



UFOPLAN 2014 – FZK 3714 41 107 2

## **Kurzstudie**

# **Kurz- und mittelfristige Sektorkopplungspotentiale**

### **Im Rahmen der Studie**

### **Integration erneuerbarer Energien durch Sektorkopplung**

### **Teilvorhaben 2: Analyse zu technischen Sektorkopplungsoptionen**

Von

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI  
Breslauer Straße 48  
76139 Karlsruhe

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

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Karlsruhe, August 2015

## **Autoren:**

Martin Wietschel (FhG ISI)

Michael Haendel (FhG ISI)

Gerda Schubert (FhG ISI)

Wolfgang Köppel (DVGW-EBI)

Charlotte Degünther (DVGW-EBI)

## **Kontakt:**

Prof. Dr. Martin Wietschel

Leitung Geschäftsfeld Energiewirtschaft

Competence Center Energietechnologien und Energiesysteme

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Breslauer Straße 48 | 76139 Karlsruhe

Telefon +49 721 6809-254

<mailto:martin.wietschel@isi.fraunhofer.de>

<http://www.isi.fraunhofer.de>

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	1
1 Einleitung.....	3
2 Definition und energiewirtschaftliche Diskussion von stromseitigen Sektorkopplungsoptionen (Power-to-X) .....	4
3 Stand und Potential von Sektorkopplungsoptionen .....	8
3.1 Einleitung .....	8
3.2 Verkehr.....	9
3.3 Wärme.....	11
3.4 Industrie .....	13
4 Auswirkungen der Sektorkopplungsoptionen auf politische Klimaschutz- und Energieziele.....	17
5 Quellenverzeichnis.....	21

## Zusammenfassung

Ziel der folgenden Kurzstudie ist es, die Potentiale von den wichtigsten neuen Anwendungen für Strom (Power-to-X) aus erneuerbaren Energien für Deutschland bis 2030 zu identifizieren und den möglichen Beitrag dieser Anwendungen zu den energie- und klimapolitischen Zielen zu analysieren. Die Ergebnisse stellen damit einen Überblick zur kurzfristigen Einschätzung von Sektorkopplungsoptionen dar.

**Power-to-X umfasst sämtliche neue technische stromseitige Sektorkopplungsoptionen, d.h. Techniken, die den Stromsektor mit den Anwendungsbereichen Haushalte, Gewerbe-Handel-Dienstleistungen, Industrie und Verkehr verbinden.** Unter neuen Anwendungen werden der Stromeinsatz für Anwendungen, in denen bisher Strom keine oder kaum Verwendung gefunden hat (wie der Elektromobilität im Individualverkehr), oder der deutlich verstärkte Einsatz bei bekannten Anwendungen, die i.d.R. mit Produkt- oder Prozessinnovation bzw. organisatorischen Innovationen einhergehen (wie bei Elektrostahl), verstanden. **Primäres Ziel von Power-to-X-Maßnahmen ist die Dekarbonisierung des Energiesystems durch die Verwendung von Strom aus erneuerbaren Energien bzw. der Ersatz von fossilen Brennstoffen durch erneuerbaren Strom. Das sekundäre Ziel ist die Flexibilitätserhöhung der Stromnachfrage zur besseren Systemintegration von fluktuierenden Erneuerbaren.**

Die wichtigsten Ergebnisse der Kurzstudie sind:

**Mit den ausgewählten und näher untersuchten Power-to-X-Maßnahmen kann perspektivisch in allen Anwendungsbereichen die Erfüllung klimapolitischer Ziele durch die Substitution von fossilen Energieträgern durch erneuerbare Energieträger unterstützt werden.** So können unter optimistischen Annahmen bezüglich der Marktpenetration der Power-to-X Optionen im Jahre 2030 ca. 50 Mio. t an Treibhausgasen (THG) in Deutschland eingespart werden. Ein kurz- und mittelfristig besonders hohes THG-Minderungspotential haben dabei die Elektromobilität, die Wärmepumpe und die Elektrostahlerzeugung. Längerfristig könnten auch Hybrid-Oberleitungs-Lkws eine bedeutende Rolle spielen, allerdings ist hier derzeit die Datenlage noch recht schwach. Auch in der Industrie gibt es mittel- und längerfristig zu erschließende hohe Potentiale (bei Methanol, Ammoniak und Raffinerien), sie sind unter derzeitigen Rahmenbedingungen aber noch ein gutes Stück von einer Wirtschaftlichkeit entfernt.

**Wichtig für den THG-Minderungsbeitrag ist, dass ausschließlich oder überwiegend erneuerbarer Strom zum Einsatz kommt.** Aufgrund der Marktwachstumsraten, die mit Power-to-X-Anwendungen erzielbar sind, ist ein frühzeitiger Markteinstieg notwendig, damit die Power-to-X-Potentiale überhaupt mittel- und langfristig erschlossen werden können. Damit verbunden ist ein notwendiger zusätzlicher Ausbau an erneuerbaren Energien. Aus Kosten- und Akzeptanzgründen sollten zu Beginn des Transformationsprozesses insbesondere Power-to-X-Optionen mit einem hohen Wirkungsgrad und dem entsprechend hohem THG-Minderungspotential integriert werden.

**Neben der Substitution von fossilen Energieträgern durch erneuerbaren Strom liegt ein Beitrag zur THG-Minderung auch darin begründet, dass einige Power-to-X-Anwendungen eine deutlich höhere Energieeffizienz aufweisen (z.B. die Elektromobilität oder Elektrostahlerzeugung).** Bei Wärmepumpen macht sich weiterhin die Nutzung von Umgebungswärme bei der Klimabilanz positiv bemerkbar. Durch beide Effekte betragen die Einsparungen an fossilen Endenergieträgern im optimistischen Falle im Jahre 2030 knapp 180 TWh (ohne die neuen Industrieenanwendungen), was ca. 7 % der heutigen Endenergienachfrage entspricht, bei einem um knapp 50 TWh gestiegenen Stromverbrauch (was rund 8 % der heutigen Stromproduktion entspricht).

**Ein weiterer wesentlicher Aspekt der neuen Stromverbraucher ist die Erhöhung der Flexibilität im Energiesystem.** Der Flexibilitätsbeitrag ist bei den einzelnen Optionen allerdings deutlich unterschiedlich. Insbesondere die Elektromobilität und Elektrokessel in Wärmenetzen weisen hier hohe Potentiale aus. In der Summe über alle Maßnahmen übersteigen die theoretische Speicherkapazität und die Speicherleistung unter optimistischen Annahmen im Jahr 2030 die Werte der heute in Deutschland installierten Pumpspeicherkraftwerken deutlich. Gerade zum Ausgleich von Schwankungen im Stunden- bis Tagesbereich können die Power-to-X-Optionen somit einen wertvollen Beitrag zur Systemintegration der erneuerbaren Energien leisten.

## 1 Einleitung

Die Energiewende in Deutschland zielt auf eine signifikante Minderung der Treibhausgasemissionen ab. Die Treibhausgasemissionen (THG) sollen um mindestens 80 % im Jahr 2050 bezogen auf 1990 reduziert werden. Um diese Dekarbonisierung erreichen zu können, müssen zunehmend fossile Energieträger durch erneuerbare Energien ersetzt werden. Ein wichtiger Weg dabei ist, Strom aus erneuerbaren Quellen verstärkt in den Nachfragesektoren zur Substitution von fossilen Quellen und/oder Effizienzsteigerungen einzusetzen.

Darüber hinaus unterstützen die neuen Stromverbraucher durch die Bereitstellung von Flexibilität, die Integration in das Energiesystem der fluktuierenden Einspeisung aus Wind und Sonne, die im Rahmen der Energiewende weiter an Bedeutung gewinnen werden. So kann z.B. die Abregelung von erneuerbaren Stromproduktionen in Überschusszeiten verhindert werden.

Ziel der folgenden Kurzstudie ist es, die Potentiale von neuen Anwendungen für Strom aus erneuerbaren Energien für Deutschland in den nächsten Jahren zu identifizieren. Dazu sollen Anwendungen mit kurz- und mittelfristig möglichst hohem Umsetzungspotential identifiziert und der mögliche Beitrag dieser Anwendungen zu wichtigen energie- und klimapolitischen Zielen bis 2020 bzw. 2030 herausgearbeitet werden.

Im folgenden Kapitel 2 der vorliegenden Kurzstudie wird ein Überblick zum allgemeinen Verständnis der Begrifflichkeiten „Stromseitige Sektorkopplungsoptionen<sup>1</sup>“ (auch als Power-to-X bezeichnet) sowie eine generelle energiepolitische Diskussion zu diesen Optionen dargestellt. In Kapitel 3 wird ein Überblick über die einzelnen Sektorkopplungsoptionen gegeben. Abschließend werden in Kapitel 4 die energie- und klimapolitischen Auswirkungen einer Marktdurchdringung der Sektorkopplungsoptionen gegeben.

Die Kurzstudie erfolgt im Rahmen des Forschungsvorhabens „Integration erneuerbarer Energien durch Sektorkopplung Teilvorhaben 2: Analyse zu technischen Sektorkopplungsoptionen“, wobei im Rahmen dieses Forschungsvorhabens der zeitliche Fokus für die Beurteilung auf den relevanten Sektorkopplungsoptionen bis 2050 liegt. Dabei wird der jeweilige Beitrag der technischen Optionen für neue Stromverbraucher zur Erreichung der klima- und energiepolitischen Ziele analysiert. Es werden Konkurrenzoptionen zur Flexibilisierung, wie Speicher und Lastmanagement, als Alternativen mitberücksichtigt. Für die Sektorkopplungsoptionen werden weiterhin Transformationsprozesse für ihre erfolgreiche Markteinführung entwickelt und Handlungsempfehlungen bzgl. ihrer erfolgreichen Marktpenetration gegeben.

---

<sup>1</sup> Auch andere Sektorkopplungsoptionen sind vorstellbar, beispielsweise die des Gassektors mit dem Verkehrssektor. Diese sind aber nicht Gegenstand der Studie.

## 2 Definition und energiewirtschaftliche Diskussion von stromseitigen Sektorkopplungsoptionen (Power-to-X)

Für den zunehmenden Einsatz von Strom in den Nachfragesektoren beginnt sich der Begriff Power-to-X zu etablieren, allerdings gibt es hierzu noch keine einheitliche und allgemein anerkannte Begriffsdefinition. Im Folgenden umfasst Power-to-X sämtliche neue technische und stromseitige Sektorkopplungsoptionen, d.h. Techniken, die den Stromsektor mit den Anwendungsbereichen Haushalte (HH), Gewerbe-Handel-Dienstleistungen (GHD), Industrie und Verkehr verbinden. Die Begriffe stromseitige Sektorkopplungsoptionen und Power-to-X-Optionen werden in dieser Studie als Synonyme verwendet.

Strom wird in einigen Bereichen natürlich schon seit Jahrzehnten eingesetzt, z.B. im Wärmebereich durch Nachtspeicherheizungen oder im Mobilitätsbereich durch elektrische Züge und Straßenbahnen. Dies sind klassische Stromverbraucher. Power-to-X beinhaltet dagegen im Verständnis dieser Studie neue Anwendungen (wie den Einsatz von Strom in Fernwärmenetzen zur Gassubstitution bei der Wärmeerzeugung) oder den energie- und klimapolitisch motivierten und angereizten deutlich verstärkten Einsatz bei bekannten Anwendungen (z.B. die vermehrte Substitution von Hochofenstahl durch Elektrostahl), die i.d.R. mit Produkt- oder Prozessinnovation bzw. organisatorischen Innovationen einhergehen.

