CLIMATE CHANGE
03/2019

Integration erneuerbarer Energien durch Sektorkopplung: Analyse zu technischen Sektorkopplungsoptionen

Kurzbericht

Für Mensch & Umwelt

Umwelt Bundesamt

CLIMATE CHANGE 03/2019

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl FZK 3714 41 107 2
UBA-FB 002739/KURZ

Integration erneuerbarer Energien durch Sektorkopplung: Analyse zu technischen Sektorkopplungsoptionen

Kurzbericht

von

Martin Wietschel et al.
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI , Karlsruhe

Im Unterauftrag:
DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher-Instituts für Technologie (KIT)

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:
Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

/umweltbundesamt.de
/umweltbundesamt

Durchführung der Studie:
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Str. 48
76139 Karlsruhe

Unterauftragnehmerin:
DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher-Instituts für Technologie (KIT)
Engler-Bunte-Institut 1-7
76131 Karlsruhe

Abschlussdatum:
September 2018

Redaktion:
Fachgebiet V 1.2 Energiestrategien und -szenarien
Dr.-Ing. Katja Purr

Fachgebiet V 1.5 Energieversorgung und –daten
Fabian Sandau

Publikationen als pdf:
http://www.umweltbundesamt.de/publikationen

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, März 2019

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung

Ziel der Studie ist es, die Potenziale wichtiger neuer Anwendungen für Strom zur Subsituierung fossiler Energieträger (sogenannte Sektorkopplungsoptionen (SKO)) für Deutschland bis 2050 zu identifizieren und den möglichen Beitrag dieser Anwendungen zu den energie- und klimapolitischen Zielen zu analysieren.

Für die untersuchten SKO lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen. Viele der SKO haben ein hohes Treibhausgas(THG)-Minderungspotenzial. Wichtig für den THG-Minderungsbeitrag der SKO ist, dass ausschließlich oder überwiegend erneuerbarer Strom zum Einsatz kommt. Eine relevante Anzahl der SKO weist zudem ein hohes Flexibilitätspotenzial auf und trägt zur Systemintegration von Erneuerbaren bei. Je stärker das Flexibilitätspotenzial der SKO genutzt wird, desto weniger bedarf es an Technologien, die ausschließlich zur Flexibilitätsbereitstellung eingesetzt werden wie z.B. Speicher. Einige der Sektorkopplungsoptionen können auch einen signifikanten Beitrag zur Energieeffizienzsteigerung leisten.

Bei der Wirtschaftlichkeit unter Einbezug der Umweltkosten schneiden insbesondere die untersuchten SKO im Verkehr, längerfristig auch in der Wärme gut ab. Viele der SKO in der Industrie stehen diesbezüglich jedoch vor großen Herausforderungen. Unter Wirtschaftlichkeits- und Umweltaspekten sollte möglichst der Strom direkt genutzt werden und auf die Umwandlung zu gasförmigen- oder flüssigen Brenn- und Kraftstoffen verzichtet werden. Dies ist allerdings nicht in allen Anwendungsbereichen möglich bzw. sinnvoll, beispielsweise im internationalen Flug- oder Schiffsverkehr. Wenn Strom umgewandelt wird, ist besonders auf die Stromherkunft zu achten sowie das vorhandene große Flexibilitätspotenzial dieser SKO zu nutzen. Die Elektrolyse sowie die Gewinnung von CO_2 aus Abscheidungsprozessen sind dabei die Schlüsseltechnologien für einen künftigen Markterfolg. Für den mittel- und langfristigen Markterfolg ist aufgrund der langen Vorlaufzeiten ein frühzeitiger Einstieg in die SKO bedeutsam.

Abstract

The aim of the study is to identify the potentials of important new applications where electricity can displace fossil fuels (Sector Coupling Options (SCO)) up to 2050 for Germany and to analyse the contribution these applications could make to achieving energy and climate policy targets.

The following conclusions can be drawn for the SCO examined. Many of the SCOs have a high potential to reduce greenhouse gases (GHG). For them to contribute significantly to GHG reduction, it is important that exclusively or predominantly renewable electricity is used. A relevant number of SCOs also have a high flexibility potential and can contribute to the system integration of renewables. The more the flexibility potential of the SCO is used, the less technology is needed that is used exclusively for flexibility provision such as energy storage, for example. Some sector coupling options can also make a significant contribution to increasing energy efficiency.

In terms of economic efficiency and taking environmental costs into account, the analysed SCOs performed particularly well in transport and, in the longer term, also in the heat sector. However, many of the SCO face major challenges in industry. From an economic and environmental point of view, electricity should be used directly wherever possible and not converted into gaseous or liquid fuels. However, this is not possible or sensible in every area of application, for example, international aviation or shipping. When electricity is converted, particular attention must be paid to the origin of the electricity and the existing high flexibility potential of this SCO must be exploited. Electrolysis and the recovery of CO_2 from separation and capture processes are key technologies for the future market success. For the medium- and long-term market success, it is important to get an early start on SCO due to the long lead times involved.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 7
1 Zielsetzung und Ausgangslage 9
2 Vorgehen 10
3 Ergebnisse 13
3.1 Verkehrssektor 13
3.2 Wärmesektor 16
3.3 Industriesektor 19
3.4 Generelle Schlussfolgerungen zu Sektorkopplungsoptionen 22
4 Quellenverzeichnis 26

1 Zielsetzung und Ausgangslage

Die Energiewende in Deutschland zielt auf eine signifikante Minderung der Treibhausgasemissionen ab. Um diese Minderungsziele erreichen zu können, müssen zunehmend fossile Energieträger durch erneuerbare Energien ersetzt werden. Ein derzeit vieldiskutierter Weg dabei ist, Strom aus erneuerbaren Quellen verstärkt in den Nachfragesektoren zur Substitution von fossilen Quellen einzusetzen. Bisher findet der direkte Einsatz von Strom in den Sektoren Verkehr, Wärme (Heizen und Warmwasser) und Industrie nur in wenigen Anwendungsfällen statt. Unter Berücksichtigung des steigenden Anteils erneuerbarer Stromerzeugung liegt in der Erschließung neuer Stromanwendungen, den sogenannten Sektorkopplungsoptionen (SKO), ein großes Treibhausgasreduktionpotential. Dies kann über den direkten Stromeinsatz geschehen oder über die Umwandlung von Strom in Gase, Flüssigkeiten oder Wärme/Kälte, die dann genutzt werden. Der hohe politische Stellenwert der Sektorkopplung in der heutigen energiepolitischen Diskussion spiegelt sich unter anderem im Klimaschutzplan 2050 (BMUB 2016) und in dem Grünbuch Energieeffizienz (BMWi 2016) wieder.

Der Begriff Sektorkopplung wird oft unterschiedlich verwendet. Im Rahmen der Studie wurde folgende Definition entwickelt[2], die im Weiteren zu Grunde gelegt wird:

Sektorkopplung bezeichnet die Substitution fossiler Energieträger durch weit überwiegend erneuerbar erzeugten Strom oder durch andere erneuerbare Energieträger und nachhaltige Energienutzungsformen in neuen sektorenübergreifenden Anwendungen oder durch verstärkte Nutzung bekannter sektorenübergreifender Anwendungen. Bei Strom geschieht dies zum einen durch eine direkte Stromnutzung, die auch eine strombasierte Wärme / Kälteerzeugung (Power-to-Heat) einschließt. Zum anderen über die Umwandlung von Strom in synthetischen Kraftstoffe (Power-to-Gas, Power-to-Liquid). Die indirekte Stromnutzung über Power-to-Liquid und Power-to-Gas bilden eine Teilmenge der Sektorkopplung. Synthetische Kraftstoffe können aber auch aus anderen (erneuerbaren) Quellen hergestellt werden.

Primäres Ziel der Sektorkopplung ist die Senkung der Treibhausgasemissionen durch Substitution fossiler Energieträger, weshalb bei den Energieträgern primär die Nutzung die Erneuerbaren notwendig ist. Sekundäre Ziele (Co-Benefits) können durch einen Beitrag zur Flexibilisierung und Energieeffizienzsteigerung entstehen.

In dieser Studie stehen die SKO, die auf der Basis von Strom beruhen, aufgrund ihres hohen technischen Potenzials im Fokus.

Ziel der Studie ist es, die Potenziale der wichtigsten SKO für Deutschland bis 2050 zu identifizieren und ihren möglichen Beitrag zu den energie- und klimapolitischen Zielen auf Basis von Zukunftsszenarien aus der Literatur zu analysieren.

An dieser Stelle wird darauf verwiesen, dass es sich hier um den Kurzbericht der Studie handelt. Ein umfassender Endbericht ist ebenfalls vorhanden (Wietschel et al. 2018). Dort sind alle Annahmen, Datengrundlagen, methodische Vorgehensweise sowie die detaillierten Ergebnisse ausführlich dokumentiert.

[2] Siehe zu einer Vorläuferdefinition Wietschel et al. 2015a sowie auch die detaillierten Ausführungen in Wietschel et al. 2018.

