

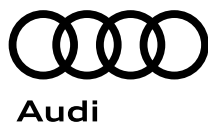


© Audi AG

ENERGIEWIRTSCHAFTLICHES KURZGUTACHTEN

NOTWENDIGKEIT UND CHANCEN FÜR POWER-TO-X-TECHNOLOGIEN

Im Auftrag von:



ENERGIEWIRTSCHAFTLICHES KURZGUTACHTEN

Notwendigkeit und Chancen für Power-to-X-Technologien

Erstellt von Prof. Dr.-Ing. Michael Sterner

Professor für Energiespeicher und Energiewirtschaft
an der Ostbayerischen Technischen Hochschule Regensburg (OTH
Regensburg)

Institut für Energiespeicher IFES
Franz-Mayer-Str. 1
93053 Regensburg

Review durch Prof. Dr.-Ing. Martin Kaltschmitt

Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft (IUE)
Technische Universität Hamburg (TUHH)

Regensburg, Oktober 2017

I Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | Aktuelle Ausgangslage | 2 |
| 1.1 | Klimapolitische Sachlage und Energiewende | 2 |
| 1.2 | Entwicklungen im Stromsektor | 3 |
| 1.3 | Entwicklung von Power-to-Gas in Deutschland und global | 5 |
| 2 | Energiewirtschaftliche Notwendigkeit von Power-to-X | 6 |
| 2.1 | Verwertungspfade von PtX innerhalb der Sektorenkopplung | 6 |
| 2.2 | Bedarf und Notwendigkeit von PtX in den einzelnen Sektoren | 8 |
| 3 | Wertschöpfungspotenziale und Chancen von Power-to-X | 14 |
| 3.1 | Globale Entwicklung und Chancen für den deutschen Export | 14 |
| 3.2 | Ideen für ein PtX-Markteinführungsprogramm | 16 |
| 4 | Kernaussagen | 18 |
| 5 | Literaturverzeichnis | 19 |

1 Aktuelle Ausgangslage

Im ersten Abschnitt wird auf die klimapolitischen Rahmenbedingungen, die energiewirtschaftliche Notwendigkeit von PtX und den aktuellen Status Quo von PtG-Anlagen eingegangen.

1.1 Klimapolitische Sachlage und Energiewende

Im Pariser Klimaschutzabkommen (COP 21) vom Dezember 2016 hat die internationale Staatengemeinschaft das Ziel beschlossen, den Anstieg der globalen Mitteltemperatur auf max. 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen. Ferner wird das Ziel angestrebt, die mittlere Erderwärmung auf 1,5 °C zu begrenzen. Das Abkommen wurde im November 2016 ratifiziert und ist damit völkerrechtlich bindend [1].

Auf die globalen Treibhausgasemissionen umgerechnet steht der Menschheit damit noch ein verbleibendes Budget von etwa 1000 GtCO_{2eq} (2 °C) bzw. 400 GtCO_{2eq} (1,5 °C) zur Verfügung [2], welches bei Beibehaltung der aktuellen globalen THG-Emissionen von ca. 40 Gt CO_{2eq} nach 25 Jahren (2 °C) bzw. 10 Jahren (1,5 °C) aufgebraucht ist. Es besteht also global und national ein immenser Zeitdruck und **Handlungsbedarf**, das Weltklima zu stabilisieren und die THG-Emissionen zu reduzieren.

In der EU und Deutschland sind die beiden Hauptmaßnahmen zur THG-Reduktion der Ausbau erneuerbarer Energien und die Steigerung der Energieeffizienz in allen Sektoren. Im Stromsektor liegt der Anteil erneuerbarer Energien Mitte 2017 bereits bei ca. 35 %, wohingegen in den Sektoren Wärme, Verkehr und NEV (Nichtenergetischer Verbrauch fossiler Rohstoffe, v. a. Grundstoffchemie) noch großer Handlungsbedarf besteht (s. Abbildung 1.1 und [1]). Laut Monitoringbericht zur Energiewende werden daher die Klimaschutzziele für 2020 voraussichtlich nicht erreicht [1].

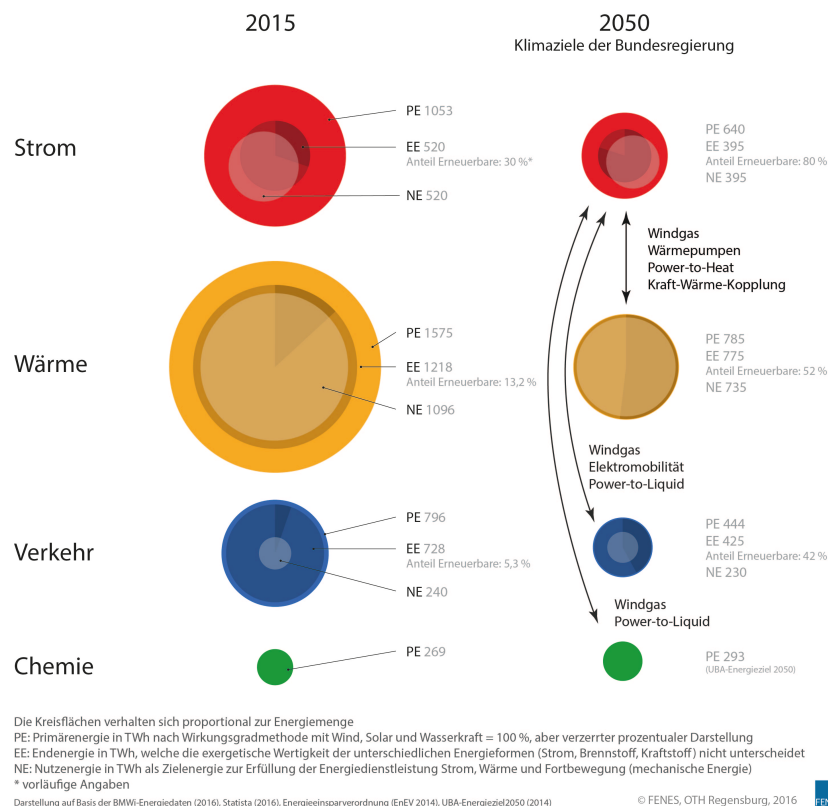


Abbildung 1.1: Primär-, End- und Nutzenergie in den Sektoren Strom (Energiewirtschaft), Wärme (v. a. Gebäude), Verkehr (Mobilität) und Chemie (NEV) für 2015 und 2050 nach den alten Klimaschutzziele der BRD vor dem Pariser Klimaschutzabkommen. Die Sektorenkopplung und damit PtX und Energiespeicher werden neben dem Ausbau von erneuerbaren Energien und Energieeffizienz zur tragenden Säule zukünftiger Energieversorgungsstrukturen. Quelle: [3]

Zur Umsetzung des Pariser Klimaschutzabkommens hat Deutschland den Klimaschutzplan 2050 beschlossen [4]. Darin wird klar, dass nicht nur der Stromsektor, sondern auch alle anderen Sektoren größere Beiträge zu leisten haben. Handlungsbedarf besteht demnach auch in der Erschließung der defizitären Sektoren mit günstigem Wind- und Solarstrom über die **Sektorenkopplung**. Hier spielt Power-to-X (PtX) in Verbindung mit Energiespeichern eine zentrale Rolle.

