

DAS GEKOPPELTE ENERGIESYSTEM

Vorschläge für eine optimale Transformation
zu einer erneuerbaren und effizienten
Energieversorgung

EINE STUDIE IM AUFTRAG DES BUNDESVERBANDES ERNEUERBARE ENERGIE E.V.

MIT FREUNDLICHER UNTERSTÜTZUNG DURCH

BUNDESVERBAND ERNEUERBARE ENERGIE, BUNDESVERBAND WÄRMEPUMPE,

BUNDESVERBAND WINDENERGIE, FACHVERBAND BIOGAS, GREENPEACE ENERGY, SMA UND STIEBEL ELTRON

DAS GEKOPPELTE ENERGIESYSTEM

Vorschläge für eine optimale Transformation
zu einer erneuerbaren und effizienten
Energieversorgung

Dr. Malte Jansen



E4tech (UK) Ltd

83 Victoria Street
London SW1H 0HW
United Kingdom

Kontakt:
Imperial College London
m.jansen@imperial.ac.uk

Dr. Christina Sager-Klauß



**Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft
und Energiesystemtechnik (IEE)**

Königstor 59
34119 Kassel

Kontakt:
christina.sager-klauss@iee.fraunhofer.de

Inhalt

1	Management Summary.....	6
1.1	Sektorenkopplung als essentieller Teil der Energiewende.....	6
1.2	Interaktion der Sektoren Strom, Wärme, Verkehr und Industrie für die Zukunft ermöglichen	7
1.3	Politische Maßnahmen zur Förderung Sektorenkopplung	7
2	Einleitung	11
2.1	Einleitung und Ziel der Studie	11
2.2	Was ist Sektorenkopplung – Eine Definition.....	12
2.3	Funktionen der Sektorenkopplung	14
2.4	Vision Sektorenkopplung	15
3	Szenarien und Studien.....	17
3.1	Zusammenfassung der Studien.....	17
3.2	Herausforderungen bei der Nutzung von Erneuerbaren Energien	19
3.3	Flexibilisierungsoptionen durch die Sektorenkopplung.....	19
4	Sektorenkoppler – Interaktionen.....	22
4.1	Technische Rahmenbedingungen	22
4.2	Interaktionen und Technologien	22
4.3	Interaktionsanalyse Strom / Wärme	25
4.3.1	Wahrscheinliche Sektorenkopplungsinteraktionen.....	26
4.3.2	Stand der Sektorenkopplung.....	27
4.3.3	Barrieren	28
4.4	Interaktionsanalyse Wärme / Strom	29
4.4.1	Wahrscheinliche Sektorenkopplungsinteraktionen.....	30
4.4.2	Stand der Sektorenkopplung.....	30
4.4.3	Barrieren	31
4.5	Interaktionsanalyse Strom/Verkehr.....	31
4.5.1	Wahrscheinliche Sektorenkopplungsinteraktionen.....	32
4.5.2	Stand der Sektorenkopplung.....	33
4.5.3	Barrieren	33
4.6	Interaktionsanalyse Verkehr/Strom.....	34
4.6.1	Wahrscheinliche Sektorenkopplungsinteraktionen.....	34
4.6.2	Stand der Sektorenkopplung.....	35
4.6.3	Barrieren	35
4.7	Interaktionsanalyse Strom/Industrie (stoffl. Nutzung)	35
4.7.1	Wahrscheinliche Sektorenkopplungsinteraktionen.....	35
4.7.2	Stand der Sektorenkopplung.....	38
4.7.3	Barrieren	38

5	Gemeinsame Barrieren der Sektorenkopplung.....	39
5.1	Rechtliche Barrieren	39
5.1.1	Fehlende Anreize durch Netzentgelte	39
5.1.2	Anreizregulierung.....	40
5.1.3	Fehlende Regelung Redispatch	40
5.1.4	Kein Zugang zum Absatzmarkt	41
5.1.5	Markteintrittsbarrieren.....	42
5.1.6	Fehlender regulatorischer Rahmen für Speicher	43
5.2	Finanzielle Barrieren.....	43
5.2.1	Fehlende Wirtschaftlichkeit durch Abgaben / Umlagen / Steuern.....	43
5.2.2	Wert sektorengekoppelter Energie kann nicht kommuniziert werden	44
5.2.3	Kein Absatzmarkt.....	44
5.2.4	Transaktionskosten	45
5.3	Technische Barrieren.....	45
5.3.1	Geringe Marktreife	45
5.3.2	Unpassende Größenstaffelung.....	46
5.3.3	Technische Engpässe	46
6	Maßnahmen zur Förderung der Sektorenkopplung.....	47
6.1	Maßnahmenpaket – Abgaben / Umlagen / Steuern.....	51
6.1.1	Netzentgelte flexibilisieren	52
6.1.2	EEG-Umlage flexibilisieren	56
6.1.3	Stromsteuer durch sektorenübergreifende CO ₂ -Bepreisung ersetzen.....	59
6.1.4	Netzentgelte in Infrastrukturabgabe überführen	62
6.1.5	Doppelbelastung von Letztverbrauchsabgaben für Speicher abschaffen.....	65
6.2	Maßnahmenpaket – Weiterentwicklung des EEG	67
6.2.1	Umsetzung der Innovationsausschreibungen anhand des „Innovation Balancing“ Konzeptes	67
6.2.2	Alternative Nutzung von Strom-Überangeboten ermöglichen.....	70
6.2.3	Einbezug von alternativer Nutzung und Speicherung in die Förderung.....	72
6.3	Maßnahmenpaket – Mobilität.....	73
6.3.1	Förderung E-Mobilität in Flotten	73
6.3.2	Förderung klimaneutraler Mobilität	75
6.3.3	Einführung von Null-Emissionszonen	77
6.4	Maßnahmenpaket – Industrie	78
6.4.1	Förderung Technologieentwicklung.....	78
6.4.2	Ausschreibung und Steuerfinanzierung einer festen Menge an EEG-Umlagebefreiungsprivilegien	80
6.4.3	Quotenmechanismus für die Verwendung EE-basierter chemischer Produktgruppen	82
6.5	Maßnahmenpaket – Wärme.....	84

6.5.1	Flexibilität und EE-Anteil von KWK erhöhen	84
6.5.2	Rechtliche Hemmnisse für Wärmepumpen beseitigen.....	86
6.5.3	Ordnungsrechtliche Impulse für erneuerbare Wärme Neubau und im Bestand setzen	88
6.5.4	Erneuerbare Wärmenetze als verbindendes Element der Interaktion von Wärme- und Stromsektor ausbauen.....	90
6.5.5	Stromdirektnutzung im Wärmebereich differenzieren.....	92
6.5.6	Einsatzoptionen für Biogas im KWK-Bereich ausweiten.....	94
6.5.7	Wärmeförderung fokussieren.....	95
6.6	Maßnahmenpaket – P2P-Trading	96
6.6.1	Regulatorischer Rahmen für Mikrotransaktionen in einem 'Bilanzkreissystem light' schaffen.....	96
6.7	Zusammenfassung der Maßnahmen.....	99
7	Literaturverzeichnis.....	101

1.1

Sektorenkopplung als essentieller Teil der Energiewende

Die Sektorenkopplung ist eine wesentliche Voraussetzung für das Gelingen einer technisch und ökonomisch optimierten Energiewende in allen Sektoren. Sie erlaubt es, höhere Anteile Erneuerbarer Energie in jedem Sektor zu erreichen, Flexibilitätsoptionen intersektoral besser zu nutzen und hebt Effizienzpotenziale im Betrieb des Energiesystems. Die intelligente Interaktion von Erzeugung und Verbrauch von Energie über die Grenzen der Sektoren Strom, Wärme, Verkehr und stoffliche Nutzung hinweg ermöglicht die Dekarbonisierung und sorgt für ein effizienteres Gesamtsystem.

Erste technische Lösungen zur Sektorenkopplung sind vorhanden und bereits erprobt, finden aber aus diversen Gründen nur unzureichend Anwendung. Deshalb bedarf es zum jetzigen Zeitpunkt für deren Anwendung weiterer Forschungs- und Pilotprojekte sowie notwendiger Impulse durch die Politik. Im Fokus stehen sollten hierbei Maßnahmen zur Schaffung eines Marktdesigns, welches Investitionen in Technologien zur Energiespeicherung oder Transformation (Strom, Gas, Wärme) wirtschaftlich möglich macht. Dies führt zu einem effizienteren Gesamtsystem und höherem volkswirtschaftlichem Nutzen.

Sektorenkopplung ist die ganzheitliche Verknüpfung aller Bereiche des Energiesystems. Eine Vielzahl an Technologien und Energieträgern stehen zur Strukturierung, Verteilung und Nutzung Erneuerbarer Energie zur Verfügung. Sie ermöglichen ein System der bedarfsgerechten Bereitstellung Erneuerbarer Energie in den Bereichen Strom, Wärme, Mobilität und Industrie. An einzelnen Stellen ist jedoch ein vorsichtiges Nachsteuern der Rahmenbedingungen für die Entwicklung bestimmter Technologien notwendig, da der Einsatz durch falsch gesetzte Impulse oftmals verhindert wird. Beispielsweise ist der Einsatz der Sektorenkopplungstechnologie Wärmepumpe (Power2Heat) oft aus Energie- und Kosteneffizienzgründen für die Bereitstellung von Wärme sinnvoll, während die Nutzung von Wasserstoff (Power2Gas) und der Einsatz von Bioenergie dagegen in Bereichen mit höheren Anforderungen, wie z.B. der verlässlichen Überbrückung von Versorgungsengpässen flexibel eingesetzt werden sollte.

1.2

Interaktion der Sektoren Strom, Wärme, Verkehr und Industrie für die Zukunft ermöglichen

Die vorliegende Studie legt die Notwendigkeit der Sektorenkopplung dar und beschreibt diese im Kontext einer Energiewende, die noch viele politische Entscheidungen zur Umsetzung in den Bereichen Wärme, Verkehr, Strom und Industrie benötigt. Die Vielzahl der möglichen Kombinationen erlaubt die Kopplung der Sektoren auf verschiedenen Routen. Aufbauend auf den identifizierten Routen werden die Interaktionen zwischen den Sektoren analysiert, Barrieren beschrieben und mit Maßnahmen adressiert. Die Analyse hat eine große Komplexität bei der Umsetzung festgestellt. Derzeitig ist nicht vollständig abzusehen, in welchen Anteilen die unterschiedlichen erneuerbaren Energieträger und Wandlungstechnologien, von der Biomasse bis zum in Power-to-Gas-Anlagen erzeugtem Wasserstoff, das zukünftige Energiesystem versorgen werden. Diese Unschärfe bei der Ausgestaltung erfordert es, dass die vorgestellten Maßnahmen darum die Sektorenkopplung aus heutiger Sicht fördern, ohne zukünftige Optionen eines nachhaltigen und verlässlichen Energieversorgungssystems grundsätzlich einzuschränken. Entsprechend wichtig ist es, dass politische Entscheidungen keine falschen Pfadabhängigkeiten zementieren.

Die Vorschläge zielen darauf ab, unter Einbezug der bestehenden Infrastruktur, faire Wettbewerbsbedingungen zwischen allen technologischen Lösungsansätzen zu schaffen („Level-Playing-Field“). Neben dem Abbau von Barrieren für bereits verfügbare Technologien muss die Entwicklung besonders systemdienlicher Technologien für eine Übergangszeit durch geeignete Rahmbedingungen gestärkt werden. Dies erstreckt sich insbesondere auf Technologien der strategischen Langzeitspeicherung (z.B. Bioenergie, Power2Gas) und schwierig zu erschließender Anwendungsfelder in den Energiesektoren (z.B. Luftverkehr, chemische Grundstoffe) aber auch den weiteren Ausbau von sinnvoller Infrastruktur (z.B. Wärmenetze). Ein wichtiges Kriterium für ein CO₂-effizientes Gesamtsystem ist seine Fähigkeit, eine wetterabhängige Energieerzeugung zu möglichst hohen Anteilen kosteneffizient und zum Zeitpunkt und am Ort des Energiebedarfs nutzbar zu machen.

1.3

Politische Maßnahmen zur Förderung Sektorenkopplung

Die Bewertung der politischen Maßnahmen erlaubt eine qualitative Klassifizierung aufbauend auf der Wirkung und der Markteingriffstiefe. Die Wirkung bemisst sich anhand der Reichweite, d.h. wie viele Sektoren betroffen sind und wie groß der Anteil in den jeweiligen Sektoren in etwa ist. Die Markteingriffstiefe beschreibt die notwendigen regulatorischen

Änderungen, die dafür notwendig sind. Alle vorgeschlagenen Maßnahmen sind in der nachfolgenden Grafik dargestellt. Zusätzlich dazu werden für jede Maßnahme die Anzahl der adressierten Barrieren durch Kreisgrößen dargestellt. Die Kategorisierung erfolgt in vier verschiedenen Segmenten, welche durch die unten dargestellten Quadranten verdeutlicht wird. Der obere rechte Quadrant enthält Maßnahmen die einen großen Einfluss auf alle Sektoren haben und (relativ) wenige Eingriffe in die derzeitigen Randbedingungen benötigen. Diese Maßnahmen sollten kurzfristig und prioritär umgesetzt werden. Der untere rechte Quadrant enthält Maßnahmen, welche eine große Wirkung entfalten können, jedoch auch eine große Markteingriffstiefe erfordern. Zur Umsetzung der Maßnahmen muss eine längerfristige „regulatorische Investition“ getätigt werden, damit diese ihre lohnende Wirkung entfalten.

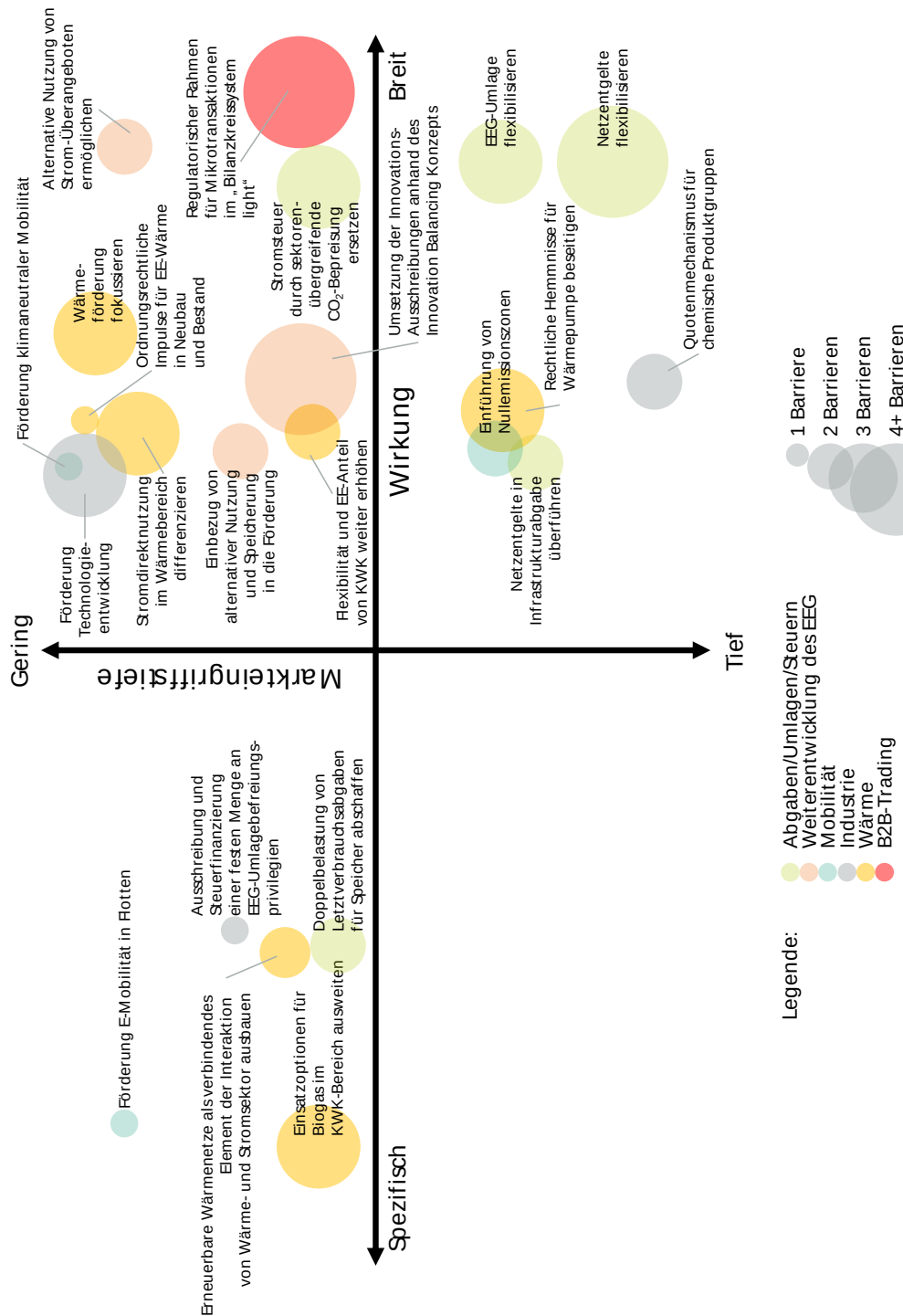


Abbildung 1: Übersicht und Priorisierung der Maßnahmen

Die Einordnung der verschiedenen teilweise komplexen Maßnahmen erfolgt qualitativ anhand der beschriebenen Kriterien. Auf dieser Basis ergibt sich das folgende zusammenfassende Bild:

Die längerfristigen Maßnahmen mit der absehbar größten Wirkung sind die Maßnahmen zur Flexibilisierung der EEG-Umlage und der Netzentgelte sowie der Einführung einer CO₂-Bepreisung in allen Bereichen. Des Weiteren werden die Maßnahmen zur Beschleunigung der Markteinführung hocheffizienter Power2Heat-Technologien eine große Wirkung entfalten. Besonders den Maßnahmen, welche sich mit den Abgaben und Umlagen befassen, kommt hier eine große Bedeutung zu, da sie sowohl ein Sektorenkopplungshindernis als auch eine große Barriere bei der Flexibilisierung des Energiesystems beseitigen. Hierdurch würde die Integration von Erneuerbaren Energien gleich mehrfach unterstützt.

Die kurzfristigeren Maßnahmen mit der größten Wirkung sind die Einführung eines regulatorischen Rahmens für die Durchführung von Mikrotransaktionen im Energiesystem. Dies würde die Interaktionen von Technologien zur Energiespeicherung oder Transformation (Strom, Gas, Wärme) stärken, die Erneuerbaren Energien lokal integrieren und die Netze entlasten. Die alternative Nutzung durch Sektorenkopplungstechnologien von zeitlich begrenzten, lokal verfügbaren Strom-Überangeboten ermöglicht die lokale Integration von Erneuerbaren Energien und schafft konkrete Anwendungsfelder der Sektorenkopplung, insbesondere wenn diese mit einer differenzierteren Stromdirektnutzung im Wärmebereich einhergeht.

Einleitung

Die Studie befasst sich mit den Möglichkeiten einer sektorenübergreifenden Optimierung der Energiesysteme. In der nachfolgenden Grafik sind die Sektoren dargestellt und die Interaktion untereinander den Kapiteln in dieser Studie zugeordnet.

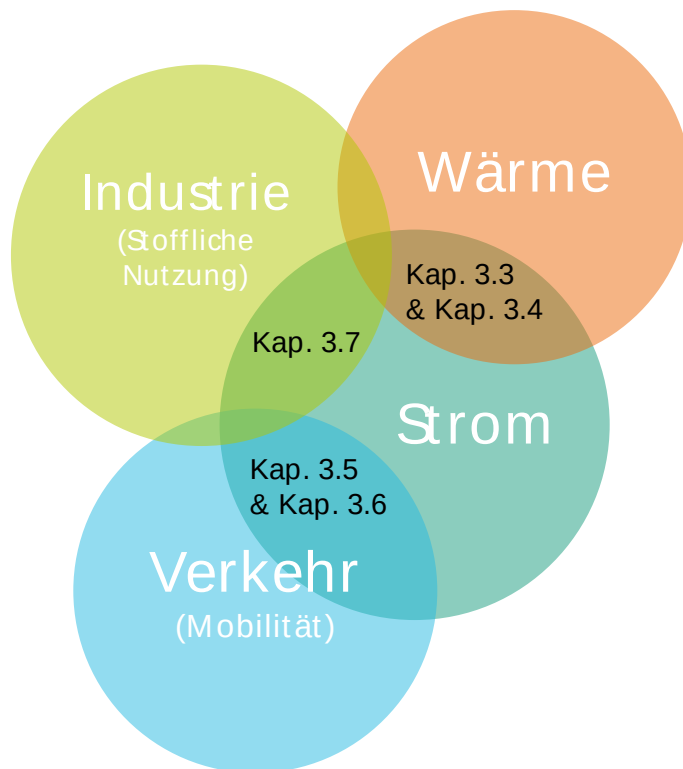


Abbildung 2: Übersicht der Sektoren

2.1

Einleitung und Ziel der Studie

Aufbauend auf den bislang veröffentlichten Studien des BEE (Albrecht et al. 2013; Canzler und Knie 2015; Hauser et al. 2014; Jansen et al. 2015; Krzikalla et al. 2013; Schulz et al. 2013) stellt die hier vorliegende Studie die Herausforderungen und erforderlichen Maßnahmen einer verstärkten Kopplung der Energiesektoren vor. Diese stellt einen notwendigen Baustein für die langfristige Dekarbonisierung aller Bedarfssektoren dar, wenn der Ausbau der Erneuerbaren Energien im erforderlichen Maß voranschreitet.

Die Sektorenkopplung stellt nach dem Ausbau der erneuerbaren Erzeugungskapazitäten und der Erschließung vorhandener Flexibilitätsoptionen eine weitere technologische Voraussetzung für die systemische Umsetzung der Energiewende dar.

Bei einer Unterteilung der Energiewende in vorangegangenen Arbeiten (Gerhardt et al. 2015) wurden vier Phasen der Energiewende skizziert. Die unten dargestellte Grafik verdeutlicht die Phasen der Energiewende. Nachdem Erneuerbare Energien (EE) in Phase I Systemrelevanz erreicht haben, steht in Phase II die fortschreitende Integration der Erneuerbaren Energien an. In diese Phase fällt die Umgestaltung des Energiesystems auf die neuen Führungsgrößen. Dies erfordert neben dem Umbau des Strommarktes und der Schaffung von Flexibilitätsoptionen (Jansen et al. 2015) auch die Kopplung der Sektoren Strom, Wärme, Verkehr und stoffliche Nutzung in der Industrie.

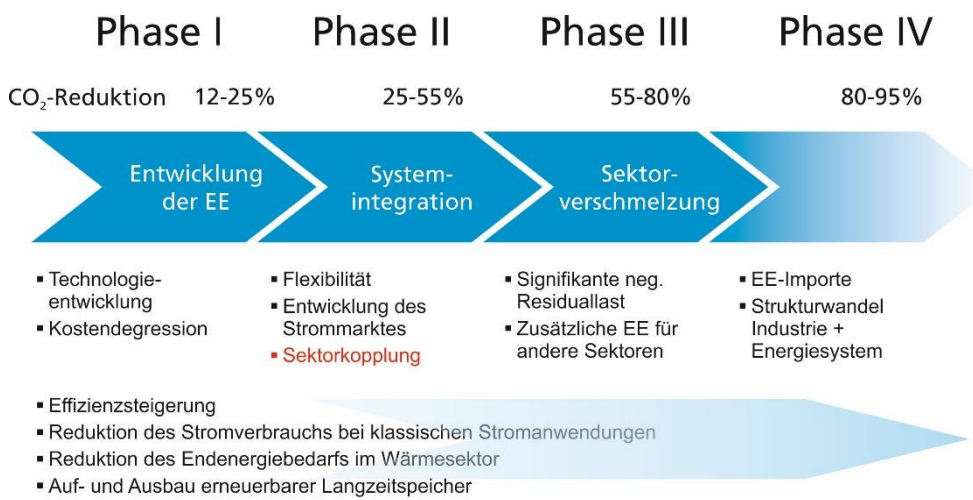


Abbildung 3: Rolle der Sektorenkopplung in den Phasen der Energiewende (Gerhardt et al. 2015)

2.2

Was ist Sektorenkopplung – Eine Definition

Der Begriff Sektorenkopplung ist noch relativ neu und wird nicht überall einheitlich verwendet und verstanden. Für die vorliegende Studie dient die nachfolgende Definition für die Ein- und Abgrenzung der verschiedenen Kopplungstechnologien.

Das Energiesystem lässt sich zunächst über seine Bedarfe beschreiben. Diese werden in den Energiebilanzen üblicherweise in die Sektoren Industrie, Gewerbe / Handel / Dienstleistungen, Haushalte und Verkehr differenziert. Innerhalb der Sektoren treten Energiebedarfe jeweils für unterschiedliche Anwendungszwecke auf, welche sich wiederum in elektrische, thermische, mechanische und chemische Energieanwendungen zusammenfassen lassen. Diese Gruppierung nach Energieformen kann relativ einfach den verschiedenen erneuerbaren Erzeugungstechnologien gegenübergestellt werden, die ebenfalls elektrische, thermische oder chemische Energie bereitstellen. Alle Erneuerbaren Energien stehen, ebenso wie die fossilen Energien, vor der Herausforderung, den geforderten Nutzen mit möglichst geringem Aufwand in technischer, ökonomischer und ökologischer Hinsicht sowie auf gesamtsystemdienlicher Weise zu erbringen. Die Sektorenkopplung eröffnet die Möglichkeit, die Optimierung

über die althergebrachten Systemgrenzen hinweg zu betrachten und damit eine ideale zeitliche und räumliche Verortung der verschiedenen Technologien und Erneuerbaren Energieträger innerhalb des Gesamtsystems zu erreichen. Diese gesamtsystemische Betrachtung stellt die notwendige Voraussetzung für einen vollständigen Verzicht auf fossile Energieträger dar.

Bei den gängigen Diskussionen zur Sektorenkopplung geht es in aller Regel weniger um die Kopplung der Endenergieabnehmer, also der Sektoren Industrie, GHD, Haushalte und Verkehr, als der Nutzung vorhandener oder erschließbarer erneuerbarer Erzeugungskapazitäten für einen anderen Anwendungszweck bzw. in einer anderen Energieform. Sektorenkopplung ist vor allem die Interaktion von Erzeugung und Verbrauch über die verschiedenen Energieformen hinweg.

Sektorenkopplung beinhaltet die Umwandlung einer Energieform in eine andere.

Für die vorliegende Studie muss die Definition der Interaktion um das Optimierungsziel einer mittel- und langfristigen Dekarbonisierung aller Endenergiesektoren (Industrie, GHD, Haushalte, Verkehr) erweitert werden. Die Interaktion zwischen den Sektoren und der gezielte Einsatz von unterschiedlichen Sektorenkopplungstechnologien lässt auf diese Weise ein effizientes Gesamtsystem entstehen, das weitestgehend ohne fossile Energieträger auskommt.

Sektorenkopplung im Sinne der Energiewende hat zum Ziel, die unterschiedlichen erneuerbaren Energietechnologien so einzusetzen, dass in allen Bedarfssystemen fossile Energieträger ersetzt werden und ein räumlich und zeitlich optimiertes Gesamtsystem entsteht.

Dies bedeutet, dass die Sektorenkopplung in dieser Studie über die Sektoren Strom, Wärme, Verkehr und die stoffliche Nutzung in der Industrie definiert wird (siehe auch (BEE 2015a; Jansen et al. 2015)). Mit dieser Definition lassen sich Flexibilisierungstechnologien von Sektorenkopplungstechnologien unterscheiden. Sektorenkopplung dient auch der Flexibilisierung, tangiert aber zudem unterschiedliche Bedarfssektoren und stellt damit weitgehend eine Teilmenge der Flexibilisierungstechnologien dar. Insofern sind Maßnahmen zur Unterstützung einer Flexibilisierung der Energiesysteme in vielen Fällen notwendige Voraussetzung für eine verstärkte Sektorenkopplung.

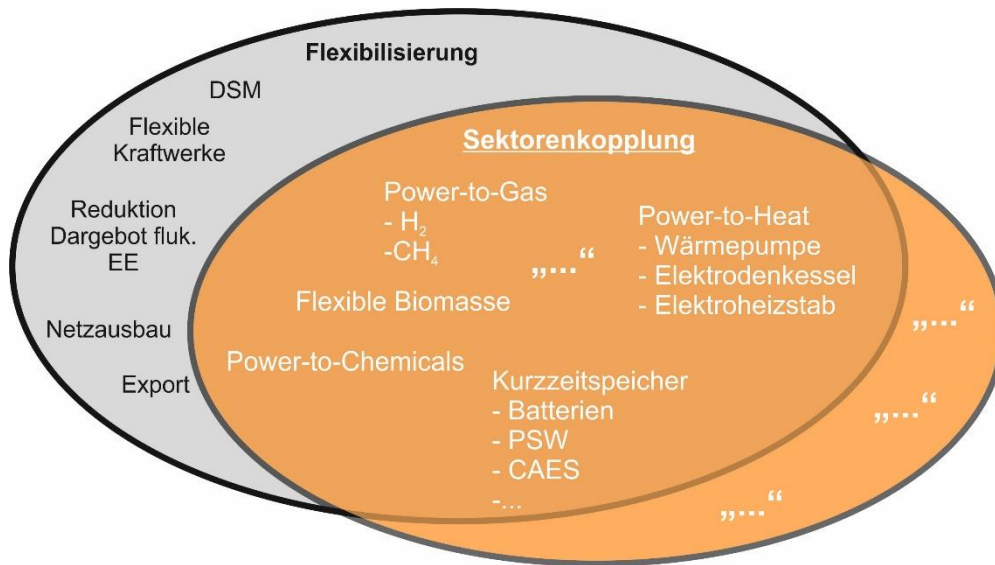


Abbildung 4: Die Sektorkopplungstechnologien stellen eine Teilmenge der gesamten Flexibilisierungsmaßnahmen dar.

2.3 Funktionen der Sektorkopplung

Die Sektorkopplung dient auf lange Sicht der vollständigen und effektiven Dekarbonisierung der Bedarfssektoren, die mit einer direkten Substitution der fossilen Energieträger nicht erreicht werden können oder in denen die Substituierung durch erneuerbare Energieträger ökologisch und ökonomisch unsinnig wäre (beispielsweise der vollständige Ersatz von Heizöl durch Bio-Stoffe). Die Sektorkopplung kann dazu beitragen, das verfügbare Angebot erneuerbarer Energien innerhalb eines dekarbonisierten Energiesystems optimal zu nutzen. Gleichzeitig werden durch die Sektorkopplung die regionale Nutzung und der überregionale Ausgleich gefördert.

Am schnellsten schreitet momentan der Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung aus Wind- und PV-Anlagen voran, während der Ausbau anderer erneuerbarer Energiequellen und der Sektorkopplungstechnologien nicht vernachlässigt werden darf. Der Schwerpunkt und der Anreiz für viele Sektorkopplungstechnologien liegt heute auf einem räumlichen und zeitlichen Ungleichgewicht zwischen Erzeugung und Bedarf aus den dominierenden fluktuierenden erneuerbaren Energieerzeugern vor allem Windkraft und Photovoltaik. Nach Krzikalla et al. (2013) tritt dies entweder auf, wenn im Gesamtsystem die Einspeisung aus Erneuerbaren Energien die Last übersteigt oder wenn in bestimmten Netzgebieten regionale Netzengpässe auftreten. Die Sektorkopplung schafft diesen Ausgleich, indem sie die verfügbaren Energiemengen für andere Bedarfsbereiche erschließt und dort fossile Energieträger ersetzt oder, wie beispielsweise im Falle von Power2Gas, für eine spätere Nutzung speicherbar macht. Die Nutzung von elektrischer Energie in anderen Anwendungen kann, wie beispielsweise bei Antrieben, zu zusätzlichen Effizienzvorteilen führen. Bei der Nutzung von Strom zu Heizzwecken bietet die Nutzung in

Wärmepumpen eine Effizienzverbesserung. Da es sich bei den Erneuerbaren Energien nicht ausschließlich um fluktuierende elektrische Energien handelt, wird durch die Sektorenkopplung im Rahmen dieser Studie ein ganzheitlicher Ansatz verfolgt, insbesondere Fragen eines sektorenvariablen Einsatzes der verschiedenen Biomassen (z.B. in der stofflichen Nutzung aber auch im Rahmen der KWK).

Die Sektorenkopplung setzt dabei auf die Nutzung vorhandener Infrastruktur. Auf Strom-, Gas- und Wärmenetze kommt hier eine besondere Rolle zu. Sektorenkopplung erlaubt die Interaktion zwischen den verschiedenen Netzen und fördert so einen optimierten Netzausbau und die Dekarbonisierung des Energiesystems.

Besonders durch die Interaktion zwischen Strom- und Gasnetz erfüllt die Sektorenkopplung eine wichtige Funktion zur Gewährleistung der künftigen Versorgungssicherheit in einem Energiesystem mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien. Durch die Umwandlung von Strom aus Wind- und Solarkraft per Elektrolyse in erneuerbaren Wasserstoff und in einem zweiten Schritt zu Methan (Power2Gas) sowie deren Speicherung im Gasnetz können auch längere "kalte Dunkelflauten" überbrückt werden. In solchen Phasen mit wenig Sonne und Wind können die erneuerbaren Gase in flexiblen Gaskraftwerken rückverstromt werden, wenn die Stromproduktion aus Wind und Sonne den Bedarf nicht decken kann und andere Speicheroptionen keine ausreichenden Kapazitäten bieten.

Da zudem die bislang praktisch noch nicht erfolgte Dekarbonisierung der Industrie, vor allem von Prozesswärme, und insbesondere des Schiffs- und Flugverkehrs einen hohen Bedarf an erneuerbarem Wasserstoff/Methan nach sich zieht, stellt dieser Aspekt der Sektorenkopplung einen wichtigen Baustein für das künftige Energiesystem dar.

2.4

Vision Sektorenkopplung

Die Sektorenkopplung trägt dazu bei, die Ziele der Energiewende effektiv und zielgerichtet zu erreichen. Die Grundannahme besteht hierbei im verstärkten Ausbau der erneuerbaren Stromerzeuger, insbesondere Windkraft und Photovoltaik als wesentliche Komponenten des zukünftigen Erzeugerparcs. In einem Energiesystem mit einem steigenden Anteil erneuerbaren Stroms nehmen Phasen des lokalen „Überangebotes“ bzw. die Notwendigkeit einer Abregelung von erneuerbaren Energieanlagen zunächst weiter zu. Ein verstärkter Netzausbau wirkt dieser Entwicklung entgegen, kann aber auch die zeitlichen und räumlichen Abweichungen zwischen Erzeugung und Bedarf nicht vollständig kompensieren. Die Sektorenkopplung ist ein Baustein, der innerhalb eines vernetzten Systems die Flexibilitäten erhöht und zu einer maximalen zeitlichen wie räumlichen

Ausnutzung vorhandener Erneuerbare-Energien-Erzeugungskapazitäten beiträgt.

Einleitung

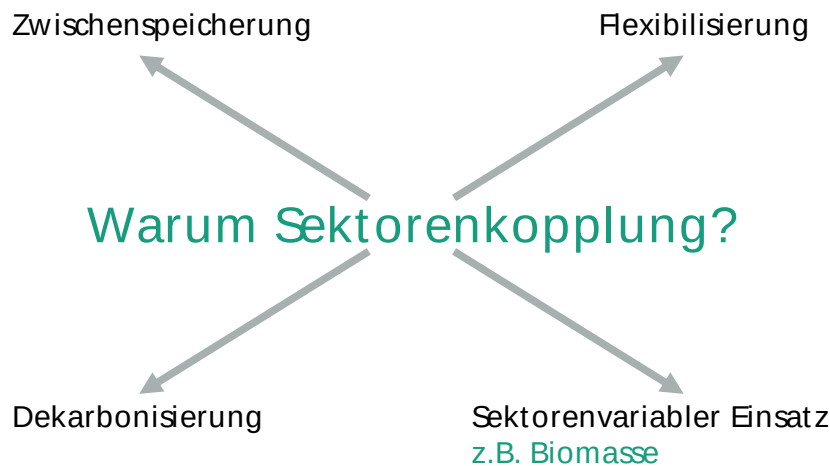


Abbildung 5:
Sektorenkopplung integriert
unterschiedliche Aspekte
des Energiesystems.

Die Nutzung von elektrischen Energieangeboten in bisher nicht-elektrisch geprägten Anwendungszwecken bringt das Energiesystem noch stärker zusammen und schafft Synergien über die verschiedenen Energieformen und Sektoren hinweg. Neben den elektrischen Energieangeboten bieten auch thermische erneuerbare Erzeuger und das breite Feld der biogenen Energieträger Raum für eine verstärkte synergetische Gesamtoptimierung. Die verschiedenen Energieträger werden entsprechend ihrer spezifischen Charakteristika gezielt in das Gesamtsystem integriert. Die speicher- und transportierbaren Energieträger, sowohl aus Biomasse als auch aus Power2X-Prozessen bilden hierbei den nötigen Ausgleich für die fluktuierenden erneuerbaren Stromerzeuger.

Hierfür ist es erforderlich, wo immer möglich, ein „Level-Playing-Field“ zu schaffen, das eine systemdienliche und energiewendekonforme Sektorenkopplung unterstützt. Dies bezieht sich nicht nur auf die Bewertung des Gesamtsystems, sondern sollte bei guten Rahmenbedingungen auch auf der lokalen Ebene wirksam werden. Dies gilt für alle aktuell verfügbaren und marktgängigen Technologien, die auf diese Weise vergleichbare Wettbewerbsbedingungen erhalten. In Bezug auf mittel- und langfristige Technologieentwicklungen kann es in Einzelfällen erforderlich sein, vielversprechende Schlüsseltechnologien der Sektorenkopplung bis zu ihrer Marktreife mit Förderungen und Marktanzreizen zu unterstützen.

