


# Power-to-X im Kontext der Energiewende und des Klimaschutzes in Deutschland

Franz Bauer\* und Michael Sterner

DOI: 10.1002/cite.201900167

 This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Um den Einfluss verschiedener Power-to-X-Verfahren auf die Transformation des deutschen Energiesystems und das Erreichen der Klimaschutzziele zu überprüfen, wurde ein sektorübergreifendes Energiesystemmodell entwickelt. Die daraus gewonnenen Ergebnisse zeigen: Für eine erfolgreiche Energiewende ist der Einsatz von Power-to-X in Zukunft unverzichtbar. Vor allem in Bereichen und Sektoren, in denen hohe Energiedichten erforderlich sind und nur wenig andere Optionen zur Defossilisierung vorhanden sind, werden Power-to-X-Technologien zwingend notwendig.

**Schlagwörter:** Energiesystem, Klimaschutzziele, Modellierung, Power-to-X

*Eingegangen:* 21. Oktober 2019; *revidiert:* 05. November 2019; *akzeptiert:* 25. November 2019

## Power-to-X in Context of Energy Transition and Climate Change Mitigation in Germany

In order to examine the impact of different Power-to-X technologies on the transformation of the German energy system and meeting the climate change mitigation goals, a cross-sectoral energy system model was developed. The results show that Power-to-X will be essential for a successful energy transition. Especially in applications where high energy densities are required and only few other options for defossilization exist, Power-to-X technologies become essential.

**Keywords:** Climate mitigation, Energy system, Modeling, Power-to-X

## 1 Einleitung

Für eine erfolgreiche Energiewende und das Erreichen der Klimaschutzziele wird die Nutzung von Power-to-X (PtX) in den Sektoren Industrie inkl. nichtenergetischer Verbrauch, Wärme und Verkehr in Zukunft unverzichtbar sein [1–4]. Die Entwicklung von PtX ist daher in hohem Maße vom Transformationspfad des zukünftigen Energiesystems abhängig. Um verschiedene PtX-Nutzungspfade hinsichtlich ihrer Rolle und ihres Beitrags zum Klimaschutz zu bewerten, wurde im Rahmen des Kopernikus-Projekts „P2X“ das Energiesystemmodell SPIKE entwickelt. Annahmen und Ergebnisse werden in diesem Beitrag vorgestellt und diskutiert.

## 2 Beschreibung des Energiemodells

Das Energiemodell besteht aus drei miteinander interagierenden Teilmodellen. Dies sind einerseits ein Grobmodell mit einer zeitlichen Auflösung von einem Jahr und andererseits ein stundenscharfes Feinmodell sowie ein Speichermodell. Der Modellierungszeitraum beginnt im Jahr 2015 und endet im Jahr 2050. Darüber hinaus ist die geografische Auflösung auf Deutschland begrenzt und es wird ein idealer Netzausbau angenommen (Kupferplatte).

Das Grobmodell basiert auf einer linearen Optimierung des Energiesystems mit minimalen volkswirtschaftlichen Kosten als Zielfunktion und diversen Nebenbedingungen (s. Abschn. 3). Es werden über 300 Technologiepfade in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr abgebildet, wobei der Strom- und Wärmebedarf gesondert für die Verbrauchssektoren Haushalte, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) sowie Industrie betrachtet wird. Ein besonderer Fokus liegt auf der energieintensiven Industrie und dem Verkehr, da hier häufig Energieträger mit hohen Energiedichten nötig sind und diese in einem weitgehend defossilisierten Energiesystem nach aktuellem Stand der Forschung nur durch PtX-Prozesse oder Biomasse bereitgestellt werden können [5]. Im Stromsystem werden alle in Deutschland gängigen fossilen und erneuerbaren Kraftwerkstypen berücksichtigt. Dies sind einerseits Kohle-, Gas- und Erdöl- sowie Kernkraftwerke und andererseits Wasserkraft, Windkraft, Photovoltaik, Geothermie und Biomasse. Die Verbrauchssektoren private Haushalte und GHD werden

---

Franz Bauer, Prof. Dr. Michael Sterner  
franz.bauer@oth-regensburg.de  
OTH-Regensburg, Forschungsstelle für Energienetze und Energiespeicher (FENES), Seybothstraße 2, 93053 Regensburg, Deutschland.