Neben dem direkten verstärkten Stromeinsatz, beispielsweise durch Elektrokessel in Wärmenetzen, besteht auch die Option, Strom in flüssige Energieträger (Methanol, Kerosin, Benzin und weitere höhere Kohlenwasserstoffe) umzuwandeln (sogenanntes Power-to-Liquid), wobei dann eine energetische Nutzung beispielweise als Kraftstoff im Verkehrssektor oder eine nicht energetische Nutzung, z.B. bei den höheren Kohlenwasserstoffen in der Petrochemie, erfolgen kann. Weiterhin existiert die Option, Strom in Gas (Wasserstoff, Methan) für eine energetische oder nicht energetische Nutzung umzuwandeln (sogenanntes Power-to-Gas). Dies kann in den Anwendungssektoren erfolgen (wie der Wasserstoffherzeugung bei der Ammoniakherstellung) oder im Angebotssektor, wobei dann die Einspeisung in das Erdgasnetz erfolgt. Im letzteren Fall kann dann natürlich nicht mehr zwischen klassischen und neuen Anwendungen unterschieden werden, eine energetische Aufteilung kann dann nur noch bilanziell vorgenommen werden. Zum besseren Verständnis sind in den folgenden Abbildungen die Power-to-X-Optionen in Abhängigkeit der Umwandlungsart (Abbildung 1) und der Nutzung in den Anwendungsbereichen (Abbildung 2) dargestellt. In Abbildung 3 sind Power-to-X-Optionen dargestellt, klassifiziert nach Anwendungssektoren und Umwandlungsart. Diese sind wichtige Optionen, allerdings sind auch noch weitere vorstellbar.

Mit den Power-to-X-Maßnahmen kann in allen Anwendungsbereichen die Erfüllung klimapolitischer Ziele durch die Substitution von fossilen Energieträgern durch erneuerbare Energieträger unterstützt werden. Zusätzlich sind bei einigen Power-to-X-Maßnahmen weitere energie- und klimapolitische Vorteile durch eine höhere Gesamteffizienz (z.B. beim Einsatz von Wärmepumpen oder bei der Elektrostahlerzeugung gegenüber der Hochofenstahlerzeugung)<sup>2</sup> möglich.

---

<sup>2</sup> In starker Abhängigkeit der Stromerzeugung. Im höchsten Maße bei vollständiger Nutzung von erneuerbaren Energien.

Abbildung 1: Überblick der Power-to-X-Optionen entsprechend ihrer Umwandlung, eigene Darstellung

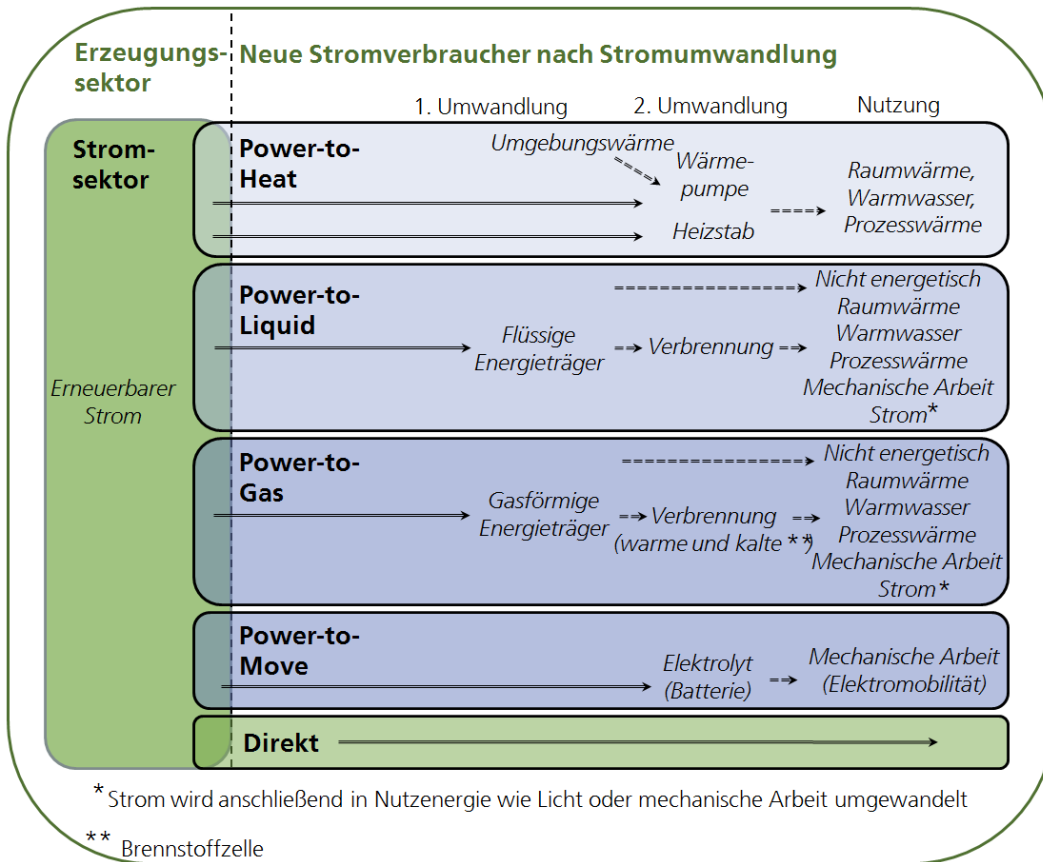


Abbildung 2: Überblick zu Power-to-X-Optionen nach ihren Anwendungssektoren, eigene Darstellung

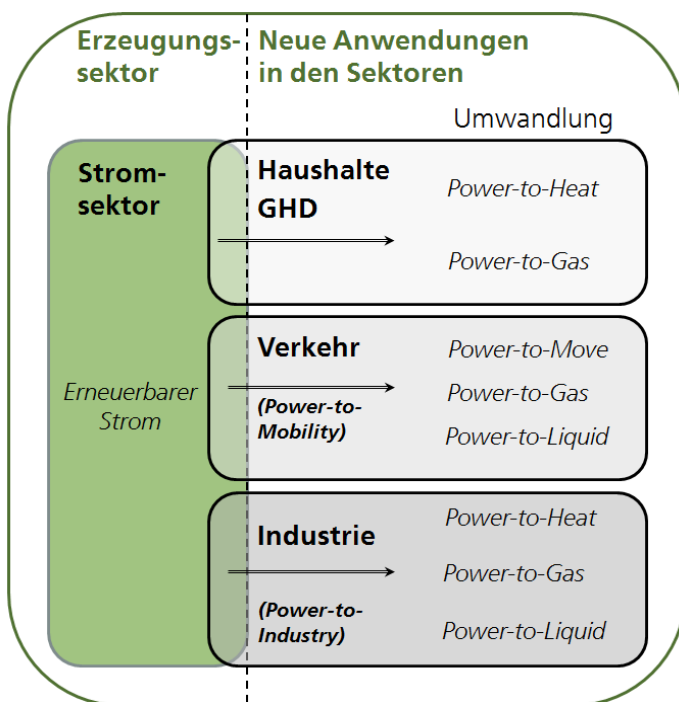




Abbildung 3: Überblick zu Power-to-X-Optionen nach Anwendungssektoren und Umwandlungsart (fett: die in dieser Studie betrachteten Optionen), eigene Darstellung

		Anwendungssektoren		
		Haushalte GHD	Verkehr (Power-to-Mobility)	Industrie (Power-to-Industry)
Stromumwandlung	Power-to-Heat	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Wärmepumpe</b></li> <li>• <b>Elektrowärme (Elektrokessel)</b></li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Elektrische Schmelzöfen (Stahl, NE-Metalle, Glas)*</b></li> <li>• Wärmepumpe (u.a. Nahrungsmittel, Textilindustrie)</li> <li>• Elektrowärme* (u.a. Nahrungsmittel, Chemie, Zellstoffherstellung, Textilindustrie)</li> </ul>
	Power-to-Liquid		<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Verbrennungsmotor</b></li> <li>• <b>Brennstoffzelle</b></li> </ul>	
	Power-to-Gas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Brennstoffzelle</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Brennstoffzelle</b></li> <li>• <b>Verbrennungsmotor</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Elektrolyse (Ammoniak, Methanol, Raffinerie, Chemie)</b></li> <li>• <b>Brennstoffzelle</b></li> </ul>
	Power-to-Move		<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Elektrofahrzeuge (Batterie)</b></li> <li>• <b>Oberleitungs-LKWs</b></li> <li>• <b>Leitungsgebundene* Elektrifizierung</b></li> <li>• <b>Bahn, Busse</b></li> </ul>	
	Direkt			<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Elektrifizierung Betriebsmittel Gasnetz</b></li> <li>• <b>Plasmaverfahren (u.a. Acetylen)</b></li> </ul>

\* Über bestehende Anwendungen hinausgehende Substitution von fossil basierten Verfahren/Antriebssystemen

Power-to-X-Maßnahmen sind künftig wichtige Bausteine für eine Dekarbonisierungsstrategie. In welchem Umfang sie zur Dekarbonisierung beitragen, hängt auch vom Erfolg anderer Maßnahmen, beispielsweise bei der Erhöhung der Energieeffizienz auf der Nachfrageseite oder der Verfügbarkeit von Biomasse, ab. Schon bei einem 80-prozentigem Treibhausgasminderungsziel bis 2050 für Deutschland werden die Power-to-X-Optionen allerdings eine signifikante Rolle zur Zielerreichung spielen. Dies liegt darin begründet, dass der Wärmesektor und der Verkehrssektor dafür weitestgehend entkarbonisiert sein müssen. Einerseits sind der Energieeffizienz bei der Nachfrage bestimmte thermodynamische Grenzen der Verminderung gesetzt und andererseits sind die Biomassepotentiale unter Einbezug der Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion und den Nachhaltigkeitsanforderungen deutlich beschränkt. Für die Erreichung ambitionierterer Klimaschutzziele, also eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 90 oder 95 %, nimmt die Bedeutung von Power-to-X weiter sehr stark zu.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt der neuen Stromverbraucher ist die Erhöhung der Flexibilität im Energiesystem. Für eine Nutzung dieses Flexibilitätspotentials müssen jedoch entsprechende Maßnahmen ergriffen werden (z.B. eine flexible intelligente Steuerung von Batch-Prozessen oder die Ein-

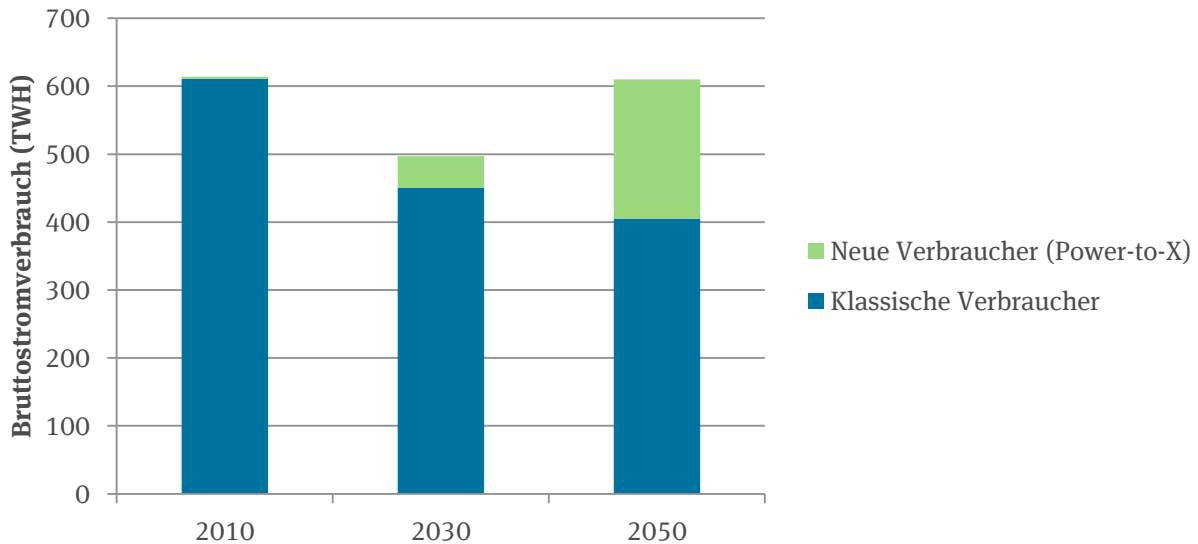
führung von Speichern, bspw. Wärmespeichern bei Wärmepumpen). Diese sind genauso systemdienlich ausgerichtet wie Demand Side Management von klassischen Anwendungen, wie z.B. die flexible Steuerung von Nachtspeicherheizungen, oder anderen Flexibilisierungsoptionen, wie Kurzzeitstromspeicher.

