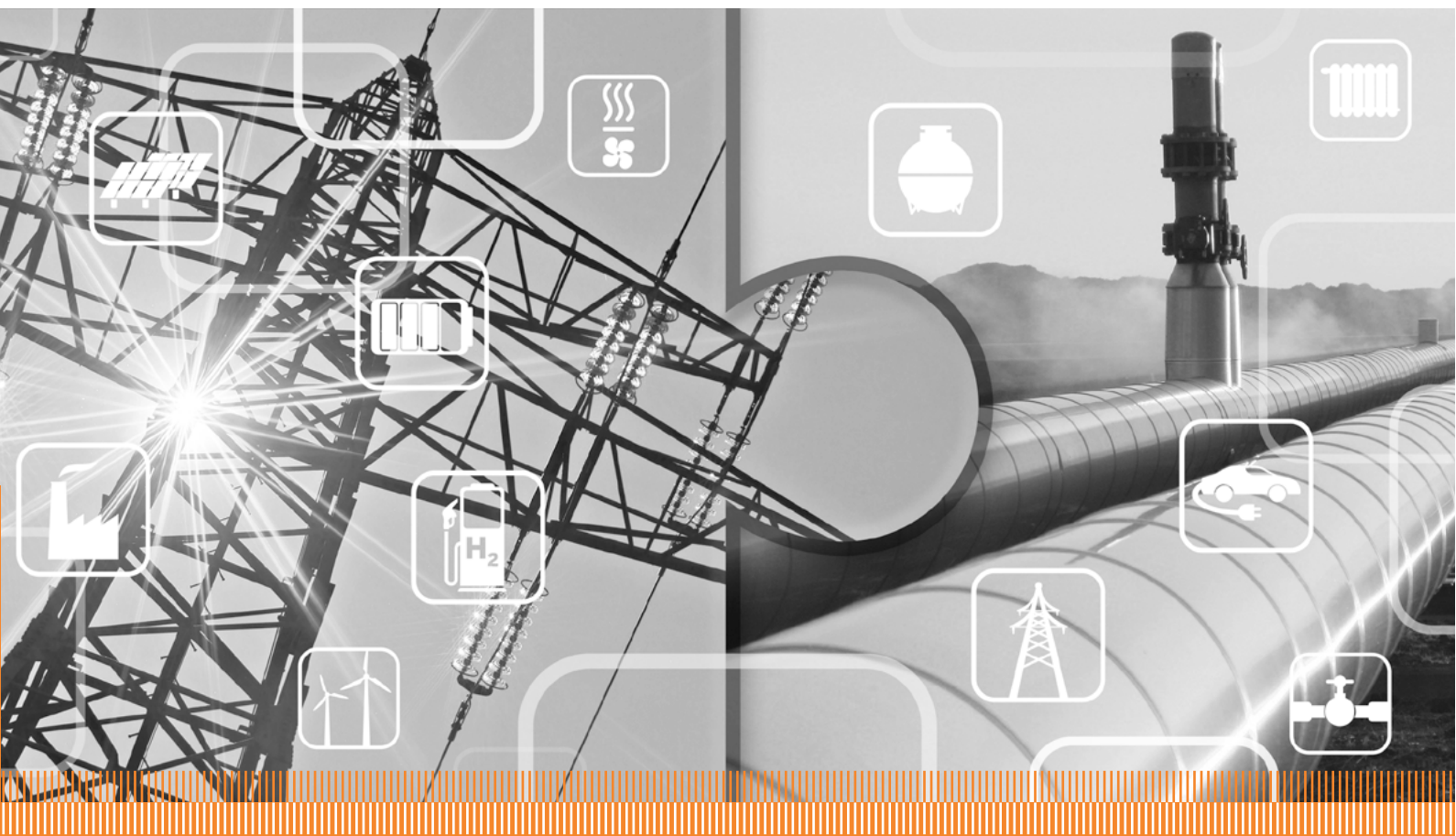




Sektorenkopplung in Nordrhein-Westfalen

Handlungsoptionen und Herausforderungen für das Energieland NRW

Sektorenkopplung als Herausforderung und Chance für das Energieland NRW

Handlungsoptionen und Ergebnispapier der Expertengruppe AG 4 „Sektorenkopplung“ im Netzwerk Netze und Speicher der EnergieAgentur.NRW im Auftrag des Landes Nordrhein-Westfalen.

Vorbemerkung:

Dieses Positionspapier gibt gemeinsame Erkenntnisse der Mitglieder der Expertengruppe wieder. Die Gemeinschaftsergebnisse wurden im konstruktiven Dialog aus häufig unterschiedlichen Positionen erarbeitet. Die Studie spiegelt daher nicht unbedingt die Meinung der durch ihre Mitarbeiter vertretenen Unternehmen und Institutionen wieder.

Empfohlene Zitierweise:

Fischedick, M., Schoof, R., e.a.:

Sektorenkopplung als Herausforderung und Chance für das Energieland NRW.

Handlungsoptionen einer Expertengruppe im Netzwerk Netze und Speicher der Energie-Agentur.NRW im Auftrag des Landes Nordrhein-Westfalen.

NRW (Dezember 2017)

Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Manfred Fischedick (Wuppertal Institut)

Rene Schoof (Uniper Energy Storage)

Dr. Jörg Adolf (Shell Deutschland), Hendrik Axelsen (RWTH Aachen- ISEA), Dr. Thomas Bauer (DLR-TT), Dr. Matthias Dienhart (RheinEnergie), Natalie Ebersbach (EnergieAgentur.NRW), Jürgen Fuhlrott (Open Grid Europe), Prof. Dr.-Ing Klaus Görner (Gas-und Wärme-Institut Essen e.V.), Prof. Dr.-Ing. Christoph Hebel (FH Aachen), Agnes Herdick (Open Grid Europe), Tobias Kornrumpf (Bergische Universität Wuppertal-EVT), Christian Last (Air Liquide), Carsten Leder (Thyssengas), Jochen Linssen (FZ-Jülich, IEK-3), Dr. Georg Markowz (Carbon CEEnergy), Dr. Thomas Marzi (Fraunhofer Umsicht), Torsten Merckens (FH Aachen), Frank Merten (Wuppertal Institut), Claus Meyer (Open Grid Europe), Dr. Stefan Nykamp (Westnetz), Dr.-Ing. Ulrich Pfisterer (BP Europe), Dr. Fritz Rettberg (TU-Dortmund -ie3), Dr. Erik Riedel (Amprion), Dr. Martin Robinus (FZ-Jülich, IEK-3), Frank Schäfer (EnergieAgentur.NRW), Franzjosef Schaffhausen (ewi ER&S), Dr. Steffen Schirrmeyer (Thyssenkrupp), Prof. Dr. Christoph Weber (Universität Duisburg-Essen- EWL), Prof. Dr.-Ing. Markus Zdrallek (Bergische Universität Wuppertal-EVT), Sebastian Zurmühlen (RWTH Aachen- ISEA)

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis	4
I. Zielsetzung und Handlungsoptionen für NRW	5
II. Sektorenkopplung – Definition, Bedeutung und Einführungsphasen	10
1. Sektorenkopplung in der Übersicht	12
2. Heutige und zukünftige Bedeutung der Sektorenkopplung: Was bestimmt die Sektorenkopplung?	18
3. Projektbeispiele in NRW	24
4. Spezifika, resultierende Herausforderungen und Ableitung eines konkreten Phasenkonzeptes der Sektorenkopplung für NRW	27
4.1 Spezifika des Landes NRW	28
4.2 Resultierende Herausforderungen und Chancen für das Land unter Berücksichtigung zukünftiger Anforderungen und bestehender Energieinfrastrukturen	32
4.3 Ableitung Phasenkonzept Sektorenkopplung für NRW und Spezifikation konkreter Umsetzungserfordernisse	37
4.4 Zusammenfassende Darstellung und Diskussion konkreter Beiträge (robuste Strategien) für die Umsetzung einer Sektorenkopplungsstrategie	40
III. Rahmenbedingungen	42
5. Allgemeine und regulatorische Rahmenbedingungen	42
5.1 Allgemeine Anforderungen	42
5.2 Möglichkeiten konsistenter CO ₂ -Bepreisung	43
5.3 Berücksichtigung der nationalen und internationalen Wettbewerbsfähigkeit des Energie- und Industriestandorts Nordrhein-Westfalen	45
5.4 Ausgestaltung von Umlagen	46
5.5 Ausgestaltung von Netzentgelten und Netzregulierung	46
5.6 Umgang mit lokalen Flexibilitätsbedarfen und Betreibermodellen bei netzdienlichem Fokus	48
5.7 Anreize zur Verwendung von Strom aus erneuerbaren Energien in anderen Sektoren	50
5.8 Ausgestaltung von Fördermaßnahmen und netzdienliche Maßnahmen	51
Referenzen	52
Anhang I: Projektliste zur Sektorenkopplung in NRW (Auszug)	54
Anhang II Förderprogramme im Bereich Sektorenkopplung	62

Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating Current- Wechselstrom
BEV	Battery electric vehicle- Batterieelektrisches Fahrzeug
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung
BNetzA	Bundesnetzagentur
DC	Direct current -Gleichstrom
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Utilization
CCUS	Carbon Capture, Utilization and Storage
DME	Dimethylester
DSM	Demand side management- Lastverschiebung
ETS	Europäisches Emissionshandelssystem
FNB Gas	Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas e. V.
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
KMU	Kleinere und mittlere Unternehmen
IuK	Information und Kommunikation
OME	Oxymethylenether
PHEV	Plug-in hybrid electric vehicle –Kraftfahrzeug mit Hybridantrieb
PtG	Power-to-Gas
PtH	Power-to-Heat
PtX	Power-to-X
SK	Sektorenkopplung
TGH	Treibhausgasemissionen
UER	Upstream emissions reductions
ÜNB	Übertragungsnetzbetreiber Strom
VNB	Verteilnetzbetreiber

I. Zielsetzung und Handlungsoptionen für NRW

1.1 Zielsetzung des Expertenpapiers

Das Ziel dieses Expertenpapiers ist es, die Chancen und Herausforderungen der Sektorenkopplung für das Land Nordrhein-Westfalen zu identifizieren und damit eine vertiefte Diskussion dazu anzuregen. Das Papier stellt keine umfassende Strategie für das Land NRW selbst dar, sondern identifiziert zentrale Bausteine für die Erarbeitung einer solchen Strategie. Wesentlicher Output des Expertenpapiers sind daher zentrale Thesen, die zur weiteren Auseinandersetzung mit der Sektorenkopplung im Land dienen sollen und Herausforderungen wie Chancen zeitgleich adressieren. Sie richten sich an eine breite Zielgruppe aus Wirtschaft (u.a. Energiewirtschaft, Anlagenbau, Grundstoffindustrie), Investoren und Kapitalgeber sowie Politik und Gesellschaft.

NRW als Energieland steht vor der Herausforderung, sich angesichts der fortlaufenden Veränderungen der Energieversorgung zu positionieren und seine Chancen im Wandel rechtzeitig zu identifizieren und wahrzunehmen. Das Expertenpapier soll dafür einen Beitrag leisten und die mit der Sektorenkopplung verbundenen Herausforderungen und Chancen diskutieren. Im Einzelnen geht es darum,

- in die zentralen Hintergründe und Rahmenbedingungen für die Sektorenkopplung einzuführen,
- die aktuell diskutierten Leitplanken des Energiesystems zu beschreiben und die Notwendigkeit der Sektorenkopplung darin einzuordnen,
- ein gemeinsames Verständnis über die daraus resultierenden Handlungsbedarfe für das Land NRW und die im Kontext des Energiesystems tätigen Unternehmen abzuleiten und
- die Handlungsoptionen und Chancen für das Land konkret zu benennen und Voraussetzungen für deren Umsetzung zu formulieren.

Unter Sektorenkopplung versteht man dabei alle Maßnahmen, die zu einem Zusammenwachsen der Sektoren Strom, Mobilität, Wärme und Produktion und ihren jeweiligen Infrastrukturen führen.

1.2. Handlungsoptionen für NRW

1. Die Klimaschutzziele für Deutschland und NRW leiten sich aus den globalen Klimaschutzherausforderungen ab

Laut den internationalen Klimaschutzvereinbarungen (Paris Agreement 2015) soll die Erderwärmung auf deutlich unter 2°C begrenzt werden. Für Deutschland hat die Bundesregierung in Anlehnung an die europäischen Ziele eine Minderung der THG-Emissionen von 80-95% bis zum Jahr 2050 im Vergleich zum Jahr 1990 vorgegeben. Um den Anforderungen der internationalen Staatengemeinschaft gerecht zu werden, wird von Experten gefordert, dass sich Deutschland und NRW am oberen Ende des vorgegebenen Korridors orientieren.

2. Die Umsetzung der Klimaschutzziele erfordert einen Umbau der Energiesysteme - die Sektorenkopplung ist dabei der zentrale Wegbereiter, wovon auch das Energie- und Industrieland NRW profitieren kann

Die Umsetzung der Klimaschutzziele erfordert einen weitgehenden Umbau der heutigen Energieversorgung. Zentrale Voraussetzung ist das Heben der Energieeffizienzpotenziale, nicht zuletzt, um die mit dem Umbau verbundenen Kosten zu begrenzen. Parallel dazu ist ein engagierter Ausbau erneuerbarer Energien notwendig. Nur so kann die erforderliche Reduktion der energiebedingten Treibhausgasemissionen dauerhaft erreicht werden. Die Sektorenkopplung bietet geeignete Möglichkeiten, um die Klimaschutzziele nicht nur bei der Strombereitstellung auf effiziente Art und Weise zu erreichen, sondern auch im Bereich der Endenergiesektoren (d.h. Industrie, Verkehr, Gebäude). NRW bieten sich in diesem Bereich gute Chancen, sich weiterhin als guter Standort für Energieinfrastruktur sowie als Industrieland zu profilieren. Im Interesse der Effizienz des Gesamtsystems ist eine Synchronisierung der drei Strategieelemente, d.h. Umsetzung der Energieeffizienzpotenziale, weiterer Ausbau der erneuerbaren Energien und Heben der Potenziale der Sektorenkopplung, anzustreben.

3. Die Ausschöpfung der Potenziale der Sektorenkopplung erfolgt in drei Phasen

Für die Umsetzung der Potenziale der Sektorenkopplung können im Wesentlichen drei Phasen unterschieden werden:

- Kurzfristig (2025) geht es darum, heute bereits verfügbare Optionen der Sektorenkopplung (z.B. Batterie-, Brennstoffzellen- und Erdgas-Busse sowie LNG-LKW, Substitution fossilen Wasserstoffs in der Industrie, Power-to-Heat mit Wärmespeichern) in die Umsetzung zu bringen, sofern mit ihnen ein direkter Vorteil (z.B. THG-Minderung) verbunden ist, und zentrale F&E- sowie Demonstrationsmaßnahmen (z.B. innovativer Endanwendungen) durchzuführen.
- Mittelfristig (2030) geht es um die Bereitstellung der notwendigen leitungsgebundenen Infrastrukturen für die Umsetzung der Sektorenkopplung durch die Weiterentwicklung bestehender Strukturen (z.B. Strom- und Gasnetze, Speicher, Kuppelstellen mit dem Ausland) und ggf. den bedarfsorientierten Aufbau neuer Strukturen. Die Maßnahmen der Kopplung - gerade in der Weiterentwicklung der Infrastruktur - sollten synchronisiert und kohärent verlaufen, um Ineffizienzen zu vermeiden. „Lock-in Effekte“ sollen vermieden werden, um innovative Lösungen von morgen nicht zu blockieren.
- Langfristig (2050) geht es darum, die Energiebereitstellung auf weitgehend erneuerbare respektive klimaneutrale Energien umzustellen. Eine flächendeckende Umsetzung der Sektorenkopplung ist dafür das strategische Schlüsselement. Sektorenkopplung kann dabei nicht nur einen entscheidenden Beitrag zur Reduktion der mit den Endenergiesektoren verbundenen THG-Emissionen leisten, sondern auch ein hohes Maß an Flexibilität bereitstellen und damit entscheidend zur Systemstabilität der Energienetze und Versorgungssicherheit der Verbraucher beitragen.

4. Erarbeitung einer Roadmap Sektorenkopplung für NRW zur Unterlegung der Transformationsphasen bis 2030

Zur Ausschöpfung der Potenziale und als Orientierungsrahmen für Unternehmen sollte eine umfassende Roadmap für NRW entwickelt werden, die die Möglichkeiten für eine zeitliche Umsetzung der Sektorenkopplung aufzeigt, konkrete Potenzialstudien für die einzelnen Sektoren einschließt und die Umsetzung anwendungsnaher Pilot- und Demonstrationsprojekte konkret initiiert. Bei einer konsequenten Umsetzung der Roadmap kann NRW eine Blaupause für die Transformation des Energiesystems in einem industriell geprägten, dicht besiedelten Bundesland bereitstellen und aufzeigen, wie Klimaschutz und Wettbewerbsfähigkeit langfristig miteinander vereinbar sind.

5. Energieinfrastrukturelle Voraussetzungen in NRW für ein integriertes Energiesystem nutzen und verbessern

- NRW als Energieland wird bei rückläufiger Kohleverstromung zukünftig zu einem Stromimportland werden. Gleichzeitig nimmt die Bedeutung von NRW als Drehscheibe für den Transport von Strom und Stromprodukten insbesondere auch durch den EU-Binnenmarkt erheblich zu.
- NRW hat durch die eng vermaschten Strom-, Gas- und Wärmenetze sowie der leistungsfähigen Grundstoffindustrie gute infrastrukturelle Voraussetzungen, um die Möglichkeiten der Sektorenkopplung zu nutzen und sich weiterhin als führender Industriestandort aufzustellen. Die vorhandene Energieinfrastruktur muss dafür allerdings optimiert und dort, wo erforderlich, ausgebaut und an die neuen Herausforderungen angepasst werden. Intelligente Netze und sektorenübergreifende Betriebskonzepte sind hierfür ein zentraler Baustein.
- Die überwiegende Anzahl der Maßnahmen zur Sektorenkopplung basiert auf der Kopplung von Netzinfrastrukturen. Leistungsfähige Strom-, Gas- und Wärmenetze ermöglichen die Sektorenkopplung und können durch übergreifende Regelungskonzepte effizient genutzt werden. Neben der integrierten Betriebsweise zur effizienten Ausnutzung der vorhandenen Infrastruktur sollte parallel eine Synchronisierung der bisher existierenden Netzentwicklungspläne (NEP Gas und Strom) sowie darüber hinaus eine integrierte Energienetzplanung (Strom, Gas, Wärme) vorangetrieben werden.

6. NRW sollte die Chancen der Sektorenkopplung nutzen, die sich aus seiner zentralen Lage ergeben

- Mit der Sektorenkopplung bietet sich für NRW die Chance, trotz rückläufiger absoluter Stromerzeugungsbeiträge dauerhaft bedeutender Energiesystemdienstleistungsstandort zu bleiben.
- Die Etablierung von NRW als Energiesystemdienstleistungsstandort eröffnet u.a. die Möglichkeit neue Geschäftsfelder für Unternehmen aus dem Bereich Energiewirtschaft zu schaffen sowie positive Beiträge für die Attraktivität des Landes als dauerhafter Standort für die energieintensive Industrie zu leisten.
- NRW sollte sich - auch in Hinblick auf die zentrale Lage zwischen Nordsee-Offshore-Windparks und süddeutschen Verbrauchszentren - als bundesweiter Hub für die Produktion und Verteilung von Power-to-X-Sektorenkopplungsprodukten aufstellen und damit von der, die Energiewende begleitenden, Sektorenkopplung profitieren.

7. NRW sollte als Vorreiter der Sektorenkopplung agieren

- NRW sollte sich als Vorreiter für Anbieter von Sektorenkopplungstechnologien und als Produktionsstandort für Sektorenkopplungsprodukte etablieren und damit Wertschöpfungspotenziale im Energie- und Industriebereich dauerhaft im Land halten. Darüber hinaus bieten sich für den Technologiestandort NRW erhebliche Chancen, erfolgreiche Technologien zu exportieren. Die vorhandene F&E-Infrastruktur sowie die Innovationskraft der NRW-Unternehmen stellt dafür eine hervorragende Basis dar.
- Von besonderer Bedeutung ist in diesem Zusammenhang eine adäquate Aus- und Weiterbildung von Fachkräften für den Energiebereich, um auf die zukünftigen Herausforderungen in der Umsetzungspraxis vorbereitet zu sein.
- NRW sollte die Anwendung und den Einsatz von Sektorenkopplungstechnologien durch spezifische Förderinstrumente unterstützen und entsprechende Anreize für Technologieentwicklung und Markteinführung sowie branchenübergreifende Zusammenarbeit setzen.
- In NRW bieten sich hervorragende Chancen, um von den global wachsenden Märkten für Sektorenkopplungstechnologien und –produkten zu profitieren. Dafür muss sichergestellt werden, dass die gesamte Wertschöpfungskette im Land abgebildet wird. Dazu gehört auch der Ausbau von erneuerbaren Energien-Kapazitäten, um eine regionale Nachfrage nach Sektorenkopplungstechnologien vor Ort zu fördern.

8. NRW sollte sich im Bund und der EU für eine Verbesserung der rechtlichen Rahmenbedingungen einsetzen, damit Marktanreize für den Einsatz von Sektorenkopplungstechnologien und den zugehörigen Speichern entstehen

- Unter Berücksichtigung der Wettbewerbssituation der Industrie- und Gewerbeunternehmen sollte NRW u.a. zentrale Impulse für eine Reform der Abgaben, Umlagen und Steuern geben.
- Ein Ziel sollte eine möglichst einheitliche CO₂-Bepreisung über alle Verbrauchssektoren sein (level playing field), um damit zur Durchsetzung der Sektorenkopplungstechnologien am Markt beizutragen.
- Weiterhin sollte die regulatorische Einordnung von Speichern angepasst werden, so dass diese im Zusammenhang mit Power-to-X für die Sektorenkopplung vorteilhafter eingesetzt werden können.

9. Digitalisierung sollte als Wegbereiter der Sektorenkopplung genutzt werden

- Eine beschleunigte Digitalisierung und der verstärkte Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) kann in den Bereichen Energiebereitstellung, -Verteilung und -Verbrauch eine schnellere Umsetzung der Sektorenkopplung fördern. Zentrale Beiträge können vor allem in Bezug auf den Umgang mit der Volatilität der Erzeugung von Strom aus Wind und Sonne erwartet werden.
- Der Systemsicherheit ist bei zunehmender Digitalisierung besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Das gilt auch für die Schaffung einheitlicher internationaler Standards, um die Kommunikation sektorenübergreifend zu ermöglichen.

10. Gesellschaftliche Akzeptanz sollte als Grundlage für eine erfolgreiche Sektorenkopplung gestärkt werden

- Die Transformation des Energiesystems und insbesondere die Prozesse zur Kopplung der Sektoren müssen gesellschaftlich verankert werden. Entscheidend ist hierfür, dass der gesellschaftliche Diskurs über die Sektorenkopplung gestärkt wird.
- Regionale Umsetzungskonzepte unter Einbeziehung partizipativer Elemente, die zur Gewinnung von Erfahrungen einen wichtigen Beitrag leisten, sollten verstärkt gefördert werden.
- Mit Blick auf die zahlreichen noch offenen Fragen, sollte die im Rahmen der Arbeitsgruppe angestoßene akteursübergreifende Diskussion (Wirtschaft, Wissenschaft, Politik, Gesellschaft) fortgeführt werden.

II. Sektorenkopplung – Definition, Bedeutung und Einführungsphasen

Das Thema Sektorenkopplung wird aktuell in Fachkreisen intensiv diskutiert und gilt in vielen Veröffentlichungen als eine der zentralen Strategien für die Umsetzung der Energiewende und damit als ein wesentlicher Baustein für die Transformation des Energiesystems. Sektorenkopplung ist kein Selbstzweck, sondern letztlich auf zentrale Herausforderungen wie den Klimaschutz zurückzuführen, denen mit der Transformation des Energiesystems begegnet werden soll.

Das Besondere an diesem Expertenpapier ist – im Unterschied zu den zahlreichen laufenden und zum Teil bereits abgeschlossenen Arbeiten zum Thema Sektorenkopplung – der spezifische Blick auf die Herausforderungen und Chancen für das Land NRW, insbesondere aus Sicht der Unternehmen.

Ambitionierte Klimaschutzziele bilden die Grundlage für die Notwendigkeit der Transformation des Energiesystems– internationale Abkommen setzen dafür die Maßstäbe

Als zentraler Treiber für die Sektorenkopplung können die (langfristigen) Klimaschutzziele für Deutschland und NRW gesehen werden, die sich aus den globalen Klimaschutzherausforderungen ableiten lassen. Das von 194 Staaten im Herbst 2015 auf der 21. Vertragsstaatenkonferenz (COP 21) in Paris beschlossene Abkommen (Paris Agreement) erfordert von der Staatengemeinschaft, insbesondere aber von den Industrieländern, eine weitgehende Minderung der THG-Emissionen schon bis zur Mitte des Jahrhunderts, um den Gefahren der Klimaveränderungen wirksam begegnen zu können. Dem Pariser Abkommen folgend, ist das angestrebte Ziel das Erreichen der Treibhausgasneutralität in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts. Soll die maximale Temperaturerhöhung auf 1,5°C begrenzt werden, sind entsprechende Minderungsziele schon deutlich vorher zu erreichen.

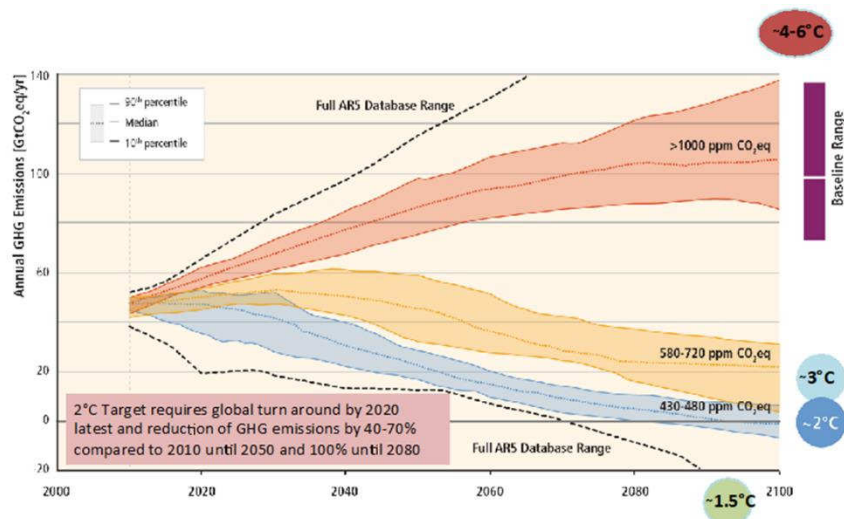


Abb. 1: Entwicklung der THG-Konzentration in der Atmosphäre und des korrespondierenden Anstiegs der Weltmitteltemperatur für verschiedene THG-Emissionspfade [1]

Für Deutschland (NRW) bedeutet die Umsetzung der Pariser Beschlüsse in der Konsequenz eine Orientierung an der oberen Marke des aktuellen Zielkorridors

für die Minderung der Treibhausgasemissionen (80-95%) aus dem Energiekonzept des Jahres 2010.