2 Vorgehen

Die Studie fokussiert sich auf SKO mit erwarteter hoher energie- und klimapolitscher Relevanz:

- Im Verkehrssektor werden für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge die Optionen Elektrofahrzeuge (EV; reine Batteriefahrzeuge/BEV und Plug-in-Hybride/PHEV), Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren und Methanol als Kraftstoff sowie Brennstoffzellen(BZ)-Fahrzeuge mit Wasserstoff analysiert.
- Für den Lkw-Sektor (schwerer Straßengüterverkehr) stehen Hybridoberleitungs-Lkw (entweder mit Batterien oder Verbrennungsmotoren als hybride Komponente), BZ-Lkw und Methanol-Lkw (mit Verbrennungsmotor) im Fokus der Studie.
- Im Wärmebereich werden insbesondere die Wärmepumpe für dezentrale Anwendungen, Anwendungen in Wärmenetzen und der Industrie detaillierter untersucht.
- Weiterhin werden in der Industrie SKO für die Glas-, Stahl-, Ammoniak- und Methanolherstellung sowie die Raffinerien und der Gastransport[3] betrachtet.

Es existieren allerdings auch andere Anwendungsbereiche, die in dieser Studie ausgeklammert wurden. Zu nennen sind hier z.B. der internationale Flugverkehr, der Seeschiffsverkehr, Wochen- oder saisonale Speicheranwendungen oder im nicht-elektrifizierten Teil des Schienenverkehrs oder bei Bussen.

Um die Wirtschaftlichkeit der in dieser Studie näher untersuchten Anwendungen sowie den energie- und klimapolitischen Beitrag der SKO erheben zu können, wird zur Bewertung jeder SKO vereinfachend eine konventionelle Referenztechnologie definiert, die derzeit bei den jeweiligen Anwendungen in den verschiedenen Sektoren dominiert (z.B. zur SKO Wärmepumpe eine Gasbrennwerttherme). Dementsprechend wird der heutige Technologiemix nicht abgebildet. Einhergehend mit dieser Vereinfachung ergeben sich gewisse Ungenauigkeiten bei den Quantifizierungen, die dennoch in ihrer Größenordnung als hinreichend genau eingeschätzt werden können. Die notwendigen Rahmendaten wie Energieträgerpreise oder Nachfrageentwicklungen basieren auf der Studie Klimaschutzszenario 2050 (Öko-Institut, Fraunhofer ISI 2015) und dabei auf den Szenarien "Aktuelle-Maßnahmen-Szenario" (AMS) und "Klimaschutzszenario 95" (KS95). Im AMS werden die bestehenden energie- und klimaschutzpolitischen Maßnahmen berücksichtigt. In diesem Szenario werden jedoch die energie- und klimaschutzpolitischen Ziele der Bundesregierung weitgehend verfehlt. Das Klimaschutzszenario 95 beschreibt hingegen ein Szenario, in welchem die festgelegten energie- und klimaschutzpolitischen Ziele für Treibhausgasemissionen, Energieeffizienz und erneuerbare Energien erreicht werden. Dabei wird für das Treibhausgasziel eine 95-prozentige Reduzierung bis 2050 (gegenüber 1990) angenommen. Das KS95 ist gegenüber dem AMS durch eine deutlich stärkere Dekarboniserung des Stromsektors, höhere Stromnachfrage sowie längerfristig durch höhere Strompreise geprägt. Bei den SKO wird immer vom Strommix ausgegangen, wobei das KS95 ein sehr stark erneuerbares System widerspiegelt, während mit Hilfe des AMS die SKO in einem Stromsystem mit auch im Jahr 2050 nach wie vor nennenswerten fossilen Anteilen bewertet wird.

Neben den beiden unterschiedlichen Rahmendaten aus dem AMS und dem KS95 werden weitere Sensitivitäten zur Wirtschaftlichkeit betrachtet, beispielsweise bezüglich der Herkunft des CO_2 für die Methan- oder Metanholherstellung aus Strom oder zur Entwicklung der konventionellen Energieträgerpreise.

---

[3] Zum Gastransport liegt ein separater Bericht vor, siehe Köppel et al. (2018). Er wird deshalb hier nicht weiter betrachtet.

Tabelle 1: Wichtige Rahmendaten für die beiden ausgewählten Szenarien AMS und KS95

	2012	AMS 2030	AMS 2050	KS95 2030	KS95 2050
Rohöl (Preisbasis 2010)	104 USD/b	128 USD/b	195 USD/b	128 USD/b	195 USD/b
Strom (Energy-Only-Markt) (2010=2015)	3,16 Cent/kWh	7,4 Cent/kWh	12,1 Cent/kWh	9,9 Cent/kWh	21,5 Cent/kWh
Primärenergieverbrauch	3.694 TWh	2.923 TWh	2.446 TWh	2.455 TWh	1.815 TWh
Anteil Erneuerbare am Primärenergieverbrauch	10,8 %	26,1 %	38,1 %	31,7 %	65,0 %
Endenergieverbauch	2.634 TWh	2.449 TWh	2.133 TWh	1.735 TWh	1.211 TWh
Nettostromerzeugung	591 TWh	554 TWh	588 TWh	468 TWh	764 TWh
Anteil Erneuerbarer an Nettostromerzeugung	23,7 %	51,3 %	67,5 %	69,0 %	96,1 %

Quelle: Öko-Institut, Fraunhofer ISI 2015

In einem ersten Berechnungsschritt werden auf Basis des technischen Potenzials der einzelnen Sektorkopplungsoptionen, d.h. alle ausgewählten technisch machbaren Lösungen ohne Berücksichtigung der Kostenwirkung, die potenziellen Treibhausgasminderungs- und Energieeinspareffekte ermittelt.

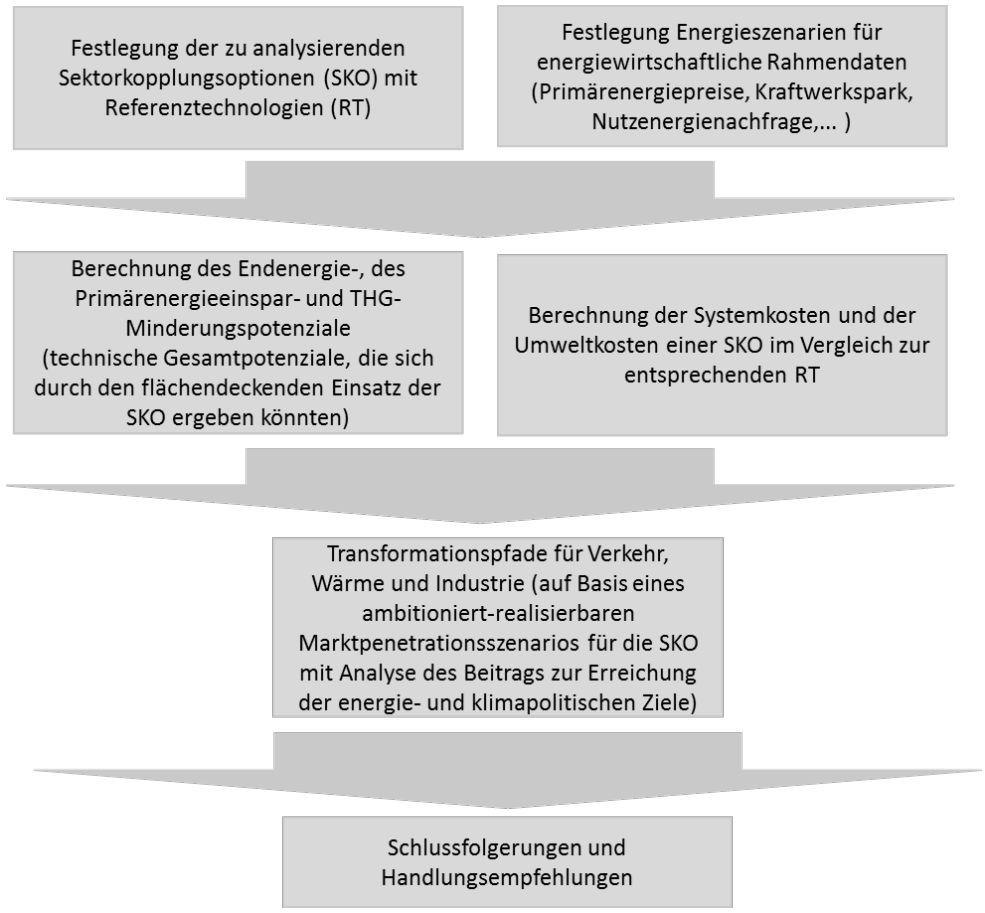
Anschließend wird die Wirtschaftlichkeit der einzelnen SKO bewertet, indem sie einer Referenztechnologie gegenübergestellt wird. Diese wird auf Basis der sogenannten Systemkosten analysiert, die ohne Steuern und Abgaben berechnet werden. Dabei erfolgt die Ableitung der Systemkosten anhand der über das Szenario festgelegten Strom- und Brennstoffkosten sowie den entsprechenden Investitionen, wobei immer die SKO mit der entsprechenden Referenztechnologie verglichen wird. Weiterhin werden die Umweltkosten quantifiziert. Diese monetarisieren hier die externen Kosten der emittierte Klimagase und Luftschadstoffe.

