im PtX-Bereich ist dabei vor allem das Erneuerbare-Energien-WärmeGesetz zu nennen, das eine anteilige Nutzungspflicht erneuerbarer Energien zur Deckung des Wärme- und Kältebedarfs normiert. Als erneuerbare Energie gilt dabei mittels Wärmepumpen nutzbar gemachte Umweltwärme.¹⁵ In der KWK-Sparte ist das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz hervorzuheben, das Zuschlagszahlungen für Strom aus KWK-Anlagen, Wärmenetzen und Wärmespeichern gewährt.¹⁶ Die Elektromobilität wird durch Steuervorteile gefördert: so sind bei der Bewertung von Entnahmen durch die private Nutzung eines betrieblichen Fahrzeugs die Kosten des Batteriesystems aus dem Listenpreis des Pkw ausgenommen¹⁷; der Strom für den Schienen- und Omnibusverkehr unterliegt einem ermäßigten Steuersatz¹⁸; die Aufladung von Elektrofahrzeugen beim Arbeitgeber gilt als steuerfreier Sachbezug¹⁹. Nach einem Entwurf der Kommission sind Neubauten von Nichtwohngebäuden mit mehr als zehn Parkplätzen künftig mit Ladeeinrichtungen auszurüsten.²⁰

¹⁵ § 2 Abs. 1 Nr. 2, §§ 3, 5 EEWärmeG.

¹⁶ §§ 18-25 KWKG, § 14 Abs. 1 Nr. 4 EEWärmeG.

¹⁷ § 6 Abs. 1 Nr. 4 Satz 2 Hs. 2 EStG.

¹⁸ § 9 Abs. 2 StromStG.

¹⁹ § 3 Nr. 46 EStG.

²⁰ Art. 8 Abs. 2 Gebäude-Richtlinie; siehe dazu COM (2016) 765 final, S. 12.

Regelungen zur system-, netz- und marktdienlichen Sektorkopplung finden sich u.a. im EnWG²¹, dem Erneuerbare-Energien-Gesetz²², der Stromnetzentgeltverordnung²³ und neuerdings auch im Messstellenbetriebsgesetz²⁴. Diese Normen knüpfen teils an die konkrete Technologie an, sind teils aber bereits technologieneutraler ausgestaltet.

Diese formellen Parlamentsgesetze mit Bezug zur Sektorkopplung enthalten zahlreiche Verordnungsermächtigungen, wodurch die Legislative der Exekutive ermöglicht, die Gesetze durch Rechtsverordnungen zu konkretisieren. Hingewiesen werden soll an dieser Stelle auf das Förderprogramm SINTEG „Schaukasten intelligente Energie – Digitale Agenda für die Energiewende“²⁵, das gerade die weitere Flexibilisierung des Verbrauchs durch Sektorkopplung erforscht. Dessen Ausführungsverordnung spricht de lege lata von der „Umwandlung von Strom in einen anderen Energieträger“²⁶. Die Formulierung ist technologieneutral. Dabei haben die Betreiber von Anlagen, die der „Umwandlung“ dienen, zunächst die Netzentgelte und Umlagen nach Maßgabe der bestehenden Normen zu entrichten.²⁷ Nach § 6 Abs. 1, § 8 Satz 2 SINTEG-V²⁸ sind ihnen aber diejenigen wirtschaftlichen Nachteile zu erstatten, die sich aus der Wälzung von Umlagen auf die Letztverbraucher während marktdienlicher oder netzdienlicher Zeiträume ergeben: entweder muss der Strombezug marktdienlich sein, nämlich in einem Zeitfenster negativer Spotmarktpreise der Börse;²⁹ oder der Verbrauch dient der Vermeidung von Systemdienstleistungen des Netzbetreibers und erfolgt daher netzdienlich.³⁰ Die Norm trägt dem Umstand Rechnung, dass Strom bisher stärker mit Entgelten und Umlagen belastet ist als Brennstoffe. Sektorkopplungsanlagen weisen dadurch gegenwärtig höhere Gestehungskosten auf. Die Norm schafft somit ein „Level Playing Field“.

21 Z. B. § 13 Abs. 6a, § 14a EnWG.

22 § 27a Satz 1 Nr. 4, 5 EEG.

23 § 19 Abs. 2, 4 StromNEV.

24 § 48 MsbG.

25 § 119 EnWG; Verordnungsentwurf:
https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/entwurf-sinteg.pdf?__blob=publicationFile&v=4.

26 § 2 Satz 1 Nr. 4 SINTEG-V.

27 § 8 Satz 1 SINTEG-V.

28 Die Norm beruht auf den Ermächtigungsgrundlagen der §§ 119 Abs. 2 Nr. 2 EnWG, 33 Abs. 1 Nr. 3 KWKG, 95 Nr. 6 lit. a EEG.

29 § 6 Abs. 2 Nr. 2 SINTEG-V.

30 § 6 Abs. 2 Nr. 1 SINTEG-V.

De lege ferenda könnten neben KWK-Anlagen auch andere Sektorkopplungstechnologien als zuschaltbare Lasten durch den Netzbetreiber systemdienlich gesteuert werden.³¹ § 14a EnWG ermächtigt den Verteilnetzbetreiber zu Abschlüssen von bilateralen Verträgen mit Betreibern steuerbarer Verbrauchseinrichtungen. Die Digitalisierung der Energiewende ermöglicht aber auch anderen Stakeholdern Steuerungsmaßnahmen durchzuführen. Der Gesetzgeber wird daher de lege ferenda einen möglichen Konflikt verschiedener Steuerer um dieselbe Last regulieren müssen.³² Die Komponente der Netzdienlichkeit eines legaldefinierten Sektorkopplungsbegriffs könnte dabei für die Normierung eines Prioritätsprinzips von Steuerungssignalen des Netzbetreibers im Hinblick auf Sektorkopplungsanlagen genutzt werden. Weitere Verordnungsermächtigungen von denen de lege ferenda Gebrauch gemacht werden könnte finden sich in § 33, § 46 Nr. 10, 11 MsbG, §§ 39j, 88d EEG.

Bedeutung der Einheitlichkeit des Begriffs

Zur Gewährleistung der Einheit der Rechtsordnung sollte sämtlichen Normen und Verordnungen ein einheitliches Begriffsverständnis zu Grunde gelegt werden.

Eine einheitliche Definition des Sektorkopplungsbegriffs auf normativer Ebene wäre aus juristischer und letztlich wohl auch aus ökonomischer und politischer Perspektive zu begrüßen. Der Gesetzgeber könnte z. B. bei den „Begriffsbestimmungen“ des § 3 EnWG den Begriff legal definieren. Bereichsspezifische Paragrafen und Rechtsverordnungen könnten sodann auf § 3 EnWG Bezug nehmen. Nur ein einheitliches Begriffsverständnis ermöglicht allen Stakeholdern, also Sektorkopplungsanlagenbetreibern, Netzbetreibern, Lieferanten und der Verwaltung eine effektive und rechtssichere Anwendung der Normen. Ein divergentes Begriffsverständnis müsste hingegen nach dem Gleichheitsgebot des Art. 3 Abs. 1 GG sachlich gerechtfertigt werden und würde Rechtsunsicherheit schaffen und sich womöglich wirtschaftlich nachteilig auswirken, indem Investitionen gehemmt werden oder eine komplexe Rechtsanwendung Transaktionskosten hervorruft. Politisch bietet eine einheitliche Definition die größte Chance auf Akzeptanz der Regelungen.

³¹ § 13 Abs. 6a Satz 7, § 13i.

³² § 14a Satz 3 EnWG.

Rechtliche Erwägungen für eine Begriffsdefinition

Sollte die Sektorkopplung mit „Strom aus erneuerbaren Energien“ erfolgen, kann an die Legaldefinition von EE-Strom in § 3 Nr. 21 EEG angeknüpft werden. Dabei ist zu klären, ob der Einsatz von „weit überwiegend erneuerbaren Energien“ im Rahmen der Sektorkopplung genügen soll oder „ausschließlich“ erneuerbare Energien zu fordern sind. Insoweit besteht auf den ersten Blick ein Zielkonflikt zwischen Treibhausgasemissionsminderungen und Systemstabilität. Das politische Ziel der vollständigen Dekarbonisierung intendiert langfristig eine Ausschließlichkeit des Einsatzes erneuerbarer Energien. Die Netzstabilität sowie die wirtschaftlichen und technischen Rahmenbedingungen der Sektorkopplungstechnologien können einen partiellen „Zuschuss“ konventionellen Stroms erfordern. Die Ziele konfliktieren jedoch nicht, sondern laufen gleich: Ein systemdienlicher Strombezug im Sinne der – oben ausgeführten – SINTEG-Verordnung erfolgt in aller Regel zu einem Zeitpunkt hoher Einspeiseleistung durch erneuerbare Energien. Nach dem Merit-Order-Prinzip sind konventionelle Kraftwerke in diesem Zeitpunkt weitestgehend abgeschaltet. Zur Sicherung der Netzstabilität ist gegenwärtig jedoch ein kleinerer Beitrag konventionellen Stroms unvermeidlich. Die Netzstabilität ist ihrerseits Voraussetzung für eine bestmögliche Integration erneuerbaren Stroms. Der konventionelle Stromanteil dient somit einer weitgehenden Dekarbonisierung. Letztlich gehen auch die politischen Zielvorgaben von einer stufenweisen Erreichung der 100-Prozent-EE-Ziele aus. Ein weit überwiegender Einsatz von erneuerbaren Energien dürfte damit den technischen Gegebenheiten und den politischen Zielen entsprechen.

Bei etwaigen monetären Privilegierungen sollte zur Vermeidung eines Konflikts mit dem Beihilferecht der Europäischen Union lediglich auf den Stromanteil aus erneuerbaren Energien abgestellt werden.³³ Dabei sollte zur Gewährleistung der praktischen Anwendbarkeit der Definition, vor allem im Verwaltungsvollzug, eine Nachweispflicht für den Strombezug aus erneuerbaren Energien normieren werden. Die SINTEG-Verordnung enthält in § 12 SINTEG-V Anhaltspunkte für Ausgestaltungsmöglichkeiten. Zur Entwicklung von Geschäftsmodellen für die Sektorkopplung ist normativ zu klären, wie „grüner“ Strom bezogen werden kann.

³³ Zur unionsrechtlichen Zulässigkeit der Förderung von erneuerbarem Strom: Staatliche Beihilfen, Leitlinien für staatliche Umweltschutzbeihilfen, häufig gestellte Fragen: http://europa.eu/rapid/press-release_IP-14-2122_de.htm; European Commission, Pressemitteilung, Staatliche Beihilfen: http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-08-31_de.htm.