Als wesentliche Schlussfolgerungen aus dem Klimaschutzplan 2050 sind zu ziehen:

1. neben den Säulen „Ausbau erneuerbarer Energien“ und „Energieeffizienz“ wird die 3. Säule **„Sektorenkopplung“** und damit PtX von entscheidender Bedeutung für den Klimaschutz sein,
2. da die THG-Reduktion in Sektoren mit starker Landnutzung (v. a. Landwirtschaft) technisch limitiert sind, wird die Überführung der Sektoren Strom, Wärme, Verkehr und auch Teile der Grundstoffchemie (NEV) zu Nullemissionssektoren notwendig – v. a. im Hinblick auf das 1,5 °C Ziel. Entsprechend sind **bisherige Energieszenarien** mit erneuerbaren Anteilen von bis zu 80 % im Stromsektor und 50 % im Wärme- und Verkehrssektor samt Schlussfolgerungen (s. Abbildung 1.1) **überholt**. Hierzu zählen auch die Netzentwicklungspläne (NEP) für Strom und Gas.

Diese beiden Schlussfolgerungen sind wesentlich für die energiewirtschaftliche Bewertung und Einordnung: Eine 2 °C-Welt impliziert ein nationales THG-Reduktionsziel von 80 % bis 2050 bezogen auf 1990; eine 1,5 °C-Welt hingegen eine Reduktion um 95 %. Diese scheinbar kleine Differenz von 15 % ist von wesentlicher Bedeutung für die energiewirtschaftliche Umsetzung der Energiewende [5] [6] [7] und damit v. a. der Sektorenkopplung und PtX, da dadurch **PtX** in fast allen Sektoren zur **Notwendigkeit** wird (s. Abschnitt 2). Nur wenige Studien verbleiben für PtX-Anwendungen in Verkehr und Chemie auf dem fossilen Pfad und erhöhen im Gegenzug die Anstrengungen bei Biomasse und CCS für „negative Emissionen“.

Die Umsetzung des Pariser Klimaschutzabkommens stellt damit wesentlich höhere Anforderungen an die Energie- und Rohstoffpolitik als bislang diskutiert.

1.2 Entwicklungen im Stromsektor

Im **globalen Trend** und damit auch in Deutschland sind immer **niedrigere Preise** in Ausschreibungen für neue **Wind- und PV-Anlagen** zu registrieren. Diese liegen in Deutschland mittlerweile bei unter 6 €-ct/kWh und global bei ca. 2-3 €-ct/kWh [8] [9]. Damit ist Wind- und Solarstrom in Bezug auf die Vollkosten schon heute wettbewerbsfähig gegenüber Strom aus fossilen und nuklearen Quellen.

Die für deutlich höhere Anteile erneuerbaren Stroms an der gesamten Energieversorgung benötigte **Strominfrastruktur** kommt jedoch an ihre **Grenzen**, wenn diese Ziele in Deutschland erreicht werden sollen. Der notwendige Ausbau der Stromnetze stößt vielerorts auf heftigen Widerstand in der Bevölkerung, der sich in über 150 aktiven Bürgerinitiativen gegen Stromtrassen manifestiert. Entsprechend verzögert sich der Stromnetzausbau erheblich, wie Abbildung 1.2 im Vergleich von Soll und Ist-Zustand des Netzneubaus in Trassenkilometern zeigt.

Der verzögerte Netzausbau **erhöht** die **Energiesystemkosten** durch ansteigende Netznutzungsentgelte. Fehlende Netze tragen deutlich zur Erhöhung der Ausfallarbeit erneuerbarer Energien aufgrund von Einspeisemanagement-Maßnahmen bei. Dass erneuerbarer Strom zwar entlohnt, aber nicht genutzt wird, ist einer recyclingbewussten Nation nur schwer zu vermitteln. Lagen die Verluste dadurch im Jahr 2010 noch bei 127 GWh, hat sich die Energiemenge nach Zahlen der Bundesnetzagentur im Jahr 2015 mehr als verdreifacht. Die Entschädigungszahlungen haben sich im gleichen Zeitraum sogar um den Faktor 47 erhöht [7]. Im Jahr 2016 war dieser Trend zwar rückläufig, aber im Jahr 2017 ist bislang keine deutliche Trendwende erkennbar bzw. die netzinternen Maßnahmen sind ab einem gewissen Zeitpunkt ausgeschöpft.

Weitere Kosten, welche über die Netzentgelte an den Verbraucher umgelegt werden, sind Redispatchkosten¹ zur Behebung von **Netzengpässen**, wenn das Handelsergebnis des Strommarkts physikalisch nicht umgesetzt werden kann.