Auf der Basis der Ergebnisse wird dann für diejenigen SKO, die aus wirtschaftlichen sowie energie- und klimapolitischen Abwägungen am erfolgversprechendsten sind, jeweils ein möglicher Transformationspfad ausgearbeitet. Für diesen wird ein ambitioniertes, aber noch als realisierbar eingestuftes Szenario der Marktdiffusion entwickelt (ein sogenanntes optimistisch-realisierbares Szenario). Die möglichen Auswirkungen dieser Szenarien auf die THG-Minderungen und Energieeinsparungen sowie die potenziellen Beiträge zu den energie- und klimapolitischen Auswirkungen dieser Marktdurchdringung werden ebenfalls quantifiziert. Zu erwähnen ist, dass die gesamten Potenziale der SKO auf der Basis eigener Analysen ausgewiesen werden. Diese unterscheiden sich von den Marktdurchdringungsszenarien des AMS und KS95[4], um die Effekte der SKO einzeln und detaillierter analysieren zu können.

Im Fokus der Studie steht somit die Frage, welche SKO unter den gegeben Szenarioannahmen aus energie- und klimapolitisch einen hohen positiven Effekt haben. Sie richtet sich primär an politische Entscheidungsträger.

[4] Dort werden gerade auch im KS95 eigene Szenarien zur Marktdurchdringung von SKO ausgewiesen. Methodisch bedingt kann der Beitrag der einzelnen SKO zur Energieeffizienz und THG-Emissionen dort nicht ausgewiesen werden.

Abbildung 1: Übersicht zur Vorgehensweise



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer ISI

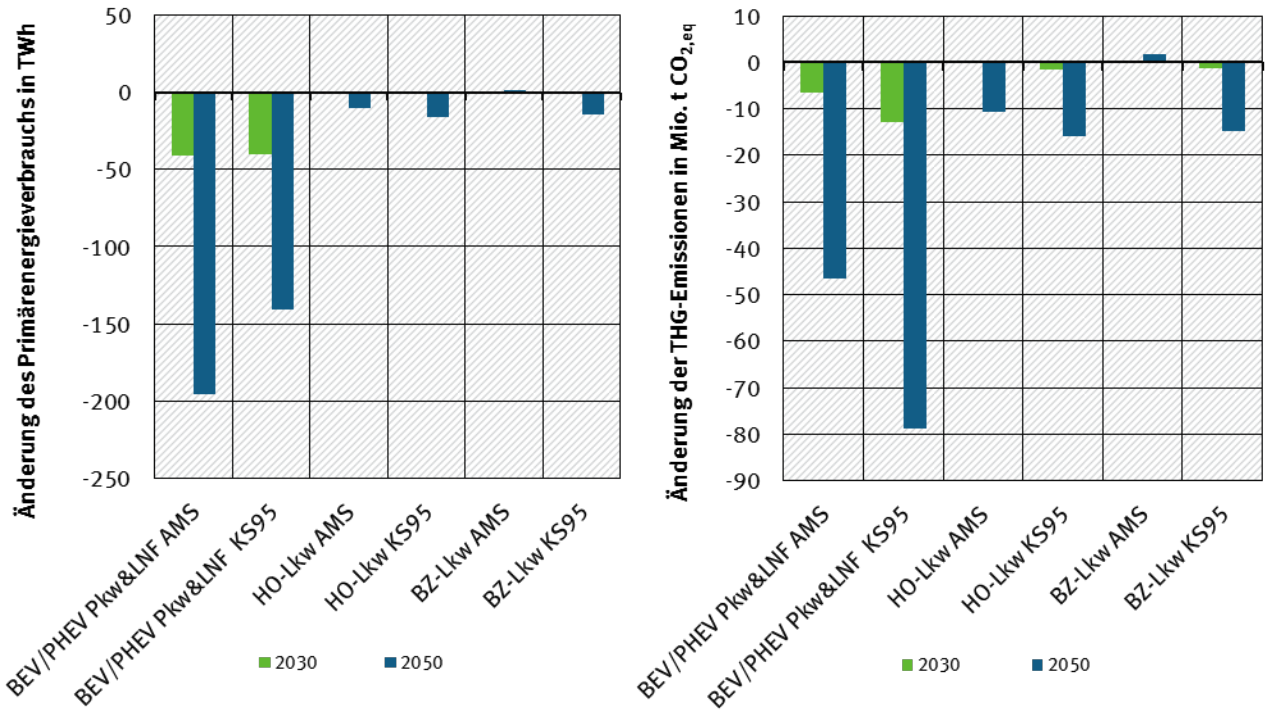
3 Ergebnisse

3.1 Verkehrssektor

Energie- und Treibhausgaseinsparungen

Im Verkehrssektor ergeben sich aus der Betrachtung[5] der rein technischen Potenziale hohe Einsparpotenziale an Primärenergie sowie an THG-Emissionen (siehe Abbildung 2). Die höchsten Potenziale liegen bei Pkws und leichten Nutzfahrzeugen (LNF) durch Ersatz der konventionellen Fahrzeuge durch BEV und PHEV. Danach folgt der schwere Straßengüterverkehr auf der Basis von Hybrid-Oberleitungslösungen. Die höheren Potenziale bei Pkw gegenüber Lkw resultieren vor allem aus dem insgesamt höheren Endenergieverbrauch der Pkw aber auch aus den höheren Effizienzgewinnen. Bei BEV steigt der Wirkungsgrad im Verhältnis zu einem konventionellen Pkw um den Faktor 3, bei schweren Lkws von Hybrid-Oberleitungs-Lkws im elektrischen Fahrmodus gegenüber einem Diesel-Lkw um den Faktor 2. Der Brennstoffzellen-Lkw (BZ-Lkw) schneidet nicht so gut ab, weil der Wirkungsgrad des Lkw nicht so hoch liegt wie der von Hybrid-Oberleitungs-Lkw (HO-Lkw) und auch in der Herstellung von H_2 Wirkungsgradverluste auftreten. Für die nicht in der Abbildung 2 dargestellten BZ-Pkw sowie Methanol-Pkw lässt sich ähnliches schlussfolgern, wobei der BZ-Pkw noch deutlich besser abschneidet wie der Methanol-Pkw (siehe zu den Detailauswertungen Wietschel et al. 2018).

Abbildung 2: Änderung des Primärenergieverbrauchs und der THG-Emissionen von ausgewählten SKO für ein optimistisch-realisierbares Szenario



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer ISI

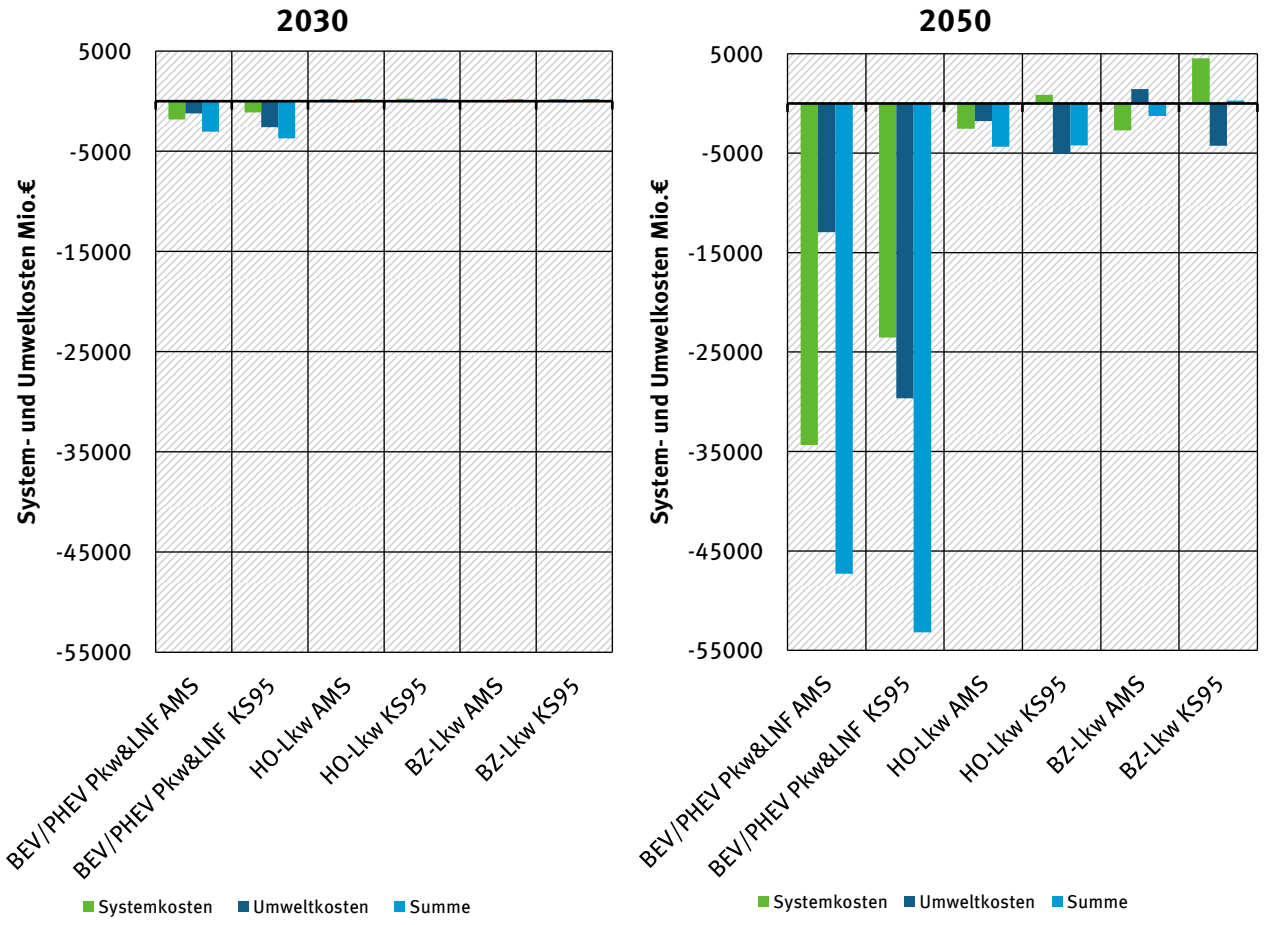
[5] Es wurde nicht alle Verkehrsträger untersucht.