Der Gesetzgeber könnte langfristig in einen nächsten Schritt, wie oben vorgeschlagen und technisch wohl sinnvoll, den vollständigen Sektorkopplungsbegriff definieren, sich aber zunächst nur auf den Power-to-X-Begriff als dessen Teilmenge konzentrieren. Die gegenwärtigen technischen und normativen Anknüpfungspunkte bestehen in PtX-Anwendungen. Der Begriff sollte ebenfalls die Elektromobilität als Power-to-Mobility umfassen. Aktuell knüpft die Regulierung grundsätzlich nach § 3 Nr. 25 EnWG i.V.m. § 2 Nr. 6 LSV an den Strombezug des Ladepunkts als Letztverbrauch an. § 14a S. 2 EnWG hingegen stellt - insofern inkonsistent - auf das Elektromobil ab. Die Wandlung des zwischengespeicherten Stroms in Bewegung erfolgt dann erst im der Regulierung nachgelagerten Schritt. Diese Problematik kann dadurch gelöst werden, dass Zwischenspeicherung aus der Definition des Letztverbrauchs ausgenommen wird, wodurch gleichzeitig Hemmnisse für den Einsatz von Speichern reduziert würden, ohne dass Ausnahmetatbestände erforderlich werden.

Eine engere Sektorkopplungsdefinition in Form des Power-to-X-Begriffs als erster Schritt würde den Rechtsanwendern die Subsumtion unter die Definition erleichtern, ohne den Rechtsrahmen im Ganzen umgehend zu erneuern. Ein hohes Maß an Klarheit und Bestimmtheit des Gesetzes dient der Vorhersehbarkeit der Rechtsanwendung und fördert somit die – im Rechtsstaatsprinzip des Grundgesetzes (Art. 20 Abs. 3 GG) verankerte – Rechtssicherheit. Rechtssicherheit schafft Investitionssicherheit und ist daher ein wesentliches Kriterium betrieblicher Entscheidungen. Daher erscheint überlegenswert, zunächst eine Legaldefinition für den Power-to-X-Begriff in das Gesetz aufzunehmen. Sollten in Zukunft Technologien der Sektorkopplung außerhalb des PtX-Bereichs (verstärkt) Bedeutung gewinnen, sollte in einem Zwischenschritt eine (punktuelle) Öffnung der Legaldefinition erwogen werden. Der Gesetzgeber würde also „auf Sicht fahren“, wobei die Technologieneutralität gewahrt wird.

Zudem sollten Haushaltsgeräte abgegrenzt werden. Zum Beispiel soll ein Wasserkocher nicht als Power-to-Heat-Anlage gelten. Was für Naturwissenschaftler und Verbraucher selbstverständlich erscheint, könnte sich bei einer positivistischen Auslegung des Wortlauts (wozu Juristen mitunter neigen) als kompliziert umsetzbar erweisen. Viele Haushaltsgeräte erzeugen kinetische Energie (Rasierer, Waschmaschine, Zahnbürste) oder (als Beiprodukt) Wärme. Eine zu weite (Power-to-X-) Definition droht aus juristischer Sicht konturlos zu werden, da sie nahezu alle Lasten erfasst.

Aus juristischer Perspektive sind bei der Definierung des Sektorkopplungsbegriffs somit eine Vielzahl divergenter Entscheidungen zu treffen.

2.6.4 IT-Aspekte der Sektorkopplung

Einleitung

Unter Digitalisierung wird weithin die Umstellung von Prozessen und Anwendungen auf automatisierte, IT-gestützte Verfahren verstanden. Diese ist mit Erwartungen von Effizienzgewinnen, einer deutlichen Erweiterung der Möglichkeiten und neuen Geschäftsmodellen verbunden. Die Dynamik der Entwicklung führt zu einer enormen Veränderung von Prozessen, Geschäftsmodellen und Wertschöpfungsketten.

Digitalisierung ist ein Trend, der alle Branchen und Bereiche des Lebens erfasst. Laut verschiedener Studien ist der Grad der Digitalisierung in der Energiewirtschaft bisher im Vergleich mit anderen Branchen eher niedrig (u. a. BBH 2017). Digitalisierung betrifft dabei nicht nur neue Geschäfts- und Vertriebsmodelle, sondern auch die Effizienz der internen Unternehmensprozesse sowie die Flexibilisierung der Infrastruktur.

Relevant im Sinne der Sektorkopplung sind die systemdienlichen Aspekte der Vernetzung, also

- Abregelung von fluktuierenden EE-Anlagen vermeiden,
- Auslastung der Stromnetze optimieren,
- Flexibilisierung der Nachfrageseite zur Minimierung des Bedarfs dedizierter Stromspeicher.

Eine Kopplung der Sektoren findet dann statt, wenn mit diesem Anspruch Lasten *gezielt* verlagert werden.

Mit der Transformation des Energiesystems entsteht daher an verschiedenen Stellen eine neue Komplexität, die nur mit einem hohen Automatisierungsgrad beherrschbar wird – die Sektorkopplung erhöht diese Komplexität zusätzlich. Die Digitalisierung wird daher mit großen Chancen wahrgenommen, aber auch mit einer großen Sorge, bei allen tiefgreifenden Veränderungsprozessen die hohe Versorgungsqualität und Wirtschaftlichkeit der Energieinfrastruktur sicherzustellen.

Digitalisierung der Energiesektoren

Bisher sind die einzelnen Sektoren gar nicht bis schwach gekoppelt. Das bedeutet, dass unabhängige IT-Steuerungssysteme existieren mit spezifischen Datenformaten, Schnittstellen und Standards. Durch die Auftrennung der Mark-

trollen mit der rechtlichen und operationellen Entflechtung ist ein weiterer Standardisierungs- und Kommunikationsbedarf in der Energiewirtschaft entstanden.

Darüber hinaus wird auch in der Energiewirtschaft der allgemeine Trend zur massenhaften Erhebung von Daten beobachtet. Grundsätzlich fallen in den Netzsektoren Daten vor allem im Rahmen der Prozesssteuerung an. Jedoch können diese unter Umständen auch für vor- oder nachgelagerte Wertschöpfungsstufen Relevanz besitzen. Die Bundesnetzagentur diskutiert in Ihrem Papier „Digitale Transformation in den Netzsektoren“ (BNetzA 2017b) ausführlich die Zielkonflikte der Datenverwendung. Eine zentrale Herausforderung besteht demnach darin, einen Ausgleich zwischen der Datensouveränität der Verbraucher einerseits und der Innovationswirkung datenbasierter Geschäftsmodelle andererseits zu finden. Darüber hinaus gilt es, trotz reguliertem Markt keine Wettbewerbsverzerrung durch zu restriktive Nutzungsrechte zu schaffen. Die Bundesnetzagentur konstatiert, dass sich Fragen hinsichtlich eines offenen Zugangs zu Daten als sehr komplex erweisen.

Für den effektiven Austausch von Daten („Marktkommunikation“) überwacht die Bundesnetzagentur die verbindliche Standardisierung von Geschäftsprozessen und Datenformaten (EDIFACT-Formate).

Beispiele für IT-Anwendungen in der Sektorkopplung

Virtuelle Kraftwerke

Ein virtuelles Kraftwerk ist ein Geschäftsmodell, bei dem dezentrale Erzeugungsanlagen (wie beispielsweise Photovoltaik-, Biogas-, Windenergieanlagen, Blockheizkraftwerke etc.) vernetzt und vom Betreiber des virtuellen Kraftwerks zentral angesteuert werden können. Der Betreiber des virtuellen Kraftwerks übernimmt dabei das Pooling der Erzeugungsanlagen. Dies bedeutet, dass er die angeschlossenen Anlagen zusammenschalten und so deren erzeugten Strom gebündelt am Regelenergiemarkt bzw. im Rahmen der Direktvermarktung anbieten kann. Darüber hinaus übernehmen die Betreiber virtueller Kraftwerke in der Regel eine Reihe von weiteren Aufgaben. Sie installieren die notwendige Fernwirktechnik, regeln Formalitäten mit den Netzbetreibern, erstellen Prognosen über die Erzeugungsmengen und die Abrechnungen für die Anlagenbetreiber und überwachen die angeschlossenen Erzeugungsanlagen. Da es sich bei den Anlagenbetreibern häufig um relativ kleine Marktteilnehmer handelt, haben virtuelle Kraftwerke für sie insbesondere den Vorteil, dass sie ihnen

erst den Zugang zum Regenergiemarkt bzw. zur Direktvermarktung ermöglichen.

Multi-Sparten Smart Metering

Das BMWi vertritt im Grünbuch Energieeffizienz (BMWi 2016a) die These, dass kontinuierliche Verbrauchserfassung neue Möglichkeiten der Analyse, Nutzerinformation und Entwicklung darauf basierender Mehrwertdienste und (Finanzierungs- und Beratungs-)Dienstleistungen für Energieeffizienz eröffnen, die in dieser Form zuvor technisch-organisatorisch unmöglich oder (zu) teuer waren. Darüber hinaus werden hochaufgelöste Daten der intelligenten Messsysteme zunehmend für eine Betriebsoptimierung des Stromnetzes herangezogen.

Mit dem Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende und der Entwicklung der Schutzprofile durch das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) sind in den letzten Jahren die Rahmenbedingungen für einen flächendeckenden Ausbau der Smart-Meter-Infrastruktur in Deutschland geschaffen worden. Die Systeme werden zeitlich gestaffelt zunächst für Verbraucher mit hohem Stromverbrauch (über 6 MWh pro Jahr) und dezentrale Erzeugungsanlagen ab 7 kW_p verpflichtend eingeführt. Über die Systeme werden neben dem Stromzähler auch Gas- und Wärmemengenzähler ausgelesen werden können.

Die IT-Prozesse werden durch die hohen Schutzanforderungen und die zeitlich hochaufgelöste Erfassung der Zählerstände sehr komplex. Die Smart Meter Gateways sind darüber hinaus dafür vorbereitet, einen Steuerungskanal zwischen externen Marktteilnehmern und den Kundenanlagen zu etablieren. Hierüber sollen sowohl Marktprozesse wie die Teilnahme an Regelleistungsmärkten und *demand side management* als auch Steuerungseingriffe durch den Netzbetreiber realisiert werden. Dies macht eine Koordination und ggf. Priorisierung der Zugriffe durch eine weitere Instanz erforderlich.

Die grundlegenden Kommunikationsprotokolle und -technologien sind spezifiziert, allerdings sind für die Zugriffe auf Kundenanlagen noch einige Aspekte unklar.

Elektromobilität

Die Ladeinfrastruktur und die Umrichter (Leistungselektronik zur Umwandlung von Wechsel- auf Gleichstrom) stellen die Schnittstellen zwischen Batterie und Stromnetz dar. Ladevorgänge könnten sowohl zur Vermeidung von Netzengpässen als auch zur Hebung der Flexibilität auf Verbrauchsseite steuerbar sein.

Die IT-Strukturen dafür wurden in den letzten Jahren entwickelt, sind aber derzeit noch nicht der Standard bei marktverfügbaren Fahrzeugen. Ladeinfrastrukturen sind häufig mit einem übergeordneten IT-System zur Betriebsüberwachung und Abrechnung vernetzt. Eine Steuerung im Sinne der Sektorkopplung über dynamische Tarife o. a. ist technisch darstellbar, die Funktionen der entsprechenden Kommunikationsprotokolle werden stetig erweitert.