Das Energiekonzept der Bundesregierung von 2010 hat zum Ziel, bis 2020 bezogen auf 2008 10 % Strom und bis 2050 25 % Strom einzusparen. Der verstärkte Einsatz von Power-to-X führt zwar zu der politisch ebenfalls anvisierten Senkung der Treibhausgase, gestaltet aber die Zielerreichung beim Stromeinsparen herausfordernder (siehe Abbildung 4). Die sich hieran anschließende Frage ist, ob die politischen Stromeinsparziele nicht im Sinne des Transformationspfades angepasst werden müssten und zum Beispiel für klassische Anwendungen festzulegen sind, während die neuen Verbraucher bzw. neue Power-to-X-Optionen hier heraus gerechnet werden sollten. Dies ist jedoch mit Herausforderungen an die Datenerfassung und Verarbeitungssystematik der Daten für die klare Trennung in neue Verbraucher bzw. Power-to-X und klassischen Anwendungen verbunden (z.B. wie bewertet man eine stärkere Elektrifizierung des deutschen Schienennetzes?).

Um den mit den Power-to-X-Optionen angestrebten Beitrag zur Senkung der Treibhausgasemissionen zu erreichen, müsste der Strom für Power-to-X allerdings ganz oder überwiegend aus erneuerbaren Energiequellen kommen. Dieses bedingt dann einen höheren Ausbau bei den erneuerbaren Energien, wenn die anvisierten Stromeinsparungen bei den klassischen Anwendungen die erhöhte Stromnachfrage bei Power-to-X nicht kompensieren können. Die vollständige Kompensation erscheint derzeit wenig wahrscheinlich, wie aus der Abbildung 4 zu entnehmen ist. Somit sind die Ausbauziele für regenerative Energien und der stärkere Ausbau von Power-to-X in der Diskussion um energie- und klimapolitische Ziele stark miteinander verwoben. Um den notwendigen zusätzlichen Ausbau an erneuerbaren Energien aus Kosten- und Akzeptanzgründen in Grenzen zu halten, sollten Power-to-X-Optionen insbesondere zu Beginn des Transformationsprozesses möglichst einen hohen Wirkungsgrad aufweisen. Es sind somit i.d.R. Umwandlungsschritte zu vermeiden. So weisen Hybrid-Oberleitungs-Lkws einen deutlich höheren energetischen Gesamtwirkungsgrad (ca. 70 %) als Lkws auf der Basis von Power-to-Liquid (ca. 35 %) auf und benötigen somit einen deutlich geringeren Zubau an Erneuerbaren zur Bedarfsabdeckung. Auch ist die nicht energetische bzw. stoffliche Nutzung von Power-to-X-Optionen in der Industrie aus Effizienzgründen oftmals der energetischen Nutzung vorzuziehen. Neben der Effizienz sind allerdings auch andere Kriterien wie die Wirtschaftlichkeit bei der Bewertung von Power-to-X-Optionen einzubeziehen.

Obwohl den neuen Power-to-X-Anwendungen ein hohes Marktwachstumspotential in der Zukunft zugebilligt wird, sollte beachtet werden, dass der möglichen Geschwindigkeit des Marktwachstums bestimmte Grenzen gesetzt sind. So beschränken die Verfügbarkeit an Kapital, Zugriff auf Ressourcen, ausgebildeten Akademikern und Facharbeitern sowie der Zeitbedarf für den Aufbau von Infrastrukturen das Marktwachstum. Neue Basistechnologien im Energie- und Automobilsektor wachsen beispielsweise über einen längeren Zeitraum i.d.R. „nur“ zwischen 0 bis 40 % (mittlere jährliche Wachstumsrate, siehe Tabelle 1). Auch im Industriesektor sind bei vielen Prozessen durch die langen technischen Lebensdauern der Anlagen den Diffusionsprozessen enge Grenzen gesetzt. Damit die Power-to-X-Optionen über den Zeitverlauf relevante Marktanteile erreichen können und damit ihren im Transformationsprozess immer bedeutender werdenden Beitrag zur Erreichung von energie- und klimapolitischen Zielen auch leisten können, ist deshalb ein frühzeitiger Markteintritt notwendig. Höhere Wachstumszahlen sind ggf. durch gezielte Förderung und/oder entsprechenden Regulierungen möglich. So werden zum Beispiel in Norwegen derzeit Elektrofahrzeugen stark gefördert bzw. angereizt, sodass historische Wachstumsraten von 100 % zu verzeichnen sind.

Abbildung 4: Stromverbrauchsentwicklung in Deutschland am Beispiel des „Klimaschutzszenarios 90 (THG: -90 %)“, Quelle: Öko-Institut, Fraunhofer ISI 2014



Anmerkung: Als „neue Verbraucher“ in den Klimaschutzszenarien gelten: Elektromobilität, Wärmepumpen sowie die Herstellung von Methan und Wasserstoff.

Tabelle 1: Beispielhafte historische Wachstumsraten von Techniken, Quelle: Eigene Berechnungen sowie Hacker et al. 2012

Technik (Land)	Historische mittlere Wachstumsrate (CAGR)	Zeitraum (Jahre)
Wärmepumpen (SWE)	11 % p.a.	29
Energiesparlampen (SWE)	45 % p.a.	17
Kernenergie (global)	8 % p.a.	39
Photovoltaik (global)	22 % p.a.	28
Solarheizung (AUS)	15 % p.a.	29
Windenergie (global)	26 % p.a.	16
Erdgas-Pkw (DEU)	19 % p.a.	15
Hybrid-Pkw (DEU)	40 % p.a.	8

### 3 Stand und Potential von Sektorkopplungsoptionen

#### 3.1 Einleitung

Im Folgenden wird die Auswahl der in der Kurzstudie betrachteten Power-to-X-Optionen begründet und die ausgewählten Optionen kurz vorgestellt. Weiterhin werden für diese Optionen Marktpenetra-

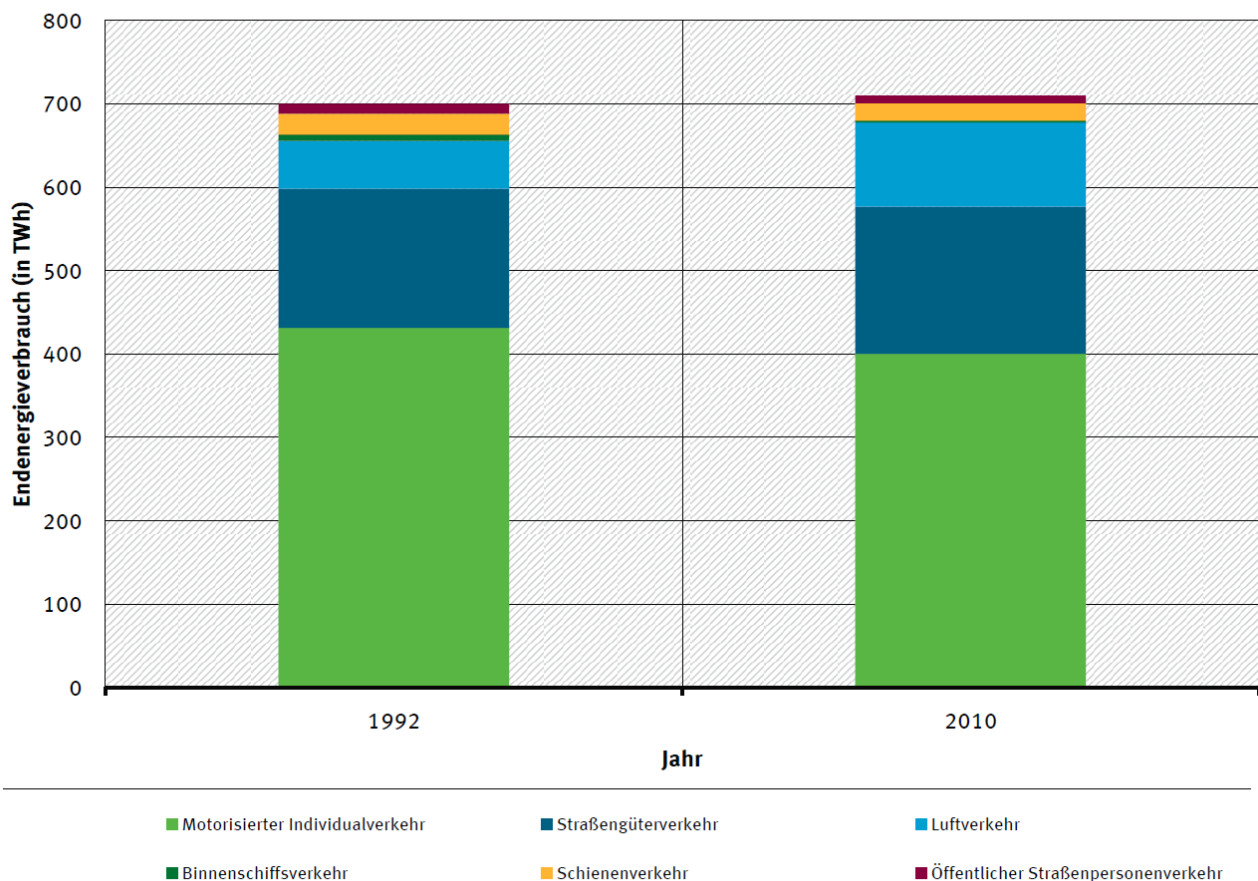
tionsszenarien entwickelt, die unter Einbezug von wirtschaftlichen, technischen und regulatorischen Aspekten sowie den energie- und klimapolitischen Rahmenbedingungen als realistisch eingestuft werden. Es wird dabei i.d.R. ein moderates sowie ein optimistisches Marktdurchdringungsszenario angenommen.