zusammengefasst modelliert. Hier dient ein exogen vorgegebener Wärme- und Strombedarf als Aktivitätsgröße. Als Wärmeerzeugungstechnologien sind verschiedene Heizkesselarten, Wärmepumpen und Power-to-Heat(PtH)-Systeme sowie Fernwärme und Geothermie integriert. Im Industriesektor werden besonders energieintensive Prozesse der Branchen Metallherzeugung, Grundstoffchemie, Papiergewerbe, Verarbeitung von Steinen und Erden, Nicht-eisenmetalle- und Gießereien, Glas und Keramik und das Ernährungsgewerbe abgebildet. Die Auswahl der Produktionsprozesse orientiert sich dabei an Fleiter et al. [6]. Als Eingangsgrößen werden die Produktionsmengen verwendet, mit denen anhand von spezifischen Energieverbräuchen der Energiebedarf berechnet wird. Die restlichen Industriebranchen werden aggregiert im Modell erfasst. Im Verkehrssektor erfolgt eine Aufteilung nach Personen- und Güterverkehr, da hier unterschiedliche Aktivitätsgrößen (Personen- und Tonnenkilometer) sowie Kraftstoffanforderungen auftreten. Die analysierten Verkehrsträger sind Pkw, Lkw, Busse, Schiene, Schiffe und Flugzeuge mit jeweils unterschiedlichen Kraftstoffen.

Im Grobmodell erfolgt eine ganzheitliche Optimierung des Energiesystems über alle Sektoren, die über verschiedene Technologien der Sektorenkopplung miteinander verknüpft sind. Dies sind Power-to-X inkl. Power-to-Heat, Wärmepumpen, Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und die Elektromobilität. Das Ergebnis dieses Teilmodells sind jahresscharfe Energiemengen, die beginnend mit dem ersten Jahr, nacheinander dem Feinmodell übergeben werden. Hier wird die stündliche Energienachfrage und -erzeugung in dem vom Grobmodell übergebenem Jahr modelliert. Unter anderem wird der Kraftwerkeinsatz anhand einer Merit-Order mit den Grenzkosten als Kriterium bestimmt. Weiterhin werden alle zeit- und wetterabhängigen Erzeugungs- und Lastprofile sowie Flexibilitätsoptionen berücksichtigt. Das letzte Teilmodell wird aufgerufen, wenn die Flexibilitäten nicht ausreichen und bildet Energiespeicher ab. Hier werden zunächst Kurzzeitspeicher für die Überschüsse eingesetzt. Ist dessen Leistung zu gering oder die maximale Speicherkapazität erreicht, werden Langzeitspeicher herangezogen. Verbleiben zudem nicht-speicherbare Stromüberschüsse, werden diese als letzte Option exportiert. Liegen hingegen Energiedefizite vor, werden die nötigen Strommengen aus den Speichern entnommen oder es erfolgt ein Import. Die Importe und Exporte werden dabei vereinfacht durch die verfügbaren Übertragungskapazitäten und Kuppelstellen begrenzt.

Die Ergebnisse der Fein- und Speichermodellierung werden im letzten Schritt wieder dem Grobmodell übergeben und die jeweiligen Daten des Jahres überschrieben. Mit diesen neuen Startwerten wird das nächste Jahr im Grobmodell modelliert. Dieses Verfahren erfolgt iterativ bis zum Jahr 2050.

### 3 Annahmen und Nebenbedingungen für das Energiemodell

Die Entwicklung des zukünftigen Energiesystems hängt in hohem Maße von den gesetzten Klimaschutzziele ab. Diese werden zum einen durch einen Treibhausgasbudgetansatz nach WBGU [7] berücksichtigt. Zum anderen wird in Anlehnung an Benndorf et al. [8] festgelegt, dass eine vollständige Defossilisierung des Energiesystems sowie eine Treibhausgasreduktion von 95 % im Vergleich zu 1990 stattfinden soll. Das globale Kohlenstoffbudget wird so gewählt, dass die mittlere globale Oberflächentemperatur mit einer Wahrscheinlichkeit von über 66 % nicht über 1,5 °C gegenüber dem Wert vor der Industrialisierung ansteigt. Dafür wurde der IPCC-Sonderbericht „Global Warming of 1,5 °C“ [9] herangezogen. Da neben CO<sub>2</sub> auch alle anderen im Kyoto-Protokoll reglementierten Treibhausgase (THG) berücksichtigt werden, wird das Kohlenstoffbudget auf ein THG-Budget ausgeweitet. Dieses wird nach dem egalitären Prinzip der Chancengleichheit [10] aufgeteilt und anhand der Bevölkerungszahl für Deutschland bestimmt. Daraus resultiert ein Budget für Deutschland von rund 11,5 Gt CO<sub>2</sub>-e. Die nichtenergetischen Emissionen aus der Landwirtschaft, der Produktverwendung und Industrieprozessen sowie Abfall und Abwasser werden mit Ausnahme der industriellen Prozesse exogen vorgegeben und vom verfügbaren Emissionsbudget abgezogen.