Die niedrigeren Primärenergieeinsparpotenziale unter den Rahmenbedingungen des KS95 ergeben sich im Wesentlichen dadurch, dass dort bereits eine stärkere Verbesserung der Energieeffizienz bei den konventionellen Fahrzeugen, der Referenztechnologie, unterstellt wird. Weiterhin ist die Verkehrsnachfrage im KS95 niedriger als im AMS. Die höheren THG-Einsparpotenziale im KS95 lassen sich damit erklären, dass unterstellt wird, dass bei der Stromerzeugung deutlich weniger THG-Emissionen auftreten, was die beiden zuvor genannten Aspekte überkompensiert.

System- und Umweltkosten

Unter den getroffenen Annahmen bietet die Elektromobilität bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen trotz hoher Strompreise bereits 2030 deutliche Einsparungen sowohl in den Systemkosten wie auch bei den vermiedenen Umweltkosten (hauptsächlich THG-Emissionen), siehe Abbildung 3. Bis 2050 steigert sich der Effekt deutlich. In der Summe sind die Einsparungen im KS95 im Vergleich zum AMS höher. Die höheren Strompreise des KS95 gegenüber dem AMS, die die Systemkosten negativ beeinflussen, werden durch die höheren Einsparungen bei den Umweltkosten überkompensiert.

Abbildung 3: Summe der System- und Umweltkostenänderung von ausgewählten SKO im Vergleich zur Referenztechnik im Jahre 2030 (links) und 2050 (rechts) für ein optimistisch-realisierbares Szenario (negative Werte bedeuten Einsparungen)



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer ISI

Transformationspfad

Im Pkw- und leichten Nutzfahrzeugbereich hat sich im Rahmen des Vorgehens der Studie und unter den getroffenen Annahmen herausgestellt, dass die Elektromobilität die sinn-vollste der untersuchten SKO ist. Aufgrund der aufgezeigten Einsparpotenziale an THG-Emissionen sowie dem Beitrag zur Verringerung des Endenergieverbrauchs im Verkehrssektor kann sie entscheidend zur Erreichung der im Verkehrssektor gesteckten politischen Einsparziele beitragen. Weiterhin ist sie durch hohe Potenziale zur Lastverlagerung gerade im kurzfristigen Bereich gekennzeichnet. Zusätzlich befindet sie sich bereits in einigen Anwendungsfällen nahe der Wirtschaftlichkeit und wird, falls sich die Rahmenbedingungen entsprechend entwickeln, kurzfristig selbstragend in den Markt diffundieren. Neben einer kurzfristigen Förderung des Markteintritts sollten mittelfristig seitens der Politik insbesondere die Rahmenbedingungen so gesetzt werden, dass die hohen Flexibilitätspotenziale der Elektromobilität auch genutzt werden können.

Im schweren Straßengüterverkehr, der derzeit aufgrund der Zunahme der THG-Emissionen immer stärker in das Zentrum der politischen Diskussion rückt, haben die Hybrid-Oberleitungs-Lkw mittel- und insbesondere langfristig viele Vorteile. Sie stehen aber noch vor gewissen Herausforderungen, beispielsweise bezüglich des Infrastrukturaufbaus und der Akzeptanz auf verschiedenen Ebenen. Die derzeit laufenden Pilotprojekte mit aktuell noch geplanten bzw. in Aufbau befindlichen Strecken auf öffentlichen Straßen in Deutschland können helfen, wichtige offene Fragen weiter zu untersuchen.

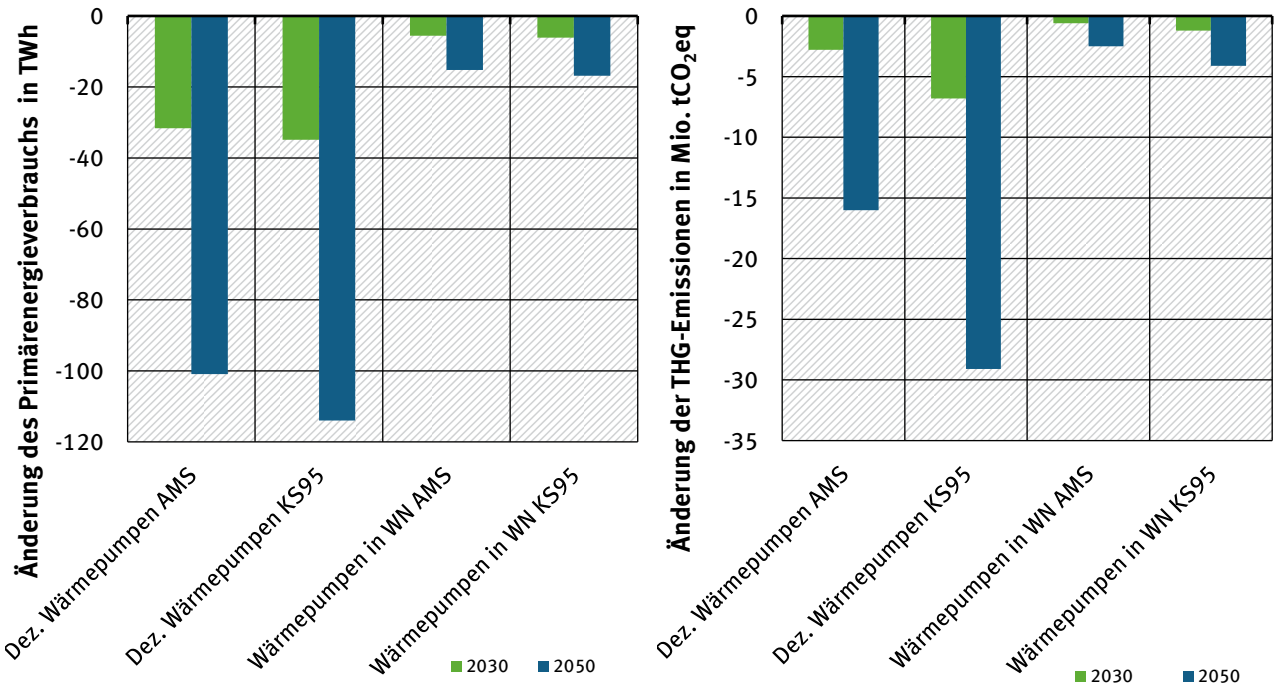
BZ-Lkw könnten zu den HO-Lkw aus wirtschaftlichen Überlegungen heraus eine interessante Alternative sein. Sie bieten weiterhin wichtige Flexibilitätspotenziale, die bei den HO-Lkw nicht gegeben sind. Bei den BZ-Lkw sind aber u. a. bei der Fahrzeugentwicklung sowie dem Aufbau der Versorgungsinfrastruktur noch technische Entwicklungsarbeiten zu leisten. Wichtig erscheint auch, dass hier bald erste Pilotprojekte hier starten.

3.2 Wärmesektor

Energie- und Treibhausgaseinsparungen

Im Wärmesektor ergeben sich aus der Betrachtung[6] eines optimistisch-realisierbaren Szenarios besonders im Jahr 2050 hohe Einsparpotenziale an Primärenergie sowie an THG-Emissionen (siehe Abbildung 4). Bei höheren Anteilen erneuerbarer Energien, wie unter den Rahmenbedingungen des KS95, ergeben sich höhere Primärenergieeinsparpotenziale und damit höhere THG-Minderungseffekte. Die höchsten Potenziale haben dezentrale Wärmepumpen bei hohen Anteilen erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung. Großwärmepumpen in Wärmenetzen haben geringere Potentiale, da die ersetzbaren Wärmemengen begrenzt sind. Die spezifischen Effizienzgewinne von dezentralen Wärmepumpen und Großwärmepumpen liegen in einer vergleichbaren Größenordnung.