Eine umfassende Minderung des Bedarfs ist der Schlüssel für ein nachhaltiges auf Erneuerbare Energien aufgebautes Energiesystem. Die Anforderungen an eine kontinuierliche Verbesserung der Energieeffizienz bzw. der Erhöhung der Energieproduktivität bleiben auch mit einer umfassenden Flexibilisierung und Sektorenkopplung grundsätzlich erhalten.

3.1

Zusammenfassung der Studien

Über die Ausbaupfade für Erneuerbare Energien besteht in der Fachwelt weitgehend Einigkeit. Diese bewegen sich innerhalb der politischen Korridore und nehmen je nach Szenario Zielwerte von 80 – 95% für die Erneuerbaren Energien im Jahr 2050 an. Manche Szenarien gehen auch von 100% aus. Dieses Ziel wiederum findet sich auch in der Satzung des BEEs wieder (BEE 2015b). Die Studien unterscheiden sich teilweise in ihren Annahmen und Entwicklungsparametern, so dass die Ziele jeweils unterschiedlich und zu unterschiedlichen Zeitpunkten erreicht werden. Eine vergleichende Übersicht über die wichtigsten aktuellen Entwicklungsszenarien findet sich in (Haller et al. 2016). Hier werden das Klimaschutzszenario 2050 (Öko-Institut, Fraunhofer-ISI), die Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050“ (UBA), die Studie „Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose“ (Prognos AG, EWI, GWS) sowie die BMU-Leitstudie 2011 (DLR) einschließlich ihrer Szenarienvarianten vergleichend ausgewertet. In (Nitsch 2015) werden die Zielvorgaben der Bundesregierung in zwei Trendszenarien „Korridor“ und „100“ untersucht. Die kostenoptimale Transformation des deutschen Energiesystems steht in (Henning und Palzer 2015) im Mittelpunkt der Betrachtung. Aus allen dieser übergreifenden Studien lassen sich Rückschlüsse auf das Thema Sektorenkopplung lediglich in Bezug auf die vorausgesehenen Ausbaupfade der fluktuierenden erneuerbaren Energieerzeuger schließen.

Das Potenzial der Sektorenkopplungstechnologien lässt sich grundsätzlich sowohl von der Bedarfs- als auch von der Erzeugungsseite her betrachten. Die Herangehensweise an die Fragestellung von Sektorenkopplungspotenzialen ist in beiden Fällen unterschiedlich. Auf der einen Seite bestimmt in den eher energiesystemseitig getriebenen Studien vor allem die Entwicklung der fluktuierenden erneuerbaren Erzeuger die Zusammensetzung des übrigen Kraftwerksparks und den Flexibilitäts- und Sektorenkopplungsbedarf. Auf der anderen Seite wird die Sektorenkopplung maßgeblich durch die Zielstellung der Dekarbonisierung in den verschiedenen Sektoren getrieben.

Das Thema Sektorenkopplung ist bislang als alleiniger Untersuchungsgegenstand noch nicht umfassend diskutiert worden. Vorliegende Studien, wie (Quaschnig 2016; Krzikalla et al. 2013; Jansen et al. 2015) diskutieren die Sektorenkopplung in Verbindung mit den grundsätzlichen Flexibilisierungserfordernissen eines auf fluktuierenden Energieerzeugern aufgebauten Energiesystems. Diese bauen weitestgehend auf den

Erkenntnissen der oben genannten Meta-Studien auf und widmen sich in erster Linie der Problematik zukünftig verstärkt auftretender „Stromüberangebote“ und deren mögliche Integration in das Energiesystem. Hierzu bieten sich als mögliche Reaktionen die Abregelung, die Speicherung, die Flexibilisierung der Stromverbraucher, die Sektorenkopplung sowie der Netzausbau an. Auf die abschwächende Wirkung eines vermehrten Netzausbaus auf die Potenziale für die Sektorenkopplung wies (BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. 2017) hin. Die Abgrenzung zwischen Flexibilisierungs- und Sektorenkopplungstechnologien ist in den vorliegenden Studien nicht scharf definiert. Insgesamt wird das Thema Flexibilisierung und Sektorenkopplung vor allem aus der Perspektive der erneuerbaren Stromerzeuger Wind und Photovoltaik betrachtet. Einigkeit besteht in dem Ziel, Abregelung nach Möglichkeit zu vermeiden. Eine umfassende Modellierung der zukünftigen Sektoreninteraktionen Strom-Wärme-Verkehr wurde in (Gerhardt et al. 2015) durchgeführt. Anhand zentraler Kopplungstechnologien wurden technologisch umsetzbare und volkswirtschaftlich kostenoptimale Entwicklungspfade ermittelt. Einen verstärkten Fokus auf die Technologien und Potenziale im Wärmesektor legt die Agora-Studie Wärmewende (Gerhardt et al. 2017), in der vor allem die Dekarbonisierung des Wärmesektors im Fokus steht und die wärmeseitigen Sektorenkoppler detailliert untersucht wurden.

Eine Reihe von sehr umfassenden Studien befasst sich mit der Frage der Energiespeicherung. Eine sehr umfassende Analyse von erneuerbarem Erzeugerausbau, resultierenden Speicherbedarfen und Technologieoptionen findet sich in (Hochloff et al. 2014). In Bezug auf die stromseitig induzierte Sektorenkopplung finden sich in der Studie neben einer umfassenden Auswertung vorliegender Studien und Szenarien, technische und wirtschaftliche Einsatzoptionen für die verschiedenen Speicherlösungen einschließlich der mobilen Batteriespeicher in der E-Mobilität. Der Rolle von Power2Gas ist ein eigenes Arbeitspaket gewidmet. Mit der Frage der Energiespeicher befassen sich außerdem (Höfling et al. 2014) mit besonderem Bezug auf Baden-Württemberg, (Stern et al. 2014b) und (Hennings et al. 2015). Hier wird insbesondere die Bedeutung der Power2Gas-Technologie hervorgehoben aber auch die Rolle der Biomasse behandelt.

Power2Gas als zentrale Zukunftstechnologie im Bereich der Sektorenkopplung ist das Schwerpunktthema einer Reihe weiterer Studien (Stern et al. 2015). In (Bünger et al. 2014) vor allem aus der Perspektive des Verkehrs, in (Stern et al. 2015) und (Stern et al. 2014a) vor allem aus der Perspektive des zukünftigen Energiesystems. Eine technische und ökonomische Bewertung von Wasserstoff als Energieträger und -Speicher, ebenfalls aus der Perspektive der zukünftigen Anforderungen, findet sich bei (Friedrich et al.). Eine bedarfsseitig getriebene Untersuchung zur

Wasserstofferzeugung im Zieljahr 2050 findet sich in (Joest et al. 2009). Die Rolle der Bioenergie wird u.a. in (Hauser et al. 2014) untersucht. Die Notwendigkeit eines flexiblen Einsatzes und der Erbringung von Systemdienstleistungen wird hier als zukünftige Rolle der Biomasse besonders hervorgehoben.

3.2

Herausforderungen bei der Nutzung von Erneuerbaren Energien

Erneuerbare Energien insbesondere Wind- und Solarenergie tragen zukünftig in großem Maße zur Energieerzeugung bei. Gleichzeitig reduzieren sich die Bedarfsspitzen nur geringfügig. Die Erneuerbaren Energien tragen im Strombereich zwar maßgeblich zur Gesamterzeugung bei, leisten jedoch nur einen kleinen Beitrag zu Absenkung der residualen Höchstlast. Durch die großen Erzeugungskapazitäten treten zunehmend Situationen mit Energieüberangeboten aus Erneuerbaren Energien auf, die in ihrer Ausprägung auch stark durch die „Sockelerzeugung“ der fossilen Grundlastkraftwerke bestimmt werden. Der Umgang mit diesen „Überangeboten“ erfolgt innerhalb des Energiesystems auf verschiedenen Ebenen, da neben der zeitlichen auch eine geografische Komponente berücksichtigt werden muss. Die regionalen Unterschiede in der Verfügbarkeit der verschiedenen Erneuerbaren Energie (Wind, Solar, Biomasse, Wasser, Geothermie, Gezeiten etc.) haben einen starken Einfluss auf die regionale Ausgestaltung der Sektorenkopplung. Der vorgesehene Netzausbau von Strom-, Gas- und Wärmenetzen trägt tendenziell zur besseren Verteilung der erzeugten Energiemengen bei. Zeiträume, in denen aufgrund von abweichender Angebots- und Nachfragebedingungen und damit einhergehenden Preissignalen eine Abregelung von Erneuerbare-Energien-Anlagen erfolgt, werden tendenziell jedoch weiter zunehmen. Dieses Potenzial an freien Strommengen im Rahmen einer Sektorenkopplung für andere Anwendungen zusätzlich nutzbar zu machen, ist eine sinnvolle Maßnahme, um fossile Energieträger im System zu ersetzen. Bei der Planung und Umsetzung von Power2X-Technologien ist zu berücksichtigen, dass die Potenziale je nach Zubauplanung, Netzausbau und Bedarfsstrukturen räumlich und zeitlich unterschiedlich ausfallen.

3.3

Flexibilisierungsoptionen durch die Sektorenkopplung

Die Sinnhaftigkeit einer Sektorenkopplung ergibt sich zunächst vorrangig aus den Erzeugungsprofilen der erneuerbaren Stromerzeuger, welches nicht mehr primär bedarfsorientiert, sondern zunehmend zeitlich und räumlich fluktuierend ausfällt. Dies gilt nicht in gleichem Maße für alle erneuerbaren Erzeugungstechnologien, sondern primär für den Wind und die Photovoltaik als Haupterzeuger im zukünftigen Energiesystem. Einhergehend mit ihrem massiven Ausbau und ihrer Einspeisecharakteristik

ergeben sich zukünftig vermehrt Situationen, in denen nicht die gesamte erzeugte Energiemenge zeitgleich verarbeitet werden kann und sollte und auch nicht über die sektorenimmanenten Flexibilitätsoptionen aufgefangen werden können.

Die Sektorenkopplung ist eine Maßnahme, diese Angebote für andere Bedarfssektoren nutzbar zu machen und auf diese Weise andere nicht fluktuierende erneuerbare Energieträger zu schonen. Strom ist als Energieträger besonders flexibel einsetzbar und problemlos in alle anderen Energieformen umwandelbar. Dies macht die Sektorenkopplung Power2X besonders attraktiv. Gleichzeitig ergibt sich durch die fluktuierende Erzeugung der größte Flexibilisierungsbedarf (Abbildung 6). Es sollte aber bedacht werden, dass jede Energiewandlung die Entropie erhöht. Aus diesem Grund sollten zunächst die Flexibilitätsoptionen bei den Stromanwendungen ausgeschöpft werden, bevor Strom direkt (Stromdirektheizung) für Wärmeanwendungen eingesetzt wird.

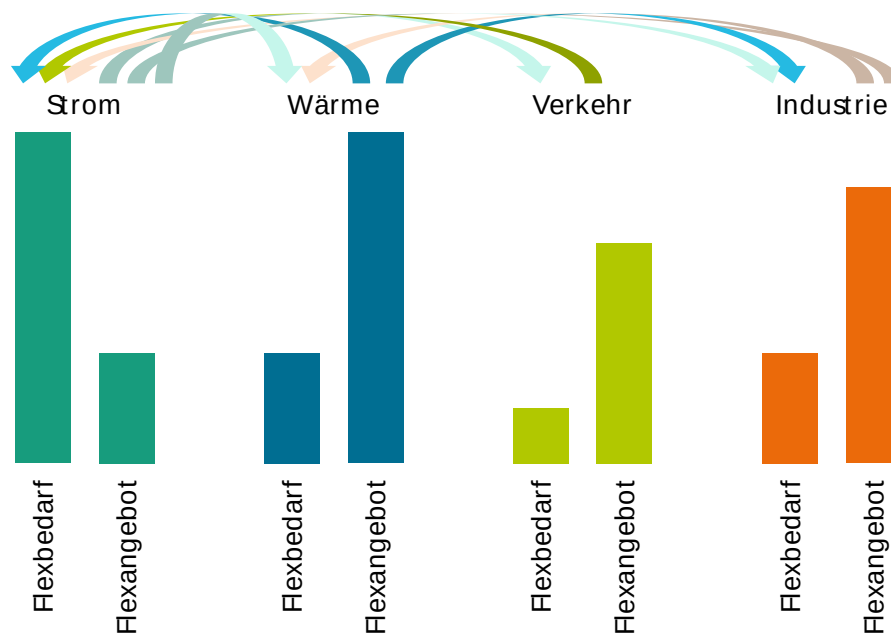


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Austauschs an Flexibilität durch Sektorenkopplung

Der Wärmesektor bietet ein großes Flexibilisierungsangebot. Zum einen, da Wärmeanwendungen in der Regel deutlich träger sind als Stromanwendungen. Zum anderen, weil sie sehr variabel unterschiedliche Energieträger nutzen können (Strom, Brennstoffe, Abwärme) und entsprechende Technologien verfügbar sind. Thermische (Zwischen-) Speicher sind technisch einfach und vergleichsweise kostengünstig und stellen zusammen mit Wärmenetzen eine sinnvolle Verknüpfung zwischen der CO₂-armen Wärmeerzeugung und der Nutzung dar. Diese Aspekte

erlauben eine effektive Nutzung von Sektorenkopplungstechnologien im Wärmesektor.

Der Verkehrssektor stellt ebenfalls ein großes Potenzial für die Sektorenkopplung dar. Hier steht ein grundsätzlicher Wechsel der Antriebstechnologien von den fossilen Verbrennungsmotoren hin zu Elektromotoren und alternativen Kraftstoffen im Fokus. Der wesentliche Vorteil der Kopplung mit dem Verkehrssektor liegt in seiner zeitlichen Variabilität und den aktuell noch langen „Standzeiten“, was insbesondere für den Bereich des motorisierten Individualverkehrs (MIV) gilt.

Die nicht-fluktuierenden erneuerbaren Energieträger, wie die Biomasse, müssen im zukünftigen Energiesystem zunehmend die Back-up Kapazitäten bereitstellen und die fossilen Energieträger in der stofflichen Nutzung substituieren. Dadurch und durch ihre begrenzte Verfügbarkeit (Nutzungskonkurrenzen u.a. zur Nahrungsmittelproduktion und im Naturschutz) stellen sie im zukünftigen Energiesystem besonders wertvolle Ressourcen dar und bilden auch im Zusammenhang mit der Sektorenkopplung eine eigene Gruppe. Die Bedeutung der Biomasse kann sich regional stark unterscheiden, da ihr Wert letztendlich von lokalen Strukturen abhängt. Der Power2Gas-Technologie kommt dabei eine ähnliche Rolle zu wie der Bioenergie. Nach der Umwandlung von Strom in Gas (H_2 , CH_4) kann dieses sektorenvariabel eingesetzt werden. Daneben besteht die Möglichkeit mittels Power2Fuel langkettige Kohlenwasserstoffe als Kraftstoff oder für die stoffliche Nutzung zu erzeugen.

Sektorenkoppler – Interaktionen

4.1

Technische Rahmenbedingungen

In Bezug auf die vorliegende Studie und die teilweise komplexen Wechselwirkungen in den Energiesystemen werden auf die Sektorenkopplung die energetischen Anwendungen betrachtet, die potentiell im Rahmen einer Sektorenkopplung in Betracht kommen. Diese umfassen Stromanwendungen, Wärmeanwendungen (auf verschiedenen Temperaturniveaus), Mobilitätsanwendungen und die stoffliche Nutzung von Energieträgern. Diese stehen auf der Bedarfsseite und werden im heutigen Energiesystem durch entsprechende Energiewandlungstechnologien aus fossilen und erneuerbaren Energiequellen bedient. Die Nachfrage bestimmt in konventionellen Erzeugungsstrukturen maßgeblich die Erzeugung.

Auf der Erzeugungsseite stehen in einem zukünftigen Energiesystem unterschiedliche Energieträger und Energieerzeugungstechnologien zur Verfügung, die sich teilweise von der bisherigen bedarfsgetriebenen Versorgungsphilosophie grundlegend unterscheiden. Das Angebot bestimmt bei den fluktuierenden erneuerbaren Energietechnologien zunehmend das verfügbare Bedarfsprofil. Dies erfordert zukünftig eine deutlich größere Flexibilität auf der Bedarfsseite. Die Flexibilisierung umfasst verschiedene Handlungsbereiche auf der Bedarfs- und der Erzeugungsseite: Lastmanagement, bedarfsgerechtere Erneuerbare-Energien-Stromerzeugung, Flexibilisierung konventioneller Kraftwerke und Speicher (Krzikalla et al. 2013). Die Sektorenkopplung stellt eine Teilmenge der Flexibilisierungsmaßnahmen dar, die als primäres Ziel nicht nur die zeitliche Entkopplung von Angebot und Nachfrage oder die Speicherung zum Ziel hat, sondern auch die Verschiebung eines Energieangebots in einen anderen Bedarfssektor beinhaltet, um fossile Energieträger einzusparen.

4.2

Interaktionen und Technologien

Diese Studie konzentriert sich auf die Untergruppe der „Sektorenkoppler“. Diese Sektorenkoppler stellen die verschiedenen Möglichkeiten zur Verbindung unterschiedlicher Energieerzeuger und -bedarfe vereinfacht dar und stehen für die grundsätzlich verfügbaren Optionen. Diese erfüllen die folgenden drei Kriterien:

1. Eine Energieform substituiert eine andere Energieform (z.B. Strom ersetzt Brennstoff im Heizungssystem = Power2Heat)
2. Durch die Substitution werden fossile Energien eingespart (Dekarbonisierung)
3. Im gesamten Energiesystem werden CO₂-Emissionen eingespart und die Ausnutzung der erneuerbaren Erzeugungskapazitäten (Strom, Wärme, Biomasse) optimiert.

Bei den einfachsten Technologien zur Sektorenkopplung erfolgt eine direkte Wandlung von der verfügbaren in die benötigte Energieform. Beispiele hierfür sind der Elektrodenkessel, in dem Strom in Wärme umgewandelt wird oder der Elektromotor, der Strom in Bewegung umsetzt. Wärmepumpen machen zusätzlich Umweltwärme nutzbar.

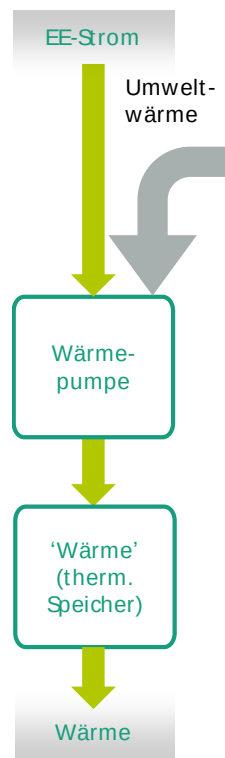


Abbildung 7: Direkte Kopplung von Sektoren

Komplexere Verbindungen zwischen den Sektoren nutzen Technologien, die zunächst Energieträger oder Rohstoffe erzeugen und die erst in weiteren Umwandlungsschritten in die benötigte Energieform gebracht werden. Dies umfasst alle Power2Gas oder Power2Liquid Technologien. Hierbei ist das Produkt des Prozesses zunächst nur ein Zwischenschritt, der jedoch ein wesentliches zusätzliches Kriterium aufweist. Durch Power2Gas- bzw. Power2Liquid-Prozesse werden aus fluktuierenden Stromangeboten speicher- und transportierbare Energieträger.

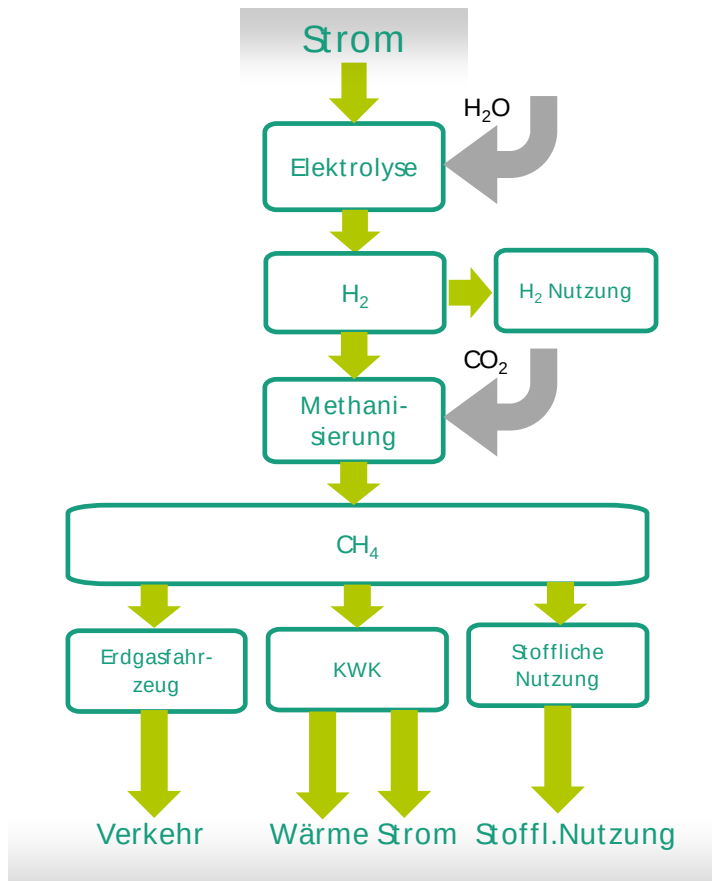


Abbildung 8:
Sektoreninteraktion über
Zwischenprodukte

Um einheitliche Systemgrenzen einzuhalten, muss bei den Zwischenprodukten die Bewertung der Gesamtprozesse erfolgen. Dies gilt in gleichem Maße für die Power2Heat/Cold Technologien, in denen Wärme- oder Kältespeicher zum Einsatz kommen, Stromanwendungen in der Mobilität, bei denen Batteriespeicher genutzt werden oder bei der Rückverstromung von Power2Gas.

Die Potenziale, die die Bioenergie innerhalb flexibilisierter Energiesysteme ausspielen kann, wurde bereits eingehend im Rahmen der BEE-Studie „Beiträge der Bioenergie zur Energiewende“ (Hauser et al. 2014) vorgestellt. Die Bioenergieträger zeichnen sich durch ihre grundsätzliche Flexibilisierbarkeit und sektorenübergreifenden Einsetzbarkeit aus. Ihr potenzielles Einsatzgebiet innerhalb des Energiesystems ist aus diesem Grund auch sehr groß. Außer bei einer unmittelbaren stofflichen Nutzung von Biomasse, erfolgt die Nutzung von chemisch gebundener Bioenergie innerhalb des Energiesystems immer in einem Verbrennungsprozess. Aus diesem Grund stellt für den Bereich der Sektorenkopplung die Kraft-Wärme-Kopplung mit biogenen Brennstoffen eine Schlüsseltechnologie dar. Mittels KWK kann die Bioenergie „bedarfsgerecht“ Strom und Wärme erzeugen und ihrer Rolle als Systemdienstleister in einem zukünftigen

Energiesystem gerecht werden. Die Bioenergie kann für alle Bedarfssektoren Strom, Wärme, Verkehr und Industrie Energieträger bereitstellen, wie beispielhaft in Abb. 8 dargestellt wird. Insbesondere ihr potentieller Einsatz in Bereichen, die nicht über eine Elektrifizierung dekarbonisiert werden können (z.B. Prozesswärme im Hochtemperaturbereich), findet sie ihre Rolle und ergänzt die fluktuierenden Erneuerbaren Energien Wind und Photovoltaik.

Sektorenkoppler - Interaktionen

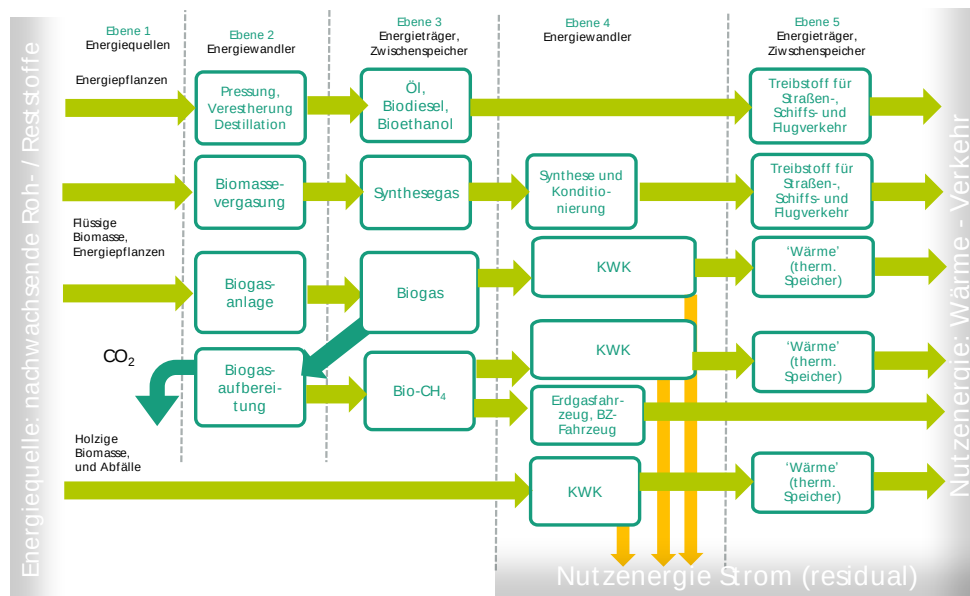
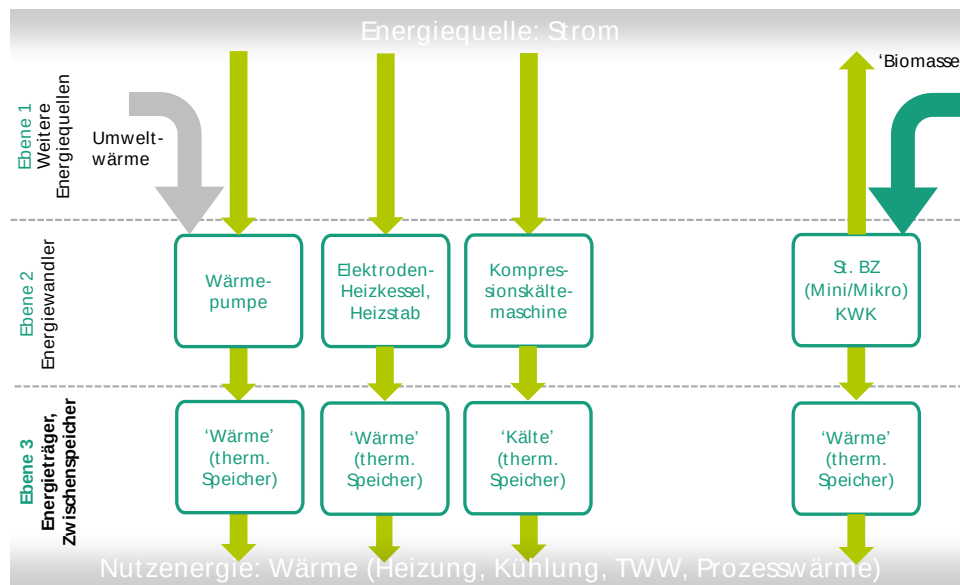


Abbildung 9: Bioenergie als sektorenübergreifende Energieform

4.3 Interaktionsanalyse Strom / Wärme

Die Nutzung von elektrischem Strom im Wärmebereich stellt die technisch einfachste Sektorenkopplung dar. Dies liegt vor allem daran, dass Strom als hochexergetischer Energieträger problemlos und mit hundertprozentiger Effizienz in Wärme umgewandelt werden kann. Die Technologien für die Sektorenkopplung sind kostengünstig verfügbar.

Die Kraft-Wärme-Kopplung auf Basis biogener Brennstoffe kann im Rahmen der Sektorenkopplung die Residuallasten erbringen. Sie produziert Wärme und Strom und koppelt damit, anders als die Wärmepumpe oder der Elektrodenkessel nicht den Strom- mit dem Wärmesektor, sondern die erneuerbaren Brennstoffe (Biomasse und Power2Gas) mit beiden und sichert die Versorgung ab.



Sektorenkoppler - Interaktionen

Abbildung 10: 3.3
Interaktionsanalyse
Strom/Wärme

4.3.1

Wahrscheinliche Sektorenkopplungsinteraktionen

Der Wärmesektor sollte aus zweierlei Gründen im Fokus für die Sektorenkopplung stehen. Zum einen baut der Wärmesektor derzeit noch überwiegend auf die Nutzung fossiler Brennstoffe auf. Im Jahr 2015 wurden lediglich 13,2% der Endenergie für Wärme und Kälte aus Erneuerbaren Quellen gedeckt (BMW i 2016). Hier ist eine Dekarbonisierung durch einen Wechsel der Energieträger in großem Maßstab erforderlich. Zum anderen ist die Umwandlung von elektrischem Strom in Wärme kostengünstig und energetisch effizient und erlaubt die Einbindung weiterer erneuerbarer Energien (Umweltwärme aus Boden, Wasser und Luft). Für eine sinnvolle Sektorenkopplung erfolgt die Nutzung des Stromangebots in bivalenten Systemen¹, um sowohl der Angebots- als auch der Nachfragefluktuation gerecht werden zu können. Insofern stellt die Sektorenkopplung Strom-Wärme eine Flexibilisierungsfunktion des Energiesystems dar. Die Technologien der Strom-Wärme-Kopplung sind weitestgehend verfügbar. Sie umfassen:

- Stromdirektheizung (Elektrodenheizung, Heizstab)
- Elektrische Wärmepumpe

¹ Bivalente Systeme sind Systeme, die mehr als einen Energieträger (Strom und ein weitere Brennstoff) nutzen und auf diese Weise auf fluktuierende Angebote reagieren können.

- Gas-Brennwertheizung
 - mit Power2Gas-Methan
 - mit Biomethan
- Gas-Wärmepumpe
 - mit Power2Gas-Methan
 - mit Biomethan.

4.3.2

Stand der Sektorenkopplung

Der Wärmepumpeneinsatz hat in den vergangenen zwanzig Jahren ein deutliches Wachstum verzeichnet. Von gerade einmal 2.000 verkauften Geräten im Jahr 1995, stieg der Absatz bis 2008 auf einen Höchststand von 62.500 Geräten. In den Folgejahren brachen die Verkaufszahlen um 18 Prozent ein. 2010-15 erholten sich die Absätze langsam und schwankten zwischen 55.000 und 60.000 Geräten. 2016 wurde mit 66.500 Geräten erstmals wieder in deutliches Wachstum verzeichnet, das sich 2017 fortgesetzt hat. Bezüglich der Absatzstruktur setzte sich der Trend zur Luft/Wasser-Wärmepumpe fort. Ein positiver Impuls wird durch die MAP-Förderrichtlinie auf die Erdwärme für das Jahr 2016 erwartet. Nach wie vor wird der Heizungsmarkt sowohl im Neubau als auch im Gebäudebestand von den fossilen Energieträgern dominiert. Das vergleichsweise hohe Preisniveau für elektrischen Strom und die zuletzt gesunkenen Preise für fossile Energieträger haben diesen Trend befördert. Gleichwohl ist die Wärmepumpe in allen Sektorenkopplungsstudien als Schlüsseltechnologie benannt (z.B. in Gerhardt et al. 2017), deren Ausbaurate sich massiv steigern muss. Gleichzeitig müssen die Wärmepumpen für eine Nutzung von „Strom-Überangeboten“ befähigt werden. Mit der SG-Ready-Schnittstelle hat die Wärmepumpenbranche hierfür 2013 einen einheitlichen Standard entwickelt. SG-Ready-gelabelte Wärmepumpen können auf ein fluktuierendes Angebot erneuerbarer Stromerzeugung reagieren und innerhalb bestimmter Rahmenbedingungen direkt auf das vorhandene Stromangebot reagieren. In den gängigen Marktstatistiken wird nicht erfasst, welchen Anteil Hybrid-Wärmepumpen am Gesamtabsatz einnehmen. Auch die Verbreitung bivalenter Anlagen ist nur schwer präzise zu erfassen. Eine Erhebung geht von rund 5.000 verkauften Hybridsystemen in Europa für 2014 aus (Delta-EE 2015). Da diese Technologie noch verhältnismäßig neu ist, sind in den kommenden Jahren deutliche Steigerungen möglich. Befragungen von Marktexperten legen nahe, dass es auch in Deutschland einen Trend zu hybriden bzw. bivalenten Lösungen, insbesondere im Gebäudebestand, gibt. Die geplanten Förderungen zur Markteinführung könnten diese Entwicklung unterstützen. Diese würden einen Einsatz in der Sektorenkopplung ermöglichen, da sie den Vorteil einer Energieträgerflexibilität bieten

(Bundesverband Wärmepumpe e.V. (bwp) 2015). Gas-Wärmepumpen sind weiterhin kaum am Markt vertreten.

Der Einsatz von Erneuerbaren Energien im Bereich der Fernwärme liegt nur auf einem verhältnismäßig niedrigen Niveau. Im Zweiten Erfahrungsbericht zum Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2015) wird der Erneuerbare Energien Anteil mit 12,1% als unterer Grenzwert angegeben, da hierbei kleinere Nahwärmanlagen erfasst sind, die häufiger auf Basis Erneuerbarer Energien arbeiten. Der Einsatz von Elektrodenkesseln in der Fernwärme zur Nutzung von Überangebot aus Windkraft wurde exemplarisch für die Bundesländer Mecklenburg-Vorpommern (Mecklenburg-Vorpommern 2016) und Brandenburg (GridLab 2016) untersucht. Der prognostizierte potentielle Beitrag lag hier für das Jahr 2020 bei 1,3 % und für das Jahr 2030 bei 4,8% der angenommenen Gesamtnettowärmeerzeugung. Die Nutzung von Power2Heat in der Fernwärme stellt damit ein vermutlich eng begrenztes aber technisch relativ einfach zu erschließendes Potenzial dar.

4.3.3

Barrieren

Die Barrieren für eine weitreichende Sektorenkopplung im Bereich Strom-Wärme erstrecken sich auf eine große Bandbreite an technischen, wirtschaftlichen und regulatorischen Hemmnissen. Diese werden umfänglich in Kapitel vier erläutert. In Bezug auf die Interaktion Strom / Wärme sind dies insbesondere:

- Staatlich induzierte Strompreisbestandteile (EEG-Umlage, Stromsteuer, Netzentgelte)
- Fehlende Rahmenbedingungen für effiziente Nutzung von „Strom-Überangeboten“
- Fehlende räumliche Nähe von Erzeugungsanlagen und Power2Heat-Anlagen sowie Wärmesenken
- Netzausbau wirkt Angebotspotenzial entgegen
- Derzeitiger Gesamtwirkungsgrad bei Nutzung von CH₄ aus Power2Gas-Prozessen
- Technische Einbindung von Biomethan im großen Maßstab
- Nutzungsoptionen von Biogas außerhalb der KWK.

Entsprechend der Systematik der Sektorenkopplung in dieser Studie ergibt sich ein Potenzial für eine Sektorenkopplung Wärme / Strom aus potentiell verfügbaren (Ab-)Wärmequellen. Diese können beispielsweise aus verschiedenen Industrieprozessen stammen. Im niedrigen Temperaturbereich ($\leq 80^{\circ}\text{C}$) erfolgt die Abwärmenutzung in der Regel als direkte Wärmenutzung über Wärmerückgewinnungsanlagen oder mit Hilfe von Wärmepumpen. Adsorptions- und Absorptionskältemaschinen ermöglichen die Nutzung der Abwärme zur Kälteerzeugung. Eine Sektorenkopplung zum Stromsektor ist bei hohen Temperaturen ($\geq 350^{\circ}\text{C}$) über eine Dampfturbine oder eine Stirling-Maschine möglich. Im mittleren Temperaturbereich lässt sich über einen ORC-Prozess (Organic-Rankine-Cycle)¹ ebenfalls Strom aus der Abwärme erzeugen. Eine Studie zu den unterschiedlichen Prozessen und Abwärmepotenzialen in Deutschland findet sich z.B. in (Pehnt et al. 2010) und (Grote et al. 2015).

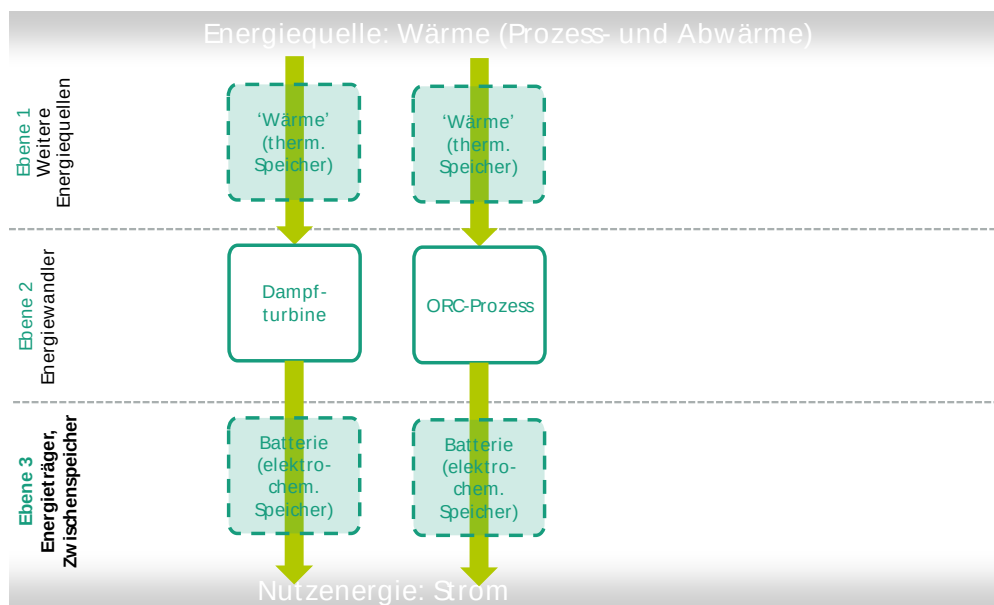


Abbildung 11:
Interaktionsanalyse
Wärme/Strom

¹ ORC-Verfahren zum Betrieb von Dampfturbinen bei geringem Temperaturgefälle zwischen Wärmequelle und -senke mit organischen Flüssigkeiten mit einer niedrigen Verdampfungstemperatur an Stelle von Wasser.