Für das Bevölkerungswachstum wird die demografische Entwicklung bis zum Jahr 2050 aus der Variante 1 der 13. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung des statistischen Bundesamtes [11] übernommen. Zudem wird ein gesamtwirtschaftliches Wachstum von 1 % pro Jahr unterstellt.

Weiterhin ist der Ausbau der erneuerbaren Energien durch das technisch-ökologische Potenzial begrenzt, dass mit Daten aus Klaus et al. [12] und Günther et al. [13] zu insgesamt 1052 TWh berechnet wurde. Die energetische Nutzung von Biomasse erhält im Energiemodell einen Ausbaustopp, da diese mit einem hohen Flächenverbrauch verbunden ist und in Konkurrenz zur Ernährungssicherheit steht [14]. Im Jahr 2050 wird demnach nur noch Biomasse aus Abfall- und Reststoffen zugelassen. Negative Emissionen durch Geoengineering-Maßnahmen wie BECCS oder CCS werden in Anlehnung an WBGU [15] nicht in das Energiemodell implementiert.

Zudem werden jährliche Zu- und Abbaugrenzen für alle Technologiepfade anhand einer Fortschreibung historischer Werte und aktueller Arbeiten, ein Atomausstieg laut Atomgesetz vom 31. Juli 2011 sowie maximal mögliche Effizienzsteigerung in allen Sektoren angenommen. Der Verkehrsaufwand und Modal-Split stammen aus Bergk et al. [16], die neben Effizienzsteigerungen auch nichttechnische Maßnahmen (Verkehrsvermeidung und -verlagerung) berücksichtigen. Zuletzt wird eine Steigerung der CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreise basierend auf Luckow et al. [17] hinterlegt.

Im Modell sind darüber hinaus vielfältige Nebenbedingungen hinterlegt, die an dieser Stelle aufgrund der hohen Anzahl nicht detailliert aufgeführt und stattdessen in Folgepublikationen veröffentlicht werden. Diese sind überwiegend im Industriesektor verortet. Es handelt sich dabei beispielsweise um die maximalen Recyclingquoten von Glas-, Nichteisenmetall- und Papierprodukten, den Einsatz von Sekundärbrennstoffen in der Branche Verarbeitung von Steinen und Erden oder das verfügbare Stahlschrottaufkommen für die Sekundärstahlerzeugung.

## 4 Ergebnisse der Modellierung

Im Folgenden werden ausgesuchte Ergebnisse des Energie-modells dargestellt. Dies sind zum einen die verwendete Primärenergie zur Stromerzeugung und zum anderen die Endenergiemengen in den Verbrauchssektoren sowie die emittierten THG bis zum Jahr 2050. Bei den nachfolgend aufgeführten Ergebnissen handelt es sich nicht um Prognosen, sondern um ein mögliches Szenario, mit dem unter den getroffenen Annahmen die gesetzten Klimaziele erreicht werden könnten.

### 4.1 Stromerzeugung

Das Stromsystem erfährt aufgrund einer zunehmenden Elektrifizierung der Verbrauchssektoren und des Einsatzes von PtX-Technologien eine schnelle Veränderung hin zu erneuerbaren Energieträgern (s. Abb. 1). Wegen den hohen spezifischen Emissionen der Braun- und Steinkohlekraftwerke erfolgt der Kohleausstieg mit einem sehr steilen Gradienten bereits im Jahr 2028. Daraus wird ersichtlich, dass die Klimaschutzziele mit einem – wie bisher von der Bundesregierung geplanten – zehn Jahre späteren Kohleausstieg kaum zu erreichen sind. Als fossiler Energieträger mit dem niedrigsten Emissionsfaktor verbleibt Erdgas, das hauptsächlich in KWK-Kraftwerken genutzt wird, in geringen Mengen bis zum Jahr 2049 im Stromsystem erhalten. Die noch übrigen Erdgaskraftwerke werden im Zieljahr auf

die CO<sub>2</sub>-neutrale Power-to-Gas(PtG)-Technologie umgestellt, da hier als Resultat der getroffenen Annahmen keine energiebedingten Emissionen mehr zugelassen sind. Die Voraussetzung für klimaneutrales Gas ist der Einsatz von erneuerbarem Strom. Dies ist im Jahr 2050 im Model gegeben.

Hinsichtlich der regenerativen Erzeugungsanlagen besitzt die Windkraft den Hauptanteil von 62 % des Strommix im Jahr 2050. Hier dominiert die Windenergienutzung an Land. Weitere 24 % entfallen auf die Photovoltaik und 12 % auf Biomasse. Letztere besteht im Jahr 2050 vollständig aus regenerativen Abfällen und Reststoffen und wird überwiegend in KWK-Anlagen verstromt. Die dabei erzeugte Wärme wird über das Fernwärmenetz in den Verbrauchssektoren genutzt. Wasserkraftwerke leisten aufgrund der bereits heute fast ausgeschöpften Potenziale nur einen geringen Beitrag zur Stromerzeugung. Auch geothermische Anlagen werden wegen den hohen Stromgestehungskosten kaum eingesetzt.