Übergeordnete IT-Aspekte mit zentraler Bedeutung für die digitale Transformation

Standardisierung ist ein wesentlicher Aspekt der Digitalisierung. Durch die Etablierung von Standards wird das Ziel verfolgt, Schnittstellen für Systeme, Verfahren, Prozesse und Formate zu vereinheitlichen, um Interoperabilität herzustellen und so die Effizienz der Leistungserstellung zu erhöhen. Bei der gesamtsystemischen Bewertung des Bedarfs hat sich die Use-Case-Systematik und das Smart Grid Architecture Model (SGAM) bewährt, siehe hierzu z. B. Gottschalk et al. (2017).

Als weiterer zentraler Aspekt bezeichnet Resilienz die Fähigkeit von technischen Systemen, bei Störungen bzw. Teilausfällen nicht vollständig zu versagen, sondern wesentliche Systemdienstleistungen aufrechtzuerhalten. Dies ist insbesondere durch die zunehmende Komplexität der Automatisierung eine der wesentlichen Herausforderungen der Zukunft.

Mit der massenhaften Erhebung von Daten stellen sich grundsätzliche Fragen der Datenhoheit (wer erfasst Daten und wem gehören diese, wer benötigt Zugriff auf welche Daten) und des Datenschutzes. Netzbetreiber und die übrigen Marktbeteiligten besitzen und verarbeiten z. B. in der Netzsteuerung, im Rahmen von Verbrauchs- und Handelsprognosen, bei Kraftwerkseinsatzplanungen, im Börsenhandel usw. schon heute enorme Datenmengen. Daten werden zukünftig vermehrt in separaten Dienste-Plattformen erhoben und verarbeitet, ein Großteil der zukünftigen Wertschöpfung wird bei datenbasierten Diensten vermutet. Diese riesigen Datenbestände bieten eine Fülle neuer Erkenntnisse, die zum Teil erst zu verwertbarem Wissen werden, indem verschiedene Datenbestände zueinander in Beziehung gesetzt werden und zielgerichtet ausgewertet werden. Dies steht in einem vermeintlichen Widerspruch zu den hohen Datenschutzstandards in Deutschland. Die Gesetzgebung wird eine neue Balance dieser Aspekte finden müssen, insbesondere bei der Vernetzung und Verknüpfung verschiedener Datensätze aus den verschiedenen Sektoren.

Auch Anforderungen an die IT-Sicherheit müssen erfüllt werden. Im Energiesektor werden gemäß § 2 BSI-KritisV die Versorgung mit Strom, Gas, Kraftstoff, Heizöl und Fernwärme als kritische Dienstleistungen eingestuft. Welche Anlagen oder Teile dieser Dienstleistungen im Einzelnen als kritische Infrastruktur anzusehen sind und daher besonderen IT-Sicherheitsstandards unterliegen, regelt die BSI-KritisV anhand von Schwellenwerten. Der IT-Sicherheitskatalog der Bundesnetzagentur enthält Anforderungen an die Netzbetreiber zum Schutz von Informations- und Kommunikationstechnologien, die für einen sicheren Netzbetrieb notwendig sind. Auch Energieanlagen müssen zukünftig, sofern diese die Schwellenwerte der BSI-KritisV erreichen, spezielle Anforderungen an die Informationssicherheit erfüllen. Hiervon betroffen sind insbesondere große Kraftwerke und Gasspeicher. Die Anforderungen für Energieanlagen werden derzeit von der Bundesnetzagentur im Dialog mit den betroffenen Kreisen und dem BSI erarbeitet.

3 Potentiale und Herausforderungen der Sektorkopplung von Angebots- und Nachfragesektoren

3.1 Potentiale der Sektorkopplung

3.1.1 Überblick

Wie oben in Kapitel 2.2 ausgeführt wurde, hat die Sektorkopplung zwischen Angebots- und Nachfrageseite hohe Potentiale im Bereich des Verkehrs-, Wärme- und Industriesektors. Die technischen Potentiale sind hier sehr groß, weil sich praktisch alle fossilen Energieträger substituieren lassen (siehe zu Berechnungen einer solchen Umstellung UBA 2014). Dort werden 2.600 bis 2.850 TWh an Strombedarf für eine solche Umstellung in Deutschland für das Jahr 2050 quantifiziert, wenn PtX die dominierende Lösung in vielen Anwendungen ist. Dies bedeutet aber einen enormen Ausbau an Erneuerbaren in Deutschland (siehe auch die Diskussion in Kapitel 3.2 hierzu) oder alternativ bzw. ergänzend den Import von synthetischen Kraftstoffen im hohen Umfang.

Geringe PtX-Potentiale, aber hohe Anteile der Anwendung von direkter Stromnutzung in neuen Anwendungen gerade im Verkehr und in der Wärme (Power-to-Heat) werden in Pfluger et al. (2017) gesehen.

Während steigende Anteile direkter Stromnutzung in neuen Anwendungen in allen Studien gesehen werden, wird das PtX-Potential sehr unterschiedlich bewertet (siehe beispielsweise Pfluger et al. 2017, Fraunhofer ISE 2015, Hydrogen Council 2017, Acatech 2017). Gerade als notwendige Flexibilitätsoption in Verbindung mit dem Ausbau der Erneuerbaren-Stromerzeugung, als saisonaler Speicher oder für bestimmte Anwendungen wie im Fernverkehr oder der Industrie werden relevante PtX-Potentiale gesehen. Manche Studien sehen einen zusätzlichen Strombedarf für PtX in Deutschland von bis zu 500 TWh.

Eine Analyse der Treiber für diese stark divergierenden Ergebnisse zu PtX in den verschiedenen Studien ergibt folgendes Bild:

- Unterschiede in den Rahmenannahmen wie Energieträger- und CO₂-Preise und Unterschiede bei techno-ökonomischen Annahmen zu Schlüsseltechnologien wie dem Elektrolyseur.
- Höhe der Realisierung der bestehenden Energieeffizienzpotentiale (deren Realisierung mindert den PtX-Bedarf).

- Höhe der THG-Ziele – je ambitionierter, desto mehr PtX wird gesehen. In vielen Studien wird ein größerer PtX-Bedarf ab Erneuerbaren-Energie-Anteilen von über 60 % in Deutschland gesehen (siehe Studiauswertung hierzu in Hydrogen Council 2017 und Acatech 2017).
- Höhe des Imports und Exports von Strom (europaweite Kupferplatte einschließlich der Anrainerstaaten durch Netzausbau führt zu signifikanten Ausgleichseffekten bei den Erneuerbaren und verringert den PtX-Bedarf).
- Umgang mit Überschussstrom (wird auch vorgesehen, dass zu manchen Zeiten auch Abregelungen von Erneuerbaren-Anlagen möglich sind – was wirtschaftlich zu befürworten ist – dann sinkt der PtX-Bedarf).
- Technologische Entwicklungen (gelingen schnelle Verbesserungen bei den PtX-Schlüsseltechnologien – Elektrolyseur, CO₂-Abscheidung und Speicherung und Direct Air Capture von CO₂ – dann wird PtX deutlich wirtschaftlicher).
- Höhe der Biomassepotentiale (je mehr Biomassepotentiale gesehen werden, umso geringer wird der Bedarf an PtX aus Strom bewertet, weil Biomasse ein Substitut für PtX, u. a. in der Langstreckenmobilität und in der Industrie, ist).

3.1.2 Beispielhafte Vertiefung der Potentiale für den Verkehrssektor

Im Verkehrssektor lassen sich neben den verschiedenen Verkehrsmodi (Straße, Schiene, Luft und Wasser) verschiedene Kraftstoffe für eine Sektorkopplung unterscheiden: zusätzliche direkte Verwendung von Strom im Verkehr oder Umwandlung von erneuerbarem Strom in flüssige (PtL) oder gasförmige (PtG) Kraftstoffe.

Im Straßenverkehr werden große Potentiale in der direkten Nutzung von Strom gesehen. Für Pkw sind Elektrofahrzeuge in vielen Studien die zentrale Option zur Reduktion der Treibhausgasemissionen bei gleichzeitiger, weiterhin umfangreicher Nutzung von motorisiertem Individualverkehr (siehe z. B. Peters 2012, Kasten et al. 2016 oder IEA 2017). Je nach Markthochlaufszszenarien werden bis 2030 ca. 110 bis 130 TWh zusätzlicher Strombedarf durch Elektrofahrzeuge im Pkw-Bereich gesehen und 80 bis 120 TWh bis 2050. Demgegenüber steht eine erhebliche Einsparung konventioneller Kraftstoffe, sodass sich im Jahr 2030 ca. 5 bis 20 Mio. t CO_{2eq} durch Elektromobilität einsparen ließen (Wietschel et al. 2015). Die erforderlichen zusätzlichen Strommengen sind nennenswert, erscheinen aber realisierbar und stellen per se keine besonders starke Belastung eines zukünftigen Energiesystems dar. Wichtig ist allerdings die Frage, wann Elektrofahrzeuge laden und ob diese zusätzliche Last flexibel ge-

steuert werden (siehe zu dieser Thematik Dallinger 2013, BMVI 2014, Boßmann 2015, Hennings et al. 2015). Gleichzeitiges Laden einer nennenswerten Anzahl an Elektrofahrzeugen kann lokal in den Verteilnetzen zu Engpässen führen. Eine zentrale Aufgabe für die Sektorkopplung zwischen Verkehr und Energiesystem wird daher in den nächsten Jahren das direkt oder indirekt (bspw. durch Anreize) gesteuerte Laden von Elektrofahrzeugen sein. Wenn das Laden der Elektrofahrzeuge beispielsweise strompreisgesteuert geschieht, trägt diese Flexibilisierung deutlich zur guten Umweltbilanz dieser Optionen bei: Es wird verstärkt Strom in günstigen Stunden mit hoher EE-Einspeisung genutzt.

Im Bereich des Straßengüterverkehrs sind besonders schwere Lkw mit über 12 t zulässigem Gesamtgewicht (zGG) und Sattelzugmaschinen trotz ihres geringen Gesamtbestandes für einen hohen Anteil des Energieverbrauches und der CO₂-Emissionen verantwortlich (10 % des Bestandes und 70 % der CO₂-Emissionen, vgl. Abbildung 3-1).

Abbildung 3-1: Bestand, Fahrleistung sowie CO₂-Emissionen von Lkw in Deutschland

LKW in Deutschland



Aufgrund der großen Tagesfahrleistungen und hohen Zuladung sind Batteriespeicher wegen ihrer geringen volumetrischen und gravimetrischen Energiedichte für schwere Lkw und Sattelzüge außerhalb der Verteilverkehre ungeeignet. Derzeit werden daher als Dekarbonisierungsoptionen für schwere Lkw Oberleitungen und gasförmige oder flüssige synthetische Kraftstoffe diskutiert (siehe zu synthetischen Kraftstoffen auch BMVI 2017). Beispielsweise ließen

sich bis 2030 je nach Markthochlauf 1 bis 5 Mio. t CO_{2eq} durch Oberleitungs-Lkw einsparen (Wietschel et al. 2017). Dabei ist zu beachten, dass die mögliche zusätzliche Stromnachfrage durch Oberleitungs-Lkw vermutlich inflexibel sein wird. In der aktuellen Diskussion ist aber noch unklar, welche der genannten Optionen volkswirtschaftlich am sinnvollsten sein wird. Klar ist, dass für die Produktion synthetischer Kraftstoffe zwei- bis dreimal mehr zusätzlicher erneuerbarer Strom bereitgestellt werden muss. Auf der anderen Seite sind für Oberleitungen aber im Vergleich zu flüssigen synthetischen Kraftstoffen zusätzliche Infrastrukturinvestitionen nötig. Da prinzipiell viele Versorgungspfade für den Straßengüterverkehr zur Verfügung stehen, bspw. auch über den Import synthetischer Kraftstoffe, ist noch nicht sicher, in welche Richtung die Entwicklung hier gehen wird.