Die Beschlüsse des Pariser Klimaschutzabkommens lagen auch der Diskussion über die Ausgestaltung des Klimaschutzplans der Bundesregierung im Jahr 2016 zugrunde. Zum ersten Mal ist hier der Versuch gemacht worden, Minderungsziele auf sektoraler Ebene vorzugeben. Auch wenn die konkret formulierten Ziele umstritten sind und zunächst nur den Zeitraum bis zum Jahr 2030 umfassen, haben sie doch deutlich orientierenden Charakter. Insbesondere wird deutlich, dass alle Sektoren einen signifikanten Beitrag leisten müssen und hierbei auch jene Sektoren eingeschlossen sind, die ihre THG-Emissionen bis dato kaum verringern konnten. Letzteres gilt insbesondere für den Verkehrssektor.

Handlungsfeld	1990 (in Mio. t CO ₂ -Äq.)	2014 (in Mio. t CO ₂ -Äq.)	2030 (in Mio. t CO ₂ -Äq.)	2030 (Minderung in % ggü. 1990)
Energiewirtschaft	466	358	175-183	62-61%
Gebäude	209	119	70-72	67-66%
Verkehr	163	160	95-98	42-40%
Industrie	283	181	140-143	51-49%
Landwirtschaft	88	72	58-61	34-31%
Teilsomme	1209	890	538-557	56-54%
Sonstige	39	12	5	87%
Gesamtsumme	1248	902	543-562	56-55%

Tabelle 1: Sektoriale Minderungsziele nach den Vorgaben des Klimaschutzplans 2050 der Bundesregierung [2]

Eine Orientierung am oberen Korridor der deutschen Klimaschutzziele (95%) erfordert weitgehende Maßnahmen und die Intensivierung der Sektorenkopplung

Vorliegende Studien und Szenarioanalysen machen deutlich, dass sich 95% THG-Minderungsszenarien ganz erheblich von 80% THG-Minderungsszenarien unterscheiden und ihre Umsetzung insbesondere in den Endenergiesektoren weitergehende Maßnahmen notwendig macht. 95% THG-Minderungsszenarien erfordern neben der Ausweitung der direkten Nutzung erneuerbarer Energien (z.B. Solarthermie, thermische Biomassenutzung) und einer deutlichen Steigerung der Energieeffizienz im Bereich der Energiebereitstellung sowie in allen Endanwendungsbereichen insbesondere einen stärkeren (direkten und/oder indirekten) Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energien. Vor diesem Hintergrund stellt die Sektorenkopplung eine der maßgeblichen Schlüsselstrategien für das Erreichen ambitionierter Klimaschutzziele dar.

1. Sektorenkopplung in der Übersicht

Bei der Sektorenkopplung handelt es sich nicht um ein vollständig neues Phänomen. Etablierte Beispiele sind die Kraft-Wärme-Kopplung, aber auch Stromanwendungen im Wärmebereich (z.B. elektrische Wärmepumpen). In der Zukunft ist allerdings davon auszugehen, dass Intensität und Vielfalt der Sektorenkopplung zunehmen werden. Dabei sind drei Treiber zu unterscheiden:

- die Weiterentwicklung technischer Möglichkeiten (insbesondere Elektromobilität, Power-to-X-Technologien und Prozesse)
- die auf der Zeitachse zunehmende Nachfrage nach klimaverträglichen Energieträgern in den Endenergiesektoren aufgrund steigender Klimaschutzanforderungen
- die Zunahme der Einspeisung erneuerbarer Energien in die Stromnetze und die Notwendigkeit, Fluktuationen abzuf puffern und mittel- bis langfristig Langzeitspeicher zur Verfügung zu stellen (z.B. chemische Speichermedien über Power-to-X)

Bei der Sektorenkopplung handelt es sich anders als häufig kolportiert zudem keineswegs um eine Strategie der ausschließlichen Nutzung von Strom, der nicht direkt verwendet werden kann (sog. „Überschussstrom“), sondern um einen deutlich breiteren Ansatz.

Der Begriff der Sektorenkopplung wird derzeit sehr unterschiedlich verwendet.

Eine allgemein gültige und anerkannte Definition existiert bis dato nicht.

Aktuell wird Sektorenkopplung i.d.R. auf Basis konventioneller Energieträger (z.B. KWK mit Erdgas) betrieben, zukünftig wird Sektorenkopplung zunehmend auf Basis Erneuerbarer Energien betrieben. Neben der zuvor eher allgemeinen Beschreibung des Begriffs, soll hier daher nur eine beispielhafte (pragmatische) Definition verwendet.

Unter Sektorenkopplung versteht man alle Maßnahmen, die zu einem Zusammenwachsen der Sektoren Strom, Mobilität und Wärme führen. Insbesondere -aber nicht ausschließlich- zielt die Sektorenkopplung darauf ab, zur Verringerung der Treibhausgas- und vor allem der CO₂-Emissionen, Strom aus erneuerbaren Energien auch zur Bereitstellung von Wärme und Mobilität sowie für industrielle Anwendungen in direkter oder indirekter Form einzusetzen (beispielsweise strombasierte gasförmige oder flüssige Kraft- und Brennstoffe sowie Ausgangsstoffe für die Industrie).

Der Begriff „Sektorenkopplung“ wird in verschiedenen Anwendungsbereichen verwendet und je nach Sichtweise werden unterschiedliche Schwerpunkte gesetzt. Ein zentrales Merkmal ist die Verbindung zwischen unterschiedlichen Branchen, Energieträgern und Infrastrukturen. Schon heute sind die Verbindungen im Energiesystem sehr vielschichtig. Abb. 2 zeigt eine Auswahl von potentiellen Sektorenkopplungspfaden, die zwischen Bereitstellung und Anwendung von Energie angesiedelt sind. Infrastrukturen (z.B. Strom-, Wärme- und Gasnetze) spielen als Bindeglied dabei eine entscheidende Rolle.

Die Abbildung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Grundsätzlich bestehen deutlich mehr Kopplungsmöglichkeiten im Energiesystem, die aus Gründen der Übersichtlichkeit aber nicht alle erfasst werden können. Wie die Abbildung deutlich macht, spielt Strom im Kontext der Sektorenkopplung eine wichtige Rolle. Er kann auf verschiedenen Wegen direkt oder indirekt genutzt werden. Für die Sektorenkopplung ist es dabei zunächst unerheblich, ob der genutzte Strom

aus erneuerbaren Energien oder konventionell erzeugt wird, respektive aus einer disponiblen oder volatilen Quelle stammt. Grundsätzlich können beispielsweise auch Geothermie und Wasserkraft das regenerative Portfolio und Abfälle sowie biogene Reststoffe das konventionelle Portfolio ergänzen.

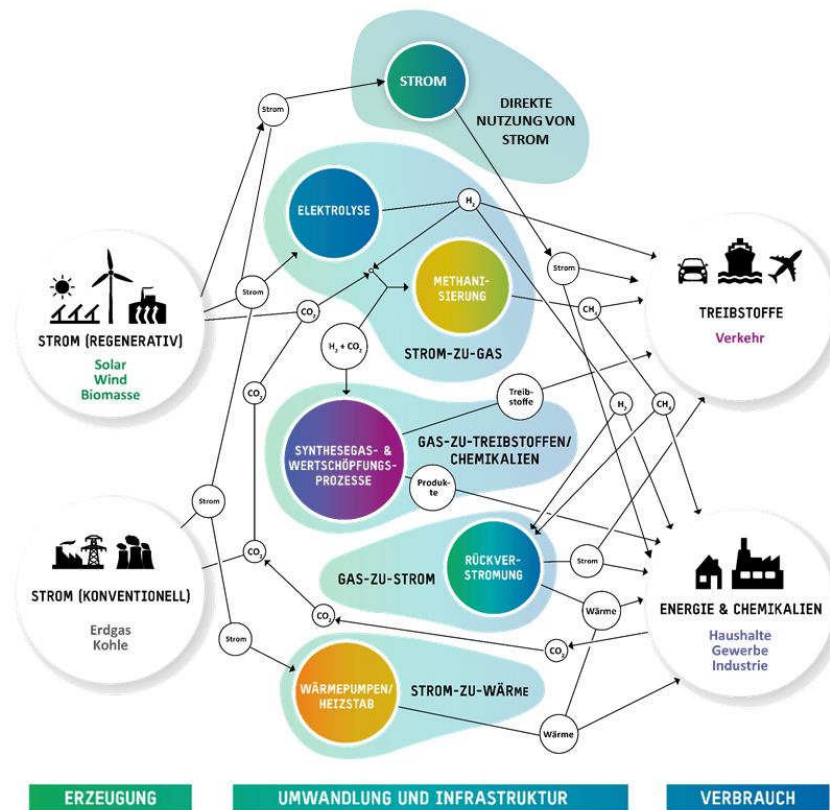


Abb. 2: Auswahl von Pfaden und Flexibilitäts Optionen der Sektorenkopplung [40].

Direkte Nutzung von Strom

Neben der bereits genannten Nutzbarmachung von EE-Strom in anderen Sektoren, kann die Sektorenkopplung auf verschiedenste Art helfen, die volatile Erzeugung von Strom aus regenerativen Quellen, vor allem aus Wind- und Solarenergie, flexibel zu nutzen und darüber zu Ausgleichseffekten beizutragen. Mit zunehmendem Anteil der regenerativen, volatilen Quellen im Strom-Mix wird die Bedeutung der Sektorenkopplung im zeitlichen Verlauf entsprechend weiter steigen. Auch wenn zurzeit vielfach die Power-to-X-Optionen in der Diskussion um die Sektorenkopplung erwähnt werden (also z.B. die Umwandlung von Strom in ein synthetisches Gas, Kraftstoff oder Rohstoff für die chemische Industrie), ist vor allem und gerade die direkte Nutzung von Strom eine wichtige Option der Sektorenkopplung, da sie Umwandlungsverluste entlang der Prozesskette vermeidet. Insbesondere im Verkehrssektor kann Strom beispielsweise in batterieelektrischen Fahrzeugen eingesetzt werden. Im Güterverkehrsbereich könnten sich mittel- bis langfristig durch Oberleitungs-Lkws zusätzliche Möglichkeiten eröffnen. Die direkte Stromnutzung beispielsweise in der Bahn wird heute bereits intensiv genutzt wird, sie stellt nach dem diesem Papier zugrundeliegenden Verständnis ebenfalls eine Option der Sektorenkopplung (hier von den Sektoren Stromerzeugung und Verkehr) dar. Auch die direkte Stromnutzung zur Bereitstellung von Wärme mittels einer Wärmepumpe oder einer elektrischen Widerstandsheizung (z. B. Tauchsieder, Elektrodenheizkessel) mit nachgeschaltetem Wärmespeicher fällt unter die Sektorenkopplung, wobei sich vielfach hier der Begriff „Power-to-

Heat“ bzw. „Strom-zu-Wärme“ etabliert hat. Eine weitere Technologie zur Substitution fossiler Energieträger in der Industrie ist das Plasmaverfahren.

Indirekte Nutzung von Strom

In zahlreichen Anwendungspfaden – insbesondere, wenn keine Nutzungskonkurrenz zur direkten Verwendung vorliegt – kann eine indirekte Nutzung von Strom sinnvoll sein. Indirekte Pfade für die Sektorenkopplung beginnen meistens mit der Elektrolyse, d.h. der elektrochemischen Spaltung von Wasser mit Hilfe von elektrischer Energie in Wasserstoff und Sauerstoff. Der Wasserstoff kann direkt in verschiedenen Anwendungsbereichen genutzt werden, beispielsweise in der chemischen Industrie, in der Stahlproduktion (Nutzung von Wasserstoff als Reduktionsmittel) [3] aber auch im Flug- und Schiffverkehr oder dem öffentlichen personalisierten Nah- und Fernverkehr, in denen eine direkte Nutzung von Strom keine (wirtschaftliche) Option darstellt.

Zur Bereitstellung von reinem Wasserstoff am Ort der Nutzung sind oft eigene Infrastrukturen notwendig, die sich je nach Bedarf und Entfernung als Lkw- oder Pipeline-basierte Lösungen darstellen lassen. Für eine großskalig angelegte Pipeline-basierte Versorgung einschließlich Speicher liegen bereits Studienergebnisse vor, die den Investitionsaufwand einerseits sowie die resultierenden Wasserstoffkosten andererseits angeben [4].

Der Einstieg in die großmaßstäbliche Nutzung von Wasserstoff kann aber auch anders erfolgen. So kann Wasserstoff auch dem heutigen Erdgasnetz beigemischt werden. Allerdings sind der direkten Einspeisung von Wasserstoff Beimischungsgrenzen gesetzt. Laut DVGW ist die heutige Gasinfrastruktur nur für volumetrische Mischungsanteile im einstelligen Prozentbereich geeignet [5].

Wasserstoff kann zusammen mit CO_2 in chemischen Reaktionen zu Methan umgesetzt werden, dem Hauptbestandteil des heutigen Erdgases. Nach der sogenannten „Methanisierung“ kann das Methan ohne Beimischungsgrenze über die bestehende Erdgasinfrastruktur genutzt werden. Das für die Synthese notwendige CO_2 kann für eine Übergangszeit aus dem Rauchgas von Kohle- oder Gaskraftwerken abgetrennt werden. Geht man allerdings zukünftig von deutlich rückläufigen Anteilen an Kraftwerken, die mit fossilen Brennstoffen befeuert werden, im Energiesystem aus, kann das CO_2 aus Industrieanlagen (z.B. der Stahl- oder Zementindustrie), Biogasanlagen oder aus natürlichen Quellen abgetrennt werden. Alternativ ist auch eine direkte CO_2 -Abtrennung aus der Atmosphäre möglich.

Die direkte Nutzung des Wasserstoffs bzw. die „Methanisierung“ werden unter dem Begriff „Power-to-Gas (PtG)“ bzw. „Strom-zu-Gas“ zusammengefasst. In Abbildung 3 sind aktuelle Standorte von PtG-Anlagen in Deutschland verzeichnet. Hier werden wichtige Erfahrungen für einen potentiellen zukünftigen Ausbau gesammelt.

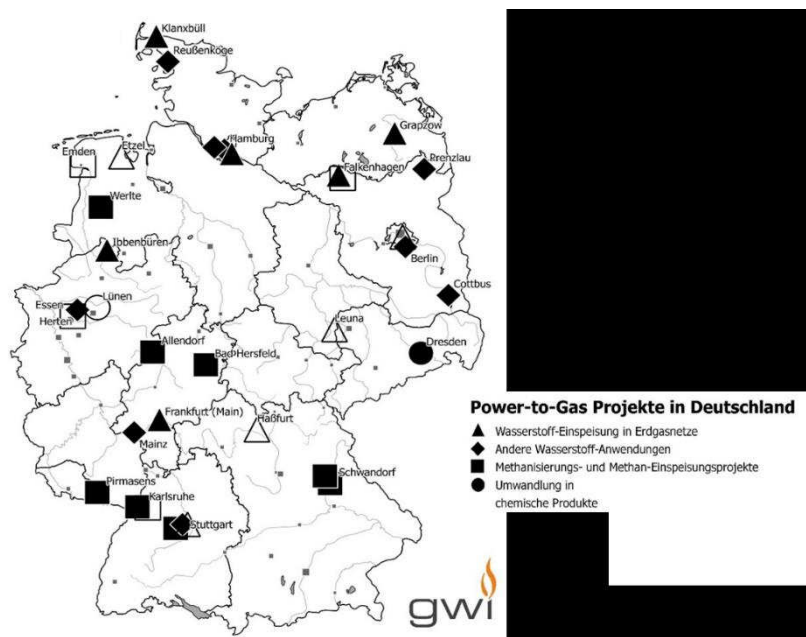


Abb. 3: Power-to-Gas Projekte in Deutschland [6]

Parallel zur Methanisierung können viele weitere chemische Produkte sowie Brenn- und Kraftstoffe auf der Basis von Wasserstoff und CO₂ bzw. CO hergestellt werden. Neben der Produktion von synthetischem Erdgas über die Methanisierungsrouten wird aktuell u.a. auch die Produktion von Methanol [7] oder die Herstellung von synthetischen flüssigen Kraftstoffen mit Hilfe der Fischer-Tropsch-Synthese verfolgt.

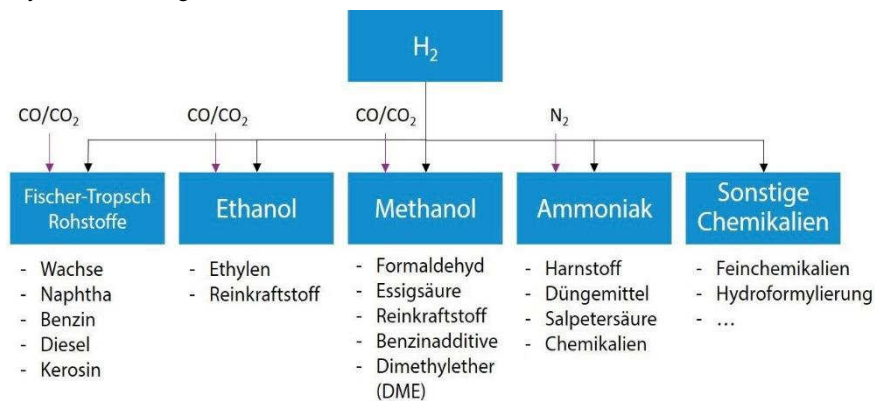


Abb. 4: Power-to-X als Ausgangsstoff für einen Großteil industriell genutzter Rohstoffe [38]

Ein weiterer Pfad zur Sektorenkopplung ist die Rückverstromung. Wasserstoff bzw. Methan können beispielsweise in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (z.B. in motorischen BHKWS, Brennstoffzellen, Gasturbinen oder Gas- und Dampfturbinen) wieder in Strom umgewandelt werden. Hierdurch wird die Nutzung gasförmiger Brennstoffe und die Verknüpfung der Energieinfrastruktur (Gas-, Strom- und Wärmenetze) ermöglicht. Die Energieversorgungsnetze sind demnach ein wesentliches Element für die energetische Sektorenkopplung. Der Rückgriff auf Gasspeicher, die in Deutschland seit vielen Jahrzehnten etabliert sind und über hohe Kapazitäten verfügen, ermöglichen es auch bei langen Zeiten ohne ausreichende Stromeinspeisung aus Wind- oder Solaranlagen ein Energiesystem Versorgungssicher zu betreiben.

Abbildung 5 stellt mit dem dargestellten „3-Säulen-Konzept“ [7] die Grundidee der Sektorenkopplung noch einmal stärker aus der industriellen Perspektive dar. Die erste Säule umfasst die direkte Verwendung von Strom für energieintensive Prozesse. Von hoher Bedeutung ist dabei, dass der Betrieb der Prozesse flexibel erfolgen kann. Konkret bedeutet dies, dass die Verfahren bei Vorliegen von nicht direkt anderweitig nutzbarem Strom in Volllast und zu anderen Zeiten entweder abgestellt oder in Teillast bzw. bivalent (beispielsweise Wechsel zwischen Gas und Strom bei der Wärmebereitstellung) betrieben werden können.

Die zweite Säule umfasst Verfahren, mit denen Ressourcen erschlossen werden können, deren Aufarbeitung bisher nicht wirtschaftlich war. Dabei kann es sich beispielsweise um geologische Lagerstätten mit vergleichsweise geringem Gehalt an Seltenen Erden, Metallschlacken oder um Abfälle handeln, die bisher nicht als Rohstoffquelle genutzt wurden, da ihre Aufarbeitung einen zu hohen Energieaufwand erforderte. Die dritte Säule beinhaltet wie bereits dargestellt die o.g. Carbon-Capture-and-Utilisation-(CCU)-Verfahren«, die mithilfe von elektrischem Strom Wasserstoff erzeugen und diesen mit CO_2 zu chemischen Grundstoffen oder Treibstoffen umsetzen. Potenzielle Produkte sind in Abb. 5 dargestellt.

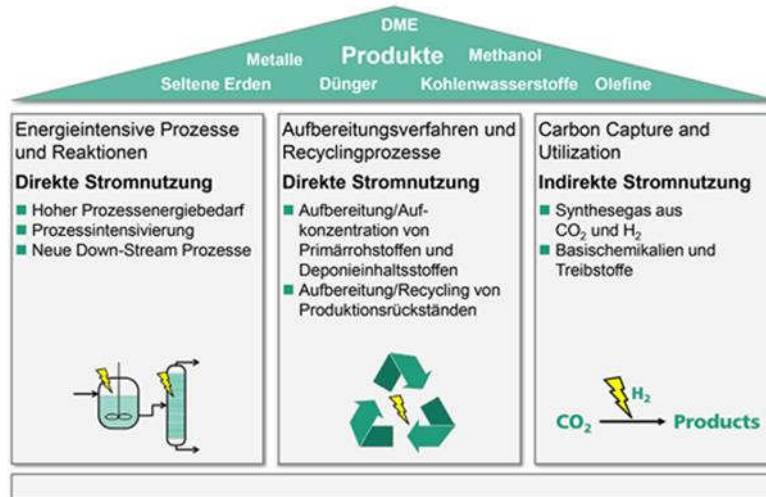


Abb. 5: Die drei Säulen des Power2Products-Konzepts [7]

Je nachdem, ob die Umsetzung von CO_2 mit Wasserstoff zum Zwecke der Energiespeicherung geschieht oder der Herstellung von Chemikalien dient, kann die vergleichende Bewertung der einzelnen Synthesen unterschiedlich ausfallen. So ist in einem Fall die direkte Nutzung des aus regenerativer Energie bereitgestellten Stroms das Ziel der Reaktion von CO_2 und Wasserstoff, während im anderen Fall durch indirekte Nutzung vermarktungsfähige Basischemikalien hergestellt werden sollen. Die ökonomische Bewertung des Umwandlungsschritts von Wasserstoff zum Produkt orientiert sich neben den Verfahrenskosten, hauptsächlich am Wert der gespeicherten Energie. Entscheidend ist dabei die Art der späteren energetischen Anwendung (Rückverstromung oder weitere Umwandlung z.B. zu Treibstoffen) sowie die Energiedichte und Energieeffizienz. Bei der Herstellung von Basischemikalien können energetische Umwandlungsverluste wirtschaftlich kompensiert werden, wenn ein Produkt hergestellt wird, das einen höheren Marktpreis erzielt als das Ausgangsprodukt Wasserstoff.

Welche stofflichen Speicher zukünftig von Bedeutung sein werden und in welcher Kombination, lässt sich heute noch nicht endgültig festlegen. So ist noch ungeklärt, wie hoch die über eine direkte Elektrifizierung abdeckbaren Anteile im Verkehrssektor sein werden und welche Kraftstoffmengen zukünftig noch erforderlich sind. Zumindest der Flugverkehr wird jedoch noch auf die Verwendung von Treib-

stoffen mit hoher Energiedichte angewiesen sein. Hier scheinen Kohlenwasserstoffe aufgrund ihrer hohen volumenbezogenen Energiedichte einen Vorteil gegenüber sauerstoffhaltigen Kohlenstoffverbindungen, wie DME, OME oder Methanol zu haben, obwohl diese schadstoffärmer verbrennen. Für die chemische Industrie ist CO_2 als Rohstoff von Interesse, weil CO_2 und Biomassen die einzigen verfügbaren Alternativen zu konventionellen Kohlenstoffträgern wie Kohle, Öl und Erdgas darstellen. Technologien, die CO_2 umwandeln sind dabei eine wichtige Option, Kohlenstoff der in einer primären Anwendung, beispielsweise einem Stahlwerk bereits verarbeitet wurde, erneut zu nutzen. Als Produkte sind hier Alkohole wie Methanol oder Ethanol von Interesse, da sie sich zu Olefinen und anderen etablierten Produkten der chemischen Industrie weiterverarbeiten lassen. Allerdings müssen hierzu erhebliche Mengen regenerativer Energie bereitgestellt werden. So würden für die von der deutschen chemischen Industrie jährlich umgesetzten 17 Mio t Kohlenstoff theoretisch 440 TWh_{el} benötigen, wenn die Herstellung chemischer Produkte komplett über den Pfad aus CO_2 und Erneuerbaren Energien erfolgen würde [7].

Technologien der Sektorenkopplung

Durch die zunehmende Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien und die ambitionierten Klimaschutzziele kommt der Sektorenkopplung zukünftig eine entscheidende Bedeutung zu. Viele der für die Sektorenkopplung relevanten Technologien und die sie verbindenden grundlegenden Infrastrukturen sind heute schon vorhanden oder befinden sich zumindest in der Erprobung. Die zentrale Herausforderung besteht daher vor allem in der optimierten Kombination der vielfältigen Kopplungstechnologien bzw. -pfade, wobei es einerseits darum geht aufgrund der langen Zeitkonstanten frühzeitig die richtigen Weichen zu stellen, andererseits nicht Gefahr zu laufen in Pfadabhängigkeiten zu geraten und angesichts der hohen Komplexität und Dynamik im System Handlungsmöglichkeiten oder Flexibilität zu verlieren.

Auf die hohe zukünftige Bedeutung der Sektorenkopplung weist auch die Bundesregierung explizit hin [8]. Der Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen („energy efficiency first“) und der direkten Nutzung erneuerbarer Energien werden aufgrund der Wirkungsgradvorteile Vorrang vor Technologien der Sektorenkopplung eingeräumt [8]. Tabelle 2 zeigt eine Übersicht der Sektoren und Technologien, wie sie durch das Bundeswirtschaftsministerium im Grünbuch Energieeffizienz skizziert werden. Dabei nimmt das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) auch neue strombasierte Verfahren der Bereitstellung von Rohstoffen für chemische Industrie mit auf (z.B. Plasmaverfahren), die zukünftig Bedeutung erlangen könnten und nicht den Weg über die elektrolytische Spaltung von Wasser gehen.