Bis zum Jahr 2050 erfolgt ein vollständiger Ausbau der erneuerbaren Energien bis an die technisch-ökologischen Potenzialgrenzen. Darüber hinaus ist der Primärenergieeinsatz zur Stromerzeugung in den Anfangsjahren stark degressiv. Dies ist auf die zur Berechnung genutzte Wirkungsgradmethode zurückzuführen. Die Endenergie steigt im Gegensatz dazu aufgrund der notwendigen Strommenge für PtX um den Faktor 1,7 bezogen auf das Jahr 2015 an und entspricht im Jahr 2050 wegen dem hohen Anteil von Wind und Photovoltaik in etwa der Primärenergie.

Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass die Strommenge, die für PtX-Prozesse aufgewendet wird, bis zum Jahr 2030 noch relativ gering ist. Danach erfolgt ein steiler Anstieg von 40 TWh auf rund 250 TWh im Jahr 2050 (s. Abb. 2). Dies ist in etwa die Hälfte der aktuellen Nettostromerzeugung und 25 % der gesamten Stromerzeugung im Jahr 2050. Wird hier noch Power-to-Heat und Elektromobilität hinzugerechnet, beträgt der Strombedarf der Sektorenkopplung zwei Drittel des Gesamtstromverbrauchs. In Zukunft wird also ein hoher Stromanteil zur Sektorenkopplung über PtX-Verfahren benötigt. Die in Abb. 2 dargestellte Strommenge enthält sowohl die Synthesegasherstellung als auch die CO<sub>2</sub>-Gewinnung und andere Umwandlungsschritte wie die Fischer-Tropsch-Synthese.

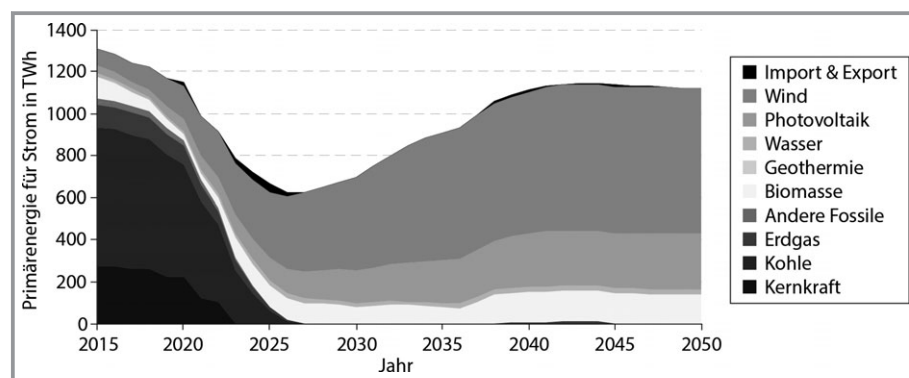


Abbildung 1. Primärenergie zur Stromerzeugung bis zum Jahr 2050.

### 4.2 Energiebedarf in den Sektoren Industrie, Verkehr und Wärme

Vor allem in der energieintensiven Industrie (s. Abb. 3) und im Verkehrssektor (s. Abb. 4) werden in Zukunft signifikante Mengen von PtX-Brenn-, Kraft- und Rohstoffen eingesetzt.

Der Endenergieverbrauch in der Industrie sinkt trotz steigendem Wirtschaftswachstum infol-

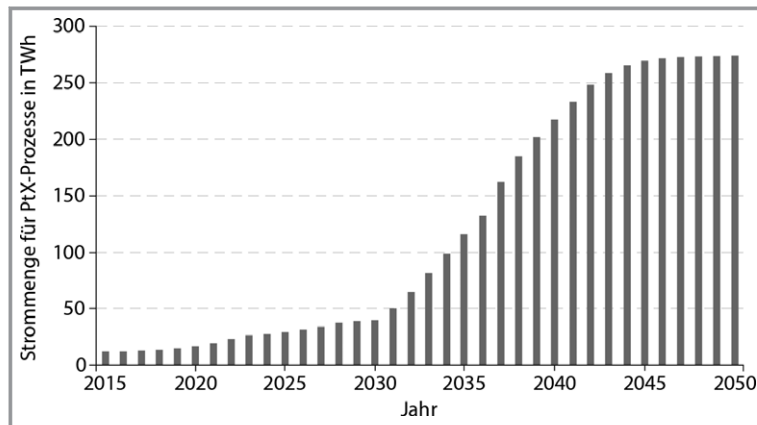


Abbildung 2. Strommenge für PtX-Prozesse bis zum Jahr 2050.