4.4.1

Wahrscheinliche Sektorenkopplungsinteraktionen

Die größten Potenziale für eine Abwärmenutzung liegen in der direkten Wärmenutzung. Die „Sektorenkopplung“ erfolgt in diesem Fall nicht zwischen Wärme und Strom sondern zwischen den Endenergiesektoren Industrie und Haushalte (oder GHD). Die wesentliche Einschränkung liegt hierbei in der „Wärmelogistik“ also der zeitlichen und räumlichen Harmonisierung von Wärmeangebot und –bedarf. Für die Einbindung von Abwärmepotenzialen in Nah- und Fernwärmenetze bestehen zusätzliche Hemmnisse bei Fragen der Produktionssicherheit und der Ausgestaltung von Geschäftsmodellen.

Die Sektorenkopplung Wärme / Strom ist vor allem durch den verhältnismäßig geringen Wirkungsgrad der ORC-Technologie und die fehlenden finanziellen Anreize zur Stromerzeugung gehemmt. Der bisherige Einsatz beschränkt sich weitgehend auf industrielle Nischen mit optimalen Randbedingungen. Die Gesamtpotenziale der Stromerzeugung aus Abwärme werden von (Tänzer 2011) auf rund 36 TWh pro Jahr geschätzt, was jedoch das theoretische Potenzial ohne technische und wirtschaftliche Machbarkeiten darstellt.

4.4.2

Stand der Sektorenkopplung

ORC-Anlagen gibt es ab einer elektrischen Leistung von 300 kW_{el} (Arens 2009). In der Praxis wurden sie verschiedentlich mit Abwärmenutzung kombiniert, beispielsweise in einem Klinkerkühler der Firma Heidelberger Cement mit einer elektrischen Leistung von 1,1 MW (seit 1999 in Betrieb) oder der Gerresheimer Essen GmbH mit einer Abwärmenutzung aus zwei Schmelzöfen mit 500 kW (Steinmann 2007). Verschiedene Anlagen werden angeboten, beispielsweise von Turboden, Ormat, Maxxtec oder ElectraTherm. Die Abwärme der ORC-Turbine kann auch zur weiteren Wärmenutzung herangezogen werden, so dass sich eine Nutzungskaskade ergibt.

Als problematisch bei der Stromerzeugung erweisen sich die Wärmesenken. Erforderliche (Nass- und Trocken-)Kühltürme steigern die Investitionskosten und können auch genehmigungsrechtliche Fragen aufwerfen. Die Wirtschaftlichkeit wird maßgeblich von der „Qualität“ der Wärme (Temperaturniveau, sensibel/latent), den Wärmesenken, den Abwärmemengen und den Betriebsstunden determiniert (Rohloff 2010). Andere Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme, die sich derzeit in Entwicklung befinden, sind beispielsweise Stirlingmotoren, die einen Generator treiben, oder Thermoelektrik, die auf dem Seebeck-Effekt beruht. Dieser ermöglicht einen Stromfluss in zwei verschiedenen

Metalleitern, deren Verbindungsstellen zwei unterschiedliche Temperaturen aufweisen. Derzeit sucht die Forschung noch nach geeigneten Metallen und Bauformen. Diese Technologien müssen aber auf ihre Einsatzmöglichkeiten vor allem hinsichtlich der sinnvoll erreichbaren Leistungsgrößen geprüft werden. (Pehnt et al. 2010)

4.4.3

Barrieren

Die Barrieren für eine weitreichende Sektorenkopplung im Bereich Wärme-Strom erstrecken sich auf eine große Bandbreite an technischen, wirtschaftlichen und regulatorischen Hemmnissen. Diese werden umfänglich in Kapitel vier erläutert. In Bezug auf die Interaktion Wärme / Strom sind dies insbesondere:

- Fehlende Informationen zu Abwärmepotenzialen bei den Betrieben und technische Restriktionen der Nutzung
- Fehlende finanzielle Anreize für wirtschaftliche Rahmenbedingen der Betriebe (ROI) für langfristige Investitionen
- Fehlende Selbstverpflichtung der Industrie zur Energieeinsparung und Energieeffizienz
- Fehlende Rahmenbedingungen für Abwärme-Strom z.B. in KWKG, EnEG, EWärmeGG, EEG.

4.5

Interaktionsanalyse Strom/Verkehr

Um Synergien bei der Energieerzeugung, der Speicherung und Nutzung der Energie zu optimieren, müssen im Sinne einer möglichst kostenminimalen und ressourceneffizienten Erreichung der Klimaziele alle Sektoren gemeinsam betrachtet werden. Der Verkehrssektor umfasst neben dem Bereich des Motorisierten Individualverkehrs (MIV) und des Güterverkehrs auch den straßen- und schienengebundenen Öffentlichen Verkehr sowie den Schiffs- und Flugverkehr. Der gesamte Verkehrssektor stellt für die Versorgung mit Erneuerbaren Energien eine große Herausforderung dar. Im Rahmen dieser Studie werden nur der Bereich MIV und Güterverkehr exemplarisch und beispielhaft herangezogen. Der Verkehrssektor kann grundsätzlich einen wesentlichen Beitrag zur Integration des fluktuierenden Erneuerbaren Energien-Stromes leisten, benötigt aber als neuer Verbraucher erneuerbarer Energien auch zusätzlich für den Verkehr gebaute Erneuerbaren-Energien-Erzeuger.

Dem Eigenverbrauch in dezentralen Strukturen im Gebäudebereich kommt eine besondere Bedeutung zu. Sie sind gleichzeitig Energieproduzent

(PV-Anlage), Verbraucher und Teil der neuen Mobilitätsinfrastruktur. Die Interaktionen sind dabei nicht auf den Mobilitätsbereich beschränkt, sondern auf den verschiedenen Sektoren verteilt. Somit besteht eine große Bedeutung für alle dezentralen Sektorenkopplungssysteme (z.B. Power2Heat) im Gebäudebereich. Dezentrale Energieproduktion kann dazu beitragen, Elektrizität für das Laden von Elektrofahrzeugen im Gebäude oder in der nahen Umgebung bereitzustellen.

4.5.1

Wahrscheinliche Sektorenkopplungsinteraktionen

Die zentralen Sektorenkoppler zwischen dem Strom und dem Mobilitätsbereich stellen das E-Fahrzeug im Bereich des Individualverkehrs sowie der Oberleitungs-Lkw im Bereich des Güterverkehrs dar. Um den Verkehrssektor nachhaltig zu dekarbonisieren, müssen die Technologien rasch in die Praxisanwendung geführt werden und von Anfang an im Sinne der Systemflexibilisierung ausgebaut werden. Die Studie (Gerhardt et al. 2015) beleuchtet die aktuellen Technologieoptionen im Zusammenspiel des Gesamtsystems: „Werden die Möglichkeiten der Flexibilisierung der Nachfrage nicht genutzt, verursachen Elektroautos eine Lastspitze in den frühen Abendstunden, die sich mit der Lastspitze in den Haushalten deckt und können auf der anderen Seite die tagsüber vorhandene Spitze im Angebot nicht nutzen. Für eine erfolgreiche Flexibilisierung der Stromnachfrage und Integration des fluktuierenden Erneuerbaren-Energien-Stromes bedarf es dabei zum einen der infrastrukturellen Voraussetzungen, zum anderen ein funktionierendes System des Lastmanagements.

Zur Integration der Tagesspitze im Angebot sind die wesentlichen Voraussetzungen in der Infrastruktur öffentliche bzw. semi-öffentliche Ladepunkte, die es erlauben, Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) und Plug-In-Hybridfahrzeuge (PHEV) während Nutzungspausen tagsüber zu laden. Ein wesentlicher Anwendungsfall ist dabei der Berufspendler, der sein Fahrzeug auf dem Firmenparkplatz an das Netz anschließen kann. Neben der Infrastruktur ist es wesentlich, dass der Nutzer das Lastmanagement in seiner Betriebsweise und Zielstellung versteht und auch akzeptiert: Voraussetzung hierfür dürften zum einen finanzielle Anreize sein und zum anderen eine Technik, die den Ladevorgang im Hintergrund zuverlässig optimiert, so dass keine oder nur geringfügige Nutzungseinschränkungen auftreten.

Insbesondere im Straßengüterverkehr sind Aussagen zu künftigen Antriebskonzepten zum jetzigen Zeitpunkt mit hohen Unsicherheiten behaftet. Dabei sind bei den Fernverkehrs-Lkw die wirtschaftlichen Herausforderungen der Energiebereitstellung beim Einsatz von Wasserstoff oder von Power2X-Kraftstoffen mit den strukturellen Herausforderungen

der Einführung des Oberleitungs-Lkw abzuwägen. Einerseits ist es dabei notwendig, technologische Pfade rechtzeitig anzustoßen, um bis 2050 eine entsprechende Marktdurchdringung zu erreichen, andererseits kann eine verfrühte Einschränkung der Optionen zu deutlichen Mehrkosten führen.

4.5.2

Stand der Sektorenkopplung

Am 1. Januar 2017 hatten nach Angaben des Kraftfahrbundesamtes von den 45,8 Millionen Personenkraftwagen (Pkw) rund 55.000 Fahrzeuge einen Elektro- oder Plug-In-Hybridantrieb. Darunter befanden sich 34.022 Pkw die ausschließlich elektrisch angetrieben wurden und 20.975 Plug-In-Hybrid-Pkw. Dies macht insgesamt 0,1 Prozent aller am 1. Januar 2017 zugelassener Pkw aus.

Das Bundesumweltministerium fördert aktuell den Bau einer sechs Kilometer langen Teststrecke für Oberleitungs-Lkw in Hessen.

4.5.3

Barrieren

Die Barrieren für eine weitreichende Sektorenkopplung im Bereich Strom – Mobilität liegen vor allem in dem aktuellen Nischendasein der Fahrzeuge. Die noch lückenhaften Ladeinfrastruktur stellt eine Herausforderung dar, ist aber in der aktuellen Phase mit geringer Marktdurchdringung als zusätzliche Maßnahme zu sehen, da die überwiegende Anzahl an Ladevorgängen nicht im öffentlichen Raum stattfindet. Für öffentlich zugängliche Ladeinfrastruktur ist die Wirtschaftlichkeit, trotz bestehender Förderung bislang häufig noch nicht gegeben. In Bezug auf die Sektorenkopplung besteht neben dem grundsätzlichen Ausbau der elektrischen Fahrzeugflotte in der Herausforderung, die Ladungen zunehmend möglichst systemdienlich zu organisieren, um das Ziel einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors zu erreichen. Die Hemmnisse werden umfänglich in Kapitel 5 erläutert. In Bezug auf die Interaktion Strom / Verkehr sind dies insbesondere:

- Fehlende Angebote an E-Fahrzeugen im mittleren und niedrigen Preissegment
- Nutzervorbehalte durch Reichweitenbeschränkung und nicht flächendeckend verfügbarer öffentlicher Ladeinfrastruktur
- Ladeinfrastruktur ist noch nicht Ausreichend auf systemdienliche Nutzung ausgerichtet
- Kostenvorteile der konventionellen Antriebe und Treibstoffe.

Interaktionsanalyse Verkehr/Strom

Hinter dem Sektorenkoppler Verkehr / Strom (Vehicle2Grid) steht die Idee, die dezentralen mobilen Batteriespeicher in Elektrofahrzeugen zeitweise zur Stabilisierung des Netzes zu nutzen (Reid und Julve 2016). Der direkte Systemnutzen durch den Bezug und die Rückspeisung von Elektrofahrzeugen je nach Bedarf des lokalen Netzes kann heute noch nicht genutzt werden, weil verfügbare Elektrofahrzeuge meist nicht auf die Rückspeisung ausgelegt sind. Mit einer höheren Anzahl an Fahrzeugen, die bidirektionales Laden zulassen, gewinnt dieses Thema an Bedeutung. Jedoch kann kurzfristiger ein Systemnutzen erschlossen werden, wenn Ladevorgänge systemdienlich gesteuert ablaufen (z.B. durch zeitliche Verlagerung). Hinsichtlich der Entstehung von Geschäftsmodellen in diesem Bereich sollten die Ladevorgänge auch gepoolt gesteuert werden können und die Teilnahme von Ladeinfrastruktur und Elektrofahrzeugen an bestehenden und zukünftigen Flexibilitätsmärkten sollte frühzeitig ermöglicht werden. Darüber hinaus kann die (indirekte) Kopplung der Sektoren auch durch die Nutzung von Strom und der Erzeugung von Wasserstoff- oder Methangas hergestellt werden.

4.6.1

Wahrscheinliche Sektorenkopplungsinteraktionen

Die Frage in welchem Umfang E-Fahrzeuge zu Netzdienstleistungen genutzt werden können wurde im Rahmen eines breit angelegten Feldversuchs der enercity Contracting zusammen mit dem Institut für elektrische Energiesysteme der Leibniz Universität Hannover und dem Institut für Transportation Design in Braunschweig behandelt (enercity Contracting GmbH, 2016). Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass aus technischer Sicht die Möglichkeit der Einbindung der Elektrofahrzeuge in den Regelenenergiemarkt durch die Simulation mit Testabrufen aus dem virtuellen Kraftwerk erfolgreich gezeigt werden konnte. Jedoch bestehen für die praktische Umsetzung noch Hemmnisse und Regelungsbedarf insbesondere bei den Geschäftsmodellen: „Nicht alle denkbaren Geschäftsmodelle, die als Zielgruppe Elektrofahrzeugbesitzer haben, sind heute schon umsetzbar. Änderungen bedarf es insbesondere bei der Bilanzierung von Haushaltskunden, um das gesteuerte Laden auch wirtschaftlich und bilanziell nutzen zu können, und bei den Möglichkeiten, Elektrofahrzeuge für den Regelenenergiemarkt zu präqualifizieren, damit eine Teilnahme am Regelenenergiemarkt möglich wird. Eine Flexibilisierung der Abgaben auf die Stromlieferungen würde flexible Lademodelle noch wirtschaftlicher machen. Die Wirtschaftlichkeit von Rückspeisemodellen hängt wesentlich davon ab, ob für rückgespeisten Strom die Abgaben zukünftig entfallen werden (enercity Contracting GmbH, 2016).

4.6.2

Stand der Sektorenkopplung

Die Ansätze befinden sich aktuell noch in der Test- und Pilotphase.

4.6.3

Barrieren

Bezüglich der Verknüpfung von Ladevorgängen mit Marktsignalen aus dem Stromsektor besteht deutlicher Verbesserungsbedarf. Zwar sind z.B. variable Stromtarife für den Bezug von Fahrstrom rechtlich grundsätzlich möglich, aber bei der praktischen Umsetzung bestehen heute erhebliche Hürden, z.B. bezüglich der Abrechnung von Energiemengen. Elektrofahrzeuge gelten nach §14a EnWG als steuerbare Verbrauchseinrichtungen im Niederspannungsnetz und könnten ein reduziertes Netzentgelt geltend machen. Dem Durchsetzen dieses Rechts stehen in der Praxis noch fehlende Möglichkeiten hinsichtlich der Steuerung von Verbrauchern im Niederspannungsnetz und bei der Einbindung in eine digitalisierte Energiewirtschaft entgegen, die beim Ausgestalten einer Flexibilitätsverordnung gelöst werden soll. Neben den technischen Herausforderungen besteht bei den „Vehicle2Grid“ Lösungen eine wesentliche Herausforderung in der Nutzerakzeptanz. Da der Fahrzeugbesitzer temporär dem Netzbetreiber Zugriff auf die Steuerung seines Fahrzeuges und der Lade- und Entladevorgänge einräumen muss, sind insbesondere Fragen zu Geschäftsmodellen und Haftung signifikante Barrieren für eine breite Anwendung.

4.7

Interaktionsanalyse Strom/Industrie (stoffl. Nutzung)

4.7.1

Wahrscheinliche Sektorenkopplungsinteraktionen

Per Elektrolyse und Synthesen erzeugter Wasserstoff oder Methan kann in das vorhandene Gasnetz eingespeist werden. Außerdem können vorhandene Kavernen- und Porenspeicher des Gasnetzes genutzt werden. Es ist also auf der Speicher- und Verteilebene bereits eine funktionierende Infrastruktur vorhanden.

Power2X bietet zudem, neben der Elektrifizierung die Möglichkeit, auch den Verkehrssektor und die Industrie stärker aus erneuerbaren Quellen zu versorgen und gleichzeitig hohe Energiedichten bereitzustellen.

4.7.1.1

Methanisierung

Unter der Power2Gas-Technologie versteht man die Umwandlung von Strom aus volatilen Erneuerbaren Energien wie Windkraft oder Photovoltaik via Elektrolyse in Wasserstoff¹. Ziel ist die Einspeisung des Wasserstoffs in das bestehende Erdgasnetz, wodurch die leistungsfähige Erdgasinfrastruktur für den Transport und die Speicherung von elektrischer Energie erschlossen wird. Der Wasserstoffanteil im Erdgasnetz ist, bedingt durch sensible Verbraucher und Infrastruktureinheiten, mit lokalen Unterschieden meist noch auf bis zu 10 %_{Vol} (Volumenprozent) beschränkt (Dörr et al. 2016). Sollen größere Energiemengen ins Erdgasnetz eingespeist werden, ist eine Umwandlung des Elektrolysewasserstoffs mit Kohlendioxid zu Methan unumgänglich. Methan ist unbegrenzt in das Erdgasnetz einspeisbar. Es gibt bereits einige Demonstrationsanlagen zur Methanisierung von Kohlendioxid, allerdings sind die verwendeten Verfahren derzeit noch relativ teuer, hochkomplex und anfällig gegenüber Verunreinigungen in den verwendeten Gasströmen.

Die Power2Gas-Technologie (Wasserelektrolyse) ist für den Einsatz im Energiebereich eine junge Technologie, was auch bedingt, dass die Kosten derzeit relativ hoch sind. Neue Verfahren und Effizienzfortschritte werden sie aber absehbar deutlich senken. Der Technologie kommt bei der Umsetzung der Energiewende eine Schlüsselrolle zu bei der Integration der Erneuerbaren Energien, der Flexibilisierung des Energiesystems sowie der Kopplung aller Sektoren. Insbesondere die kostengünstige Stromerzeugung in wind- und solarreichen Gebieten der Erde² kann der Elektrolýsetechnologie zu zusätzlicher Bedeutung verhelfen und die Verschiffung von grünen Kraftstoffen ermöglichen.

4.7.1.2

Methanolsynthese

Methanol ist einer der wichtigsten chemischen Grundstoffe. Es soll hier beispielhaft für eine Reihe von chemischen Grundstoffen stehen, die auf Basis von erneuerbarem Wasserstoff / Methan für eine Dekarbonisierung in Frage kommen (wie z.B. Ethen (Äthylen) oder Ammoniak). Es kann als Zusatz oder direkt als Treibstoff verwendet oder in Brennstoffzellen

¹ Prozessbeschreibungen aus: DBI: POWER-TO-CHEMICALS Chemische Grundstoffe aus CO₂ und Erneuerbarer Energie

² Derzeitig niedrigster Wert ist 0,0157 €/kWh ausgeschrieben in Saudi-Arabien (Bellini 2017)

eingesetzt werden. Aus diesen Gründen wird Methanol als die Basischemikalie für eine nachhaltige Energie- und Stoffwirtschaft angesehen. Die Herstellung von Methanol erfolgt in einem weit ausgereiften Verfahren bevorzugt aus erdgas- oder kohlestämmigen Synthesegas. Zukünftig ist es denkbar, aus Kohlendioxid und per Elektrolyse aus erneuerbarem Strom erzeugtem Wasserstoff Methanol zu produzieren.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, Biogas durch weitere Aufbereitung für chemische Anwendungen nutzbar zu machen und auf fossiler Basis hergestellte Grundstoffe zu ersetzen.

4.7.1.3

Grünes Synthesegas

Unter Synthesegas wird eine Mischung aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff verstanden, die für vielfältige chemische Synthesen als Ausgangsstoff dient. In der industriellen Praxis wird dieses Synthesegas aus Erdgas, Schweröl oder Kohle über diverse Verfahren wie z. B. der Dampfreformierung oder der Partiellen Oxidation gewonnen. Da fossile Ressourcen endlich sind und ein Anstieg der Preise für Erdöl und Erdgas in den nächsten Jahren zu erwarten ist, beschäftigen wir uns mit der Erzeugung von so genanntem „grünen Synthesegas“ durch trockene Reformierung von Biogas oder die reverse Wassergas-Shiftreaktion (RWGS) von Kohlendioxid und Elektrolysewasserstoff.

4.7.1.4

Direkte DME-Synthese aus Biogas

Dimethylether (DME) besitzt ähnliche physikalische Eigenschaften wie Flüssiggas und wird deshalb als langfristige Alternative zu Autogas (Propan, Butan) angesehen. Im Gegensatz zu den C₃/C₄-Kohlenwasserstoffen lässt sich DME relativ leicht synthetisch herstellen. Nach dem Stand der Technik wird DME über die Dehydratisierung von Methanol erzeugt. Die DBI-Gruppe forscht an einem Verfahren zur einstufigen Synthese von DME aus biogasstämmigem Synthesegas unter milden Prozessbedingungen. Die Besonderheit des Verfahrens liegt in der Flexibilität hinsichtlich des Feeds. So soll dem Feed in Zeiten mit hohem Angebot an Erneuerbaren-Energien-Strom Elektrolysewasserstoff zugemischt werden. In diesem Fall würde als Nebenprodukt der Synthese Wasser gebildet und der Kohlenstoffnutzungsgrad maximiert werden.

4.7.2

Stand der Sektorenkopplung

Die Ansätze befinden sich aktuell noch in der Test- und Pilotphase. Einzelne Verfahren, wie die Herstellung von Synthesegas sind bereits in dezentralen Einheiten einsetzbar. Im Rahmen von Forschungsprojekten sowie einer kommerziellen Nutzung sind rund 30 Power2Gas-Elektrolyseure, teils mit angeschlossener Methanisierung, im Regeleinsatz. Darüber hinaus beschäftigt sich aktuell eine Vielzahl von großskaligen Forschungsprojekten mit der Weiterentwicklung von Verfahren und Technologien, so z.B. das Kopernikus Projekt P2X¹.

4.7.3

Barrieren

Aktuell wird die zukünftige Rolle von Power2Gas im Energiesystem noch recht kontrovers diskutiert. Dies geschieht insbesondere im Vergleich von Power2Gas-Kosten gegenüber den Kosten für den Netzausbau. Die Frage, ab wann und in welchem Umfang Power2Gas als langfristiger Energiespeicher im Energiesystem erforderlich wird, hängt von einer Reihe von Randbedingungen und ihrer Entwicklung ab. Power2Gas wird insbesondere in Verbindung mit dem Ausbau von Windenergie interessant, da hier ein angemessen großes Potenzial zur Nutzung von ‚Stromüberangeboten‘ gegeben wäre. Aus technischer Sicht ist die Windgas-Technologie bereits heute reif für die Markteinführung. Der klassische Speicherbetrieb für Power2Gas (Einspeichern bei niedrigen Strompreisen, Ausspeichern bei hohen Strompreisen) rechnet sich vor allem aufgrund der schlechten Bedingungen an den Strombörsen derzeit in der Regel noch nicht. Hier kommt die aktuelle Abgabenstruktur als entscheidende Barriere ins Spiel, so dass allenfalls im Bereich der Regel- und Ausgleichsmärkte, in der Mobilität sowie auf dem Wärmemarkt Nischenangebote möglich sind. Dies bedeutet, dass aufgrund der aktuellen Rahmenbedingungen die Technologieentwicklung und Markteinführung des Sektorenkopplers Power2Gas nur unter erschwerten Bedingungen oder überhaupt nicht stattfinden kann. Bei einem weiteren Voranschreiten des Ausbaus Erneuerbarer Energien steht darum möglicherweise die Speichertechnologie Power2Gas nicht rechtzeitig und nicht in ausreichendem Umfang zur Verfügung.

¹ <https://www.kopernikus-projekte.de/projekte/power-to-x>

In diesem Kapitel werden die Barrieren für die Sektorenkopplungstechnologien dargestellt. Diese werden aufbauend auf der Charakteristik der Barriere benannt, z.B. „keine Anreize zur Flexibilisierung“ anstatt die „Barriere Netzentgelte“. Die Übersicht baut auf den erfassten Barrieren der Interaktionsanalyse des vorherigen Kapitels auf.

5.1

Rechtliche Barrieren

5.1.1

Fehlende Anreize durch Netzentgelte

Die Verordnung über die Entgelte für den Zugang zu Elektrizitätsversorgungsnetzen (Stromnetzentgeltverordnung - StromNEV) regelt die Bedingungen und Kosten des Zugangs zum öffentlichen Elektrizitätsnetz. Die teilweise Befreiung von den Netzentgelten ist möglich nach §19 Abs. 2 StromNEV, auch atypische Netznutzung genannt. Die Regelung sieht die Vereinbarung von individuellen Netzentgelten zwischen dem Netzbetreiber und dem Verbraucher vor, wenn der Verbraucher einen signifikanten Anteil an der Netzlast im angeschlossenen Netz hat oder der Stromverbrauch jährlich 10 GWh überschreitet. Die Regelung sieht eine Staffelung vor, welche eine Befreiung von bis 80% der veröffentlichten Netzentgelte vorsieht, wenn der Stromverbrauch am Anschluss mindestens 7000 Vollbenutzungsstunden vorweisen kann. Die Befreiung erhöht sich auf 85% und 90% bei 7500 und 8000 Vollbenutzungsstunden.

Diese Regelung fördert somit den möglichst gleichmäßigen Verbrauch von Elektrizität über das Jahr hinweg. Es war die Intention damit die Auslastung thermischer Kraftwerke möglichst gleichmäßig zu gestalten. Ein Energiesystem mit Erneuerbarer Energie als Führungsgröße hingegen hat zeitlich starke Schwankungen im Angebot des Stroms und erfordert daher Flexibilität. Im bisherigen System haben Industriebetriebe aufbauend auf den Netzentgelten keinen Anreiz dem System Flexibilität anzubieten, da ansonsten die Privilegierung des Erlasses der Netzentgelte entfallen könnte.

Die Netzentgelte lassen eine Anreizwirkung auch in anderen Bereichen vermissen. Wird die bezogene Leistung kurzfristig erhöht, um überangebotenen Strom aus Erneuerbaren Energie zu nutzen, erhöht dies für den Netznutzer auch die Zahlung für den Leistungspreis, womit mögliche Erlöse durch günstigen Strombezug überkompensiert werden können. Es werden keine Anreize gesetzt, die Lastspitzen zur richtigen Zeit

am richtigen Ort zu verhindern und die systemdienliche Stromnutzung anzuregen.

Im Bereich der industriellen Eigenproduktion von Strom und Wärme verhindern die Privilegien zur Befreiung der Netzentgelte für Industrieabnehmer, dass Strom aus dem Netz bezogen wird. Somit wird ein fossiler Mindesterzeugungssockel geschaffen.

5.1.2

Anreizregulierung

Die Anreizregulierungsverordnung (ARegV) reguliert das Verhalten der Netzbetreiber. Ziel der Verordnung ist es Effizienz und Wettbewerb zu fördern. Die verschiedenen Netzbetreiber werden dabei in Konkurrenz gesetzt. Daraus ergibt sich eine Erlösobergrenze für den Betrieb des Netzes. Dabei trägt die Verordnung den Anforderungen der Versorgungssicherheit Rechnung, indem notwendige Investitionen eine Sonderregelung erhalten haben, welche nicht dem Benchmarking der Netzbetreiber unterliegt. Die ARegV erlaubt in diesem Zusammenhang allerdings die Investitionen in Hardware, jedoch nicht die Umsetzung in gleichwertigen operativen Lösungen. Eine Anpassung der ARegV die in einem begrenzten Umfang die Nutzung von Energiespeichern durch Netzbetreiber zuließe (oder die Nutzung der Speicher Dritter), könnte innovative Sektorenkopplungsanlagen nutzen um die Aufgaben der Netzbetreiber zu erfüllen. Die Interaktion der Netzbetreiber mit Dritten zur Erhaltung der Versorgungssicherheit kann kostenmäßig nicht durch den Netzbetreiber geltend gemacht werden. Der Stand der Digitalisierung einiger der Verteilnetzbetreiber verhindert darüber hinaus eine effektive Einbindung räumlich verteilter Speicher. Die Systemverantwortung kann daher nicht kostenoptimal wahrgenommen werden und wird in Form höherer Netzentgelte an die Netznutzer gewälzt.

5.1.3

Fehlende Regelung Redispatch

Die Regularien zur Bewirtschaftung der Übertragungs- und Verteilnetze vernachlässigen die physikalischen Rahmenbedingungen der verfügbaren Übertragungskapazität. Insbesondere die Bewirtschaftung Deutschlands als eine gemeinsame Preiszone führt wiederholt zu Netzenspässen zwischen den windstarken Regionen im Norden und Osten Deutschlands und den Verbrauchszentren im Süden und Westen. Die bestehenden Übertragungsleitungen sind häufig nicht ausreichend, um die Elektrizität vom Ort der Erzeugung zum Ort des Verbrauchs zu transportieren. Die resultierenden Netzenspässe gefährden den sicheren Betrieb des Netzes und müssen durch die Netzbetreiber behoben werden.

Da diese Eingriffe nur teilweise vorgeplant werden können und ein marktlicher Ausgleich häufig nicht mehr möglich ist, werden Netzengpässe durch kurzfristige Notmaßnahmen ausgeglichen, welche nach §13 EnWG geregelt sind. Dies beinhaltet üblicherweise das Herunterfahren von Windenergie- und Solaranlagen (Einspeisemanagement, §13 Abs. 2 EnWG) und das Hochfahren von thermischen Kraftwerken. Die Netzbetreiber haben eine gewisse Routine beim Einsatz der Maßnahmen entwickelt. Für das Hochfahren wird häufig immer wieder auf die gleichen Kraftwerke zurückgegriffen. Die Kraftwerke werden anhand der angefallenen Kosten des Eingriffs entschädigt. Es ist jedoch nicht gesichert, dass die durch die Kraftwerksbetreiber ausgewiesenen Kosten tatsächlich den entstandenen Kosten entsprechen. Diese Kosten sind nicht unerheblich (2014: 185,4 mio. €, 2015: 412 mio. €, 2016: 219 mio. €), mit grundsätzlich steigender Tendenz. Ebenfalls ist es unklar, inwiefern der erwartete Netzengpass (z.B. bei der Vorhersage von Starkwind) das Betriebsverhalten der Kraftwerke bereits in der Planung beeinflusst. Eine fehlende Regulierung zur Bewirtschaftung der Netzengpässe und intransparente Beschaffungsprozesse verhindern die Teilnahme von Sektorenkopplungstechnologien, welche potentiell genutzt werden könnten. Dies erstreckt sich auch auf die europäischen Betrieb des Netzes.

Die Regelung der zuschaltbaren Lasten nach §13 Abs. 6a EnWG ist grundsätzlich geeignet um Sektorenkopplung zu ermöglichen, ist aber auf Netzausbaugelände (§36c Abs. 1 EEG) und KWK-Anlagen mit Power2Heat mit mehr als 0,5 MW beschränkt.

5.1.4

Kein Zugang zum Absatzmarkt

Sektorenkopplung wird verhindert durch fehlenden Zugang zu den Absatzmärkten und inflexible Regelungen. Die derzeitige Fassung des EEG sieht die Vermarktung der Erneuerbaren-Energien-Anlagen nach dem Marktprämienmodell vor. Alternativ können Erneuerbare-Energien-Anlagen auch außerhalb des EEG direkt vermarktet werden, erhalten aber im Gegenzug auch nicht die wirtschaftlichen Privilegien wie den garantierten Netzzugang und Marktprämienvergütung. Die Vermarktung nach Marktprämienmodell erfordert es, dass die gesamte erzeugte Menge nach diesem Vergütungsmodell eingespeist wird. Ein Wechsel zwischen dem Marktprämienmodell und der alternativen Direktvermarktung während des Förderzeitraums ist nicht vorgesehen. Dies soll steigende Kosten bei den Ausschreibungen und Mitnahmeeffekte verhindern, verhindert aber auch eine flexiblere Vermarktung, welche ansonsten abgeregelte Strommengen nutzen könnte. Die Nutzung von ansonsten abgeregeltem Strom ist insbesondere bei lokaler Nutzung von Solarstrom relevant, da hier eine unmittelbare Nähe von Erzeugung und Verbrauch hergestellt werden kann. Die derzeitige Regulierung verhindert die

intelligente Nutzung dieses Stroms zur lokalen Nutzung, z.B. für lokale Nahwärmekonzepte. Das Gebot der vollständigen Einspeisung im EEG wirkt somit als Sektorenkopplungsbarriere, da ansonsten abgeregelte Strommengen grundsätzlich in anderen Sektoren zum Einsatz kommen könnten.

5.1.5

Markteintrittsbarrieren

5.1.5.1

Großhandelsmärkte

Großhandelsmärkte stellen ein zentrales Element für den Handel von Energie dar und bieten durch Preise Informationen des Energiesystems ab. Zugang zum Markt ist grundsätzlich diskriminierungsfrei und transparent. Der Aufwand zur Zulassung zum Markt ist jedoch relativ hoch, weshalb hier eine (finanzielle) Markteintrittsbarriere für Sektorenkopplungstechnologien besteht. Darüber ist das derzeit gültige Design des Großhandelsmarkts nicht geeignet um regionale Restriktionen zu begegnen und kann daher nicht genutzt werden um netzdienliches Verhalten regional gezielt anzureizen.

5.1.5.2

Regelleistungsmärkte

Der Markt für Regelleistung (Frequenzhaltung) ist der einzige organisierte Markt für Systemdienstleistungen der deutschen Übertragungsnetzbetreiber mit standardisierten Marktzugangsbedingungen. Die jüngst beschlossenen Änderungen im Sekundärregelleistungs- (Bundesnetzagentur) und Minutenreservemarkt (Bundesnetzagentur 2017a) der Bundesnetzagentur haben die Markteintrittsbarrieren größtenteils beseitigt. Die Produktlänge von 4 Stunden verhindert u.U. die Teilnahme einiger Sektorenkopplungstechnologien, welche somit nicht zum Ausgleich kurzfristiger Leistungsdefizite oder -überschüsse im Netz zur Verfügung stehen. Durch das Pooling von Leistung ist die Nutzung dieser sektorenkoppelnden Flexibilität dennoch möglich.

Ein weiterer Aspekt ist die Abregelung von EE-Anlagen durch die Verteilnetzbetreiber aufgrund der Anwendung von §13 EnWG (EinsMan) welche zu Regelleistungsbereitstellung vorgesehen wurden. Dies erhöht das Risiko einer Nichterfüllung der kontrahierten Regelenergie, gefährdet die Systemsicherheit und pönalisiert die betroffenen Anlagen. Grund hierfür sind fehlende Prozesse seitens der Verteilnetzbetreiber für Anlagen, die für die Regelenergie bezuschlagt wurden, diese von der EinsMan-Regelung auszunehmen.

5.1.5.3 Weitere Systemdienstleistungen

Neben der Regelleistung werden weitere Systemdienstleistungen durch die Übertragungsnetzbetreiber auf bilateraler Basis beschafft. Diese relevanten Systemdienstleistungen für Sektorenkopplungstechnologien umfassen Schwarzstartfähigkeit, Spannungshaltung und Redispatch bei Netzengpässen. Die intransparenten Beschaffungsprozesse schließen Sektorenkopplungstechnologien aus oder verhindern einen effizienten Markteintritt, da der Bedarf nach den Systemdienstleistungen nicht kommuniziert werden kann. Des Weiteren verhindert es die derzeitige Regulierung, dass die untergeordneten Verteilnetzbetreiber eine aktivere Rolle spielen können, obwohl Netzengpässe auch im Verteilnetz auftreten. Verteilnetzbetreiber sind rechtlich nicht aufgefordert, ihre Netze aktiv zu bewirtschaften, weshalb der lokale Ausgleich durch sektorenkoppelnde Technologien nicht stattfindet. Die darüber hinaus schleppende Digitalisierung in dem Bereich benachteiligt kleinskalige Nutzer des Energiesystems.

5.1.6

Fehlender regulatorischer Rahmen für Speicher

Die Einführung von dezentralen Speichern (siehe auch (KfW 2017)) wurde nicht durch die Einführung neuer regulatorischer Rahmenbedingungen begleitet. Aus Sicht des Stromnetzes ist das „Einspeichern“ der Letztverbrauch von elektrischer Energie. Das „Ausspeichern“ wird regulatorisch als Erzeugung elektrischer Energie angesehen. Problematisch ist dabei, dass die additiven Abgaben / Umlagen / Steuern sowohl beim Einspeichern als auch beim Verbrauch der ausgespeicherten Energie erhoben werden. Gespeicherte Energie wird somit doppelt belastet. Der Wert der Speicherung für das Energiesystem wird regulatorisch nicht erfasst.

5.2

Finanzielle Barrieren

5.2.1

Fehlende Wirtschaftlichkeit durch Abgaben / Umlagen / Steuern

Die Kopplung von Sektoren führt zur Umwandlung von einer Energieform in eine andere, oder in ein Produkt. Die erzielbaren Verkaufspreise werden häufig durch Marktmechanismen bestimmt. Konventionelle CO₂-behaftete Technologien sind dabei häufig die finanziell attraktivere Alternative für den Nutzer. Die Marktpreise ziehen die Qualität der geringen CO₂-Intensität meistens gar nicht oder nur begrenzt ab. Sektorengekoppelte

CO₂-arme Produkte stehen somit in Konkurrenz zu Produkten, welche nicht alle externen Kosten internalisiert hat.