	Haushalte / GHD	Wärmenetze	Verkehr	Industrie	
Power-to-Heat	Wärmepumpen, direktelektrische Heizung	Großwärmepumpe, Elektrodenkessel		Prozesswärmeerzeugung in Elektrodenkesseln, Heizstab, Lichtbogen etc.	← Sektorkopplungs-technologien ← Substituierte Technologie und Energieträger
	Heizkessel (Erdgas und Heizöl)	Heizkessel (Erdgas und Heizöl)		Direktverbrennung (Erdgas)	
Power-to-Gas	Verbrennung in Heizkesseln und KWK-Anlagen	Verbrennung in Heizkesseln und KWK-Anlagen	Brennstoffzelle, Verbrennungsmotor, Gasturbine	Prozesswärmeerzeugung, stoffliche Nutzung	
	Erdgas	Erdgas	Verbrennungsmotor (Benzin, Diesel, Erdgas)	Erdgas und Kohle	
Power-to-Liquid	Verbrennung in Heizkesseln		Verbrennungsmotor, Gasturbine	Stoffliche Nutzung	
	Heizöl		Verbrennungsmotor (Benzin, Diesel, Kerosin)	Erdöl-Derivate	
Direktelektrische Antriebe			Elektro-PKW, Elektro-Zweiräder, elektrisch betriebener leichter Nutzverkehr und Busse, Schienenverkehr, Oberleitungs-LKW, Oberleitungs-Busse Verbrennungsmotor (Benzin, Diesel, Erdgas)		
Strombasierte neue Verfahren				Neue Verfahren (Plasma etc.)	
				Diverse konventionelle Verfahren	

Tabelle 2: Darstellung verschiedener Technologien zur Sektorenkopplung [9]

2. Heutige und zukünftige Bedeutung der Sektorenkopplung: Was bestimmt die Sektorenkopplung?

Die Kopplung zwischen unterschiedlichen Sektoren findet heute schon statt. Dies gilt insbesondere in Bezug auf die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). KWK-Anlagen sind auf der elektrischen Seite mit dem Stromnetz verbunden, auf der Wärmeseite mit Nah- oder Fernwärme- respektive Dampfnetzen, die die in Koppelproduktion bereitgestellte thermische Energie zu den Verbrauchsorten transportieren. Im Jahr 2013, der letzten veröffentlichten statistischen Erhebung, wurden deutschlandweit 16,6% (NRW: 9,5%) [10] des Stroms über KWK-Anlagen bereitgestellt. Eine weitere seit langem bereits eingeführte Form der Sektorenkopplung ist die Nutzung von Strom für die Bereitstellung von Wärme (z.B. im Rahmen von Nachtspeicherheizungen oder zunehmend elektrischen Wärmepumpen). Im Gegensatz dazu stehen Stromanwendungen im Bereich der Mobilität (zumindest jenseits des Einsatzes von Strom für schienengebundene Fahrzeuge und Oberleitungsbusse) noch vergleichsweise am Anfang. Derartige Nutzungsformen von Strom ergänzen die originären (direkten) Stromanwendungen, die ausschließlich oder in ihrer großen Mehrheit auf der Nutzung von Strom basieren. Hierzu gehören beispielsweise mechanische Antriebe in Industrie, Gewerbe und Haushalten oder künstliche Beleuchtung, die aktuell die Stromverwendung in Deutschland dominieren (siehe Abbildung 6).

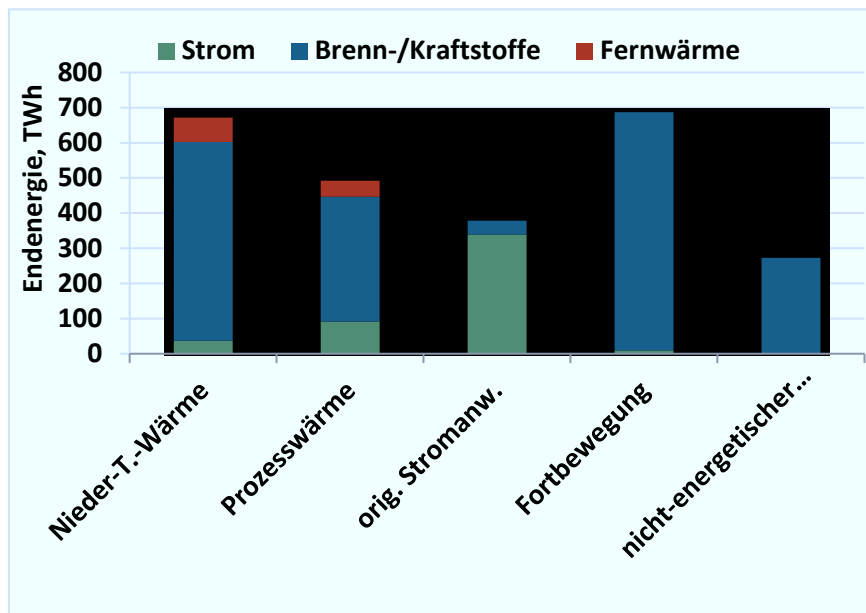


Abb. 6: Zuordnung der Hauptformen der Endenergie zu Nutzungsarten [11]

Im Rahmen der Umsetzung der Energiewende in Deutschland ist zu erwarten, dass der Einsatz von Strom jenseits der originären Anwendungen -und damit die Sektorenkopplung- erheblich zunehmen wird. Hintergrund ist einerseits das begrenzte Potenzial der direkten Nutzungsmöglichkeiten erneuerbarer Energien im Bereich der Wärmebereitstellung (z.B. über Solarkollektoren oder Biomasse) sowie der Mobilität (z.B. über Biokraftstoffe). Mit zunehmenden Treibhausgasminderungszielen ergibt sich aus den Sektoren heraus **auf der Zeitachse eine höhere Nachfrage nach klimaverträglichen Energieträgern** (respektive Einsatzstoffen für industrielle Prozesse).

Andererseits nimmt mit zunehmenden Anteilen von Strom aus erneuerbaren Energien in derselben Zeitspanne der Bedarf an Lastmanagementoptionen zu. Auch die Verfügbarkeit von Langzeitspeicheroptionen bedarf einer sukzessiven Steigerung, um eine Abregelung der volatilen Stromeinspeisung weitestgehend vermeiden zu können. Die Schlüsseltechnologien der Sektorenkopplung wie PtX, oder elektrische Antriebe im Verkehr können hierzu einen Beitrag leisten. Durch höhere Treibhausgasminderungsziele und den damit verbundenen steigenden Druck zur Minderung der THG-Emissionen der Endenergiesektoren sowie durch höhere Anteile fluktuierender Einspeisung von Strom entsteht dementsprechend eine doppelte Notwendigkeit zur Intensivierung der Sektorenkopplung.

Nachfolgende Abbildung stellt die potentielle zukünftige Entwicklung für das Jahr 2050 auf der Basis einer Metaanalyse unterschiedlicher aktueller Energieszenarien für Deutschland dar. Dabei kann der hier dargestellte resultierende Strombedarf als indirektes Maß für die notwendige Sektorenkopplung dienen.

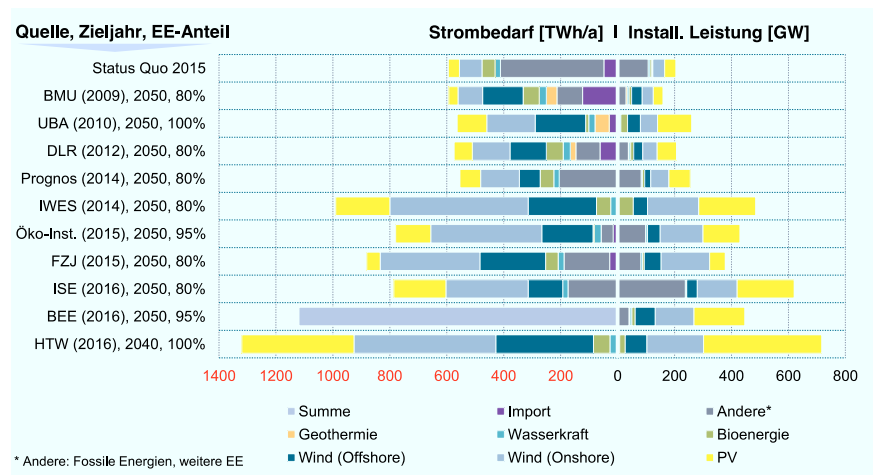


Abb. 7: Metaanalyse der Entwicklung des Strombedarfs für Deutschland für das Jahr 2050 [12]

Aus der vergleichenden Betrachtung der Energieszenarien wird insbesondere der starke Einfluss des Treibhausgasminderungsziels auf den Strombedarf deutlich. Offensichtlich ist dies aber nicht die einzige Einflussgröße. Eine detailliertere Betrachtung der Szenarien lässt folgende Einflussfaktoren als maßgeblich erscheinen:

- Treibhausgasminderungsziel und damit resultierender Minderungsdruck von Treibhausgasemissionen in den Endenergiesektoren: Vereinfacht betrachtet zeigen die vorliegenden Szenarien, dass je nach sonstigen Annahmen ein Minderungsziel von 80% ohne eine signifikante Einführung von PtX-Technologien erreicht werden kann, während ambitioniertere Ziele ohne einen weitgehenden Einsatz von PtX-Optionen nicht auskommen und entsprechend zu den daraus resultierenden sehr hohen Strombedarfen führen.
- Umsetzungsintensität der alternativen Treibhausgasminderungsoptionen in den Endenergiesektoren:
 - Nutzung der direkten Einsatzmöglichkeiten erneuerbarer Energien (z.B. Solarthermie, Geothermie, Biokraftstoffe) für die Abdeckung der Endenergienachfrage
 - Ausschöpfung der Energieeffizienzpotenziale in den Endenergiesektoren und den sonst steigenden Strombedarf der anderen Sektoren zu senken.
- Eigene Erzeugung und Import von PtX-Produkten nach Deutschland: Neben der Erzeugung der Produkte vor Ort ist auch ein direkter Import von PtX-Produkten (z.B. synthetische strombasierte flüssige Kraftstoffe) ähnlich den im Moment üblichen Mineralöl- oder Erdgasimporten nach Deutschland möglich. Zentrale Einflussfaktoren dafür sind u.a.
 - (Realisierbare) Stromerzeugungspotenziale erneuerbarer Energien in Deutschland
 - Möglichkeiten des Imports von Strom aus erneuerbaren Energien aus dem Ausland
 - Möglichkeiten des Aufbaus einer PtX-Produktionsstruktur (inkl. Infrastrukturen) in Deutschland und der diese bestimmenden ökonomischen, technischen, institutionellen und strukturellen Einflussgrößen
 - Geopolitische und wirtschaftliche Erwägungen beim Import von Strom respektive PtX-Produkten aus dem Ausland
- Verfügbarkeit und Umsetzung von Flexibilitätsoptionen zur Abdeckung (Pufferung) der volatilen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien

und damit der zeitlichen Verschiebung des Bedarfs an Langzeitspeichern.

- Verfügbarkeit einer leistungsfähigen Netzinfrastruktur zur Integration der erneuerbaren Energien und der PtX-Kopplungselemente sowie zur Übertragung von insbesondere Strom von Erzeugungs- zu Bedarfschwerpunkten

Die Darstellung der Einflussfaktoren macht die Komplexität der Energiesystemtransformation noch einmal sehr deutlich. Zudem wird klar, dass an verschiedenen Stellen im System und zu verschiedenen Zeiten strukturelle Entscheidungen notwendig sind (z.B. für den Aufbau von neuen PtX-Infrastrukturen bzw. die Erhöhung der bestehenden Netze). Dabei geht es um hohe Investitionen, die mit hohen Fixkosten verbunden sind und ggf. Vorleistungen oder begleitende Maßnahmen (z.B. politischer und gesellschaftlicher Diskurs zur Sicherstellung der Akzeptanz) für die konkrete Umsetzung erfordern. Eine wichtige Rolle spielt hier ebenfalls das Thema der Verhaltensmuster. Durch neue Standards (bisher beispielsweise im Bereich energieeffiziente Haushaltsgeräte bereits erfolgreich umgesetzt) und gesetzlich vorgegebene Grenzwerte sollen neue Routinen entstehen, die innovative Technologien zur Unterstützung der Energiewende einleiten. Als Beispiel können etwa der Wechsel zur Elektromobilität oder der Erwerb klimaschonender Heiztechnologien wie der Wärmepumpe genannt werden.

Aufgrund der mit ihnen häufig verbundenen hohen Zeitkonstanten ist zudem wichtig, dass keine Pfadabhängigkeiten entstehen und die Flexibilität der Systementwicklung nicht in signifikantem Maße eingeschränkt wird. Dabei kann es sich sowohl um technische, strukturelle, ökonomische als auch regulative Pfadabhängigkeiten handeln.

Reflektiert man die Entwicklungsperspektiven und Herausforderungen der Energiesystemtransformation wird deutlich, dass sich daraus ein Phasenprinzip für die Sektorenkopplung ableiten lässt. Dabei lassen sich drei maßgebliche Pfade auf der Zeitachse unterscheiden, die jeweils unterschiedliche Maßnahmen erfordern:

- **Kurzfristig (2025) – Einstiegsphase der Sektorenkopplung**
Ziel ist hier -ausgehend vom aktuellen Stand der Sektorenkopplung heute- bereits verfügbare Optionen in die Umsetzung zu bringen, sofern mit ihnen ein direkter Vorteil verbunden ist (z.B. Beitrag zur Treibhausgasminderung) und zukünftige Maßnahmen nicht verhindert werden. Beispielhaft hierfür steht die breitere Marktdurchdringung von Erdgas-Bussen (die zukünftig auf strombasierte Gase umgestellt werden könnten). Notwendig ist diese Phase ferner für die Vorbereitung mittel- bis langfristig relevanter Optionen durch z.B. zielorientierte F&E-Maßnahmen, Sammeln von Erfahrungen in Pilot- und Demonstrationsvorhaben, Schaffung regulatorischer Rahmenbedingungen, so dass aus F&E-Maßnahmen marktfähige umsetzungsfähige Produkte und/oder Dienstleistungen werden können. Beispielsweise sollen Studien zur Entwicklung der Energieinfrastruktur (z.B. H₂) durchgeführt werden. Auch politische und gesellschaftliche Diskurse zur ganzheitlichen Bewertung unterschiedlicher Entwicklungsoptionen des Energiesystems sowie spezifischer Technologien gehören dazu. Im Wärmesektor können PtH-Technologien in Kombination mit Wärmespeichern zur netzdienlichen Nutzung von Überschussstrom und damit zur Minderung der THG-Emissionen des Wärmesektors beitragen.
- **Mittelfristig (2030) – Aufbauphase der Sektorenkopplung**
Ziel in dieser Phase ist der konkrete Aufbau und die Bereitstellung der

notwendigen Infrastrukturen für die Umsetzung der Sektorkopplung. Konkret geht es um die Nutzungsanalyse bestehender Strukturen (z.B. Gas-, Wärmenetze oder Rohstoffpipelines), die Weiterentwicklung bestehender Strukturen (z.B. Stromnetze, Kuppelstellen mit dem Ausland) oder den Aufbau neuer Strukturen (z.B. H₂). Nicht zuletzt stellen sich in dieser Phase zentrale Fragen der Finanzierung und der daran beteiligten Akteure sowie zu Aspekten der europäischen Einbettung.

- **Langfristig (2050) – flächendeckende Umsetzung der Sektorkopplung**

Ziel in dieser Phase ist die sukzessive Umsetzung einer treibhausgasneutralen Energieversorgung im Bereich der Energiebereitstellung ebenso wie in den Endenergiesektoren. Damit geht es in dieser Phase vor allem auch um die Errichtung einer flächendeckenden PtX-Infrastruktur sowie um Entscheidungen über das Wechselspiel zwischen heimischer Erzeugung und der Etablierung von stabilen Importstrukturen.

Entlang der drei Phasen spielt parallel die weitere Marktdurchdringung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien eine zentrale Rolle. Abbildung 8 versucht die unterschiedlichen Phasen der Systemtransformation respektive der Sektorkopplung vereinfacht grafisch darzustellen und macht dabei den Vorreitercharakter des Stromerzeugungssektors deutlich.

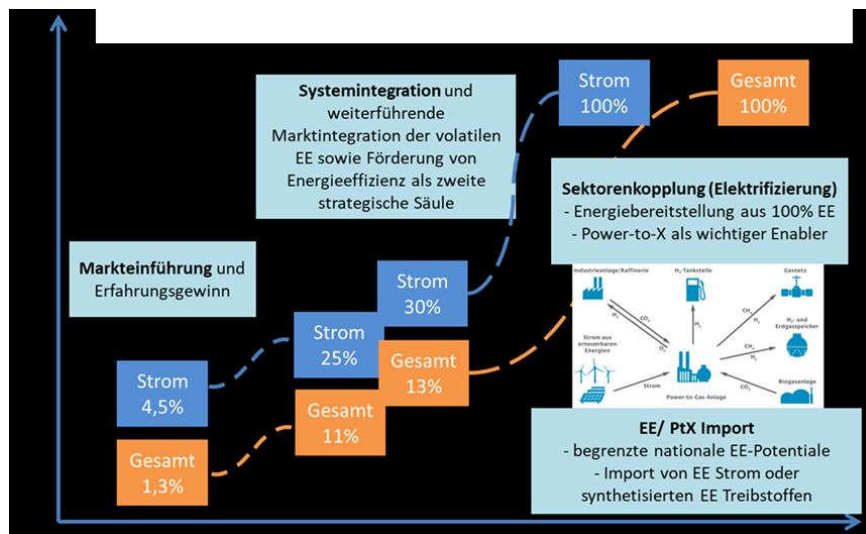


Abb. 8: Vereinfachte schematische Darstellung der Umsetzungsschritte der Transformation des Energiesystems (Quelle: eigene Darstellung)

Eine zentrale Aufgabe bei der Gestaltung der Transformationsphasen ist neben der Berücksichtigung von potentiellen Pfadabhängigkeiten im Entscheidungsprozess der adäquate Umgang mit Unsicherheiten und Risiken. Aufgrund der Vielfalt an Einflussfaktoren und der hohen Systemdynamik (u.a. aufgrund stetiger technologischer Entwicklungen aber auch hinsichtlich der Anforderungen an regulatorische Rahmenbedingungen z.B. für den Umfang mit stetig steigenden Zeiten mit Grenzkosten Null bei der Stromerzeugung) kommt letztgenannten Aspekten eine besondere Bedeutung zu. Dies gilt auch vor dem Hintergrund, dass die Energiewende und damit die Transformation des Energiesystems nicht nur durch einige wenige Ziele determiniert ist, sondern vor allem auch in Bezug auf die gesellschaftliche Akzeptanz des Transformationsprozesses einem breiteren Zielportfolio gerecht werden muss (inkl. ökonomische und soziale Faktoren). Die Aufgabe im Rahmen der einzelnen Transformationsphasen besteht daher auch darin, die

verfügbaren Optionen einer breiteren Wirkungsabschätzung (impact assessment) zu unterziehen und möglichst robuste Strategien für die Umsetzung auszuwählen. Szenarioanalysen und vor allem Sensitivitätsbetrachtungen können dabei ebenso unterstützend wirken wie multi-kriterielle Bewertungstools.

An dieser Stelle hat die Erarbeitung und Einführung neuer Standards und Grenzwerte eine immense Bedeutung zur Etablierung neuer Routinen, die eine Transformation des Energiesystems mithilfe erhöhter Suffizienz beschleunigen würden. Wegen des langen Betrachtungshorizonts und hohen Investitionsvolumina gehört dabei auch die Analyse und Einschätzung von potentiellen „game changern“ zu wichtigen Aufgaben. Als Beispiel für einen „game changer“ kann der Umgang mit der Technologie der CO₂-Abtrennung und Speicherung (CCS: carbon capture and storage) herangezogen werden. Ändert sich die aktuelle eher ablehnende Einstellung gegenüber der Technologie in Deutschland maßgeblich, kann dies dazu führen, dass der Druck für die Einführung klimaverträglicher Brenn- und Kraftstoffe in einzelnen Sektoren (z.B. energieintensive Industrie) deutlich zurückgeht und Maßnahmen der Sektorenkopplungen weniger bedeutsam werden. Auf der anderen Seite könnte die Verwendung von CO₂ zur Bereitstellung klimaverträglicher Brenn- und Kraftstoffe (CCUS: carbon capture utilization and storage) den Optionenraum für die Sektorenkopplung zu erhöhen.

Die Sektorenkopplung und ihr Beitrag für die Erreichung energiepolitischer Ziele ist nicht nur ein Thema für NRW und Deutschland insgesamt, sondern ist auch auf europäischer Ebene von immenser Bedeutung. Die EU strebt mithilfe einer Energieunion neben dem europäischen Energiebinnenmarkt auch ein Zusammenwachsen der Energieinfrastruktur an [13]. Die Rolle der Sektorenkopplung ist auch hier zentral verbunden mit dem Ausbau erneuerbarer Energien für die Stromerzeugung und die damit korrespondierende (volatile) Einspeisecharakteristik. Ebenso gibt es starke Wechselwirkungen hinsichtlich der Fragestellungen zum regionalen und überregionalen Aus- und Umbau der Netzinfrastrukturen. Insofern erscheint es sinnvoll zu hinterfragen, wie andere Länder mit der Zunahme an fluktuierender Stromerzeugung bisher umgehen und welche Pläne sie haben.

In einigen europäischen Ländern sind bereits Demonstrationsvorhaben zur erweiterten Nutzung von Strom und zur Kopplung zwischen Sektoren initiiert worden. Deutschland bildet neben Großbritannien, Dänemark und Frankreich dabei den Schwerpunkt für Power-to-X Demonstratoren. Im Vordergrund derzeitiger Projekte zur verbesserten Nutzung einer dargebotsabhängigen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien stehen dabei die Wasserelektrolyse ohne und mit Methanisierung sowie Beimischung ins Erdgasnetz, die Erzeugung synthetischer Kraftstoffe, die Wärmeerzeugung inklusive deren Speicherung und die strombasierte Erzeugung chemischer Grundstoffe.

3. Projektbeispiele in NRW

Das Bundesland NRW kann bereits auf zahlreiche Erfahrungen mit der Sektorenkopplung zurückgreifen. Im Folgenden sollen einige Projekte vorgestellt werden, die bereits auf unterschiedlichen Ebenen Sektorenkopplung real in NRW umsetzen bzw. sich gerade in der Umsetzung befinden. Dabei handelt es sich sowohl um Forschungs- und Entwicklungsprojekte, als auch um konkrete Maßnahmen zur sukzessiven Markteinführung. Inhaltlich werden hier beispielhaft Projekte zum verstärkten Einsatz von Strom im Verkehrs- und Wärmesektor dargestellt sowie Power-to-X Anwendungen. Hinzu kommen Projekte zur CO₂-Abscheidung und weitergehenden Nutzung innerhalb energieintensiver Produktionsprozesse, welche ebenfalls Sektorenkopplung im weiteren Sinne betreiben.

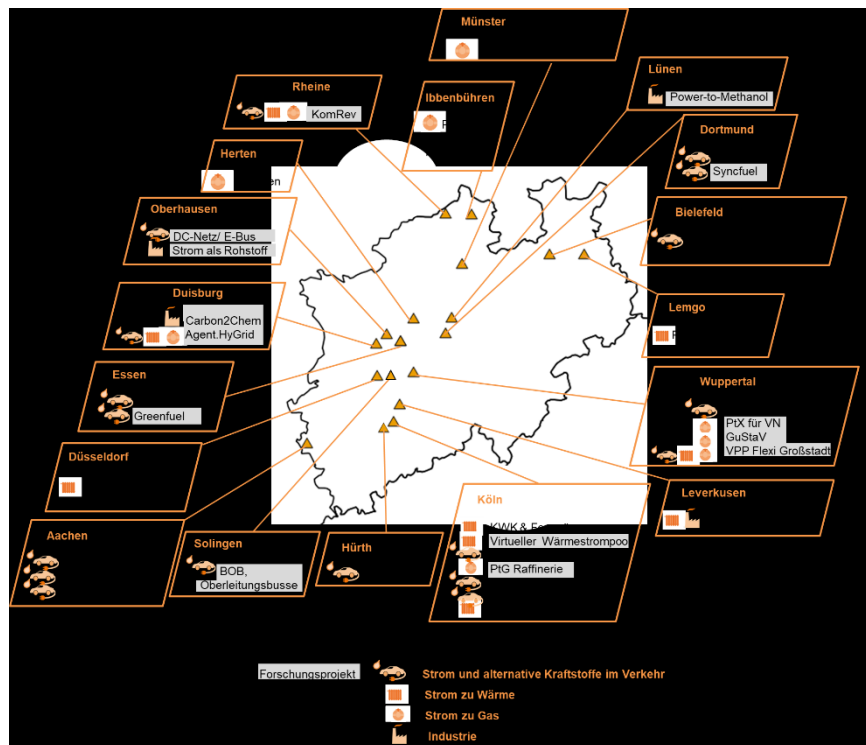


Abb. 9: Projektkarte zur Sektorenkopplung in NRW – ausgewählte Projekte in NRW (eigene Darstellung)

Anhang I stellt eine umfassendere Übersicht über die ausgewählten Projekte im Land dar, die auf der Basis einer Umfrage unter den AG-Beteiligten gewonnen wurde und insofern keinen Anspruch auf Vollständigkeit hat. Abb. 9 gibt einen Eindruck über die regionale Verteilung der Aktivitäten im Land, wobei deutlich wird, dass Projekte in nahezu allen Landesteilen durchgeführt werden.