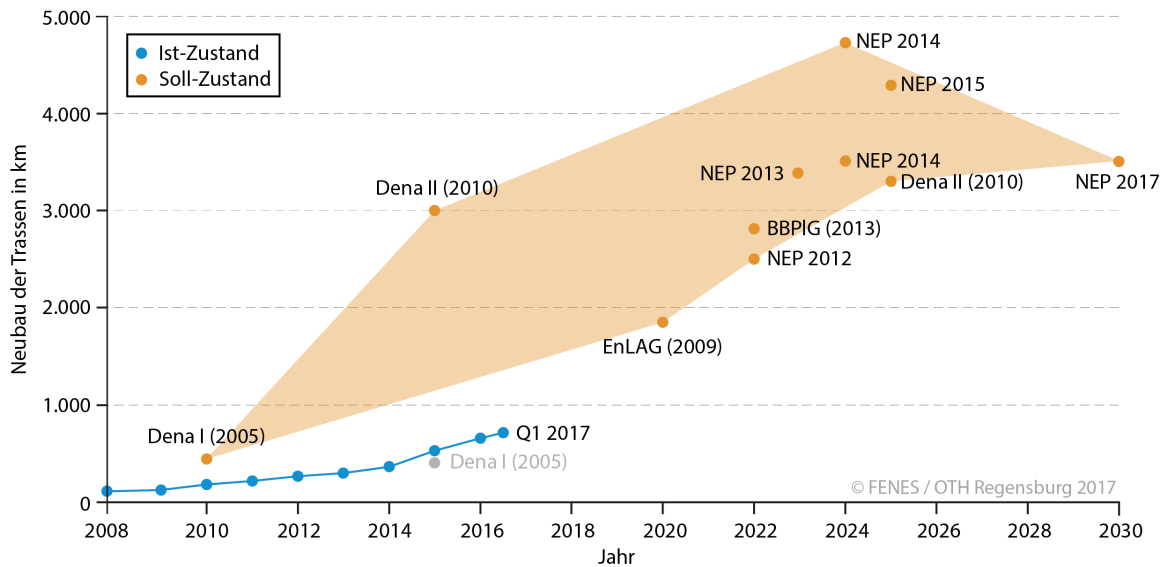


Abbildung 1.2: Gegenüberstellung des geplanten bzw. simulierten Netzausbaus und der umgesetzten Trassenkilometer. Quelle: eigene Darstellung auf Basis der Monitoring- und Quartalsberichte der BNetzA 2007-2016 und der Netzentwicklungspläne der ÜNB [7]

Die Entwicklung der Gesamtkosten aus **Redispatch** und **Einspeisemanagement** (s. Abbildung 1.3) verdeutlicht die Dringlichkeit der Aufgabe, **Redundanzen** zum Stromnetzausbau zu schaffen und weitere Flexibilitätsoptionen wie PtX verstärkt zu nutzen, um die stark steigenden Kosten einzudämmen und das Energiesystem insgesamt **resilienter** zu gestalten, als es auf nur eine Energieinfrastruktur (Stromnetze) auszurichten.

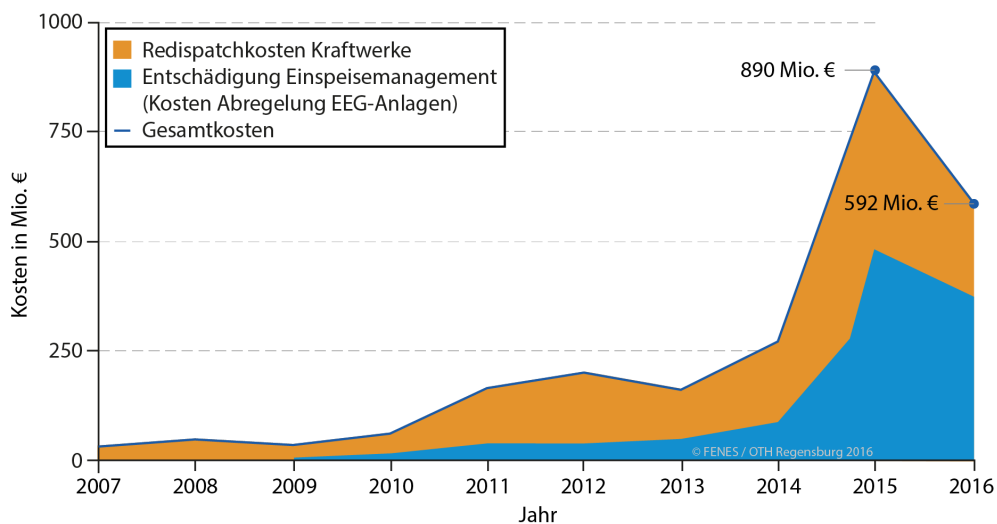


Abbildung 1.3: Entwicklung der Gesamtkosten aus Redispatch und Einspeisemanagement, Quelle: eigene Darstellung auf Basis der Monitoring- und Quartalsberichte der BNetzA 2007-2016 und der Netzentwicklungspläne der ÜNB [7].

In den letzten Jahrzehnten wurde energiepolitisch vorwiegend im Bereich der Erzeugung erneuerbarer Energien und Stromnetzausbau gehandelt, während die Bereiche anderer Infrastrukturen (z. B. Gas, Wärme), Energiespeicher- und -wandlungstechnologien mit Ausnahme der Forschung vernachlässigt wurden. Viele Studien zeigen mittlerweile auf, dass die **PtX-Technologien** der Sektorenkopplung ein **zentrales** [10] **Element** einer integrierten Strom-, Wärme-, Verkehrs- und Rohstoffwende sind [7].

¹ Redispatch: Abregelung an einem und gleichzeitiges Hochfahren von Kraftwerken an einem anderen Ende eines überlasteten Netzgebietes.

1.3 Entwicklung von Power-to-Gas in Deutschland und global

Über die PtX-Technologien Power-to-Gas, Power-to-Liquid, Power-to-Chemicals und Power-to-Heat wird es durch die Kopplung der Stromnetze mit der Gas-, Wärme- und Kraftstoffinfrastruktur möglich, dass günstiger Wind- und Solarstrom auch in anderen Sektoren außerhalb des Stromsektors einen Beitrag zur Dekarbonisierung leistet.

Ausgangspunkt für Power-to-X war die Energiewandlungs- und -speichertechnologie **Power-to-Gas** (PtG) [10], mit der erstmals eine gegenseitige Kopplung von Strom- und Gasnetzen diskutiert wurde. Die **Vorteile** liegen auf der Hand: die Gasinfrastruktur kann bereits heute die notwendigen Speichervolumina bieten, die das Stromnetz nicht hat. Zudem ist über PtG auch ein Energietransport im zweistelligen GW-Leistungsmaßstab möglich, der den Stromnetzausbau ergänzen kann. Bei Power-to-Gas wird zwischen PtG-Wasserstoff und PtG-Methan unterschieden, wobei beide Varianten ihre Vor- und Nachteile und daher ihre Berechtigung haben [3].

Viele **Energie- und Industrieunternehmen** haben diese Vorteile erkannt, sich zu **Netzwerken** zusammengeschlossen (dena PtG Plattform, Performing Energy, u. a.) und für einen dreistelligen Millionenbetrag über 30 Demonstrations- und Pilotanlagen errichtet. Auch die Bundesregierung hat über etliche **F&E-Projekte** bereits mehrere Millionen in diese Zukunftstechnologie investiert.