Im Schienenverkehr sind bereits große Teile des Netzes und des Verkehrs elektrifiziert. Es bietet sich hier an, auch die restlichen Strecken ganz oder teilweise zu elektrifizieren oder aber Wasserstoff bzw. andere synthetische Kraftstoffe zu verwenden.

In der Luft- und Binnenschifffahrt wird ein weiteres Wachsen des Verkehrsaufkommens erwartet und die Anforderungen an die Energiedichten des Energiespeichers lassen alle Lösungen der direkten Stromnutzung sehr unwahrscheinlich erscheinen. Hier ist davon auszugehen, dass synthetische Kraftstoffe aus erneuerbarem Strom langfristig für eine vollständige Dekarbonisierung benötigt werden.

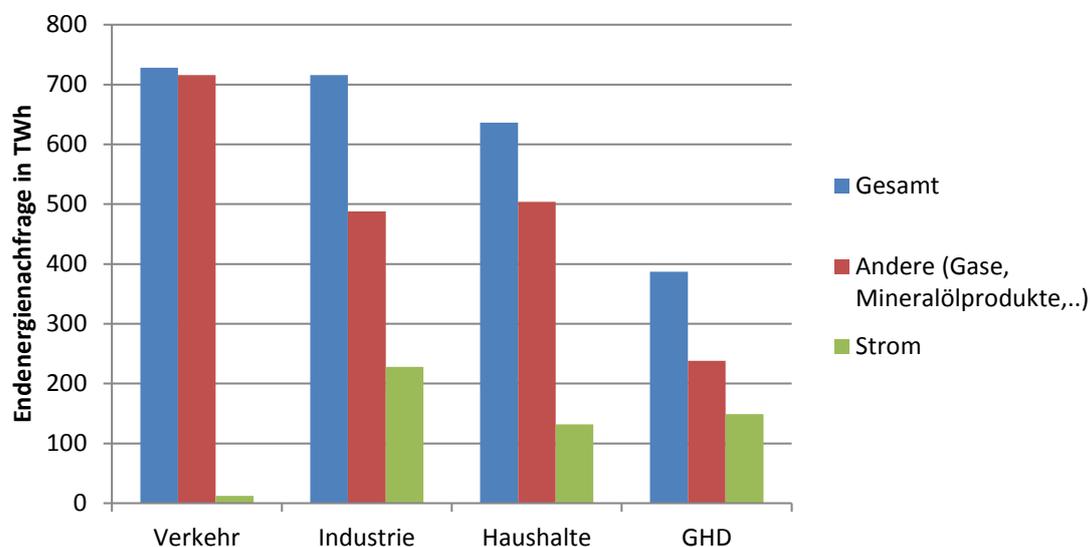
3.2 Erneuerbare Strombedarfsmengen und Systemherausforderungen

3.2.1 Überblick

Die Aufgabe der Substitution von fossilen Energieträgern durch erneuerbare ist mengenmäßig extrem herausfordernd³⁴. Dies zeigt eine Betrachtung der heutigen Anteile der einzelnen Endenergieträger im Vergleich zur gesamten Endenergienachfrage (siehe Abbildung 3-2). Von den 2.470 TWh wurden in 2015 nur gut 20 % (520 TWh) durch Strom gedeckt (siehe AGE 2017). Und Erneuerbare haben in 2015 knapp unter 200 TWh an Strom erzeugt, was einen Anteil von nur gut 8 % an der gesamten Endenergienachfrage ausmacht.

34 Siehe hierzu auch Wietschel et al. 2018.

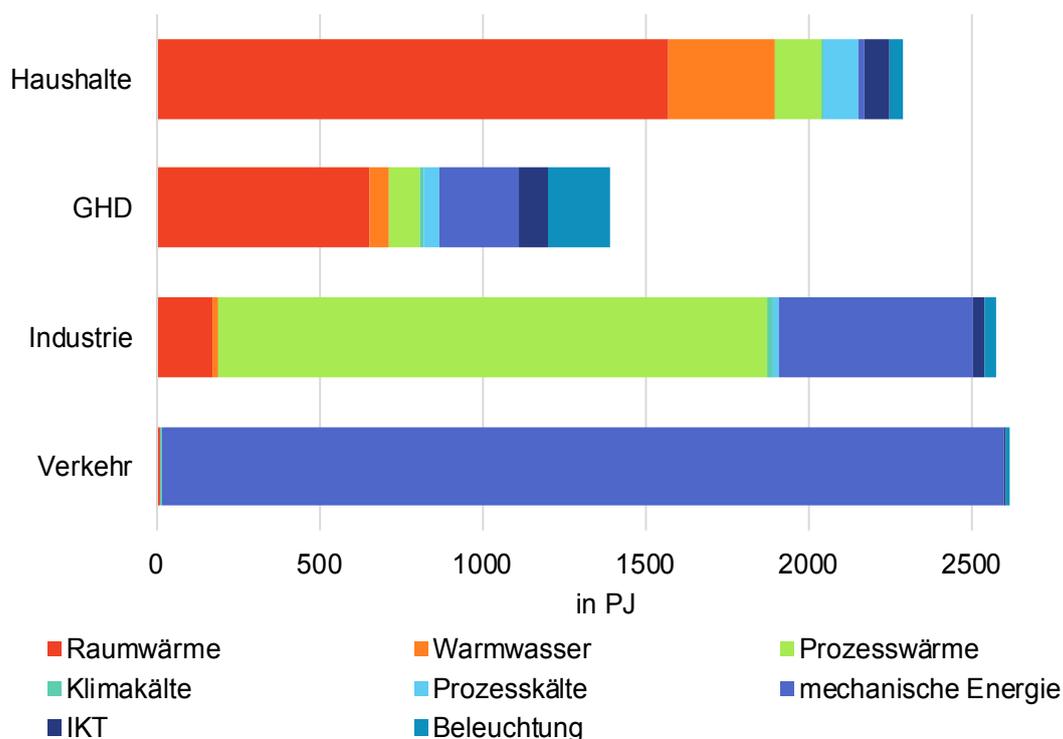
Abbildung 3-2: Endenergienachfrage in Deutschland in 2015 (Zahlen aus AGEB 2017)



Bei den Anwendungen der Energienachfrage hatten in 2015 in Deutschland die mechanische Energie mit 39 %, die Raumwärme mit 27 % sowie Warmwasser und sonstige Prozesswärme mit ebenfalls 27 % an der Endenergienachfrage die mit Abstand höchsten Anteile (siehe BMWi 2016b sowie Abbildung 3-3).

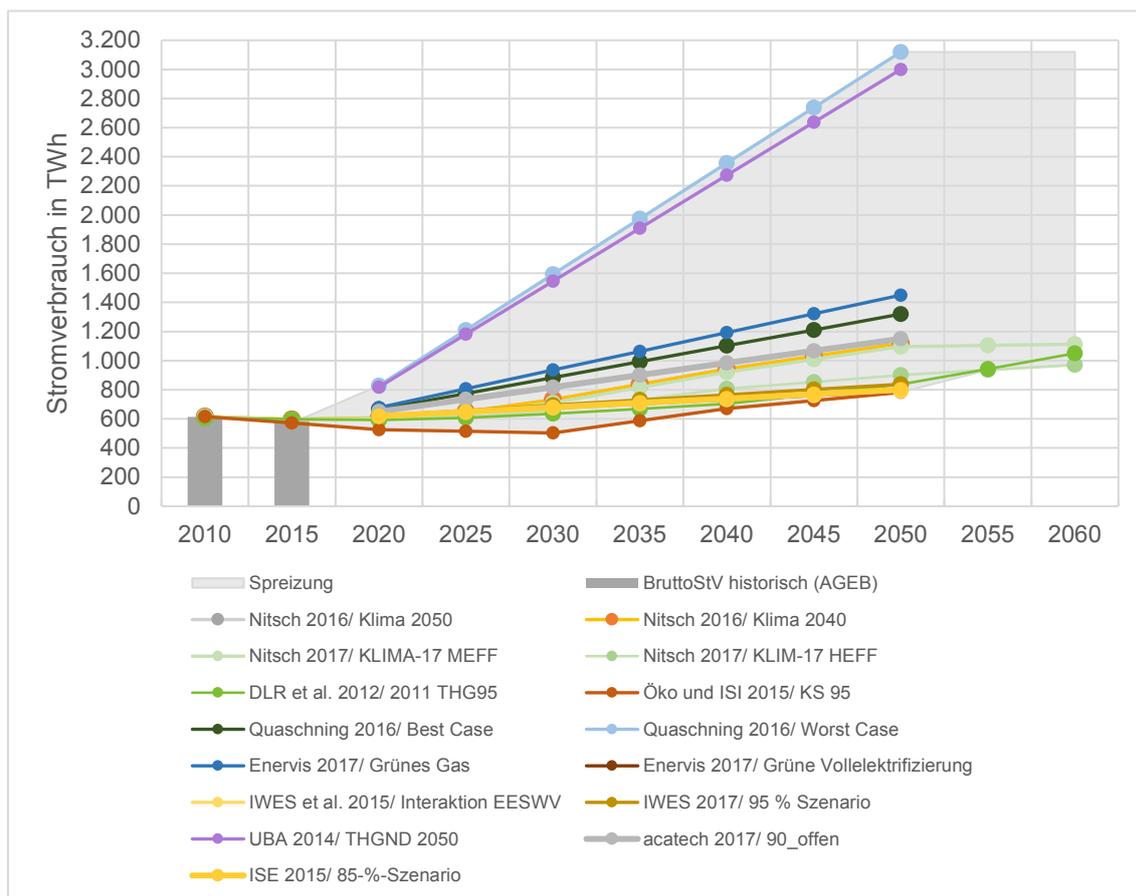
Gerade in diesen Anwendungsbereichen ist das Potential für die Substitution fossiler Energieträger durch Strom noch besonders hoch. Deshalb hat es sich eingebürgert, bei der Sektorkopplung von den Bereichen Verkehr, Wärme und Industrie bezüglich der Anwendungssektoren zu reden.