Einsatz von Strom und alternativen Kraftstoffen im Verkehrssektor

Die Projekte in NRW zur Minderung der THG-Emissionen des Verkehrssektors zielen auf die verstärkte Integration erneuerbaren Energien mittels Sektorenkopplung ab. Neben der Einführung von Elektrofahrzeugen im Bereich der privaten Nutzung geht es bei zahlreichen Projekten auch explizit um die Elektromobilität in gewerblichen und kommunalen Flotten, sowie die Etablierung unterschiedlicher emissionsfreier Antriebe im ÖPNV. Im Bereich Elektromobilität wurden aufbauend auf der Modellregion Elektromobilität NRW, seit dem Jahr 2010 über 80 Projekte in NRW gestartet, welche einen Einsatz von ca. 900 Elektrofahrzeugen und 1.300 Ladepunkten umfassen. Hinzu kommt das NRW Leitvorhaben „NRW Hydrogen

HyWay“, mit dem weitere 25 Vorhaben zur Entwicklung von Mobilität auf Basis von Wasserstoff realisiert wurden.

Aktuell sind viele Projekte aus dem Verkehrsbereich in NRW in der Umsetzung bzw. sind kürzlich abgeschlossen worden und befinden sich in der Auswertung. Beispielhaft seien an dieser Stelle zwei aktuelle Projekte genannt, weitere sind im Anhang aufgeführt:

- In **Solingen** wird mit dem Ziel, den öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) zu elektrifizieren, eine Kombination bewährter Oberleitungsbus- und neuester Batterietechnologien zur Überbrückung von Strecken ohne Oberleitung im sogenannten **Batterie-Oberleitungs-Bus (BOB)** umgesetzt. Zusätzlich wird ein Smart-Trolley-System realisiert, das die Einbindung von fluktuierenden erneuerbaren Energien sowie von Speichern ermöglicht. Das Gleichstrom(DC)-Oberleitungsnetz wird mit dem vorgelegerten Wechselstrom(AC)-Netz gekoppelt und einerseits hinsichtlich eines intelligenten netzdienlichen Betriebs sowie andererseits hinsichtlich eines marktdienlichen Einsatzes mittels Vermarktung von Flexibilität an unterschiedlichen Handelsplätzen untersucht.
- Das Verkehrsunternehmen **Regionalverkehr Köln GmbH (RVK)** setzt seit dem Jahre 2011 mit vier **Wasserstoffbussen** auf emissionsfreien Antrieb im ÖPNV. Die erforderliche Wasserstofftankstelle ist in Hürth am Chemiapark Knappsack errichtet worden und stellt den als Nebenprodukt in der benachbarten Chemieindustrie anfallenden Wasserstoff für die Betankung der Busse sowie weitere Fahrzeuge zur Verfügung.

Einsatz von Strom im Wärmesektor

Neben dem Verkehrssektor bietet insbesondere der Wärmebereich ein erhebliches Reduktionspotenzial zur Minderung der THG-Emissionen, z.B. mittels Elektrifizierung. In NRW befinden sich verschiedene Power-to-Heat Projekte in unterschiedlichen Entwicklungsstadien, von denen hier beispielhaft eines vorgestellt wird (weitere Projekte sind im Anhang dargestellt).

Die **Stadtwerke Lemgo** betreibt seit 2012 Sektorenkopplung durch **Power-to-Heat**. Das bisher durch KWK-Anlagen gespeiste Fernwärmenetz wird nun durch einen 5 MW Elektrodenkessel mit integriertem Wärmespeicher zur Nutzung von regenerativem Überschussstrom unterstützt. Die Nutzung des Überschussstroms wird in Form von negativer Regelenergie vermarktet und damit eine zusätzliche Einkommensquelle geschaffen.

Einsatz von Strom in weiteren Power-to-X-Anwendungen

Neben dem gezielten Einsatz von Strom im Verkehrs- und Wärmebereich, wurden zudem PtX-Projekte in NRW mit verstärkt netzdienlichen Zielsetzungen umgesetzt. Sektorenkopplung wird hier etwa zur optimalen Ausnutzung der Strom- und Gasnetze durch eine intelligente Steuerung der beiden Energieflüsse realisiert und unter unterschiedlichen Gesichtspunkten untersucht. Darüber hinaus wurden Projekte zur Wasserstoffproduktion mit Einsatz im Verkehrsbereich oder zur Rückverstromung in NRW realisiert. Exemplarisch ist hier ein Vorhaben aufgeführt (weitere Projekte sind im Anhang I dargestellt).

- Das im Jahr 2016 gestarteten Verbundprojekt **Designetz**, umfasst insgesamt 46 Projektpartner und versucht über eine Laufzeit von ebenfalls vier Jahren durch die Analyse ausgewählter Modellregionen eine Blaupause für wichtige Bausteine der Energiewende in Deutschland auf der Netzebene zu entwickeln. Der Kern von Designetz liegt in der Entwicklung optimierter markt-, netz- und systemdienlicher Flexibilitäten durch

die Vernetzung unterschiedlicher Sektoren mit der Zielsetzung der erhöhten Nutzung dezentral entstehender Strommengen aus erneuerbaren Energien. Im Power-to-Heat Bereich ist die Installation von Anlagen im Verteilnetz zum netzdienlichen Einsatz (Westnetz, PtH Werne) oder im Rahmen dezentraler Nahwärmekonzepte (DEW21, Wärme 2.0) geplant. Neben dem Betrieb von Power-to-Gas Anlagen (Westnetz, PtG Ibbenbüren) mit anschließender Einspeisung in das Erdgasnetz, ist die Kopplung von Gas und Strom auch durch den Einsatz stromgeführter KWK-Anlagen (in Kombination mit Wärmespeichern) vorgesehen (Regionales Verbundsystem Westeifel- Teilprojekt Biogas). Die Kopplung Power-to-Mobility wird neben dem direkten Einsatz von Strom in der Elektromobilität auch durch Power-to-Gas-Anwendungen mit anschließender Methanolherstellung umgesetzt.

Sektorenkopplung in der Industrie

Im Gegensatz zur energetischen Sektorenkopplung, geht es bei der branchenübergreifenden Sektorenkopplung in der Industrie um den Ersatz fossiler Rohstoffe durch die gezielte Abscheidung und Nutzung von CO₂-Stoffströmen in Produktionsprozessen. NRW als stark industriell geprägtes Bundesland besitzt hier ein enormes Potenzial zur industriellen Sektorenkopplung im Sinne einer Minderung der THG-Emissionen großtechnischer Produktionsprozesse. Nachfolgend ist ein Vorhaben beispielhaft für diesen Bereich aufgeführt (weitere Projekte sind im Anhang dargestellt)

- Das Projekt **Carbon2chem®** befindet sich seit Mai 2016 in der Umsetzungsphase. Das Großforschungsvorhaben wird vom BMBF gefördert und durch die Thyssenkrupp AG (Essen), Fraunhofer UMSICHT (Oberhausen) und dem Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion (Mülheim an der Ruhr) koordiniert.¹ Die geplante Laufzeit beträgt 4 Jahre. Ziel des Projektes ist die Entwicklung einer nachhaltigen Wertschöpfungskette, über die unterschiedliche Sektoren gekoppelt werden. Konkret sollen dabei bei der Stahlerzeugung anfallende Prozessgase (Hüttengase) zur Herstellung chemischer Produkte verwendet werden, um als Grundstoffe für die chemische Industrie sowie für synthetische Kraftstoffe Verwendung zu finden. Hierzu soll Wasserstoff eingesetzt werden, der zum einen in ausgewählten Teilströmen der Hüttengase enthalten ist und zum anderen elektrolytisch mit regenerativem Strom hergestellt wird. Mit dem Carbon2Chem®-Ansatz soll ein Teil des deutschen CO₂-Ausstoßes der Stahlbranche mit einem jährlichen Potenzial von 20 Millionen Tonnen künftig wirtschaftlich nutzbar gemacht werden. Dies entspricht 10% der jährlichen CO₂-Emissionen der deutschen Industrieprozesse und des verarbeitenden Gewerbes. [14] Das Projekt steht exemplarisch für neue Konzepte, die die Wettbewerbsfähigkeit von energieintensiven Industrien durch eine Kopplung des Energie- und Industriesektors erhalten wollen.

¹ Dem Carbon2Chem®-Konsortium gehören die folgenden Partner an: AkzoNobel, BASF, Clariant, Covestro, Evonik, Fraunhofer ISE, Fraunhofer UMSICHT, Karlsruher Institut für Technologie, Linde Group, Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion, Max-Planck-Institut für Kohlenforschung, Ruhr-Universität Bochum (RUB), RWTH Aachen, Siemens AG, thyssenkrupp, TU Kaiserslautern, Volkswagen Konzern, ZBT Zentrum für Brennstoffzellentechnik GmbH

Sektorenkopplende Infrastruktur

Derzeit forscht die Rheinische NETZGesellschaft in einem Dreijahresprojekt mit Laufzeit bis Mitte 2019 an der **sektorübergreifenden Kopplung** verschiedener Energiesysteme (Gas, Strom, Wärme) auf Verteilnetzebene (Projekt "es-flex-infra"). Sie untersucht hierzu drei Netzgebiete mit unterschiedlichen Charakteristika:

- Kölner Innenstadt: Diese ist durch eine bereits gut und dicht ausgebaute Netzinfrastruktur gekennzeichnet, welche dementsprechend durch zusätzliche Verknüpfungspunkte optimiert werden kann.
- In Planung befindliches Neubaugebiet: Hier können ergänzend zu im Grenzbereich bestehenden Infrastrukturen neue Konzepte entwickelt werden.
- Ländliches Gebiet im Rheinisch-Bergischen Kreis: Dieses weist eine gering ausgebaute Infrastruktur mit entsprechend hohen baulichen Freiheitsgraden auf.

Insgesamt wurden also in allen Sektoren bereits zahlreiche Projekte und Technologien in unterschiedlichen Größenordnungen sowie von unterschiedlichsten Akteuren umgesetzt, bzw. befinden sich in der Umsetzungsphase. Hierdurch konnten bereits erste wichtige (Betriebs-) Erfahrungen mit Sektorenkopplungstechnologien gewonnen werden, welche es weiter auszubauen gilt, um die Energietransformation in NRW innovativ voranzutreiben.

4. Spezifika, resultierende Herausforderungen und Ableitung eines konkreten Phasenkonzeptes der Sektorenkopplung für NRW

Schon heute sind in NRW vielfältige Anlagen installiert mit denen wertvolle Erfahrungen für die Gestaltung der Sektorenkopplung gewonnen werden können. Bei der Weiterentwicklung ist eine Bezugnahme auf die besonderen Eigenschaften des Landes von hoher Bedeutung. Dies gilt insbesondere mit Blick auf den hohen Anteil energieintensiver Industrien am Endenergiebedarf, und der zentralen Rolle der Energiewirtschaft mit einem hohen Anteil zentraler Kraftwerke. Aus der gewachsenen Struktur des Landes heraus ergeben sich einerseits Herausforderungen zur Sicherung des Standortes, aber auch maßgebliche Chancen die anstehenden Veränderungen im Energiesystem positiv zu nutzen und sich als zentraler Akteur im Bereich der Sektorenkopplung zu etablieren.

Die Transformation des Energiesystems -und damit auch die Sektorenkopplung- kann als Phasenprozess gesehen werden. In jeder der Phasen müssen zentrale Entscheidungen getroffen werden und entscheidende Weichen gestellt werden. Nachfolgend wird das in Kapitel 3 theoretisch eingeführte Konzept auf die Sektorenkopplung in NRW übertragen und es werden Beispiele für Maßnahmen (kurz-, mittel-, langfristig) entlang der drei unterschiedenen Phasen abgeleitet. Dabei besteht kein Anspruch auf Vollständigkeit. Auch kann hier keine umfassende und in sich konsistente Roadmap entwickelt werden. Das Ziel ist vielmehr anhand von Beispielen zu illustrieren, welche Maßnahmen auf der Zeitachse notwendig sind, um die Chancen für das Land ausschöpfen zu können. Die Erarbeitung einer Roadmap wäre daher ein nächster wichtiger Entwicklungsschritt.

4.1 Spezifika des Landes NRW

Das Energieland NRW zeichnet sich durch eine sehr vielfältige Verbrauchsstruktur ab.

Im Hinblick auf erschließbare Potenziale der Sektorenkopplung in NRW ist ein anfänglicher Blick auf die Energienachfrage der einzelnen Sektoren hilfreich, insbesondere in Kombination mit den hier aktuell zum Einsatz kommenden Energieträgern. Die untenstehende Abbildung zeigt den Endenergieverbrauch in NRW im Jahr 2014 differenziert nach den Einsatzbereichen Industrie, Dienstleistungen (GHD), Haushalte und Verkehr sowie den jeweils hier eingesetzten Energieträgern.

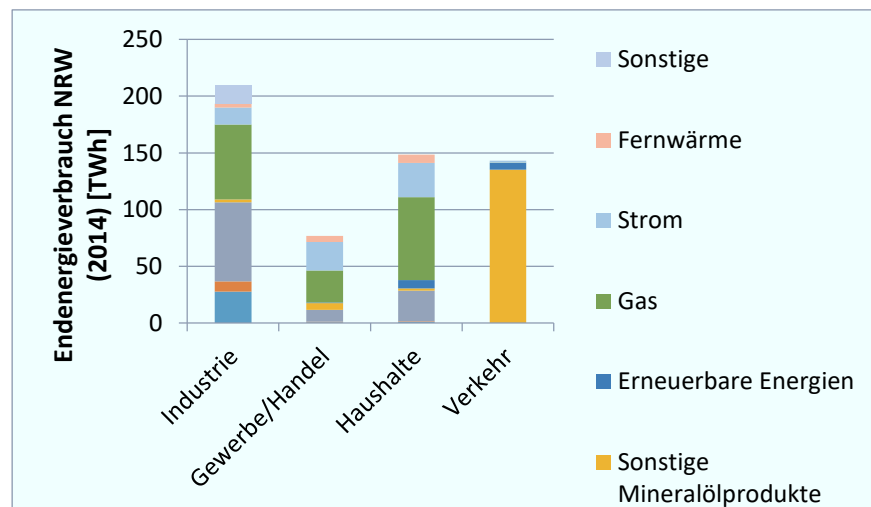


Abb. 10: Endenergieverbrauch in NRW (2016) nach Verbrauchssektoren (Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [15])

Es zeigt sich, dass der höchste Endenergieverbrauch im Industriesektor zu verzeichnen ist, welcher zu großen Teilen mit Heizöl und Gas gedeckt wird. Da die hier eingesetzten Primärenergieträger zu großen Teilen zur Wärmeproduktion (inkl. Prozesswärme) eingesetzt werden, bietet sich hier ein großes Potenzial zum Einsatz von Wärme aus erneuerbaren Energien (Niedertemperaturwärme) oder auch zum Einsatz von Strom durch sektorenkoppelnde Technologien (inkl. innovativer Technologien wie Infrarot- oder Mikrowellen). Das Wuppertaler Institut ermittelte in NRW u.a. die Potenziale von PtH in der Industrie. Differenziert nach Branchen wurden beispielsweise die Substitutionspotenziale zum Dampfeinsatz durch Strom herausgestellt. Das Substitutionspotenzial wird auf rund 91 TWh geschätzt und würde vor allem in der chemischen Industrie sowie in Raffinerien und in der Papier- und Zellstoffindustrie ausgeschöpft werden können. Abb. 12 zeigt das relative Potenzial sowie den Standort derjenigen Industrien (nach Branchen), in denen eine Herstellung von Dampf aus Strom geeignet ist.

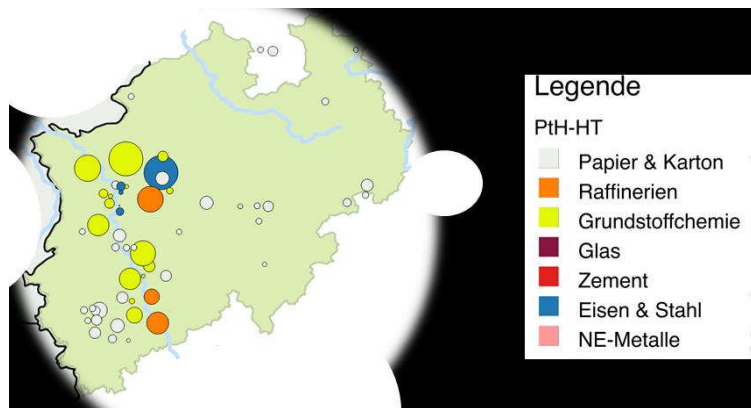


Abb. 11: Dampfeinsatz/-substitutionspotenziale nach Branchen in NRW (Quelle: Wuppertal Institut)

Andere von Wuppertaler Institut ermittelte Substitute betreffen beispielsweise die fossilen Brennstoffe mit Einsatz in der Industrie. Dieses Potenzial beläuft sich auf 59 TWh_{el}. Im Vergleich zur Industrie ist die Endenergienachfrage der Haushalte sowie des Verkehrsbereichs deutlich geringer. Aber gerade der Verkehrssektor, dessen Energieendverbrauch zu 95% aus fossilen Kraftstoffen (Mineralölprodukten) gedeckt wird, bietet ein großes Potenzial zur Minderung der THG-Emissionen durch Sektorenkopplung und zugleich zur Reduzierung der lokalen Schadstoffemissionen (z.B. Stickoxide). In Bezug auf die Elektromobilität rangiert NRW im bundesdeutschen Vergleich auf Rang drei (vgl. Abb. 14 und Abb. 15). 17% aller Neuzulassungen batterieelektrischer Fahrzeuge (5.900) im Jahr 2016 wurden in NRW verzeichnet [16]. Die geringen absoluten Zulassungszahlen zeigen aber auch deutlich, dass sich die Elektromobilität auch in NRW noch in einer sehr frühen Markteinführungsphase befindet. Zudem ist zu beachten, dass von den insgesamt 15.348 eingereichten Anträgen zur Kaufprämie für Elektrofahrzeuge mehr als die Hälfte von Unternehmen gestellt worden ist und das Interesse privater Nutzer danach noch entsprechend klein ist. In NRW wurden 2016 ca. 350 neue öffentliche Ladepunkte geschaffen, die Gesamtzahl beläuft sich damit auf insgesamt 1.603 Ladepunkte (vgl. Abb. 12). Aktuelle Entwicklungen zufolge ist davon auszugehen, dass neben der Möglichkeit des öffentlichen Ladens von Elektrofahrzeugen in der Praxis vermutlich das Laden am privaten Anschluss sowie an der Arbeitsstelle zukünftig dominieren könnte.

Derzeit fördert das Bundesland NRW mit seinem Sofortprogramm Elektromobilität unter dem Förderprogramm *progres.nrw* 50% der Kosten für die Errichtung privater oder öffentlich genutzter Ladepunkte. Einen Überblick über derzeitige Förderprogramme im Bereich Sektorenkopplung befindet sich im Anhang 2.



Abb. 12: Entwicklung des Bestandes an reinen Elektrofahrzeugen und öffentlich zugänglichen Ladepunkten in NRW 2016 [16]

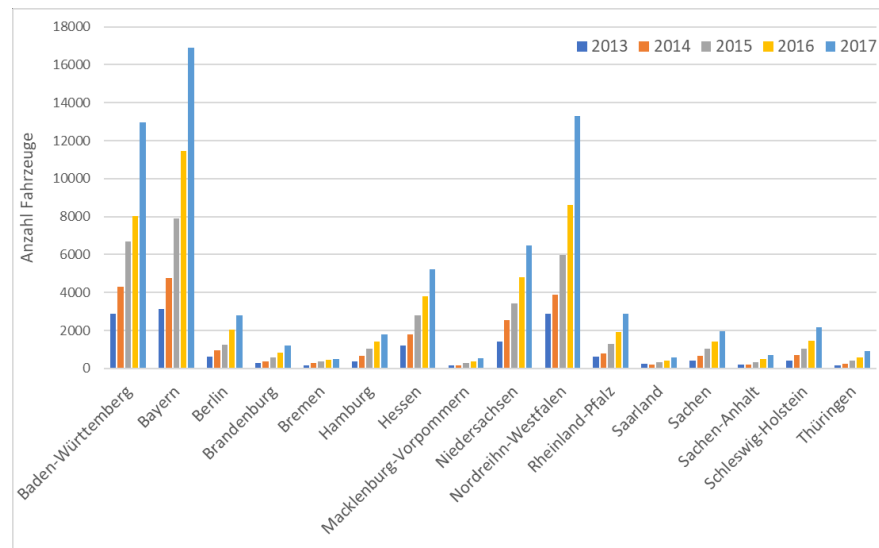


Abb. 13: Bestand aller Elektroautos nach Bundesländern [39]

Der Masterplan Elektromobilität NRW [17] evaluiert in regelmäßigen Abständen den Entwicklungsstand der Elektromobilität in NRW und gibt konkrete Handlungsempfehlungen. Neben konkreten Forschungsschwerpunkten etwa in der Batterieforschung, Fahrzeugtechnik sowie im Bereich Infrastruktur und Netze (Schnellladestellen) weist er darauf hin, dass gesteigerte Akzeptanz durch geeignete Kommunikationswege und Imagekampagnen von hoher Bedeutung sind.

Ein wesentliches Element der Sektorenkopplung sind die dafür notwendigen Energieinfrastrukturen. Hier verfügt NRW aufgrund der zahlreichen Gewerbe- und Industriestandorte sowie der hohen Bevölkerungsdichte über sehr umfangreiche Netzkapazitäten im Strom-, Erdgas- sowie bereits ansatzweise im Wasserstoffbereich. Neben dem Stromübertragungsnetz sowie dem Fernleitungsgasnetz, ist insbesondere das (Strom- und Gas-) Verteilnetz in NRW in einem bundesweit überdurchschnittlich hohen Maße ausgebaut. Dabei werden sowohl Strom als auch Gas durch ein hochgradig eng vermaschtes Netz zu den Endanwendern im Industrie-, Haushalts- und Stromsektor transportiert.

Auf der Basis der bestehenden Infrastruktur besteht grundsätzlich die Möglichkeit einer schnellen und großflächigen Reduktion der CO₂-Emissionen, wenn kohlenstoffintensive Brennstoffe (Benzin, Diesel, Kohle) in der Stromerzeugung, im Wärmebereich und im Mobilitätssektor durch CO₂-armes Erdgas ersetzt werden, insbesondere aber wenn perspektivisch eine strombasierte Erzeugung und Nutzung von „grünem“ (synthetischem) Gas erfolgt. Der große Vorteil besteht darin, dass nicht nur die Netz- und Speicherinfrastrukturen bereits heute verfügbar sind, sondern auch die Technologien auf der Anwendungsseite erprobt und bereits vielfach im Einsatz sind. Kurzfristige und mittelfristige Klimaschutzserfolge können ohne mehrmaligen Technologiewechsel beim Endverbraucher realisiert werden.

Die Stromverteilnetze spielen insbesondere für das „einsammeln“ von dezentral erzeugter elektrischer Energie und der Einbindung neuer, räumlich verteilter Kopplungselemente (Power-to-Heat, Power-to-Gas und Power-to-Mobility) eine zentrale Rolle. Die bereits immens ausgebauten Netzkapazitäten in NRW müssen jedoch für die neuen Aufgaben angepasst und ertüchtigt werden. Der überwiegend kleinteilige Charakter der Sektorenkopplung erfordert die effiziente Nutzung der bestehenden Verteilungsnetze in NRW durch den Einsatz von Smart-Grid-Technologien. Die durch die Sektorenkopplung erreichte höhere Flexibilität und dadurch mögliche bessere Ausnutzung bereits vorhandener Infrastrukturen kann einen wichtigen Beitrag liefern, um einen Netzausbau zu reduzieren oder zumindest punktuell auch zu vermeiden [18]. Untersuchungen des DVGW zeigen, dass mit Blick auf eine gesamtwirtschaftliche Optimierung Anlagen zur Sektorenkopplung möglichst erzeugungsnah, also in den meisten Fällen auf Verteilnetzebene, eingesetzt werden müssen [19] [20].

Nicht zuletzt aufgrund der dichten Besiedelung, sind neben den Strom- und Erdgasleitungen in NRW die Fernwärmeleitungen ebenfalls sehr gut ausgebaut. Sie ermöglichen grundsätzlich eine Nutzung der hohen industriellen Abwärmemengen, die im Land anfallen. Zusätzliche Potenziale zur besseren Ausnutzung großer bisher nicht genutzter Abwärmemengen bietet die Fernwärmeschiene Rhein-Ruhr (FWSRR), das bisher größte europäische Fernwärme-Verbundnetz, welches zwei ursprünglich voneinander getrennte Fernwärmesysteme im Ruhrgebiet sowie am Niederrhein miteinander verknüpft.

Ein weiteres Alleinstellungsmerkmal von NRW ist die bereits seit den 1930er Jahren existierende Wasserstoffpipeline im Rhein-Ruhr-Gebiet (Gesamtlänge rund 240 km) zur industriellen Versorgung mit Wasserstoff, welche als Nukleus für den Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur dienen kann. Die Pipeline kann zur zusätzlich Einspeisung oder Abnahme, etwa durch Wasserstofftankstellen genutzt und ausgebaut werden. Abbildung 14 zeigt das von Air Liquide betriebene Wasserstoffnetz im Rhein-Ruhr-Gebiet.



Abb. 14: Bereits existierendes Wasserstoffnetz im Ruhrgebiet und Rheinland (Quelle: Air Liquide).

Neben der Energieinfrastruktur verfügt NRW zudem über sehr gut ausgebaute Leitungen der Industrie, welche gasförmige und flüssige Grundstoffe transportiert. Dazu zählen kilometerlange Propylen-, Etylen-, Benzol- oder Stickstoffleitungen [21].