ge von Effizienzsteigerungen bei den Herstellungsprozessen der Grundstoffe und Waren von 760 TWh im Jahr 2015 auf 550 TWh im Jahr 2050. Da in der chemischen Industrie ein hoher nichtenergetischer Bedarf von kohlenstoffbasierten Rohstoffen existiert, bleibt fossiles Erdöl und andere Erdölfraktionen bis zum Jahr 2049 in der Industrie erhalten. Der Kohle- und Erdgasausstieg erfolgt hingegen weitgehend bis zum Jahr 2040. Biomasse in Form von erneuerbaren Abfällen wird primär in der Zement- und Papierbranche als Sekundärbrennstoff eingesetzt. Strom entwickelt sich in Zukunft zum bedeutendsten Energieträger in der Industrie. Vor allem in bei der Stahlherstellung steigt der Strombedarf aufgrund einer Umstellung der konventionellen Hochofenroute auf Schwammeisen aus der Direktreduktion und das Elektrostahlverfahren deutlich an. Die Kombination von Direktreduktion auf Erdgas- oder Wasserstoffbasis ist erforderlich, da mit Schrott als Eingangsmaterial lediglich Sekundäreisen zur Verfügung gestellt werden kann. Zudem reicht das verfügbare Schrottaufkommen nicht aus, um den gesamten Stahlbedarf im Jahr 2050 zu decken. Weiterhin führt die Substitution von fossil betriebenen Schmelzwannen in der Glasindustrie durch vollelektrische Wannen sowie die strombasierte Herstellung von Grundstoffchemi-

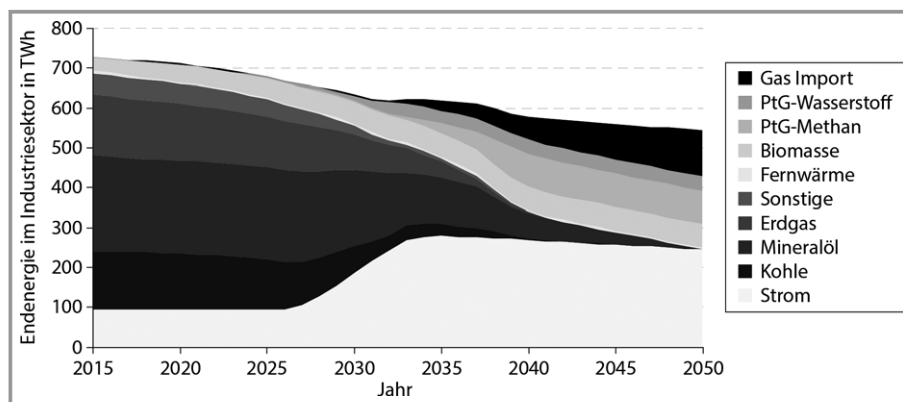


Abbildung 3. Endenergiebedarf im Industriesektor bis zum Jahr 2050.

kalien über die Power-to-Chemicals-Route zu einem Anstieg der elektrischen Energie in der Industrie. Die über PtG hergestellten Energieträger werden im Fall von Methan branchenübergreifend in Prozessen eingesetzt, in denen eine hohe Energiedichte erforderlich ist. PtG-Wasserstoff ist hingegen fast vollständig der Eisendirektreduktion in der Metallindustrie zuzuordnen. Da die Potenziale der erneuerbaren Stromerzeugungsanlagen beschränkt sind, ist zudem ein Teil der synthetischen Gase zu importieren.

Im Verkehrssektor ist die nachgefragte Endenergiemenge stark rückläufig. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass ein Modal-Shift von Pkw und Lkw auf klimaschonendere Verkehrsträger wie die Bahn stattfindet. Zum

anderen erhöht sich der Elektrifizierungsgrad im Transportsektor mit voranschreitender Zeit. Damit sinkt die Energiemenge für die Traktion, da elektrische Antriebe (Elektroautos, Elektrozüge oder Oberleitungs-Lkw) deutlich effizienter als Verbrennungsmotoren sind. In den ersten Jahren erfolgt die notwendige Emissionsreduktion im Verkehrssektor vorwiegend durch Effizienzsteigerungen sowie durch verkehrsverlagernde Maßnahmen. Erst ab dem Jahr 2030 setzen sich die Elektromobilität und mit PtX-Kraftstoff betriebene Fahrzeuge durch. Im Jahr 2050 entfallen etwa 81 TWh auf synthetische Kraftstoffe. Davon stammen 76 % aus der Power-to-Liquid-Route und lediglich 10 % aus der PtG-Route. Der hohe Anteil der flüssigen synthetischen Energieträger ist auf den Bedarf im Flug- und Schiffsverkehr sowie auf die geringeren Kosten der Transportmittel im Vergleich zu Gas- und Brennstoffzellenfahrzeugen zurückzuführen. Die direkte Stromnutzung findet hauptsächlich im Individual- und Schienenverkehr sowie im Güterverkehr in Oberleitungs-Lkw statt. Infolge des zu geringen nationalen Potenzials der regenerativen Energien müssen zudem 14 % der synthetischen Kraftstoffe importiert werden.