Damit hat sich Deutschland v. a. in der Kerntechnologie der Elektrolyse eine **Vorreiterschaft** gesichert. Die Entwicklung nimmt jedoch auch im Ausland zunehmend Fahrt auf. Die FENES-Datenbank weist folgenden aktuellen Stand auf (s. Abbildung 1.4):

- Anzahl der PtG-Anlagen: 32 in Deutschland, weitere 15 weltweit
- Installierte Leistung (Bestand): ca. 24,5 MW (BRD), ca. 30 MW kumuliert global
- Installierte Leistung (in Planung): ca. 3,7 MW in Deutschland, weitere 15,7 MW weltweit

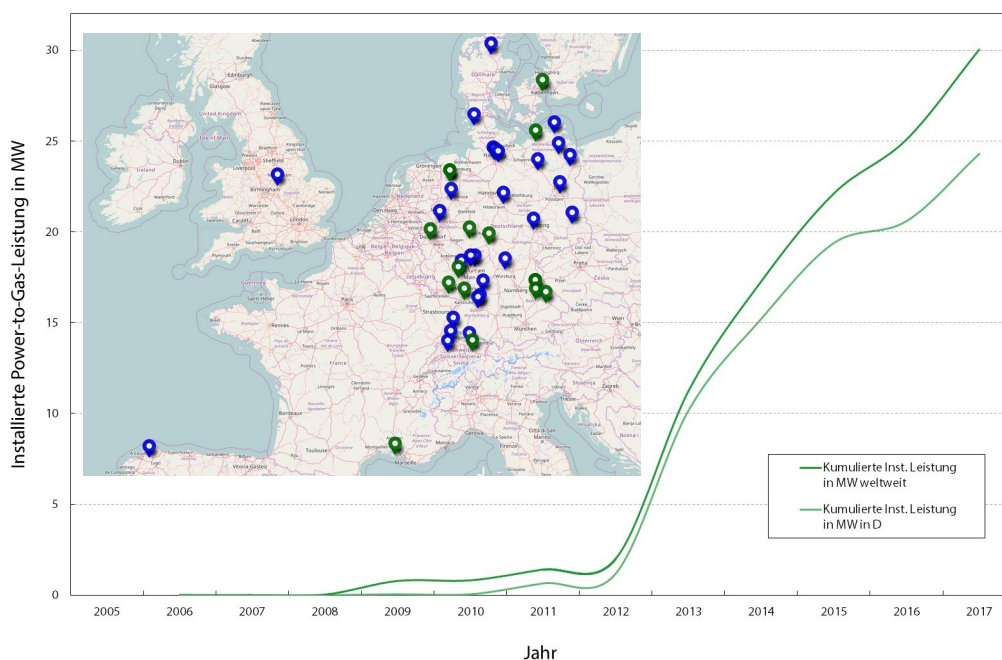


Abbildung 1.4: Entwicklung der installierten PtG-Leistung in Deutschland und global, ergänzt durch PtG-Standorte in Europa (blau: PtG-Wasserstoff; grün: PtG-Methan). Quelle: eigene Darstellung auf Basis der internen FENES-Datenbank.

Auch wenn diese Zahlen noch vergleichsweise gering sind, zeichnet sich durch die Notwendigkeit von PtX im globalen Klimaschutz und dem globalen Schwenk zu günstiger, aber fluktuierender Wind- und Solarenergie ein **Weltmarkt** ab (s. Abschnitt 2).

Um diese **Technologievorreiterschaft** zu **halten**, bedarf es mehr als reine Forschung- und Entwicklung, wie es am Beispiel von Batterietechnologien in Deutschland bereits erfahren wurde (s. Abschnitt 3).

2 Energiewirtschaftliche Notwendigkeit von Power-to-X

Im zweiten Abschnitt werden die Verwertungspfade von PtX-Technologien und ihre Notwendigkeit für Klimaschutz und Energiewende in den einzelnen Sektoren begründet.

2.1 Verwertungspfade von PtX innerhalb der Sektorenkopplung

Strom aus günstigen erneuerbaren Energiequellen (Wind, Solar, Wasserkraft, Geothermie etc.) wird zur Primärenergie aller Energiesektoren, weshalb die Sektorkopplung immer wichtiger wird.

Die **Sektorenkopplung** (auch Sektorkopplung) beschreibt die Kopplung von mehreren (mind. zwei) Sektoren, welche nach sekundären Energieträgern bzw. Endenergie (Strom, Wärme, Kraftstoffe, Gas etc.) oder Energieverbrauch bzw. Emissionssektoren (Energiewirtschaft, Gebäude, Verkehr, Landwirtschaft, Industrie) klassifiziert werden können. Eine übliche Einteilung ist eine Kombination dieser beiden Sichtweisen:

1. Strom-Wärme,
2. Strom-Gas,
3. Strom-Verkehr sowie
4. Strom-Chemie (vereinfacht für „nicht-energetischer Verbrauch fossiler Rohstoffe“).

Power-to-X ist ein **Sammelbegriff** für fast alle Technologien der Sektorenkopplung mit Ausnahme der Elektromobilität, welcher nach [3] definiert ist als:

„Die Wandlung von Strom als Primärenergie und Rohstoff in einen Energieträger, also in Wärme, Kälte, Produkt, Kraft- oder Rohstoff. Es ist ein Sammelbegriff für Power-to-Gas, Power-to-Liquid, Power-to-Fuel, Power-to-Chemicals, Power-to-Product und auch Power-to-Heat.“

Zur Definition von PtX gehört im weiteren Sinne auch Power-to-Heat. Hierfür gibt es jedoch bereits gesetzliche Regelungen, die den Einsatz von PtH-Anlagen fördern. Daher sind sie nicht vertiefter Gegenstand dieses Gutachtens. Kontrovers wird diskutiert, ob Elektrowärmepumpen zu Power-to-Heat und damit Power-to-X gehören.

Im engeren Sinn wurde Power-to-X erstmals in [11] verwendet als Sammelbegriff für die drei Technologiepfade: **Power-to-Gas**, **Power-to-Liquid** und **Power-to-Chemicals**. Damit eröffnen sich verschiedene Verwertungspfade für PtX, welche in Abbildung 2.1 und Tabelle 2.1 beschrieben sind:

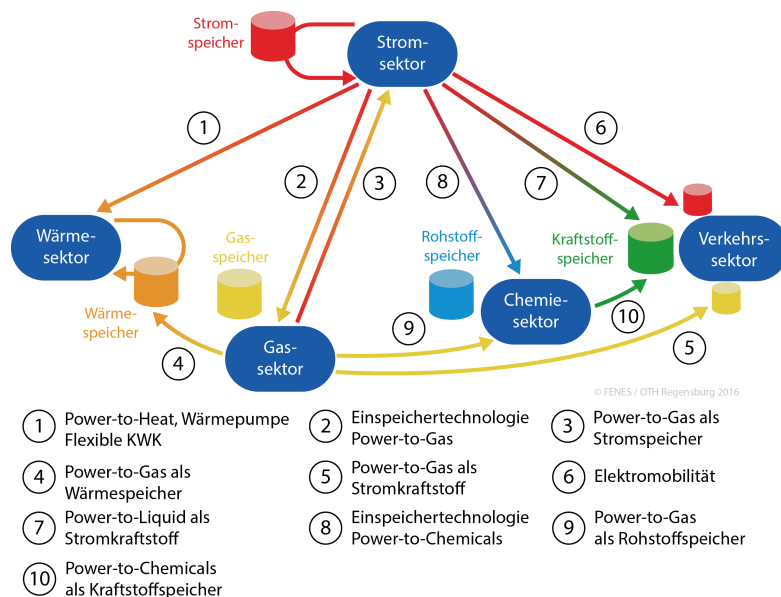


Abbildung 2.1: Definition der Sektorenkopplung und Verwertungspfade für PtX. Quelle: [7]