4.2 Resultierende Herausforderungen und Chancen für das Land unter Berücksichtigung zukünftiger Anforderungen und bestehender Energieinfrastrukturen

Für NRW stellen sich in Bezug auf die Transformation des Energiesystems verschiedene Herausforderungen. Es geht primär zunächst um die Sicherung des Industriestandortes, vor allem auch um die Sicherung der Produktionsmöglichkeiten energieintensiver Industriebranchen unter der Berücksichtigung zunehmender Klimaschutzziele. Sektorenkopplung hat dabei das grundsätzliche Potenzial einen Beitrag zur Aufrechterhaltung der Wettbewerbsfähigkeit der Industrie des Landes und damit der Zukunftsfähigkeit von NRW zu leisten. Darüber hinaus geht es um die Gestaltung des Übergangs von der heute sehr zentralen Großkraftwerksstruktur (mit hohen Anteilen von Stein- und Braunkohlekraftwerken) zu einer stärker auf erneuerbaren Energien basierenden deutlich dezentraleren (kleinteiligen) Struktur an Land sowie weiterhin zentralen großen Erzeugern wie Windenergieanlagen auf See [22]. NRW besitzt durch die hohe Besiedlungsdichte ein vergleichsweise niedriges Potenzial zum Ausbau erneuerbarer Energien, welches bis dato allerdings bei weitem noch nicht ausgeschöpft ist. Dennoch besitzt NRW gerade in Hinblick auf seine zentrale Lage in Deutschland und Europa einen Standortvorteil, den es auch als Stromimportland im Bereich der Sektorenkopplung auszunutzen gilt. Gerade der Verkehrsbereich kann hier durch die sehr hohe Verkehrsdichte im Lande sowie den hohen Anteil an Transitverkehr von der Sektorenkopplung profitieren, welche es demgemäß verstärkt auszubauen gilt. Die überwiegende Anzahl der Maßnahmen zur Sektorenkopplung basiert auf der Kopplung von Netzinfrastrukturen. Leistungsfähige Strom-, Gas- und Wärmenetze ermöglichen die Sektorenkopplung und können durch übergreifende Regelungskonzepte effizient genutzt werden. Die Auswirkungen und Chancen der Sektorenkopplung sollten aufgrund der langen Planungshorizonte allerdings auch frühzeitig in die Netzentwicklungspläne des Übertragungsnetzes in NRW einbezogen werden, da auch diese ggf. für die neuen Herausforderungen ertüchtigt werden müssen [22]. Eine integrierte Netzplanung über alle Energieträger kann zu einer effizienteren Ausnutzung der bereits existierenden Infrastruktur führen

und damit einen kostenintensiven Stromnetzausbau reduzieren. NRW als Drehscheibe Europas sollte diesen Standortvorteil nutzen.

Vor diesem Hintergrund kommt es darauf an, früh die Potenziale einer auf die Chancen des Transformationsprozesses orientierten Zukunftsgestaltung proaktiv zu identifizieren und konkret aufzugreifen. NRW hat aufgrund der spezifischen Ausgangsbedingungen die Chance sich einen technologischen Vorsprung in der Sektorenkopplung sowie Systemintegration von Speichern und Flexibilität in zukünftig stärker intersektoriellen Märkten zu sichern. Hierfür müssen die Markteintrittshürden für innovative Ansätze durch geeignete Fördermaßnahmen und regulative Steuerung in konsequenter Weise überwunden werden. Unterstützend für die Positionierung von NRW kann die ausgezeichnete Forschungslandschaft des Landes wirken sowie die innovationsorientierte Industrie mit einem starken Mittelstand. Nicht zuletzt kann NRW davon profitieren, dass umfangreiche Erfahrungen bei der Gestaltung von Transformationsprozessen vorliegen (z.B. im Bereich der auslaufenden Förderung der Steinkohle, IBA Emscher Park). NRW hat damit grundsätzlich gute Voraussetzungen, sich als starker Player bei der Gestaltung des Transformationsprozesses im Energiebereich zu etablieren und sich stärker zum Energiedienstleistungsstandort zu entwickeln. Die vielfältigen Möglichkeiten der Sektorenkopplung können dabei eine entscheidende Hilfestellung sein. Nachfolgend werden einige mögliche Ansätze dazu aufgeführt.

Im Haushaltbereich werden fossile Energieträger ganz überwiegend für den Bereich der Wärmergewinnung eingesetzt. Daraus lässt sich die Schlussfolgerung ableiten, dass hier angesetzt werden kann, um effektiv Sektorenkopplung zu praktizieren und einen Beitrag zur CO₂-Minderung zu leisten. Neben dem direkten Einsatz von Strom aus EE-Anlagen zur Wärmeerzeugung in Haushalten (z.B. über elektrische Wärmepumpen) sowie dem unmittelbaren Einsatz von erneuerbaren Energien zur Wärmeerzeugung (z.B. Solarkollektoren) kann perspektivisch auch die Erdgasinfrastruktur genutzt werden, um mittels synthetischer Gasen (Wasserstoff oder Methan) Wärme im Haushalt zur Verfügung zu stellen. Letzteres erfordert allerdings auf der einen Seite deutliche Kostendegressionen bei der Herstellung von synthetischem Gas und auf der anderen Seite entsprechende Anreizsysteme (z.B. direkte oder indirekte Steuer oder Abgabe auf die assoziierten CO₂-Emissionen der konventionellen Wärmebereitstellung), wenn die heute noch bestehende Kostenlücke, die etwa dem Faktor 10 entspricht, geschlossen werden soll [23].

Auch die großtechnische Anwendung von Power-to-Heat zur Deckung der Wärmenachfrage durch Groß-Wärmespeicher und Fernwärmenetze (vgl. heutige Anwendungen bei den Stadtwerken Lemgo oder Münster) bietet zukünftig noch nutzbares Potenzial. Hierdurch wäre es möglich die bereits existierende Infrastruktur zur Wärmeversorgung, etwa nach der Stilllegung von großen fossilen Kraftwerksblöcken, weiter zu nutzen und durch die Sektorenkopplung hierdurch zielorientiert einen langfristigen Beitrag zur Minderung der CO₂-Emissionen zu leisten. Neben der Versorgung der Haushalte durch Raumwärme, spielt in NRW insbesondere die Prozesswärme /-kälte der zahlreichen energieintensiven Industrien eine relevante Rolle. Im Jahr 2013 hat NRW einen Fernwärmeverbrauch von 29,4 TWh_{th}, wovon 56% auf die Industrie, 26% auf Haushalte sowie 18% auf den Gewerbe-, Handel- und Dienstleistungssektor zurückzuführen waren. Maßgeblich für den Wärmeabsatz ist also weiterhin die Entwicklung der Industrie in NRW [24]. Zunehmend werden von Stadtwerken und Industriebetrieben größere Elektrodenkessel mit einer Leistungsbreite von 5-60 MW installiert, insgesamt befinden sich diese aber noch in einem geringen Ausbaustadium. Die derzeit installierte thermische Leistung konventioneller Kraftwerke beträgt dagegen 19,7 GW,

wovon 39% durch Gase, 28% durch Steinkohle, und 10% durch Braunkohle betrieben werden [25].

Neben dem Wärmesektor zeichnet sich auch der Verkehrssektor durch den Einsatz von CO₂-intensiven Kraftstoffen aus. Die Minderung der THG-Emissionen des Verkehrssektors kann einerseits durch erneuerbare Kraftstoffe (Biotreibstoffe) und erneuerbare Gase (Biogas), sowie andererseits durch Elektromobilität mit Strom aus erneuerbaren Quellen erreicht werden. Längerfristig ergibt sich auch die Einsatzmöglichkeit von strombasierten flüssigen oder gasförmigen synthetischen Kraftstoffen. Neben der Stromwirtschaft (39%) und der Industrie (21%) lassen sich 18% CO₂-Emissionen auf den Verkehrssektor zurückführen. Der Sektor bietet damit ein nicht zu vernachlässigendes Reduktionspotenzial. Der Handlungsbedarf im Verkehrssektor steigt zudem deutlich, da in diesem Bereich in den letzten 25 Jahren in Deutschland kein signifikanter Klimaschutzbeitrag geleistet worden ist, sondern die absoluten Emissionen im Wesentlichen konstant geblieben sind. Gleichzeitig ergeben sich durch klimaschutzbezogene Maßnahmen im Verkehr aber auch Möglichkeiten, Lösungsbeiträge für die aktuelle Luftqualitätsproblematik in den Städten des Landes zu leisten. Bezogen auf die eingesetzte Energiemenge erscheint der direkte Stromeinsatz dabei zunächst am effizientesten. Die untenstehende Abbildung zeigt die Reichweite unterschiedlicher Antriebe bezogen auf die gleiche Eingangsenergiemenge. Es zeigt sich, dass Batteriefahrzeuge, welche direkt mit Strom aus erneuerbaren Energien betrieben werden, die höchste Energieeffizienz bezogen auf die zurückzulegende Strecke haben.

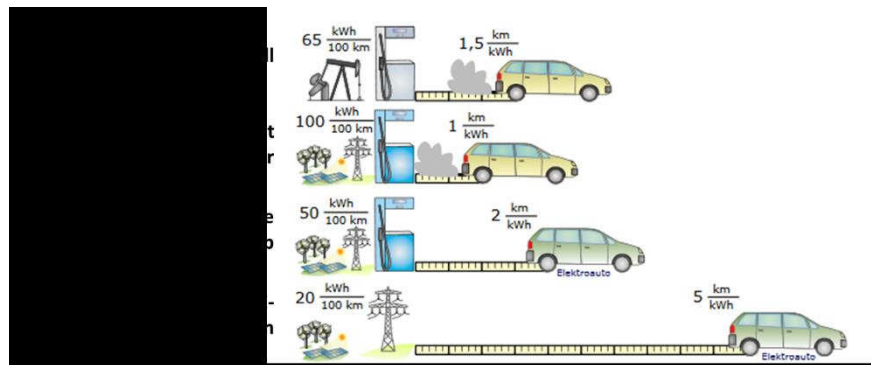


Abb. 15: Effizienz strombasierter Verkehrskonzepte im Vergleich zu herkömmlichen Fahrzeugen im Individualverkehr mit Verbrennungsmotor [26].

Aus gutem Grund verfolgt NRW entsprechend hohe Ambitionen sich im Bereich der Elektromobilität, als zukünftigen Innovations- und Produktionsstandort zu etablieren. Dies gilt mit Blick auf die potentiellen Einsatzgrenzen von Elektrofahrzeugen aber auch für die Entwicklung der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, die im Land intensiv vorangetrieben wird. Vor dem Hintergrund der volatilen Erzeugung und des daraus resultierenden Speicherbedarfs kann die wasserstoffbasierte Mobilität eine wichtige Ergänzung zur batterieelektrischen Mobilität sein. Durch die Ansiedlung namhafter Fahrzeughersteller, einer hohen Anzahl mittelständischer Zulieferbetriebe und den damit über 80.000 direkt in der Automobilindustrie NRWs Beschäftigten sowie den darüber hinaus herausragenden Forschungsaktivitäten der nordrhein-westfälischen Hochschulen (z.B. streetscooter, e.Go mobile), zählt NRW zu einem der wichtigen Automobilstandorte Deutschlands. Diese optimalen Voraussetzungen gilt es zu nutzen und in konsequenterweise Anpassungen in Richtung Elektromobilität entlang der gesamten Wertschöpfungskette vorzunehmen, wenn NRW als bundesweiter Vorreiter für Elektromobilität etabliert werden soll. Eine wesentliche Aufgabe besteht in diesem Zusammenhang im Aufbau einer adäquaten Ladeinfrastruktur und der Integration von Elektromobilität in die derzeitige Netzstruktur.

Die Nutzung von Gas aus erneuerbaren Quellen über die bestehende Gasinfrastruktur und dessen Einsatz in (Erd-)Gasfahrzeugen – sei es auf der Straße, der Schiene oder auf dem Wasser – kann im Bereich des Verkehrs perspektivisch ebenfalls einen wichtigen Beitrag zur Reduktion der Treibhausgasemissionen leisten. NRW verfügt, wie dargestellt, über eine sehr umfassend ausgebaute Erdgasinfrastruktur, die es ermöglicht eine Sektorenkopplung auch im Bestand schnell umzusetzen.

Aufgrund der höheren Energieeffizienz (Vermeidung einer weiteren Umwandlungsstufe), ist bei der Erzeugung von synthetischem Gas auf Basis von Strom aus erneuerbaren Energien, die Erzeugung von Wasserstoff, der Erzeugung von Methan zunächst vorzuziehen. Sofern der Wasserstoff nicht direkt verwertet wird, kann dieser dem Erdgasnetz zumindest in begrenztem Maße direkt beigemischt werden. An verschiedenen Stellen in der Erdgasinfrastruktur gibt es Faktoren, die eine Obergrenze für die Wasserstoffkonzentration definieren. Beispielfhaft sei hier genannt:

- Mess- und eichrechtliche Restriktionen
- Begrenzungen in Gasturbinen im Netz und bei den Kunden
- Einfluss in Porenspeichern
- Tanks von Erdgasfahrzeugen und Erdgastankstellen
- Nutzbarkeit von Porenspeichern

Daher sollten diese Restriktionen in NRW genauer analysiert werden, respektive eine Einspeisung von Wasserstoff zunächst gezielt an solchen Standorten vorgenommen werden, an denen die Restriktionen nur in einem geringen Maße Einschränkungen verursachen (z.B. dort wo verhindert wird, dass zu viel Gas in Porenspeicher gelangt). Für eine Übergangszeit bietet auch die Nutzung von industriellem Restwasserstoff interessante Nutzungsmöglichkeiten. In NRW sind rund 350 Mio. Nm³/a (= 31.000 t/a) an industriellem Restwasserstoff überwiegend aus der Chlor-Alkali-Elektrolyse verfügbar. Hiermit könnten theoretisch rund 260.000 Brennstoffzellen-Pkw betrieben werden [27]. Aufgrund von Prozessumstellungen auf der Zeitachse steht dieser Wasserstoff aber nicht dauerhaft zur Verfügung. Wasserstofftankstellen bestehen in Düsseldorf, Wuppertal, Kamen, Münster, Mülheim und am Flughafen Köln/Bonn, acht weitere sind in Bau bzw. Bauvorbereitung durch die H₂-Mobility Deutschland GmbH mit Inbetriebnahmeziel 2018. Zur besseren Übersicht an welchen Standorten bereits Wasserstofftankstellen in Betrieb sind, wurde die App H₂.Live entwickelt, welche einen Beitrag zur gesteigerten Akzeptanz der H₂-Mobilität liefert.

Neben den vorgenannten Funktionen, die die Gasinfrastruktur im Rahmen der Sektorenkopplung übernehmen kann, kann sie einen wertvollen Beitrag zur Speicherung erneuerbarer Energien über einen längeren Zeitraum leisten sowie über eine Rückverstromung auch einen signifikanten Beitrag zur Systemstabilität und damit zur Abdeckung besonders herausfordernder Wettersituationen („Dunkelflaute“). Dem Erhalt, der Anpassung und ggf. der Weiterentwicklung der bestehenden Gasinfrastruktur kommt daher eine wichtige Bedeutung für das Land zu.

Für den Chemiestandort NRW ist auch das Potenzial für die Bereitstellung von Ausgangsprodukten über die Verwendung von Strom aus erneuerbaren Energien (Power-to-Chemicals) eine sehr interessante Option. Dies gilt nicht zuletzt aufgrund der nur begrenzten Möglichkeiten der Umsetzung sehr weitgehender CO₂-Minderungsoptionen in der Branche. Neben der Bereitstellung verschiedener Ausgangsprodukte für chemische Syntheseprozesse über die elektrolytische

Wasserspaltung (vgl. Kapitel 3) besitzt auch die Lichtbogentechnologie (Plasmaverfahren) ein hohes Potenzial.

Die Lichtbogentechnologie bietet große Chancen, erneuerbaren Strom in diesen Sektor direkt einzubringen sowie gleichzeitig durch die flexible Fahrweise einen Beitrag zur Systemstabilität zu leisten. Beim Acetylen-Lichtbogenverfahren wird Erdgas zusammen mit elektrischer Energie zu Wasserstoff, Acetylen und Ethylen verarbeitet. Die elektrische Energie wird dabei in chemische Energie umgewandelt. Die Produkte Acetylen sowie Ethylen können vielseitig als Basisstoffe in der Petrochemie, etwa zur Herstellung von Propylen, Buten bzw. Butadien, eingesetzt werden und damit Mineralöl als Ausgangsstoff ersetzen. Der zusätzlich entstehende Wasserstoff ist ebenfalls vielseitig einsetzbar. In NRW werden jährlich (Stand 2015) 3,2 Millionen Tonnen Ethylen, 2,3 Millionen Tonnen Propylen sowie 1,4 Millionen Tonnen Buten/Butadien produziert. Geht man davon aus, dass 50% dieser Mengen substituierbar sind, ergibt sich eine zusätzliche elektrische Anschlussleistung von ca. 1 GW_{el}, welche flexibel genutzt werden kann.

Will man CO₂ als Rohstoff in die Prozessketten der chemischen Industrie integrieren, ist es wichtig, dass die mit CO₂ hergestellten Basischemikalien in die erdölbasierten Produktionsstrukturen der chemischen Industrie integrierbar sind und nicht vollkommen neue Synthesestammbäume, Produktionskapazitäten und Endprodukte erfordern. Dabei stellt unter den heutigen Marktbedingungen Ethen ein besonders interessantes Produkt dar, bei dem sowohl Marktpreis als auch Marktvolumen vergleichsweise hoch sind. Ethen ist eine der wichtigsten Basischemikalien. Verfolgt man eine Herstellungsrouten aus CO₂ und Wasserstoff ist zunächst die Herstellung von Alkoholen als Zwischenprodukte erforderlich. So lässt sich Ethen sowohl über eine Route mit Methanol als auch mit Ethanol² als Zwischenprodukt herstellen. Für die Verteilung von Ethen steht in NRW grundsätzlich bereits eine Pipelinestruktur zur Verfügung. Die Pipeline verbindet Ethenproduzenten und Abnehmer. Sie verbindet die Chemieregion bei Köln mit dem Hafen in Rotterdam und den Chemiestandorten in Ludwigshafen. Eine weitere Verbindung existiert zwischen dem Chemiepark Marl und der Raffinerie Scholven.

Besondere Chancen und Herausforderungen ergeben sich zukünftig für komplexe Chemieparke wie nachfolgend beispielhaft am Chemiepark der Currenta in Leverkusen gezeigt wird.

Beispielhafte Herausforderungen für einen Chemiepark und Ansatzpunkte für die Sektorenkopplung

In der Chemie werden derzeit im Zusammenhang mit der Sektorenkopplung in erster Linie Power-to-heat Verfahren realisiert. Im CHEMPARK der Currenta wird beispielsweise eine KWK-GuD-Anlage sowohl durch gasbefeuerte Back-Up-Kessel ertüchtigt, als auch ein zusätzlicher Elektrodenkessel eingesetzt. Auf diese Weise kann bei einem hohen EE-Dargebot die Mindeststromerzeugung reduziert und zusätzlich ein Teil der vorher bereits in ökologisch vorteilhafter Kraft-Wärme-Kopplungs-Technologie erzeugten Wärme mit EE-Strom hergestellt werden. Bei dem Betrieb des Elektrodenkessels wird Erdgas eingespart und durch EE-Strom ersetzt, was in der Gesamtbilanz einer virtuellen Erzeugung von Erdgas durch EE-Strom entspricht.

² Die Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung von Ethanol aus CO₂ und Wasserstoff befindet sich noch in der Laborphase. Die Entwicklung ist Teil des Carbon2Chem®-Projekts.

Die mittel- bis langfristige Entwicklung der in der Chemie mit der KWK-Technologie bereits stark fortgeschrittenen Sektorenkopplung Strom und Wärme, wird maßgeblich durch die fortschreitende EE-Durchdringung und durch regulatorische Vorgaben bestimmt.

Im Gegensatz zur fluktuierenden Stromerzeugung sind die Anforderungen an die Energieversorgung des CHEMPARKs bestimmt durch einen kontinuierlichen Bedarf an Strom und Prozesswärme (7d/ 24h) der überwiegend stationär betriebenen Prozesse und durch das chemietypische Druck- und Temperaturniveau der Prozesswärme, die langfristig in Form von Dampf bereitgestellt wird.

Auf der Ebene der Energieversorgung des CHEMPARKs werden für die gleichmäßige Bereitstellung von Strom und Wärme a) die effiziente Wandlung von Strom zu Wärme und b) eine Vergleichmäßigung der fluktuierenden Primärenergie im Tages- bis evtl. Wochenbereich bedeutsam werden, z.B. durch thermische Großenergiespeicher, die Strom einspeichern und Strom, Wärme oder Kälte ausspeichern.

Auf der Ebene der Produktion im CHEMPARK werden energieintensive elektroverfahrenstechnische Prozesse, deren Produktion der fluktuierenden Strombereitstellung folgen, Produkte erzeugen, die stofflich gespeichert werden. Bei der Standortwahl dieser Prozesse wird neben den genehmigungs- und prozessrelevanten Aspekten die Möglichkeit der Integration von evtl. anfallender Abwärme in das Standortwärmenetz oder in die Fernwärmeversorgung eine Rolle spielen.

Der bereits heute sehr hohe Anteil rückgewonnener Abwärme (> 20% im CHEMPARK) wird durch die Integration von Wärmepumpen zur Rückgewinnung von Niedertemperaturabwärme (< 150°C) erhöht.

Die Anforderungen an die Stromnetzanbindung werden steigen.

Die Anbindung an die Gasnetzanbindung muss erhalten bleiben, da für die Absicherung langer Phasen niedriger EE-Verfügbarkeit dauerhaft befeuerte Strom- und Wärme-Erzeugungen (evtl. auch Brennstoffzellen) unverzichtbar sind.

Die Wärmeversorgung wird hybrid und der Anlagenpark wird umfangreicher und komplexer, was u.a. Fragen der Flächennutzung aufwirft und hohe Anforderungen an die Integration neuer Anlagenkomponenten stellt.

Wie oder ob ein solches System wirtschaftlich betreibbar ist, wird maßgeblich durch die regulatorischen Rahmen und die Marktentwicklung bestimmt. Die Transformation des Versorgungssystems wird deshalb in kleinen Schritten im Rahmen eines sich entwickelnden Konzepts des Gesamtsystems erfolgen. Insbesondere Großenergiespeicher müssen entwickelt werden.

4.3 Ableitung Phasenkonzept Sektorenkopplung für NRW und Spezifikation konkreter Umsetzungserfordernisse

In Bezug auf die Herausforderungen der Energiesystemtransformation und die Sektorenkopplung lassen sich, wie in Kapitel 4 bereits eingeführt, drei maßgebliche Pfade auf der Zeitachse unterscheiden, die jeweils unterschiedliche Maßnahmen erfordern. Für NRW lassen sich für alle drei Phasen aus heutiger Sicht konkrete (sinnvolle) Projekte und Maßnahmen ableiten. Beispielhaft ist dies nachfolgend durchgeführt worden.

Kurzfristige Schritte (2025)

Alle Maßnahmen der Sektorenkopplung sind verbunden mit neuen Anforderungen an die Netzinfrastrukturen in den jeweiligen Sektoren. Insbesondere im Bereich der Stromverteilungsnetze kann die Sektorenkopplung zu neuen Belastungen führen, wenn es zu einer deutlichen Ausweitung der Stromnutzung kommt (d.h. Integration Elektromobilität, Power-to-Heat, Power-to-Gas etc.). Ein daraus

resultierender Ausbaubedarf der Stromnetze lässt sich durch intelligente Regelungskonzepte vermeiden bzw. reduzieren. Die technische Grundvoraussetzung hierfür ist die Zustandsüberwachung von kritischen Netzbereichen, welche in heutigen Nieder- und Mittelspannungsnetzen bisher kaum vorhanden ist. Die Zustandsüberwachung ist daher kurzfristig zu etablieren (z.B. durch eine Gleichstellung gegenüber den konventionellen Handlungsalternativen in den regulatorischen Rahmenbedingungen). Auf diese Weise kann z.B. der Integration von Elektromobilität in den Städten NRWs mit intelligenten Lademanagementsystemen anstatt mit Netzausbau begegnet werden.

Bereits heute ist der Anschluss von Elektrolyseuren und P2G-Anlagen an bestehende Gasnetze möglich, sofern die eingespeiste Menge Wasserstoff klein im Vergleich zum transportierten Erdgas ist. Hinsichtlich der Einspeisung von synthetischem Methan (unabhängig ob biogenen Ursprungs oder über PtX hergestellt) besteht keine Restriktion im vorhandenen Netz. Dies bietet die Möglichkeit, dass Anlagenbauer und -Betreiber Erfahrungen sammeln können, um eine technische und wirtschaftliche Optimierung erreichen zu können. Neben dem Anschluss an Netze können die Anlagen direkt in der Industrie eingesetzt werden, um „grünen“ Wasserstoff/Methan für die stoffliche energetische Verwertung zu erzeugen. Darüber hinaus sollte auch kurzfristig der Ausbau von Wasserstofftankstellen intensiv weiter vorangetrieben werden.

Zudem ist eine weitere Verbreitung von Erdgasfahrzeugen kurzfristig im Personen- und Wirtschaftsverkehr möglich. Dies führt nicht allein zu einer kurzfristig besseren Schadstoffbilanz im Vergleich zum benzin- und dieselbasierten Verkehrssektor, sondern bietet auch die Grundlage dafür, bei einem weiteren Ausbau z.B. der PtG-Infrastruktur und damit des Einphasens von synthetischem strombasierten Erdgas eine stufenlose, kontinuierliche Reduktion der CO₂-Emissionen des Verkehrssektors ohne eine weitere Anpassung des Fuhrparks vornehmen zu müssen. Es handelt sich in diesem Sinne um eine vorbereitende Maßnahme. Der große Vorteil ist dabei, dass Erdgasfahrzeuge bereits heute marktfähig sind, Technologie und Infrastruktur (im Vergleich zu anderen alternativen Kraftstoffen) weitgehend etabliert sind. Die bisher eher langsame Marktdurchdringung von Erdgasfahrzeugen zeigt aber, dass eine stärkere positive Besetzung des Themas und Kommunikation des umweltpolitischen Nutzens durch die Politik erforderlich ist, um deutliche Fortschritte erreichen zu können.

Neben dem Straßenverkehr ist der Einsatz von Gas – perspektivisch von Gas auf Basis von erneuerbaren Energien – im Schienen- und Schiffsverkehr sinnvoll. Dafür heißt es bereits heute die entsprechenden Randbedingungen zu schaffen. Die Technologien für z.B. LNG im Schiffsverkehr und im Schienenverkehr sind bereits verfügbar. Auch hier gilt es die heute schon gegebenen Möglichkeiten intensiver zu kommunizieren und die Verbreitung zu fördern.

Als wichtige kurzfristige Maßnahmen kann auch die Verstärkung respektive Verstetigung der forschungsseitigen Anstrengungen gelten. Dabei kann auf bestehende Netzwerke und Strukturen aufgebaut werden. Dies gilt zum Beispiel für das H₂-Netzwerk Herten, HyCologne, das Netzwerk Brennstoffzellen und Wasserstoff und Kraftstoffe und Antriebe der Zukunft der EnergieAgentur.NRW sowie das Virtuelle Institut Strom zu Gas und Wärme, in das verschiedene Forschungsinstitute des Landes zusammengeschlossen sind. Forschungsrelevante Themen sind dabei u.a. das Gewinnen von weiteren Betriebserfahrungen von PtX-Anlagen und die Verbesserung des Verständnisses der Flexibilität der Prozesskette

und korrespondierenden Optionen für die Optimierung der Dynamik des Prozesses³.