Abbildung 4: Änderung des Primärenergieverbrauchs und der THG-Emissionen von ausgewählten SKO für ein optimistisch-realisierbares Szenario (WN – Wärmenetze)



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer ISI

System- und Umweltkosten

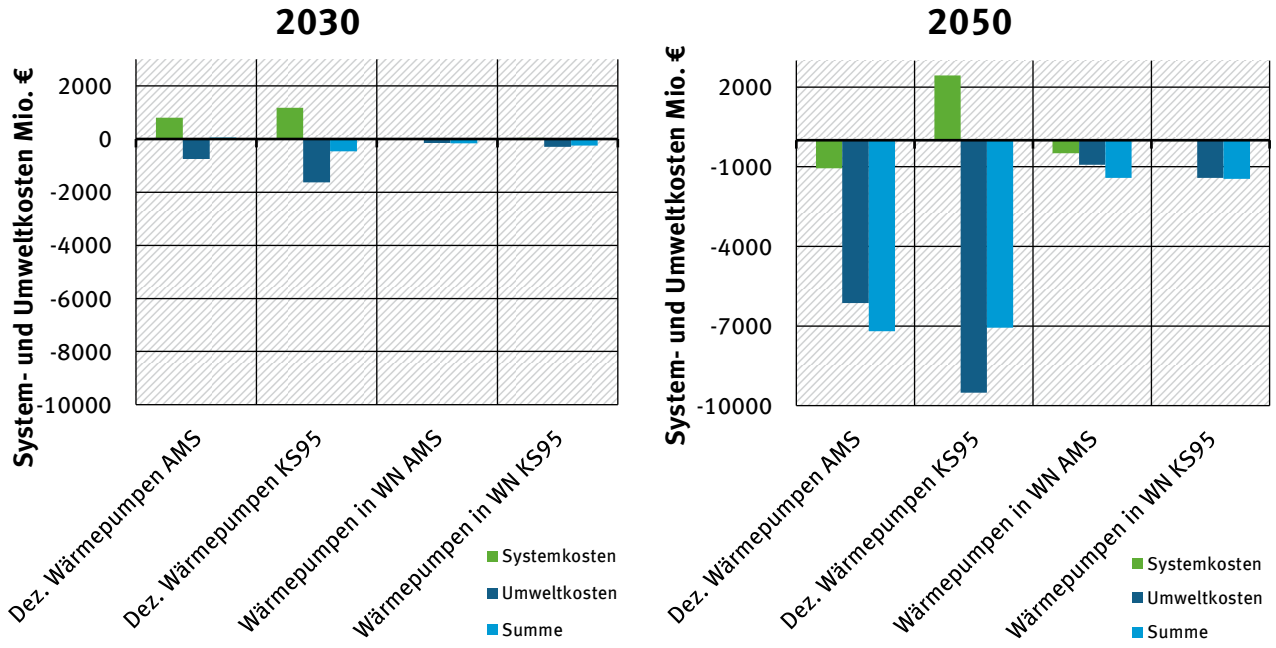
Der Beitrag der Wärmepumpen zur Primärenergieeinsparung und zur THG-Minderung kann unter den getroffenen Annahmen mit Kosteneinsparungen einhergehen (siehe Abbildung 5). Die Umweltkosten der Wärmepumpe liegen sowohl bei der dezentralen Anwendung als auch in Wärmenetzen im Jahr 2030 und 2050 unter den Umweltkosten der Referenztechnologie einer gasbasierten Feuerung. Im Jahr 2030 überschreiten die Systemkosten der Wärmepumpe aufgrund der höheren Investitionen

[6] Es wurden nicht alle Anwendungsbereiche zur Wärmeversorgung untersucht.

die Kosten eines Gasbrennwertkessels[7]. Mit höheren CO_2-Preisen und Kostensenkungen der Wärmepumpen bis zum Jahr 2050 ergeben sich auch bei den Systemkosten Einsparungen. Die höheren Strompreise im KS95 führen im Jahr 2050 zu höheren Systemkosten der dezentralen Wärmepumpe gegenüber der Referenztechnologie, diese liegen allerdings deutlich unter den eingesparten Umweltkosten.

Im Wärmesektor ist die Summe aus System- und Umweltkosten in den meisten Fällen positiv. Deshalb fallen hier keine spezifischen THG-Vermeidungskosten an, sondern es wird ein wirtschaftliches Plus erzielt. So ergeben sich beispielsweise im KS95 für das Jahr 2050 bei den dezentralen Wärmepumpen Einsparungen in Höhe von 243 € pro eingesparter Tonne $CO_{2,eq}$, bei Wärmepumpen in Wärmenetzen gar in Höhe von 353 € pro eingesparter Tonne $CO_{2,eq}$. Durch das deutlich geringere Potenzial der Wärmepumpen in Wärmenetzen ergeben sich jedoch geringere Gesamteinsparugen als bei den dezentralen Wärmepumpen.

Abbildung 5: Summe der System- und Umweltkostenänderung von ausgewählten SKO im Vergleich zur Referenztechnik im Jahre 2030 (links) und 2050 (rechts) für ein optimistisch-realisierbares Szenario (negative Werte bedeuten Einsparungen)



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer ISI

Transformationspfad

Die dezentrale Nutzung der Wärmepumpe in Gebäuden ist im Bereich des Neubaus bereits im Massenmarkt angekommen. Im Bereich der Bestandsgebäude befindet sich die Wärmepumpe allerdings noch in der Phase des Markthochlaufs. Besonders bei den Bestandsgebäuden ist der Markthochlauf auf günstige politische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen angewiesen und ist wesentlich von der Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu konkurrierenden Heizungssystemen abhängig. Insbesondere

[7] Die Rentabilität von Wärmepumpen variieren stark zwischen verschiedenen Anwedungsfällen. Bei effizienter Auslegung sind in gut gedämmten Gebäuden auch schon deutlich früher Kosteneinsparungen möglich.

hohe Strompreise und gleichzeitig niedrige Heizölpreise sind für den Markthochlauf hinderlich. Im Neubau sind die EnEV-Vorgaben eine wichtige Stütze für hohe Marktanteile von Wärmepumpen. Im Bereich der Forschung und Entwicklung ist kurzfristig die Analyse der Auswirkungen eines verstärkten Ausbaus der Wärmepumpen und anderer SKO auf das Energiesystem von Bedeutung. Kurz- und mittelfristig ist auch die Hebung des Lastmanangementpotenzials der Wärmepumpen notwendig, um negative Auswirkungen auf die Netze und das Stromsystem entgegenzuwirken. Besondere Bedeutung hat dabei die gleichzeitige Optimierung des Umlagen- und Abgabensystems, damit Preissignale des Strommarktes beim Wärmepumpenbetreiber ankommen. Technologische Entwicklungen können mit Effizienzsteigerungen, weiteren Standardisierungen und Systemlösungen zu Kostensenkungen führen. Die Weiterentwicklung von Politik und Regulierung ist besonders für die Nutzung von Wärmepumpen im Gebäudebestand von Bedeutung. Mögliche Ansatzpunkte sind hierbei ein Abbau der staatlichen Förderung für fossile Heizungen und eine klimagerechte Besteuerung der Energieträger. Beides führt zu Kostenvorteilen der Wärmepumpen gegenüber fossilen Konkurrenztechnologien. Auch die Investitionsförderungen könnten zu einem kontinuierlichen Förderrahmen ausgebaut werden. Für die Nutzung von Wärmepumpen im Neubau bieten sich eine Fortschreibung von EEWärmeG/EnEV mit kontinuierlicher Verschärfung der Anforderungen an.

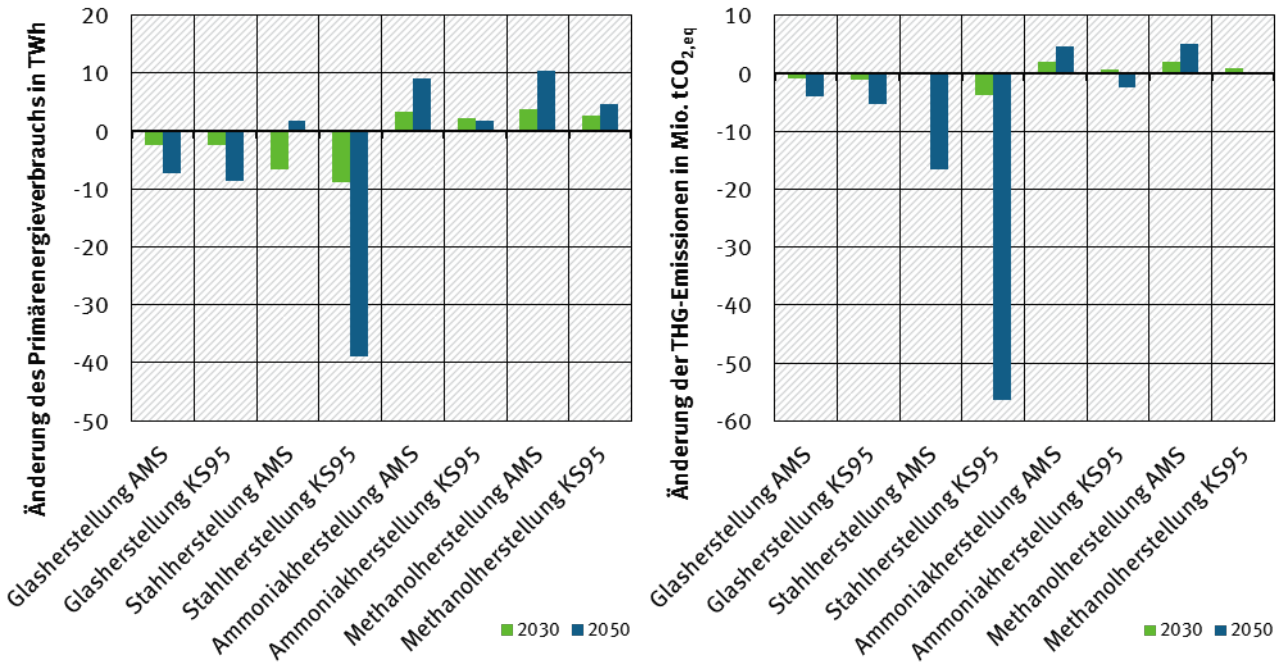
Großwärmepumpen sind in Deutschland noch in der Marktvorbereitung und spielen lediglich in Pilot- und Demonstrationsvorhaben in einzelnen Wärmenetzen eine Rolle. Mittelfristig können sich Großwärmepumpen stärker durchsetzen und eine Nische bei der Wärmeerzeugung in Wärmenetzen besetzen. Voraussetzung dafür ist die Anpassung der Infrastruktur der Wärmenetze, die weitere technologische Entwicklung und insbesondere langfristig eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit gegenüber Konkurrenztechnologien. Wie auch bei dezentralen Wärmepumpen ist der flexible Einsatz der Großwärmepumpen eine wichtige Voraussetzung für den klimafreundlichen Betrieb. Langfristig können Großwärmepumpen nahezu flächendeckend in geeigneten Wärmenetzen eingesetzt werden. Im Rahmen von Politik und Regulierung ist kurzfristig insbesondere die Förderung von einzelnen Projekten wichtig, wobei die Kommunikation der Erfahrungen in der Branche die Nachhaltigkeit der Erkenntnisse sichert. Weiterhin ist mittelfristig eine weitere Evaluierung Kosten- und Anreizstrukturen sowie eventuell eine Anpassung der Anreizstrukturen notwendig.