Tabelle 2.1: PtX-Technologiepfade innerhalb der Sektorenkopplung samt genutzte Energiespeicher und Infrastrukturen.

| Art der Sektorenkopplung | Pfad Nr. | Technologiepfad | Genutzte Energiespeicher | Genutzte Infrastruktur |
|--------------------------|----------|--|---------------------------------------|-------------------------|
| Strom-Wärme | 1 | Wärmepumpe | Wärmespeicher | Strom, Wärme |
| | | Power-to-Heat | | |
| | 1-3 | Kraft-Wärme-Kopplung | Wärmespeicher, Gasspeicher | Strom, Gas, Wärme |
| | 2-4 | Power-to-Gas (-to-Heat) | | |
| Strom-Gas | 2 | Power-to-Gas | Gasspeicher | Strom, Gas |
| | 2-3 | Power-to-Gas (-to-Power) | Gasspeicher (virtuell: Stromspeicher) | |
| Strom-Verkehr | 2-5 | Power-to-Gas | Gasspeicher | Strom, Gas |
| | 6 | Elektromobilität | Batteriespeicher | Strom |
| | 7 | Power-to-Liquid | Kraftstoffspeicher (Tank) | Strom, Mineralöl |
| | 10 | Power-to-Refinery (Wasserstoff in Benzin, Diesel, Kerosin) | Gasspeicher, Tank | Strom, Gas, Mineralöl |
| Strom-Chemie | 8 | Power-to-Chemicals (Power-to-Products) | Rohstoffspeicher, Gasspeicher | Strom, Gas, Chemie etc. |
| | 9 | Power-to-Gas | | |

Wesentlich für alle Pfade der Sektorenkopplung und damit PtX sind vier Punkte:

- der **Bezug von erneuerbarem Strom**: die Dekarbonisierung auf Basis von Graustrom ist kaum möglich. Das gilt für Wärmepumpen, Elektromobile und jede PtX-Anwendung gleichermaßen. Dafür nötig ist jedoch nicht eine physikalische Anbindung der Anlagen an EE-Anlagen, sondern ein bilanzieller Bezug in Echtzeit ausreichend, wie es in Kalifornien bereits praktiziert wird in Form eines Echtzeitmarktes für Erneuerbare. Der EE-Strombezug kann auch über neue Technologien wie eine Blockchain nachgewiesen werden,
- **CO₂ Verantwortung** bleibt bei Erstverursacher: wird für PtX CO₂ aus fossilen Quellen verwendet, bleibt die Verantwortung und damit die Emissionskosten beim Erstverursacher (z. B. Kohlekraftwerk). Ein sog. „Greenwashing“ fossiler Anlagen ist dadurch nicht möglich. Für das Klima ist die CO₂-Quelle im Gegensatz zum Strombezug irrelevant, da durch die PtX-Nutzung lediglich eine Wiederverwertung von CO₂ stattfindet (CO₂-neutral) und keine Mehremission,
- jede Form der Sektorenkopplung benötigt **Energiespeicher**: ob es Tanks für Kraftstoffe oder Rohstoffe, Batterien, Wärmepufferspeicher oder Gaskavernen sind, jeder Pfad benötigt Energiespeicher in der einen oder anderen Form. Diese Speicher variieren zwar deutlich im technologischen Reifegrad und den Kosten, sind aber für die Sektorenkopplung unabkömmlich,
- fast alle Formen der Sektorenkopplung benötigen **mehrere Infrastrukturen**: diese Infrastrukturen sind weitgehend schon vorhanden und können genutzt werden: (Fern)Wärmenetze, Gasnetze und Gasspeicher und Tankstellen samt erdölbasierter Kraftstoffinfrastruktur. Sie spielen eine wichtige Rolle in der technologischen Umsetzung der Sektorenkopplung. Die Stromnetzinfrastuktur alleine ist technisch nicht ausreichend. Zudem verfügt das Energiesystem durch mehr Infrastrukturen über mehr Freiheitsgrade, welche eine ökonomische Optimierung der Energiewende erleichtert, die gesellschaftliche Akzeptanz steigert und die Energieversorgung

resilienter gestaltet. Andere Infrastrukturen wie Wasserstoff oder Oberleitungen sind weitgehend noch nicht vorhanden,

- **Anstieg Strombedarf, Rückgang Primärenergiebedarf:** mit der Nutzung von Strom als primäre Energiequelle für die Dekarbonisierung anderer Sektoren, die bisher auf fossile Brennstoffe zurückgegriffen haben, steigt der Strombedarf stark an, während – zumindest nach der Wirkungsgradmethode – der Primärenergiebedarf anteilig sinkt, da z. B. 1 kWh EE-Strom über Wärmepumpen (COP = 3) und Elektromobile 3 kWh fossile Primärenergie ersetzt. In der Konsequenz ergibt sich ein deutlich höherer Ausbaubedarf an erneuerbarer Stromerzeugung im Inland und darüber hinaus der kostengünstigere Import von synthetischen PtX-Kraftstoffen aus dem Ausland von günstigen EE-Standorten. Hier ist wiederum die Nutzung vorhandener Infrastrukturen (Mineralöl, Gas) hilfreich und unterstützend.

2.2 Bedarf und Notwendigkeit von PtX in den einzelnen Sektoren

Verkehrssektor

Im Verkehrssektor gilt es zu unterscheiden in Personen- und Güterverkehr bzw. in Straßen-, Schienen-, Schiffs- und Flugverkehr. Allen gemein sind punkto Verkehrswende zwei grundlegende Aussagen:

1. der technisch effizienteste Antrieb auf Basis erneuerbarer Energien ist der direkte **Elektroantrieb**. Aufgrund von technischen Restriktionen (z. B. Energiedichte, Infrastruktur, Sicherheit) ist er jedoch nicht in allen Bereichen der Mobilität anwendbar,
2. das globale technische Potenzial von **Biokraftstoffen** ist aufgrund von Landnutzungskonkurrenzen **begrenzt** und damit nicht ausreichend, um alle Verkehrsbereiche wie Flug- und Schiffsverkehr, Arbeitsmaschinen und Teile des Schwerlastverkehrs, die nicht direkt elektrifiziert werden können, klimaneutral zu gestalten [12] [13] [3].
Zudem gehen mit Anbaubiomasse auch direkte und indirekte Emissionen aus Landnutzungsänderungen einher, was deren Nachhaltigkeit und gesellschaftliche Akzeptanz einschränkt (die drei größten Biokraftstoffproduzenten Brasilien, Indonesien und Malaysia sind gleichzeitig die drei Länder mit den höchsten Emissionen aus Entwaldung).