Gemeinsame Barrieren der
Sektorenkopplung

Zur Veranschaulichung wird in diesem Falle die Bereitstellung von Wärme genauer betrachtet. Wärme kann konventionell über die Verbrennung von fossilen Kraftstoffen erzeugt werden. Die sektorenggekoppelte Alternative dazu ist die Nutzung einer Power2Heat-Anlage (direkt oder Wärmepumpe). Die aus der Power2Heat-Anlage gewonnene Wärme steht in direkter Konkurrenz zu der konventionellen Technologie, wird jedoch mit einer unterschiedlichen Höhe von Abgaben / Umlagen / Steuern belastet. Da Elektrizität in Deutschland üblicherweise stärker mit diesen Preiskomponenten belastet wird als fossile Kraftstoffe, hat die Sektorenkopplungstechnologie einen Wettbewerbsnachteil, welcher über die inhärenten Umwandlungsverluste hinausgeht.

5.2.2

Wert sektorenggekoppelter Energie kann nicht kommuniziert werden

Die Nutzung von Energie über Sektorenkopplung soll zu einer Dekarbonisierung der Energiesysteme insgesamt führen. Des Weiteren ist die Kopplung zweier Sektoren häufig auch mit dem Austausch von Flexibilität zwischen den Sektoren verbunden. Beide Aspekte werden derzeit nicht über die Sektorengrenzen hinweg kommuniziert. Gibt es eine Nachfrage in einem Sektor nach Flexibilität, wird dieser durch Regularien so verändert, dass dieser nur innerhalb des Sektors erfüllt werden kann. Additive Preiskomponenten beim Strompreis wirken dabei als Sektorensseparator. Die Nutzung von elektrischer Energie zur Bereitstellung von Wärme, Mobilität oder chemischen Produkten wird mit den üblichen additiven Preiskomponenten belegt, obwohl ein Transfer von Flexibilität in den Stromsektor geschieht.

5.2.3

Kein Absatzmarkt

Sektorenkopplungstechnologien bilden ihre Wertschöpfung über die involvierten Sektoren hinweg ab. Das bedeutet, dass die Rahmenbedingungen in beiden Sektoren passend sein müssen. Ein Aspekt dieser Rahmenbedingungen ist die fundamentale Nachfrage nach den bereitgestellten Gütern und Dienstleistungen einer Sektorenkopplungstechnologie. Ist die Nachfrage auf einer Seite nicht vorhanden, bedarf es großen Aufwands um diese Barriere zu überwinden. Als Beispiel kann die Kopplung der Sektoren Strom und Wärme genutzt werden. Die Power2Gas-Technologie ist in der Lage Wasserstoff und/oder Methan herzustellen, was wiederum zur bedarfsgerechten Wärmebereitstellung genutzt werden kann. Eine Grundvoraussetzung für die Nutzung ist die

Existenz von gasbasierten Heizungen. Sollte die Wärmeversorgung allerdings großflächig durch Power2Heat-Anlagen direkt abgebildet sein, wird das erzeugte Gas keinen Abnehmer finden, da ein Absatzmarkt fehlt.

5.2.4

Transaktionskosten

Die zunehmende Dezentralisierung des Energiesystems benachteiligt kleinere Leistungsklassen bei der Durchführung von Interaktionen. Beispielsweise wird der Zugang zum Strommarkt EPEX SPOT pauschal berechnet, die gehandelten Mengen proportional. Diese bedeutet, dass kleine dezentrale Einheiten des Energiesystems überproportional stark belastet werden. Dies erhöht die Transaktionskosten. Ein weiterer Aspekt ist der personell relativ hohe Aufwand (z.B. Bilanzkreismanager, Trader, usw.), welcher durch Transaktionen im Energiesystem entsteht. Kleinskalige Energieerzeuger und Energieverbraucher werden daher mit Transaktionskosten belegt, welche den zusätzlichen Wert des bereitgestellten Gutes oder Dienstleistung übersteigen und daher den Einsatz der Sektorenkopplungstechnologie verhindert. Dies ist besonders sichtbar im Bereich nachfrageseitiger Anpassung des Stromverbrauchs im Haushaltsbereich, da Skalierungseffekte dazu führen, dass der größte Anbieter immer einen Kostenvorteil gegenüber seinen Konkurrenten hat. Langfristig gefährdet dies die Akteursvielfalt und verhindert Innovationen.

5.3

Technische Barrieren

5.3.1

Geringe Marktreife

Fehlende Marktreife oder das frühe Entwicklungsstadium einer Sektorenkopplungstechnologie verhindert deren Einsatz. Verschiedene Technologien haben bereits das Grundlagenstadium durch Forschungsförderung verlassen und warten auf den großflächigen Einsatz. Aufgrund der geringen Nutzung der Technologie, sind die Kosten und die Zuverlässigkeit noch nicht gleichwertig mit bereits erprobten, CO₂-intensiven Alternativen. Insbesondere fehlende Stückzahlen stellen eine Barriere für die wirtschaftliche Nutzung der Sektorenkopplungstechnologien dar.

Lernkurven von Sektorenkopplungstechnologien müssen durchschritten werden, um eine wirtschaftlich attraktive Option darzustellen. Dies kann üblicherweise nur durch die Nutzung im großen Maßstab erreicht werden. Des Weiteren benötigen Technologien, welche das Pilotprojektstadium verlassen haben, noch weitere technische Entwicklung, was wiederum einen Einfluss auf die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Anlagen haben

kann. Diese „Kinderkrankheiten“ nehmen mit verbreiteter Nutzung der Technologie ab und tragen schlussendlich auch zur Kostenreduktion bei.

5.3.2

Unpassende Größenstaffelung

Ein weiterer Aspekt der geringen Nutzung in frühen Stadien einer Sektorenkopplungstechnologie ist die unpassende Größenstaffelung der Anlagen für die verschiedenen Anwendungsbereiche. Teile der Zulieferkette werden mit im Markt verfügbaren Komponenten bestückt, welche nicht auf die Anwendung hin optimiert wurden, sowohl technisch als auch wirtschaftlich. Beispielsweise haben frühe PV-Solaranlagen Silizium verwendet, welches für die Mikroelektronikindustrie hergestellt wurde. Die Reinheitsgrade waren somit höher als notwendig. Erst mit der Installation von ausreichend Solarpanelen wurde die Produktion von „Solar-Silizium“ für die Zulieferkette sinnvoll. Dadurch konnten weitere Kostensenkungspotenziale erschlossen werden. Der Markt für Gleichrichter, welche in der Wasserelektrolyse genutzt werden, ist mit verschiedenen typischen Größen und Leistungsklassen bestückt, welche für den jeweiligen Hauptabnehmer in dem Segment ausgelegt werden. Durch passende Komponenten könnte die Sektorenkopplungstechnologie Wasserelektrolyse verbesserte Effizienz und Kosten hervorbringen, als es derzeit der Fall ist.

5.3.3

Technische Engpässe

Technische Restriktionen verhindern die Interaktionen von Sektorenkopplungstechnologien zwischen ihren Quellen- und Zielmärkten. Dies kann der Fall sein für Sektorenkopplungstechnologien, welche netzgebunden sind. Interaktionen mit dem Stromnetz können durch Netzengpässe im Verteilnetz oder im Übertragungsnetz bedingt sein (z.B. (Agora Energiewende et al. 2017)). Bei der Einspeisung von Wasserstoffgas in das Gasnetz darf der Anteil von Wasserstoff einen Grenzwert nicht übersteigen. Sowohl Restriktionen im Gas und im Stromnetz sind lokal bedingt und können sich stark unterscheiden.

Eine weitere Barriere ist die fehlende Digitalisierung der Energieinfrastruktur, welche eine Interoperabilität von Technologien in den Sektoren verhindert. Dies betrifft im besonderen Maße die Sektorenkopplungstechnologien, da diese deutlichen Mehraufwand für die Integration in multiple Infrastrukturen betreiben müssen. Eine offen zugängliche, sichere und kompatible Kommunikationsinfrastruktur ist Grundvoraussetzung für den optimierten Einsatz von Sektorenkopplungstechnologien. Der derzeitige Einsatz proprietärer und sektorenspezifischer Technologien verhindert ein effektives Energiemanagement von Sektorenkopplungstechnologien.

Die in diesem Kapitel vorgestellten Maßnahmen basieren auf der Interaktionsanalyse in Kapitel 4 und daraus abgeleiteten Barrieren in Kapitel 5. Der Zweck der Maßnahmen ist es, die Sektorenkopplung der vorgestellten Sektorenkopplungspfade (Kapitel 4) zu ermöglichen, indem die Barrieren (Kapitel 5) verringert oder beseitigt werden. Jede Maßnahme wird bewertet hinsichtlich ihrer Wirkung und Markteingriffstiefe. Aufbauend auf dieser Bewertung werden alle Maßnahmen abschließend verglichen.

Die hier vorgestellten Maßnahmen stehen nicht in Konkurrenz zueinander, sondern werden parallel genutzt. Die durch die Maßnahmen geschaffenen Handlungsmöglichkeiten sollen die Sektorenkopplung insgesamt ermöglichen und werden daher nicht mit einer Menge (z.B. TWh/GW) quantifiziert. Das durch die Maßnahmen dargelegte Veränderungspotenzial ist in Summe groß. In der Praxis werden sich die Maßnahmen bewähren müssen, um ihre Wirkung zu quantifizieren. Dabei ist bis jetzt nicht absehbar, wie sich diese einzeln oder in Summe auf das Energiesystem auswirken. Dies bedeutet, dass die Umsetzung durch ein Monitoring begleitet werden sollte und Nachjustierungen gegebenenfalls notwendig sein könnten. Um eine zeitgerechte Implementierung für die Energiewende zu garantieren, ist es wichtig, dass die Maßnahmen zeitnah angestoßen werden, um einen möglichen Regulierungstau zu vermeiden.

Die Entscheidung, welche der Maßnahmen die wirksamsten sind, hängt stark von der Entwicklung des Energiesystems ab. Diese Abhängigkeit ist ebenso auf der Zeitskala vorhanden. Maßnahmen lassen sich in kurzfristig umsetzbare Maßnahme (< 1 Jahr) und mittel- bis langfristige Maßnahmen (Perspektive 2025) unterteilen.

Die Maßnahmenpakete sind technologieneutral konzipiert, es gibt keine implizite Rangfolge von Sektorenkopplungstechnologien, welche bevorzugt werden. Nichtsdestotrotz muss dem Entwicklungsstadium der jeweiligen Sektorenkopplungstechnologie Rechnung getragen werden. Technologien, welche zwar potentiell vielversprechend sind und noch großes Verbesserungspotenzial haben, müssen daher gefördert werden, ohne die Entwicklungsmöglichkeiten reifer Technologien zu behindern.

Im Anschluss an die Erläuterung der Maßnahmen werden diese hinsichtlich ihrer Wirkung und Markteingriffstiefe bewertet. Die Wirkung bewertet, welcher Anteil des Energiesystems betroffen ist, ob wenige oder viele Sektoren betroffen sind, inwiefern sie Aspekte Wirtschaftlichkeit und Flexibilität adressiert, und wie groß der (energetische) Anteil in den jeweiligen Sektoren ist. Die Markteingriffstiefe setzt sich mit den

Rahmenbedingungen auseinander welche geändert werden müssen und den Interessen der Akteure, welche davon betroffen sind. Beide Faktoren werden genutzt, um die Maßnahmen in nachfolgender X/Y-Matrix zu verorten.

Maßnahmen zur Förderung der
Sektorenkopplung

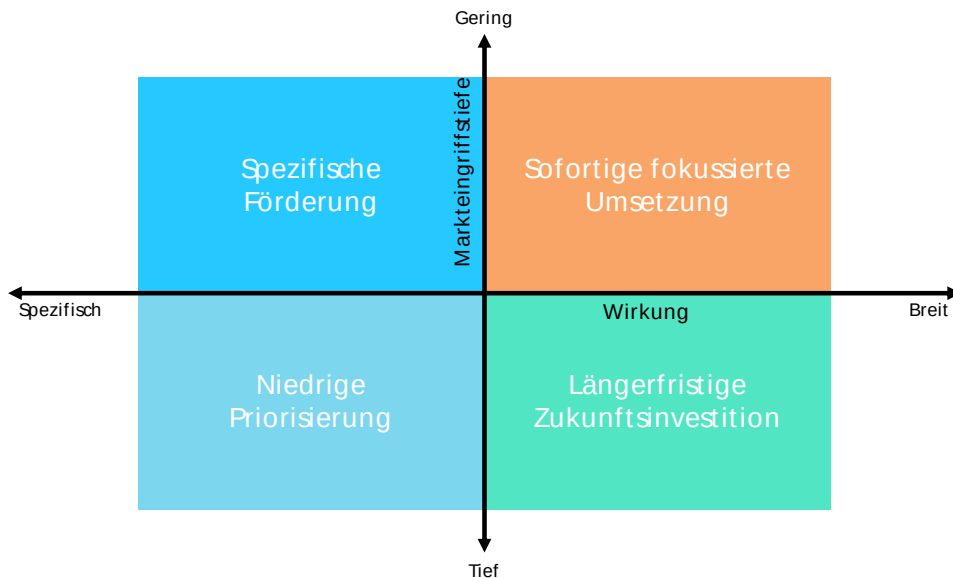


Abbildung 12: Unterteilung
der Maßnahmen in vier
Kategorien

Die Bewertung der Maßnahmen erlaubt die Kategorisierung in vier verschiedenen Gruppen, welche durch die oben dargestellten Quadranten verdeutlicht wird. Der obere linke Quadrant „Spezifische Förderung“ ist einfach umsetzbar, hat aber eine recht geringe Wirkung. Diese Maßnahmen können ohne großen Aufwand umgesetzt werden, fördern aber nur spezifische Sektorenkopplungstechnologien mit geringem Einfluss auf das Gesamtsystem. Der untere linke Quadrant „Niedrige Priorisierung“ enthält Maßnahmen, die eine geringe Wirkung haben und schwer zu realisieren sind. Diese Maßnahmen bieten sich nicht zur unmittelbaren Umsetzung an. Die Maßnahmen in diesem Quadranten können, beispielsweise durch technologischen Fortschritt, über die Zeit eine höhere Wirkung entfalten, oder einfacher umzusetzen sein, was sie dann in einen anderen Quadranten verschieben würde. Der untere rechte Quadrant „Längerfristige Zukunftsinvestitionen“ enthält Maßnahmen, welche eine große Wirkung entfalten können, jedoch schwieriger umzusetzen sind. Aufgrund ihrer großen Wirkung für die Sektorenkopplung ist es sinnvoll, hier zu investieren, damit diese schlussendlich einfacher umzusetzen sind und in den vierten Quadranten „Sofortige fokussierte Umsetzung“ rechts oben rutschen. Die Maßnahmen in diesem Quadranten haben einen großen Einfluss auf alle Sektoren und sind (relativ) einfach umzusetzen. Diese Maßnahme sollten kurzfristig und prioritär umgesetzt werden.

Jede Maßnahme kann mit vier verschiedenen Werten für die Wirkung und die Markteingriffstiefe dargestellt werden. Das heißt also, dass jede Maßnahme 16 verschiedene Positionen in der X/Y-Matrix einnehmen kann. Zusätzlich dazu werden für jede Maßnahme die Anzahl der adressierten Barrieren durch die Kreisgröße dargestellt. Die Darstellung ist nachfolgende beispielhaft dargestellt.

Maßnahmen zur Förderung der
Sektorenkopplung

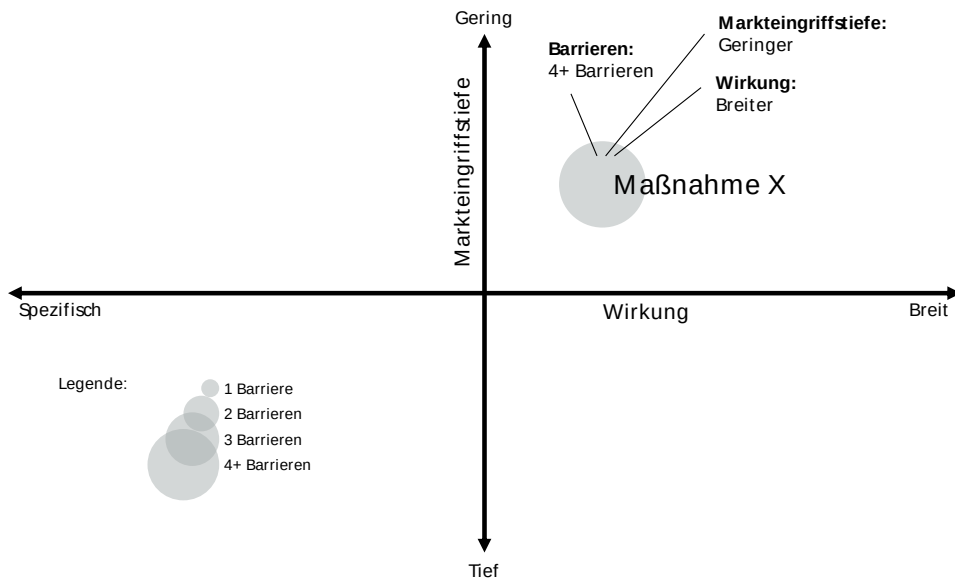


Abbildung 13:
Kategorisierung der
Maßnahmen in vier
Wirkungsklassen

Die Bewertung der Wirkung orientiert sich daran, wie viele Sektoren betroffen sind und wie groß der jeweilige Anteil in den betroffenen Sektoren ist. Die folgende Bewertungsskala kommt hierbei zur Anwendung:

Maßnahmen zur Förderung der
Sektorenkopplung

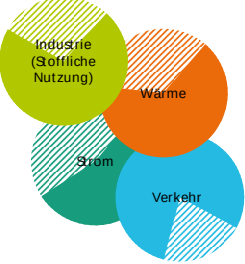
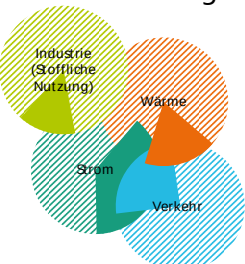
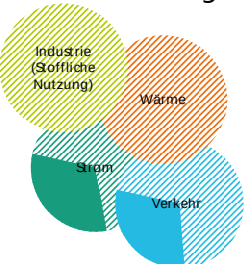
Wirkung	Beschreibung	Bewertung
Viele Sektoren & Sektorenanteil hoch 	Mehr als 2 Sektoren wurden gekoppelt (z.B. Strom/Wärme/Verkehr/Industrie (stoffl. Nutzung). Die Anteile in den Sektoren sind hoch (z.B. gesamter Straßenverkehr, Niedertemperaturwärme)	Sehr breit In der Bewertungsmatrix weit rechts
Wenige Sektoren & Sektorenanteil hoch 	Maximal 2 Sektoren wurden gekoppelt (z.B. Strom/Wärme). Die Anteile in den Sektoren sind hoch (z.B. gesamter Straßenverkehr, Niedertemperaturwärme)	Breiter In der Bewertungsmatrix rechts von der Mitte
Viele Sektoren & Sektorenanteil gering 	Mehr als 2 Sektoren wurden gekoppelt (z.B. Strom/Wärme/Verkehr/Industrie (stoffl. Nutzung). Die Anteile in den Sektoren sind gering (z.B. nur Güterverkehr auf der Schiene, Hochtemperaturwärmeanwendung)	Spezifischer In der Bewertungsmatrix links von der Mitte
Wenige Sektoren & Sektorenanteil gering 	Maximal 2 Sektoren wurden gekoppelt (z.B. Strom/Wärme). Die Anteile in den Sektoren sind gering (z.B. nur Güterverkehr auf der Schiene)	Sehr spezifisch In der Bewertungsmatrix weit links

Abbildung 14: Bewertung der Wirkung der Maßnahmen

Die Markteingriffstiefe wird aufbauend auf den Fakten beschrieben. Die Markteingriffstiefe setzt sich zusammen aus der Anzahl der zu ändernden Gesetzen und Verordnungen, der Anzahl der involvierten Stakeholder und der Barrieren aus Kapitel 5. Die folgende Bewertung kategorisiert die Maßnahmen in vier Kategorien

Maßnahmen zur Förderung der
Sektorenkopplung

Markteingriffstiefe	Beschreibung	Bewertung
Schwer umsetzbar (große Markteingriffstiefe), da weitreichende Folgen für regulatorischen Rahmen und Akteure	> 2 Gesetze/Verordnungen & (und) > 2 Stakeholder & (und) > 2 Barrieren	Sehr tief In der Bewertungsmatrix weit unten
Eher schwierig umsetzbar	> 2 Gesetze/Verordnungen & (und) > 2 Stakeholder V (oder) > 2 Barrieren	Tiefer In der Bewertungsmatrix unterhalb der Mitte
Eher einfach umsetzbar	≤ 2 Gesetze/Verordnungen & (und) ≤ 2 Stakeholder V (oder) ≤ als 2 Barrieren	Geringer In der Bewertungsmatrix oberhalb der Mitte
Gut umsetzbar (geringe Markteingriffstiefe), da geringer Änderungsbedarf im regulatorischen Rahmen und geringe Auswirkung auf Akteure	≤ 2 Gesetze/Verordnungen & (und) ≤ 2 Stakeholder & (und) ≤ als 2 Barrieren	Sehr gering In der Bewertungsmatrix weit oben

Abbildung 15: Bewertung der Markteingriffstiefe der Maßnahmen

6.1

Maßnahmenpaket – Abgaben / Umlagen / Steuern

Der Ausbau der Erneuerbaren Energie hat die Volatilität der Strompreise erhöht. Dies bedeutet, dass es eine größere Anzahl an Stunden im Jahr mit sehr niedrigen oder gar negativen Strompreisen an der Strombörse gibt. Diese niedrigen Preise sind das Preissignal für flexible Verbraucher, mehr Strom zu verbrauchen. Diese flexiblen Verbraucher sind oft auch

Sektorenkopplungstechnologien. Aufgrund der regulatorischen Rahmenbedingungen können die Preissignale im Markt nicht durch die Abnehmer genutzt werden. Dies ist mit den additiven Abgaben, Umlagen und Steuern auf den Strompreis zu begründen, welche einen Großteil des Strompreises der Endverbraucher ausmachen. Da diese Komponenten zu jeder Stunde gleich sind, bleibt der effektiv variable Teil des Strompreises relativ klein im Vergleich zur gesamten Höhe. Des Weiteren verhindern diese Komponenten, dass der Verbraucher günstigen Strom beziehen kann, auch wenn der Strompreis negativ ist.

Maßnahmen zur Förderung der Sektorenkopplung

Das bisherige System der Abgaben / Umlagen / Steuern verhindert nicht nur die Nutzung von Flexibilität, sondern kann auch keine Impulse für ökologischen, effizienten und systemdienlichen Stromverbrauch setzen. Sektorenkopplungstechnologien haben einen Wert, welcher derzeit nicht durch die regulatorischen Rahmenbedingungen anerkannt wird. Die nachfolgende Grafik veranschaulicht das Prinzip der Flexibilisierung (siehe auch (Jansen et al. 2015)).

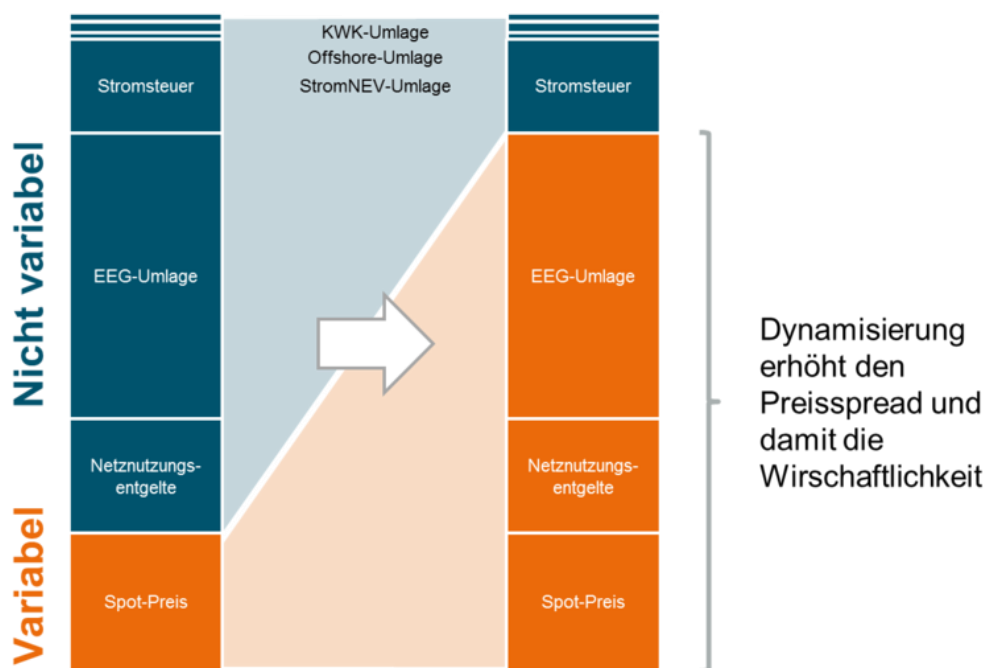


Abbildung 16: Prinzip der Flexibilisierung (Jansen et al. 2015)

6.1.1

Netzentgelte flexibilisieren

Die Netznutzungsentgelte sind ein großer Bestandteil der additiven Komponenten des Endkundenstrompreises, welche auf die Kosten für die verbrauchte Energie aufgeschlagen werden. Diese Kosten sind zu jedem Zeitpunkt identisch und zeitlich nicht variabel. Aus diesem Grund reflektieren die Netzentgelte nicht die Situation im Energiesystem und haben daher auch keine positive Steuerungswirkung für die

Sektorenkopplung. Eine Neugestaltung der Netzentgelte erlaubt eine Verbesserung der Anreizwirkung zur Flexibilisierung des Energieverbrauchs. Dies kommt flexiblen Sektorenkopplungstechnologien zugute, wie z.B. Power2Gas und Power2Heat.

Maßnahmen zur Förderung der Sektorenkopplung

Für Haushaltskunden sind die Netzentgelte mit bundesdurchschnittlich 6,71 ct/kWh neben der EEG-Umlage eine der höchsten additiven Komponenten auf den Strompreis. Für Gewerbe- und Industriekunden ist der Betrag zum Teil deutlich geringer, 5,85 ct/kWh für Gewerbekunden und 2,06 ct/kWh für Industriekunden (Bundesnetzagentur und Bundeskartellamt 2016). Die geringeren Netzentgelte haben zuletzt auch mit der Anschlussspannungsebene zu tun.

Historisch gesehen ist die Gestaltung der Netzentgelte auf die Anregung eines netzdienlichen Verhaltens der Nachfrager ausgelegt. Ein möglichst gleichmäßiger Verbrauch wird beispielsweise in der Regelung zur atypischen Netznutzung (§19 Abs. 2 StromNEV) angeregt. Dieses Verhalten kann als systemdienlich in einem Energiesystem angesehen werden, welches hauptsächlich durch konventionelle Erzeugung versorgt wird. Durch die Änderung der Erzeugungsstruktur ist systemdienliches Verhalten jedoch durch eine flexible Anpassung des Verbrauchs an das Energiesystem definiert. Damit sind die neuen Regelungen die logische Folgerung eines Energiesystems, das auf Erneuerbaren Energien aufbaut.

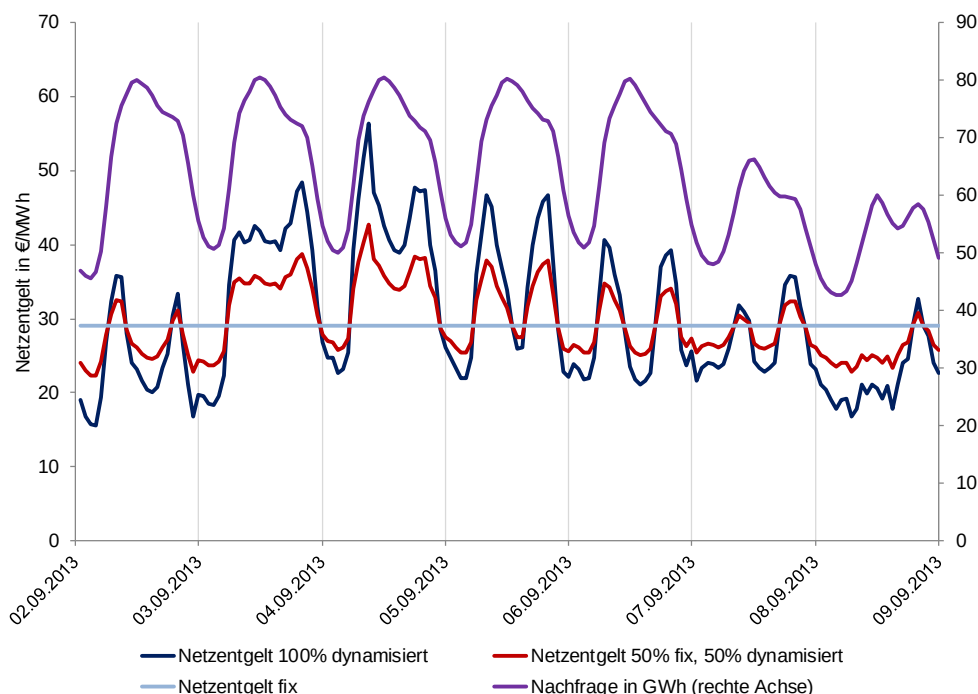


Abbildung 17: Dynamisierte Netzentgelte im Vergleich (Jansen et al. 2015)

Die Maßnahme sieht die Flexibilisierung der Netzentgelte anhand eines allgemein genutzten Indikators vor. In diesem Falle werden die Netzentgelte anhand des EPEX SPOT Strompreises flexibilisiert. Sind die Preise an der Strombörse hoch, sind auch die Netzentgelte höher und

umgekehrt. Zusätzlich zu der Kopplung des Multiplikators an den Spotpreis wird die Netzsituation durch eine temporäre Erhöhung des Multiplikators angepasst. Vor dem Netzengpass verbrauchter Strom wird dadurch zusätzlich vergünstigt, während verbrauchter Strom hinter dem Netzengpass temporär teurer wird. Es ist sinnvoll, die Netzentgelte für den vor dem Netzengpass verbrauchten Strom auf temporär null zu setzen.

Trotz des relativ einfachen Ansatzes ist die Gestaltung der Netzentgelte sehr komplex. Dies wird sich entsprechend auch in der tatsächlichen Ausgestaltung wiederfinden. Da die Netzentgelte die physikalische Situation im Netz widerspiegeln müssen, welche nicht zwangsläufig der Situation an der Strombörse entspricht, muss hier insbesondere die regionale Netzsituation berücksichtigt werden. Dies eröffnet bei der Dynamisierung verschiedene Ausgestaltungsoptionen und bedarf weiterer Diskussion. Die Details der Ausgestaltung wurden bereits in (Jansen et al. 2015) diskutiert. Werden weitere Strompreiskomponenten dynamisiert, muss bei der Ausgestaltung auf eine ganzheitliche Ausgestaltung der Signalrichtung geachtet werden, damit die z.B. dynamisierte EEG-Umlage nicht die entgegengesetzte Wirkung entfaltet.

Die Regelung soll auf alle Kunden angewandt werden, welche mit einer registrierenden Lastgangmessung oder Smart Metern ausgestattet sind und einen Verbrauch von über 6.000 bis 10.000 kWh/a haben. Kleinere Verbräuche haben die Option, sich für die variablen Entgelte zu entscheiden, werden aber nicht automatisch umgestellt. Bei der Umsetzung muss jedoch untersucht werden, ob die hier genannten flexible Netzentgelte für kleine Energieverbraucher im Wärmebereich wirtschaftlich darstellbar sind oder zu hohen Administrationskosten führen werden. Es ist dabei insbesondere darauf zu achten, ob die Nutzung von Smart Metern hier die Transaktionskosten entsprechend begrenzen kann. Es besteht weiterer Forschungsbedarf, um die Grenze für Einführung der Maßnahme zu setzen.

Eine weitere Möglichkeit, lokale Einflüsse in eine Dynamisierung einzubeziehen, ist die ausschließliche Verwendung eines anderen Indexes als den Spotpreis. Denkbar wäre die aktuelle Belastung des Verteilnetzes anhand des Netzampelkonzepts. In diesem Fall ist es aber möglich, dass andere flexibilisierte Umlagen in die entgegengesetzte Richtung wirken.

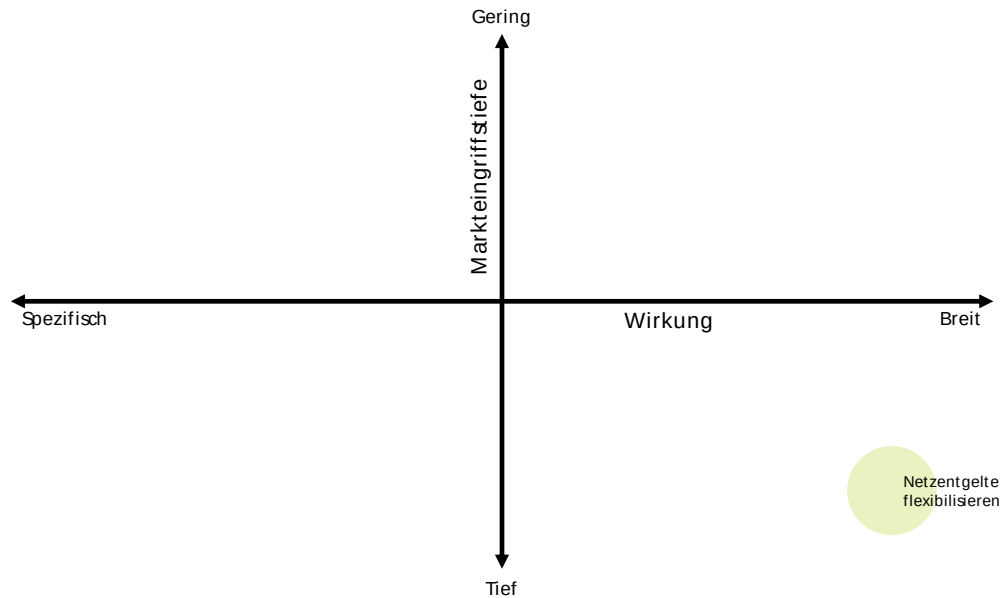
Flexible Netzentgelte fördern die flexible Nutzung von Sektorenkopplungstechnologien. Power2Heat-Anlagen zum Beispiel haben in diesem Fall einen deutlich stärkeren Anreiz auf das Strompreissignal an der Strombörse zu reagieren. Strom wird zur Beladung des Warmwasserspeichers immer dann genutzt, wenn er günstig ist. Durch die flexibilisierten Netzentgelte kommen die Preissignale so auch beim Stromverbraucher an. Die gleiche Logik kann auf (potentielle) Power2Gas-Anlagen angewandt werden, welche sich in der Nähe von Netzengpässen und fluktuierenden Erzeugern

befinden. Hier bietet die lokale Komponente einen Anreiz zur Installation und zum Betrieb von Power2Gas-Anlagen und zur Nutzung von Strom der ansonsten abgeregelt werden würde.

Die durch die Maßnahme vorgeschlagenen Änderungen sind weitreichend. Sie betreffen insbesondere Übertragungs- und Verteilnetzbetreiber, welche in der Verantwortung stünden, die Netzungspässe zu antizipieren und die Netzentgelte auf Viertelstundenbasis (oder stündlicher Basis) zu veröffentlichen. Der Gesetzgeber ist gehalten, das notwendige Rahmenwerk zu schaffen. Insbesondere erfordert dies, die Regelung in §19 Abs. 2 StromNEV in eine Flexibilitätsverordnung zu überführen, welche die Bereitstellung von Flexibilität durch Großverbraucher anregt, anstatt sie zu verhindern. Durch eine Optionalität für Haushaltskunden ist gewährleistet, dass die Strombezugskosten nicht steigen, wenn keine Sektorenkopplungsanlage vorhanden ist. Für Kunden mit einer Wärmepumpe oder einem Elektrofahrzeug kann diese Option sinnvoll sein, insbesondere dann, wenn diese durch einen variablen Tarif versorgt werden.

Die vorgeschlagenen Regelungen adressieren insbesondere die Stromnetzzugangsverordnung (StromNZV), die Stromnetzentgeltverordnung StromNEV (z.B. §19 Abs. 2, §19 Abs. 4, §17) und das Energiewirtschaftsgesetz EnWG (z.B. §14 Abs. 1 EnWG, §119 Abs.2 EnWG).

Es ist zu erwarten, dass durch die Flexibilisierung der Netzentgelte, Sektorenkopplungstechnologien Strom insgesamt wirtschaftlicher beschaffen können.



Maßnahmen zur Förderung der
Sektorenkopplung

Wirkung	Markteingriffstiefe	Barrieren
Sehr breit <i>Betrifft den gesamten Stromsektor und die Kopplung zu Wärme, Verkehr und Industrie (stoffl. Nutzung)</i>	Sehr tief <i>Netzentgeltsystematik (StromNEV) muss angepasst werden. Große Gruppe an Netzbetreibern und Netznutzern. Neuer regulatorische Rahmen durch Gesetzgeber bestimmt und BNetzA ausgeführt.</i>	4+ ▪ <i>Fehlende Anreize durch Netzentgelte</i> ▪ <i>Anreizregulierung</i> ▪ <i>Kein Zugang zum Absatzmarkt</i> ▪ <i>Fehlender regulatorischer Rahmen für Speicher</i> ▪ <i>Fehlende Wirtschaftlichkeit durch Abgaben / Umlagen / Steuern</i> ▪ <i>Wert sektorengerkoppelter Energie kann nicht kommuniziert werden</i>

Abbildung 18: Bewertung der Maßnahme „Netzentgelte flexibilisieren“

6.1.2

EEG-Umlage flexibilisieren

Analog zu den Netznutzungsentgelten wird die EEG-Umlage als additive Komponente der letztverbrauchten kWh hinzugefügt. In der Höhe ist die EEG-Umlage noch die größte Einzelposition. Im Jahr 2017 werden insgesamt 6,88 ct/kWh EEG-Umlage der verbrauchten kWh zugeschlagen. Damit ist die EEG-Umlage mehr doppelt so hoch wie der durchschnittliche

Preis im Stromgroßhandel der 2016 bei etwa 2,7 ct/kWh lag (Agora Energiewende 2016). Energieintensive Verbraucher können ab einem Jahresverbrauch von 24 GWh die EEG-Umlage im Einzelfall um bis zu 95 Prozent reduzieren (Bundesnetzagentur und Bundeskartellamt 2016). Durch die Kostendegression der Erneuerbaren Energien und den Auslauf der Förderung von hochpreisigen Altanlagen wird die EEG-Umlage langfristig sinken und daher insgesamt weniger ins Gewicht fallen (Haller et al. 2017).