3.3 Industriesektor

Energie- und Treibhausgaseinsparungen

Im Industriesektor ergeben sich beim optimistischen Szenario für die ausgewählten SKO im Vergleich zur Referenztechnik hohe THG-Minderungspotentiale, die jedoch nicht immer einhergehen mit hohen Primärenergieeinsparungen (Abbildung 6).

Abbildung 6: Änderung des Primärenergieverbrauchs und der THG-Emissionen von ausgewählten SKO für ein optimistisch-realisierbares Szenario



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer ISI

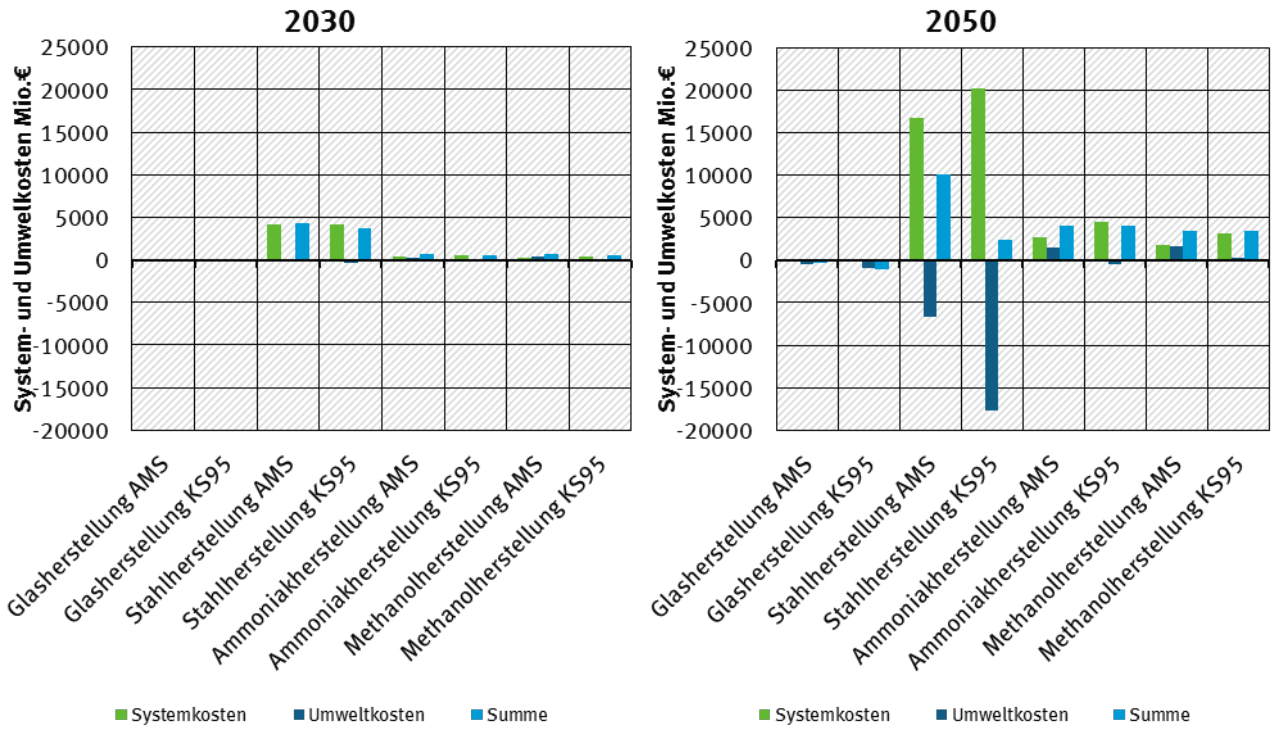
So können nur die Glasherstellung und langfristig die Stahlherstellung Primärenergieeinsparungen erzielen. Die Stahlherstellung besitzt dabei die höchsten Potentiale. Bei der Ammoniak- und Methanolherstellung kommt es zu einem Mehrverbrauch an Primärenergie, was auf die etwas ineffizientere Umwandlungskette für die stoffliche Bereitstellung von Wasserstoff zurückzuführen ist. Die Unterschiede zwischen AMS und KS95 basieren auf den Unterschieden beim Primärenergieverbrauch bei der Stromerzeugung. Für die THG-Minderungspotentiale zeigt sich, dass die Stahlherstellung das mit Abstand größte Potential besitzt. Die Glasherstellung und die Ammoniakherstellung besitzen langfristig ein deutlich niedrigeres Potential. Durch die direkte stoffliche Nutzung von CO_2 bei der Methanolherstellung ist ein Minderungspotential hier kaum vorhanden. Unterschiede zwischen AMS und KS95 sind bei den THG-Minderungspotentialen hauptsächlich auf den unterschiedlichen Strommix- zurückzuführen.

System- und Umweltkosten

Unter den getroffenen Annahmen, die teilweise großen Unsicherheiten unterliegen, haben es SKO aus Kostengesichtspunkten schwer (Abbildung 7). Einzig bei der Glasherstellung befindet sich sowohl die Systemkosten als auch Umweltkosten auf einem ähnlichen bzw. leicht niedrigerem Niveau

wie bei der Referenztechnik. Für die anderen betrachteten SKO führen insbesondere die hohen Systemkosten zu einem Anstieg der Gesamtkosten. Die Stahlherstellung, welche die mit Abstand höchsten Kosten besitzt, kann über die Zeit von deutlichen Einsparungen durch die Umweltkosten profitieren, welche wiederum jedoch nicht die gesamten höheren Systemkosten kompensieren können.

Abbildung 7: Summe der System- und Umweltkostenänderung von ausgewählten SKO im Vergleich zur Referenztechnik im Jahre 2030 (links) und 2050 (rechts) für ein optimistisch-realisierbares Szenario (negative Werte bedeuten Einsparungen)



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer ISI

Die System- und Umweltkosten für die Ammoniak- und Methanolherstellung sind ähnlich, aber deutlich niedriger als für die Stahlherstellung. Im KS95 führen deutlich steigende Strompreise, die auch stärker ansteigen als die Kosten für fossile Energieträger, zu höheren Systemkosten. Steigende Effizienzverbesserungen in der Wasserstoffbereitstellung können dies jedoch zum Teil kompensieren. Durch Verbesserungen im Strommix hinsichtlich der THG-Emissionen können zudem Umweltkosten im KS95 teilweise deutlich eingespart werden.

Die spezifischen Kosten pro vemiedener Tonne $CO_{2,eq}$ sind besonders niedrig bei der Glasherstellung, die jedoch nur ein begrenztes absolutes THG-Minderungspotential besitzt. Die spezifischen Kosten können bis zu Einsparungen von ca. 200 € pro eingesparter Tonne $CO_{2,eq}$ im KS95 in 2050 betragen. Ansonsten sind in 2030 nur im KS95 Emissionsminderungen mit ca. 1.000 €/t $CO_{2,eq}$ bei der Stahlherstellung zu erzielen, dessen THG-Minderungspotential von den betrachteten SKO in der Industrie aber mit Abstand am größten ist. In 2050 fallen diese auf ca. 40 €/t $CO_{2,eq}$. Für die Ammoniak- und Methanolherstellung betragen die spezifischen Kosten ca. 1.600 €/t $CO_{2,eq}$ bzw. 10.400 €/t $CO_{2,eq}$ unter den getroffenen Annahmen in 2050.