Schließlich ergibt sich kurzfristig auch die Notwendigkeit die Schnittstellen zwischen den Möglichkeiten der Sektorenkopplung und zentralen Megatrends systematisch zu erfassen und zu analysieren. Dies betrifft vor allem den Megatrend der Digitalisierung, der auf der einen Seite mit Implikationen auf die Sektorenkopplung zu Veränderungen im Bereich der Energienachfrage führen kann, auf der anderen Seite eine zentrale Enablerfunktion für die (technische, organisatorische) Umsetzung der Sektorenkopplung haben kann.

Mittelfristig (2030)

Im nächsten Jahrzehnt werden die großflächigen offshore Windparks zu verstärkten Erzeugungsschwerpunkten in Norddeutschland führen, welche einerseits zu neuen Transportproblemen führen, aber andererseits auch neue Möglichkeiten der Stromnutzung eröffnen werden.

Für die effiziente Ausnutzung der Netzinfrastrukturen in allen Sektoren lässt sich die Einführung übergreifender Netzautomatisierungssysteme realisieren. Während für das heutige System eine spezifische Auslegung und Optimierung in jedem einzelnen Sektor erfolgte, wird mit zunehmender Sektorenkopplung auch eine übergreifende Steuerung erforderlich. Hierzu sind bereits heute weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erforderlich, damit mittelfristig einheitliche Automatisierungslösungen zur Verfügung stehen. Neben der effizienteren Ausnutzung von Strom- und Gasnetzen, ergeben sich durch standardisierte Hard- und Softwarelösungen Vorteile für den operativen, spartenübergreifenden Netzbetrieb (insbesondere hinsichtlich der Schulung des Betriebspersonals).

Vorbereitende Maßnahmen sind auch infrastrukturseitig zu ergreifen. Beispielhaft gilt dies in Bezug auf die mittelfristige Notwendigkeit die Wasserstoffaufnahmefähigkeit der Netze und Verbrauchsgeräte zu erhöhen. Diese Maßnahmen sind vielfältiger Natur und liegen gleichermaßen im technischen und regulatorischen Bereich.

Beispielhaft seien hier genannt:

- Entwicklung passender Gasturbinen (z.B. für BHKW)
- Berücksichtigung bei Auswahl von Verdichterantrieben
- Weiterentwicklung von Tanks für Erdgasfahrzeuge im Hinblick auf Wasserstoffverträglichkeit
- Die Anerkennung von Sektorenkopplungsprodukten aus EE-Strom im Rahmen von Klimaschutzverpflichtungen
- Bestandsschutz von PtX Industrieanlagen, Überprüfung und ggf. Anpassung von Messungen und eichrechtlichen Rahmenbedingungen
- Überprüfung von Abgaben, Umlagen und Entgelten
- Regeln für den grenzüberschreitenden Austausch von Gas mit höheren Wasserstoffkonzentrationen

³ Während heute davon ausgegangen werden kann, dass für die Wasserstoffelektrolyse hochflexible Verfahren (u.a. kurze An- und Abfahrzeiten, große Leistungsspanne im Betrieb) zur Verfügung stehen, liegen noch nicht hinreichende Informationen über das Verhalten des Gesamtsystems vor, wenn weitergehende Prozesse (z.B. Methanisierung) angeschlossen werden.

Langfristig (2050)

Das langfristige Ziel in der Entwicklung der Überwachungs- und Automatisierungssysteme für die unterschiedlichen Netzinfrastrukturen sollte eine optimale Ausnutzung der bestehenden Netze unter Berücksichtigung aller zur Verfügung stehenden Kopplungselemente sein. Hierfür sind existierende Ansätze hinsichtlich eines integrierten Energiesystems kontinuierlich weiterzuentwickeln.

Gasseitig müssen langfristig zentrale Weichen gestellt werden. Es ist davon auszugehen, dass selbst wenn die vorgenannten Maßnahmen zur Erhöhung der Wasserstoffaufnahme-fähigkeit umgesetzt werden eine Obergrenze für die Wasserstoffbeimischung im Gasnetz gegeben sein wird. Für diesen Fall gibt es zwei Optionen. Einerseits die Methanisierung des gewonnenen Wasserstoffs, andererseits die Nutzung einer reinen Wasserstoffinfrastruktur. Zur Vermeidung von Pfadabhängigkeiten sollten aufgrund der bestehenden Unsicherheiten zunächst beide Wege parallel verfolgt und umfassend analysiert werden. Das bedeutet einerseits eine Weiterentwicklung von Methanisierungstechnologien mit dem Ziel deren Wirkungsgrad zu erhöhen und deren Kosten zu senken. Parallel dazu ist zu prüfen, ob und in welchem Maße der Ausbau einer Wasserstoffinfrastruktur bzw. die Umwidmung der bestehenden Erdgasinfrastruktur ein gangbarer Weg ist.

Langfristig kann der Rückverstromung von Wasserstoff, respektive von synthetischem Erdgas, in klimaschutzorientierten Entwicklungspfaden trotz der Umwandlungsverluste eine erhebliche Bedeutung zur Sicherung des Energiestandortes NRW zukommen. Heutige Systemstudien legen nahe, dass dies aus wirtschaftlicher Sicht nach dem Jahr 2040 lukrativ werden und zu einem erheblichen Mehrwert für NRW führen könnte, wenn es NRW gelingt sich als Energiesystemdienstleistungsstandort zu etablieren. Hierfür sind entsprechende Vorbereitungen zu treffen und die Möglichkeit der Weiternutzung bestehender Netzinfrastrukturen (z.B. an den heutigen Kohlekraftwerksstandorten) für Wasserstoff oder synthetisches, strombasiertes Methan in GUD/Gasturbinen-Kraftwerke zu sichern.

4.4 Zusammenfassende Darstellung und Diskussion konkreter Beiträge (robuste Strategien) für die Umsetzung einer Sektorenkopplungsstrategie

In Kapitel 4.2 sind beispielhaft Vorschläge entwickelt worden, welche Maßnahmen kurz, mittel- und langfristig sinnvoll sein könnten um NRW als Standort für die Sektorenkopplung zu etablieren und über die Sektorenkopplung einen signifikanten Beitrag zur Minderung der CO₂-Emissionen leisten zu können. Die Vorschläge sind dabei keineswegs als vollständig zu bezeichnen, insofern kann dieses Expertenpapier auch nur der Ausgangspunkt für eine weitergehende Analyse sein. Dabei erscheinen folgende weitere Aufgaben sinnvoll.

- Systematische (vertiefende) Analyse der zukünftigen Rolle der Sektorenkopplung in NRW und der dafür notwendigen vorbereitenden sowie begleitenden Maßnahmen.
- Ermittlung des resultierenden Infrastrukturbedarfs unter Berücksichtigung der Sektorenkopplung und vertiefende Identifikation notwendiger Vorleistungen und Entscheidungspunkte. Diese Aufgabe sollte gemeinsam von den Strom- und Gasnetzbetreibern auf Übertragungs- und Verteilnetzebene etwa in Form gemeinsamer Netzentwicklungspläne durchgeführt werde.
- Identifikation und Bewertung von Unsicherheiten und Risiken sowie potentiellen Pfadabhängigkeiten. Diese Aufgabe könnte von der BNetzA mit entsprechenden Berechnungen wahrgenommen werden.

- Entwicklung von Vorschlägen für die konkrete Umsetzung von weiteren Forschungs- und Entwicklungs- sowie Demonstrationsprojekten (Einordnung auf der Zeitachse). Diese Vorschläge sollten in Zusammenarbeit von Forschung und Unternehmen entstehen um praxisnahe Lösungen zu generieren. Entsprechende Plattformen sollten initiiert werden.
- Konkrete Ableitung von korrespondierenden Geschäftsfeldern im Bereich Sektorenkopplung.
- Entwicklung einer integrierten, in sich konsistenten Roadmap für die Etablierung von NRW als Energiesystemdienstleistungsstandort und Vorreiter für Sektorenkopplung (inkl. Abwägung von Kosten und Nutzen, Risiken).

III. Rahmenbedingungen

Vorbemerkung: Kapitel 5 wird zum aktuellen Zeitpunkt nicht von der gesamten Expertengruppe mitgetragen. Hintergrund ist die fehlende Zeit, im Rahmen des Erstellungsprozesses des Expertenpapiers auf alle, insbesondere die energieintensive Industrie betreffenden, Aspekte im hinreichenden Detail eingehen zu können. Ungeachtet dessen treffen viele der nachfolgend aufgeführten Vorschläge und Optionen auf eine breite Zustimmung in der Gesamtgruppe. Vor diesem Hintergrund wird vorgeschlagen, die in der AG geführten extrem fruchtbaren Diskussionen zum Themenkomplex „Rahmenbedingungen“ zwischen den verschiedenen Akteursgruppen unbedingt fortzusetzen und die Ergebnisse der Diskussion in den energiepolitischen Meinungsbildungsprozess einfließen zu lassen.

5. Allgemeine und regulatorische Rahmenbedingungen

Für die Sektorenkopplung sind neben technischen Entwicklungen auch passende Rahmenbedingungen erforderlich. Diese sind für die effiziente Umsetzung der Sektorenkopplung von besonderer Bedeutung, da nicht nur Anreize für einzelne Teilbereiche des Energiesystems gesetzt werden müssen, sondern für die Kopplung unterschiedlicher Teile. Das hier vorliegende Kapitel fokussiert vor diesem Hintergrund die Frage, wie die Hemmnisse in Bezug auf die Umsetzung der Sektorenkopplung abgebaut, respektive hinreichende Anreize zum Ausbau der Sektorenkopplung geschaffen werden können. Es versteht sich explizit nicht als Kapitel, das versucht, die Breite der aktuellen energie- und klimapolitischen Diskussion abzudecken.

Zu beachten ist dabei, dass Sektorenkopplung kein Selbstzweck ist, sondern eine maßgebliche Option zur möglichst kostengünstigen Reduktion der CO₂-Emissionen darstellen soll. Zudem kann über die Sektorenkopplung ein Beitrag zur Systemstabilität geleistet und eine Bandbreite an Flexibilitätsoptionen zur Verfügung gestellt werden.

Weiterhin ist wesentlich, dass bei der Weiterentwicklung der Rahmenbedingungen deren Auswirkungen auf die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie in NRW berücksichtigt werden. Es gilt dabei auch zu vermeiden, dass veränderte Rahmenbedingungen zu Wettbewerbsverzerrungen durch erhöhte Produktionskosten und damit zu Carbon Leakage führen.

5.1 Allgemeine Anforderungen

Wesentlich für das Gelingen der Sektorenkopplung ist die Konsistenz der Rahmenbedingungen.

Ein wichtiger Baustein für konsistente Rahmenbedingungen und Technologieoffenheit sind einheitliche, verursachungsgerechte Belastungen verschiedener Energieträger mit CO₂-Zertifikatskosten bzw. entsprechenden Entgelte, Abgaben und Umlagen (level playing field). Wenn CO₂-Emissionen bei verschiedenen Energieträgern unterschiedlich pönalisiert werden, besteht offensichtlich die Gefahr von Fehlanreizen.

Zugleich ist es wesentlich, etablierte Instrumente mit europaweit einheitlicher Lenkungswirkung (z.B. Europäisches Emissionshandelssystem, ETS) nicht zu schwächen und nicht ineffiziente Doppelbelastungen zu etablieren. Eine konsistente Refinanzierung der durch Sektorenkopplung verursachten Zusatzkosten bietet die Chance, die Sektorenkopplung effizient zu gestalten. Dies gilt gerade in Anbetracht der großen Potenziale zur Reduktion der CO₂-Emissionen, die durch

eine Koppelung des Stromsektors mit den Sektoren Verkehr und Wärme erschlossen werden können sowie der Herausforderung, effiziente CO₂-Minderungskonzepte für den industriellen Bereich zu entwickeln.

Für die Ausschöpfung der Potenziale der Sektorenkopplung sind auch auf der Netzseite adäquate Rahmenbedingungen erforderlich. In der Netzinfrastruktur hat die Transformation des Energiesystems mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien bislang schon zu einspeisebedingten Engpässen auf der Stromseite, insbesondere in ländlichen Verteilnetzen (v.a. in Norddeutschland), geführt. Mit der zu erwartenden direkten Elektrifizierung der Sektoren Verkehr und Wärme ist künftig auch zunehmend mit lastgetriebenem Ausbaubedarf auf Verteilnetzebene, vor allem in den städtischen Gebieten, zu rechnen. Die steigende Stromnachfrage durch Elektromobilität auch südlich von NRW wird zudem zu einem verstärkten Ausbau des Transportnetzes führen. Mit der Einbindung von Power-to-Heat und Power-to-Gas-Anlagen sowie der künftig stark zunehmenden Nutzung der Elektromobilität bietet eine konsistente Finanzierungsgestaltung die Möglichkeit, dass die erwartete signifikante Verschiebung des Energiebedarfs zum Energieträger Strom effizient durch die bestehende bzw. teilweise noch auszubauende Netzinfrastruktur aufgefangen wird. Der Schlüssel für eine Reduktion des Netzausbaus ist eine entsprechende flexible Betriebsweise der jeweiligen Verbraucher, Erzeuger und Speicher auch für netzdienliche bzw. netzverträgliche Zwecke und die Schaffung entsprechender Anreize durch entsprechende Ausgestaltung der Rahmenbedingungen. Dabei sollen technologieoffene Regelungen angestrebt werden.

5.2 Möglichkeiten konsistenter CO₂-Bepreisung

In Anbetracht der klimapolitischen Herausforderungen besteht grundsätzlich die Möglichkeit, die Rahmenbedingungen vorrangig so umzugestalten, dass sich die mit der Energienutzung einhergehenden CO₂-Emissionen in den Energieträgerpreisen entsprechend den sozialen Kosten⁴ der Treibhausgasemissionen möglichst einheitlich widerspiegeln. Diese sozialen Kosten liegen deutlich höher als die derzeitigen Preise im EU-Zertifikatehandel. Von führenden Klimaökonom*innen werden Preise von mindestens 30 €/t CO₂ und längerfristig von mindestens 80 €/t CO₂ für erforderlich gehalten, um die sozialen Kosten widerzuspiegeln und einen Lenkungseffekt zu erzielen, der eine Erreichung der gesetzten CO₂-Minderungsziele möglich erscheinen lässt [28] [29].

Allerdings wirft solch eine grundsätzliche Umgestaltung verschiedene Herausforderungen auf, die nachfolgend erörtert werden: Zum einen betreffen diese eine mögliche Mehrbelastung der Verbraucher, zum anderen den Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit der Industrie und schließlich auch die Konsistenz mit den vorhandenen europäischen und nationalen Steuerungsinstrumenten wie dem EU-Zertifikatehandel. Zunächst soll allerdings anhand von Tabelle 3 verdeutlicht werden, dass aktuell die implizite Bepreisung von CO₂ für verschiedene Energieträger sehr unterschiedlich ausfällt. Zugleich macht die Tabelle allerdings auch deutlich, dass schon die Frage der derzeitigen CO₂-Abgabenanteile nicht ohne weiteres eindeutig beantwortbar ist.

⁴ Die sozialen Kosten der CO₂-Emissionen beschreiben die Folgekosten, die sich aus dem Klimawandel auf gesellschaftlicher Ebene weltweit ergeben

Energieträger	Energiesteuersätze und Belastungen mit staatlich induzierten Preisbestandteilen		
	pro Energieeinheit, nach Rave et al 2013	nach Rave et al 2013	nach Agora 2017
	Ct / ME	€ / t CO ₂ a)	€/t CO ₂ b)
<i>Wärmemarkt</i>			
Heizöl leicht (Liter)	6,14	22,87	7,68
Erdgas (kWh)	0,55	27,1	18,71
Flüssiggas (kWh)	0,47	20	
<i>Kraftstoffmarkt</i>			
Diesel (Liter)	47,04	178,1	57,88
Benzin (Liter)	65,45	280	65,17
Flüssiggas (Liter)	8,96	59,5	
<i>Strommarkt</i>			
Strom (kWh)	2,05	19,5 c)	185,40 d)

Tabelle 3: Besteuerung von Energieträgern und entsprechende implizite CO₂-Preise. [30] [31]

Anmerkungen: a) Rave et al betrachten die gesamten Energiesteuersätze, also auch die nicht direkt umweltbezogenen Abgaben; b) Agora beschränkt sich auf die umweltökonomisch begründeten Aufschläge; c) bezogen auf den gesamten Energieträgermix der allgemeinen Stromversorgung in 2008 [32], d) inklusive EEG-Umlage und KWKG-Umlage,

Hinsichtlich einer möglichen Mehrbelastung der Verbraucher ist festzuhalten, dass sektorübergreifend vereinheitlichte CO₂-Kosten nicht zu einer Mehrbelastung der Verbraucher führen müssen. Vielmehr können (und sollten) die entsprechenden staatlichen Einnahmen zur Finanzierung der Kosten herangezogen werden, die bisher über die EEG-Umlage umgelegt werden.

Im Hinblick auf die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen ist wesentlich, dass spezifische, EU-Binnenmarkt-konforme Regelungen für die energieintensive Industrie sicherstellen, dass die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen nicht gefährdet wird, sofern CO₂-Kosten nicht weltweit einheitlich internalisiert werden. Die Konsistenz mit den etablierten Lenkungsinstrumenten betrifft vorrangig einerseits den EU-weiten CO₂-Zertifikatehandel und andererseits die nationale Strom- und Energiesteuer. Für eine bestmögliche Konsistenz wäre die Nutzung eines einheitlichen Steuerungsinstrumentes in allen Sektoren vorteilhaft. Bevor solch eine Option umgesetzt werden könnte, sind jedoch folgende Punkte zu prüfen:

- Wie können Kleinemittenten in den Zertifikatehandel einbezogen werden, ohne dass dies administrativ zu aufwendig wird? Wie können zudem Preisverwerfungen vermieden werden, die zu befürchten sind, wenn Sektoren mit sehr unterschiedlicher Preiselastizität der Zertifikatsnachfrage am Handel teilnehmen? Kann eine Mengensteuerung mit Preisober- und -Untergrenzen, die durch eine unabhängige Institution (vergleichbar einer Zentralbank) festgelegt werden, die kombinierte Erreichung von ökologischen und ökonomischen Zielen verbessern? Wie kann in diesem Kontext die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie sichergestellt werden?
- Gibt es sinnvolle Alternativen für eine mengenmäßige Steuerung wie im EU-Zertifikatshandel, die sich in Anbetracht der globalen Minderungsziele als zweckmäßig erweisen können?

Solange diese Fragen nicht hinreichend geklärt sind, erscheint eine Fortführung der aktuellen differenzierten Steuerung über den CO₂-Zertifikatehandel im Bereich der energieintensiven Großanlagen und über andere Instrumente in den übrigen Bereichen (z.B. Verkehr, Gebäude) naheliegender. Es ist auch zu bedenken, dass in den Bereichen, die dem CO₂-Zertifikatehandel unterliegen, die Einführung zusätzlicher CO₂-basierter Steuern oder Abgaben (z.B. im Rahmen der Vorgabe eines CO₂-Mindestpreises) keinen direkten zusätzlichen Emissionsminderungseffekt induzieren wird, da diese bei gegebenem CO₂-Zertifikatsallokationsvolumen nur zu Emissionsverlagerungen innerhalb der EU führen werden, jedoch in Bezug auf Investitionen in innovative (klimaschonende) Technologien durchaus eine zusätzliche Lenkungswirkung entfaltet werden könnte und insgesamt eine verlässlichere Planungsgrundlage entsteht. Dementsprechend ist insbesondere zu prüfen, wie eine zum Zertifikatshandel komplementäre konsistente CO₂-Bepreisung in den übrigen Sektoren realisiert werden kann und wie das Preissignal des CO₂-Zertifikatehandels gestärkt werden kann.

Neben dem ETS gibt es noch weitere kostenprägende staatlich induzierte Preisbestandteile (Abgaben und Umlagen), die maßgeblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von Sektorenkopplungsanlagen haben. Im Strompreis sind diese Bestandteile maßgeblich die Stromsteuer, die Netzentgelte sowie die EEG-Umlage, im Verkehrssektor etwa die Mineralölsteuer und über alle Sektoren hinweg die Umsatzsteuer. Im Hinblick auf die Stromsteuer ist zu bedenken, dass bei einer zunehmenden Einspeisung zeitvariabler erneuerbarer Energien wie Wind und Sonne auch der CO₂-Gehalt des produzierten Stroms zeitvariabel ist. Eine zeitvariable Stromsteuer ist daher nicht (mehr) zielführend.

5.3 Berücksichtigung der nationalen und internationalen Wettbewerbsfähigkeit des Energie- und Industriestandorts Nordrhein-Westfalen

Folgt man der aktuellen sehr heterogenen Haltung der Staatengemeinschaft wird aufgrund vielfältiger Aspekte und Motivlagen eine konsistente, am Klimaschutz orientierte Ausgestaltung der Rahmenbedingungen auf internationaler Ebene kurzfristig kaum gelingen. Ohne solche international einheitlichen Rahmenbedingungen wird allerdings bei der Ausgestaltung der Rahmenbedingungen in Deutschland und Europa sicherzustellen sein, dass die Wettbewerbsfähigkeit und die Arbeitsplätze in der Industrie nicht durch Weichenstellungen für konsequenten Klimaschutz gefährdet werden. Dies ist für das Industrieland Nordrhein-Westfalen aus wirtschaftlichen Gründen und mit Blick auf den Erhalt der Arbeitsplätze von besonderer Bedeutung. Auch für den Klimaschutz ist aber nichts gewonnen, wenn die heimische Industrie zwar die CO₂-Emissionen reduziert, die entsprechende Produktion jedoch nur in andere Länder ohne CO₂-Bepreisung verlagert wird. Solch ein „Carbon Leakage“ führt unter Umständen sogar zu einer Erhöhung der globalen CO₂-Emissionen, wenn anderswo deutsche Umwelt- und Energieeffizienzstandards nicht erreicht werden.

Um international konsistente Anreize zu setzen und auch andere Partner zum Einführen von substanziellen CO₂-Preisen zu gewinnen, könnten sogenannte „border tax adjustments“ eine Option darstellen. Daher ist sorgfältig zu prüfen, ob und ggf. wie es möglich ist, solche CO₂-basierte Steuern bzw. Abgaben bei der Einfuhr und entsprechende CO₂-Kostenerstattungen bei der Ausfuhr so auszugestalten, dass „Carbon Leakage“ vermieden wird und gleichzeitig der internationale Handel kompatibel mit den Regeln der internationalen Handelsorganisation WTO ausgestaltet wird. NRW sollte sich daher auf Bundes- und Europaebene für Rahmenbedingungen einsetzen, die eine weitergehende internationale Wettbewerbsfähigkeit ermöglicht.

5.4 Ausgestaltung von Umlagen

Die Förderkosten für den Ausbau der erneuerbaren Energien werden über das EEG bisher primär auf die Stromkunden umgelegt. Dies führt zu erheblichen Fehlanreizen für die Sektorenkopplung. Eine Möglichkeit stellt die ggf. anteilige Finanzierung der Förderkosten für den weiteren Ausbau der Erneuerbaren Energien oder der Entlastung der energieintensiven Industrie aus staatlichen Haushaltsmitteln dar, welche es aber angesichts der Regelungen des EU-Rechts (Beihilferechts) näher zu prüfen gilt.

Auch eine dynamische EEG-Umlage, wie sie beispielsweise Ecofys [33] fordern, stellt eine Möglichkeit der Anpassung des bisherigen Systems an die Anforderungen der Sektorenkopplung dar. Die Grundidee ist, die Steuern und Umlagen des Stromsektors an temporäre regenerative Stromüberschüsse anzupassen. Bei der dynamischen EEG-Umlage wird die EEG-Umlage über einen Multiplikator an den Börsenstrompreis gekoppelt. Dies bewirkt eine Senkung der Umlage in Zeiten hoher Einspeisung von erneuerbaren Energien und erhöht somit die Nachfrage, bis sich durch nachfolgend steigende Strompreise ein neues Marktgleichgewicht ergibt. Solch eine Umlage könnte einen wesentlichen Ansatzpunkt zur Integration von flexiblen Abnehmern wie etwa Power-to-Heat oder Power-to-Gas Anlagen liefern.

Allerdings ist zu beachten, dass sich die Lenkungswirkung einer dynamischen EEG-Umlage sich nur für die Energieanwender und ggf. Energiespeicher entfaltet, die die Umlage zahlen müssen. Somit ergibt sich eine Verzerrung des Wettbewerbs zwischen Flexibilitätsoptionen auf der weitgehend EEG-umlagebefreiten Großhandelsebene und anderen, teilweise auch unterschiedlich betroffenen Flexibilitätsoptionen bei Endkunden.⁵ Auch ist zu bedenken, dass eine Dynamisierung der EEG-Umlage abrechnungstechnisch für die betroffenen Unternehmen herausfordernd wird und bei Endkunden ohne direkte Leistungsmessung und entsprechend verfügbare zeitvariable Tarife (z. B. aktuell nahezu alle Haushalte) keine Lenkungswirkung entfaltet.

Aktuelle Diskussionen behandeln ebenfalls die Möglichkeit, die EEG-Umlage statt nur auf den Stromsektor, auch auf andere Bereiche, wie dem Wärme-, Gas- oder Mobilitätsbereich aufzuteilen.

5.5 Ausgestaltung von Netzentgelten und Netzregulierung

Netzentgelte dienen primär der Refinanzierung der Netzinfrastruktur:

- Auch wenn Netzentgelte grundsätzlich nicht vollständig verzerrungsfrei ausgestaltet werden können⁶, sind doch Anpassungen an die Anforderungen der Sektorenkopplung möglich. Die aktuelle zeitinvariante Umlage von Netzkosten auf die Arbeitspreise der Stromlieferung in der Niederspannung, führt derzeit zu Fehlanreizen bei der Sektorenkopplung

⁵ Des Weiteren führt eine aufkommensneutrale Umgestaltung der Umlage zu Verteilungseffekten zu Lasten unflexibler Verbraucher. Die Umlage orientiert sich zudem nicht direkt an den mit der Stromerzeugung verbundenen CO₂-Emissionen und führt damit teilweise zu Fehlanreizen – z. B. in Zeiten, in denen niedrige positive Strompreise mit Produktion aus Kohlekraftwerken einhergehen.