Abbildung 3-3: Endenergieverbrauch 2015 nach Sektoren und Anwendungsbe-
reichen für Deutschland (eigene Darstellung nach AGEB 2016)



Ein verstärkter Einsatz von PtG oder PtL könnte den gesamten Stromverbrauch deutlich in die Höhe treiben. In einer UBA-Studie wird der gesamte Nettostromverbrauch für Deutschland in 2050 in einem vollständig auf erneuerbaren Energien beruhenden Szenario mit einer Bandbreite von 2.600 bis 2.850 TWh/a angegeben (UBA 2014). Da es kaum vorstellbar ist, diesen Bedarf wirtschaftlich und mit der entsprechenden Akzeptanz in Deutschland herzustellen, müssen die strombasierten Kraftstoffe dann zu einem großen Teil importiert werden. Alternativ müssten diejenigen Sektorkopplungsoptionen gewählt werden, die den Strom direkt nutzen oder die die Umwandlungsverluste möglichst geringhalten, beispielsweise durch die direkte Verwendung von Wasserstoff anstelle des zusätzlichen Prozessschritts der Methanisierung. Eine Auswertung weiterer Studien und Szenarien zeigt eine weite Spreizung des Stromverbrauchs in Szenarien mit einer Treibhausgasreduzierung über 80 %, in denen Sektorkopplung in bedeutendem Umfang eingesetzt wird (Abbildung 3-4).

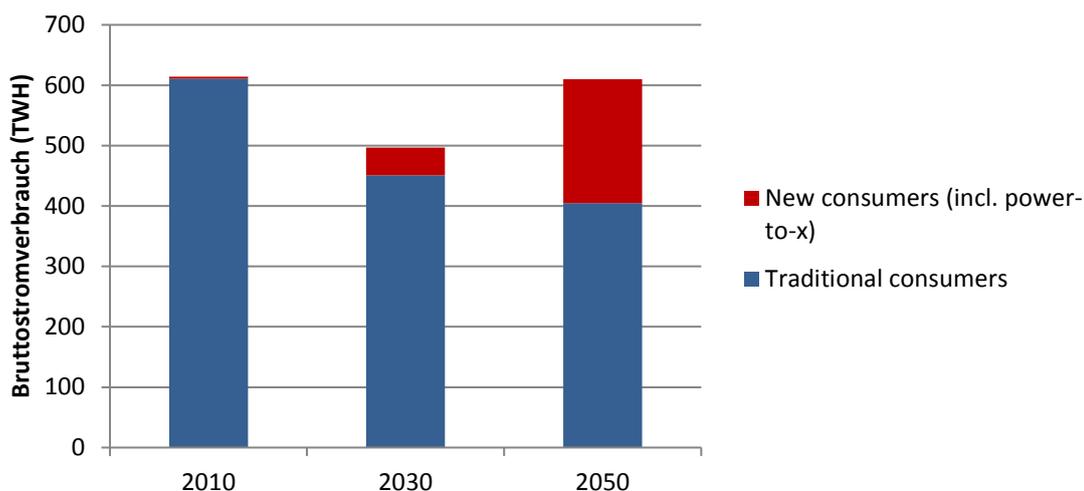
Abbildung 3-4: Projektionen des (Brutto-)Stromverbrauchs in aktuellen Energiesystemstudien (eigene Darstellung auf Basis von Nitsch 2016, Nitsch 2017, Öko-Insitut und Fraunhofer ISI 2015, DLR et al. 2012, Quaschnig 2016, Enervis 2017, Fraunhofer IWES et al. 2015, IWES 2017, UBA 2014, Acatech 2017 sowie Fraunhofer ISE 2015; fehlende Werte linear interpoliert)



Im Energiekonzept der Bundesregierung von 2010 wird das Ziel formuliert, bis 2020 bezogen auf 2008 10 % Strom und bis 2050 25 % Strom einzusparen (siehe BMWi 2016a). Der verstärkte Einsatz von Sektorkopplungsoptionen führt zwar zu der politisch ebenfalls anvisierten Senkung der Treibhausgase, gestaltet aber die Zielerreichung beim Stromeinsparen herausfordernder (siehe auch Diskussion in BMUB 2016). Die hieran anschließende Frage ist, ob die politischen Stromeinsparziele nicht im Sinne des Transformationspfades angepasst werden müssten und zum Beispiel für klassische Anwendungen festzulegen sind, während die neuen Verbraucher bzw. neue Sektorkopplungsoptionen hier

heraus gerechnet werden sollten.³⁵ Dies ist jedoch mit Herausforderungen an die Datenerfassung und Verarbeitungssystematik der Daten für die klare Trennung in neue Verbraucher bzw. Sektorkopplungsoptionen und klassische Anwendungen verbunden (z. B. wie bewertet man eine stärkere Elektrifizierung des deutschen Schienennetzes?).

Abbildung 3-5: Stromverbrauchsentwicklung in Deutschland am Beispiel des „Klimaschutzszenarios 90 (THG: -90 %)“³⁶



Einen entscheidenden Einfluss auf die Höhe des Strombedarfs hat zudem die Systemgestaltung. Diese lässt sich als Punkt auf einem Kontinuum der möglichen Systemzustände beschreiben, die jeweils abweichende Strombedarfe repräsentieren. Da Sektorkopplung bei unterschiedlichen und im Zeitverlauf ansteigenden Anteilen erneuerbarer Energien in den Teilsystemen Strom, Wärme, Verkehr und Industrie angewendet wird, verändert sich auch die Position entlang dieses Kontinuums (Abbildung 3-6). Folgende Zustände bilden die Enden des Kontinuums der Systemzustände:

- Sektorkopplung kann einerseits in Form einer reinen Flexibilisierungsmaßnahme für das Stromsystem genutzt werden (linkes Ende des Kontinuums in Abbildung 3-6). Hierbei soll ein Verwendungszweck für überschüssigen Strom aus erneuerbaren Quellen erschlossen werden, der temporär nicht in

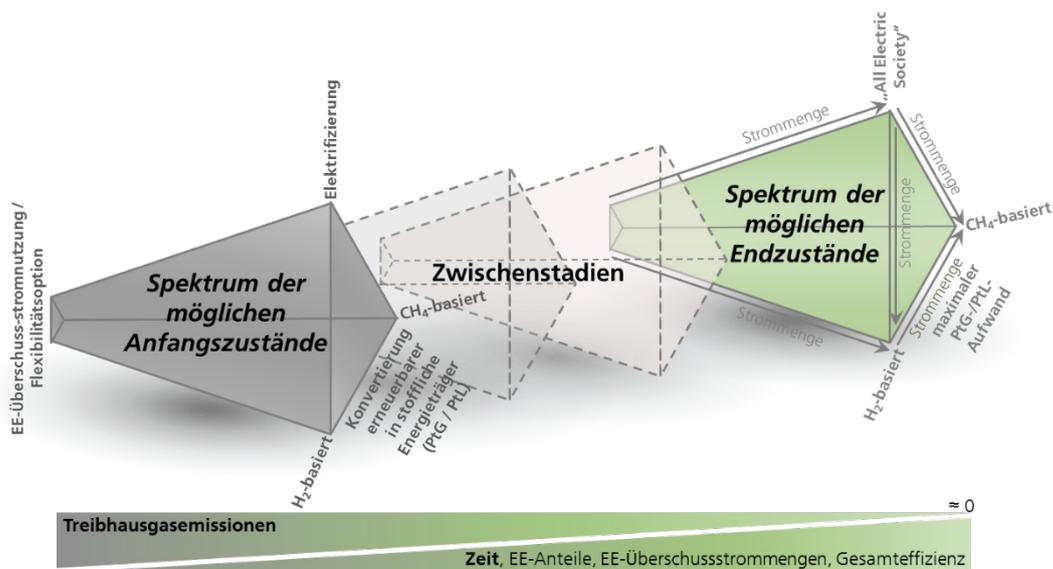
³⁵ In einer Reihe von Energiesystemszenarien werden daher die im Energiekonzept formulierten Stromeinsparziele ausschließlich auf „klassische“ Verbraucher bezogen und eine entsprechende Abgrenzungssystematik entwickelt (vgl. z. B. DLR et al. 2012).

³⁶ Anmerkung: Als „neue Verbraucher“ in den Klimaschutzszenarien gelten: Elektromobilität, Wärmepumpen sowie die Herstellung von Methan und Wasserstoff. Datenquelle: Repenning et al. 2015.

das Stromsystem integrierbar ist. Dieses Ende des Kontinuums ist insbesondere bei niedrigeren Anteilen erneuerbarer Energieträger und nachhaltiger Energienutzungsformen relevant. Zu einer umfangreichen Dekarbonisierung des Energie- und Wirtschaftssystems sind jedoch nach aktuellem Kenntnisstand Sektorkopplungsmöglichkeiten zu erschließen, die über eine reine Verwendung überschüssigen Stroms hinausgehen.

- Andererseits kann Sektorkopplung, dazu führen, dass neben einer Überschussstromverwendung Erzeugungskapazitäten errichtet werden, die überwiegend oder ausschließlich zur Versorgung von Sektorkopplungsanwendungen dienen. Bei maximaler Ausschöpfung dieser Möglichkeit ergibt sich ein Systemzustand, der am rechten Ende des Kontinuums in Abbildung 3-6 zu verorten ist. An diesem Ende lassen sich wiederum unterschiedliche Ausprägungen unterscheiden, die von einer Elektrifizierung von Endnutzungen in den Teilsystemen Strom, Wärme, Verkehr und Industrie über eine Nutzung von stofflichen Energieträgern auf Basis von Wasserstoff (H₂) bzw. Methan (CH₄) reichen. Zur Erreichung einer Dekarbonisierung ist spätestens zum Ende des Transformationsprozesses des Energiesystems, d.h. bei hohen Anteilen erneuerbarer Energien und nachhaltiger Energienutzungsformen, eine Bewegung von weiter links liegenden Systemzuständen zu diesem Ende des Kontinuums zu vollziehen. Die möglichen extremen Endzustände des Kontinuums nach Abschluss der Energiesystemtransformation werden durch eine vollständige (direkte oder indirekte) Elektrifizierung aller Sektoren und Teilsysteme („All-Electric Society“) sowie eine maximale Erzeugung von stofflichen Energieträgern auf Basis von Wasserstoff bzw. Methan gebildet.