Transformationspfad

Bedingt durch die teilweisen erheblichen Mehrkosten beim Einsatz der SKO im Vergleich zur Referenztechnik ist eine starke Diffusion der SKO in den Markt unter aktuellen regulatorischen Rahmenbedingungen und den getroffenen Annahmen kaum möglich. Insbesondere die Entwicklung eines stärkeren Strompreisanstieges im Vergleich zum Preisanstieg fossiler Energieträger hemmt den Markteintritt auch unter Berücksichtigung von steigenden CO_2-Zertifikatskosten. Eine Schlüsseltechnologie für die Marktdiffusion in der Industrie ist die Elektrolyse zur Bereitstellung regenerativen Wasserstoffs. Eine gegebene Wirtschaftlichkeit im Vergleich zur Dampfreformation kann den Markthochlauf deutlich beschleunigen und ist für einen verbreiteten Einsatz der SKO erforderlich. Zur Erreichung von klimapolitischen Zielsetzungen gilt es in der Industrie bei Neuinvestitionen inbesondere auch die langen Nutzungszeiträume der Anlagen zu berücksichtigen, um Fehlinvestitionen oder ausbleibende Investitionen zu vermeiden.

Unter den betrachtenden SKO ist insbesondere die Glasherstellung nahe an der Wirtschaftlichkeit. Kurz- und mittelfristig ist daher zu erwarten, dass zunehmend elektrische Schmelzöfen zum Einsatz kommen. Für einzelne Produkte, wie Flachglas, müssen jedoch noch technische Weiterentwicklungen vorangetrieben werden, um eine direktelektrische Herstellung zu ermöglichen. Für die Stahlherstellung ist eine Verfahrensumstellung erforderlich, bei der die erforderliche Technik am Weltmarkt verfügbar ist, bisher aber aus wirtschaftlichen Gründen in Europa kaum zum Einsatz kommt. Hier scheint es hilfreich, dass mittelfristig erdgasbetriebene DRI-Anlagen eingesetzt werden und langfristig zudem das Erdgas durch regenerativ bereitgestellten Wasserstoff substituiert wird. Bei der Ammoniak- und Methanolherstellung sollte die Wasserstoffbereitstellung mittel- bis langfristig mittels Elektrolyseuren vorgenommen werden. Für die Methanolherstellung kann es langfristig, wie für andere kohlenstoffbasierte Energieträger, zusätzlich erforderlich sein CO_2 direkt aus der Luft zu gewinnen.

3.4 Generelle Schlussfolgerungen zu Sektorkopplungsoptionen

Für die untersuchten SKO und unter den getroffenen Rahmenbedingungen sowie festgelegten techno-ökonomischen Parametern zu den Techniken lassen sich folgende allgemeinere Schlussfolgerungen ziehen:

Viele SKO haben ein hohes Treibhausgasminderungspotenzial.

Mit den untersuchten SKO kann perspektivisch in allen Anwendungsbereichen die Erfüllung klimapolitischer Ziele durch die Substitution von fossilen durch erneuerbare Energieträger wesentlich vorangetrieben werden. So könnten unter optimistischen, aber als noch realisierbar eingestuften Markpenetrationsszenarien bezüglich der untersuchten SKO im Jahre 2030 ca. 33 Mio. t an Treibhausgasen und in 2050 sogar 197 Mio. t in Deutschland im KS95 in der Summe eingespart werden. Dabei sind die zusätzlich möglichen Minderungen durch Lastverlagerung sowie einer weiteren Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien in der Stromversorgung noch nicht berücksichtigt. Dies ist ein erheblicher Beitrag zur politisch gesetzten Zielsetzung der THG-Minderung um 1.000 bis 1.290 Mio. t CO_{2eq} in 2050. Zu beachten ist, dass in dieser Studie zwar viele wichtige SKO betrachtet werden, aber nicht alle Optionen und ebenfalls nicht alle Anwendungsbereiche.

Wichtig für den THG-Minderungsbeitrag der SKO ist, dass ausschließlich oder überwiegend Strom aus erneuerbaren Energien zum Einsatz kommt.

Im Vergleich der beiden Szenarien AMS und KS95 zeigt sich, dass in einem Stromsystem, in welchem der Strom, überwiegend aus erneuerbaren Quellen stammt, die THG-Einsparungen natürlich deutlich größer sind. In 2030 sind es in der Summe über alle betrachteten SKO im AMS "nur" 20 statt 33 Mio. t CO_{2eq} im KS95 und in 2050 "nur" 148 Mio. t. CO_{2eq} statt 197 Mio. t. CO_{2eq}. Für effektive Klimaschutzmaßnahmen in den Anwendungsbereichen ist folglich eine Hand-in-Hand Umstrukturierung der Energieversorgung hin zu erneuerbaren Quellen erforderlich.

Eine relevante Anzahl der SKO weisen zudem ein hohes Flexibilitätspotenzial auf und tragen zur Systemintegration von erneuerbaren Energien bei.

Es ist auch zu beachten, dass viele der SKO mit hohem technischem Minderungspotenzial auch flexibel gesteuert werden können. Da dies üblicherweise nach wirtschaftlichen Kriterien geschieht und eine positive Korrelation zwischen niedrigen Strompreisen und hohen Anteilen an erneuerbaren Energien existiert, trägt die Lastflexibilisierung deutlich zur guten Umweltbilanz von SKO bei. Die SKO nutzen dann verstärkt Strom in günstigen Stunden mit hoher EE-Einspeisung. Berücksichtigt man diesen Effekt, steigen die THG-Minderung durch Elektromobilität bei Pkw und LNF im KS95 um nochmals bis zu 10 Mio. t CO_2eq in 2050 an. Die THG-Minderung im KS95 steigen dann durch Elektromobilität bei Pkw und LNF um nochmals bis zu 10 Mio. t CO_2eq in 2050 an. Für dezentrale Wärmepumpen kann der zusätzliche Beitrag in 2050 bei bis zu ca. 3 Mio. t CO_2eq liegen. Im Vergleich zu anderen Flexibilitätsmaßnahmen, beispielsweise dem Lastverlagerungspotenzial von Nachtspeicherheizungen, weißer Ware oder industriellen Optionen wie in der Chlorindustrie, ist das Flexibilitätspotenzial der Elektromobilität, aber auch der Wärmepumpe, als sehr hoch einzustufen. Dies verringert den Bedarf an Back-up-Kapazitäten im Kraftwerkssektor.

Wenn man den PtG/PtL-Pfad verfolgt bietet es sich an, die Wasserstofferzeugung über die Elektrolyse mit einer Speicherung zu verbinden. Der Vorteil der Zwischenspeicherung ist, dass damit die Elektrolyse flexibler an das Stromangebot angepasst werden kann. Es lassen sich somit Speicherkapazitäten in Salzkavernen sehr kostengünstig erschließen, die weit über die heutigen Speicherkapazitäten der

Pumpspeicher in Deutschland hinausgehen. SKO helfen somit auch, fluktuierende erneuerbare Energien besser in das Stromsystem zu integrieren, weil die Abregelung in Zeiten mit Stromüberschüssen reduziert wird und damit die Systemkosten insgesamt gesenkt werden können.

Deshalb sollten die politischen Rahmenbedingungen so gesetzt werden, dass die bestehenden Potenziale zur Lastflexibilisierung bei direkter Stromnutzung oder über PtG/PtL bei den SKO genutzt werden.

Viele der Sektorkopplungsoptionen tragen auch zur Erhöhung der Energieeffizienz bei.

Neben der Substitution fossiler Energieträger durch erneuerbaren Strom liegt ein Beitrag zur THG-Minderung und Einsparungen an fossilen Energieträgern auch darin begründet, dass einige der SKO einen deutlichen Beitrag zur Erhöhung der Energieeffizienz beitragen können (z.B. die Elektromobilität oder Elektrostahlerzeugung).

Rechnet man die Primärenergieeinsparungen aller betrachteten Optionen zusammen, so kommt man im AMS (bzw. KS95) im Jahre 2030 auf 80 TWh (89 TWh) und im Jahr 2050 auf 310 TWH (329 TWH).

Kurz- und mittelfristig sind aus klimapolitischen Gründen insbesondere SKO im Verkehrs- und Wärmesektor relevant.

Die SKO haben im Vergleich untereinander ein sehr unterschiedliches THG-Potenzial. Ein kurz- und mittelfristig besonders hohes THG-Minderungspotenzial haben dabei die Elektromobilität, die Wärmepumpe und die Glasherstellung. Längerfristig könnten auch der Hybrid-Oberleitungs-Lkw oder BZ-Lkw eine bedeutende Rolle spielen. Auch in der Industrie gibt es längerfristig insbesondere bei der Stahlherstellung relevante erschließbare hohe Potenziale.

Bei der Wirtschaftlichkeit unter Einbezug der Umweltkosten schneiden insbesondere einige der untersuchten SKO im Verkehr und in der Wärme gut ab. Viele der SKO in der Industrie stehen bezüglich de Wirtschaftlichkeit jedoch vor großen Herausforderungen.