Grundlegend gilt ebenso der Vorrang von Energieeffizienzmaßnahmen (Verkehrsvermeidung, Intermodalität) – analog zur Strom- und Wärmewende (Verbrauchsreduktion).

Viele Zukunftsszenarien zeigen daher einen **großen Bedarf** und damit eine Notwendigkeit an PtX-**Kraftstoffen** in Form von strombasierten gasförmigen Kraftstoffen (Wasserstoff, SNG) und strombasierten Flüssigkraftstoffen (Kerosin, Diesel, Benzin, OME, Ethanol, Methanol etc.), welche über PtG und PtL aus erneuerbarem Strom, CO₂ und Wasser gewonnen werden [13].

Relevante Verkehrsbereiche, auf welche die beiden genannten grundlegenden technischen Aussagen zur Notwendigkeit von PtX zutreffen sind v. a. der Flug- und Schiffsverkehr, aber auch Arbeitsmaschinen (z. B. Bauindustrie, Landwirtschaft) und Teile des Langstreckenverkehrs wie dem schweren Güterfernverkehr.

PtG und PtL kann ebenfalls eine technisch-ökonomisch sinnvolle Alternative zur reinen Elektrifizierung des Güterverkehrs (LKW und Eisenbahn mit Oberleitungen) sein, wenn der dafür notwendige Aufbau der Infrastruktur technisch schwierig oder teurer ist. Ein Beispiel dazu sind Wasserstoff-Brennstoffzellen-Züge auf nicht-elektrifizierten Schienenabschnitten [14].

In der technischen, ökonomischen und ökologischen Bewertung von Mobilitätspfaden ist die Einbeziehung aller Komponenten zentral: a) die Herstellung, Nutzung und das Recycling der Fahrzeuge; b) Herstellung und Nutzung der Energieträger und c) die Herstellung und Nutzung der notwendigen Infrastruktur. Dadurch ergeben sich im Lösungsraum der verschiedenen Pfade selbst im motorisierten Individualverkehr erhebliche Anteile von Wasserstoff- und Gasmobilität in Ergänzung zur Elektromobilität [15].

Chemiesektor (NEV)

Im Bereich des nichtenergetischen Verbrauchs fossiler Rohstoffe (NEV) besteht in der Umsetzung der nationalen und globalen THG-Reduktionen ein erheblicher Bedarf an PtX-Technologien.

Die chemische Industrie hat einen großen Bedarf an fossilen Rohstoffen, der bei der Transformation zu einem erneuerbaren Energiesystem ebenfalls durch erneuerbaren Rohstoffe zu substituieren ist. Dies betrifft vorwiegend die Grundstoffchemie, welche bislang v. a. Erdöl und Erdgas als Rohstoff für ihre Produkte verwendet.

Durch PtX können über Wasserstoff / Synthesegas viele Grundstoffe klimaneutral hergestellt werden:

- **Ethylen** (Ethen), die mengenmäßig meistproduzierte organische Grundchemikalie in Deutschland (5,1 Mio. t/a) [16], wird beispielsweise zu einem hohen Anteil für die Herstellung von Kunststoffen verwendet,
- **Ammoniak** (2,5 Mio. t/a) [16] wird über Stickstoff und Wasserstoff hergestellt und ist Grundchemikalie aller stickstoffhaltigen Verbindungen, so auch Salpetersäure, Harnstoff und Düngemittel,
- auch anderen Stoffe wie Essigsäure und Formaldehyd (aus Methanol) oder Feinchemikalien.

Aus heutiger Sicht sind PtX-Technologien bei limitierter vorhandener Biomasse der **einzige technische Weg**, Erdöl und Erdgas in diesem Bereich der Chemieindustrie zu ersetzen und dadurch die THG-Emissionen zu mindern. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit von PtX in der Rohstoffwende.

In weiteren Bereichen des nichtenergetischen Verbrauchs fossiler Rohstoffe, z. B. in der **Stahlindustrie** ist der Ersatz von Kohle nur begrenzt durch direkte Elektrifizierung möglich; der Einsatz von Holzkohle oder biogenem Wasserstoff aus Biomassevergasung und -vergärung ist potenziell wiederum begrenzt. Auch hier besteht daher ein Bedarf an PtX-Technologien, um mit stofflich genutztem PtG-Wasserstoff fossilen Kohlenstoff als Reduktionsmittel in der Eisenerzreduktion zu ersetzen, den entstehenden Sauerstoff zu nutzen und damit den Rohstoff Stahl klimafreundlicher herzustellen.

Stromsektor

Im Stromsektor gibt es zahlreiche Flexibilitätsoptionen zur Integration erneuerbarer Energien: a) Stromnetzausbau, b) Flexible Erzeuger, c) Flexible Lasten und d) Energiespeicher. Im Bereich der Langzeitspeicherung erhärtet sich die These, dass PtG dafür die national günstigste und effizienteste Technologie ist, um große Mengen an regenerativen Strom über Monate zu speichern und später wieder bereitzustellen. Entscheidend hierfür sind die sehr geringen Selbstentladungsraten und Speicherkapazitäten von Gasspeichern vs. alternativen Stromspeichern wie Pumpspeicher und Batteriekraftwerken. Zudem erfordert der nationale Kohleausstieg und damit verbundene Rückgang an gesicherter Leistung den Zubau von günstigen Spitzenlastkraftwerken wie Gaskraftwerken, welche über Langzeitspeicher mit PtG auch ohne fossile Gasimporte zuverlässig die Stromversorgung Deutschlands absichern [3].