Abbildung 3-6: Spektrum der Systemzustände der Sektorkopplung im Zeitverlauf (eigene Darstellung)



3.2.2 Herausforderungen bei der Umsetzung der Sektorkopplung am Beispiel Erdgas

Die Dekarbonisierung der Sektoren Strom, Wärme und Verkehr ist nach aktuellem Kenntnisstand nur mit einem verstärkten Einsatz von Strom möglich. Zur Erreichung zeitnaher Klimaschutzziele 2020 und 2030 lässt sich dieser Mehrbedarf an Elektrizität jedoch nicht ausschließlich aus erneuerbaren Energien generieren, sondern die Erzeugung der fluktuierenden Energieträger Sonne und Wind muss insbesondere mittels steuerbaren Technologien im Sinne der Versorgungssicherheit und Netzstabilität abgesichert werden. Um diese Versorgungssicherheit zu gewährleisten, sind schnell regelbare Gaskraftwerke mit hohem Wirkungsgrad und vergleichsweise geringen CO₂-Emissionen aus Sicht der Bundesregierung als wesentliche Säule und Übergangstechnologie des Energiewendefortschritts hilfreich und notwendig. Sukzessive soll nach 2030 der Brennstoff Erdgas dann durch CO₂-neutrales, regenerativ erzeugtes Gas ersetzt werden (Bundeskabinett 2016). Gaskraftwerke unterschiedlicher Bauform und Größe bilden bereits heute den Stand der Technik und stehen daher als Ersatz für Kohlekraftwerke unmittelbar zur Verfügung. Weitere Einsatzbereiche von Erdgas sieht man in seinem verstärkten Einsatz in stetig effizienter und flexibler werdenden Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) zur Versorgung von Nah- und Fernwärmenetzen (Bundeskabinett 2016) sowie in der Industrie, wo hohe Temperaturen für Prozesswärme notwendig sind, die voraussichtlich auch zukünftig nicht in ausreichender Form mittels Wärmepumpentechnologien bereitgestellt werden können.³⁷

In der Frage der zukünftigen Bewertung der Rolle des Erdgases ist der wissenschaftliche Diskurs zwiespaltig. Nimmt man den Pariser Klimagipfel mit seinem 1,5-°C-Ziel als Grundlage, halten Teile der Forschung einen vollkommenen Verzicht auf den Einsatz von fossilen Energieträgern und damit auch von Erdgas ab 2040 für dringend notwendig.³⁸ Weiterhin gilt allerdings zu beachten, dass die nationale Gasinfrastruktur Deutschlands erhebliche Flexibilitätspotentiale bietet, welche schon heute in Teilen für die sog. externe Regelenergie genutzt werden. Diese, im Gegensatz zur internen Regelenergie, im Gas rein über Marktmechanismen (preissignal-gestütztes Anreizsystem) zur Netzstabilität eingesetzten Flexibilitäten erfahren seit Jahren ein stetiges Wachstum in den

37 Vgl. BMWi 2017, S. 9.

38 Quaschnig 2016, S. 7.

jährlichen Einsatzmengen. Das Flexibilitätspotential des Gassektors ist dadurch eindrücklich unter Beweis gestellt.

Um jedoch das Flexibilitätspotential von Erdgas für eine von Sektorkopplung geprägte Versorgungslandschaft voll integriert nutzen zu können, sind die bisher getrennten Markt- und Bilanzierungsstrukturen von Gas und Strom zu harmonisieren. Neben den im Folgenden als Gegenüberstellung wesentlichen Kriterien dargestellten Abweichungen wären insbesondere Produkte des Kurzfrist-Börsenmarkts anzugleichen (z. B. Stunden- oder Viertelstundenmarkt an Stelle eines Rest-of-the-day-Markts oder halbstündiger Vorlauf an Stelle eines bisher im Gas üblichen Vorlaufintervalls von mindestens drei Stunden zwischen Geschäftsabschluss und Beginn der physischen Erbringungsphase).

Tabelle 3-1: Unterschiede zwischen dem Strom- und Gasmarkt

Unterschiede zwischen dem Strom- und Gasmarkt	
Strom	Gas
Ein Übertragungsnetzbetreiber pro Regelzone	Mehrere Ferngasnetzbetreiber pro Marktgebiet (sie arbeiten zusammen und bilden das Marktgebiet)
Vier Regelzonen in D müssen getrennt bewirtschaftet werden	Zwei Marktgebiete in D (aber: je 2 „Gasqualitäten“ müssen getrennt bewirtschaftet werden)
Anwendung der Standardlastprofile erfolgt durch den Lieferanten	Anwendung der SLP erfolgt durch den Netzbetreiber
Bewirtschaftung der SLP-Abweichungen erfolgt durch den VNB (Differenz-BK)	Bewirtschaftung aller Abweichungen erfolgt durch den MGV (Umlagekonto)
Messung = Abrechnung in kWh	Messung in m ³ , Umrechnung in kWh Bilanzierung mit einem „Referenzbrennwert“ erzwingt auch bei RLM-Kunden eine Mehr- oder Mindermengenabrechnung
Messintervall: 15 Minuten	Messintervall: 1 Stunde
Bilanzierungsintervall: 15 Minuten	Bilanzierungsintervall: 1 Gastag
„Stromtag“ von 00 ⁰⁰ Uhr bis 24 ⁰⁰ Uhr	„Gastag“ beginnt um 06 ⁰⁰ Uhr und endet um 06 ⁰⁰ Uhr des Folgetages „Gaswirtschaftsjahr“ beginnt am 01. Oktober 06 ⁰⁰ Uhr und endet am 01. Oktober 06 ⁰⁰ Uhr des Folgejahres „Speicherwirtschaftsjahr“ beginnt am 01. April 06 ⁰⁰ Uhr und endet am 01. April 06 ⁰⁰ Uhr des Folgejahres

Um die Akzeptanz der Bevölkerung bezüglich der Energiewende – vor allem im Wärmebereich und der Umstellung auf andere Wärmeerzeuger – nicht zu verlieren, besteht Handlungsbedarf – Handlungsbedarf, der den Status quo jedoch als Ausgangspunkt eines kontinuierlichen Wandels nutzt und die Bevölkerung aktiv in diesen Wandel mit einbindet. Wesentlich hierbei sind das Schaffen von Transparenz, das verständliche Erklären der Zusammenhänge sowie die Beteiligung der Bevölkerung an lokalen und dezentralen Ansätzen zur Kopplung der Sektoren.³⁹ Insbesondere für Erdgas als Element der Sektorkopplung und für seine Infrastruktur kommt deshalb dem Faktor der Regionalität wesentliche Bedeutung zu.

Sollte der Ausstieg aus dem Erdgasverbrauch nach dem Jahre 2030 geplant sein, so ist dieser Aspekt in die Netzausbau- sowie Investitionsplanung für Gasnetzinfrastruktur bereits heute zu berücksichtigen. Letztendlich entscheidend für den Weiterbetrieb der Gasnetze sind vornehmlich die am Ende verbleibenden Transportmengen der industriellen Anwendungen. Beispielhaft sei hier die Abschreibungsdauer von Stahlleitungen genannt, die gemäß regulatorischer Vorgaben zu Kalkulationsgrundsätzen bis zu 65 Jahre beträgt.⁴⁰ Zur Erhaltung der in Tabelle 3-2 dargestellten und im Sinne deren langfristig effizienten Weiterbetriebs bleibt auch und v. a. im Sinne der Sektorkopplung nur ein kombinierter Entwicklungspfad der Elektrizitäts- und Gasinfrastruktur.

Tabelle 3-2: Kenndaten Gasnetze und Gasspeicher, Quelle: BDEW Statistiken, Ergebnisse Gas, Veröffentlichung 2015 und Entwicklung der Stromnetze Deutschland⁴¹

- Energienetze -	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Stromverteilnetze (in km)	1.776.000	1.787.000	1.790.000	1.799.000	1.802.000	1.814.000
Leitungslängen Gas (in km)	471.886	482.741	465.863	469.551	470.685	476.561
Rohrnetzinvestitionen (in Mio. Euro)	875	769	874	1.080	1.049	1.185
Erdgasspeicherkapazitäten (in Mio. m ³)	21.297	20.431	22.672	23.821	24.588	24.099
Speicherinvestitionen (in Mio. Euro)	642	555	405	63	22	54

39 Vgl. BMUB (2016).

40 Gasnetzentgeltverordnung: Anlage 1, Betriebsgewöhnliche Nutzungsdauern von Anlagegütern in der Gasversorgung: bis zu 55 Jahre Abschreibungen bei Gasleitungen

41 [https://www.bdew.de/internet.nsf/id/A1AFF8C265813B71C1257FEA00406DBE/\\$file/Stromkreislängen%20Deutschland%20Entwicklung%2010Jahre%20online%20jaehrlich%20Ki_03032017.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/A1AFF8C265813B71C1257FEA00406DBE/$file/Stromkreislängen%20Deutschland%20Entwicklung%2010Jahre%20online%20jaehrlich%20Ki_03032017.pdf)

4 Zusammenfassung, Fazit und weiterer Forschungsbedarf

Die Auswertung der verschiedenen Begriffsdefinitionen und Interpretationen zur Sektorkopplung haben gezeigt, dass eine einheitliche Sichtweise in der Wissenschaft und der Politik fehlt. Eng gefasst wird darunter nur die Umwandlung von Erneuerbare (Überschuss-)Strom in Gase oder Flüssigkeiten gesehen, weit gefasst hingegen alle Aspekte der Verzahnung von energierelevanten Sektoren. Da die Sektorkopplung ein wesentlicher Baustein der Energiewende ist, wird die Notwendigkeit eines klaren Verständnisses gesehen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde deshalb folgende sehr weitgefasste Definition entwickelt:

*Sektorkopplung bezeichnet den **fortschreitenden Prozess der Substitution fossiler Energieträger durch weit überwiegend erneuerbar erzeugten Strom oder durch andere erneuerbare Energieträger und nachhaltige Energienutzungsformen in neuen sektorenübergreifenden Anwendungen oder durch verstärkte Nutzung bekannter sektorenübergreifender Anwendungen.***

*Bei Strom geschieht dies zum einen durch eine **direkte Stromnutzung**, die auch eine strombasierte Wärme/Kälteerzeugung (Power-to-Heat) einschließt. Zum anderen über die Umwandlung von Strom in synthetischen Kraftstoffe (Power-to-Gas, Power-to-Liquid). Die **indirekte Stromnutzung über Power-to-Liquid und Power-to-Gas** werden zusammen als **Power-to-X (PtX)** bezeichnet und bilden eine Teilmenge der Sektorkopplung. Synthetische Kraftstoffe können aber auch aus anderen (erneuerbaren) Quellen hergestellt werden.*

*Neben **sektorenübergreifenden Anwendungen zwischen Angebots- und Nachfragesektoren** durch die Kopplung der Energieträger kann Sektorkopplung auch in Form einer **neuartigen Verzahnung zwischen den klassischen Verbrauchssektoren** (Haushalte, Gewerbe/Handel/Dienstleistung, Industrie und Verkehr) über Netzinfrastrukturen gegeben sein.*

***Primäres Ziel der Sektorkopplung ist die Senkung der Treibhausgasemissionen** durch Substitution fossiler Energieträger, weshalb bei den Energieträgern primär die Erneuerbaren im Fokus stehen. Sekundäre Ziele (Co-Benefits) können in der Nutzung von Freiheitsgraden der Optimierung innerhalb eines zunehmend und perspektivisch vollständig dekarbonisierten Energie- und Wirtschaftssystems sowie durch einen Beitrag zur **Flexibilisierung und Energieeffizienzsteigerung** entstehen.*

Diese Definition umfasst möglichst viele der diskutierten Aspekte der Sektorkopplung. Einige der bisherigen Definitionen sind deutlich enger und fokussierter, aber durchaus divergierend. Zukünftig wird eine Aufgabe darin liegen, den Begriff der Sektorkopplung einheitlich zu fassen und dabei kritisch darüber zu diskutieren, was unter dem Begriff alles zu fassen ist: Geht es nur um erneuerbaren Strom oder auch um Anteile von konventionellem Strom? Sind Kraft-Wärme-Kopplung, Biomasse oder die Abwärmenutzung auch einzubeziehen oder nicht? Wie sind neue Anwendungen wie die Elektromobilität überhaupt abzugrenzen von bestehenden Anwendungen wie der Elektrostahlnutzung? Kann man Sektorkopplung und Power-to-X wie vorgeschlagen differenzieren oder sind die Begriffe nicht gleich zu setzen? Wenn Sektorkopplung sehr weit gefasst wird, umfasst der Begriff dann nicht viele wesentliche Aspekte der Energiewende und wird evtl. zu unscharf bzw. zu beliebig? Diese Problematik tritt dann noch schärfer aus, wenn man beispielsweise die Energiespeicher oder das Lastmanagement, die in der obigen Definition nicht enthalten sind, noch versucht unter Sektorkopplung zu fassen.