### 3.2 Verkehr

Der motorisierte Individualverkehr hat den derzeit größten Energieverbrauch im Verkehrssektor (siehe Abbildung 5) und stellt somit hinsichtlich seines Potentials wie auch seiner aktuellen sowie prognostizierten Marktdurchdringungsraten von Elektrofahrzeugen den kurz- und mittelfristig interessantesten Bereich für Power-to-Mobility dar.

Abbildung 5: Endenergieverbrauch nach Verkehrsbereichen, Quelle: Dena, Total 2012

#### Endenergieverbrauch nach Verkehrsbereichen



Neben Pkws werden leichte Nutzfahrzeuge (LNfz) sowie für gewisse Anwendungen wie innerstädtische Belieferungen auch kleine Lkws als Elektromobile betrachtet. Elektromobilität im Sinne der Bundesregierung umfasst all jene Fahrzeuge, die von einem Elektromotor angetrieben werden und ihre Energie überwiegend aus dem Stromnetz beziehen, also extern aufladbar sind. Dazu gehören rein elektrisch betriebene Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV), eine Kombination von E-Motor und kleinem Verbrennungsmotor (Range Extender, REEV) und am Stromnetz aufladbare Hybridfahrzeuge (PHEV). Prinzipiell zählen auch Brennstoffzellen-Fahrzeuge zu den Elektrofahrzeugen. Die Bundes-

regierung visiert für zweispurige Elektrofahrzeuge einen Markthochlauf von mindestens 1 Mio. Elektrofahrzeugen bis 2020 und mindestens 6 Mio. bis 2030 im Bestand an. Die aktuelle Marktdurchdringung sowie die beiden Klimaschutzszenarien zur möglichen künftigen Marktdurchdringung sind in der Tabelle 2 angegeben.

Tabelle 2: Potentiale von Elektrofahrzeugen in Deutschland

Szenario	-	2014	2020	2025	2030
<b>Elektrofahrzeuge (Pkws, LNfz)</b>					
optimistisch	Bestand <sup>1)</sup> in Tsd Stück	24	870	3716	10364
optimistisch	Marktanteil am Bestand in %	0,06	2	8	23
moderat	Bestand <sup>2)</sup> in Tsd Stück	24	464	1865	5201
moderat	Marktanteil am Bestand in %	0,06	1	4	11

Annahmen: 1) Abgeleitet aus dem MKS-Szenario der Klimaschutzszenarien (Öko-Institut, Fraunhofer ISI 2014); 2) Abgeleitet aus dem K90-Szenario der Klimaschutzszenarien (Öko-Institut, Fraunhofer ISI 2014)

Der zurzeit wachsende Straßengüterverkehr hat durch seine hohe Energienachfrage sehr relevante Potentiale für Elektromobilität, die aber schwierig zu erschließen sind. Aufgrund der geringen Energiedichten und der hohen Batteriepreise der heutigen Batterien kommen reine Batterie-Lkws nur in Spezialfällen wie dem innerstädtischen Lieferverkehr in Frage. Derzeit sehr in einer kontroversen Diskussion stehen die Hybrid-Oberleitungs-Lkws, die ein hohes Potential haben. Hybrid-Oberleitungs-Lkws sind Systeme mit oberleitungsgebundenem elektrischem Betrieb von schweren Nutzfahrzeugen auf vielbefahrenen Autobahnen. I.d.R. sind es Hybridfahrzeuge, die neben dem elektrischen Antrieb auch noch einen Verbrennungsmotor haben und mit kleineren Batterien zum Zwischenspeichern ausgestattet sind, um nicht elektrifizierte Strecken fahren zu können bzw. zu erlauben, dass die Autobahnen nur abschnittsweise mit Oberleitungen ausgestattet werden. Im Nahverkehr werden in ausgewählten Regionen bereits ähnliche Konzepte bei Bussen angewendet und im innerstädtischen Bereich werden beim Lieferverkehr ähnliche Ansätze diskutiert.

Die Konzepte für die Hybrid-Oberleitungs-Lkws sind derzeit noch in der Erprobung und zur detaillierteren Wirtschaftlichkeitsrechnungen fehlen noch Studien. Der Infrastrukturaufbau von Oberleitungen an Autobahnen benötigt Zeit und verursacht schon Infrastrukturkosten bevor diese genutzt werden kann. Dabei liegt ein klassisches „Henne-Ei-Problem“ vor, da ohne Oberleitungen die Investitionen in entsprechende Fahrzeuge fehlen und umgekehrt. Die Umsetzung rein regionaler Lösungen, z.B. für Pendelverkehr, bietet dabei auch nur begrenzte Fahrleistungspotentiale die elektrifiziert werden können. Neben dem Infrastrukturaufbau ergeben sich rechtliche und sicherheitsrelevante Fragen, die zu klären sind, sowie die Frage nach dem Fahrzeugangebot. Vor dem Hintergrund der angesprochenen Herausforderungen kann frühestens ab 2020 mit einer Markteinführung gerechnet werden, die dann ab 2025 energiewirtschaftlich relevant werden könnte. Die beiden Szenarien sind in der Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Potentiale von Elektrofahrzeugen in Deutschland

Szenario	-	2014	2020	2025	2030
<b>Hybrid-OL-Lkws</b>					
optimistisch	Bestand <sup>1)</sup> in Tsd Stück	0	3	19	72
optimistisch	Anteil am Bestand in %	0	0,7	5	17
moderat	Bestand <sup>2)</sup> in Tsd Stück	0	0	9	21
moderat	Anteil am Bestand in %	0	0	2,2	4,9

Annahmen: 1) Eigenes Szenario<sup>3</sup> 2) Eigenes Szenario<sup>3</sup>

Im Pkw-Bereich gibt es unter anderem noch die Option der Wasserstoffherzeugung und dessen Nutzung in Brennstoffzellenfahrzeugen. Ab 2020 könnte diese Option interessant werden, sie bleibt aber in dieser Kurzstudie unberücksichtigt und wird erst in der Langfassung der Studie ausführlich behandelt. Einige Aktivitäten im Elektromobilitäts- und Wasserstoffbereich laufen derzeit auch im Busbereich. Gerade die Linienbusse mit Schnellladung stellen eine interessante Alternative dar. Aufgrund des insgesamt geringen Endenergieverbrauches bei Bussen wird dieser Bereich allerdings nicht detailliert behandelt. Als Zweitkraftstoffe, bspw. für extern aufladbare Hybridfahrzeuge, könnten aber auch Power-to-Gas oder Power-to-Liquid-Optionen möglich sein.

Im Flugverkehr sind Power-to-Liquid-Optionen von Interesse, allerdings ist der Beitrag des rein nationalen Flugverkehrs am Endenergieverbrauch gering. Erst bei der notwendigen globalen Betrachtung werden das hohe THG-Minderungspotential und der Handlungsbedarf offenkundig. Im Rahmen dieser Studie liegt der Fokus auf jedoch der nationalen Betrachtung, sodass diese Option nicht näher betrachtet wird.

Weiterhin bietet sich bei der Bahn noch die Option der weiteren Elektrifizierung an, die aber aufgrund des heute schon recht hohen Elektrifizierungsgrades in Deutschland weitgehend ausgeschöpft ist.

Im Binnenschiffsverkehr, der energiewirtschaftlich allerdings eher unbedeutend ist, bieten sich Power-to-Liquid-Optionen an. Hinsichtlich des national verursachten globalen Seeschiffsverkehrs besteht wie im Luftverkehr auch hier die Möglichkeit, hohe THG-Minderungspotentiale durch Power-to-Gas oder Power-to-Liquid global zu erschließen. Im weiteren Verlauf wird auch diese Option aufgrund des nationalen Fokus nicht näher betrachtet.

### 3.3 Wärme

Der Einsatz von elektrischem Strom zur Bereitstellung von Wärme umfasst alle Sektoren und verschiedene Techniken. Heute schon im bedeutenden Maßstab etablierte Techniken sind die Elektrowärmepumpen, die Nachtspeicheröfen und die direktelektrische Wärmebereitstellung für Warmwasser. Eine weitere Technik, die heute bereits vereinzelt zum Einsatz kommt, sind Elektroheizkessel als bivalente Erzeuger in Fernwärmenetzen, die in Deutschland hauptsächlich am Regelenergiemarkt

<sup>3</sup> Weitere Details können später dem Forschungsvorhabens „Integration erneuerbarer Energien durch Sektorkopplung Teilvorhaben 2: Analyse zu technischen Sektorkopplungsoptionen“ entnommen werden

vermarktet werden. Langfristig können sie auch sehr flexibel zur Nutzung von Überschussstrom eingesetzt werden. Neben diesen Anwendungen wird auch im Industriesektor bereits heute für bestimmte Prozesse Wärme durch Strom bereitgestellt (z.B. in Lichtbogen- oder Induktionsöfen).

Elektrowärmepumpen nutzen neben elektrischem Strom auch erneuerbare Umgebungswärme zur Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser. Mit Hilfe eines Wärmespeichers und der Wärmespeicherfähigkeit der Gebäude kann der Betrieb der Wärmepumpe in gewissen Grenzen flexibilisiert werden. Der Ausbau der Wärmeerzeugung aus erneuerbaren Quellen und die Steigerung der Energieeffizienz im Gebäudebereich sind in der Energieeinsparverordnung (EnEV2014) und dem Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG2011) geregelt. Es gibt verschiedene Fördermaßnahmen (Marktanreizprogramm (MAP), KfW-Programme), die unter anderem den Bau von Wärmepumpen unterstützen. Der Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte soll bis zum Jahr 2020 auf 14 % gesteigert werden (§1 EEWärmeG2011). Gleichzeitig soll der Gebäudebestand langfristig bis zum Jahr 2050 nahezu klimaneutral werden (EnEV2014). Für Bestandsgebäude spielen Wärmepumpen im Rahmen von umfassenden energetischen Sanierungen mit Austausch des Heizsystems eine Rolle. Für Neubauten insbesondere bei gut gedämmten Häusern.

Elektrischer Strom kann mittels Elektrokessel und Großwärmepumpen in Fernwärmenetzen zur Wärmeerzeugung eingesetzt werden. Elektrokessel benötigen geringere Investitionen als Großwärmepumpen und sind damit besser für einen flexiblen Einsatz auch mit geringeren Einsatzstunden, etwa zur Nutzung von Überschussstrom, geeignet. Elektrokessel werden bereits in einigen Fernwärmenetzen, hauptsächlich zur Bereitstellung von negativer Regelenergie, eingesetzt, können aber auch zur Erzeugung von Prozessdampf in der Industrie genutzt werden. Insbesondere der Vergleich mit der Situation in Dänemark zeigt, dass Deutschland hier noch ein hohes Potential hat.

Sowohl die Elektrowärmepumpen als auch die Elektrokessel sind unter bestimmten Rahmenbedingungen bereits heute wirtschaftlich zu betreiben und können auch langfristig einen bedeutenden Beitrag sowohl zur Senkung der THG-Emissionen am Wärmemarkt als auch zur Integration erneuerbarer Energien am Strommarkt leisten. Zur Abschätzung der kurz- und mittelfristigen Potentiale beider Techniken werden zwei Entwicklungspfade untersucht, die der Tabelle 4 entnommen werden können.