Für den Bedarf an PtX, insbesondere PtG als Langzeitspeicher sind die Annahmen zum Stromnetzausbau, dem Stromin- und -export und das verbleibende CO₂-Budget (Kraftwerkspark) hochrelevant: wird ein vollständiger Stromnetzausbau zugrunde gelegt (**Marktintegration**), ist bis zum Jahr 2035 kaum ein marktbasierter Einsatz von PtG zu sehen. Wird ein verzögerter Stromnetzausbau angenommen, was aus heutiger Perspektive wie in Abschnitt 1 dargestellt der realitätsnahe Fall ist (**Netzintegration**), werden bis 2035 5 - 30 GW installierte netzdienliche PtG-Kapazitäten benötigt. Diese Kapazitäten können zusätzliche Vorteile in der Verteilnetzebene bieten. Bei hohem EE-Anteil von 80-95 % im Strommix, zeigen sich selbst im reinen marktseitigen Einsatz PtG-Kapazitäten von bis zu 40 GW [17] [18] [19] [20]. Die stark variierende Bandbreite der PtG-Kapazitäten zeigt die hohe Abhängigkeit von den zugrundeliegenden Annahmen und Betrachtungsweisen auf. Dennoch ist der grundlegende Bedarf vorhanden.

In einem 100 % regenerativen Stromsystem sind 60-70 GW an gesicherter Leistung aus Gaskraftwerken notwendig, welche mit PtG-Gas in der Rückverstromung (Ausspeicherung) betrieben werden - selbst bei Ausschöpfung aller anderen Flexibilitätsoptionen. Die dafür erforderliche PtG-Leistung (Einspeicherung) liegt bei ca. 44 GW [21] [22].

Zu ähnlichen Schlüssen kommt eine Studie von Energy Brainpool [23], welche illustrativ die **Dunkelflaute** von Januar 2006 (zwei Wochen, im Mittel 72,8 GW Residuallast, annähernd kein Wind- und Solarstrom) als meteorologische Grundlage für ein 100 % erneuerbares Szenario untersucht haben: Über kurz- und mittelfristige Flexibilitätsoptionen wie Erzeugungs- und Lastmanagement und Kurzzeitspeichern (Batterien, Pumpspeicher) kann der Strombedarf der Dunkelflaute von 23 TWh nicht gedeckt werden. Es sind 43 GW an PtG-Leistung (Einspeicherung) nötig, welche auf ca. 17 % (44 TWh) der heute verfügbaren deutschen Gasspeicherkapazitäten zurückgreift. Verschärft wird dieses Problem der Dunkelflaute durch zusätzliche Lastspitzen aus der direkten Elektrifizierung von Wärme (Wärmepumpen) und Verkehr (E-mobilität), welche durch den eigenen Einsatz von Kurzzeitspeichern (Wärmespeicher, Batterien) nicht gelöst werden kann. Dies unterstreicht die Bedeutung von PtG zur Gewährleistung der **Versorgungssicherheit**.

Die Extremsituation einer Dunkelflaute ist in etwa alle zwei Jahre zu erwarten. Ein europäischer Ausgleich über die Kuppelstellen kann nur einen geringen Beitrag zur Deckung der Dunkelflaute leisten, da sich diese in 2006 über **Kontinentaleuropa** erstreckte. Selbst Studien, die eine 100 % europaweite EE-Versorgung auf Basis einer „Kupferplatte“ berechnen, kommen zum Schluss, dass bei einem europäischen Ausgleich (Radius 3000 km) nach wie vor ein Backup-Bedarf an Langzeitspeichern für ca. 20 % des Strombedarfs besteht [24].

Die **Kosten** der Stromversorgung steigen gegenüber heute dadurch nicht. [25] kommt zum Schluss, dass die Kosten durch PtG ab einem Anteil von 70 % EE-Strom (nach dem Jahr 2040) bei Annahme von Emissionszertifikatspreisen für die aus Klimasicht notwendigen 100 € / t CO_{2eq} sogar sinken; selbst bei unbegrenzt und kostenlos verfügbaren Kurzzeitflexibilität bis zu 48 h. Darüber hinaus kann die Wirtschaftlichkeit der PtG-Anlagen durch den Einsatz am Regelleistungsmarkt verbessert werden.

Zu ähnlichen Schlüssen kommt eine aktuelle Studie von Frontier Economics und IAEW zur Sektorenkopplung Strom-Gas: durch die Einbeziehung der Gasinfrastruktur inkl. PtG werden die **Kosten** der **Dekarbonisierung** gesenkt und die **Versorgungssicherheit** erhöht [26].

Ohne **Langzeitspeicher** für Zeiten mit wenig Wind- und Solarstrom (**Dunkelflaute**) wird eine vollständige Dekarbonisierung des Stromsektors nicht möglich. Aus heutiger Sicht ergibt sich daraus die Notwendigkeit für **PtG**, welche in Kombination mit der **Gasinfrastruktur** die erforderlichen Speicherkapazitäten bereits heute aufweist und darüber hinaus national gesehen die einzige technisch realisierbare Option hierfür ist. In der Theorie bestehen noch weitere technische Möglichkeiten (LOHC in Mineralölinfrastrukturen, Lageenergiespeicher etc.), die jedoch aus heutiger Sicht im Vergleich zur Option PtG und Gasinfrastruktur ökonomisch weniger vorteilhaft sind [3].

Wärmesektor

Eine Wärmewende ohne PtX (im erweiterten Sinne mit PtH) wird in keinem bekannten Szenario abgebildet und ist damit kaum denkbar [26] [27] [3] [28]. In Szenarien für den klimaneutralen Wärmemarkt 2050 ergeben sich folgende Ergebnisse zu PtG in einer kostenoptimalen Wärmeversorgung [6]:

- **Wohn- und Nichtwohngebäude** benötigen für Raumwärme und Warmwasser überwiegend Elektrowärmepumpen, ergänzt durch über **PtG-Gase** befeuerte **KWK-Anlagen** in hochverdichteten Räumen und Altbauten, die nur schwer zu sanieren sind oder wo ein vollständiger Austausch bestehender Heizungssysteme und eine Umrüstung auf Niedertemperatursysteme oder kalten Nahwärmenetzen zur Nutzung von Elektrowärmepumpen nicht möglich ist,
- **Prozesswärme** in der Industrie in Form von Dampf kann über PtH-Anwendungen in Kombination mit KWK und (PtG-)Gas im Temperaturbereich von 100 – 500 °C bereitgestellt werden. Bei Prozesswärme für Verfahren über 500 °C sind Hochtemperatur-Wärmepumpen (max. 140 °C) nicht nutzbar und monovalente Stromheizungen nicht ausreichend, woraus sich eine Notwendigkeit für monovalente Gasfeuerungsanlagen und somit **PtG** ableitet.

Trotz technisch maximaler Elektrifizierung über Power-to-Heat inkl. Elektrowärmepumpen ist ein Bedarf an PtG gegeben und damit auch in diesem Bereich notwendig.

Bedarf aller Sektoren

Der Bedarf an PtX (ohne PtH) und damit auch das Potenzial aller Sektoren ist in Abbildung 2.2 aus verschiedenen Studien, welche konform sind mit dem 1,5 °C-Ziel des Pariser Klimaabkommens (95 % - 100 % THG-Minderung) zusammengestellt.