Eine einheitliche Definition des Sektorkopplungsbegriffs ist aus juristischer Sicht ebenfalls zu begrüßen. Dies ist notwendig zur Gestaltung von entsprechenden Gesetzen und Verordnungen. Eine auf normativer Ebene einheitliche Definition des Sektorkopplungsbegriffs ist aus juristischer Sicht zur Vereinfachung und technologieoffenen Ausgestaltung des Rechtsrahmens sowie der Gewährleistung von Rechtssicherheit ebenfalls zu begrüßen. Eine restriktivere Begriffsdefinition, die bei Power-to-X-Anwendungen ansetzt und die Begriffsdefinition zu einem späteren Zeitpunkt ausweitet, ist aus juristischer Sicht aufgrund des immensen Anpassungsbedarfs des Rechtsrahmens vorzugswürdig. Nur ein einheitliches Begriffsverständnis ermöglicht allen Stakeholdern eine effektive und rechtssichere Anwendung von Normen.

Da die erneuerbaren Energieträger in den Sektoren Verkehr, Wärme und Industrie mit fossilen Energieträgern wie beispielsweise Erdgas oder Benzin nun neu in Konkurrenz treten, ist es vor diesem Hintergrund notwendig, auch die regulatorischen und ökonomischen Rahmenbedingungen sektorenübergreifend zu betrachten. Analysen zeigen, dass Strom heute im Regelfall mit deutlich höheren Steuern, Umlagen und Abgaben belastet ist als die fossilen Energieträger, die in Konkurrenz zur Stromnutzung stehen. Ein mögliches Zielmodell für die regulatorischen Rahmenbedingungen sollte sowohl zu einem ökonomisch effizienten Gesamtsystem als auch zu einer weitgehenden Internalisierung von Umweltkosten führen. Daneben sind weitere Anforderungen wie Technologieförderung oder das Vermeiden von Carbon Leakage zu erfüllen. Weitere Analy-

sen zu anderen wichtigen Energieträgern und -formen außer Strom, wie z. B. die Verknüpfung von nachfrageseitigen Sektoren über Wärmenetze, die ebenfalls im Rahmen der Sektorkopplung eine wichtige Rolle spielen können, sind künftig ebenfalls anzustellen.

Zur Realisierung einer intelligenten Sektorverknüpfung ergibt sich weiterhin ein erhöhter Bedarf an Digitalisierung, da diese bisher bezüglich der sektorübergreifenden Perspektive zu schwach ausgeprägt ist. Die Digitalisierung der Energiewirtschaft, also die informationstechnische Durchdringung von Angebots- und -nachfrageseite sowie der Verknüpfung zwischen Nachfragesektoren, wird als zentrale Voraussetzung einer umfassenden Energiewende angesehen. Aufgrund der heute noch zu geringen sektorübergreifenden informationstechnischen Verknüpfung besteht auch in diesem Themenfeld ein Handlungsbedarf.

Die größten Substitutionspotentiale von fossilen Energieträgern liegen in den Sektoren Verkehr, Wärme und Industrie, weshalb viele Ausführungen der Sektorkopplung, die die Verknüpfung von Angebots- und Nachfragesektoren betrachten, sich auf diese drei Sektoren fokussieren. Da heute nur ein geringer Teil der Endenergie durch Strom (ca. 20 %, davon nur ca. 7 % durch erneuerbaren Strom) bereitgestellt wird, besteht rein mengenmäßig eine große Herausforderung in der fast vollständigen Substitution fossiler Energieträger. Diese ist allerdings für die Erreichung der bestehenden nationalen und internationalen Klimaschutzziele notwendig. Vor der damit einhergehenden Notwendigkeit einer möglichst hohen Effizienz ist die direkte Stromnutzung bei der Sektorkopplung gerade in den Sektoren Verkehr und Wärme in den meisten Studien unbestritten. Hingegen wird in den Studien die Höhe der notwendigen Realisierung von Power-to-X stark unterschiedlich bewertet. Dies hängt wesentlich mit den unterstellten Rahmenbedingungen wie dem weiteren Ausbau des Stromnetzes oder dem Erfolg einer Energieeffizienzpolitik zusammen. Auch zu den wirtschaftlichen Potenzialen von Power-to-X- besteht weiterer Forschungsbedarf.

Da die Sektorkopplung in ihrer weitgefassten Definition auch eine Kopplung der Nachfragesektoren untereinander einschließt, sind diese Potenziale ebenfalls zu erheben. Die sich dabei stellende Frage ist aber, ob diese Potenziale überhaupt relevant gegenüber den Potenzialen der Sektorkopplung zwischen Angebots- und Nachfragesektoren sind und ob sich über die unterschiedlichen Potenziale nicht gegebenenfalls eine Fokussierung auf die Verknüpfung von Angebots- und Nachfragesektoren begründen lässt. Auch hierzu erscheinen weitere Forschungsarbeiten sinnvoll zu sein.

5 Quellen

- Acatech (2017): Sektorkopplung – Optionen für die nächste Phase der Energiewende. Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina | www.leopoldina.org acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften | www.acatech.de. Union der deutschen Akademien der Wissenschaften. Acatech: München.
- AGEB (Hg.) (2016): Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2013 bis 2015. AG Energiebilanzen e.V. Berlin
- AGEB (2017): Energieflussbild der Bundesrepublik Deutschland 2015, Energieeinheit Petajoule (PJ).
- AGEE-Stat/BMWi (2017): Erneuerbare Energien in Zahlen – Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2016. Internet Download vom 08.11.2017: http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/erneuerbare-energien-in-zahlen-2016.pdf?__blob=publicationFile&v=10.
- Agentur für Erneuerbare Energien e.V. (2016): METAANALYSE – Flexibilität durch Kopplung von Strom, Wärme & Verkehr. Forschungsradar Energiewende. Bearbeiter: Kirchner, A.; Koziel, S.; Mayer, N. (Prognos AG); Kunz, C. (Agentur für Erneuerbare Energien), Agentur für Erneuerbare Energien e.V.: Berlin.
- Agora Energiewende (2017): Neue Preismodelle für Energie. Grundlagen einer Reform der Entgelte, Steuern, Abgaben und Umlagen auf Strom und fossile Energieträger. Hintergrund. Berlin.
- BBH (2017): Studie zur Digitalisierung der Energiewirtschaft. Becker Büttner Held Consulting AG, München.
- BDEW (2015a): BDEW-Gasstatistik 2015. Internet Download vom 20.10.17: https://www.bdew-statis-tik.de/media/filemanager/Ergebnisse/Gas/137._Veroeffentlichung_2015/Grafiksammlung_Gasstatistik_2015.pdf.
- BDEW (2015b): BDEW-Online Broschüre „Wie heizt Deutschland?“. Internet Download vom 18.10.17: <https://www.bdew.de/internet.nsf/id/broschuere-wie-heizt-deutschland-de>.
- BDEW (2017a): 10 Thesen zur Sektorkopplung: Positionspapier: Berlin. BMUB (2016): Klimaschutzplan 2050 – Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. BMUB: Berlin.
- BDEW (2017b): Entwicklung der Stromnetze in Deutschland. Internet Download vom 20.10.17: [https://www.bdew.de/internet.nsf/id/A1AFF8C265813B71C1257FEA00406DBE/\\$file/Stromkreislängen%20Deutschland%20Entwicklung%2010Jahre_o_online_jaerlich_Ki_03032017.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/A1AFF8C265813B71C1257FEA00406DBE/$file/Stromkreislängen%20Deutschland%20Entwicklung%2010Jahre_o_online_jaerlich_Ki_03032017.pdf).
- BMBF (2018): Kopernikus Projekt ENavi; Internet download vom 20.01.2018: <https://www.kopernikus-projekte.de/projekte/systemintegration>
- BMUB (2016): Klimaschutzplan 2050 – Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. BMUB: Berlin.

- BMVI (2014): Analyse von Herausforderungen und Synergiepotentialen beim Zusammenspiel von Verkehrs- und Stromsektor. Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVI in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST), Berlin: DLR). München: LBST; Heidelberg: ifeu; Leipzig: DBFZ; Berlin: DLR.
- BMVI (2017): Initiative klimafreundlicher Straßengüterverkehr – Fahrplan für einen klimafreundlichen Straßengüterverkehr (Antriebe und Kraftstoffe). Herausgeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Leitung der Arbeitsgruppen Kaltschmitt, M. (Technische Universität Hamburg (TUHH) – Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft (IUE); Weinmann, O. (Vattenfall Europe Innovation GmbH); Wietschel, M. (Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung (ISI); Larroque, G. (TOTAL Deutschland GmbH); Schade, W. (M-FIVE GmbH); Schuckert, M. (Daimler AG). Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).
- BMW i (2005): Gasnetzentgeltverordnung – Verordnung über die Entgelte für den Zugang zu Gasversorgungsnetzen. Internet Download vom 20.10.17: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Gesetze/Energie/GasNEV.html>.
- BMW i (2016a): Grünbuch Energieeffizienz – Diskussionspapier des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. BMW i: Berlin.
- BMW i (2016b): Energieverbrauch nach Anwendungsbereichen in Deutschland 2015. Infografik. Internet Download vom 03.08.2017: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Infografiken/Energie/Energiedaten/Energiegewinnung-und-Energieverbrauch/energiedaten-energiegewinnung-verbrauch-09.html>, zuletzt geprüft am.
- BMW i (2017): Strom 2030: Langfristige Trends – Aufgaben für die kommenden Jahre – Ergebnisbericht zum Trend 7: Moderne KWK – Anlagen produzieren den residuellen Strom und tragen zur Wärmewende bei. BMW i: Berlin.
- BNetzA (Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas Telekommunikation, Post und Eisenbahnen) (2015): Monitoringbericht BNetzA 2015. BNetzA: Bonn.
- BNetzA (Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas Telekommunikation, Post und Eisenbahnen) (2017a): Quartalsbericht zu Netz- und Systemsicherheitsmaßnahmen – Viertes Quartal und Gesamtjahr 2016. BNetzA: Bonn.
- BNetzA (Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas Telekommunikation, Post und Eisenbahnen) (2017b): Digitale Transformation in den Netzsektoren. BNetzA: Bonn.
- BNetzA (Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas Telekommunikation, Post und Eisenbahnen) (2017c): Stromerzeugung im Sommer – Erneuerbare mit Spitzenwerten. Internet Download vom 03.01.2018: <https://www.smard.de/blueprint/servlet/page/home/topic-article/444/3678>.
- Boßmann, T. (2015): The contribution of electricity consumers to peak shaving and the integration of renewable energy sources by means of demand response. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie.