Tabelle 4: Potentiale von Elektro-Wärmepumpen und Elektrokesseln in Deutschland, eigene Berechnung

Szenario	-	2014	2020	2025	2030
<b>Elektrowärmepumpen</b>					
optimistisch	Bestand <sup>1)</sup> in Tsd Stück	618	1600	2500	3400
optimistisch	Anteil am Bestand (Gebäude) in %	3	8	13	15
moderat	Bestand <sup>2)</sup> in Tsd Stück	618	970	1300	1560
moderat	Anteil am Bestand (Gebäude) in %	3	4,5	6,5	8,7
<b>Elektrokessel</b>					
optimistisch	Bestand <sup>3)</sup> in Tsd Stück	9	33	93	173
optimistisch	Anteil am Bestand (Fernwärmenetz) in %	0,2	0,7	1,9	3,5
moderat	Bestand <sup>4)</sup> in Tsd Stück	9	23	35	47
moderat	Anteil am Bestand (Fernwärmenetz) in %	0,2	0,5	0,7	1,0

Annahmen: 1) Abgeleitet aus BWP Branchenstudie Szenario 2 (BWP 2013); 2) Abgeleitet aus BWP Branchenstudie Szenario 1 (BWP 2013); 3) Zubau steigt auf 400 MW pro Jahr an, mittlere Größe: 25 MW; 4) konstanter Zubau von 60MW pro Jahr, mittlere Größe: 25 MW;

### 3.4 Industrie

Der Industriesektor besitzt eine Vielzahl an Prozessen in verschiedenen Branchen, von denen die Metallerzeugung und die Grundstoffchemie aktuell ungefähr für zwei Drittel des Energieverbrauchs des Sektors verantwortlich sind (Abbildung 6). Unterschiedliche Sektorkopplungsoptionen lassen sich einsetzen, um den Verbrauch von fossilen Brennstoffen durch die Nutzung von Strom zu substituieren.

Eine vielversprechende Power-to-Heat-Option ist bei der Stahlherstellung zu sehen. Die Stahlherstellung ist einerseits für einen Großteil des Energieverbrauches der Metallerzeugung verantwortlich. Andererseits handelt es sich bei der Umstellung auf die Elektrostahlroute zur Gewinnung von Rohstahl um einen etablierten diskontinuierlichen Prozess mit zunehmendem Marktanteil und hohem Potential, bei dem Strom direkt eingesetzt werden kann. Da die direkte Rohstahlherstellung aus Eisenerz in Elektrostahlwerken aktuell nicht möglich ist, ist die maximal mögliche Produktionsmenge durch die zur Verfügung stehende Menge an Schrott bzw. direktreduziertem Eisen begrenzt. Für die Neuproduktion von Rohstahl aus Eisenerz wird daher noch die Hochofenroute benötigt. Alternative wirtschaftliche Verfahren für die Neuproduktion von Rohstahl mit geringeren Treibhausgasemissionen befinden sich zwar in der Entwicklung, sind aber auf absehbarer Zeit nicht einsetzbar. Zwei mögliche Szenarien zur Entwicklung der Rohstahlproduktion sind in Tabelle 5 angegeben.



Abbildung 6: Endenergieverbrauch nach Industriebranchen, Quelle: aktualisiert basierend auf Fleiter et al. 2013

**Endenergieverbräuche in der Industrie 2010**

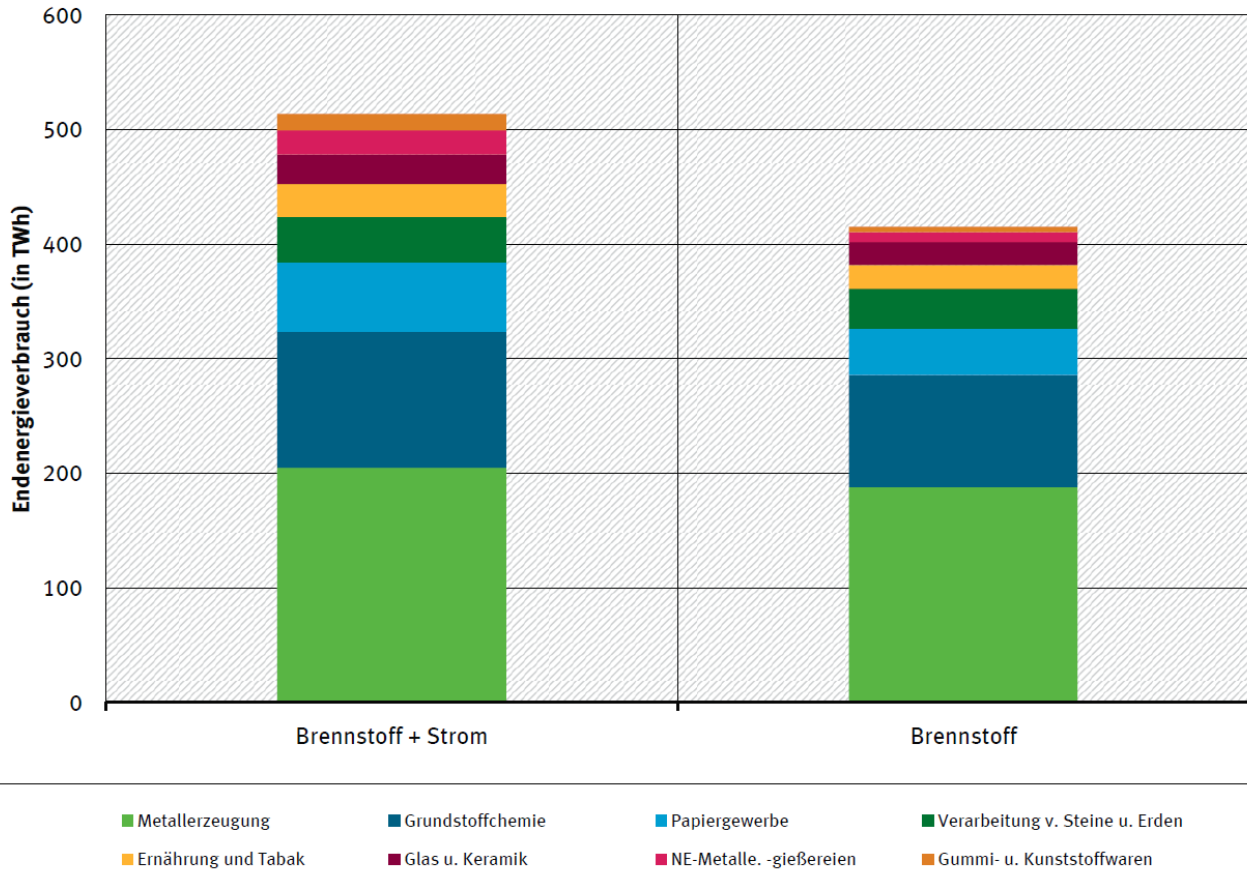


Tabelle 5: Potentiale der Elektrostahlroute in Deutschland

Szenario	-	2014	2020	2025	2030
optimistisch	Rohstahlproduktion <sup>1)</sup> in t	42.811.705	46.155.000	45.191.500	44.228.000
optimistisch	Anteil an der Produktion <sup>1)</sup> in %	31,2	36	39	42
moderat	Rohstahlproduktion <sup>1)</sup> in t	42.811.705	43.818.000	44.656.000	45.495.000
moderat	Anteil an der Produktion <sup>2)</sup> in %	31,2	33	35	36

Quelle: 1) Klimaschutzszenario 90 (optimistisch) bzw. Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (pessimistisch) (Öko-Institut, Fraunhofer ISI 2014); 2) Eigenes Szenario

Für Power-to-Gas-Optionen sind noch vor der Nutzung der gewonnenen Gase als erneuerbaren Brennstoff die Optionen zur nicht-energetischen Nutzung zu nennen, da so Umwandlungsverluste vermieden werden können. Als Power-to-Gas-Option mit hohem Potential bietet sich dabei insbesondere die stoffliche Nutzung von Wasserstoff an. Die momentan größten Abnehmer von Wasserstoff sind neben den Raffinerien die Ammoniak- und Methanolherstellung aus der Grundstoffchemie (Töpler, Lehmann 2014).

In Raffinerieprozessen wird Wasserstoff hauptsächlich beim Entschwefeln der Zwischenprodukte (z.B. Vakuumgasöl) und der Endprodukte (u.a. Diesel-, Benzinfraktion) verwendet. Darüber hinaus wird Wasserstoff in Hydrocrackern benötigt, in denen längere Kohlenwasserstoffe (z. B. Wachse) zu kurzkettigeren Kohlenwasserstoffen (zugehörig zu z.B. Kerosin-, Benzin- und Dieselfraktion) mit Wasserstoff katalytisch umgewandelt werden. Die große Nachfrage nach Mineralölprodukten verursacht daher einen stetigen Bedarf nach Wasserstoff. Bei der Ammoniak- und der Methanolherstellung dient Wasserstoff als Synthesegas, das zusammen mit Stickstoff bzw. Kohlenmonoxid für die Produktion von Ammoniak bzw. Methanol benötigt wird. Durch den Einsatz von Ammoniak vorwiegend in der Düngemittelherstellung und dem Einsatz von Methanol als Syntheserohstoff bzw. Energieträger ist auch hier weiterhin mit einer relevanten Nachfrage nach Wasserstoff zu rechnen. Vorteilhaft an diesen drei Prozessen ist zudem eine einfache Integration der Sektorkopplungsoption bzw. die Möglichkeit einen bivalenten Betrieb mit bestehender Technik aufzubauen.

Für die rein elektrische Gewinnung von Wasserstoff bietet sich die Elektrolyse an, die das Potential hat die Dampfreformation von Erdgas, der heute dominierenden Technologie zur Wasserstoffherzeugung, zu ersetzen. Eine überschlägige wirtschaftliche Vergleichsrechnung der Wasserstoffherstellung über Elektrolyseure im Vergleich zur Dampfreformierung zeigt jedoch, dass z.B. im Jahre 2030 die Wasserstoffgestehungskosten des Elektrolyseurs bei 0,102 €/kWh im Vergleich zu 0,073 €/kWh bei der Dampfreformation liegen. Zudem hängen die Wasserstoffgestehungskosten bei der Elektrolyse von ihren Volllaststunden ab, sodass eine hohe Auslastung anzustreben ist (Abbildung 7).

Zusätzlich ist bei Verwendung des Strommixes mit einem höheren CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu rechnen als bei der Dampfreformation entsteht.<sup>4</sup> Es ist somit weder aktuell noch in naher Zukunft ohne Berücksichtigung möglicher zukünftiger rechtlicher bzw. politischer Maßnahmen von einer Wirtschaftlichkeit der Elektrolyse in den betrachteten Anwendungsfällen auszugehen. Aufgrund der Tatsache, dass in der Industrie Investitionen i.d.R. auf Wirtschaftlichkeitsentscheidungen beruhen, ist ohne anpassende Maßnahmen mit keiner großen Substitution des Dampfreformierungsprozesses kurz- und mittelfristig zu rechnen. Das technisch umsetzbare Potential der Raffinerierung, der Ammoniakherstellung und der Methanolherstellung wird in Tabelle 6 dargestellt.