Da die EEG-Umlage zu jedem Zeitpunkt in gleicher Höhe dem Strompreis aufgeschlagen wird, wird der Zustand des Energiesystems nicht durch den Endpreis des Stroms bestimmt. Das von der EEG-Umlage (und den anderen additiven Preiskomponenten) ausgehende Signal regt keinen flexiblen Verbrauch an. Da Sektorenkopplungstechnologien häufig flexibel sind, würden sie hingegen von Preisunterschieden profitieren, welche sich durch eine dynamische EEG-Umlage ergeben.

Die EEG-Umlage wird durch einen Multiplikator an den Großhandelspreis der Strombörse EPEX SPOT gekoppelt. Ist der Strompreis niedrig, ist die EEG-Umlage gering und umgekehrt. Zu Zeiten hoher Einspeisung aus fluktuierenden Erneuerbaren Energien sind die Großhandelspreise üblicherweise gering. Aus diesem Grund führt die Kopplung an den Spot-Preis zu einer Kopplung an die Einspeisung der fluktuierend einspeisenden Erneuerbaren Energien.

Analog zur Maßnahme der dynamischen Netzentgelte wird die Regelung auf Kunden mit einer registrierenden Lastgangmessung oder Smart-Metern angewandt, welche einen Verbrauch von über 6.000 bis 10.000 kWh/a haben.

Das Konzept und seine Vorzüge wurde bereits ausführlich diskutiert, u.a. in (Agora Energiewende 2014) und (Jansen et al. 2015). Insbesondere in Hinsicht auf die Sektorenkopplung ist eine Umsetzung der Maßnahme dringend notwendig, da die starre EEG-Umlage als Straßenblockade bei der Umsetzung der Sektorenkopplung und der Flexibilisierung des Energiesystems wirkt.

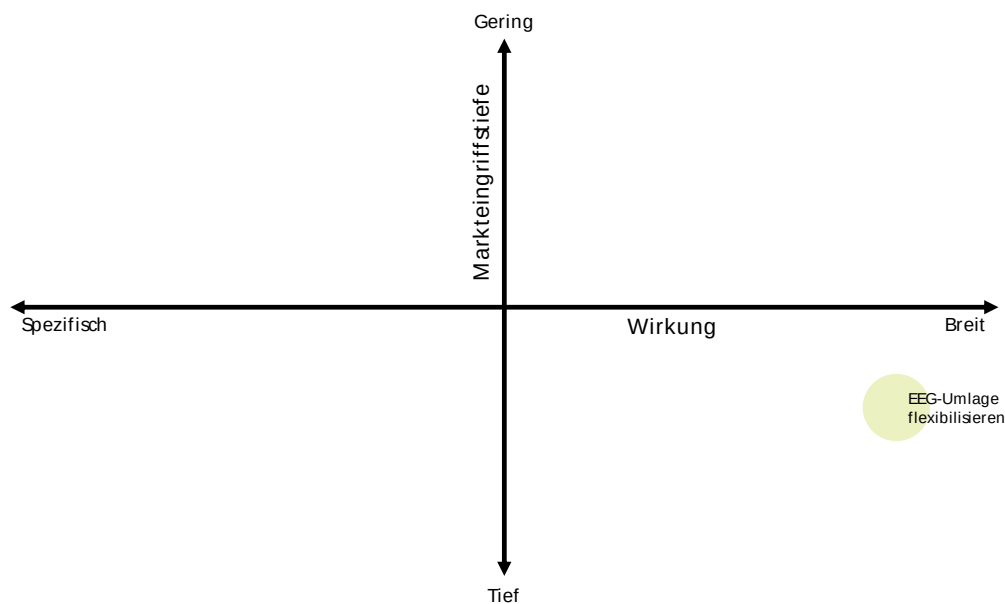
Die Hauptprofiteure einer dynamisierten EEG-Umlage sind flexible Stromverbraucher, insbesondere Sektorenkopplungstechnologien, wie Power2Gas, Power2Heat und batterieelektrische Mobilität. Elektrische Fahrzeuge, und Warmwasservorratsbehälter können zu Zeiten niedriger Preise wirtschaftlicher geladen werden. Dies erlaubt die Dekarbonisierung des Wärme- und Mobilitätssektors durch Sektorenkopplung. Power2Gas-Anlagen haben einen Anreiz, Wind- und Solarstrom direkt von der Erzeugungsquelle zu nutzen. Netzengpässe können so verringert werden. Voraussetzung dafür sind die Maßnahmen zur alternativen Vermarktung in einem reformierten EEG (siehe weiter unten).

Die Maßnahme richtet sich an die Stromverbraucher, welche die EEG-Umlage zahlen. Diese muss bereits vor der Abrechnung, im Idealfalle kurz nach der Veröffentlichung der Großhandelspreise, viertelstündlich zur Verfügung stehen. Entsprechend können sich dann Energieversorger, Gewerbe- und Industriebetriebe sowie Haushalte auf die Preise einstellen.

.....
Maßnahmen zur Förderung der
Sektorenkopplung
.....

Diese Maßnahme adressiert hauptsächlich das EEG. Hier müssen durch den Gesetzgeber die Rahmenbedingungen geschaffen werden, um den Wälzungsmechanismus anzupassen.

Eine Dynamisierung der EEG-Umlage, zusammen mit der Flexibilisierung der Netzentgelte, erlaubt es, Endverbrauchern Anreize zu einem systemdienlichen Verhalten zu kommunizieren. Dadurch wird erreicht, dass ein Großteil der bisher additiven Kosten in ein Signal umgewandelt wird, welches den ökologischen, effizienten und systemdienlichen Stromverbrauch durch Sektorenkopplungstechnologien anreizt.



Maßnahmen zur Förderung der Sektorenkopplung

Wirkung	Markteingriffstiefe	Barrieren
Sehr breit <i>Betrifft den gesamten Stromsektor und die Kopplung zu Wärme, Verkehr und Industrie (stoffl. Nutzung)</i>	Tiefer <i>Anpassung des EEGs und dessen Wälzungsmechanismus durch Gesetzgeber. Starken Einfluss auf das Verhalten der Netznutzer.</i>	3 - Kein Zugang zum Absatzmarkt - Fehlende Wirtschaftlichkeit durch Abgaben / Umlagen / Steuern - Wert sektorengekoppelter Energie kann nicht kommuniziert werden

Abbildung 19: Bewertung der Maßnahme „EEG-Umlage flexibilisieren“

6.1.3

Stromsteuer durch sektorenübergreifende CO₂-Bepreisung ersetzen

Die Stromsteuer ist eine weitere additive Strompreiskomponente, welche dem Strompreis hinzugefügt wird. Zum großen Teil wird durch die Stromsteuer eine finanzielle Umverteilung zulasten der Stromkunden erwirkt, aber keine Anreizwirkung erzielt (StromSTEUER). Die wenigen bestehenden Steuerungsanreize (z.B. §9 StromStG) sind punktuelle Maßnahmen, unterstützen die Sektorenkopplung aber nicht ausreichend.

Die Maßnahme sieht eine Abschaffung der Stromsteuer vor. Gleichzeitig wird eine sektorenübergreifende CO₂-Steuer eingeführt. Konkret sieht dies die Besteuerung von CO₂-Emissionen vor, welche durch den Gesetzgeber

festgelegt wird und sukzessive erhöht wird. Das Umweltbundesamt hat die Umweltkosten von CO₂-Emissionen auf ca. 80 €/t_{CO₂} beziffert (UBA 2015). Es wurde gezeigt, dass durch eine CO₂-Steuer mit einem CO₂-Preis von 20-30 €/t_{CO₂} bereits erste Schritte in Richtung Sektorenkopplung und Dekarbonisierung erreicht werden können (BEE 2017a, 2017b). Eine kontinuierliche Steigerung hin zu den Vollkosten ist sinnvoll und schafft langfristig Sicherheit.

Die Einführung einer CO₂-Steuer ist repräsentativ für die Einführung einer Luftschadstoffabgabe. Durch die CO₂-Bepreisung werden indirekt auch Schwefel- (SO_x) und Stickoxide (NO_x) bepreist, da diese mitemittiert werden.

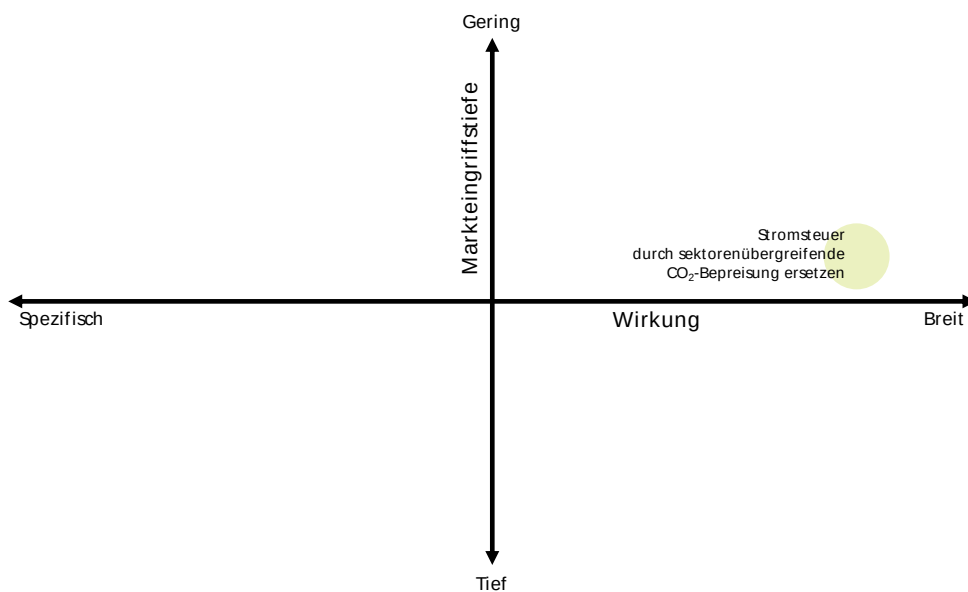
Die Besteuerung von CO₂-Emissionen erzeugt eine Steuerungsfunktion für CO₂-arme Versorgungstechnologien. Die Besteuerung der Kraftwerksbrennstoffe erlaubt es, dass Strom zu Zeiten des ausreichenden Angebots fluktuierend einspeisender Erneuerbarer Energien mit geringer CO₂-Intensität entsprechend günstiger ist als zu Zeiten mit hoher CO₂-Intensität. Je nach Höhe der Steuer, kompensieren die Einnahmen aus der CO₂-Steuer die Verluste aus dem Wegfall der Stromsteuer komplett (Energy Brainpool 2017). Der Übergang zu einem CO₂-getriebenem Abgabensystem ermöglicht die Dekarbonisierung durch Sektorenkopplung, indem es Preissignale für die Verfügbarkeit von CO₂-armen Strom generiert. Die Erweiterung des Konzepts auf den Wärmemarkt sieht die Besteuerung der Primärenergieträger Kohle, Erdöl und Erdgas vor (Prognos AG 2017). Die Steuer würde hier durch den Brennstoffhändler eingepreist und an den Endkunden weitergegeben. Durch diese Ergänzung würde eine flexible Power2Heat- oder Power2Gas-Anlage sowohl durch den CO₂-armen Strom wie auch den Brennstoffkostenvorteil profitieren und somit die Sektorenkopplungstechnologien insgesamt wirtschaftlich besser darstellen.

In der Anwendung Wärme konkurrieren CO₂-arme Sektorenkopplungstechnologien und andere erneuerbare Wärmeerzeuger mit fossil-gefeuerten Anlagen. Eine CO₂-Bepreisung, z.B. in Form einer Energiesteuer mit CO₂-Komponente mit Rückvergütung an private Haushalte und Unternehmen, in diesem Bereich würde alle CO₂-sparenden Technologien relativ besser stellen, darunter auch sektorenkoppelnde Power2Heat-Anlagen, wie z.B. Wärmepumpen. Beispielsweise kann die Sektorenkopplungstechnologie Wärmepumpe mit Speichertank (Power2Heat) CO₂-armen Strom dann verbrauchen, wenn im Energiesystem ein großes Angebot aus fluktuierenden Erneuerbaren Energien besteht. Gleiches gilt für den Verbrauch CO₂-armen Stroms in der Mobilität, welcher in Konkurrenz mit konventionellen Kraftstoffen und der Bioenergie steht. Der Verbrauch von fossilen Kraftstoffen wird durch die CO₂-Besteuerung verteuert, was dem CO₂-armen Verbrauch aus Strom und Bioenergie einen Nachteilsausgleich erlaubt.

Für die Maßnahme wird das Stromsteuergesetz auslaufen. Zeitgleich wird ein CO₂-Steuer-Gesetz eingeführt. Das Gesetz zur Besteuerung klimaschädlicher Emissionen (KlimaSchadG) besteuert CO₂-Emissionen. Im Wärme- und Mobilitätsbereich werden die CO₂-Emissionen auf den Verkaufspreis der Kraftstoffe erhoben. Der Verbrauch von Strom zur Sektorenkopplung im Wärme und Mobilitätsbereich wird durch das Smart Meter-Gateway abgerechnet. Die CO₂-Intensität von Strom ist grundsätzlich öffentlich zugängliche Information (z.B. (Tomorrow 2017)).

Die Maßnahme adressiert alle Sektoren gleichzeitig und kann somit eine große Wirkung entfalten. Die Sektorenkopplung wird ermöglicht, indem CO₂-arme Versorgungsvarianten wirtschaftlich konkurrenzfähig werden.

Maßnahmen zur Förderung der Sektorenkopplung



Wirkung	Markteingriffstiefe	Barrieren
Sehr breit <i>Betrifft alle Sektoren gleichermaßen</i>	Gering <i>Berührt die Bereiche Stromsteuer und CO₂-Bepreisung,</i>	3 ▪ <i>Fehlende Anreize durch Netzentgelte</i> ▪ <i>Fehlende Wirtschaftlichkeit durch Abgaben / Umlagen / Steuern</i> ▪ <i>Wert sektorengekoppelter Energie kann nicht kommuniziert werden</i>

Abbildung 20: Bewertung der Maßnahme „Stromsteuer durch sektorenübergreifende CO₂-Bepreisung ersetzen“

Die Systematik der Netzentgelte ist komplex und die konkrete Ausgestaltung entfaltet eine Wirkung auf vielen Ebenen mit verschiedenen Akteuren. Die Bundesnetzagentur listet in Summe 880 Verteil- und vier Übertragungsnetzbetreiber (Bundesnetzagentur 2017b). Diese werden durch die Anreizregulierungsverordnung zu einem möglichst effizienten Netzbetrieb angeregt. Problematisch ist dabei, dass jeder Netzabschnitt besonderen technischen Eigenheiten unterliegen kann. Die angeschlossenen Verbraucher und Erzeuger können sich, genauso wie die regionale Ausdehnung und die Spannungsebenen, stark unterscheiden. Die technischen Anforderungen der Verteilnetze mit hohen Anteilen von Wind- und Solarenergie mit Einspeisung in die nächsthöhere Spannungsebene unterscheiden sich von den Anforderungen urbaner Verteilnetze. Die Anreizregulierung reizt die Investition in Netzhardware an, jedoch nicht die Investitionen in operative Änderungen. Daher können Verteilnetzbetreiber – hauptsächlich Netzeigner – nur sehr begrenzt das Netz sinnvoll bewirtschaften.

Der Ausbau der Erneuerbaren Energien hat insbesondere in ländlichen Bereichen zu einem Netzausbaubedarf geführt, welcher durch die Netzentgelte an die Stromverbraucher gewälzt wird. Da Erneuerbare-Energien-Anlagen üblicherweise im ländlichen Gebiet gebaut werden, ist der Investitionsbedarf für den Netzausbau dort besonders hoch. Dies führt dazu, dass die Netzentgelte in ländlichen Gebieten deutlich höher sind als in Städten (Bundesnetzagentur 2015). Diese ungerechte Verteilung wird durch die Struktur der Netzbetreiber bestimmt und ist inhärent im derzeitigen Netzentgeltsystem für die Verteilnetzbetreiber.

Ein weiterer Aspekt, der dabei zum Tragen kommt, ist die Tatsache, dass in Deutschland die Netzentgelte durch die Letztverbraucher von Strom komplett gezahlt werden. Somit können die Netzentgelte keine Steuerungswirkung auf die Erzeuger entfalten, obwohl sie erheblich zu den Kosten beitragen.

Aufgrund der vielschichtigen Problematik, welche durch das Netzentgeltsystem hervorgerufen wird, ist es sinnvoll, die Netzentgelte in eine sektorenübergreifende Infrastrukturabgabe zu überführen. Diese wird genutzt, um die Betriebs- und Investitionskosten der Netzbetreiber zu refinanzieren. Die Vergütung der Netzbetreiber wird weiterhin an die ARegV angelehnt. Den Netzbetreibern werden weitreichende Handlungsoptionen eingeräumt, die eine echte Bewirtschaftung des Netzes ermöglichen. So kann der Netzbetreiber Kosten für die flexible Bewirtschaftung des Netzes mit lokalen Power2Gas-Anlagen und Speichern geltend machen, wenn dies nachweislich die Infrastrukturkosten

als Ganzes senkt, selbst wenn dies Investitionen im Gasnetz erforderlich machen würden. Bei der wirtschaftlichen Betrachtung sind auch die betrieblichen Kosten zu betrachten, wie z.B. Redispatchkosten aufgrund von Netzengpässen.

Die sektorenübergreifende Infrastrukturabgabe hebt Sektorengrenzen auf und ermöglicht die ganzheitliche Betrachtung. Sektorenkopplungsrouten, welche sich als insgesamt vorteilhaft herausstellen (insgesamt geringere Infrastrukturkosten), können mit dieser End-to-End-Betrachtung ermöglicht werden, auch wenn sie im heutigen Netzentgeltsystem zu höheren Kosten auf der Stromseite führen würden.

Des Weiteren wird durch die Maßnahme die Infrastrukturfürsorge wieder als hoheitliche Aufgabe wahrgenommen. Es wird ein sektorenübergreifender Wettbewerb zwischen dem Straßen- und Schienennetz und dem Strom- und Gasnetz hergestellt. In dieser Umgebung werden Sektorengrenzen überwunden und End-to-End-Lösungen gleichberechtigt behandelt.

Die Maßnahme ist komplementär zu der Flexibilisierung der Netznutzungsentgelte. Die Flexibilisierung der Netzentgelte verringert die Notwendigkeit des Übergangs zu einer Infrastrukturabgabe.

Die Infrastrukturabgabe wird pauschal erhoben und ist nicht an die Energiekosten gebunden. Es ist vorstellbar, dass die Abgabe zusammen mit der Einkommens- und Umsatzsteuer erhoben wird. Die Höhe der Abgabe bemisst sich dann nach dem Finanzbedarf für die Infrastruktur. Da die Abführung mit der Steuer keine Anreize zur Energieeffizienz setzt, ist im Falle von Gas und Strom auch eine Abrechnung über den Bereitstellungspreis des Netzzugangs möglich. Finanziell ist die Infrastrukturabgabe vergleichbar mit der Zahlung der Netzentgelte. In beiden Fällen wird ein technisch bedingter Finanzbedarf durch eine Nutzergruppe bedient. Im Falle der Abgabe ist ein finanzieller Vorteil zu erwarten, da durch die Sektorenkopplung (und andere Effekte) eine bessere Nutzung der Infrastruktur angenommen werden darf.

Der Bau einer Wasserelektrolyseanlage vor dem Netzengpass und die Einspeisung in das Erdgasnetz können gesamtwirtschaftlich günstiger sein als der Ausbau des elektrischen Netzes. Im bisherigen Netzentgeltsystem wird der Bau der Elektrolyseanlage durch die hohen additiven Preiskomponenten verhindert. Durch den Wegfall verbrauchsspezifischer Abgaben und die neuen Möglichkeiten der Netzbetreiber kann die sektorenübergreifende Lösung genutzt werden. Selbst wenn für diese Option das Gasnetz verändert werden muss, um mehr Wasserstoff aufzunehmen, kann dies durch eine Infrastrukturabgabe finanziert werden, solange die Wirtschaftlichkeit nachgewiesen wird. Zu diskutieren sind die Entscheidungskriterien für Infrastrukturausgaben, welche sich gegenseitig

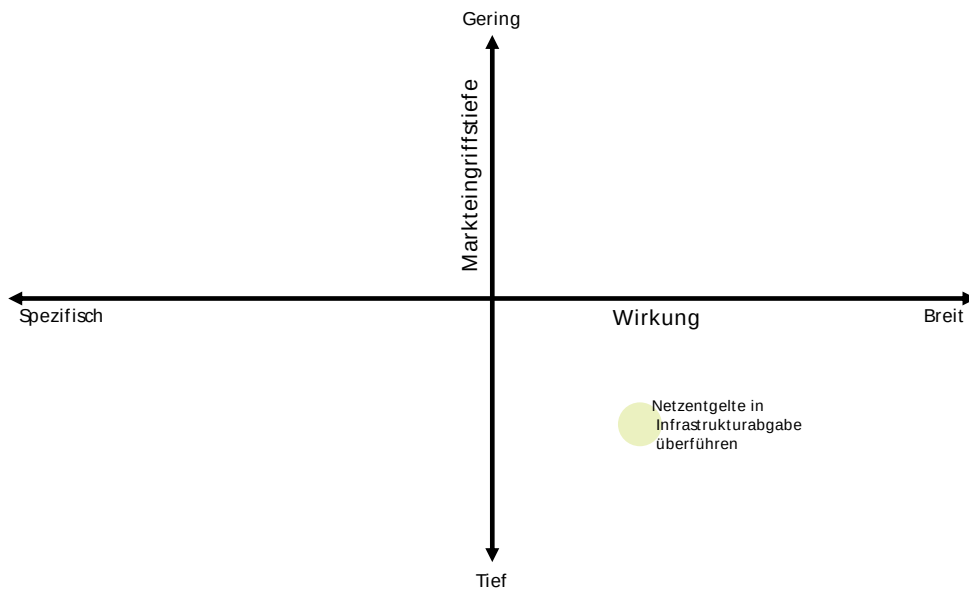
beeinflussen, und ob es z.B. in dem Zusammenhang sinnvoller ist, die Netze oder die Elektrolysekapazität auszubauen. Durch die weitreichende Wirkung der Sektorenkopplung muss dies im Rahmen einer ganzheitlichen Betrachtung erfolgen.

.....
Maßnahmen zur Förderung der
Sektorenkopplung
.....

Die Maßnahme betrifft die Betriebsweise der Verteil- und Versorgungsnetze, welche sich fundamental wandeln würde. Verteilnetzbetreiber haben die Möglichkeit eine aktivere Rolle einzunehmen und vom „Verteilnetzverwalter“ zum echten „Verteilnetzbetreiber“ zu avancieren.

Für die Maßnahme muss das Regelwerk der Netzentgeltberechnung und -wälzung abgeschafft werden und durch ein Abgabensystem ersetzt werden. Die Rolle der BNetzA ändert sich hinsichtlich der Prüfung der Wirtschaftlichkeit der alternativen „betrieblichen“ Maßnahmen.

Zu den positiven Effekten der Maßnahme gehören eine faire Aufschlüsselung der Infrastrukturkosten und Verbesserung der Situation für Sektorenkopplungstechnologien.



Maßnahmen zur Förderung der
Sektorenkopplung

Wirkung	Markteingriffstiefe	Barrieren
Breiter <i>Breite Wirkung, Auswirkungen auf die Betriebsweise der Verteil- und Versorgungsnetze. Großflächige Nutzung in allen Sektoren möglich und wahrscheinlich.</i>	Tiefer <i>Abschaffung der Netzentgeltberechnung und -wälzung und durch ein Abgabensystem ersetzen. Anpassung der Rolle der BNetzA hinsichtlich Prüfung der Wirtschaftlichkeit von alternativen „betrieblichen“ Maßnahmen.</i>	2 ▪ Kein Zugang zum Absatzmarkt ▪ Fehlende Wirtschaftlichkeit durch Abgaben / Umlagen / Steuern

Abbildung 21: Bewertung der Maßnahme „Netzentgelte in Infrastrukturabgabe überführen“

6.1.5

Doppelbelastung von Letztverbrauchsabgaben für Speicher abschaffen

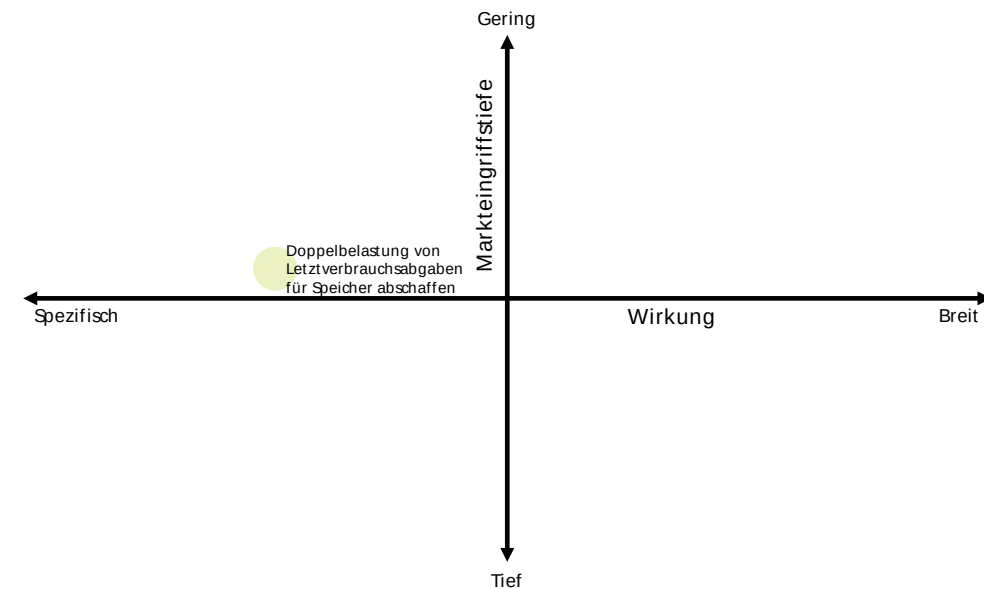
Der Betrieb eines Speichers, welcher elektrische Energie speichert und später wieder entlädt, wird doppelt mit Abgaben und Umlagen belastet. Für die eingespeicherte Energie werden beim Einspeicherungsvorgang alle Abgaben und Umlagen fällig, da es sich hier in der Definition der StromNZV um die Entnahme von Strom aus dem Netz handelt, somit also als Verbrauch gewertet wird. Die Ausspeicherung und Rückspeisung ins Netz ist als Erzeugung gewertet und der anschließende Verbrauch wird wieder mit den fälligen Abgaben und Umlagen belastet. Dies bedeutet, dass die

gespeicherte Energie (abzüglich der Verlustenergie) zweimal mit den Abgaben und Umlagen belastet wird.

.....
Maßnahmen zur Förderung der
Sektorenkopplung
.....

Die Maßnahme schlägt eine neue Definition für eingespeicherte Energie vor. Eingespeicherte Energie wird weiterhin wie üblich bepreist (ggf. mit dynamisierten Umlagen). Bei der Ausspeicherung werden die angefallenen Abgaben und Umlagen zurückerstattet. Dies geschieht über eine Messung während der Einspeicherung und Ausspeicherung. Die Differenz zwischen den beiden Mengen ist die Verlustenergie, für die keine Erstattung der gezahlten Abgaben und Umlagen möglich ist.

Das Konzept der Rückerstattung erlaubt komplexeren Energiespeichern mehrere Nutzungsmöglichkeiten. Bei der Erzeugung von Wasserstoff (Power2Gas) und anschließender Rückverstromung (Gas2Power) werden die Abgaben und Umlagen abzüglich der Speicherverluste erstattet. Speicherverluste sind die Energieverluste, die durch die Umwandlung von Strom in einen Zwischenspeicher und der Rückwandlung zu Strom entstehen. Wird der Wasserstoff hingegen in der Mobilität oder der Wärmeanwendung genutzt, wird keine Erstattung gewährt. In diesem Falle sind die kompletten (dynamisierten) Abgaben und Umlagen fällig.



Maßnahmen zur Förderung der Sektorenkopplung

Wirkung	Markteingriffstiefe	Barrieren
Spezifischer <i>Hauptsächlich Stromspeicher, z.T. auch Power2Gas mit Rückverstromung</i>	Gering <i>Abgaben/Umlagen/ Steuern, Speicherbetreiber, Netzbetreiber</i>	2 ▪ <i>Fehlender regulatorischer Rahmen für Speicher</i> ▪ <i>Wert sektorengekoppelter Energie kann nicht kommuniziert werden</i>

Abbildung 22: Bewertung der Maßnahme „Doppelbelastung von Letztverbrauchsabgaben für Speicher abschaffen“

6.2 Maßnahmenpaket – Weiterentwicklung des EEG

6.2.1 Umsetzung der Innovationsausschreibungen anhand des „Innovation Balancing“ Konzeptes

Der Ausbau Erneuerbarer Energien hat gezeigt, dass das Energiesystem zunehmend mit der dynamischen Einspeisung aus Wind- und Photovoltaikanlagen konfrontiert wird. Ein weiterer Ausbau erfordert es, dass die Erzeugung aus Erneuerbaren Energien systemfreundlicher wird. Die Volatilität der Einspeisung kann durch die Auswahl und Auslegung der Anlagentechnologie bis zu einem gewissen Grad beeinflusst werden. Eine Kombination von Wind- und PV-Anlagen an einem Standort verringert üblicherweise die Volatilität der Einspeisung, da sich ihre Einspeisung häufig komplementär verhält. Des Weiteren kann die Volatilität weiter reduziert werden, indem die Wind- bzw. PV-Anlage um steuerbare

Erzeuger mit flexibler Fahrweise ergänzt (z.B. Biomasse/Wasserkraft) und/oder die überschüssige Energie von flexiblen Verbrauchern (Power2X) und Speichern genutzt wird.

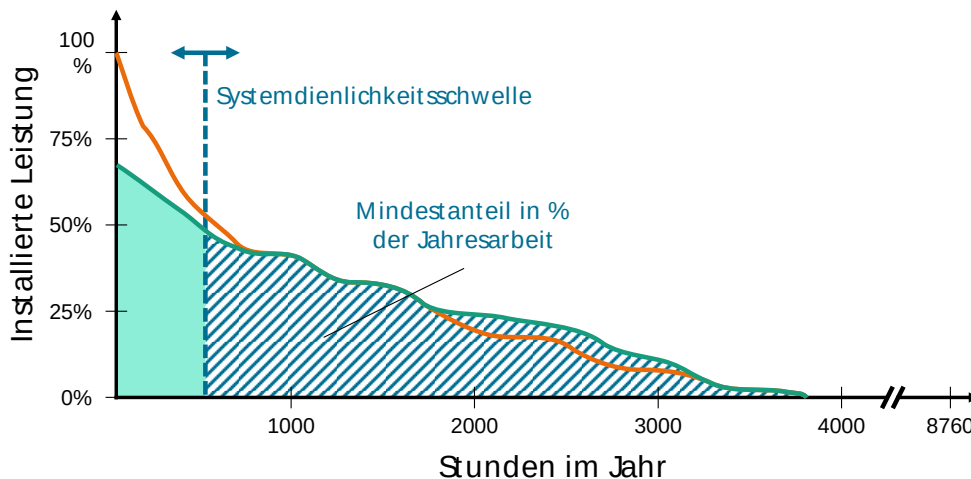
Maßnahmen zur Förderung der
Sektorenkopplung

Mit der EEG-Novelle 2017 wurden in §39j erstmalig „Innovationsausschreibungen“ eingeführt. Das Gesetz sieht den Erlass einer Verordnung bis spätestens zum 1. Mai 2018 vor (§88d EEG2017), welche die Einzelheiten der Innovationsausschreibungen noch bestimmt. Die durch die Bundesnetzagentur in den Jahren 2018 bis 2020 durchgeführten Innovationsausschreibungen haben ein jährliches Volumen von 50 MW und erlauben die Teilnahme unterschiedlicher Erneuerbarer Energien, auch in Kombination. Es ist das Ziel der Verordnung, innovative Geschäftsmodelle und systemdienliches Verhalten zu fördern, welches unter anderem durch Sektorenkopplung realisiert werden kann.

Die bisherige Förderung von fluktuierenden Erneuerbaren Energien macht derzeit keinen Unterschied zwischen einer „nützlichen“ Kilowattstunde und einem „Überangebot“, da zum jedem Zeitpunkt die gleiche Vergütung gezahlt wird. Die vorgestellte Maßnahme begegnet der Volatilität der Einspeisung durch Ausschreibungsbedingungen, einer flexiblen Vergütungsstruktur und der optionalen Nutzung nicht-systemdienlicher Strommengen durch Sektorenkopplungstechnologien.

Es ist das Ziel der des Ausschreibungsmodells, die Systemdienlichkeit von fluktuierenden Erneuerbaren Energien durch die Kombination mit Speichern und Sektorenkopplungstechnologien zu erhöhen. Für den Nachweis der Systemdienlichkeit wird die Jahresdauerlinie herangezogen. Das zentrale Konzept der Ausschreibung ist die Definition einer Systemdienlichkeitsschwelle, welche mindestens erreicht werden muss. Die Anpassung der Jahresdauerlinie durch die Anbieter kann entweder durch die Auswahl der Anlagentechnologie beeinflusst werden (Innovative Technik, Systemdienliche Anlagenauslegung), die Kombination von verschiedenen Anlagentypen oder der Kombination mit Verbrauchern, welche die überschüssige Energie nutzen (innovative Geschäftsmodelle).

Die nachfolgende Grafik illustriert die Anwendung der Systemdienlichkeitsschwelle und des systemdienlichen Flächenanteils. Die Jahresdauerlinie in orange ist nicht optimiert. Die Linie in grün hingegen entspricht eher dem gewünschten Effekt. Die blau gestrichelte Linie ist die Systemdienlichkeitsschwelle, die blau schraffierte Fläche ist der systemdienliche Mindestanteil der Fläche.



Maßnahmen zur Förderung der Sektorenkopplung

Abbildung 23: Definition der Systemdienlichkeitsschwelle und systemdienliche Mindestanteil (Jansen 2017)

Aufbauend auf der Flexibilitätsprämisse und des Ziels der Systemdienlichkeit wird anerkannt, dass nicht jede eingespeiste Kilowattstunde eines Erneuerbaren-Energien-Kraftwerks den gleichen Wert für das System hat. In der bisherigen technologiespezifischen Ausschreibung ist dies über den Erneuerbaren-Energien-Fördermechanismus nur sehr begrenzt über die Sechs-Stunden-Regel¹ abgebildet. Die Vergütung in der Innovation-Balancing-Förderung visiert eine zeitvariable Vergütung der eingespeisten Energie aus Erneuerbaren-Energien-Anlagen an. In Stunden mit einem höheren Wert für das System soll die Einspeisung vergütet werden, in Stunden mit keinem oder geringem Wert wird die eingespeiste Energie nicht vergütet. Der Zeitpunkt der Stunden wird durch den Anbieter selbst bestimmt und wird zunächst auf 20 % der Jahresstunden begrenzt.

Der umfängliche Vorschlag zur Maßnahme wurde bereits vorgestellt und die weiteren Details können dort entnommen werden (Jansen 2017). In Summe reizt das vorgeschlagene Ausschreibungsdesign Gebote an, welche systemdienlich sind. Dies kann durch optimierte, systemdienliche Anlagenauslegung oder die Nutzung von Sektorenkopplungstechnologie erreicht werden.

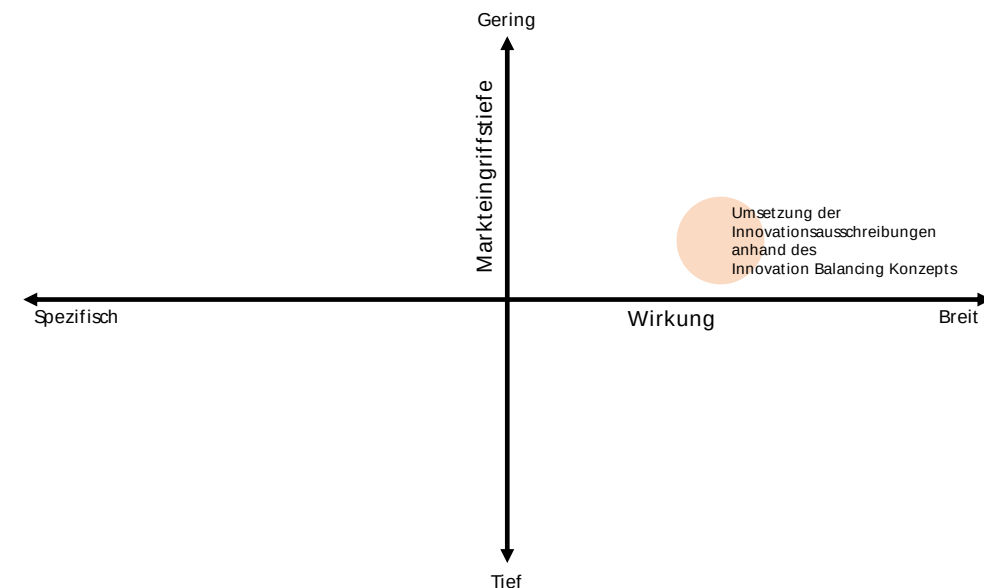
Als Beispiel könnte bei der Ausschreibung ein Bieter mit Windenergieanlagen zum Zuge kommen, welcher die Systemdienlichkeit durch die Kombination mit einer Power2Gas-Anlage herstellt. Das Wasserstoffgas kann anschließend in verschiedenen Sektoren genutzt werden.