- Brodecki, L.; Tomaschek, J.; Fahl, U.; Alonso, J.; Faure, A. (2014): Synergies in the integration of energy networks for electricity, gas, heating and cooling; INSIGHT_E Rapid Response Energy Brief No. 1, 2014.
- Bundesgesetzblatt Jahrgang 2016 Teil I Nr. 43 (2016): Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende, 01.9.2016.
- Dallinger, D. (2013): Plug-in electric vehicle integrating fluctuating renewable electricity. In: Erneuerbare Energien und Energieeffizienz, Band 20.
- Dena (2017a): Sektorkopplung: Alles mit allem verbinden. Internet Download 05.08. 2017: <https://www.dena.de/themen-projekte/energiesysteme/sektorkopplung/>.
- Dena (2017b): dena-Leitstudie Integrierte Energiewende: Impulse und Erkenntnisse aus dem Studienprozess, Zwischenfazit, Berlin.
- Dena (2017c): Chancen und Herausforderung der Digitalisierung der Energiewelt am Beispiel „Pooling“. Internet Download Dez. 2017: https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/esd/Positionspapier_Pooling_Plattform_Digitale_Energiewelt_.pdf.
- DLR/Fraunhofer IWES/IfnE (2012): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Schlussbericht. Stuttgart, Kassel, Teltow.
- DVGW (2017): Der Energie-Impuls – ein Debattenbeitrag für die nächste Phase der Energiewende, Bonn.
- Ecke, J.; Klein, S.; Klein, S. W.; Steinert, T. (2017): Klimaschutz durch Sektorenkopplung: Optionen, Szenarien, Kosten. Eine enervis - Studie im Auftrag von: DEA, EWE, Gascade, Open Grid Europe, Shell, Statoil, Thüga und VNG. Berlin.
- European Commission (2016b): COM(2016) 765 final. Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie 2010/31/EU über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden.
- Fraunhofer ISE (2015): What will the energy transformation cost? Pathways for transforming the German energy system by 2050. Fraunhofer ISE: Freiburg.
- Fraunhofer IWES; Fraunhofer IBP; Ifeu; Stiftung Umweltenergierecht (2015): Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr. Analyse der Interaktion zwischen den Sektoren Strom, Wärme/Kälte und Verkehr in Deutschland in Hinblick auf steigende Anteile fluktuierender Erneuerbarer Energien im Strombereich unter Berücksichtigung der europäischen Entwicklung. Ableitung von optimalen strukturellen Entwicklungspfaden für den Verkehrs- und Wärmesektor. Endbericht. Kassel, Berlin, Würzburg.
- Gottschalk, M.; Uslar, M.; Delfs, C. (2017): The Use Case and Smart Grid Architecture Model Approach. Springer Verlag Wiesbaden.
- Helms, H.; Jöhrens, J.; Kämper, C.; Giegrich, J.; Liebich, A.; Vogt, R.; Lambrecht, U. (2016): Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen. UBA Texte 27/2016. Dessau: Umweltbundesamt.
- Hennings, W.; Linssen, J. (2015): Elektromobilität. In Wietschel, M.; Ullrich, S.; Markewitz, P.; Schulte, F.; Genoese, F. (Hg.) (2015): Innovative Energietechnologien für die Zukunft. Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze. Aufl. 2015. Springer Verlag Wiesbaden.

- Hydrogen Council (2017): Hydrogen scaling up – A sustainable pathway for the global energy transition. Hydrogen Council.
- IEA (2017): Energy Technology Perspectives 2017 – Catalysing Energy Technology Transformations. International Energy Agency (IEA).
- IWES et al. (2015): Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr. Endbericht einer Studie gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Bearbeitet durch die Institute Fraunhofer IWES, Fraunhofer IBP, IFEU, Stiftung UmwelteNERGIERECHT. IWES: Kassel.
- IWES und E4Tech (2017): Das gekoppelte Energiesystem – Vorschläge für eine optimale Transformation zu einer erneuerbaren und effizienten Energieversorgung. Berlin, 28.09.2017.
- Kasten, P.; Mottschall, M.; Köppel, W.; Degünther, C.; Schmied, M.; Wütherich, P. (2016): Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Dessau-Roßlau: Öko-Institut e.V.
- Michaelis, J.; Wietschel, M.; Klobasa, M. (2017): Energiepolitische Rahmenbedingungen. In GP Joule (2017): Akzeptanz durch Wertschöpfung – Wasserstoff als Bindeglied zwischen der Erzeugung erneuerbarer Energien und der Nutzung im Verkehrs-, Industrie- und Wärmesektor. Machbarkeitsstudie zum Verbundvorhaben. GP JOULE: Reußenköge.
- Nitsch, J. (2016): Die Energiewende nach COP 21 – Aktuelle Szenarien der deutschen Energieversorgung. Kurzstudie für den Bundesverband Erneuerbare Energien e.V. Stuttgart.
- Nitsch, J. (2017): Erfolgreiche Energiewende nur mit verbesserter Energieeffizienz und einem klimagerechten Energiemarkt - Aktuelle Szenarien 2017 der deutschen Energieversorgung. Stuttgart.
- Öko-Institut; Fraunhofer ISI (2015): Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht. Berlin.
- Peters, A.; Doll, C.; Kley, F.; Möckel, M.; Plötz, P.; Sauer, A.; Schade, W.; Thielmann, A.; Wietschel, M.; Zanker, C. (2012): Konzepte der Elektromobilität. Berlin: Büro für Technikfolgenabschätzung am Deutschen Bundestag (TAB).
- Pfluger, B. et al. (2017): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Modul 0: Zentrale Ergebnisse und Schlussfolgerungen. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung, Consentec GmbH, IFEU, Technische Universität Wien, M-Five, TEP Energy GmbH. Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI): Karlsruhe.
- Quaschnig, V. (2016): Sektorkopplung durch die Energiewende: Anforderungen an den Ausbau erneuerbarer Energien zum Erreichen der Pariser Klimaschutzziele unter Berücksichtigung der Sektorkopplung, Berlin.
- Repenning, J.; Matthes, F.C.; Blanck, R.; Emele, L.; Döring, U.; Förster, H. et al. (2014): Klimaschutzszenario 2050. 1. Modellierungsrunde. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Berlin: Öko-Institut e.V.; Karlsruhe: Fraunhofer ISI.

- Repenning, J.; Matthes, F.C.; Blanck, R.; Emele, L.; Döring, U.; Förster, H. et al. (2015): Klimaschutzszenario 2050. 2. Modellierungsrunde. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Berlin: Öko-Institut e.V.; Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- RP-Energie-Lexikon (2017): Sektorkopplung. Internet Download vom 07.08.2017: <https://www.energie-lexikon.info/sektorkopplung.html>.
- Sterner, M. (2016): Bedeutung und Notwendigkeit von sektorenkoppelnden Speichern für die Energiewende. Forschungsstelle Energienetze und Energiespeicher FENES, OTH Regensburg. BMWi Workshop „Sektorkopplung – Chance für die Industrie?“. Berlin 24. November 2016.
- Stolzenburg, K.; Hamelmann, R.; Wietschel, M.; Genoese, F.; Michaelis, J.; Lehmann, J.; Miede, A.; Krause, S.; Sponholz, Ch.; Donadei, S.; Crocogino, F.; Acht, A.; Horvath, P.-L. (2014): Integration von Wind-Wasserstoff-Systemen in das Energiesystem. Abschlussbericht 31. März 2014, Studie für das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) durchgeführt von PLANET Planungsgruppe Energie und Technik GbR, Fachhochschule Lübeck PROJEKT-GMBH, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Institut für Energie und Umwelt e.V. an der Fachhochschule Stralsund, KBB Underground Technologies GmbH.
- UBA (2014): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA).
- ÜNB (Übertragungsnetzbetreiber) (2017): Netzentwicklungsplan Strom 2030 – Version 2017. Zweiter Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber.
- VDE (2017): Steuerung mit dem intelligenten Messsystem: Schrittweise Weiterentwicklung. Internet Download Dez. 2017: <https://www.vde.com/resource/blob/1603870/adf7264e2e91b5142fcec3a8f2f1bf0/vde-fnn-steuerbox-infoblatt-data.pdf>.
- Weidenfeld, U. (2016): Sektorkopplung: „All Electric Society“? in et – Zeitschrift für Energiewirtschaft, Recht, Technik und Umwelt, März 2016.
- Wietschel, M.; Haendel, M.; Schubert, G.; Köppel, W.; Degünther, Ch. (2015): Kurz- und mittelfristige Sektorkopplungspotentiale. Kurzstudie im Rahmen der Studie Integration erneuerbarer Energien durch Sektorkopplung - Teilvorhaben 2: Analyse zu technischen Sektorkopplungsoptionen. Im Auftrag des Umweltbundesamtes (UFOPLAN 2014 – FZK 3714 41 107 2). Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI und DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- Wietschel, M.; Gnann, T.; Kühn, A.; Plötz, P.; Moll, C.; Speth, D.; Stütz, S.; Schellert, M.; Rüdiger, D.; Balz, W.; Frik, W.; Wassmuth, V.; Pauffler-Mann, D.; Rödl, A.; Schade, W. (2017): Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw. Studie im Rahmen der wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung. Beteiligte Forschungsinstitute: Fraunhofer ISI, Karlsruhe, Fraunhofer IML, Dortmund, PTV Group, Stuttgart, Karlsruhe, TU Hamburg-Harburg, Hamburg, M-Five. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- Wietschel, M.; Haendel, M.; Schubert, G.; Köppel, W.; Degünther, Ch. (2018): Integration erneuerbarer Energien durch Sektorkopplung - Teilvorhaben 2: Analyse zu

technischen Sektorkopplungsoptionen. Im Auftrag des Umweltbundesamtes (UFOPLAN 2014 – FZK 3714 41 107 2). Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI und DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Karlsruhe: Fraunhofer ISI – Veröffentlichung in Vorbereitung.

Wikipedia (2017): Sektorkopplung. Internet Download vom 03.08.2017:
<https://de.wikipedia.org/wiki/Sektorkopplung>.



Autorinnen und Autoren

Martin Wietschel, Patrick Plötz, Benjamin Pfluger, Marian Klobasa, Anke Eßer,
Michael Haendel

Fraunhofer ISI, Karlsruhe

Joachim Müller-Kirchenbauer, Johannes Kochems, Lisa Hermann
Technische Universität Berlin, FG Energie- und Ressourcenmanagement

Lukas Nacken
Universität Kassel, FG Integrierte Energiesysteme

Michael Küster, Johannes Pacem, David Naumann
VSE AG, Saarbrücken

Christoph Kost, Robert Kohrs
Fraunhofer ISE, Freiburg

Ulrich Fahl
Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER),
Universität Stuttgart

Simon Schäfer-Stradowsky, Daniel Timmermann, Denise Albert
IKEM - Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V., Berlin



Kontakt

Martin Wietschel
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Karlsruhe
E-Mail: martin.wietschel@isi.fraunhofer.de
www.isi.fraunhofer.de

Karlsruhe, Februar 2018