Die Endenergienachfrage für Wärme (ohne energieintensive Industrie) ist vor allem wegen Einsparungen bei den privaten Haushalten und im GHD-Sektor durch Dämmmaßnahmen und dem Einsatz von effizienteren Heizanlagen rückläufig (s. Abb. 5). Öl und Kohle werden nur noch bis zum Jahr 2025 für Heizzwecke verwendet. Erdgasheizungen hingegen sind wegen des niedrigeren Emissionsfaktors von Erdgas noch bis zum Jahr 2049 im Wärmemarkt vertreten. Aufgrund der hohen Wirkungsgrade sind in Zukunft im Bereich Wärme neben der Solarthermie hauptsächlich die elektrischen Erzeugungstechnolo-



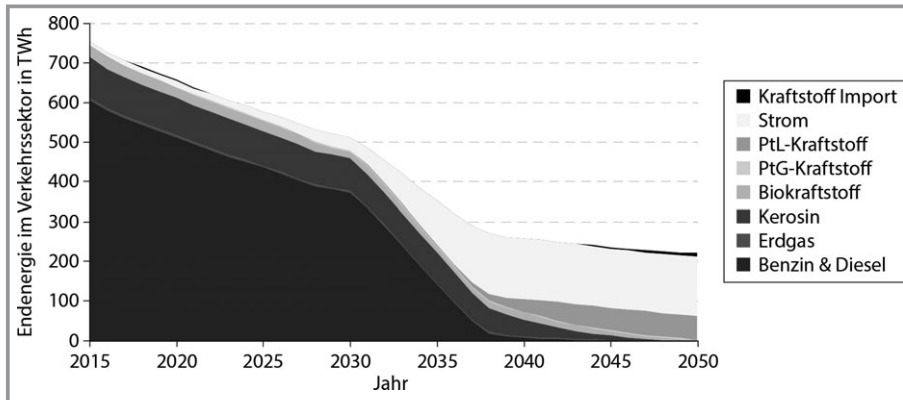


Abbildung 4. Endenergiebedarf im Verkehrssektor bis zum Jahr 2050.

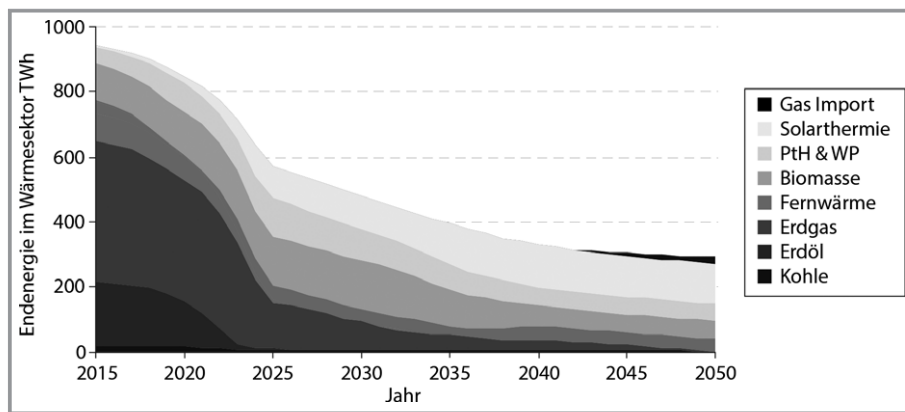


Abbildung 5. Endenergiebedarf im Wärmesektor bis zum Jahr 2050.

gien Power-to-Heat und Wärmepumpen (WP) vorzufinden. In Gegensatz dazu können sich in Deutschland erzeugte synthetische Brennstoffe nicht durchsetzen. Dies liegt an den niedrigeren Wirkungsgraden und an den höheren Wärmegestehungskosten im Vergleich zu anderen Technologien. Ein kleiner Teil des Wärmebedarfs ist über erneuerbare Gase aus dem Ausland zu decken.

### 4.3 Treibhausgasemissionen

Die Treibhausgasemissionen können unter den getroffenen Annahmen und Nebenbedingungen von 902 Gt CO<sub>2</sub>-e im Jahr 2015 auf 53 Gt CO<sub>2</sub>-e im Jahr 2050 reduziert werden (s. Abb. 6). Gegenüber dem Jahr 1990 ist dies eine THG-Minderung von 95,8 %. Das vorgegebene Emissionsbudget wird dabei vollständig aufgebraucht.