Die Maßnahme zielt auf die Nutzung der Möglichkeiten durch das EEG ab. Eine Ausarbeitung durch das BMWi und die Durchführung durch die

¹ Siehe §51 EEG

BNetzA ist notwendig. Die Maßnahme adressiert die Volatilität und schafft gleichzeitig die Option zur Nutzung von Sektorenkopplungstechnologien.

Maßnahmen zur Förderung der Sektorenkopplung



Wirkung	Markteingriffstiefe	Barrieren
Breiter <i>Sektoren Strom, Wärme, Verkehr, Industrie (stoffl. Nutzung) betroffen aber zunächst geringe Reichweite</i>	Tiefer <i>Nur EEG und Gesetzgeber, allerdings 4 Barrieren</i>	4 ▪ <i>Fehlende Regelung Redispatch</i> ▪ <i>Fehlender regulatorischer Rahmen für Speicher</i> ▪ <i>Fehlende Wirtschaftlichkeit durch Abgaben / Umlagen / Steuern</i> ▪ <i>Wert sektorengekoppelter Energie kann nicht kommuniziert werden</i>

Abbildung 24: Bewertung der Maßnahme „Umsetzung der Innovationsausschreibungen anhand des „Innovation Balancing“ Konzept“

6.2.2

Alternative Nutzung von Strom-Überangeboten ermöglichen

Netzengpässe führen punktuell zur Abregelung von Erneuerbaren Energien. Die abgeregelte Energie wird vergütet, als ob sie eingespeist worden wäre. Ein Verbrauch des Stroms vor dem Netzengpass wäre unschädlich für den Betrieb des Netzes. Dieser Verbrauch kann aber nicht stattfinden, da für den Verbrauch die üblichen Steuern und Gebühren anfallen. Dies verhindert die sinnvolle Nutzung des Stroms.

Der der sonst abzuregelnde Strom könnte durch Sektorenkopplungstechnologien genutzt werden, z.B. Power2Heat- oder Power2Gas-Anwendungen. Der Kern der Maßnahme besteht darin, den verbrauchten Strom aus ansonsten abzuregelnden Erneuerbare-Energien-Anlagen komplett von den Abgaben und Umlagen zu befreien. Somit kann kurzfristig die Sektorenkopplung gefördert werden, bis das Netz entsprechend ausgebaut wurde. Die Maßnahme stellt somit temporär eine Lösung für die Nutzung von Sektorenkopplungstechnologien bereit, welche nicht die grundlegende Reform der Netzentgelte und EEG-Umlage ersetzt.

Die Maßnahme ist kostenneutral gegenüber dem Status quo. Die EEG-Kosten blieben neutral, da die ansonsten abgeregelte Energie vergütet würde. Die Befreiung von allen Abgaben und Umlagen ist ebenso kostenneutral, da auch hier der Strom ansonsten gar nicht erst produziert worden wäre. Somit lässt sich die Maßnahme einfach umsetzen, ohne finanzielle Implikation oder zusätzlichen Netzausbau.

Würde die Energie (kWh) aufgrund eines Netzengpasses abgeregelt, wird dem Verbraucher dieser Energiemenge zu dem Zeitpunkt des Engpasses das Privileg eingeräumt, diese zu verbrauchen, ohne dabei die sonst üblichen Abgaben und Umlagen zu entrichten. Für die Vorhersage der Netzengpässe ist der Netzbetreiber zuständig, welche diese vor dem Verbrauchszeitpunkt veröffentlicht (z.B. 1 Std. vorher).

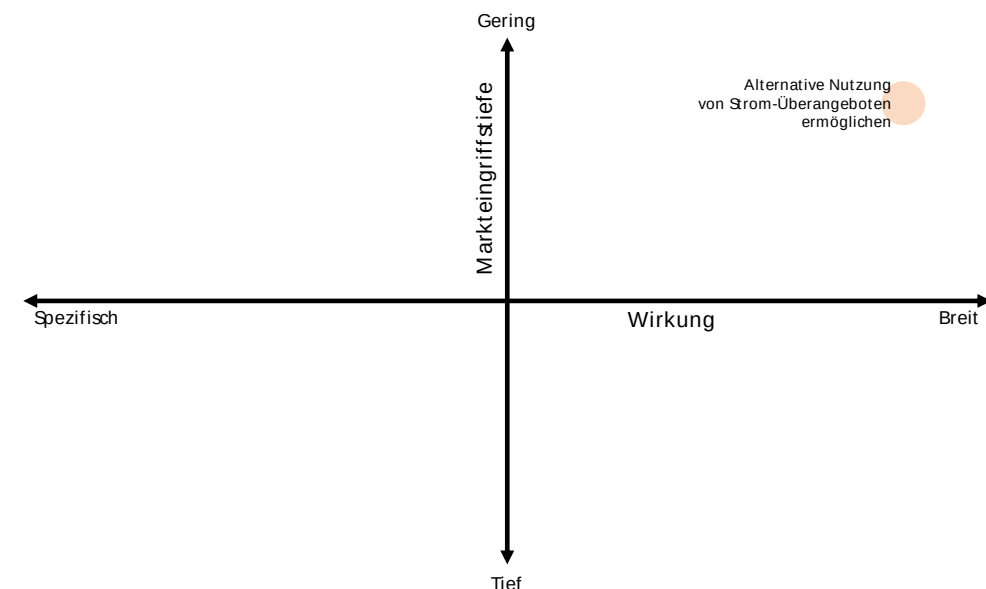
Die genutzte Energie kann entweder gespeichert oder sektorenübergreifend eingesetzt werden. In diesem Zusammenhang ist auch die vorgeschlagene Regelung in Kapitel 6.1.5 relevant.

Netzgebiete mit häufigen Engpässen prädestinieren sich für die Nutzung von Sektorenkopplungstechnologien zur Nutzung von ansonsten abgeregeltem Strom. Die Erlassung der additiven Strompreiskomponenten zu diesen Zeitpunkten erlaubt den Strombezug zu annähernd null Kosten. Durch die geringen Volllaststunden ist davon auszugehen, dass insbesondere direkte Power2Heat-Anlagen (für Nahwärmeanwendung) eine interessante Anwendung in dem Kontext wären. Die geringen Strombezugskosten könnten dann die Investitionskosten refinanzieren und gleichzeitig die Wärmeversorgung dekarbonisieren.

Für die Umsetzung der Maßnahme müssen die Vermarktungsoptionen im EEG geändert werden, welche die Veräußerung von Strom erlauben. Die Abregelung der Anlagen muss außer Kraft gesetzt werden, wenn eine Abnahme durch Power2X oder Speicher garantiert ist. Das System der Abgaben und Umlagen muss um Sonderregelungen für die Nutzung bei Abregelung ergänzt werden.

Durch die Maßnahme wird die lokale Nutzung der Sektorenkopplungstechnologien ermöglicht. So können sich in Netzengpassgebieten Sektorenkopplungsschwerpunkte herausbilden. Die komplette Befreiung von den genannten Abgaben ermöglicht die Schaffung von Geschäftsmodellen zwischen der lokalen Quelle des temporären Stromüberangebots und der Senke des Stroms in Form einer lokalen Sektorenkopplungstechnologie.

Maßnahmen zur Förderung der Sektorenkopplung



Wirkung	Markteingriffstiefe	Barrieren
Sehr breit <i>Sektoren Strom, Wärme, Verkehr, Industrie (stoffl. Nutzung) mit großer Reichweite in Netzengpassgebieten</i>	Sehr gering <i>Nur EEG und Gesetzgeber</i>	2 ▪ <i>Fehlende Regelung Redispatch</i> ▪ <i>Wert sektorengekoppelter Energie kann nicht kommuniziert werden</i>

Abbildung 25: Bewertung der Maßnahme „Alternative Nutzung von Strom-Überangeboten ermöglichen“

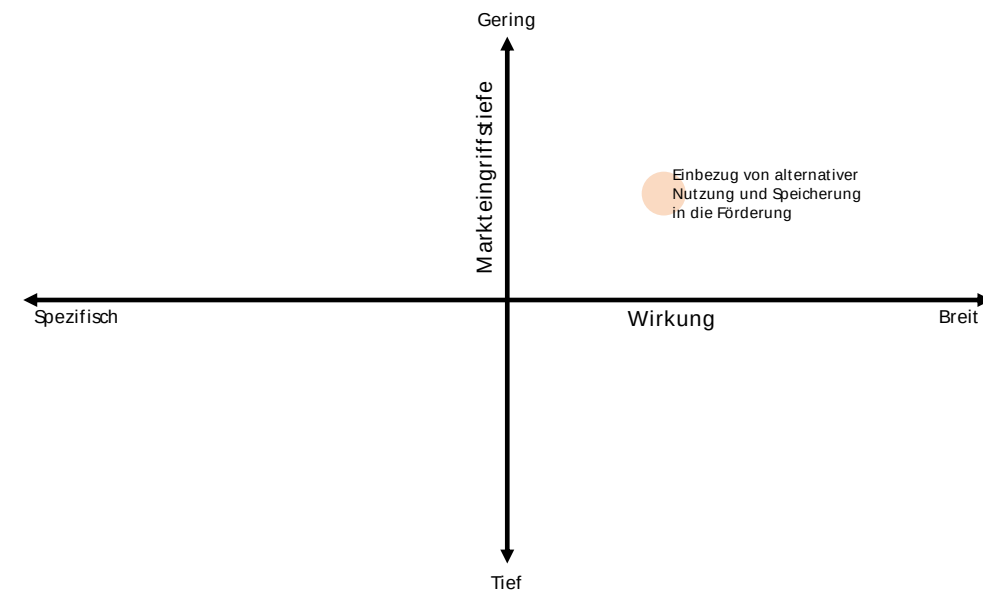
6.2.3

Einbezug von alternativer Nutzung und Speicherung in die Förderung

Derzeit gibt es kein Rahmenwerk für die Förderung von Sektorenkopplungstechnologien. Wie bereits in Kapitel 3 erörtert, ist die Nutzung von Sektorenkopplungstechnologien in der Zukunft dringend notwendig. Außerhalb von Forschungsprojekten wird der Einsatz von Sektorenkopplungstechnologien jedoch noch nicht angereizt.

Die Erhöhung der Ausschreibungsmenge des Innovation Balancing Konzepts ab 2020 auf 500 MW jährlich erlaubt den Aufbau der notwendigen Technologie. Der weitere Ausbau der Erneuerbaren Energie wird an die Erfüllung einer Systemverträglichkeitsprüfung geknüpft. Die in der Ausschreibung geforderte Systemverträglichkeit ist so ausgestaltet, dass dies nur in Kombination mit Power2X-Anlagen erreicht werden kann. So kann durch das Ausschreibungssystem die Entwicklung von Sektorenkopplungstechnologie gefördert werden.

Maßnahmen zur Förderung der Sektorenkopplung



Wirkung	Markteingriffstiefe	Barrieren
Breiter <i>Sektoren Strom, Wärme, Verkehr, Industrie (stoffl. Nutzung) mit zunächst geringer Reichweite da nicht für Bestandsanlagen</i>	Sehr gering <i>Nur EEG durch Gesetzgeber</i>	2 - Kein Zugang zum Absatzmarkt - Markteintrittsbarrieren

Abbildung 26: Bewertung der Maßnahme „Einbezug von alternativer Nutzung und Speicherung in die Förderung“

6.3 Maßnahmenpaket – Mobilität

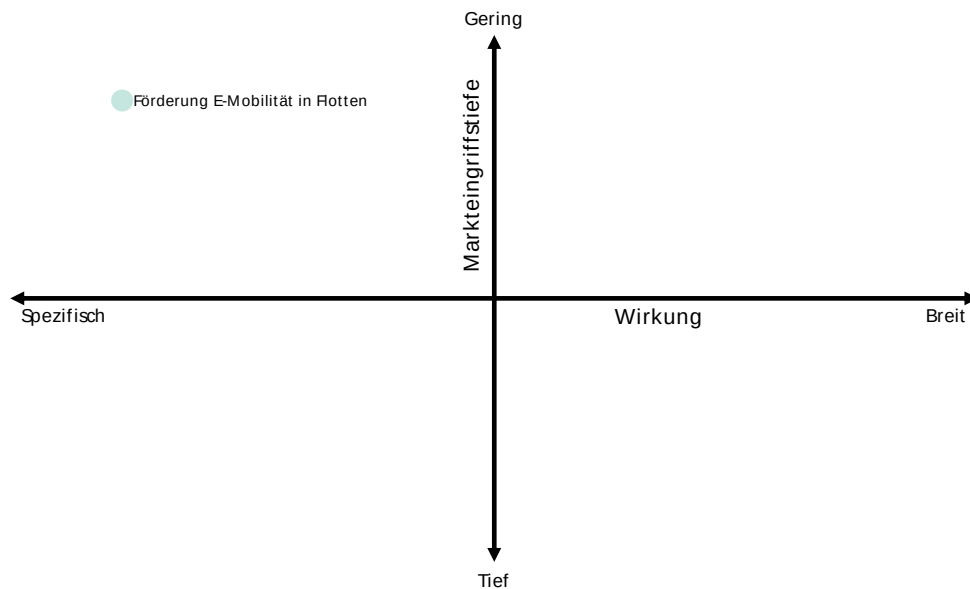
6.3.1 Förderung E-Mobilität in Flotten

Die Technologieentwicklung von batterieelektrischer und wasserstoffbasierter Mobilität hat das Forschungsstadium erfolgreich hinter sich

gelassen. Der nächste Schritt für die Technologieentwicklung ist die Erhöhung der Marktreife, welche die Kosten reduziert und die Zuverlässigkeit erhöht. Elektrische Mobilität ist eine Schlüsseltechnologie für die Sektorenkopplung.

Die Nutzung von batterieelektrischen und wasserstoffbasierten Fahrzeugen bedarf einer Lade- und Betankungsinfrastruktur, welche wiederum durch die geringe Nutzung noch kostenintensiv ist. Die Kosten der Nutzung dieser Infrastruktur lassen sich besser durch hohe Auslastung darstellen. Dies kann relativ einfach durch die Umstellung von Fahrzeugflotten, z.B. im öffentlichen Nahverkehr, geschehen. Zum einen erlaubt dies die Lade- und Betankungsinfrastruktur optimal zu nutzen sowie eine relevante Menge an Fahrzeugen zu nutzen. Dies erlaubt die Erweiterung von Produktionskapazitäten. Flottenbasierte Modelle haben außerdem den Vorteil, dass eventuelle Ausfälle in der Flotte durch andere Fahrzeuge kompensiert werden können.

Die Förderung der Ladeinfrastruktur auf der Stromseite wird durch das Entfallen der Abgaben und Umlagen gefördert (siehe Kapitel 6.1). Zusätzlich dazu kann der Aufbau der Infrastruktur gefördert werden. Die Unterstützung beim Aufbau der Flotten auf der Wasserstoffseite kann das Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie Phase 2 (NIP) genutzt werden. Die Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Fahrzeuge wird bereits durch ein Programm des BMVI gefördert (BMVI 2017). Des Weiteren ist es möglich, Flottenbetreiber für eine begrenzte Zeit Steuervergünstigungen einzuräumen. Die Maßnahme der Steuervergünstigungen findet Anwendung in Busflotten des ÖPNV und bei Carsharinganbietern. Zusätzlich zu der Förderung von Flotten muss die steuerliche Privilegierung für Dieselfahrzeuge beendet werden, insbesondere im Bereich der Dienstwagen, wo die Einführung von Elektrofahrzeugen durch bestehende Regelungen besonders unattraktiv ist.



Maßnahmen zur Förderung der
Sektorenkopplung

Wirkung	Markteingriffstiefe	Barrieren
Sehr spezifisch <i>Betrifft nur die Sektoren Mobilität und Strom (als Energiequelle)</i>	Sehr gering <i>Spezifische Förderung kann einfach durch Forschungsförderung oder durch Verordnung implementiert werden</i>	1 ▪ <i>Geringe Marktreife</i>

Abbildung 27: Bewertung
der Maßnahme „Förderung
E-Mobilität in Flotten“

6.3.2 Förderung klimaneutraler Mobilität

Die Förderung klimaneutraler Mobilität bedarf anfänglicher finanzieller Unterstützung zur Technologieeinführung. Die Dekarbonisierung des Verkehrssektors ist eine große Herausforderung und wird ohne eine anfängliche politische Unterstützung nicht möglich sein, trotz der in dieser Studie vorgeschlagenen Maßnahmen zur Förderung der Sektorenkopplung.

Im Bereich der Mobilität gibt es bereits funktionierende Mechanismen zur Dekarbonisierung (Treibhausgasquote in (COMM/DG/UNIT 2017)). Es ist sinnvoll, hier die Maßnahme auf nationaler Ebene ambitionierter zu gestalten und die Treibhausgasquote kontinuierlich zu steigern. Des Weiteren ist hier die Nutzung von Kraftstoffen aus Power2Liquid-Anlagen durch die Mehrfachzählung gesondert zu unterstützen. Derzeitig wird die Anpassung im EU-Winterpaket (RED II) angedacht. Aufbauend auf den Ergebnissen der Diskussion können hier ambitionierte Ziele gesetzt werden. Aufgrund des aktuellen Diskussionsstandes besteht in dieser

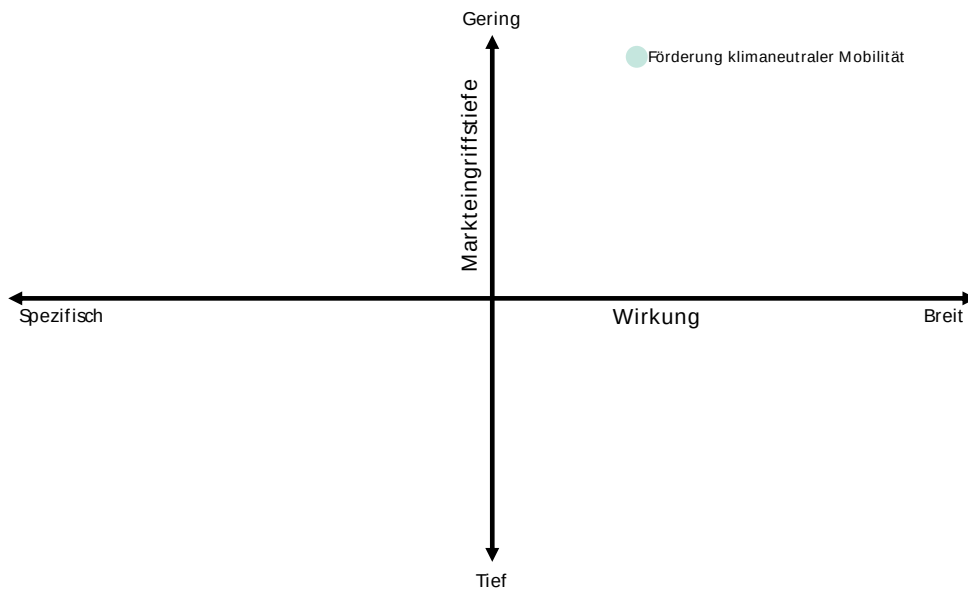
Maßnahme noch weiterer Forschungsbedarf bevor eine Umsetzung möglich ist.

.....
Maßnahmen zur Förderung der
Sektorenkopplung
.....

Die Dekarbonisierung der Schifffahrt und der Luftfahrt wird auf lange Sicht nicht ohne politische Unterstützung auskommen, da hier weitere Herausforderungen in der internationalen Ausrichtung dieser Verkehrsträger liegen. Noch sind diese im Sinne des Energieverbrauchs relativ gering, jedoch zeigt insbesondere die Luftfahrt ein starkes Wachstum, was eine Dekarbonisierung ab 2025 zwingend notwendig macht. Zeitlich dringender hingegen ist die Dekarbonisierung der straßen- und schienengebundenen Mobilität. Die Vielzahl der Anwendungen macht eine einheitliche Lösung kompliziert, da die jeweiligen klimaneutralen Technologien (Güterverkehr auf Schiene und Straße, Individualverkehr Straße, öffentliche Verkehrsmittel, usw.) jeweils eine fossile Konkurrenz haben, welche preislich unterschiedlich weit entfernt liegt.

Ein möglicher Ansatz zur Förderung von CO₂-freien Optionen liegt in der Besteuerung der CO₂-Emissionen. In gleicher Höhe angewandt auf alle Technologien würde dies zu vermehrter Dekarbonisierung in einigen Bereichen führen und weniger Aktivität in anderen Bereichen. Alternativ kann die CO₂-Steuer für die verschiedenen Technologien einzeln erarbeitet werden. Die Steuer wäre dann zum Beispiel beim Individualverkehr so eingestellt, dass die Kostennachteile der klimaneutralen Lösung ausgeglichen werden. Steuererleichterungen (z.B. keine Kerosinsteuer im Flugverkehr) erschweren einen Strukturwandel und müssen schrittweise abgebaut werden, wenn sie dem Klimaziel entgegenstehen. Dies ist insbesondere wichtig, da der weiter dramatisch wachsende Luftverkehr einen großen Energiebedarf haben wird. Mit der richtigen Abstimmung der Maßnahme kann der Bedarf nach erneuerbaren Flugtreibstoff bedient werden. Power2Gas wird hier als Lösung angesehen, auch wenn aus Wirtschaftlichkeit- und Mengengründen ein Import des Treibstoff sinnvoll sein kann (siehe auch (Gerhardt et al. 2017)).

Die Besteuerung der CO₂-Emissionen hätte den Vorteil, dass Sektorenkopplungstechnologien (Power2Gas, oder Power2Mobility) genutzt werden um den Verkehrssektor zu dekarbonisieren. Durch die Besteuerung der CO₂-Emissionen haben auch alternative Kraftstoffe eine Möglichkeit zur Geltung zu kommen, wie zum Beispiel Erdgas. Grundsätzlich dürfen CO₂-arme Kraftstoffe (und Strom) nicht besteuert werden, um die Wirkung der CO₂-Steuer nicht zu verringern.



Maßnahmen zur Förderung der
Sektorenkopplung

Wirkung	Markteingriffstiefe	Barrieren
Breiter <i>Betrifft nur die Sektoren Mobilität und Strom (als Energiequelle)</i>	Sehr gering <i>Kann durch die Umwandlung der KFZ- Steuer geschehen</i>	1 ▪ <i>Geringe Marktreife</i>

Abbildung 28: Bewertung
der Maßnahme „Förderung
klimaneutraler Mobilität“

6.3.3

Einführung von Null-Emissionszonen

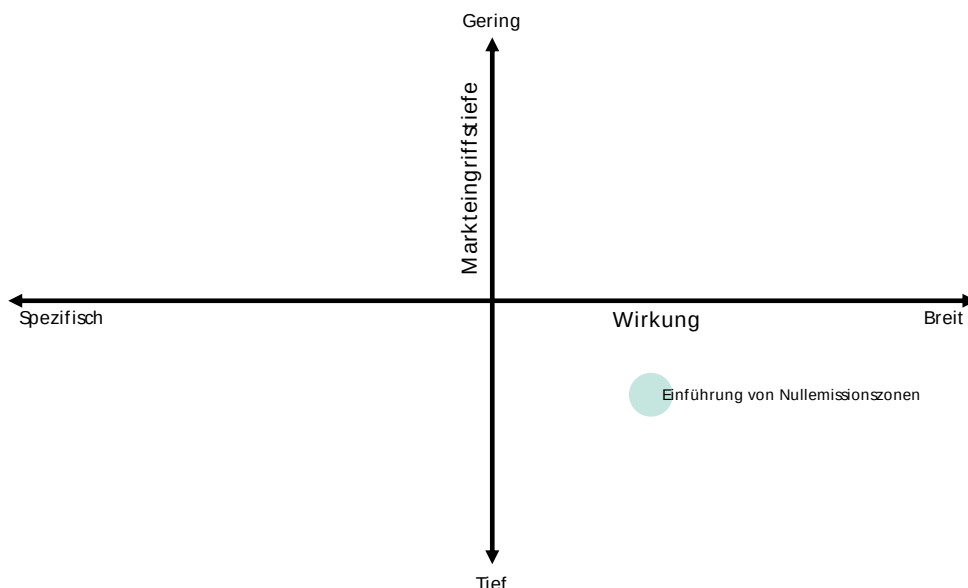
Die Umweltfolgekosten von NO_x- und SO_x-Emissionen aus Verbrennungsmotoren sind besonders in urbanen Gebieten hoch, werden derzeit jedoch nicht durch den Gesetzgeber adressiert. Urbane Gebiete profitieren am meisten von der Reduktion von Emissionen aus Batterie- oder Brennstoffzellenfahrzeugen.

Die gravierenden Einflüsse auf die menschliche Gesundheit erfordern die Einführung von Nullemissionszonen in den am stärksten betroffenen Gebieten. Um den Nutzern eine Übergangsphase zu gewähren, wird vorgeschlagen, diese Nullemissionszonen in 2025 einzuführen. Dies erlaubt es, dass die gesamte Fahrzeugflotte im normalen Zyklus ausgetauscht werden kann und bereitet die Nutzer auf den Wandel vor. Dies fördert die Nutzung H₂/Batteriemobilität, da es keine andere Option für die Nutzer gibt. Durch die Kopplung Wasserstoff mit batterieelektrischen Fahrzeugen kann die Sektorenkopplung gefördert werden.

Grundsätzlich ist dabei zu beachten, dass die Förderung der Elektromobilität zusätzlichen Strombedarf erzeugt. Dieser würde unter

heutigen Bedingungen durch fossile Kraftwerke gedeckt werden (hauptsächlich Gas und Kohle). Damit die Gesamtemissionen sinken bedarf es einer Reduktion der CO₂-Intensität im Stromnetz, welche durch den Ausbau der Erneuerbaren Energien erreicht werden kann.

Maßnahmen zur Förderung der
Sektorenkopplung



Wirkung	Markteingriffstiefe	Barrieren
Breiter <i>Betrifft große Teile der straßengebundenen Mobilität und Strom (als Energiequelle)</i>	Tiefer <i>Erforderter mehrere Stufen (z.B. Einführung von Emissionszonen, Klassifizierung von Fahrzeugen) und tangiert mehrere Akteure (z.B. Nutzer, Gesetzgeber, KBA)</i>	2 ▪ Markteintrittsbarrieren ▪ Geringe Marktreife

Abbildung 29: Bewertung der Maßnahme „Einführung von Null-Emissionszonen“

6.4 Maßnahmenpaket – Industrie

6.4.1 Förderung Technologieentwicklung

Große Teile der Anlageninfrastruktur für chemische Prozesse haben hohe Investitionskosten. Chemische Prozesse sind auf eine hohe

Anlagenauslastung optimiert. Ein wirtschaftlicher Betrieb erfordert daher eine hohe Auslastung. Die Nutzung sektorengekoppelter Energie erfordert hingegen die Fähigkeit, sich auf das Angebot fluktuierender Erneuerbarer Energien einzustellen, da sich ansonsten die Nachfrage z.B. nach Strom zu Zeiten mit fossiler Erzeugung erhöht.

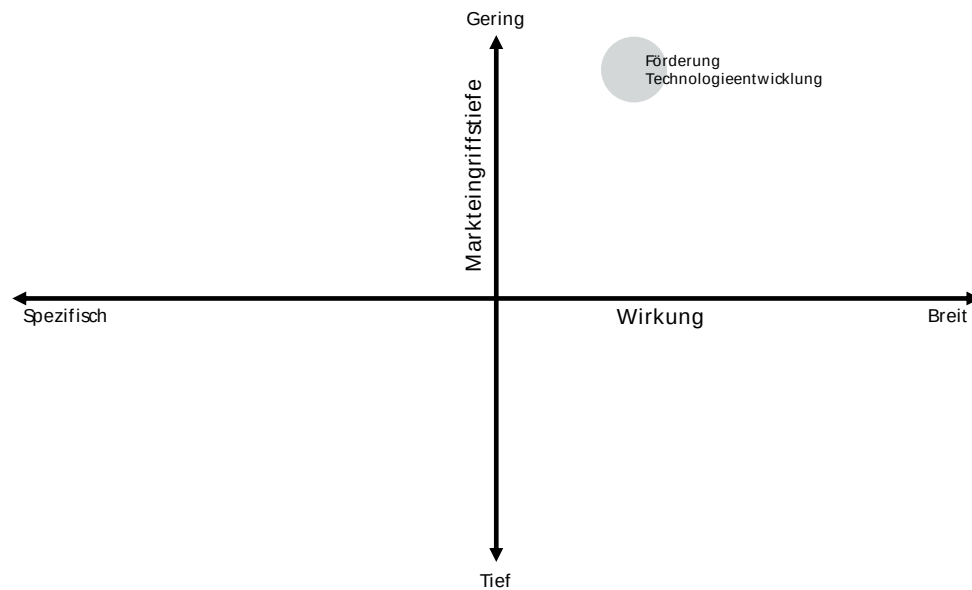
Sektorenkopplung erfordert daher eine Anpassung chemischer Prozesse, welche eine andere Balance zwischen Betriebs- und Investitionskosten anstreben. Die bisherige Auslegung auf eine kontinuierliche Betriebsweise hat Technologien gefördert, die sich unter diesen Rahmenbedingungen als kostenoptimal herausgestellt haben. Die für eine flexible Betriebsweise erforderlichen Technologien sind daher weniger gereift und bedürfen weiterer Entwicklung, da die Technologie noch nicht in allen Fällen einsatzbereit ist.

Die Maßnahme sieht eine Forschungsförderung zur Technologieentwicklung vor. Initiativen wie Carbon2Chem, ChemCoast oder VoltaChem, zeigen den technologischen Entwicklungsbedarf und das Interesse der chemischen Industrie. Die genannten Projekte befassen sich mit einzelnen Prozessen und chemischen Stoffen. Damit Sektorenkopplung im großen Maßstab in der Industrie zum Tragen kommt, bedarf es der Weiterentwicklung einer großen Anzahl chemischer Prozesse.

Grundsätzlich ist die Forschungsförderung zur Entwicklung der Sektorenkopplung auch in anderen Bereichen sinnvoll, allerdings stellt sich heraus, dass die chemische Industrie die größte Lücke zwischen der Fähigkeit der heutigen Anlagen und den zukünftigen Anlagen schließen muss.

Am Beispiel Ammoniaksynthese, ein bereits lange genutzter Prozess, wird der Entwicklungsbedarf illustriert. Die zur Ammoniaksynthese eingesetzten Katalysatoren sind optimal auf die kontinuierliche Nutzung abgestimmt. Eine Veränderung des Katalysators ist ein Baustein zur Flexibilisierung der Anlagen, bedarf aber zusätzlicher Forschung um die Wirtschaftlichkeit zu gewährleisten.

Die Maßnahme ist auf die chemische Industrie fokussiert, kann aber auch auf andere Bereiche angewandt werden. Zur Umsetzung muss die Forschungsförderung durch das Ministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) entsprechend ausgestaltet werden. Die Anpassung des Forschungsrahmenprogramms oder Auflage eines speziellen Forschungsprogramms erlaubt die Aktivierung potentieller Sektorenkopplungsaktivitäten in dem Bereich. So wird sichergestellt, dass die Technologie zur Verfügung steht, wenn die es die Systemintegration erfordert. Gleichzeitig wird eine Option zu Dekarbonisierung der chemischen Industrie geschaffen. Das zu erwartende Ergebnis ist eine Erhöhung der Technologiereife der geförderten Forschungsvorhaben.



Wirkung	Markteingriffstiefe	Barrieren
Breiter <i>Zunächst kleinere Auswirkungen auf Sektorenkopplung, allerdings große MW-Zahlen da Industrie stark skaliert</i>	Sehr gering <i>Erste Stufe der Technologieentwicklung ist durch Forschungsförderung umzusetzen</i>	2 ▪ Geringe Marktreife ▪ Unpassende Größenstaffelung

Abbildung 30: Bewertung der Maßnahme „Förderung Technologieentwicklung“

6.4.2

Ausschreibung und Steuerfinanzierung einer festen Menge an EEG-Umlagebefreiungsprivilegien

Derzeitig werden energieintensive Unternehmen, welche im internationalen Wettbewerb stehen, zu großen Teilen von der EEG-Umlage befreit. Die Befreiung von der Umlage führt dazu, dass nicht befreite Nutzer des Stromnetzes mit anteilig höheren Kosten belastet werden.

Im Sinne der Sektorenkopplung wirkt die Befreiung von der EEG-Umlage als Sektorenkopplungshindernis, da die Kosten konventioneller Energie verringert werden und somit alternativer Energiebezug aus der Sektorenkopplung noch weniger wirtschaftlich darzustellen ist.

Die Maßnahme sieht die Abschaffung der bedingungslosen EEG-Umlagebefreiung vor. Dabei sollen Unternehmen dazu angeregt

werden, für die Reduktion der EEG-Umlage eine Gegenleistung zu erbringen. Diese Gegenleistung besteht in der aktiven Partizipation im Energiesystem und kann z.B. durch die Bereitstellung von Flexibilität dargestellt werden. Insgesamt soll somit erreicht werden, dass derzeit passive Unternehmen sich aktiv an der Energiewende beteiligen und zur Sektorenkopplung beitragen.

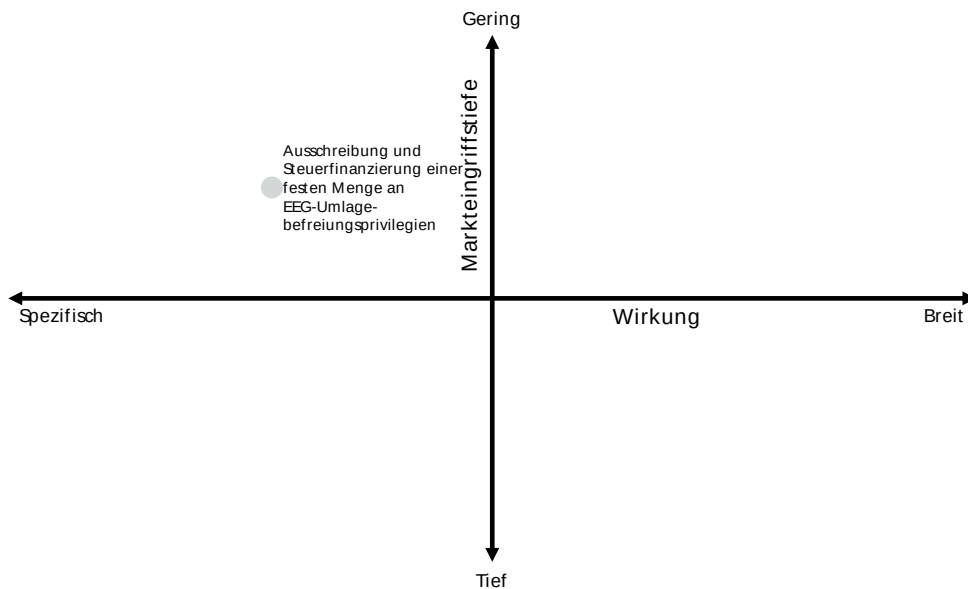
Das jeweilige Unternehmen kann demnach wie bisher die Befreiung von der EEG-Umlage beantragen, muss aber gleichzeitig nachweisen, wie die Integration von Erneuerbaren Energien oder die Sektorenkopplung vorangebracht wird. Dies wird anhand einfacher Kennzahlen erfasst, wie z.B. dem Lastverschiebungspotenzial oder der installierten Leistung der Power2X-Anlage. Die Industrieprivilegien könnten z.B. auch an Regelungen zur Investition in den Eigenverbrauch gekoppelt werden. Eine einfache Befreiung von der EEG-Umlage lässt keine Anreize für die Nutzung von Sektorenkopplungstechnologien entstehen.

Bei der Anwendung der Regelung dürfen die Nachhaltigkeit und Energieeffizienz der entsprechenden Unternehmen nicht negativ beeinflusst werden.

Wahlweise kann eine vordefinierte Menge an Privilegien auch ausgeschrieben werden. Dabei bieten die Unternehmen für die Zuteilung einer bestimmten umlagebefreiten Strommenge. Dabei gibt jeder Bieter an, wie groß die installierte Leistung und jährliche Energiemenge ist, welche zur Sektorenkopplung genutzt werden kann. Das Ausschreibungsmodell hat den Vorteil, dass es eine konstante Verbesserung ohne Rückkehroption anreizt. Für den Erhalt der Befreiungsprivilegien müssen im Wettbewerb immer wieder neue Innovationen generiert werden.

Ein stromkostenintensives Industrieunternehmen benötigt Prozessdampf für die Produktion. Dieser wird durch die Verbrennung von Erdgas erzeugt. Das Unternehmen kann sich zum Einsatz einer Power2Heat-Anlage entscheiden, welche Überschussstrom im Netz in Prozessdampf umwandeln kann. Der Betrieb der Anlage kann die Vermarktung an verschiedenen Märkten beinhalten.

Die Maßnahme adressiert die stromintensive Industrie, welche derzeit von der Umlagebefreiung nach §60ff EEG profitiert. Die Ausschreibung dieser Mengen fällt in den Hoheitsbereich der Bundesnetzagentur und des Bundesamtes für Ausfuhrkontrolle. Die Maßnahme muss gesetzlich in der nächsten EEG-Revision durch den Gesetzgeber festgelegt werden.



Maßnahmen zur Förderung der Sektorenkopplung

Wirkung	Markteingriffstiefe	Barrieren
Spezifischer <i>Hier wird nur die stromintensive Industrie adressiert</i>	Gering <i>Nur der Gesetzgeber ist zuständig und ggf. das Bundesamt für Ausfuhrkontrolle sowie die BNetzA</i>	1 ▪ <i>Fehlende Wirtschaftlichkeit durch Abgaben / Umlagen / Steuern</i>

Abbildung 31: Bewertung der Maßnahme „Ausschreibung und Steuerfinanzierung einer festen Menge an EEG-Umlagebefreiungsprivilegien“

6.4.3

Quotenmechanismus für die Verwendung EE-basierter chemischer Produktgruppen

Die Dekarbonisierung der chemischen Grundstoffindustrie kann durch Sektorenkopplung geschehen. Chemische Grundstoffe werden üblicherweise unter Einsatz fossiler Energieträger gewonnen. Große Energiemengen werden für die Produktion von landwirtschaftlichen Düngern auf Ammoniakbasis verwandt.