Als weitere stoffliche Power-to-Gas-Option bietet sich die Herstellung von erneuerbarem Methan an, bei der Methan insbesondere für andere Prozesse in der Grundstoffchemie als Syntheserohstoff genutzt werden kann. Hierfür ist jedoch im Vergleich zur Wasserstoffnutzung ein weiterer verlustbehaft-

---

<sup>4</sup> Annahmen: 1) Betrieb des Elektrolyseurs bei 8.520 VLS/a, 20 Jahre Abschreibung; 2) Strompreise entsprechend Szenario aus Klimaschutzszenario 2050 (Öko-Institut, Fraunhofer ISI 2014); 3) Stromverbrauch Elektrolyse nach eigenen Abschätzung (2014: 4,8 kWh/m<sup>3</sup> H<sub>2</sub> bis 2030: 4,4 kWh/m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>); 4) spezifische Investition Elektrolyse nach eigenen Abschätzungen auf Basis von (Müller-Syring 2013), (Baumann et al. 2014), (Wilken et al. 2014), (Nitsch et al. 2010), (Albrecht et al. 2013), (Smolinka et al. 2010) und unter Annahme einer netzdienlichen Fahrweise; 5) Erdgasbezugspreis aus Klimaschutzszenario 2050 (Öko-Institut, Fraunhofer ISI 2014), Wirkungsgrad Dampfreformation: 75 %, Investitionen und Betriebskosten nach eigenen Abschätzungen; 6) CO<sub>2</sub>-Zerifikatspreise nach Klimaschutzszenario 2050 (Öko-Institut, Fraunhofer ISI 2014).

teter Umwandlungsschritt erforderlich. Darüber hinaus gibt es die energetische Nutzung von Wasserstoff und Methan als Power-to-Gas-Optionen. Aufgrund von Umwandlungsverlusten ist auch hier die Wasserstoffnutzung der Methannutzung vorzuziehen, prozessbedingt ist dies jedoch nicht immer möglich. Branchen bzw. Prozesse mit hohem Potential für die energetische Methannutzung sind vor allem die NE-Metallindustrie, die Papierherstellung, die Zementindustrie und die Glasindustrie, bei denen der größte Teil der fossilen Brennstoffe durch die direkte und indirekte Stromnutzung substituiert werden könnte. Die Nahrungsmittelindustrie hat als Branche insgesamt auch ein hohes Potential für den Einsatz von erneuerbaren Brennstoffen bzw. der direkte Stromnutzung, da sie aber aus vielen verschiedenen Prozessen besteht, haben die einzelnen Prozesse absolut gesehen eine eher geringe Bedeutung. Die in diesem Absatz angesprochenen Optionen werden jedoch in der Kurzstudie nicht näher betrachtet. Die Langfassung der Studie wird hingegen einige dieser Optionen im Detail untersuchen.

Abbildung 7: Wasserstoffgestehungskosten in Abhängigkeit von Volllaststunden und Strompreisen mit Bandbreiten durch Preisunsicherheiten, eigene Darstellung

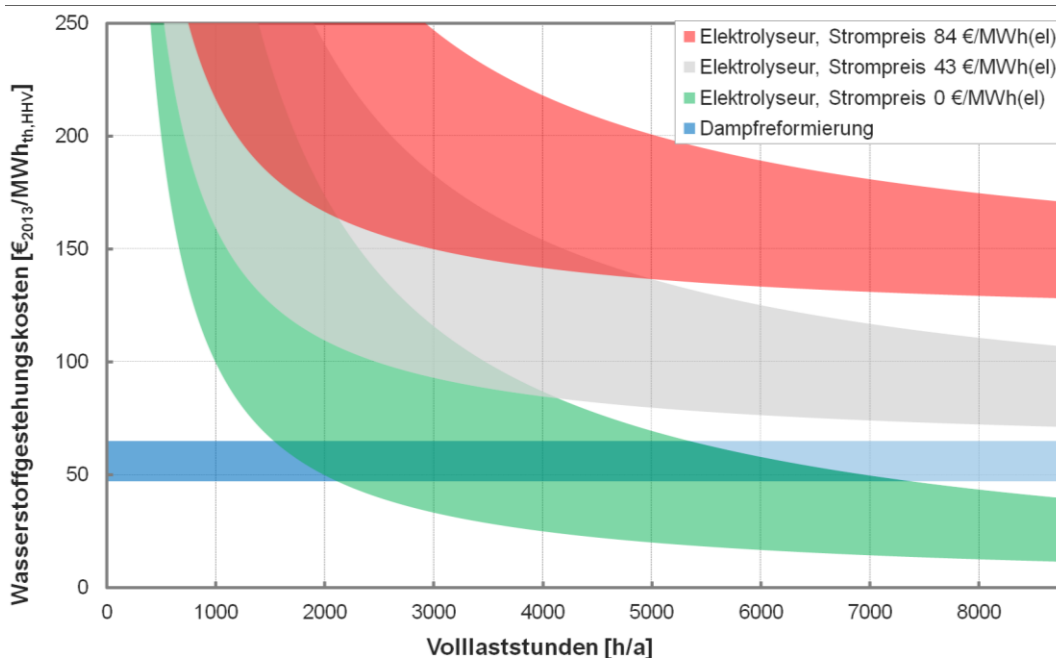


Tabelle 6: Theoretische Potentiale im Jahre 2030 für die rein elektrische Wasserstoffherstellung in der Raffinerie, der Ammoniakherstellung und der Methanolherstellung

Szenario	Raffinerienbestand in Mio.t Rohöl <sup>1)</sup>	Ammoniakproduktion in kt <sup>2)</sup>	Methanolproduktion in kt <sup>2)</sup>
optimistisch	37,8	3.363	1.974
moderat	54,9	3.450	2.025

Annahmen: 1) Primärrohölaufkommen für 2010 und 2014 (BAFA 2014), Entwicklung nach KS 90-Szenario (optimistisch) und AMS-Szenario (pessimistisch) (Öko-Institut, Fraunhofer ISI 2014); 2) Entwicklung nach KS 90-Szenario (optimistisch) und AMS-Szenario (pessimistisch) (Öko-Institut, Fraunhofer ISI 2014)

## 4 Auswirkungen der Sektorkopplungsoptionen auf politische Klimaschutz- und Energieziele

Die Auswirkungen von Sektorkopplungsoptionen auf politische Klimaschutz- und Energieziele werden im Folgenden vorgestellt. Für die Abschätzung und Darstellung der möglichen Potentiale der Sektorkopplungsoptionen wird jeweils eine Bandbreite, also ein Minimal- und ein Maximalwert unterschieden. Beim Minimalwert wird das in Kapitel 3 dargelegte moderate Marktpenetrationszenario mit Verwendung des deutschen Strommixes<sup>5</sup> zugrunde gelegt. Beim Maximalwert wird von einer optimistischen Marktdurchdringung der Power-to-X-Optionen mit der grundsätzlich anzustrebenden ausschließlichen Verwendung von erneuerbarem Strom ausgegangen. Die Resultate der Power-to-X-Optionen in der Industrie, die auf regenerativen Wasserstoff angewiesen sind, werden dabei nur für den Maximalwert des Jahres 2030 als technisches Potential ausgewiesen, da hier wie in Kapitel 3 ausgeführt noch mit keiner Wirtschaftlichkeit unter derzeitigen Rahmenbedingungen in naher Zukunft zu rechnen ist. Bei den anderen betrachteten Maßnahmen hat entweder eine Marktdurchdringung (teilweise gestützt durch Förderung) schon stattgefunden oder es wird deren Start in absehbarer Zukunft als gut möglich angesehen und die künftigen Marktdurchdringungsszenarien werden in Abhängigkeit der Entwicklung der energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen, des technologischen Fortschritts und möglicher Förderung als plausibel angesehen.

In der Abbildung 8 ist das THG-Minderungspotential der hier ausgewählten Power-to-X-Optionen dargestellt. Während der Beitrag an einer THG-Minderung im Jahre 2020 noch vergleichsweise gering ist (je nach Annahmen liegt er zwischen 2 bis 11 Mio. t THG-Emissionen) steigt er bis 2030 exponentiell an (auf 11 bis 45 Mio. t THG-Emissionen). Die Power-to-X-Optionen können im günstigen Fall dann im Jahre 2030 bereits einen Anteil von knapp 6 % an der erforderlichen THG-Minderung erreichen, die notwendig ist für einen Zielpfad von 90 % THG-Minderung bis zum Jahre 2050. In den Darstellungen sind die Potentiale der untersuchten Power-to-X-Optionen bis 2030 bei weitem noch nicht ausgeschöpft (so sind beispielsweise selbst im optimistischen Szenario erst 23 % des Pkw-Bestandes bis 2030 auf Elektrofahrzeuge umgestellt). Bei entsprechenden Anpassungen der Rahmenbedingungen könnte auch bis 2030 zumindest bei einigen Optionen ein noch höheres THG-Minderungspotential erreicht werden. Für die Erfüllung der langfristigen Klimaschutzziele ist die Erschließung der Potentiale darüber hinaus notwendig.

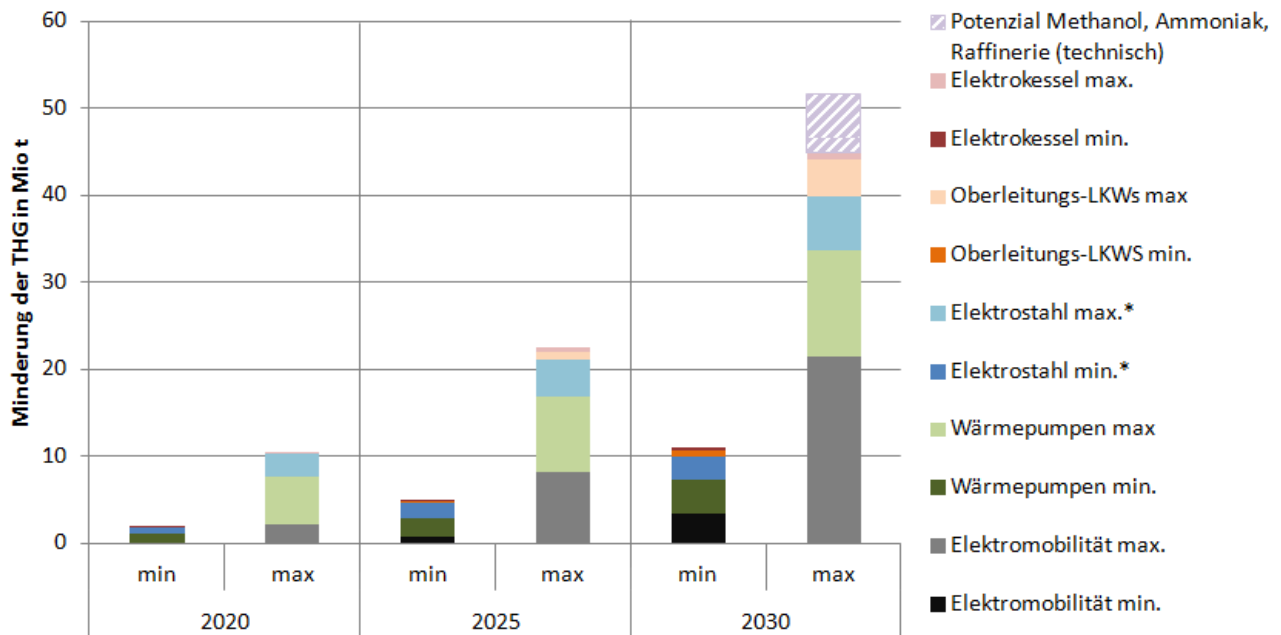
Die kurz- und mittelfristig größten THG-Minderungspotentiale findet man bei der Elektromobilität (Elektro-Pkws und LNfz, später dann auch Hybrid-Oberleitungs-Lkws, wobei bei letzteren allerdings wie oben bereits erwähnt die Datenbasis noch schwach ist) und der Wärmepumpe. Diese sind Techniken mit vergleichsweise geringen Lebensdauern und hohen Stückzahlpotentialen. Sie liegen außerdem nahe bei der Wirtschaftlichkeit von konventionellen Vergleichstechniken. Durch geeignete Fördermaßnahmen lässt sich hier der Markthochlauf beschleunigen.