Vor allem durch den schnellen Kohleausstieg im Stromsektor bis zum Jahr 2028 sind die energiebedingten THG-Emissionen anfangs stark sinkend. Im Jahr 2030 werden dadurch insgesamt nur noch 282 Gt CO<sub>2</sub>-e emittiert. Dies sind

69 % weniger als im Jahr 2015 und 77 % weniger als im Jahr 1990. Der Stromsektor ist zu diesem Zeitpunkt nahezu vollständig defossilisiert, da in den Verbrauchssektoren zunehmend elektrische Energie aus erneuerbaren Quellen für direkte Stromanwendungen und PtX benötigt wird. Danach erfolgt eine flachere Abnahme der Emissionen infolge von schwieriger zu defossilisierenden Technologien – vor allem in Industrie- und Verkehrssektor, da hier hauptsächlich PtX-Verfahren notwendig sind, die bisher teilweise noch einen geringen Reifegrad und hohe Kosten aufweisen. Die energetischen Emissionen in den letzten Jahren der Modellierung resultieren hauptsächlich aus dem Einsatz von Kerosin und Erdgas.

Die nichtenergetischen Emissionen sind ebenfalls rückläufig und betragen im Jahr 2050 nur noch 38 % im Vergleich zum Jahr 2015. Rund 61 % davon sind auf den Landwirtschaftssektor zurückzuführen. Weitere 31 % werden prozessbedingt und überwiegend bei der Herstellung von

Zement und Kalk emittiert. Je 4 % der Emissionen entfallen auf die Abfallwirtschaft und die Produktverwendung. Da die nichtenergetischen Emissionen quasi nicht oder wie z. B. in der Landwirtschaft nur durch entsprechende Verhaltensänderungen vermieden werden können, zeigt sich an den Modellergebnissen, dass für das Erreichen der gesetzten

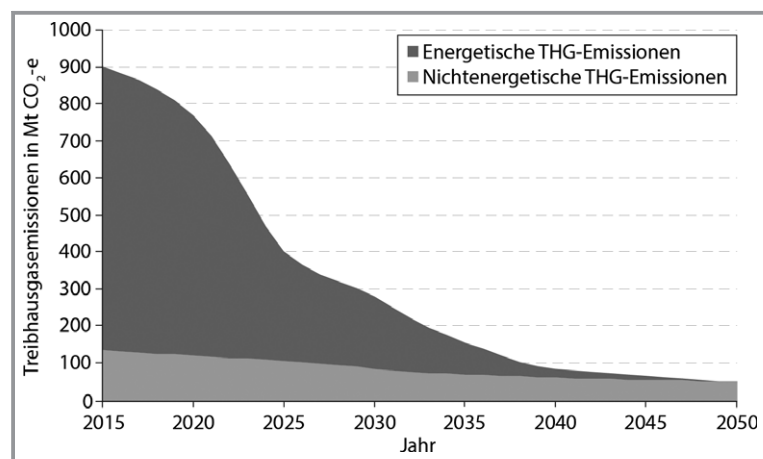


Abbildung 6. Kumulierte Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050.

Klimaschutzziele die Sektoren Energie, Gebäude, Verkehr und Industrie komplett klimaneutral werden müssen. Dafür ist in einigen Bereichen der Einsatz der PtX-Technologie unverzichtbar.

## 5 Zusammenfassung

Anhand der Modellierungsergebnisse konnte gezeigt werden, dass die Klimaschutzziele in Deutschland zu erreichen sind. Diese sind allerdings unter den getroffenen Annahmen zur Biomassenutzung und CCS nur durch den Einsatz von PtX umsetzbar. Der Kohleausstieg erfolgt bis zum Jahr 2028 und die Sektoren Energie, Gebäude, Verkehr und Industrie sind bis auf einige Industrieprozesse, in denen auch weiterhin zwangsläufig nicht-energetische Emissionen entstehen, klimaneutral. Zwei Drittel des Stromverbrauchs entfallen dann auf die Sektorenkopplung, ein Viertel auf Power-to-X. Über PtX wird zudem die vorhandene Infrastruktur mit erneuerbaren Brenn- und Kraftstoffen weitergenutzt.