Aufgrund der Tatsache, dass die eingesetzten fossilen Energieträger die wirtschaftlich attraktivste Alternative darstellen, wird die Sektorenkopplung nur sehr begrenzt zur Dekarbonisierung beitragen.

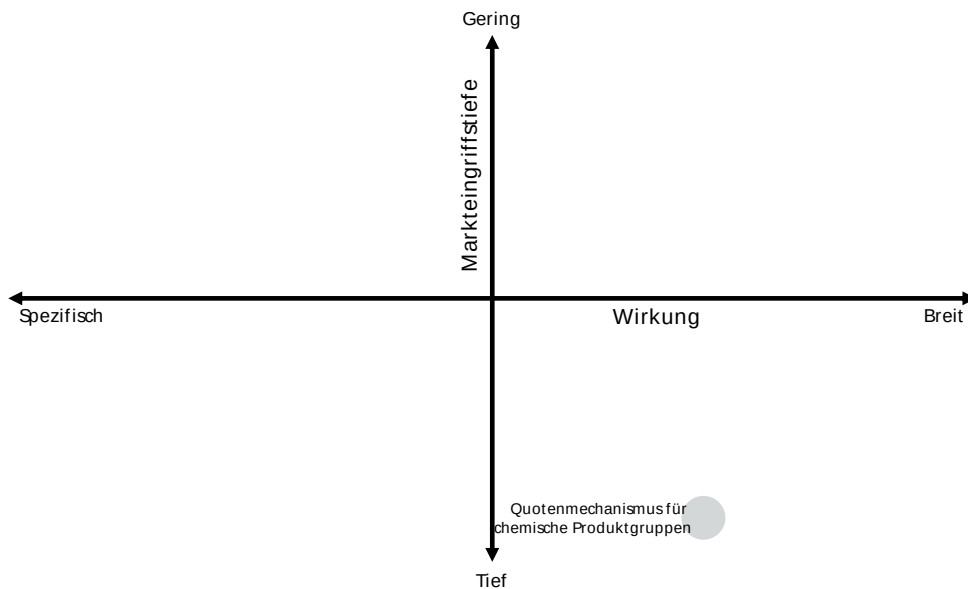
Es gilt den Anteil CO₂-arm erzeugter chemischer Grundstoffe sukzessive zu steigern. Ohne wirtschaftliche Anreize im derzeitigen Marktumfeld kann dies durch regulatorische Eingriffe geschehen. Die Maßnahme sieht die Einführung eines Quotenmechanismus für verschiedene Produkte (z.B.

Wasserstoff) vor, welche aus der Sektorenkopplung oder CO₂-armen Erzeugung stammen. Die Ausgestaltung würde an den Entwurf Revision der Renewable Energy Directive (RED II) (Bitnere) und der Fuel Quality Directive (FQD) (COMM/DG/UNIT 2017) angelehnt, oder auch an die EEG Wärmequote (§3 Abs.1 EEWärmeG). Die Regelung ist für inländisch Produkte wie auch importierte Produkte anzuwenden. Die Quoten selber beziehen sich auf die jeweilige Menge der Grundstoffe (z.B. Wasserstoff, Stickstoff, usw.). Dies vermeidet die Notwendigkeit, dass jedes Produkt mit einer eigenen Quote versehen werden muss.

Maßnahmen zur Förderung der
Sektorenkopplung

Die Ammoniaksynthese aus Wasserstoff und Stickstoff ist ein essentieller Teil der Produktion von Stickstoffdünger. Der genutzte Wasserstoff wird derzeit fast ausschließlich aus der Dampfreformierung gewonnen. Durch die Quote würde festgelegt, dass ein definierter Anteil des verwendeten Wasserstoffs zur Synthese aus der Sektorenkopplung (z.B. Wasserelektrolyse) oder CO₂-freien Quellen (Biomasse) stammen muss. Für importierten Ammoniak müsste die Herstellung entsprechend nachgewiesen werden.

Die Maßnahme adressiert die chemische Grundstoffindustrie. Regelungen durch den Gesetzgeber müssen veranlasst werden. Die vorgeschlagene Regelung erlaubt die Dekarbonisierung der chemischen Produkte durch Sektorenkopplung.



Maßnahmen zur Förderung der
Sektorenkopplung

Wirkung	Markteingriffstiefe	Barrieren
Breiter <i>Große Teile der chemischen Industrie und der nachgelagerten Wertschöpfungskette</i>	Gering <i>Ausarbeitung durch den Gesetzgeber. Relevant für den internationalen Wettbewerb und EU Beihilferecht.</i>	4 ▪ Markteintrittsbarrieren ▪ Wert sektorengekoppelter Energie kann nicht kommuniziert werden ▪ Kein Absatzmarkt ▪ Geringe Marktreife

Abbildung 32: Bewertung der Maßnahme „Quotenmechanismus für die Verwendung EE-basierter chemischer Produktgruppen“

6.5 Maßnahmenpaket – Wärme

6.5.1 Flexibilität und EE-Anteil von KWK erhöhen

Die Dekarbonisierung des Wärmesektors ist auch durch den Beitrag der Kraft-Wärme-Kopplung möglich und sollte weiter ausgebaut werden. Der Gesetzgeber hat hierfür mit dem Entwurf zur KWK-Ausschreibungsverordnung (KWKAusV) einen wichtigen Schritt getan. Die Rolle der Kraft-Wärme-Kopplung wird sich zukünftig in einem durch die Erneuerbaren Stromerzeuger dominierten elektrischen Energiesystem neu ausrichten müssen. Die KWK stellt hierbei per Definition eine Sektorenkopplungstechnologie dar. Die entscheidende Weichenstellung in Bezug auf eine Dekarbonisierung des KWK-Beitrags in Bezug auf den Anwendungsfall Wärme erfolgt vor allem durch die Anforderungen an eine

Flexibilisierung der Anlagen und den Anteil der eingesetzten Erneuerbaren Brennstoffe. Tendenziell werden Anlagenkonfigurationen, die den Flexibilitätsanforderungen gerecht werden, in Zukunft komplexer. Dieser Tatsache trägt die KWKAusV mit dem separaten Segment für innovative KWK-Systeme in Teilen Rechnung.

Der aktuelle Entwurf ist jedoch vor dem Hintergrund der langfristigen Rolle der KWK und deren Entwicklungsperspektive zu sehen, welche die Bundesregierung im Rahmen des Dialogprozesses Strom 2030 mit den Akteuren diskutiert und formuliert hat¹. Hierin wird die KWK weitestgehend als Übergangstechnologie interpretiert, welche insbesondere in Verbindung mit Wärmenetzen und für besondere Anforderungen der Industrie ihre Rolle im Energiesystem einnimmt. Gleichzeitig wird in Bezug auf die Raumwärme und Trinkwarmwasserbereitung stark in Richtung einer Reduzierung der Systemtemperaturen argumentiert, was wiederum den Einsatz von Geothermie (mit Wärmepumpen) und Solarthermie begünstigt.

Im Sinne der Sektorenkopplung und einer kurzfristigen verstärkten Dekarbonisierung des Wärmesektors sollten die Maßstäbe für die Flexibilisierung der KWK von den innovativen Segmenten auf alle auszuschreibenden KWK-Anlagen ausgedehnt werden. Auf diese Weise wird die Systemdienlichkeit der KWK zum Standard. Die Kombination von KWK-Anlagen mit angepasst großen Power2Heat-Modulen setzt Anreize für die Installation der Technik, bevor die finanziellen Anreize flexibler Netzentgelte und CO₂-Besteuerung greifen. In Bezug auf eine Intensivierung der Sektorenkopplung ist die Verpflichtung zu einer Volleinspeisung des erzeugten Stroms möglicherweise kontraproduktiv, da es zwar die Rolle der KWK zur Residuallastbereitstellung adressiert, komplexere innovative Konzepte mit höherer Eigenbedarfsnutzung (z.B. durch Wärmepumpen) vor dem Einspeisepunkt ausschließen.

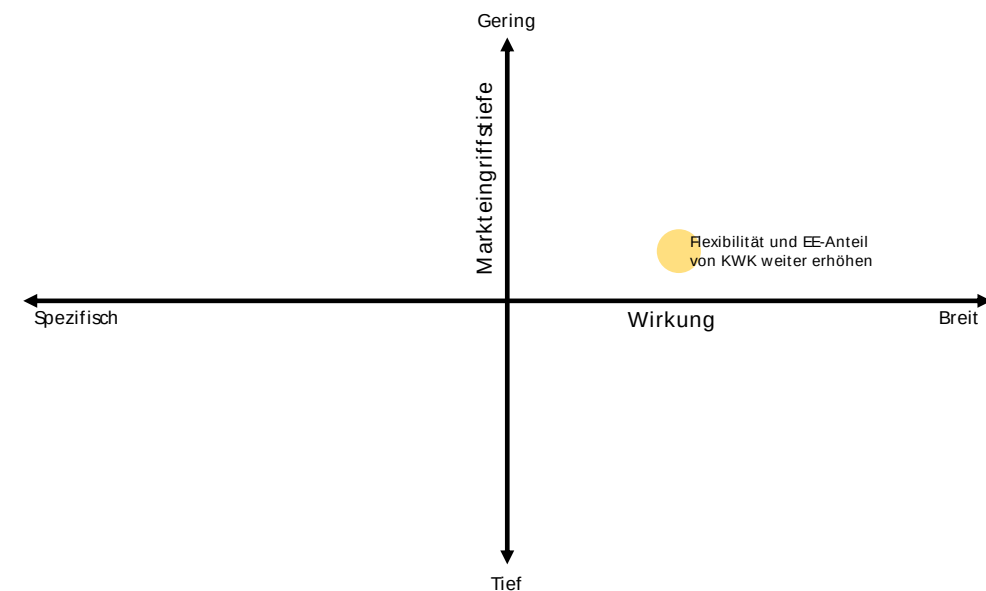
Um die Dekarbonisierung des Wärmesektors rasch voran zu bringen, wirken die Regelungen zur Mindestjahresarbeitszahl von 1,25 der Anlagen zur Erzeugung des erneuerbaren Wärmeanteils stark systembeschränkend, da sie ausschließlich von solarthermischen oder geothermischen Systemen erreicht werden können. Je nach Randbedingungen und lokalen Potenzialen kann aber auch eine (anteilige) Nutzung erneuerbarer Brennstoffe eine sinnvolle Systemvariante darstellen, die nicht per se ausgeschlossen werden sollte. Die besondere Bedeutung von solarthermischen Systemen und geothermischen Lösungen kann ggf. auf über ein gezieltes Marktanreizprogramm besonders hervorgehoben

¹ <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/moderne-kraftwerkstechnologien.html>

werden. Gleichzeitig sollte die EE-Quote im Wärmebereich weiter angehoben werden. Hier sind die avisierten 30 Prozent als sehr zurückhaltendes Ziel zu sehen.

Maßnahmen zur Förderung der
Sektorenkopplung

Die Maßnahme adressiert die Systemausrichtung und Bewertung von innovativen KWK-Anlagen innerhalb eines sektorenübergreifenden Energiesystems.



Wirkung	Markteingriffstiefe	Barrieren
Breiter <i>Große Teile der Wärmeversorgung in Verbindung mit Wärmenetzen und dezentraler Erzeugung</i>	Gering <i>Ausarbeitung durch den Gesetzgeber im Rahmen von nationalen Gesetzen und Verordnungen.</i>	2 ▪ Anreizregulierung ▪ Geringe Marktreife

Abbildung 33: Bewertung der Maßnahme „Flexibilität und EE-Anteil von KWK weiter erhöhen“

6.5.2

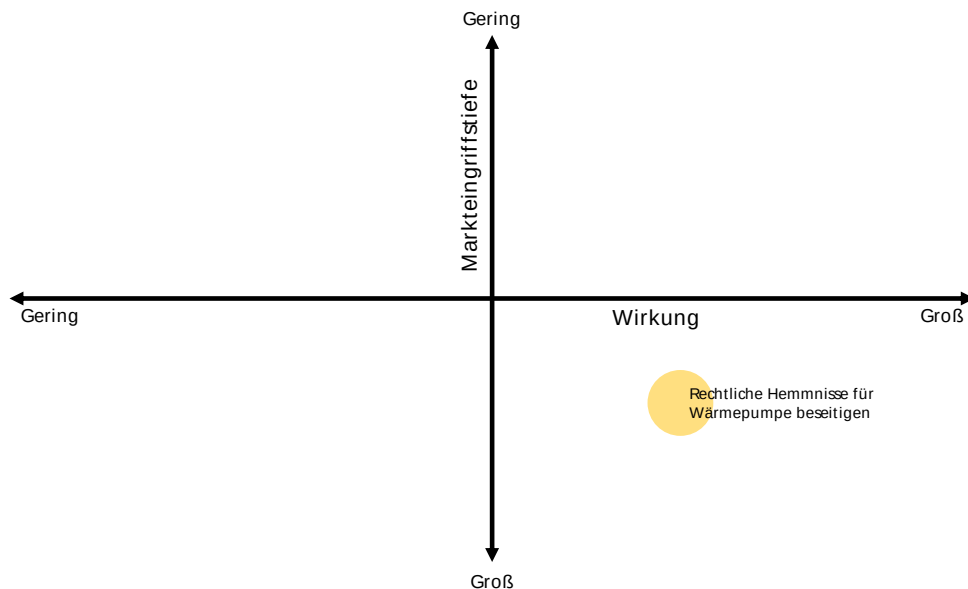
Rechtliche Hemmnisse für Wärmepumpen beseitigen

Um die Dekarbonisierung im Wärmebereich voran zu bringen, ist die Wärmepumpe eine wichtige Technologie. Allerdings bleiben die Zubauraten weiterhin hinter dem notwendigen Maß zurück. Dies hat zum einen mit einer Verunsicherung der Verbraucher aber auch Marktakteuren bezüglich eines „neuen“ Energieerzeugers zu tun, andererseits stehen die hohen Preise für elektrischen Strom bei gleichzeitig niedrigen Preisen für fossile Energieträger häufig einem Wechsel entgegen. Eine Vielzahl der Maßnahmen zur Flexibilisierung von Umlagen und zur Vergleichmäßigung der Belastungen für die verschiedenen Energieträger wirken sich positiv auf

die Attraktivität von Wärmepumpenlösungen aus. Zur Förderung des Wärmepumpenausbaus dienen daher nicht zuletzt die Entlastung der EEG-Umlage (Altlastenfonds, Industrieprivilegien) sowie die CO₂-Bepreisung in Form einer Energiesteuer mit CO₂-Komponente auf fossile Heizenergieträger mit Rückvergütung. Es sollte hier ein neues Zielmodell für die staatlich regulierten Preisbestandteile und Netzentgelte entwickelt werden wie bereits unter 5.3.1 beschrieben. Flexible Tarife können einen Anreiz für ein strommarktorientiertes Verbrauchsverhalten bieten und Wärmepumpen mit intelligenter Regelungstechnik in der Sektorenkopplung befördern.

Zum Abbau rechtlicher Hemmnisse für erdgekoppelte Wärmepumpen, wäre eine bundesweite Vereinheitlichung des rechtlichen Rahmens zur Genehmigung von Erdwärmeanlagen sinnvoll. Das Wasserhaushaltsgesetz sowie das Bergrecht werden in der Regel so ausgelegt, dass für die Nutzung von Erdwärme, insbesondere durch Erdwärmesonden, eine Erlaubnis erforderlich ist. Gleiches gilt für die immissionsschutzrechtlichen Bestimmungen für außen aufgestellte Luft-Wärmepumpen. Mit der TA Lärm steht eine allseitig anerkannte Grundlage zur Gewährleistung des Lärmschutzes zur Verfügung, die von den Behörden möglichst einheitlich und praxisgerecht angewendet werden sollte. Die zuständige Behörde kann durch die Formulierung von Nebenbestimmungen im Erlaubnisverfahren besondere Randbedingungen berücksichtigen. Lange Verfahren und stark unterschiedliche Vorgaben wirken sich hemmend auf die Umsetzung aus, so dass der Anteil der erdgebundenen Wärmepumpen weiter deutlich hinter den Luft-Wärmepumpen zurückbleibt.

Die Wettbewerbsfähigkeit von Wärmepumpen wird nicht nur von einem einzigen Faktor behindert sondern umfasst eine relativ komplexe Wechselwirkung aus Preissignalen, Marktverfügbarkeit und der Trägheit bei der Umsetzung von Technologiewechsels bei Entscheidungen von Einzelinvestoren. Die Durchsetzung von Wärmepumpen in der Wärmebereitstellung im Niedertemperaturbereich wird sich darum vermutlich weiterhin nur relativ langsam vollziehen.



Maßnahmen zur Förderung der
Sektorenkopplung

Wirkung	Markteingriffstiefe	Barrieren
Breiter <i>Durchdringung des Gebäudebereichs mit Wärmepumpen</i>	Tief Umfasst rechtliche, finanzielle und technische Aspekte sowie Probleme der Investoren- und Nutzerakzeptanz	3 ▪ <i>Fehlende Anreize durch Netzentgelte</i> ▪ <i>Kein Zugang zum Absatzmarkt</i> ▪ <i>Markteintrittsbarrie- ren</i>

Abbildung 34: Bewertung
der Maßnahme „Rechtliche
Hemmnisse für
Wärmepumpen “

6.5.3

Ordnungsrechtliche Impulse für erneuerbare Wärme Neubau und im Bestand setzen

Der Einbau von Wärmepumpen bietet sich derzeit besonders für die Umsetzung im Neubaubereich an und ist in diesem Bereich bereits eine erfolgreiche Technologie. Eine konsequente Umsetzung der EU-Gebäuderichtlinie (European Performance of Buildings Directive EPBD) in Bezug auf den „Niedrigstenergiestandard“ für Neubauten und Nutzungspflicht für Erneuerbare Energien wirkt darum förderlich für die Marktdurchdringung von Wärmepumpen. Je schneller die Anforderungen im Neubaubereich angehoben werden, umso besser lassen sich Lock-In-Effekte und Umsetzungsverzögerungen vermeiden. Für Neubauten sollte zudem ein flexibel aus unterschiedlichen Erzeugern zu beladender Wärmespeicher als technische Grundausstattung unabhängig von der eingesetzten Erneuerbaren Erzeugungstechnologie vorgesehen werden.

Über Wärmespeicher werden Energiebedarf und Energieerzeugung zeitlich entkoppelt und eine Sektorenkopplung Strom-Wärme ermöglicht.

Maßnahmen zur Förderung der
Sektorenkopplung

Die Einführung einer Nutzungspflicht für Erneuerbare Energien in der Gebäudesanierung und bei der Heizungserneuerung ist für die Dekarbonisierung des Wärmesektors elementar, da die Neubaurate im Vergleich zum Gebäudebestand nur einen minimalen Anteil ausmacht. Die Einführung einer Regelung zur Nutzung Erneuerbarer Energien im Gebäudebestand im Rahmen des Energieeinsparrechts unterstützen nicht nur Wärmepumpen, sondern auch Solarthermische und Biomasseanlagen im Gebäudebestand, so dass auch Gebäude mit Limitierungen bei der baulichen Energieeffizienz Technologieoptionen erhalten. In diesem Sektor erhält die Biomasse ihren besonderen Wert im Energiesystem. In diesem Zusammenhang sollte die Anrechnung der fossilen KWK-Anlagen als Ersatzmaßnahme gestrichen werden.

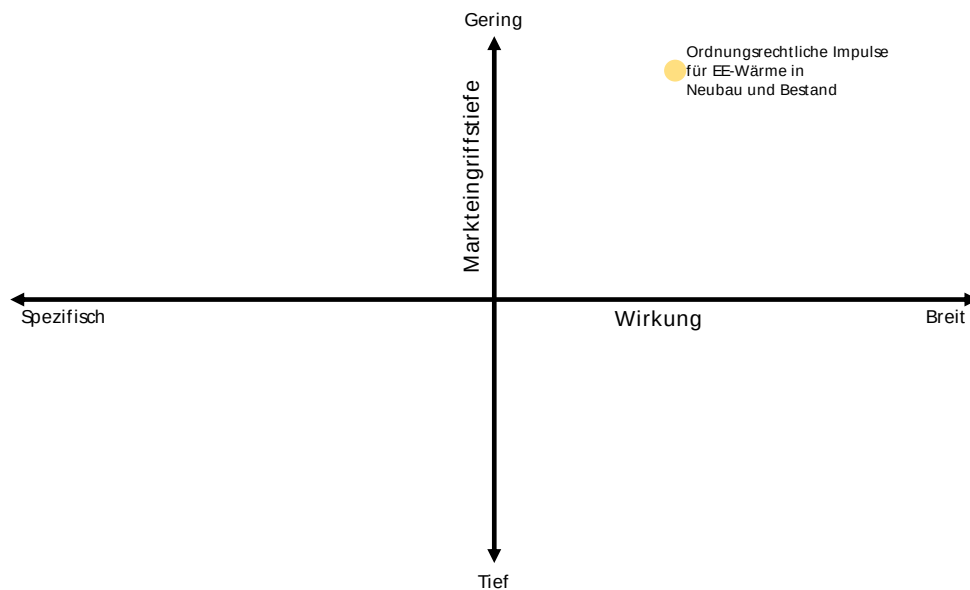
Die bestehenden Ausnahmen (für 1-2-Familienhäuser mit selbstnutzenden Eigentümern) bei der Austauschverpflichtung für Heizungsanlagen, die älter als 30 Jahre sind, sollten abgebaut werden, um die Gesamtaustauschrate und den Energieträgerwechsel zu beschleunigen. Insgesamt sollte der Vollzug bestehender Vorgaben zumindest stichprobenartig nach einer festen Quote überprüft werden. In die Austauschverpflichtung sollten neben Konstanttemperaturkessel auch alte Niedertemperaturkessel aufgenommen werden.

Die Technologie- und Brennstoffoffenheit, die derzeit im Bereich der Gebäudewärmeerzeugung in den Gesetzen und Verordnung verankert ist, wird den Klimazielen nicht gerecht. Sollen diese als Maßgabe für ein zukünftiges Technologieportfolio herangezogen werden, so muss diese grundsätzliche Brennstoffoffenheit aufgegeben werden, da mit keiner Technologie auf Basis fossiler Brennstoffe die Ziele erreicht werden können. Gasbrennwertkessel können als hocheffiziente Anlagen gleichwohl weiterhin Versorgungsaufgaben erfüllen. Eine anteilige Nutzung von Biomethan sowie Power2Gas in Brennwertkesseln kann als mittelbarer Treiber einer verstärkten Sektorenkopplung wirken. Im Gebäudebestand lassen sich über diesen Weg auch energetische ‚Problemfälle‘ dekarbonisieren. Die unterschiedlichen Versorgungsoptionen der Erneuerbaren Energien können auf diese Weise optimal ausgenutzt werden. Allerdings stellt sich hier die Frage des Vollzugs bzw. der Nachweisführung einer Biomethan- und Power2Gas-Nutzung in Brennwertkesseln.

Die Einführung einer CO₂-basierten Komponente der Brennstoffsteuer würde die Dekarbonisierung des Wärmesektors insgesamt unterstützen. Um die große Zahl der Bestandsanlagen zu adressieren und einen Energieträgerwechsel zu forcieren, sollten die bestehenden Ausnahmen

von den Austauschverpflichtungen im Rahmen des Energieeinsparrechts abgebaut und eine stichprobenartige Überprüfung vorgesehen werden.

Maßnahmen zur Förderung der
Sektorenkopplung



Wirkung	Markteingriffstiefe	Barrieren
Größer <i>EE-Wärmeanlagen können durch Gebäudebereich breit wirken</i>	Sehr gering <i>Zielfokussierte Umsetzung des GEG in Bezug auf EE-Anlagen als Leittechnologie</i>	1 ▪ <i>Regulatorischer Bedarf</i>

Abbildung 35: Bewertung der Maßnahme „Ordnungsrechtliche Impulse für EE-Wärme in Neubau und Bestand“

6.5.4

Erneuerbare Wärmenetze als verbindendes Element der Interaktion von Wärme- und Stromsektor ausbauen

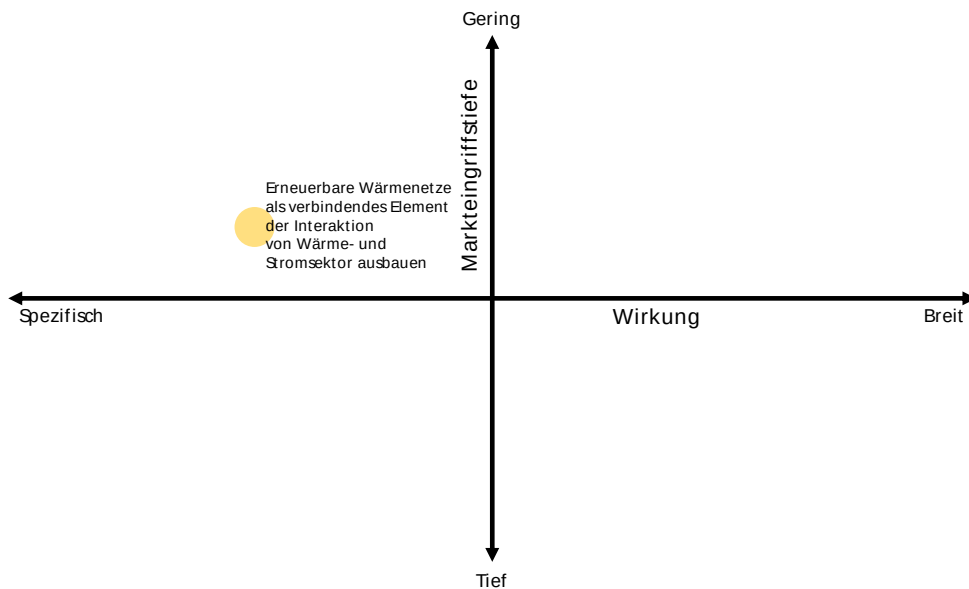
Über eine veränderte Erzeugerstruktur in der Nah- und Fernwärme lassen sich relativ schnell und kostengünstig größere Abnehmergruppen dekarbonisieren. Hierfür müssen in der Nah- und Fernwärme die entsprechenden Anreize geschaffen werden. Derzeit ist es noch möglich, über rein fossil befeuerte KWK eine Anerkennung auf Ausgleich im Sinne des EEWärmeG zu erhalten. Dies kommt vor allem durch günstige Primärenergiegutschriften für eingespeisten Strom zustande. Um einen tatsächlichen Anreiz für einen Energieträgerwechsel zu setzen, sollte eine Erneuerbare-Energien-Quote für Nah- und Fernwärmenetze eingeführt werden, die als Voraussetzung für die Anerkennung als Ausgleichsmaßnahme gilt.

Optionen für dezentrale Einspeisung von Erneuerbaren Energien sollten weiterentwickelt werden. Da es bei der dezentralen Einspeisung in thermische Netze noch eine Vielzahl von technischen Problemstellungen zu lösen gilt, sollten Pilotvorhaben (Wärmenetze der 4. Generation. LowEx-Netze¹, Niedertemperaturnetze) weiterhin gefördert werden, um Investitionsrisiken abzubauen. Für eine kurzfristige Umsetzung könnte auch eine Absicherung von bestimmten Investitionsrisiken bei innovativen Versorgungskonzepten den Betreibern helfen, neue Wege in der Fernwärmeversorgung zu beschreiten. In ähnlicher Weise sollte geprüft werden, inwiefern eine Erneuerbare Energien Quote für Prozesswärme und –kälte eingeführt werden kann.

Wärmenetze erlauben neue Konzepte der Sektorenkopplung, deren Notwendigkeit sich aus dem raschen Ausbau der erneuerbaren Energien im Strombereich ergibt. Die angeschlossenen Stromverbraucher und -erzeuger müssen eine bidirektionale Schnittstelle für einen markt- oder netzdienlichen Betrieb ohne manuelle Eingriffe des Betreibers aufweisen und mit offenen, d.h. herstellerunabhängigen Kommunikationsprotokollen funktionieren. Optimierungs- und Steuerungstechnologien, im Rahmen einer Integration in die Systematik der Virtuellen Kraftwerke (VPP), in Hard- und Software sind hierfür zwingend erforderlich. Zusätzliche großzügig dimensionierte Energiewandler im Wärmenetz (Wärmepumpen, Direktheizer) sowie zusätzliche Wärmespeicher (neben der Speicherfähigkeit des Netzes) erlauben die rasche Verschiebung von lokalen Stromangeboten in den Wärmesektor.

Insgesamt sollte der Anteil der über Nah- und Fernwärmenetze versorgten Gebäude deutlich gesteigert werden. Auf diese Weise verschiebt sich die Maßnahme auf der X-Achse in Richtung einer höheren Wirksamkeit. Der Ausbau von Nah- und Fernwärmenetzen kann durch den Abbau regulatorischer Hemmnisse im BauGB, GWB, EEWärmeG und EnEG/EnEV befördert werden. Ebenso sind eine kommunale Wärmeplanung sowie der Ausbau von Anreizen und Förderungen sinnvoll, da es sich bei Wärmenetzen um hochinvestive langfristige Infrastrukturmaßnahmen handelt. Eine wirksame Unterstützung von Unternehmen und Betreibern ist hier insbesondere außerhalb der derzeitigen Fernwärmebereiche erforderlich.

¹ „Systeme, die Energie mit geringem Exergie-Aufwand bereitstellen, werden als LowEx-Systeme bezeichnet. Darunter fallen beispielsweise Wärmerückgewinnung, Nutzung von Abwärme, Nutzung von Umgebungstemperatur, Nieder-Temperatur-Heizsysteme und Hoch-Temperatur-Kühlsysteme etc.“ (Kranzl et al. 2012)



Maßnahmen zur Förderung der
Sektorenkopplung

Wirkung	Markteingriffstiefe	Barrieren
Breiter <i>Betrifft den FW-Anteil des Wärmesektors mit steigenden Anteilen und Verknüpfung mit dem Strom und Industriesektor.</i>	Gering <i>Betrifft nur Gesetzgeber und Versorgungsunternehmen.</i>	2 ▪ <i>Fehlende Anreize</i> ▪ <i>Fehlende Marktdurchdringung</i>

Abbildung 36: Bewertung der Maßnahme „Erneuerbare Wärmenetze als verbindendes Element der Interaktion von Wärme- und Stromsektor ausbauen“

6.5.5

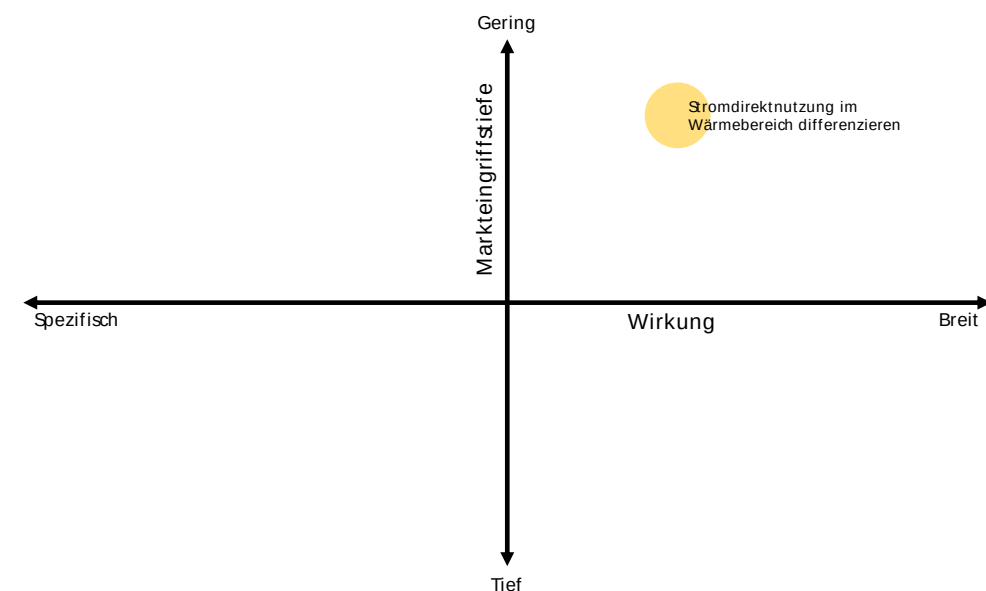
Stromdirektnutzung im Wärmebereich differenzieren

Die Anrechenbarkeit von gebäudenah erzeugtem EE-Strom muss in den Berechnungsverfahren für die Nutzungsverpflichtung Erneuerbarer Energien weiterentwickelt und über differenziertere Lastprofile abgebildet werden, da sie derzeit in den Berechnungsvorschriften noch sehr grob als Monatsbilanzen angelegt ist. Im Rahmen einer optimierten Sektorenkopplung sollte der Investor in der Lage sein, den Einsatz seines dezentral erzeugten EE-Stroms über die verschiedenen Nutzungsoptionen zu optimieren. Dies kann über eine Netzeinspeisung (bei übergeordnetem Bedarf), der Sektorenkopplung zum E-Fahrzeug oder auch der Nutzung in der Gebäudewärme mittels Wärmepumpen sein. Bei einer Direktnutzung durch eine Wärmepumpe sind dabei die Implikationen auf den Stromaustausch mit dem Netz zu berücksichtigen und z.B. in den Standardlastprofilen zu erfassen. Zeitliche Differenzen zwischen der EE-Erzeugung und dem Wärmebedarf können durch Wärmespeicher

ausgeglichen werden und erlauben so die Vermarktung von Flexibilität. Optimierungsziel eines entsprechenden Anreizsystems sollte die Dekarbonisierung des Gesamtsystems sein. Dies bedeutet auch, dass die unmittelbar lokale Herkunft des verbrauchten EE-Stroms gewährleistet sein muss, da anderweitig Strom aus nicht-regenerativen Quellen stammen könnte. Eine Anrechenbarkeit im Sinne der EnEV und des EEWärmeG wäre in diesem Fall dann auszuschließen.

Maßnahmen zur Förderung der
Sektorenkopplung

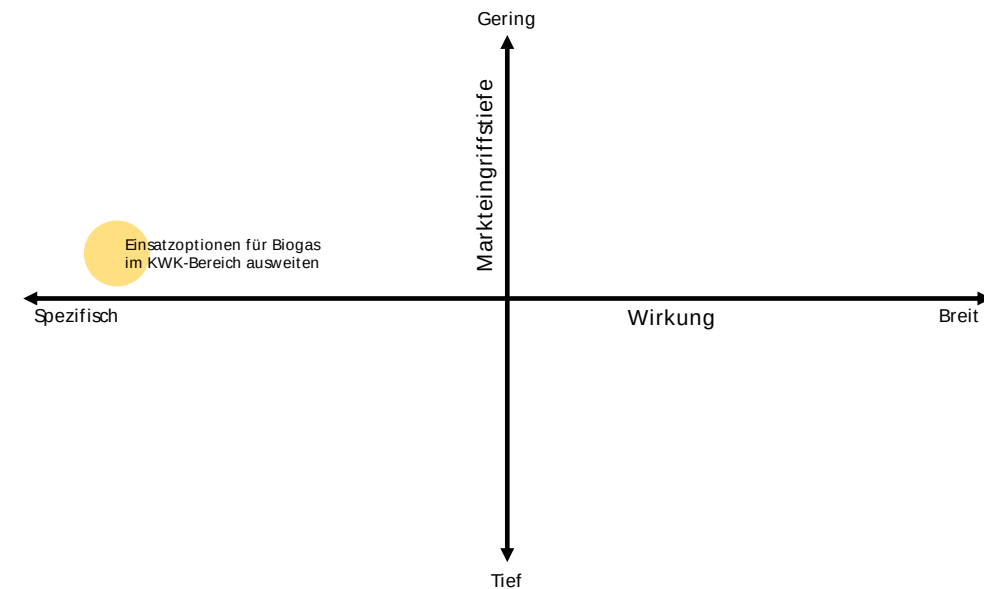
Bei entsprechender Zielfokussierung steht einer differenzierteren Betrachtung und Bewertung der netzdienlichen Eigenstromoptimierung nichts im Wege. Allerdings stellen die Komplexität der Bewertung insbesondere im Hinblick auf die Wirkung im Gesamtsystem nicht unerhebliche Herausforderungen dar, um eine möglichst realistische Abschätzung zu erhalten. Bei der Umsetzung fehlen derzeit noch zuverlässige und geprüfte Technologien an der Schnittstelle zwischen Versorger und Abnehmer. Hier können verbesserte finanzielle Anreize zukünftig Impulse geben.



Wirkung	Markteingriffstiefe	Barrieren
Breiter <i>Maßnahme adressiert P2H-Technologien und Eigenbedarfsoptimierung, kann aber durch Gebäudebereich breit wirken</i>	Sehr gering <i>Zielfokussierte Umsetzung des GEG in Bezug auf systemdienliche Eigenstrom-optimierung</i>	3 ▪ <i>Fehlende Anreize durch Netzentgelte</i> ▪ <i>Markteintrittsbarrieren</i> ▪ <i>Geringe Marktreife</i>

Abbildung 37: Bewertung der Maßnahme „Stromdirektnutzung im Wärmebereich differenzieren“

Damit die Biomasse ihrer Rolle in einem flexiblen Energiesystem gerecht werden kann, sollten ihre Einsatzoptionen weiter flexibilisiert werden. Wie bereits bei (Hauser et al. 2014) gezeigt wurde, bietet die Biomasse wichtige Aspekte, um das Energiesystem insgesamt zu flexibilisieren. Das wesentliche Ziel des Einsatzes von Biomasse liegt im Ersetzen von konventionellen must-run Kapazitäten. Hierfür erforderlich ist eine verbesserte Ertragssituation der flexiblen Anlagen mit reduzierten Laufzeiten: „Dementsprechend sollte der Gesetzgeber daran arbeiten, dass noch bestehende Hemmnisse für den Einsatz von Bioenergie als Regelenergie abgebaut werden (weitere Verkürzung der Angebotszeiträume, Annäherung der Handelszeitpunkte an die Erfüllungszeitpunkte, weiteres Synchronisieren der Handelszeitpunkte der Kilowattstundenmärkte und der Regelenergiemärkte, Aufhebung der Netzentgeltspflicht bei Erbringung positiver Regelleistung). Umgekehrt sollte durch entsprechende Regelungen erreicht werden, dass die Bioenergieanlagen weniger ‚spotmarktpreisfixiert‘ agieren.“ (ebenda S.67). Einen wesentlichen Anteil an den bereits bestehenden Flexibilisierungspotentialen macht die Modernisierung von Bestandsanlagen aus. Diese können über Investitionsanreize beispielsweise für Speicher in Kombination mit einer KWK-Nutzung realisiert werden. Im Rahmen einer weitergehenden Sektorenkopplung sollte die Nutzung von biogenen Gasen und anderen biogenen Energieträgern (NaWaRo) in der stofflichen Nutzung außerhalb der Energiesysteme besser erschlossen und über den regulatorischen Rahmen und Anreizsysteme gefördert werden.