Bei den Power-to-X-Optionen in der Industrie sind die langen Lebensdauern der technischen Anlagen und der in vielen Fällen noch große Abstand zur Wirtschaftlichkeit sowie gegebenenfalls die Gefahr von Auslandsverlagerungen noch deutliche Markthemmnisse. Hier müssten sich die Rahmenbedingungen, gegebenenfalls durch politische Maßnahmen, noch deutlich ändern. Eine Ausnahme im Industriesektor ist die Substitution von Hochofenstahl durch Elektrostahl, die einen bedeutenden Beitrag zur kurz- und mittelfristigen THG-Minderung liefern kann.

---

<sup>5</sup> Der Strommix wird dabei aus dem MKS-Szenario der Klimaschutzzszenarien abgeleitet (Öko-Institut, Fraunhofer ISI 2014).

Abbildung 8: THG-Emissionsminderungsbeitrag einzelner Power-to-X-Optionen (max. = optimistische Marktdurchdringung und erneuerbarer Strom; min. = moderate Marktdurchdringung und Strommix), eigene Darstellung



\* Minderungspotential bezogen auf den Status im Jahr 2014

Neben dem Beitrag zur THG-Minderung ist der Beitrag von Power-to-X-Optionen zur Erhöhung der Flexibilität im Strommarkt wichtig. Die theoretisch zur Verfügung gestellte Leistung bzw. das theoretische Lastverschiebepotential durch Elektromobilität, Wärmepumpen und Elektrokessel liegt in beiden Szenarien im Jahr 2030 über dem Leistungsangebot der heutigen Pumpspeicher, die heute die dominierende Speicheroption darstellen (Abbildung 9). In einer aktuellen Metastudie zu Speichern in Deutschland wird das Fazit gezogen, dass eine Mehrheit der ausgewerteten Studien einen zusätzlichen Kapazitätsbedarf, insbesondere im Bereich der Spitzenlastkraftwerke, feststellt. Dieser liegt zwischen 3-30 GW bis 2020/2022 bzw. 13-50 GW bis 2030 (Fraunhofer Umsicht, Fraunhofer IWES 2014). Dieser Bedarf kann zu einem guten Teil durch die analysierten Power-to-X-Optionen gedeckt werden.

Die theoretische Speicherkapazität dieser Optionen ist im Vergleich zu Pumpspeichern ebenfalls hoch (siehe Abbildung 10). Allerdings reichen sie eher als Tagesspeicher. Für flächendeckende extreme Situationen, z.B. extreme Windarmut bei inversen Wetterlagen über mehrere Tage benötigt man aber Speichervolumen im TWh-Bereich. Hier sind dann andere Optionen, z.B. chemische Speicher oder Gasturbinen, notwendig. Allerdings werden diese erst mittel- und langfristig bei hohen Anteilen erneuerbarer Energien in der Stromversorgung relevant.

In Abbildung 11 sind die Ergebnisse zur Entwicklung des Stromverbrauches ausgewählter Sektorkopplungsoptionen dargestellt. Entgegen dem politischen Ziel zunehmend Strom einzusparen, kommt es hier durch die vermehrte Nutzung der neuen Verbraucher zu einem zusätzlichen Strombedarf (bis 2030 zwischen 25 und 49 TWh). Dieser Anstieg ist vor allem durch den zusätzlichen Strombedarf der Elektrofahrzeuge getrieben. Käme es zudem früher zu einer Wirtschaftlichkeit bei der erneuerbaren Wasserstoffherstellung in der Industrie, könnte der insgesamt benötigte Strombedarf der

untersuchten Sektorkopplungsoptionen weiter auf 104 TWh steigen, dies entspricht rund 1/6 des aktuellem Bedarfs.

Abbildung 9: Speicherleistung bzw. Lastverschiebungspotential in GW einzelner Power-to-X-Optionen im Vergleich zu heutiger Leistung von deutschen Pumpspeicherkraftwerken (max. = optimistische Marktdurchdringung und erneuerbarer Strom; min. = moderate Marktdurchdringung und Strommix), eigene Darstellung

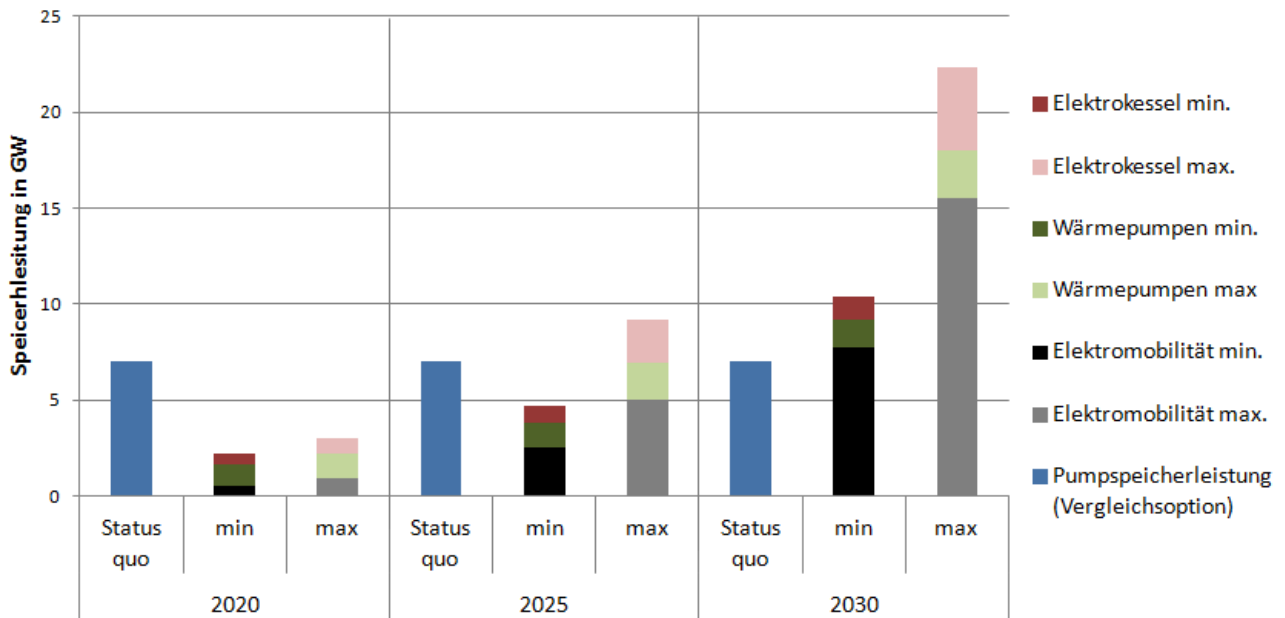
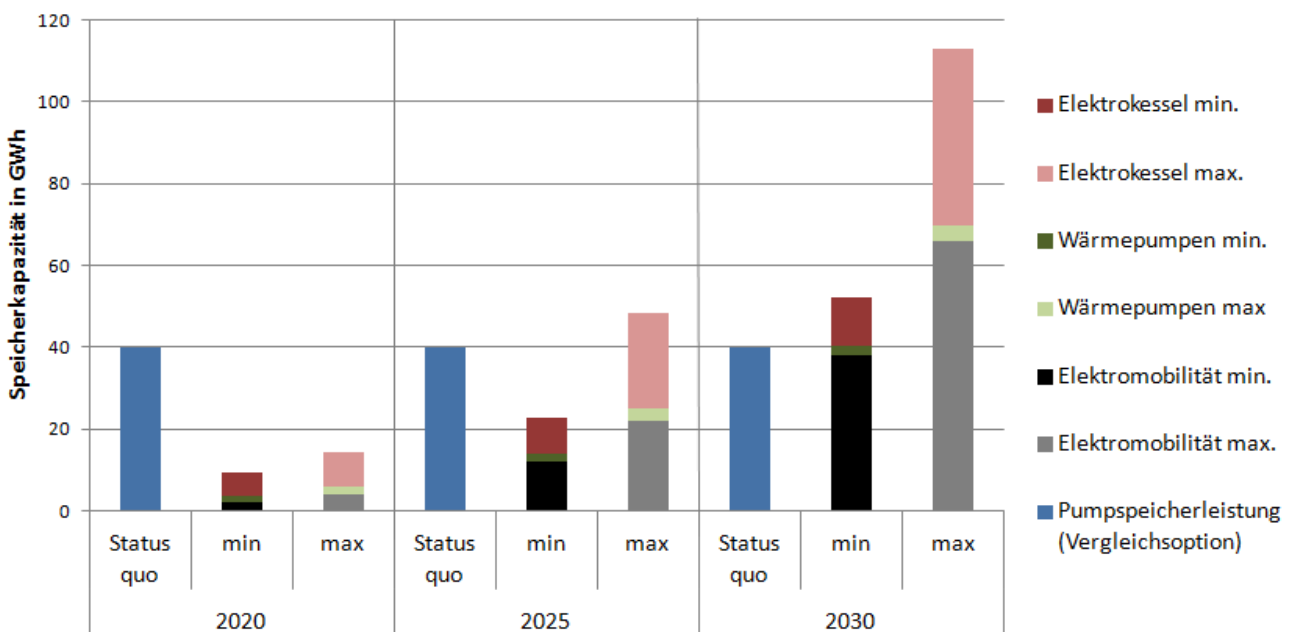


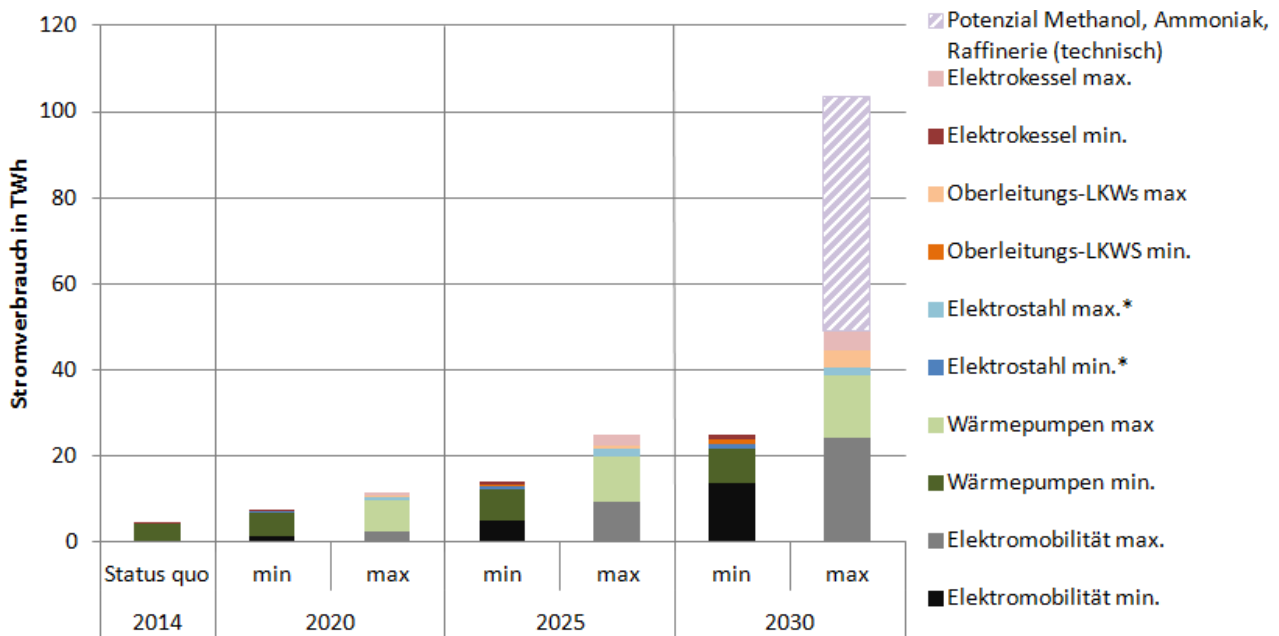
Abbildung 10: Speicherkapazität in GWh einzelner Power-to-X-Optionen im Vergleich zu heutiger Speicherkapazität von deutschen Pumpspeicherkraftwerken (max. = optimistische Marktdurchdringung und erneuerbarer Strom; min. = moderate Marktdurchdringung und Strommix), eigene Darstellung