Die wirtschaftlichen Auswertungen zeigen, dass insbesondere im Verkehr die untersuchten SKO sowohl aus System- als auch aus Umweltkostensicht interessant sind. Mittel- und insbesondere langfristig sind auch für die untersuchten SKO im Wärmebereich wirtschaftlich. In der Industrie sind bis auf die Maßnahmen in der Glasindustrie keine Kosteneinsparungen zu verzeichnen. Anzumerken ist aber für die Industrie, dass nur eine schwache Datengrundlage vorhanden ist und es größere betriebsspezifische Unterschieden gibt, was dazu führt, dass die Auswertungen einer größeren Unsicherheit unterliegen. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Die Umweltkosten werden in vielen Fällen stark durch die THG-Emissionen beeinflusst und deshalb spiegeln sich die THG-Minderungspotenziale in den Umweltkosten wider. Die Umweltkosten sind aber stark vom unterstellten Stromsystem abhängig, hohe Einsparungen ergeben sich nur mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien im Strommix. Umgekehrt verhält es sich bei der Wirtschaftlichkeit, wo sich unter den Annahmen des AMS eine bessere Wirtschaftlichkeit der SKO bezüglich der Systemkosten ergibt als im KS95, weil die Stromgestehungskosten im KS95 in 2030 und insbesondere in 2050 deutlich höher sind im Vergleich zu den Brennstoffkosten der Referenztechnologien. Die Analyse der Summe der System- und Umweltkosten führt zur folgenden weiteren relevanten Empfehlung:

Der Strom sollte möglichst direkt genutzt werden und auf die Umwandlung zu PtG und PtL sollte möglichst verzichtet werden.

Dort wo es technisch möglich ist, ist es meist sinnvoll, direkten Stromnutzung einzusetzen und auf die Umwandlung zu PtG oder PtL zu verzichten. Die Gründe hierfür sind vielschichtig. Zu nennen

sind hier die hohen Umwandlungsverluste in der Herstellung von synthetischen Kraftstoffen kombiniert mit niedrigen Wirkungsgraden in den Anwendungssektoren (i. d. R. Verbrennungsmotoren). Dies macht sie aus energie- und klimapolitischen Gesichtspunkten nur bedingt attraktiv. Hinzu kommt, dass die Umwandlungsanlagen (wie Elektrolyseure oder die Methanolsynthese) kapitalintensiv sind und deshalb für einen wirtschaftlichen Betrieb eine hohe Auslastung benötigen. Eine hohe Anzahl an Stunden mit sehr niedrigen Strompreisen, welche die PtL und PtG-Optionen aus wirtschaftlichen Gründen brauchen, kommen in Deutschland in den untersuchten Szenarien in den nächsten 15 Jahren nicht vor. Erst bei Anteilen erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung von 60 % und mehr in Deutschland ist dies in nennenswerten Umfang der Fall[8].

Für PtH gelten diese Ausführungen nicht.

Es muss auf die Stromherkunft und die Nutzung der Flexibilitätspotenziale geachtet werden.

Regulatorisch sollte darauf geachtet werden, dass der Strom möglichst aus THG-freien Quellen stammt. Dabei ist auch darauf zu achten, dass die beachtlichen Flexibilitätspotenziale der PtG/PtL-Optionen ausgenutzt werden, um die damit bereits weiter oben angesprochenen positiven Effekte zur THG-Minderung ausnutzen zu können. Gerade im KS95 wird wegen der höheren Anzahl an Stunden mit niedrigeren Strompreisen damit auch die Wirtschaftlichkeit dieser SKO deutlich erhöht.

Die Elektrolyse sowie die Gewinnung von CO_2 aus Abscheidungsprozessen sind für PtG/PtL die Schlüsseltechnologien für einen künftigen Markterfolg.

Aufgrund des hohen Beitrags zu den Gestehungskosten sowie den relevanten Umwandlungsverlusten ist die Schlüsseltechnologie für die PtL/PtG-Optionen die Elektrolyse, die deshalb im besonderen Fokus für F&E-Aktivitäten sowie der Schaffung adäquater rechtlicher Rahmenbedingungen stehen sollte. Die Förderung einer Marktdiffusion sollte allerdings erst zu einem späteren Zeitpunkt anstehen, wenn durch hohe Anteile an erneuerbaren Energien sich auch die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für Elektrolyseure verbessern.

Anfänglich kann die Abscheidung von CO_2 aus Kraftwerken oder Industrieprozessen für die Herstellung von PtG/PtL-Energieträgerneine Rolle spielen. Da CO_2 aus Kraftwerken oder Industrieprozessen aber langfristig in einer stark dekarbonisierten Welt nur noch in einem sehr begrenzten Umfang zur Verfügung stehen wird, kommt der Gewinnung von CO_2 aus der Atmosphäre ebenfalls eine bedeutende Rolle für PtG/PtL-Technologien zu. Diese Technologieentwicklung steht noch in einem frühen Entwicklungsstadium und sollte künftig bei einer F&E-Förderung ebenfalls eine der Fokustechnologien sein.

Für den mittel- und langfristigen Markterfolg ist aufgrund der langen Vorlaufzeiten ein frühzeitiger Einstieg in die SKO bedeutsam.

Aufgrund der realisierbaren Marktwachstumsraten, die mit SKO erzielbar sind, ist ein frühzeitiger Markteinstieg notwendig, damit die SKO überhaupt mittel- und langfristig im größeren Umfang erschlossen werden können. Damit verbunden ist ein notwendiger zusätzlicher Ausbau an erneuerbaren Energien, um die Umweltziele erreichen zu können. Aus Kosten- und Akzeptanzgründen sollten zu Beginn des Transformationsprozesses insbesondere SKO mit einem hohen Wirkungsgrad und dem entsprechend hohem THG-Minderungspotenzial umgesetzt werden.

Die abschließende Tabelle fasst die wichtigsten Vor- und Nachteile zusammen.

[8] Siehe Öko-Institut, Fraunhofer ISI 2015 oder BMWi 2017.

Tabelle 2: Vor- und Nachteile verschiedener Sektorkopplungsoptionen

	Direkte Stromnutzung	Wasserstoff (Elektrolyse)	Strombasierte Kohlenwasserstoffe (PtL, PtG)
Vorteile	Technisch effizientester Pfad In vielen Fällen wirtschaftlich günstigste Lösung	Technisch effizienterer Pfad als Kohlenwasserstoffe Gut speicherbar Flexibilitätsoption zu besseren Integration Erneuerbarer	Infrastruktur in Teilen vorhanden Einsetzbar in sehr vielen Anwendungsfeldern mit bekannten Technologien Vorhandene Speicher können genutzt werden
Nachteile	Nötiger Ausbau Netz- und ggf. Speicherinfrastruktur Bei hohen EE-Anteilen ist Ausbau der Flexibilitätsmaßnahmen notwendig In bestimmten Anwendungsfällen nicht umsetzbar (z. B. zu geringe Speicherdichte, technisch)	Aufbau einer neuen und teuren Infrastruktur notwendig Pfadabhängigkeit Höhere Verluste als direkte Stromnutzung Akzeptanz, weil erhöhter Ausbaubedarf an Erneuerbaren erforderlich	CO_2-Input notwendig Potenziale für „bilanzneutrales“ CO_2 beschränkt Oftmals unwirtschaftlicher als anderen Optionen Energetisch ineffizienteste der drei Optionen Akzeptanz, weil höchster Ausbaubedarf an Erneuerbaren erforderlich

Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer ISI. Anmerkung: in Erweiterung von Ausführungen in Pfluger et al. 2017.

4 Quellenverzeichnis

BMUB (2016): Klimaschutzplan 2050 – Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.

BMWi (2016): Grünbuch Energieeffizienz – Diskussionspapier des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.

Köppel, W.; Degünther, Ch.; Wietschel, M.; Haendel, M.; Boßmann, T.; Deac, G.; Michaelis, J.; Doll, C.; Schlomann, B.; (2018): Integration erneuerbarer Energien durch Sektorkopplung, Teilvorhaben 2: Analyse zu technischen Sektorkopplungsoptionen: Elektrifizierung von Betriebsmitteln im Gasnetz. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher-Instituts für Technologie (KIT). Berlin: Umweltbundesamt.

Öko-Institut, Fraunhofer ISI (2015): Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMU). Online verfügbar unter https://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf, zuletzt geprüft am 01.09.2017.

Pfluger, B.; Fleiter, T.; Kranzl,L.; Hartner, M.; Schade, W.; Hennecke,A.; Fehrenbach, H.; Brischke, L.; Tersteegen, B.; Sensfuß, F.; Steinbach, J. (2017): Reduktion der Treibhausgasemissionen Deutschlands um 95 % bis 2050. Grundsätzliche Überlegungen zu Optionen und Hemmnissen. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Karsruhe: Fraunhofer Insitut für System- und Innovationsforschung.

Wietschel, M.; Haendel, M.; Boßmann, T.; Deac, G.; Michaelis, J.; Doll, C.; Schlomann, B.; Köppel, W.; Degünther, Ch. (2018): Integration erneuerbarer Energien durch Sektorkopplung, Teilvorhaben 2: Analyse zu technischen Sektorkopplungsoptionen. Endbericht Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher-Instituts für Technologie (KIT). Berlin: Umweltbundesamt.