Maßnahmen zur Förderung der
Sektorenkopplung

Wirkung	Markteingriffstiefe	Barrieren
Sehr gering <i>Betrifft in erster Linie KWK-Anlagen, zukünftig stärkere Auswirkungen im Rahmen von Sektoren-kopplung zur stofflichen Nutzung</i>	Eher gering <i>Neuregelungen im Rahmen des KWKG und EEG erforderlich</i>	3 ▪ <i>Fehlende Anreize durch Netzentgelte</i> ▪ <i>Markteintrittsbarrieren</i> ▪ <i>Wert sektorengekoppelter Energie kann nicht kommuniziert werden</i>

Abbildung 38: Bewertung der Maßnahme „Einsatzoptionen für Biogas im KWK-Bereich ausweiten“

6.5.7

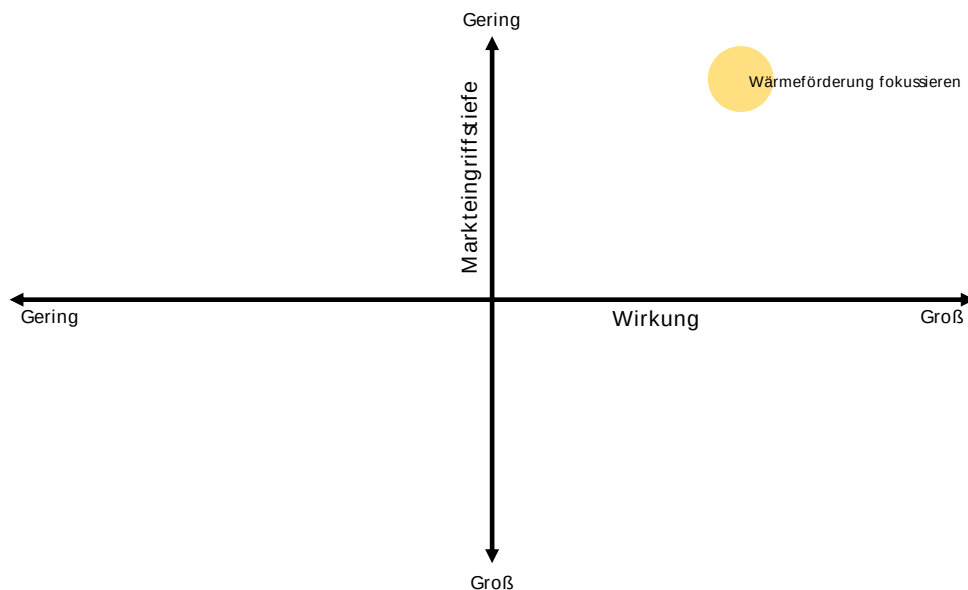
Wärmeförderung fokussieren

Das Marktanreizprogramm für Erneuerbare Energien ist ein sinnvolles Instrument und sollte fortgeführt werden, da es zum Abbau von Vorbehalten auf der Nutzerseite beiträgt und EE-Wärmeanlagen durch die stärkere Verbreitung zur „Normaltechnik“ werden. Dies gilt nicht zuletzt für Sektorenkopplungstechnologie Wärmepumpe. Ergänzend zur Förderung von Erzeugungstechnologien im Wärmebereich sollte die Förderung von Wärmespeichern erfolgen, um die Sektorenkopplung in der Umsetzung zu beschleunigen.

Die Förderung ist aufgrund der weiterhin höheren Investitionskosten von Erneuerbaren Wärmeanlagen und Sektorenkopplungstechnologien im Wärmebereich weiterhin notwendig und sollte verstärkt auf diese ausgerichtet sowie weiter verbessert werden. Hierzu würden eine

Vereinfachung der Förderverfahren sowie die Abschaffung einer Förderung für CO₂-intensive Technologien beitragen.

Maßnahmen zur Förderung der
Sektorenkopplung



Wirkung	Markteingriffstiefe	Barrieren
Eher groß <i>Betrifft EE- Wärmeanlagen und Wärmespeicher, insgesamt großes Marktpotenzial</i>	Eher gering <i>Anpassung der MAP erforderlich</i>	3 ▪ <i>Fehlende Anreize durch Netzentgelte</i> ▪ <i>Markteintrittsbarrie- ren</i> ▪ <i>Wert sektorengekoppelter Energie kann nicht kommuniziert werden</i>

Abbildung 39: Bewertung
der Maßnahme
„Wärmeförderung
fokussieren“

6.6

Maßnahmenpaket – P2P-Trading

6.6.1

Regulatorischer Rahmen für Mikrotransaktionen in einem 'Bilanzkreissystem light' schaffen

Der Austausch von Energie zwischen den Teilnehmern von öffentlichen Versorgungsnetzwerken ist durch ein regulatorisches Regelwerk bestimmt. Alle Verbraucher und Erzeuger werden in sogenannten Bilanzkreisen zusammengefasst, welche zur Bilanzierung innerhalb der Regelzone genutzt werden, ohne weiteren regionalen Bezug. Für Verbraucher und Erzeuger, welche keinen eigenen Bilanzkreis bewirtschaften, kann Energie

nur über den Bilanzkreis des Versorgers bzw. des Netzbetreibers untereinander ausgetauscht werden. Dies geschieht entweder bilateral (z.B. Stromliefervertrag) oder durch regulatorische Maßnahmen (z.B. EEG).

Die feste Zuordnung zu Bilanzkreisen limitiert die Interaktion der Verbraucher und Erzeuger auf wenige Optionen, welche durch den Versorger oder Regularien angeboten werden. Lokale (Mikro-)Transaktionen können somit nur durch die Intermediäre durchgeführt werden. Dies verhindert effektiv den Handel zwischen kleineren Einheiten im Energiesystem, d.h. dass zum Beispiel der Handel von Energie von einem Haus zu einem anderen Haus in derselben Straße (de facto) nicht möglich ist.

Vielen lokalen Effekten, welche durch die Einspeisung von Erneuerbarer Energie entstehen könnten, könnte durch Mikrotransaktionen begegnet werden. Die lokale Optimierung von Erzeuger, Speichern und Verbraucher könnte den Netzausbaubedarf verringern und die lokale Wirtschaft stärken. Der großen Anzahl an Solaranlagen (über eine Million), Speichern und flexiblen Verbrauchern steht eine relativ geringe Anzahl an Bilanzkreisen (einige Tausend) gegenüber. Die Dezentralität bringt das bisherige Bilanzierungssystem an seine Grenzen und führt zu einer ineffizienten Bewirtschaftung des Energiesystems.

Im Sinne der Sektorenkopplung kommt insbesondere der Kopplung mit der Elektromobilität und der Wärmeerzeugung eine besondere Bedeutung zu. Die Integration der Verbrauchsseite hilft hier. Der Fokus liegt somit auf dem Elektrizitätsnetz, kann jedoch auch auf das Erdgasnetz angewandt werden.

Die Maßnahme sieht die Einführung eines „Bilanzkreissystems light“ vor, welches die Möglichkeit für Mikrotransaktionen schafft, ohne dabei den Betrieb des Energiesystems als Ganzes zu gefährden. Ziel der Maßnahme ist es dabei, die Möglichkeiten für eine Reihe unterschiedlicher Anwendungsbereiche zu erlauben. D.h. es besteht keine Präferenz gegenüber der genutzten Technologie oder der Geschäftsmodelle, die durch die Verbraucher und Erzeuger genutzt und entwickelt werden.

Die Isolierung der Mikrotransaktionen vom „normalen“ Bilanzierungssystem erlaubt Freiraum und bietet einen „Sandkasten“ (Sandboxing) für neue Geschäftsmodelle, bevor diese in das Energiesystem integriert werden.

Die Maßnahme erlaubt es mehreren Nutzern im Energiesystem miteinander zu interagieren, ohne dass dies über einen dezidierten Bilanzkreis geschehen muss. Die Kommunikationswege sind dabei frei wählbar und die Kommunikation kann direkt zwischen den Beteiligten ausgeführt werden. Die Transaktionen werden durch die Nutzer selber erfasst. Die getätigten Transaktionen müssen registriert und dem

jeweiligen lokalen Netzbetreiber zur Verfügung gestellt werden. Sind mehrere Netzbetreiber betroffen, sind diese entsprechend zu informieren.

Maßnahmen zur Förderung der
Sektorenkopplung

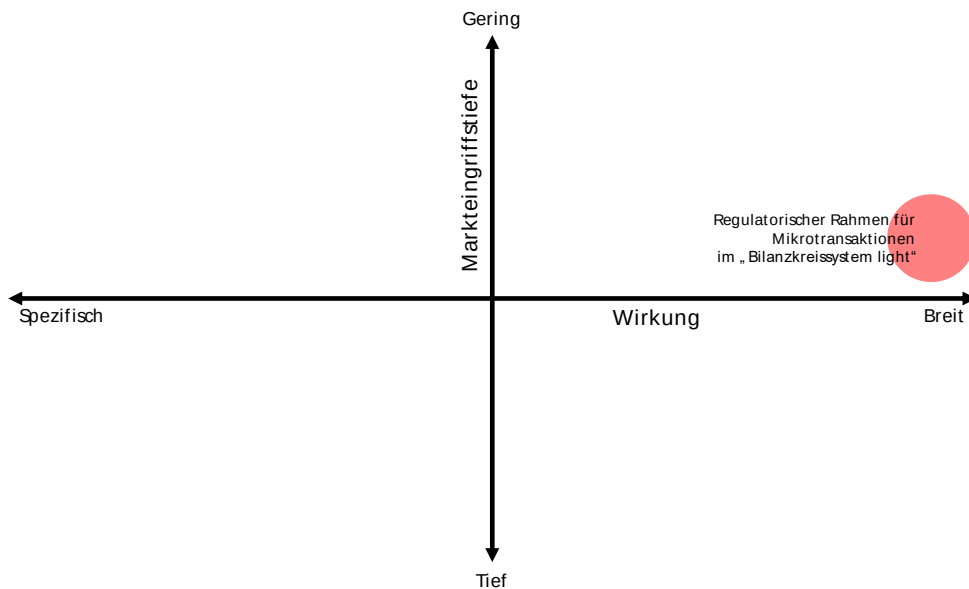
Die Anlagen, welche die Option wählen, verpflichten sich dazu, das Energiesystem nicht zu gefährden und die Sektorenkopplung zu fördern. Die Prinzipien der Energieeffizienz und Umweltverträglichkeit sind anzuwenden.

Um die Systemsicherheit nicht zu gefährden, wird die Anzahl der Anlagen begrenzt. Lokal darf die Summe der installierten Leistung aller teilnehmender Anlagen (Verbraucher, Speicher und Erzeuger) 10 % der vertikalen Netzlast nicht übersteigen. Die Zustimmung des lokalen Netzbetreibers ist erforderlich und kann nur begründet abgelehnt werden.

Die Nutzung von einem Mikrotransaktionssystem erlaubt den Aufbau von „Smart Markets“, in denen Solaranlagen, Batteriespeicher, Elektromobile und elektrische Wärmerzeuger handeln. Dies kann sowohl innerhalb eines Haushalts oder Gewerbebetriebs sein (Behind-the-Meter), wie auch über verschiedene Liegenschaften verteilt (Block Chain). Smart Meter können in den Geschäftsmodellen eine Rolle spielen, sind aber nicht zwingend notwendig. Die Mikrotransaktionen können Distributed-Ledger-Technologie oder zentrale Systeme nutzen.

Durch die Implementierung von P2P-Trading können Nachbarschaftsmodelle zur Energieversorgung gewählt werden. Beispielsweise kann ein lokaler Windpark Energie an Industrieunternehmen und Haushalte liefern. Angenommen, das Industrieunternehmen hat größere Wärmelasten und kann diese flexibel bedienen, stellt es im Gegenzug Flexibilität bereit, um die Schwankungen der Windeinspeisung zu vermindern. Flexibilität wird ebenso auf der Haushaltsseite durch Wärmepumpen, Elektromobile und Batteriespeicher bereitgestellt.

Die Regelungen betreffen das regulatorische Rahmenwerk und werden maßgeblich durch den Gesetzgeber und die BNetzA bestimmt. Die Begrenzung der Leistung verhindert große Auswirkungen in der Experimentierphase, die Implikationen später können aber erheblich sein. Die möglichen Änderungen der disruptiven Geschäftsmodelle im Energiesystem werden sich besonders bei Verteilnetzbetreibern und Energieversorgern bemerkbar machen. Um die innovativen P2P-Geschäftsmodelle umzusetzen, werden erhebliche Änderungen an den Marktregeln für die Durchführung der Bilanzkreisabrechnung Strom (MaBiS) (Bundesnetzagentur 2009) notwendig werden.



Maßnahmen zur Förderung der
Sektorenkopplung

Wirkung	Markteingriffstiefe	Barrieren
Sehr breit <i>Alle Teile des Energiesystems möglich, insbesondere für Transaktionen auf der Strom und Gasseite und Interaktionen mit dem Mobilitätssektor</i>	Eher groß <i>Ausarbeitung durch den Gesetzgeber Durchführung durch BNetzA.</i>	4 - Kein Zugang zum Absatzmarkt - Fehlender regulatorischer Rahmen für Speicher - Wert sektorengekoppelter Energie kann nicht kommuniziert werden - Transaktionskosten

Abbildung 40: Bewertung der Maßnahme „Regulatorischer Rahmen für Mikrotransaktionen in einem 'Bilanzkreissystem light'“

6.7

Zusammenfassung der Maßnahmen

Alle in der Studie vorgestellten Maßnahmen fördern die Sektorenkopplung auf unterschiedliche Art und Weise. Die Maßnahmen wurden priorisiert und in drei Handlungsbereiche unterteilt: „Spezifische Förderung“, „Sofortige fokussierte Umsetzung“ sowie „Längerfristige Zukunftsinvestition“.

Die folgenden Maßnahmen sollten zeitnah umgesetzt werden und fallen in die Kategorie „Sofortige fokussierte Umsetzung“, die ersten drei Maßnahmen bilden eine Gruppe an Maßnahmen, welche geeignete Rahmenbedingungen für Energiespeicherung schaffen:

- Umsetzung der Innovationsausschreibungen anhand des „Innovation Balancing“ Konzeptes

- Alternative Nutzung von Strom-Überangeboten ermöglichen
- Einbezug von alternativer Nutzung und Speicherung in die Förderung
- Stromsteuer durch sektorenübergreifende CO₂-Bepreisung ersetzen
- Regulatorischer Rahmen für Mikrotransaktionen in einem 'Bilanzkreissystem light' schaffen
- Förderung klimaneutraler Mobilität
- Stromdirektnutzung im Wärmebereich differenzieren
- Ordnungsrechtliche Impulse für erneuerbare Wärme Neubau und im Bestand setzen
- Wärmeförderung fokussieren
- Flexibilität und EE-Anteil von KWK erhöhen

Diese Maßnahmen fallen in die Kategorie „Längerfristige Zukunftsinvestition“:

- Einführung von Null-Emissionszonen
- Rechtliche Hemmnisse für Wärmepumpen
- Netzentgelte in Infrastrukturabgabe überführen
- EEG-Umlage flexibilisieren
- Netzentgelte flexibilisieren
- Quotenmechanismus für die Verwendung EE-basierter chemischer Produktgruppen

Diese Maßnahmen, die „Spezifische Förderung“ voraussetzen, sind vielversprechende Einzelanwendungen der Sektorenkopplung:

- Erneuerbare Wärmenetze als verbindendes Element der Interaktion von Wärme- und Stromsektor ausbauen
- Förderung E-Mobilität in Flotten
- Doppelbelastung von Letztverbrauchsabgaben für Speicher abschaffen
- Ausschreibung und Steuerfinanzierung einer festen Menge an EEG-Umlagebefreiungsprivilegien

Agora Energiewende (2014): Der Spotmarktpreis als Index für eine dynamische EEG-Umlage. Vorschlag für eine verbesserte Integration Erneuerbarer Energien durch Flexibilisierung der Nachfrage. Unter Mitarbeit von Andreas Jahn, Barbara Praetorius, Christian Nabe und Marian Bons. Hg. v. Agora Energiewende. Regulatory Assistance Project, Ecofys. Berlin. Online verfügbar unter https://www.agora-energieswende.de/fileadmin/Projekte/2014/dynamische-eeu-umlage/Agora_RAP_Spotmarktpreis_als_Index_fuer_dyn_EEG-Umlage_web.pdf, zuletzt geprüft am 05.09.2017.

Agora Energiewende (2016): Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2016. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2017. Unter Mitarbeit von Patrick Graichen, Mara Marthe Kleiner und Christoph Podewils. Hg. v. Agora Energiewende. Berlin. Online verfügbar unter https://www.agora-energieswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Jahresauswertung_2016/Agora_Jahresauswertung-2016_WEB.pdf, zuletzt geprüft am 05.09.2017.

Agora Energiewende; I²Energy; Regulatory Assistance Project (RAP) (2017): Energiewende und Dezentralität. Zu den Grundlagen einer politisierten Debatte. Online verfügbar unter https://www.agora-energieswende.de/fileadmin/Projekte/2016/Dezentralitaet/Agora_Dezentralitaet_WEB.pdf, zuletzt geprüft am 13.09.2017.

Albrecht, Uwe; Altmann, Matthias; Michalski, Jan; Raksha, Tetyana; Weindorf, Werner (2013): Analyse der Kosten erneuerbarer Gase. Hg. v. Bundesverband Erneuerbare Energien (BEE) e.V.

BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (Hg.) (2017): Stellungnahme zum Entwurf eines Gesetzes zur Einsparung von Energie und zur Nutzung Erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden Gebäudenergiegesetz (GEG).

BEE (2015a): Kursbuch Energiewende - Ein Leitbild für 100 % Erneuerbare Energien in Wärme, Strom und Mobilität. Online verfügbar unter https://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Präsentationen/Kursbuch_Energiewende_-_Ein_Leitbild_für_100__Erneuerbare_Energie_in_Strom__Wärme_und_Mobilität.pdf, zuletzt geprüft am 13.09.2017.

BEE (2015b): Satzung lt. 17.06.2016. Online verfügbar unter https://www.bee-ev.de/fileadmin/20150617_BEE-Satzung_final.pdf, zuletzt geprüft am 13.09.2017.

BEE (2017a): Effizient Erneuerbar: Was jetzt zum Gelingen einer Erneuerbaren Wärmewende getan werden muss. BEE-Positionspapier CO₂-Steuer mit Rückerstattungsmodell in der Wärmeversorgung. Hg. v. Bundesverband Erneuerbare Energien (BEE) e.V. Berlin.

BEE (2017b): Wirkungsweise und Umsetzung einer CO₂-Steuer im Strommarkt. BEE Bundesverband der Erneuerbare Energie e.V. Berlin, 12.07.2017. Online verfügbar unter https://www.bee-ev.de/fileadmin/user_upload/BEE-Studie_CO2_Steuer_12Jul2017.pdf, zuletzt geprüft am 13.09.2017.

Bellini, Emiliano (2017): Saudi-Arabien: Photovoltaik-Ausschreibung verzeichnet Niedrigstgebot von 1,5 Cent. Hg. v. pv-magazine. Online verfügbar unter <https://www.pv-magazine.de/2017/10/04/saudi-arabien-photovoltaik-ausschreibung-verzeichnet-niedrigstgebot-von-15-cent/>.

Bitnere, Kristine: The European Commission's renewable energy proposal for 2030. Online verfügbar unter http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/RED%20II_ICCT_Policy-Update_vF_jan2017.pdf, zuletzt geprüft am 08.09.2017.

BMVI (2017): BMVI - Startschuss für das Bundesprogramm Ladeinfrastruktur. Online verfügbar unter <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2017/019-dobrindt-e-ladesaeulenoffensive.html>, zuletzt geprüft am 08.09.2017.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hg.) (2015): Zweiter Erfahrungsbericht zum Erneuerbare-Energien-Wärmegezet. Online verfügbar unter http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/zweiter-erfahrungsbericht-erneuerbare-energien-waermegesetz.pdf?__blob=publicationFile&v=8, zuletzt geprüft am 12.09.2017.

Bundesnetzagentur (2009): Marktregeln für die Durchführung der Bilanzkreisabrechnung Strom (MaBiS). Bonn. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Service-Funktionen/Beschlusskammern/Beschlusskammer6/BK6_g1_Bilanzkreisabrechnung/bilanzkreisabrechnung-node.html, zuletzt geprüft am 08.09.2017.

Bundesnetzagentur (2015): Netzentgeltsystematik Elektrizität. Bericht der Bundesnetzagentur zur Netzentgeltsystematik Elektrizität. Hg. v. Bundesnetzagentur. Bonn. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Netzentgelte/Netzentgeltsystematik/Bericht_Netzentgeltsystematik_12-2015.pdf?__blob=publicationFile&v=1, zuletzt geprüft am 06.09.2017.

Bundesnetzagentur: Beschluss BK6-15-158. Online verfügbar unter <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Service->

Funktionen/Beschlusskammern/1BK-Geschaefitszeichen-Datenbank/BK6-GZ/2015/2015_0001bis0999/BK6-15-158/BK6-15-158_download_Beschluss_vom_13_06_2017.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 10.08.2017.

Bundesnetzagentur (2017a): Beschluss BK6-15-159. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Service-Funktionen/Beschlusskammern/1BK-Geschaefitszeichen-Datenbank/BK6-GZ/2015/2015_0001bis0999/BK6-15-159/BK6-15-159_download_Beschluss_vom_13_06_2017.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 10.08.2017.

Bundesnetzagentur (2017b): Übersicht Strom- und Gasnetzbetreiber. Listen der Netzbetreiber und Versorgungsunternehmen. Bundesnetzagentur. Bonn. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/DatenaustauschundMonitoring/UnternehmensStammdaten/Uebersicht_Netzbetreiber_VersorgUnternehmen/UebersichtStromUndGasnetzbetreiber_node.html, zuletzt geprüft am 06.09.2017.

Bundesnetzagentur; Bundeskartellamt (2016): Monitoringbericht 2016. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/DatenaustauschUndMonitoring/Monitoring/Monitoringbericht2016.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 05.09.2017.

Bundesverband Wärmepumpe e.V. (bwp) (2015): BWP-Branchenstudie 2015 Szenarien und politische Handlungsempfehlungen. Hg. v. Bundesverband Wärmepumpe e.V. (bwp). Online verfügbar unter https://www.waermepumpe.de/fileadmin/user_upload/waermepumpe/07_Publikationen/2016-04-08_B Branchenprognose_2015_web.pdf, zuletzt geprüft am 11.09.2017.

Bünger, U.; Landinger, H.; Pschorr-Schoberer, E.; Schmidt, P.; Weindorf, Werner; Jöhrens, J. et al. (2014): Power-to-Gas (PtG) im Verkehr Aktueller Stand und Entwicklungsperspektiven.

Canzler, Weert; Knie, Andreas (2015): Die neue Verkehrswelt. Mobilität im Zeichen des Überflusses: schlau organisiert, effizient, bequem und nachhaltig unterwegs. Eine Grundlagenstudie im Auftrag des BEE e.V. Hg. v. Bundesverband Erneuerbare Energien (BEE) e.V. InnoZ - Innovationszentrum für Mobilität und gesellschaftlichen Wandel. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Studien/Plattform/BEE-Plattform-Systemtransformation-Die_neue_Verkehrswelt.pdf, zuletzt geprüft am 30.10.2017.

COMM/DG/UNIT (2017): Fuel Quality - Climate Action - European Commission. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/fuel_en, zuletzt aktualisiert am 08.09.2017, zuletzt geprüft am 08.09.2017.

Dörr, Holger; Kröger, Kerstin; Graf, Frank; Köppel, Wolfgang; Burmeister, Frank; Senner, Janina et al. (2016): Untersuchungen zur Einspeisung von Wasserstoff in ein Erdgasnetz. In: *energie | wasser-praxis*, S. 50–59. Online verfügbar unter http://www.dvgw-ebi.de/download/ewp_1116_50-59_Kroeger.pdf, zuletzt geprüft am 13.09.2017.

Energy Brainpool (2017): Ein wirksamer Preis für CO₂ im Stromsektor. Mit einer nationalen CO₂-Steuer lassen sich die Klimaschutzziele erreichen. Bundesverband Erneuerbare Energien (BEE) e.V. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bee-ev.de/fileadmin/Veranstaltungen/Bundestagswahl_2017/BEE-Flyer_Ein_wirksamer_Preis_fuer_CO2_im_Stromsektor_2017.pdf, zuletzt geprüft am 26.09.2017.

Friedrich, K. Andreas; Noack, Christoph; Bünger, Ulrich; Michalski, Jan; Crotogino, Fritz; Donadei, Sabine et al.: Power-to-Hydrogen: Technische und Ökonomische Bewertung von Wasserstoff als Energieträger und -Speicher. Hg. v. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Online verfügbar unter http://elib.dlr.de/92123/1/Lampoldshausen_af.pdf.

Gerhardt, Norman; Sandau, Fabian; Becker, Sarah; Scholz, Angela; Schumacher, Patrick; Schmidt, Dietrich (2017): Wärmewende 2030. Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäude- sektor. Hg. v. Agora Energiewende. Fraunhofer IWES; Fraunhofer IBP. Berlin, Kassel. Online verfügbar unter https://www.agora-energienewende.de/fileadmin/Projekte/2016/Sektoruebergreifende_EW/Waermewende-2030_WEB.pdf, zuletzt geprüft am 12.09.2017.

Gerhardt, Norman; Sandau, Fabian; Hahn, Henning; Schumacher, Patrick; Sager, Christina; Bergk, Fabian et al. (2015): Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr - Endbericht. 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. Hg. v. Fraunhofer IWES. Fraunhofer IWES; ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH; Stiftung Umweltenergierecht. Kassel. Online verfügbar unter https://www.energiesystemtechnik.iwes.fraunhofer.de/content/dam/iwes-neu/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Veroeffentlichungen/2015/Interaktion_EEStrom_Waerme_Verkehr_Endbericht.pdf, zuletzt geprüft am 12.09.2017.

GridLab (2016): Microsoft Word - 2014-09-29_Potenzialstudie Nordostdeutschland_Endbericht_final_ohne Anhang_v2. Online verfügbar unter <http://energietechnik-bb.de/sites/default/files/potentialstudie-energieregion-nordostdeutschland-zur-energiewende-281114-2110.pdf>, zuletzt geprüft am 12.09.2017.

Grote, Lars; Hoffmann, Patrick; Tänzer, Guillem (2015): Abwärmenutzung - Potentiale, Hemmnisse und Umsetzungsvorschläge. Saarbrücken.

Haller, Markus; Loreck, Charlotte; Graichen, Verena (2017): Die Entwicklung der EEG-Kosten bis 2035. Wie der Erneuerbaren-Ausbau entlang der langfristigen Ziele der Energiewende wirkt. Hg. v. Agora Energiewende. Öko-Institut. Online verfügbar unter https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2015/EEG-Kosten-bis-2035/Agora_EEG_Kosten_2035_web_05052015.pdf, zuletzt geprüft am 13.09.2017.

Haller, Markus; Repenning, Julia; Vogel, Moritz; Schlomann, Barbara; Reuter, Matthias; Jochem, Eberhard et al. (2016): Überblick über vorliegende Szenarienarbeiten für den Klimaschutz in Deutschland bis 2050. Hg. v. Öko-Institut, Fraunhofer ISI und IREES GmbH. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/oekodoc/2445/2015-602-de.pdf>.

Hauser, Eva; Baur, Frank; Noll, Florian (2014): Beitrag der Bioenergie zur Energiewende.

Henning, Hans-Martin; Palzer, Andreas (2015): Was kostet die Energiewende? Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050. Hg. v. Fraunhofer ISE. Freiburg. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE-Studie-Was-kostet-die-Energiewende.pdf>, zuletzt geprüft am 11.09.2017.

Hennings, Wilfried; Markewitz, Peter; Helgeson, Broghan; Paulus, Simon; Peter, Jakob (2015): Auswertung von Studien zu künftigem Bedarf an Stromspeicherung. Beitrag zum Vorprojekt „Virtuelles Institut: Strom zu Gas und Wärme – Entwicklung einer Forschungsagenda für NRW“. Hg. v. Forschungszentrum Jülich. Online verfügbar unter http://www.fz-juelich.de/SharedDocs/Downloads/IEK/IEK-STE/EN/publications/research_reports/2015/report_03_2015.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 04.09.2017.

Hochloff, Patrick; Appen, Jan von; Trost, Tobias; Gerhardt, Norman; Puchta, Matthias; Jentsch, Mareike et al. (2014): Abschlussbericht Metastudie "Energiespeicher". Hg. v. Fraunhofer UMSICHT und Fraunhofer IWES. Online verfügbar unter <https://www.umsicht.fraunhofer.de/content/dam/umsicht/de/dokumente/pressemitteilungen/2015/Abschlussbericht-Metastudie-Energiespeicher.pdf>, zuletzt geprüft am 04.09.2017.

Höfling, Holger; Capota, Michael; Jachmann, Henning (2014): Dynamische Simulation der Ausbauszenarien für erneuerbare Stromversorgung in Baden-Württemberg bis 2050 nach dem Gutachten zur Vorbereitung eines Klimaschutzgesetzes (SimBW). Hg. v. Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoff-Forschung (ZSW). Online verfügbar unter https://www.zsw-bw.de/uploads/media/Abschlussbericht_SimBW_2014.pdf, zuletzt geprüft am 11.09.2017.

Jansen, Malte (2017): Design von Innovationsausschreibungen im EEG 2017. Innovation Balancing für ein integriertes Energiesystem. Kurzstudie von E4tech (UK) Ltd. im Auftrag des Bundesverbandes Erneuerbare Energie e.V. und der Hannover Messe. Unter Mitarbeit von Malte Jansen. Hg. v. E4tech. E4tech. London, Berlin. Online verfügbar unter https://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Studien/E4tech-Studie_Design_von_Innovationsausschreibungen_05Apr2017.pdf, zuletzt geprüft am 07.09.2017.

Jansen, Malte; Richts, Christoph; Gerhardt, Norman; Lenck, Thorsten; Heddrich, Marie-Louise (2015): Strommarkt-Flexibilisierung. Hemmnisse und Lösungskonzepte. Eine Studie im Auftrag des BEE e.V. Unter Mitarbeit von Malte Jansen, Christoph Richts, Norman Gerhardt, Lenck, Thorsten, Heddrich und Marie-Louise. Kassel, Berlin. Online verfügbar unter https://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Studien/20150216BEE_Strommarkt_Flexibilisierung.pdf, zuletzt geprüft am 04.09.2017.

Joest, Steffen; Fichtner, Maximilian; Wietschel, Martin; Bünger, Ulrich; Stiller, Christoph; Schmidt, Patrick; Merten, Frank (2009): Studie zur Frage: Woher kommt der Wasserstoff in Deutschland bis 2050? Hg. v. Bau und Stadtentwicklung Bundesministerium für Verkehr. Berlin. Online verfügbar unter https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Produktbilder/verkehr/9060_MOB_Studie_Woher_kommt_der_Wasserstoff_in_Deutschland_bis_2050_Abschlussbericht_.pdf.

KfW (2017): Erneuerbare Energien – Speicher (275). Kredit 275. Strom aus Sonnenenergie erzeugen und speichern. Hg. v. KfW. Online verfügbar unter [https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Energie-Umwelt/F%C3%B6rderprodukte/Erneuerbare-Energien-%E2%80%93-Speicher-\(275\)/](https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Energie-Umwelt/F%C3%B6rderprodukte/Erneuerbare-Energien-%E2%80%93-Speicher-(275)/), zuletzt aktualisiert am 14.08.2017, zuletzt geprüft am 14.08.2017.

Kranzl, L.; Müller, A.; Matzenberger, J.; Bayr, M. (2012): LowEx – Das Konzept der Exergie in energieökonomischen Analysen. IEA Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme Annex 49: Low Exergy Systems for High Performance Buildings and Communities. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 41/2014. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. Wien. Online verfügbar unter

https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/iea_pdf/endbericht_201241_lowex.pdf, zuletzt geprüft am 30.10.2017.

Krzikalla, Norbert; Achner, Sigg; Brühl, Stefan (2013): Möglichkeiten zum Ausgleich fluktuierender Einspeisungen aus erneuerbaren Energien. Hg. v. Bundesverband Erneuerbare Energien (BEE) e.V.

Mecklenburg-Vorpommern, Landtag (2016): LANDTAG MECKLENBURG-VORPOMMERN. Online verfügbar unter https://www.landtag-mv.de/fileadmin/media/Dokumente/Parlamentsdokumente/Drucksachen/6_Wahlperiode/Do6-5000/Drso6-5315.pdf, zuletzt geprüft am 12.09.2017.

Nitsch, Joachim (2015): SZEN-15 Aktuelle Szenarien der deutschen Energieversorgung unter Berücksichtigung der Eckdaten des Jahres 2014. Online verfügbar unter https://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/20150419-Szenarien_SZEN-15.pdf, zuletzt geprüft am 04.09.2017.

Pehnt, Martin; Bödeker, Jan; Arens, Marlene; Jochem, Eberhard; Idrisove, Farikha (2010): Die Nutzung industrieller Abwärme - technisch-wirtschaftliche Potenziale und energiepolitische Umsetzung. Hg. v. ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Fraunhofer ISI und IREES GmbH. Heidelberg, Karlsruhe.

Prognos AG (2017): Ein wirksamer Preis für CO₂ im Wärmesektor. Klimafreundliche & soziale Ausgestaltung einer Reform der Energiesteuer mit Rückvergütung. Bundesverband Erneuerbare Energien (BEE) e.V. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bee-ev.de/fileadmin/Veranstaltungen/Bundestagswahl_2017/BEE-Flyer_Ein_wirksamer_Preis_f%C3%BCr_CO2_im_W%C3%A4rmesektor_2017.pdf, zuletzt geprüft am 26.09.2017.

Prognos AG, EWI, GWS: Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/entwicklung-der-energiemaerkte-energiereferenzprognose-endbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=7, zuletzt geprüft am 13.09.2017.

Quaschnig, Volker (2016): Sektorkopplung durch die Energiewende. Anforderungen an den Ausbau erneuerbarer Energien zum Erreichen der Pariser Klimaschutzziele unter Berücksichtigung der Sektorkopplung. Hg. v. Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin. Berlin.

Reid, Gerard; Julve, Javier (2016): Second Life - Batteries As Flexible Storage For Renewables Energies. Hg. v. BEE Bundesverband der Erneuerbare Energie e.V. Berlin, Hannover. Online verfügbar unter https://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Studien/201604_Second_Life-Batterien_als_flexible_Speicher.pdf, zuletzt geprüft am 13.09.2017.

Schulz, Wolfgang; Brandstätt, Christine; Hagemeister, Andreas; Holzfuss, Timo; Gabriel, Jürgen (2013): Flexibilitätsreserven aus dem Wärmemarkt. Hg. v. Bundesverband Erneuerbare Energien (BEE) e.V. Online verfügbar unter https://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Studien/Plattform/BEE-Plattform-Systemtransformation_Waermeflexibilitaeten.pdf.

Sterner, Michael; Eckert, Fabian; Thema, Martin (2014a): Power-to-Gas - zwischen Mythos und Wahrheit Teil 1: Weit mehr als ein Stromspeicher. DENA Jahreskonferenz Power-to-Gas 2014. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Berlin, 02.07.2014. Online verfügbar unter https://www.oth-regensburg.de/fileadmin/media/professoren/ei/sterner/pdf/2014_Sterner_DENA_PtG_Jahreskonf.pdf, zuletzt geprüft am 11.09.2017.

Sterner, Michael; Thema, Martin; Eckert, Fabian; Lenck, Thorsten; Götz, Philipp (2015): Bedeutung und Notwendigkeit von Windgas für die Energiewende in Deutschland. Hg. v. Greenpeace energy. Hamburg. Online verfügbar unter <http://speicherinitiative.at/assets/Uploads/04-2015-FENES-EBP-GPE-Windgas-Studie.pdf>, zuletzt geprüft am 11.09.2017.

Sterner, Michael; Thema, Martin; Eckert, Fabian; Moser, Albert; Schäfer, Andreas; Drees, Tim et al. (2014b): Stromspeicher in der Energiewende Untersuchung zum Bedarf an neuen Stromspeichern in Deutschland für den Erzeugungsausgleich, Systemdienstleistungen und im Verteilnetz. Hg. v. Agora Energiewende. Online verfügbar unter https://www.agora-energiewende.de/de/fileadmin/downloads/publikationen/Studien/Speicher_in_der_Energiewende/Agora_Speicherstudie_Web.pdf, zuletzt geprüft am 11.09.2017.

Tänzer, Guillem (2011): Industrielle Abwärme - Ergebnisse einer Potentialstudie für Deutschland. izes gGmbH. Kraftwerk Fenne, 29.09.2011.

Tomorrow (2017): Electricity Map. Live CO₂ emissions of electricity consumption. Online verfügbar unter <https://www.electricitymap.org>.

UBA (2015): Schätzung der Umweltkosten in den Bereichen Energie und Verkehr. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/hgp_umweltkosten_o.pdf, zuletzt geprüft am 05.09.2017.