Dem erhöhten Stromverbrauch steht jedoch auch ein Potential zur Einsparung an fossiler Endenergie gegenüber. In Abbildung 12 ist zu erkennen, dass durch den zusätzlichen Einsatz von Strom über die Zeit zunehmend fossile Endenergie eingespart werden kann. Die Elektrostahlherstellung leistet neben Wärmepumpen und Elektromobilität jeweils einen bedeutsamen Beitrag zum Einsparpotential. Das Einsparpotential an fossiler Endenergie steigt von 26 bis 45 TWh in 2020 auf 85 bis 179 TWh in 2030 an. Bei den Ammoniak-, Methanol- und Raffinerie-Power-to-X-Optionen käme es insbesondere zur Einsparung stofflich genutzter Energieträger, sodass das Einsparpotential in der Summe auf 237 TWh steigen könnte.

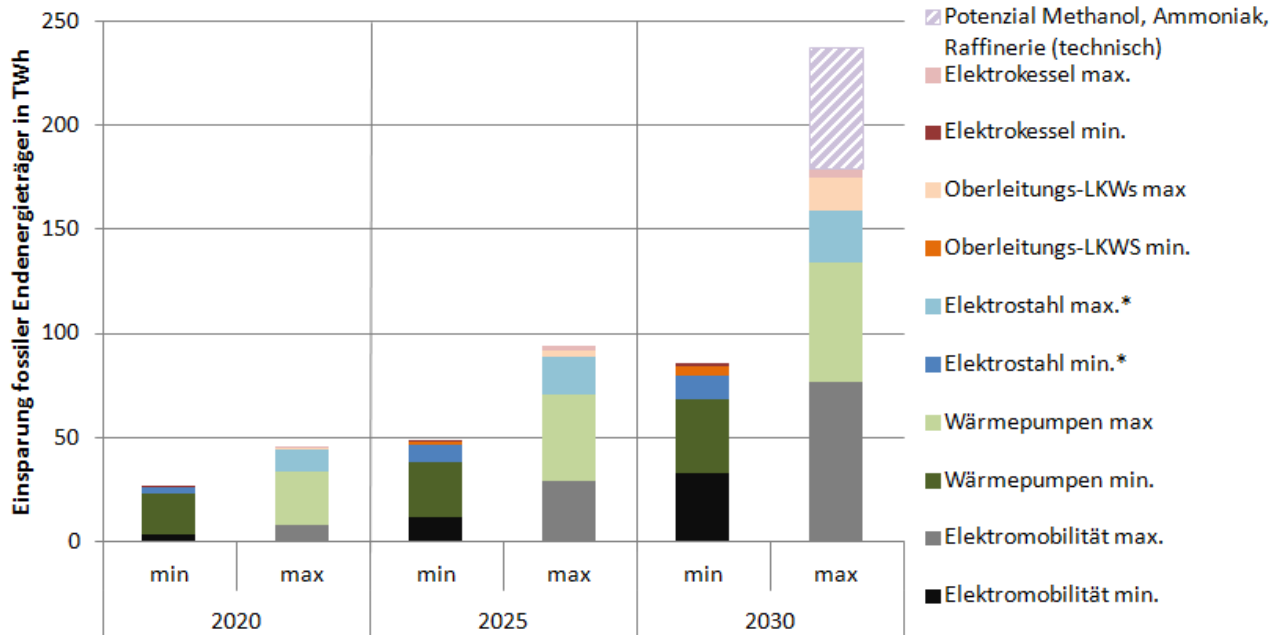
Wird die absolut eingesparte fossile Endenergie mit dem zusätzlich benötigten Strom verglichen, so liegt im Jahr 2030 die Energieeinsparung um den Faktor 2 bis zu viermal höher als der Strommehrverbrauch. Insbesondere bei Elektrostahl und Wärmepumpen ist die eingesparte absolute Energiemenge (also eingesparte fossile Endenergie im Vergleich zum zusätzlichen benötigten Strom) hoch.

Abbildung 11: Stromverbrauch (insgesamt) einzelner Power-to-X-Optionen (max. = optimistische Marktdurchdringung und erneuerbarer Strom; min. = moderate Marktdurchdringung und Strommix), eigene Darstellung



\* Minderungspotential bezogen auf den Status im Jahr 2014. Im Sinne der Definition von Sektorkopplungsoptionen in Kapitel 2, wird nur die künftig anstehende Substitution, die klimapolitisch motiviert sind und die mit Prozess- und Produktinnovationen einhergehen, als Sektorkopplungsoption angesehen. Daher wird die Bezugsgröße im Jahr 2014 auf 0 TWh festgelegt.

Abbildung 12: Einsparung fossiler Endenergie einzelner Power-to-X-Optionen (max. = optimistische Marktdurchdringung und erneuerbarer Strom; min. = moderate Marktdurchdringung und Strommix), eigene Darstellung



\* Minderungspotential bezogen auf den Status im Jahr 2014

## 5 Quellenverzeichnis

Albrecht, Uwe; Altmann, Matthias; Michalski, Jan; Raksha, Tetyana; Weindorf, Werner (2013): Analyse der Kosten erneuerbarer Gase. Hg. v. Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, zuletzt geprüft am 05.08.2014.

Baumann, Christoph; Geschermann, Kilian; Hüttenrauch, Jens; Köppel, Wolfgang; Müller-Syring, Gert; Steffens, Philipp Jonathan et al. (2014): Studie "Nutzen von Smart-Grid-Konzepten unter Berücksichtigung der Power-to-Gas-Technologie". Unter Mitarbeit von Albert Mose, Markus Zdrallek, Hartmut Krause und Frank Graf. Hg. v. DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., zuletzt geprüft am 03.06.2015.

Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) (Hg.) (2014): Amtliche Mineralöl- und Erdgasdaten für die Bundesrepublik Deutschland. Online verfügbar unter [http://www.bafa.de/bafa/de/energie/mineraloel\\_rohoel/amtliche\\_mineraloel\\_und\\_erdgasdaten/2014/index.html](http://www.bafa.de/bafa/de/energie/mineraloel_rohoel/amtliche_mineraloel_und_erdgasdaten/2014/index.html), aufgerufen am 27.07.15.

Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V. (Hg.) (2013): BWP-Branchenstudie 2013. Szenarien und politische Handlungsempfehlungen. Berlin. Online verfügbar unter [http://www.waermepumpe.de/uploads/tx\\_bwppublication/2013-11-20\\_Branchenprognose\\_2013.pdf](http://www.waermepumpe.de/uploads/tx_bwppublication/2013-11-20_Branchenprognose_2013.pdf), aufgerufen am 27.07.15.

Dena, Total (2012): Verkehr. Energie. Klima. - Alles Wichtige auf einen Blick. Berlin. Online verfügbar unter [http://www.dena.de/fileadmin/user\\_upload/Projekte/Verkehr/Dokumente/Daten-Fakten-Broschuere.pdf](http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Projekte/Verkehr/Dokumente/Daten-Fakten-Broschuere.pdf), aufgerufen am 27.07.15.

EEWärmeG2011: Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-Wärme-Gesetz - EEWärmeG)



EnEV2014: Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV)

Fleiter, Tobias; Schlomann, Barbara und Eichhammer, Wolfgang (Hg.)(2013): Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen industrieller Prozesstechnologien - Einsparpotentiale, Hemmnisse und Instrumente. Stuttgart. Online verfügbar unter [http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/x/de/publikationen/Umweltforschungsplan\\_FKZ-370946130.pdf](http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/x/de/publikationen/Umweltforschungsplan_FKZ-370946130.pdf), aufgerufen am 27.07.15.

Fraunhofer Umsicht, Fraunhofer IWES (2014): Metastudie »Energiespeicher«, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi). Online verfügbar unter <http://www.umsicht.fraunhofer.de/content/dam/umsicht/de/dokumente/pressemitteilungen/2015/Abschlussbericht-Metastudie-Energiespeicher.pdf>, aufgerufen am 27.07.15.

Hacker et al. (2011): Marktpotentiale und CO<sub>2</sub>-Bilanz von Elektromobilität. Arbeitspakete 2 bis 5 des Forschungsvorhabens OPTUM. Berlin 2011. <http://www.oeko.de/oekodoc/1338/2011-002-de.pdf>

Müller-Syring, Gert (2013): Entwicklung von modularen Konzepten zur Erzeugung, Speicherung und Einspeisung von Wasserstoff und Methan ins Erdgasnetz. Hg. v. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfachs e.V.

Nitsch, Joachim; Pregger, Thomas; Scholz, Yvonne; Naegler, Tobias; Sterner, Michael; Gerhardt, Norman et al. (2010): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. "Leitstudie 2010". Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Stuttgart; Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES); Ingenieurbüro für neue Energien (IFNE), Teltow.

Öko-Institut, Fraunhofer ISI (2014): Klimaschutzszenario 2050 - 1. Modellierungsrunde, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Berlin. Online verfügbar unter <http://www.oeko.de/oekodoc/2065/2014-638-de.pdf>, aufgerufen am 27.07.15.

Smolinka, Tom; Günther, Martin; Garcke, Jürgen (2010): Stand und Entwicklungspotential der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien. Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme.

Töpler, J und Lehmann, J (2014): Wasserstoff und Brennstoffzelle. Berlin Heidelberg.

Umweltbundesamt (2014): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter [http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/07\\_2014\\_climate\\_change\\_dt.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/07_2014_climate_change_dt.pdf), aufgerufen am 27.07.15.

Wilken, Dennis; Würfel, Claus; Küter, Uwe; Smolinka, Tom; Götz, Manuel; Schollenberger, Dominik et al. (2014): Schlussbericht zum Verbundvorhaben „Speicherung elektrischer Energie aus regenerativen Quellen im Erdgasnetz - H<sub>2</sub>O-Elektrolyse und Synthese von Gaskomponenten“. Im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme „Technologien für Nachhaltigkeit und Klimaschutz - Chemische Prozesse und stoffliche Nutzung von CO<sub>2</sub>“. DVGW; KIT-EBI; ISE. Karlsruhe, zuletzt geprüft am 08.06.2015.