⁶ Dies folgt aus der Tatsache, dass die Grenzkosten einer verstärkten Netznutzung in der Regel niedriger sind, als die Durchschnittskosten. Bei der effizienten Preissetzung auf Basis von Grenzkosten entsteht ein Finanzierungsdefizit für die Netzinfrastruktur. Die Umlage dieses Defizits auf die Netznutzer führt zwangsläufig zu einem gewissen Maß an ineffizienter Faktorallokation, im vorliegenden Fall bei der Elektrizitätsanwendung oder/und -erzeugung.

und beim Eigenverbrauch⁷. Grundsätzlich ist dabei festzustellen, dass jede Änderung der Netzentgeltsystematik bedingt durch das Prinzip der Kostenwälzung in der Netzentgeltkalkulation zu Gewinnern und Verlierern führt und daher zu verteilungspolitischen Diskussionen führt [34]. Durch das am 22.07.2017 in Kraft getretene Netzentgeltmodernisierungsgesetz wurde bereits die Thematik der verursachergerechten Netzentgelte umgesetzt, wodurch eine schrittweise Vereinheitlichung der bundesweiten Übertragungsnetzentgelte sowie eine schrittweise Abschmelzung und Abschaffung der vermiedenen Netzentgelte im Verteilnetz eingeführt wurde. Weitere Änderungen mit den folgenden Zielen werden weiterhin diskutiert [34]: verursachungsgerechte Netzentgelte (Netzanschluss- und Vorhaltungskosten),

- keine Hemmnisse für netzdienliche Flexibilitätseinsätze⁸ – besser gezielte Förderung von netzdienlichem Verhalten,
- keine unnötigen Hemmnisse für markt- oder systemdienliche Flexibilitätsanwendungen,
- Vermeidung von Fehlanreizen und Mitnahmeeffekten,
- Transparenz, Planbarkeit und Diskriminierungsfreiheit

Zudem ist bei einer neuen Netzentgeltsystematik auf eine verteilungspolitisch akzeptable Ausgestaltung zu achten.

Folgende Faktoren einer geänderten Netznutzung sind dabei zu berücksichtigen:

- Eine steigende dargebotsabhängige und dezentrale Erzeugung erfordert ohne Ausgleichsmaßnahmen (z.B. DSM, Speicher,) eine höhere Netzkapazität und ggfs. einen Ausbau insbesondere auch des Verteilnetzes; insbesondere, wenn ein lokaler Überschuss (z.B. in den ländlichen Netzen) nicht lokal verbraucht werden kann (sondern z.B. in die Stadtzentren transportiert werden muss)
- Aktive Prosumer führen bei entsprechenden Anreizen tendenziell zu höherer Gleichzeitigkeit im Netz (z.B. durch gleichzeitiges Laden der Elektroautos bei geringen Preisen) und können ohne Nutzung von Flexibilitäten/Steuerungsmöglichkeiten ebenfalls einen Netzausbaubedarf zur Folge haben.
- Eine zunehmende Elektrifizierung anderer Energieanwendungen (Verkehr und Wärmemarkt) hat perspektivisch einen signifikanten Mehrverbrauch und ggfs. eine Erhöhung der Last zur Folge und kann daher Netzausbau verursachen.
- Eine grundlegende Voraussetzung, um die bestehende Infrastruktur möglichst effizient nutzen zu können, ist die Fähigkeit, den aktuellen

⁷ Zum Beispiel werden dadurch Anlagen bei Endkunden häufig so ausgestaltet und betrieben, dass der eigene Strombezug minimiert wird, statt dass sie möglichst in Zeiten hoher Residuallast CO₂-effizient Strom und Wärme bereitstellen.

⁸ Netzdienlicher Flexibilitätseinsatz bezeichnet die temporäre Leistungsanpassung einzelner Netznutzer aufgrund des aktuellen lokalen Netzzustands. Dieser wird auf Basis der Spannungsgrenzen und der zulässigen Betriebsmittelauslastung determiniert. Der netzdienliche Flexibilitätseinsatz dient der Reduzierung, Verzögerung oder Vermeidung des konventionellen Netzausbaus (insbesondere im Verteilnetz).

Systemdienlicher Flexibilitätseinsatz dient der Beeinflussung aktueller, überregionaler Systemparameter. Hiermit ist in erster Linie die Frequenzhaltung gemeint. Der systemdienliche Flexibilitätseinsatz dient der stabilen Systemführung- und nicht der Substitution von Netzausbau.

Der marktorientierte Flexibilitätseinsatz umfasst alle weiteren Anwendungsfälle für Flexibilität wie z.B. Spotmarkt-Trading oder der Einsatz für das Bilanzkreismanagement. Der marktorientierte Flexibilitätseinsatz dient dem Ausgleich von Nachfrage und Angebot in der Marktsphäre.

Netzzustand möglichst räumlich und zeitlich hoch aufgelöst zu identifizieren. Diese Voraussetzung ist in den Nieder- und Mittelspannungsebenen heute bei nahezu keinem Verteilnetzbetreiber flächendeckend gegeben.

Auf Basis dieser Ausführungen ergeben sich folgende Handlungsoptionen:

- Um Flexibilität zielgerichtet einsetzen zu können, sind zumindest die potentiell kritischen Netzabschnitte mit „Smart Grid“- Systemen permanent zu überwachen. Solche Systeme in großem Umfang in den Netzbetrieb zu integrieren, ist nur möglich, wenn die regulatorischen Rahmenbedingungen derart gestaltet sind, dass weder die Entscheidung zugunsten von Investitionen in Assets noch die Entscheidung zur Nutzung von Flexibilität bevorteilt wird (siehe dazu auch das nächste Unterkapitel) [35].
- Die Entlastung von Stromverbrauchern, die zu einer effizienten Integration von erneuerbaren Energien führen und sich netzdienlich verhalten, erscheint grundsätzlich zielführend, führt allerdings zwangsläufig zu einer Belastung an anderer Stelle. Die Herausforderung besteht daher darin, eine Balance zwischen der Bereitstellung von hinreichenden Anreizen für ein gewolltes Verhalten und zusätzlichen Belastungen für nicht aktiv beteiligte Akteure zu schaffen. Eine Belastung für die zuletzt genannte Gruppe könnte jedoch beispielsweise dadurch aufgefangen werden, indem auch eine Beteiligung von Einspeiseanlagen an der Finanzierung des Netzes erfolgt, insbesondere wenn ihr Anschluss und Betrieb zu Netzausbau führt (aktuell ist dies nicht der Fall). Ein (lokal differenzierter) Baukostenzuschuss für neu anzuschließende Einspeiser in Gebieten, die bereits deutlich an den einspeisebedingten Kapazitätsgrenzen sind, wäre diesbezüglich eine zielführende und in der Praxis auch umsetzbare Option.⁹ Allerdings ist man hierbei direkt mit der nicht vollständig aufzulösenden Fragestellung konfrontiert, wer letztlich Auslöser für den Netzbedarf ist, z.B. die neu hinzukommenden Anlagen oder auch die bereits bestehende Erzeugungsstruktur.
- Eine (ggf. stufenweise) Anhebung des Grundpreises auf ca. 50% der Netzkosten wäre eine verursachungsgerechte und zugleich umsetzungsfähige Option für eine neue Netzentgeltsystematik bei Kunden ohne direkte Leistungsmessung (z. B. derzeit nahezu alle Haushalte) zur Abdeckung der Fixkosten.
- Darüber hinaus ergibt sich im Hinblick auf verursachungsgerechte Netzentgelte perspektivisch die Option, alle Kunden, bei denen ein intelligentes Messsystem (Smart Meter plus Kommunikations-Gateway) verbaut wird und für die somit messtechnisch ein Leistungswert ermittelt werden kann, mit einem entsprechenden Leistungspreis anstelle eines Grundpreises abzurechnen¹⁰.

5.6 Umgang mit lokalen Flexibilitätsbedarfen und Betreibermodellen bei netzdienlichem Fokus

Eine wesentliche Prämisse bei der Weiterentwicklung des regulatorischen Rahmens sollte sein, sowohl einspeisebedingte als auch lastbedingte Netzengpässe

⁹ Eine regional differenzierte Beteiligung von Erzeugern im Rahmen der Netzentgelte ist allerdings nur sachdienlich, wenn gleichzeitig das EEG von überlagernden Regelungen (insbes. dem Referenzertragsmodell) bereinigt wird.

¹⁰ Während ein Grundpreis unabhängig von der zeitlichen Verteilung der Stromabnahme erhoben wird, wird der Leistungspreis für die maximale Bezugsleistung in einem vorgegebenen Zeitfenster fällig.

im Verteilnetz durch den Einsatz netzdienlicher Flexibilität gleichermaßen begehen zu können. Die Wahlfreiheit des Netznutzers zur Bereitstellungen von Flexibilität (verbunden mit der Frage der Kostenverteilung zur Finanzierung der Netzinfrastruktur) sowie die Wahlfreiheit des Netzbetreibers zum Einsatz von Flexibilität (verbunden mit technologieneutralen Handlungsalternativen) sollten dabei im Mittelpunkt stehen. Für beide, Netznutzer und -Betreiber bietet die Sektorenkopplung zusätzliche Flexibilitätsoptionen. Von einer gezielten Förderung einzelner Alternativen ist abzusehen. Vielmehr ist eine vielversprechende Handlungsoption, bestehende Hemmnisse und Bevorzugungen einzelner Lösungen in der Netzentgeltstruktur, in der Anreizregulierung, den Förderungsbedingungen und der Ausgestaltung der bestehenden Marktplätze abzubauen. Dazu gehört auch die zuvor andiskutierte Angleichung von CO₂-basierten Kosten bei unterschiedlichen Energieträgern (z.B. zur zeitweisen Substitution von Gas durch Strom zur Wärmeherzeugung) [36].

Darüber hinaus gibt es für die lokal differenzierte Anreizsetzung der Flexibilitätsnutzung im Allgemeinen und der Sektorenkopplung im Speziellen mit Blick auf ihre geografische Komponente unterschiedliche Ausprägungen.

Eine ökonomisch-theoretisch konsistente Lösung bietet das sogenannte Nodal-Pricing. Statt eines einheitlichen Marktpreises werden dabei im Fall von Netzengpässen lokal differenzierte Preise gebildet – niedrige in Gebieten mit Erzeugungsüberschuss, hohe in Gebieten mit Nachfrageüberhang. Dieses Prinzip wird in den USA in einem anderen institutionellen Rahmen auf Übertragungsnetzebene und bis hinunter in die Mittelspannung bereits angewandt und setzt volkswirtschaftlich die richtigen Anreize für günstige Platzierungen von Stromerzeugern und neuen Verbrauchern sowie für deren effizienten Betrieb¹¹. Allerdings führt ein solcher Ansatz – konsequent angewandt – auch zu erheblichen Verteilungseffekten, so dass sowohl Stromerzeuger als auch -Verbraucher je nach Position im Netz dadurch besser oder schlechter gestellt werden können. Außerdem ist hierfür ein poolbasierter Stromhandelsmarkt erforderlich, bei dem Markthandel, Engpassbewirtschaftung im Netz und Kraftwerkseinsatzplanung zentralisiert erfolgen. Dies ist in Deutschland und Europa allenfalls längerfristig umsetzbar.

Bei Verzicht auf eine knotenscharfe Preisbildung können Flexibilitäten einerseits markt- oder/und systemdienlich im Hinblick auf das übergeordnete Elektrizitätssystem oder netzdienlich im Hinblick auf das lokale Netz eingesetzt werden. In diesem Fall muss es gerade im Verteilnetz eine lokal differenzierte Komponente der Vergütung geben. Hinsichtlich der Betreibermodelle und der Anreizsetzung gibt es hierbei zwei unterschiedliche Wege [37]:

- Anreizsetzung durch „Zahlung“ einer Entschädigung für die Flexibilität durch den VNB. Dieser muss mindestens die Opportunität des Dritten decken (sonst würde dieser keinen Anreiz erhalten, sich netzdienlich zu verhalten). Gleichzeitig muss der Satz aber geringer sein als die Alternative für den Verteilnetzbetreiber (in der Regel Netzausbau). Ist dies gegeben, wäre es effizient, dass der Dritte über den VNB entschädigt wird und sich netzdienlich verhält. Die Identifikation dieser Flexibilität aus Sicht des VNB muss diskriminierungsfrei und transparent erfolgen. Zudem gilt es Fragen der Risikobewertung, der Vertragsmodelle und der

¹¹ Die Anwendbarkeit und Wirksamkeit derartiger Mechanismen wird allerdings erheblich vom jeweiligen, nationalen Ordnungsrahmen beeinflusst (z.B. Unbundling zwischen Netz, Vertrieb und Erzeugung, Netzentgeltstrukturen).

genauen Anreizgestaltung auf beiden Seiten in weiteren Forschungsprojekten und -Ausarbeitungen zu klären¹².

- Alternativ dazu können die Assets an sich (also die Sektorenkopplungselemente) auch als Teil des Netzes gesehen werden und damit die Entscheidung über eine Investition hier den Effizienzkriterien des Netzbetreibers unterliegen. In solchen Fällen würde der Netzbetreiber für die Möglichkeit der Bewirtschaftung des Assets am Markt ein diskriminierungsfrei zu ermittelndes Entgelt von einem Dritten erhalten und diesen Dritten in einem transparenten Bieterwettbewerb vorab bestimmen. Auch hierfür fehlt allerdings die entsprechende (rechtliche und vertragliche) Grundlage, so dass die Ausgestaltung noch zu erarbeiten sind.
- In beiden Fällen sind Gesamtkosteneinsparungen durch vermiedenen Netzausbau zu erwarten. Dies gilt es durch eine systematische Kostenanalyse näher zu untersuchen.

5.7 Anreize zur Verwendung von Strom aus erneuerbaren Energien in anderen Sektoren

Insofern eine konsistente und substanzielle CO₂-Bepreisung (vgl. 6.2) nicht umsetzbar ist, unzureichend bleibt oder für nicht zielführend eingestuft wird, können angemessene Anreize zum Einsatz von Strom aus (überwiegend) erneuerbaren Energien in anderen Sektoren eine Option zur Förderung der Minderung der THG-Emissionen durch Sektorenkopplung darstellen. Hierbei ist allerdings darauf zu achten, dass keine ineffizienten Wechselwirkungen mit dem ETS entstehen. Dementsprechend ist zu prüfen, inwiefern solch eine Förderung auf Sektoren beschränkt bleiben sollte, die nicht dem ETS unterliegen. Der dafür nötige, zusätzliche Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung inklusive der damit verbundenen indirekten Maßnahmen (z.B. verstärkter Netzausbau) und die Anlagen zur Sektorenkopplung sollten nicht aus dem Stromsektor finanziert werden, da dies keinesfalls verursachungsgerecht ist. Eine Finanzierung der Maßnahmen aus dem Staatshaushalt oder aus den anderen Sektoren stellen Finanzierungsmöglichkeiten dar. Es ist allerdings zu prüfen, ob die Einführung einer eigenen Erneuerbaren-Umlage bei allen Energieträgern verursachungsgerecht ist oder wiederum in den betroffenen Sektoren zu Verzerrungen führt.

Ein bislang unzureichendes Beispiel für die Anreize in Bezug auf die Sektorenkopplung ist die am 15. Mai 2017 verabschiedete 37. BImSchV zur Anrechnung von Biokraftstoffen der 2. Generation (inkl. Stromkraftstoffen) auf die Treibhausgasminderungsquote für Kraftstoffe (98/70/EG). Denn diese ermöglicht weder die Anrechnung des Einsatzes von Wasserstoff aus erneuerbarem Strom im Raffineriebereich (anstelle der üblichen emissionsbehafteten Wasserstoffherzeugung aus Erdgas) als upstream emissions reduction (UER)¹³ noch den Bezug von Strom

¹² Die Problematik der (aktuell fehlenden) Anreizsetzung für den Verteilnetzbetreiber mit Blick auf dieses Opex-Modell wurde in Kapitel 6.5 und im [36] bereits thematisiert. In der regulatorischen Diskussion kann dies durch eine Opex-Marge und langfristige Verträge gelöst werden.

¹³ Dabei ist zudem sicherzustellen, dass, im Gegensatz zur aktuellen Auffassung der EU-Kommission, diese Emissionsvermeidungen als UER anerkannt werden und nicht nur die Mineralöl-Herkunftspfade als „upstream“ angesehen werden. Dass die Emissionen der Raffinerien – inklusive der Wasserstoffherstellung aus Erdgas – bereits dem Emissionshandel unterliegen, bietet bei Fortbestehen der unzureichenden Lenkungswirkung des Emissionshandels nicht hinreichende Anreize für die Nutzung von EE-Strom in PtX-Technologien. Um eine doppelte Begünstigung (Anrechnung als UER und vermiedene Kosten für CO₂-Zertifikate) zu vermeiden, ist allerdings zu prüfen, ob für vermiedene Emissionen doch CO₂-Zertifikate zu erwerben und zu entwerfen sind.

über das öffentliche Netz¹⁴. In Ergänzung zu den Handlungsoptionen für netzdienlichen Strombezug ergeben sich hier zusätzliche Handlungs- und Emissionsminderungsmöglichkeiten, wenn

1. ein netzdienlicher Strombezug zur Vermeidung von Abregelung erneuerbarer Energie voll als erneuerbar angerechnet und von Abgaben entlastet wird,
2. der zeitgenaue und kostendeckende Direktbezug von Strom aus konkreten EE-Anlagen¹⁵ über das öffentliche Netz zugelassen und angerechnet wird, oder
3. der Bezug von Börsenstrom zugelassen und entsprechend seiner aktuellen, stundenscharf zu ermittelnden Treibhausgasintensität bzw. seines EE-Anteils angerechnet wird.¹⁶

5.8 Ausgestaltung von Fördermaßnahmen und netzdienliche Maßnahmen

Insofern eine konsistente Ausgestaltung marktbasierter Ansätze auf absehbare Zeit nicht gelingt – z. B. aufgrund fehlender europäischer und internationaler Kohärenz – ist auch zu prüfen, inwiefern netzdienliche Investitionen in Power-to-Gas-Anlagen und ähnliche sektorenkoppelnde Anlagen nicht gezielt gefördert werden könnten.

Eine Möglichkeit könnte dabei sein, dass solche Anlagen und die entsprechenden Investitionen als systemdienliche Maßnahmen ausgeschrieben werden oder innerhalb des regulierten Netzgeschäfts durchgeführt werden (vgl. Alternative ii. in Abschnitt 7.6), allerdings beschränkt auf die technische Anlage, die die Sektoren koppelt (z. B. eine Power-to-Gas Anlage), d. h. den „Transformator“ zwischen den jeweiligen Sektoren. An beiden Enden des „Transformators“ würden jedoch die allgemeinen Markt- und Systemregeln gelten – um eine Verletzung von beihilferechtlichen oder energierechtlichen (Entflechtung) Vorschriften zu vermeiden. Vorteil eines solchen Ansatzes könnte sein, dass die wirtschaftlichen Risiken für den Investor reduziert würden und sich das Risiko im Wesentlichen auf die technische Umsetzbarkeit beschränken würde. Damit würden sich die Finanzierungskosten für Fremdkapital und die erforderliche Eigenkapitalquote reduzieren und sich so auch die Gesamtkosten für die Endkunden erniedrigen.

¹⁴ Es werden lediglich ein lokaler Direktbezug vor dem Netzverknüpfungspunkt und der Bezug im Einsatz als zuschaltbare Last nach §13(6) EnWG zugelassen. Ersterer ist an Neuanlagen aber auf seltene Ausnahmen begrenzt (§27a EEG2017), und letzterer ist für PtX-Anlagen unerschwinglich, da er voll entgelt-, abgaben- und umlagepflichtig ist. Eine (üppige) Erstattung hat der Gesetzgeber nur für KWK-Anlagen vorgesehen (§13(6a) EnWG), die allerdings derzeit nur für die nördlichen Bundesländer und bei Zugriff durch den Übertragungsnetzbetreiber gilt.

¹⁵ Diesen ist eine gesplittete Direktvermarktung (Börse/sonstige) zu gestatten.

¹⁶ Die Berücksichtigung von Importen bzw. Exporten bei der Ermittlung der Treibhausgasintensität ist dabei noch zu prüfen.

Referenzen

- [1] Edenhofer O., R. et al., (2014) Technical Summary. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [2] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (2016) Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung, Berlin.
- [3] A. Otto, M. Robinius, T. Grube, S. Schiebahn, A. Praktiknjo, and D. Stolten, Power-to-Steel: Reducing CO₂ through the Integration of Renewable Energy and Hydrogen into the German Steel Industry. *Energies*, 2017. 10(4): p. 451.
- [4] Robinius, M., Strom- und Gasmarktdesign zur Versorgung des deutschen Straßenverkehrs mit Wasserstoff. *Energie und Umwelt*. Vol. Dr. 2015, Jülich: RWTH Aachen University. VI, 255 pp.
- [5] Müller-Syring, G., M. Henel, W. Köppel, H. Mlaker, M. Sterner, and T. Höcher, Entwicklung von modularen Konzepten zur Erzeugung, Speicherung und Einspeisung von Wasserstoff und Methan ins Erdgasnetz - Management Summary. 2013, Bonn.
- [6] Weber, M., Senner, J., Schaffert, J., Power-to-Gas in Deutschland und NRW, 2016, Düsseldorf.
- [7] Marzi T., Deerberg G., Doetsch C., Grevé A., Hiebel M., Kaluza S., Knappertsbusch V., Maga D., Müller, T., Pflaum H., Pohlig A., Renner M., Seifert U., Stiebel S., Unger C., Wack T., Weidner E. (2017) Kohlenstoff- Biomasse und regenerativer Strom – Ressourcen einer neuen Kohlenstoffwirtschaft? (UMSICHT-Diskurs 1); Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT (Hrsg.) Oberhausen.
- [8] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2017) Ergebnisrapport Strom 2030. Langfristige Trends – Aufgaben für die kommenden Jahre, Berlin.
- [9] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2016) Grünbuch Energieeffizienz- Diskussionspapier des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.
- [10] Energiestatistik (2017) Regenerative Energien & KWK- Regenerative Stromerzeugung - EU, Bund und NRW, www.energiestatistik-nrw.de, 11.08.2017.
- [11] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2016) Energiedaten Deutschland 2014.
- [12] Markewitz, P., Grube, Th., Robinius, M., Kannengießer, T., Stolten, D.: Energietransport und –verteilung. *Brennstoff-Wärme-Kraft* Bd. 69 (2017) Nr. 5, S.51-59.
- [13] Europäische Kommission (2016) Clean Energy for all Europeans („EU-Winterpaket“), Brüssel.
- [14] Bundesministerium für Bildung und Forschung (2016) Mit Abgas das Klima retten. Pressemitteilung 075/2016 des BMBF, www.bmbf.de, 11.09.2017.
- [15] Endenergieverbrauch in NRW (2013) nach Verbrauchssektoren. www.energiestatistik-nrw.de, 11.09.2017.
- [16] ElektroMobilität.NRW (2017) ZAHLEN – DATEN – FAKTEN. Nordrhein-Westfalen Quartal 1/2017. www.elektromobilitaet.nrw.de, 11.09.2017.
- [17] ElektroMobilität.NRW (2014) Mehr bewegen. Mit Strom. Der Masterplan Elektromobilität NRW 2014. www.elektromobilitaet.nrw.de, 11.09.2017.
- [18] Zdrallek, M.; Aundrup, T.; e.a. (2016) NRW-Verteilnetze als intelligente Plattform für die Energiewende – Handlungsempfehlungen einer Expertengruppe im

Netzwerk Netze und Speicher der EnergieAgentur.NRW im Auftrag des Landes Nordrhein-Westfalen.

- [19] DVGW (2015) Nutzen der Power-to-Gas-Technologie zur Entlastung der 110-kV-Stromverteilungsnetze, Bonn.
- [20] DVGW (2013) Synergieeffekte Gas- und Stromnetze – Nutzung von Gasnetzen und -speichern für die Integration von Strom aus Erneuerbaren Energien und zur Entlastung der Stromnetze.
- [21] Chemieatlas (2017) Standort & Infrastruktur der Chemie in NRW, www.chemieatlas.de.
- [22] Rehtanz, C.; Barth, P.; e.a. (2016) Transportnetze als zukunftssichernde Infrastruktur im Industrieland NRW - Handlungsempfehlungen einer Expertengruppe im Netzwerk Netze und Speicher der EnergieAgentur.NRW im Auftrag des Landes Nordrhein-Westfalen.
- [23] Schiebahn, S., et al., Power to gas: Technological overview, systems analysis and economic assessment for a case study in Germany. International Journal of Hydrogen Energy, 2015. 40(12): p. 4285-4294.
- [24] Thermische Leistung der Wärmekraftwerke in NRW (2013) www.energiestatistik-nrw.de, 11.09.2017.
- [25] Aufkommen von Fernwärme in NRW (2014) www.energiestatistik-nrw.de, 11.09.2017.
- [26] Quaschnig, V. (2016) Sektorenkopplung durch die Energiewende. HTW Berlin.
- [27] EnergieAgentur.NRW (2016) Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff Nordrhein-Westfalen. <https://broschueren.nordrheinwestfalendirekt.de> , 11.09.2017.
- [28] Edenhofer, Ockenfels (2015) Ausweg aus der Klima-Sackgasse. FAZ-Artikel vom 26.20.2015, www.faz.net.
- [29] Laureate, N. Stiglitz J. Stern, N. (2017) Report of the High-Level Commission on Carbon Prices. Carbon Pricing Leadership Coalition. 29. Mai 2017, Paris.
- [30] Acatech et al. (2017) - AG Sektorkopplung: Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems – Analyse (noch unveröffentlicht).
- [31] Agora (2017) Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2016. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2017, Berlin Januar 2017.
- [32] Bräuninger, M., Leschus, L., Matthies, K. (2010) Die volkswirtschaftliche Bedeutung des Raffineriesektors in Deutschland (HWWI Policy Report Nr. 14, Hamburgisches Weltwirtschafts-Institut), Hamburg 2010.
- [33] Ecofys (2014) Subsidies and costs of EU energy. Final report.
- [34] Bundesnetzagentur (BNetzA) (2015) Bericht zur Netzentgeltsystematik Elektrizität, Dezember2015, Bonn.
- [35] Bergische Universität Wuppertal, Siemens AG, Power Technologies International (2016) Planungs- und Betriebsgrundsätze für ländliche Verteilungsnetze – Leitfaden zur Ausrichtung der Netze an ihren zukünftigen Anforderungen.
- [36] dena-Netzflexstudie (2017) Optimierter Einsatz von Speichern für Netz- und Marktanwendungen in der Stromversorgung“, dena, BET Aachen, Bergische Universität Wuppertal, Boos, Hummel & Wegerich.
- [37] Sauer, D. U.; Nykamp, S.; Badeda, J., Fuchs, C. e.a. (2016) Dezentrale Speicher als neue Elemente mit Flexibilitätspotenzial für die Netze Handlungsempfehlungen einer Expertengruppe im Netzwerk Netze und Speicher der EnergieAgentur.NRW im Auftrag des Landes Nordrhein-Westfalen.
- [38] Sterner, Stadler, Energiespeicher, Springer-Verlag, 2017.
- [39] Kraftfahrt-Bundesamt Flensburg, 2017.
- [40] Virtuelles Institut Strom zu Gas und Wärme/ GWI, 2017.