Power-to-X (exklusive Power-to-Heat und Wärmepumpen) setzt sich hauptsächlich in den Bereichen durch, in denen nur wenig oder aufwendig realisierbare Alternativen verfügbar sind. Dies sind vor allem der Güter-, Flug- und Schiffsverkehr, die Stahl- und Chemiebranche sowie industrielle Anwendungen, in denen eine hohe Energiedichte notwendig ist. Hier ist PtX systemrelevant und für eine Defossilisierung des Energiesystems zwingend erforderlich. Entscheidend dafür sind die ausgewiesenen Potenziale der erneuerbaren Stromerzeugungsanlagen. Diese bestimmen zudem den Anteil der Energie- und Rohstoffimportmengen aus dem Ausland. Weiterhin ist festzuhalten, dass sich PtX in Bereichen, in denen effizientere Alternativen möglich sind, nur schwer etablieren kann. Dies ist deutlich am Beispiel der Wärmeversorgung ersichtlich.

## Abkürzungen

BECCS	Bioenergy with Carbon Capture and Storage
CCS	Carbon Capture and Storage
CO <sub>2</sub> -e	CO <sub>2</sub> -Äquivalente
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistung
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
PtG	Power-to-Gas
PtH	Power-to-Heat
PtL	Power-to-Liquid
PtX	Power-to-X
THG	Treibhausgas
WP	Wärmepumpe

## Literatur

- [1] F. Ausfelder, H. Dura, *1. Roadmap des Kopernikus-Projektes „Power-to-X“: Flexible Nutzung erneuerbarer Ressourcen (P2X) – Optionen für ein nachhaltiges Energiesystem mit Power-to-X-Technologien. Herausforderungen – Potenziale – Methoden – Auswirkungen*, Frankfurt 2018.
- [2] M. Sterner, *Bioenergy and renewable power methane in integrated 100% renewable energy systems: Limiting global warming by transforming energy systems*, Erneuerbare Energien und Energieeffizienz, v. 14, Kassel University Press, Kassel 2009.
- [3] M. Thema, F. Bauer, M. Sterner, *Renewable Sustainable Energy Rev.* **2019**, *112*, 775–787. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.030>
- [4] M. Thema, T. Weidlich, M. Hörl, A. Bellack, F. Mörs, F. Hackl, M. Kohlmayer, J. Gleich, C. Stabenau, T. Trabold, M. Neubert, F. Ortloff, R. Brotsack, D. Schmack, H. Huber, D. Hafenbradl, J. Karl, M. Sterner, *Energies* **2019**, *12* (9), 1670. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12091670>
- [5] C. Hochfeld, A. Jung, A. Klein-Hitpaß, K. Meyer, F. Vorholz, *Mit der Verkehrswende die Mobilität von morgen sichern: 12 Thesen zur Verkehrswende*, Agora Verkehrswende, Berlin 2017.
- [6] T. Fleiter, B. Schlomann, W. Eichhammer, *Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen industrieller Prozesstechnologien: Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente*, ISI-Schriftenreihe (Innovationspotenziale), Fraunhofer-Verlag, Stuttgart 2013.
- [7] *Kassensturz für den Weltklimavertrag – der Budgetansatz: Sondergutachten*, Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU), Berlin 2009.
- [8] R. Benndorf et al., *Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050*, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau 2014.
- [9] J. Rogelj, D. Shindell, K. Jiang, S. Fifita, V. Ginzburg, C. Handa, K. Haroon, S. Kobayashi, in *Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* (Ed: V. Masson-Delmotte), World Meteorological Organization, Genf 2018.
- [10] F. C. Matthes et al., *Zukunft Stromsystem. Kohleausstieg 2035: Vom Ziel her denken*, WWF Deutschland, Berlin 2017.
- [11] *Vorausberechneter Bevölkerungsstand: Deutschland, Stichtag, Varianten der Bevölkerungsvorausberechnung*, Destatis, Wiesbaden, 2018. [www.genesis.destatis.de/genesis/online/link/tabelleErgebnis/12421-0001](http://www.genesis.destatis.de/genesis/online/link/tabelleErgebnis/12421-0001)
- [12] T. Klaus, C. Vollmer, K. Werner, H. Lehman, K. Müschen, *Energieziel 2050: 100 % Strom aus erneuerbaren Quellen*, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau 2010.
- [13] J. Günther, H. Lehmann, U. Lorenz, K. Purr, *Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten*, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau 2017.
- [14] *Welt im Wandel: zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung*, Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU), Berlin 2009.
- [15] *Entwicklung und Gerechtigkeit durch Transformation: Die vier großen I: Sondergutachten*, Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU), Berlin 2016.
- [16] F. Bergk, K. Biemann, C. Heidt, W. Knörr, U. Lambrecht, T. Schmidt, L. Ickert, M. Schmied, P. Schmidt, W. Weindorf, *Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050*, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau 2016.
- [17] P. Luckow, E. Stanton, S. Fields, W. Ong, B. Biewald, S. Jackson, J. Fisher, *Spring 2016 National Carbon Dioxide Price Forecast*, Cambridge 2016.