Anhang I: Projektliste zur Sektorenkopplung in NRW (Auszug)

Tabelle 4: Projekte mit Fokus Sektorenkopplung Strom-Gas

	Projekt	Standort	Laufzeit	Sektor	Inhalt
1	Einsatzkonzepte für die Power-to-Gas-Technologie auf Verteilungsebene	Wuppertal	2 Jahre: 1. Teil: 03/2013 bis 03/2014 2. Teil: 04/2014 bis 03/2015	Strom, Gas	1. Teil: G 3/03/12 Nutzen von Smart-Grid-Konzepten unter Berücksichtigung der Power-to-Gas-Technologie 2. Teil: G 3/03/12-ERG Studie über den Nutzen der PtG-Technologie zur Entlastung der 110-kV-Stromverteilungsnetze
2	GuStaV	Wuppertal	01.08.2016 - 31.07.2019	Strom, Gas	Untersuchung und Entwicklung einer kombinierten Gas- und Stromnetzautomatisierung für Verteilnetze u.a. unter dem Gesichtspunkt einer gemeinsamen Kommunikationsinfrastruktur im Sinne eines smart grids
3	h2Herten	Herten	seit 2009 in Betrieb	Strom, Gas	Wasserstoffanwendungszentrum als Energiekomplementärsystem mit Windturbinen, einem Elektrolyseur, einem 500 kg Wasserstofftank sowie einer 50 kW Brennstoffzelle. Mit dem erzeugten Wasserstoff könne die einigen Wasserstoff-Fahrzeuge ganzjährig vor Ort betankt werden. Über die Rückverstromung per Brennstoffzelle kann die Stromversorgung in Windflauten gedeckt werden.
4	Agent.HyGrid	Duisburg/ Essen/ Wuppertal	01.10.2015 - 30.09.2018	Strom, Gas & Wärme	Entwicklung eines autonomen Softwaresystems zur Steuerung der dezentralen Energieversorgung zur optimierten Ausnutzung der hybriden Strom-, Gas- und Wärmeversorgung.
5	Power2Gas (Westnetz)	Ibbenbüren	01.01.2015- 31.12.2020	Strom, Gas & Wärme	Bei der Power-to-Gas-Anlage in Ibbenbüren wird aus Strom mittels PEM-Elektrolyse Wasserstoff erzeugt und in

					das dort vorhandene Erdgasnetz eingespeist.
6	Virtuell Power Plant - Hebung von Flexibilitäten in großstädtischen Strukturen	Wuppertal	01.03.2017 - 30.04.2020	Strom, Gas, Wärme & Verkehr	Entwicklung und Implementierung eines Virtuellen Kraftwerks in das Energieversorgungssystem von Wuppertal. Hierbei sollen sowohl über Steuersignale, als auch über (monetäre) Anreizsignale, Reaktionen der Kunden hervorgerufen werden, um Lasten wie auch Einspeisungen gemeinsam zu optimieren. Einen besonderen Stellenwert hat die Einbindung von Technologien zur Sektorenkopplung (Elektromobilität, Power-to-Heat, Power-to-Gas).
7	Designnetz	NRW	01.01.2017-31.12.2020	Strom, Gas, Wärme & Verkehr	Designnetz versucht, eine Blaupause der Energiewende zu liefern. Dazu werden auch bestehende Sektorenkopplungselemente thematisiert und neue aufgebaut (Power-to-Gas, Power-to-Heat)

Tabelle 5: Projekte mit Fokus Sektorenkopplung Strom-Industrie

	Projekt	Standort	Laufzeit	Sektor	Inhalt
8	Carbon2chem	u.a. Duisburg	1. Phase: Sommer 2016- Sommer 2020, ausgelegt auf 10 Jahre	Strom, Industrie	Nutzung von Hüttengasen zur Herstellung chemischer Produkte
9	Strom als Rohstoff	Oberhausen	Sommer 2015- Sommer 2018	Strom, Industrie	Entwicklung elektrochemischer Verfahren zur Herstellung chemischer Produkte
10	Elektrodenkessel für Hochdruckdampf	Leverkusen		Strom, Industrie	Integration eines Elektrodenkessels in das Dampfversorgungssystem: 31 bar Dampf, 7 MW el, 10 t/h

11	Power-to-Methanol-Anlage	Lünen	Inbetriebnahme vsl. 2017	Strom, Industrie	Im Rahmen des Forschungsprogrammes „Horizon2020“ der EU soll das erste Großprojekt dieser Art, CO ₂ aus dem Abgas eines Steinkohlekraftwerks separieren und mit dem zuvor gewonnenem H ₂ aus einer PtG-Anlage zu Methanol synthetisieren. Es wird ein flexibler Betrieb des Reformers zu Zeiten des Überschussstroms angestrebt sowie eine zusätzliche Abwärmenutzung des Methanol-Reformers innerhalb des Kraftwerks.
12	Power-to-Gas in Rheinland Raffinerie	Wesseling	Projektbeginn September 2017	Strom, Industrie	Die Rheinland Raffinerie plant für ihre zukünftige Wasserstoffherstellung, die ursprünglich mittels Dampfreformierung aus Erdgas und Wasser hergestellt wurde, einen 10 MW-PEM Elektrolyseur zu errichten, der mithilfe von kostengünstigen EE-Strom die notwendigen Wasserstoffmengen von 180.000 Tonnen pro Jahr herstellt.

Tabelle 6: Projekte mit Fokus Sektorenkopplung Strom-Verkehr

	Projekt	Standort	Laufzeit	Sektor	Inhalt
13	metropol-E	Dortmund	01.07.2012 - 30.06.2015	Strom, Verkehr	metropol-E entwickelte und testete erstmals ein Lade- und Flottenmanagementsystem für den Einsatz von Elektrofahrzeugen in einer kommunalen Flotte. Erneuerbare Energien wurden gezielt für die Mobilität genutzt.
14	Batterie-Oberleitungs-Bus (BOB)	Solingen	01.02.2017 - 31.01.2022	Strom, Verkehr	Elektrifizierung des Solingers öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV), durch Kombination von bewährter Oberleitungsbus- und neuester Batterietechnologie im BOB.

15	NEmo	Wuppertal	01.04.2013 - 31.12.2015	Strom, Verkehr	Aufbau von intelligenten Überwachungs- und Steuerungssystemen für Niederspannungsnetze, die die Basis für eine zukünftig erfolgreiche Netzintegration von Elektromobilität bilden.
16	CIVITAS-DYN@MO	Aachen (in Kooperation mit Palma de Mallorca, Gdynia, PL und Koprivnica, HR)	Projektende 2017, wird weitergeführt	Strom, Verkehr	elektromobiles Wohnen mit der Produktion erneuerbarer Energien (e-Mobilität als Anlass für PV) für Elektromobilität (e-car-sharing und Leih-Pedelecs) bei Wohngebäude der örtlichen Wohnungsbaugesellschaft, Kopplung mit ÖV-Angeboten und Mobilitätsberatung
17	CO2 GoGreen	Bonn	01.07.2012 bis 31.12.2016	Strom, Verkehr	Elektrifizierung einer Paketzustellflotte und Erarbeitung einer großflottentauglichen Lade-technik-Infrastrukturlösung für den gewerblichen Einsatz. Dies umfasst sowohl direkte nutzerbezogene Aspekte als auch den übergreifenden Blick auf die Auswirkungen des Ladens von Großflotten auf lokale und nationale Energienetze, Energiebedarfe und die Energiebereitstellung sowie die Auswirkungen des Elektrofahrzeugeinsatzes auf logistische Prozesse.
18	Redox-Flow Speicher mit E-Tankstelle	Bielefeld	2012 abgeschlossen	Strom, Verkehr	Anbindung von zwei Redox-Flow Speichern zur erhöhten Ausnutzung des volatilen EE-Stroms und u.a. zur Versorgung zweier E-Tankstellen
19	Brennstoffzellenbusse der RVK	Region Köln	2011 abgeschlossen	Verkehr	Das Verkehrsunternehmen Regionalverkehr Köln GmbH (RVK) setzt seit dem Jahre 2011 mit vier Wasserstoffbussen auf emissionsfreien Antrieb im ÖPNV. Die erforderliche Wasserstofftankstelle ist in Hürth am Chemiapark Knapsack errichtet worden und stellt den als Nebenprodukt in der benachbarten Chemieindustrie anfallenden Wasserstoff für die Betankung der Busse sowie weitere Fahrzeuge zur Verfügung

20	RUHRAU-TOe	Ruhrgebiet	01.09.2012 – 31.10.2014	Strom, Verkehr	Im Rahmen des Projekts „RUHRAUTOe“ wird nahezu im gesamten Ruhrgebiet ein umfassendes E-Carsharingnetz aufgebaut und eine enge Vernetzung mit dem ÖPNV geschaffen. 30 Elektroautos bilden in Essen ein CarSharing-Netz mit sechs Standorten und sollen in Wohngebieten und im City-Bereich den Zweitwagen ersetzen, in das ÖPNV-Angebot integriert werden und mit den öffentlichen Verkehrsmitteln (Bahn, Bus und Straßenbahnen) vernetzt werden.
21	Syncfuel	Dortmund	01.01.2015 - 31.12.2017	Strom, Verkehr	Synchronisierter Eigenstrom für die Ladung von Elektrofahrzeugen. Es wird der kostensenkende Effekt eines erhöhten Eigenverbrauchs von EE-Stroms für das Laden von E-Fahrzeugs zur Refinanzierung von E-Fahrzeug und Ladeinfrastruktur untersucht.
22	ANFAHRT	Aachen	01.01.2013 - 31.12.2016	Strom, Verkehr	Im Forschungsverbund zwischen RWTH und FH Aachen wurde gemeinschaftlich an der Fragestellung gearbeitet, wie der Einsatz alternativer Antriebsformen in Bussen und Lastkraftwagen in der Zukunft aussehen kann.
23	KomRev	Rheine	11/2012- 12/2016	Strom, Wärme, Gas, Verkehr	Entwicklung effiziente Energienutzungs- und Versorgungskonzepte für die kommunale Ebene am Beispiel der Stadt Rheine. Es werden zwei technisch und wirtschaftlich machbare Konzepte einer exergetisch effizient vernetzten Gesamtversorgung für das Zieljahr 2050 erarbeitet (Zielvisionen)
24	E-Bus KVB	Köln	Seit Dezember 2016 umgesetzt	Strom, Verkehr	Die Kölner Verkehrsbetriebe haben die Linie 133 von Diesel- auf E-Busse umgestellt. Die acht Gelenkbusse können tagsüber an den beiden Endhaltestellen sowie nachts am zentralen Betriebshof geladen werden.

25	colognE-mobil	Köln	2012-2015	Strom, Verkehr	Das Projekt „colognE-mobil – Elektromobilitätslösungen für NRW“ untersuchte Aspekte des regionalen und überregionalen E-Verkehrs, sowie des elektrifizierten ÖPNV. Insgesamt wurden im Rahmen von colognE-mobil bisher mehr als 200 Ladestationen errichtet und rund 700.000 km Fahrzeugkilometer mit den 56 elektrischen Fahrzeugen der Testflotten zurückgelegt
26	Greenfuel Essen	Essen	2017-2018	Verkehr	greenfuel ist das Leuchtturm-Projekt der Grünen Hauptstadt Europas – Essen 2017. in-nogy produziert am Essener Baldeneysee auf nachhaltige Weise den klimaneutralen Treibstoff Methanol mithilfe erneuerbarer Energien und führt ihn zur Anwendung in einer Brennstoffzelle in dem Ausflugsschiff und in zwei Elektroautos.

Tabelle 7: Projekte mit Fokus Sektorenkopplung Strom-Wärme

	Projekt	Standort	Laufzeit	Sektor	Inhalt
27	PtH der Stadtwerke Lemgo	Lemgo	2012	Strom, Wärme	Mit Überschussstrom betriebener 5 MW Elektrodenkessel zur öffentlichen Wärmeversorgung bei gleichzeitiger Vermarktung von Regelenergie
28	Wärmepumpe mit Eisenergiespeicher	Düsseldorf	2011	Strom, Wärme	Die Alte Pumpstation Haan, welche heute als Bürogebäude und Kulturstätte dient wird per Wasser/Wasser-Wärmepumpe in Kombination mit einem Solarzaun temperiert. Als Bindeglied zwischen beiden Wärmeerzeugern steht ein Eisspeicher, der den Gebäudekomplex im Sommer kühlt.
29	KWK & Fernwärme	Köln	2016	Strom, Wärme	Gas-und-Dampfturbinen-Heizkraftwerk

					Niehl 3 zur Fernwärmeversorgung
30	KWK & Fernwärme	Düsseldorf	2016	Strom, Gas, Wärme	Weltweit effizientestes Gas- und Dampfturbinenkraftwerk „Fortuna“ der Stadtwerke Düsseldorf mit einem Brennstoffausnutzungsgrad von bis zu 85% zur Fernwärmeversorgung
31	Virtueller Wärmes-trompool	Köln	01.04.2017 - 31.03.2020	Strom, Wärme	Es wird die Eignung von Nachtspeicherheizungen (NSH) zur Einbindung als steuerbare Last in das Virtuelle Kraftwerk der RheinEnergie in einem Feldtest untersucht und gemäß einer optimierten Betriebsweise gesteuert. Ziel der Optimierung des Einsatzes von NSH ist eine systemdienliche Verschiebung der Ladezeiten auf Zeiten hoher, regenerativer Einspeisung.
32	TESIS	Köln	2013-2018	Strom, Wärme	Die 4 MWh Testanlage für Wärmespeicherung in Salzschnmelzen (TESIS) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) geht 2017 in Betrieb. Hinsichtlich der Sektorenkopplung wird erforscht ob EE-Strom in HT-Wärmespeichern über P2H eingekoppelt und diese gespeicherte erneuerbare Wärme in konventionellen Kraftwerksprozessen rückverstromt werden kann (z.B. für zentrale KWK als Strom-Wärme-Strom-Speicher).

33	PtH	Münster	Inbetriebnahme 2016	Strom, Wärme	Der Elektrodenkessel mit 22 MW Leistung der Stadtwerke Münster nutzt überschüssigen Windstrom um Wasser für die Fernwärmeversorgung zu erzeugen. Das erhitze Wasser des Elektrodenkessels wird in einen bereits vorhandenen Wärmespeicher mit acht Millionen Liter Fassungsvermögen geleitet, der an das Gas- und Dampfturbinen-Heizkraftwerk der Stadtwerke angeschlossen ist. Der Elektrodenkessel wird damit betrieblich in das Kraftwerk integriert. Weiterhin bietet der Kessel negative Regelleistung an, welche seine Wirtschaftlichkeit erhöht.
----	-----	---------	------------------------	-----------------	---

Anhang II Förderprogramme im Bereich Sektorenkopplung

Generelle Informationen

EU: <https://www.eu-foerdermittel.eu/umwelt-energie/>

Bund: <http://www.foerderdatenbank.de/>

Land:

- Fördernavi EnergieAgentur.NRW: http://www.energieagentur.nrw/foerderung/beratung_unternehmen_online_tools/foerdersnavi
- LeitmarktNRW-Wettbewerbe: <https://www.leitmarktagentur.nrw/aktuelles>

	Förderprogramm	Was wird gefördert?	Förder-summe	Lauf-zeit	Link
EU	Horizon 2020	Alles (Fokus: CO2-arme Technologien)	77 Mrd. €	2014-2020	http://ec.europa.eu
Bund	NIP 2-Einsatz von Wasserstoff und Brennstoffzellen im Verkehrsbe-reich	• Fahrzeuge (Straße, Schiene, Wasser, Logistik) sowie die dazugehörige Be-tankungsinfra-struktur • Elektrolyseanlagen zur Erzeugung von Wasserstoff • Nicht-stationäre Kraft-Wärme-Kop-pelungs-Anlagen • Autarke Stromver-sorgung für kriti-sche oder netz-ferne Infrastruktur	250 Mio. €	2017 bis 2019	www.bmvi.de
	6. Energie-forschungs-programm - Forschung	• Brennstoffzellen und Wasserstoff-technologien • Energiespeicher • Energieeffiziente Netztechnologie • Weiterentwicklung der Netzinfrastruk-tur • Systemintegration erneuerbarer Ener-gien • Systemübergrei-fende Technologie-ansätze für die Energiewende	für Ge-werbe bis zu 50% der förder-fähigen Kosten; für For-schungs-einrichtun-gen bis zu 100% der zuwen-dungsfähigen Aus-gaben	Seit 2015	www.foerderdatenbank.de

	„Brennstoffzellen und Wasserstoff 2“ (FCH 2)	• Verringerung der Produktionskosten von Brennstoffzellensystemen für Anwendungen im Verkehrssektor, • Erhöhung des elektrischen Wirkungsgrads und der Lebensdauer	665 Mio. €	2014	www.foerderdatenbank.de
Bund	(FONA3) & (r+Impuls)	stoffliche Nutzung von CO2 für chemische Produkte sowie zur Energiespeicherung	für Gewerbe bis zu 25% der förderfähigen Kosten; für Forschungseinrichtungen bis zu 100% der zuwendungsfähigen Ausgaben		www.foerderdatenbank.de
	Förderrichtlinie Elektromobilität	• kommunale Elektromobilitätskonzepte einschließlich der Beschaffung von Elektrofahrzeugen und dem Aufbau von Ladeinfrastrukturen • Forschungs- und Entwicklungsprojekte im Bereich des Markthochlaufs von Elektrofahrzeugen	für Gewerbe bis zu 25% der förderfähigen Kosten; für Forschungseinrichtungen bis zu 75% der zuwendungsfähigen Ausgaben		www.foerderdatenbank.de
	Förderung des Absatzes von elektrisch betriebenen Fahrzeugen (Umweltbonus)	• Batterieelektrofahrzeuge • Brennstoffzellenfahrzeug • Hybridfahrzeuge	Zuschuss: 4.000 € für Batterieelektro- oder Brennstoffzellenfahrzeug; 3.000 € für Hybridfahrzeug	Ab 2016	www.foerderdatenbank.de
	Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland	• Normalladepunkte bis 22kW • Schnellladepunkte • Netzanschluss NS • Netzanschluss Mittelspannung	Bis zu 40% der Gesamtausgaben	Bis Okt. 2017	www.foerderdatenbank.de
	Klimaschutzinitiative - Anschaffung	Hybrid-Fahrzeuge ohne (Hybridbusse) sowie mit externer Auflademöglichkeit	Zuschuss: 35-55% der Inves-	Bis Ende 2020	www.foerderdatenbank.de

	von diesel-elektrischen Hybridbussen im öffentlichen Nahverkehr	(Plug-In-Hybridbusse).	Investitionsmehrkosten		
	KfW-Programm Erneuerbare Energien - Speicher	Stationäres Batteriespeichersystem in Kombination mit PV-Anlage	Darlehen mit Tilgungszuschuss	Seit 2013	www.foerderdatenbank.de
	KfW-Energieeffizient Bauen und Sanieren - Zuschuss Brennstoffzelle	Einbau stationärer Brennstoffzellen (0,25 kWel - 5,0 kWel)	Investitionszuschuss Festbetrag von 5.700 Euro und einem leistungsabhängigen Betrag von 450 Euro je 100 kWel.		www.kfw.de
	KfW-Erneuerbare Energien – Premium	• Wärmenetze, die aus erneuerbaren Energien gespeist werden • große Wärmespeicher • große effiziente Wärmepumpen	Tilgungszuschuss		www.kfw.de
	Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt	• effizienten Wärmepumpen • Nahwärmenetzen, die mit Wärme aus erneuerbaren Energien gespeist werden, • besonders innovative Technologien zur Wärme- und Kälteerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland	Investitionszuschüsse & zinsvergünstigte Darlehen und Tilgungszuschüsse		www.foerderdatenbank.de
	Modellvorhaben Wärmenetzsysteme 4.0	• vorbereitende Machbarkeitsstudien • Realisierung eines Wärmenetzsystems 4.0 durch Neubau oder Transformation eines Netzes	<u>Zuschuss</u> Bis zu 60% der Kosten für Machbarkeitsstudien & bis zu 5% der Kosten, für die Realisierung eines	Bis Ende 2020	www.foerderdatenbank.de

			Wärme- netzsys- tems 4.0		
	IKU - Ener- getische Stadtsanie- rung – Quar- tiersversor- gung	• Hocheffiziente Anla- gen zur Versorgung mit Wärme aus KWK • Anlagen zur Nut- zung industrieller Abwärme zur Ver- sorgung im Quar- tier, • dezentrale Wärme- und Kältespeicher • Wärme- & Kälte- netze	Tilgungs- zuschuss		www.kfw.de/
	KMU-innova- tiv	industrielle For- schungs- bzw. vor- wettbewerbliches Entwicklungsvorha- ben, welche durch hohes wissenschaft- lich-technisches Ri- siko gekennzeichnet sind	50% der Kosten für Unterneh- men der 100% für For- schungs- einrichtun- gen		<a href="http://www.foerder-
bar.de">www.foerder- bar.de
Land NRW	Förderpro- gramme der Energiever- sorgungsun- ternehmen	U.a. • Erdgasfahrzeuge und -heizungen • Elektrofahrzeuge	Zuschüsse	Unter- schie- dlich	<a href="http://www.energie-
agentur.nrw">www.energie- agentur.nrw
	Förderpro- gramme der Energiever- sorgungsun- ternehmen	Wärmepumpen	Zuschüsse & Wärme- pumpen- stromtarif	Unter- schie- dlich	<a href="http://www.energie-
agentur.nrw">www.energie- agentur.nrw
	Förderpro- gramm prores.nrw - Wärme- und Kältenetze/ KWK	• Neubau und Ver- dichtung von ener- gieeffizienten Fern- wärme- und Fern- kältenetzen • Speicher in Fern- wärme- und Fern- kältenetzen • Umbau vorhande- ner Fernwärme- dampfnetze auf Heißwassernetze	15% der verfügba- ren Haus- haltsmittel (für pro- ress.nrw gesamt)	Seit Dez. 2014	<a href="http://www.bezreg-arns-
berg.nrw.de">www.bezreg-arns- berg.nrw.de
	NRW.Bank Elektromobi- lität	• Batterietechnik, • Fahrzeugtechnik • technische Infra- struktur • Auf- und Ausbau von Ladestationen • Anschaffung von Elektromobilen zu Demonstrations- zwecken	Zinsgüns- tiges Dar- lehen	Ab 2016	<a href="http://www.foerderda-
tenbank.de">www.foerderda- tenbank.de

		• Erwerb von Flotten von Elektromobile.			
	Förderprogramm progres.nrw - Innovation	• Vorhaben der energietechnischen Entwicklung zur rationalen Energieverwendung • Demonstration neu entwickelter Energietechniken	15% der verfügbaren Haushaltsmittel (für progres.nrw gesamt)		www.nrwbank.de
	progres.nrw - Programm für Rationelle Energieverwendung, Regenerative Energien und Energiesparen – Programmbereich Markteinführung	• Ladeinfrastrukturen (Wallboxen & Ladesäulen) • Umrüstung von Fahrzeug-flotten auf Elektro-Antriebe • stationäre elektrische Batteriespeicher in Verbindung mit einer neu zu errichtenden Photovoltaikanlage • Wärme- und Kältespeicher • Wärme- und Kältenetze • gewerbliche Anlagen zur Verwertung von Abwärme • Lüftungsanlagen und Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung	Zuschuss	Bis 2022	www.foerderdatenbank.de
	Wettbewerb "Emissionsfreie Innenstadt"	<i>Noch nicht im Detail bekannt</i>	100 Mio. €	Aufruf Anfang 2018	<i>Noch nicht veröffentlicht</i>
	Leitmarktwettbewerb Mobilität Logistik.NRW	• Innovation für Mobilität und Automotive • Innovative Logistik	50-90% der Kosten	1.Call bis Nov 2017 2. Call bis Okt.2018	www.leitmarktagentur.nrw
	Regionales Wirtschaftsförderungsprogramm – Infrastrukturrichtlinie	Maßnahmen einer regionalen Entwicklungsstrategie, u.a. • innovative Stromspeicheranlagen • CO2-Rohrleitungsnetze	Zuschuss 60-90% der unrentierlichen Ausgaben	Bis Dez. 2020	www.foerderdatenbank.de

Impressum

EnergieAgentur.NRW GmbH
Roßstraße 92
40476 Düsseldorf

Telefon: 0211/8 3719 30
hotline@energieagentur.nrw
www.energieagentur.nrw

© EnergieAgentur.NRW GmbH/EA519

Stand

03/2018

Ansprechpartner

EnergieAgentur.NRW
Kompetenzzentrum Systemtransformation
Energieinfrastruktur
Frank Schäfer
schaefer@energieagentur.nrw

Bildnachweis

Titel: Fotolia.com/Gina Sanders, Fotolia.com/
WestPic

Die EnergieAgentur.NRW GmbH verwendet in ihren Veröffentlichungen allein aus Gründen der Lesbarkeit die männliche Form von Substantiven; diese impliziert jedoch stets auch die weibliche Form. Eine Nutzung von Inhalten – auch in Teilen – bedarf der schriftlichen Zustimmung.



EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung

Ministerium für Wirtschaft, Innovation,
Digitalisierung und Energie
des Landes Nordrhein-Westfalen