Die Maximalwerte für alle drei Sektoren summieren sich zu **328 GW** PtX-Leistung; die Minimalwerte zu **100 GW**.

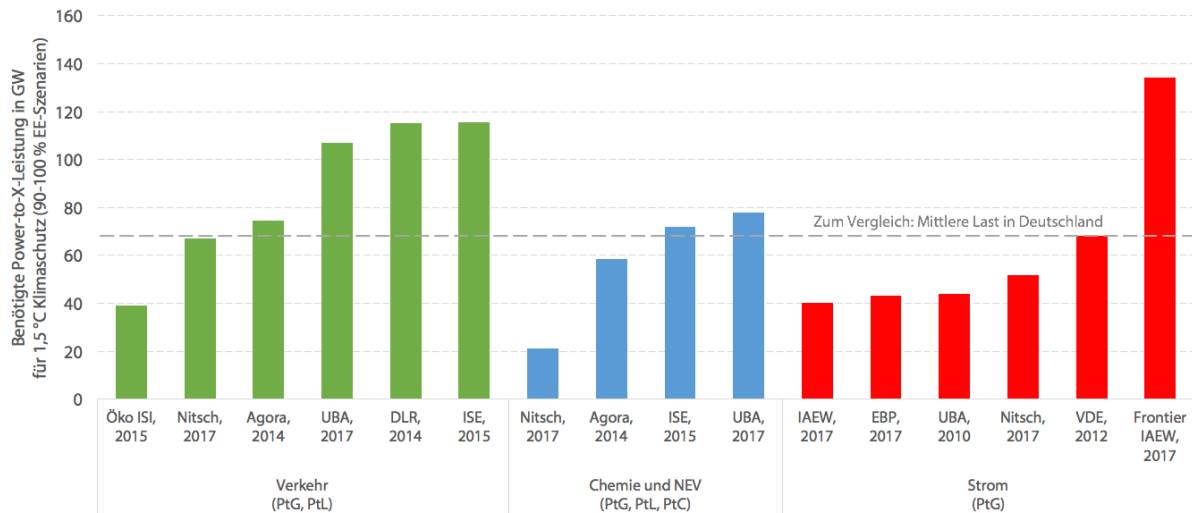


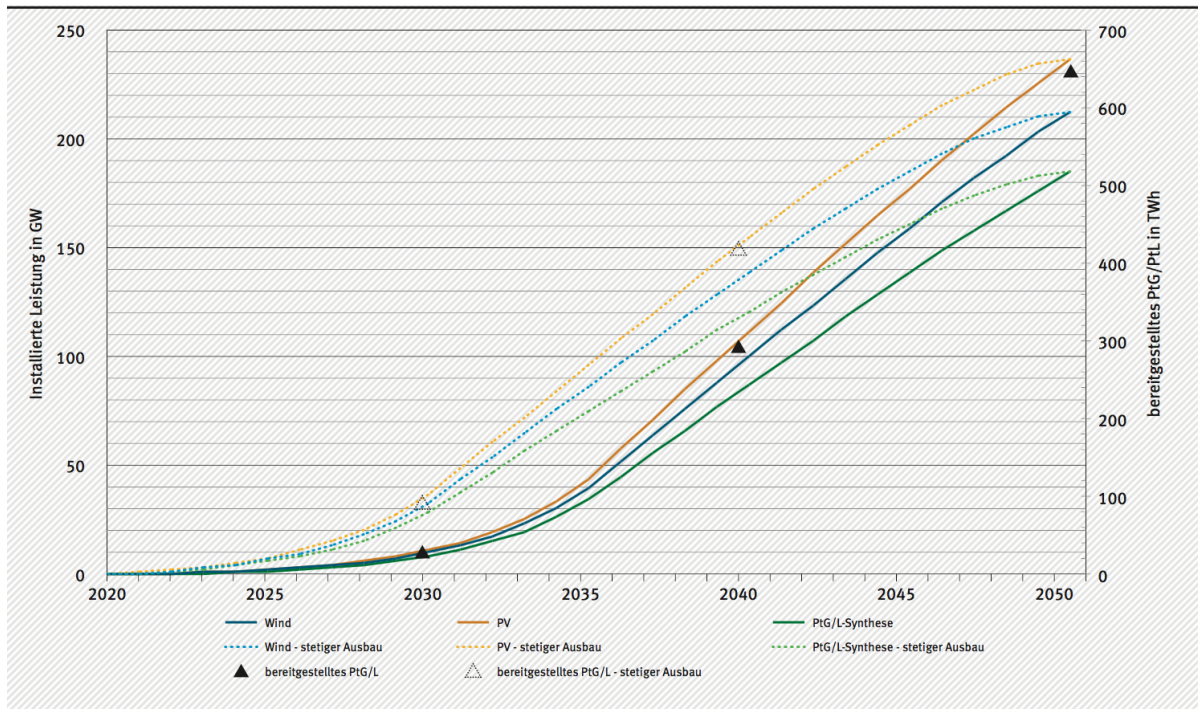
Abbildung 2.2: Bedarf an PtX (ohne PtH) aus verschiedenen Studien.

In Studien, die lediglich den Strombedarf für PtX ausgewiesen haben, aber keine Leistungen, wurde zur Umrechnung die mittlere Auslastung von 3200 h/a von Nitsch, 2017 verwendet. Quellen: Öko ISI [28], Nitsch [29], Agora [11], DLR [30], ISE [31], IAEW [17], EBP [23], UBA 2010 [21], VDE [32], Frontier IAEW [26], UBA 2017 [35]

Vor allem die Bereiche **Verkehr** und **Chemie** haben das größte Potenzial und sind auch aus heutiger Sicht am Nächsten am **Markteintritt** laut dem Potenzialatlas für PtG der Deutschen Energie-Agentur GmbH (dena) [33].

Das Umweltbundesamt (UBA) geht in einem umfassenden Szenario zur Dekarbonisierung Deutschlands samt Ressourcenbetrachtung davon aus, dass bereits im Jahr **2030** etwa **15 TWh** des Energiebedarfs im **Verkehr** und ebenso **15 TWh** des nicht-energetischen Bedarfes an Rohstoffen in der **chemischen Industrie** über PtX-Importe gedeckt wird [36]. Dafür wird also bereits 2030 allein für diese beiden Bereiche eine PtX-Leistung von ca. **7,5 GW** benötigt, welche sich auf ca. **185 GW** im Jahr 2050 steigert (s. Abbildung 2.3). Das unterstreicht die Bedeutung von PtX als international eingesetzte Klimaschutztechnologie mit **Exportchancen** für Deutschland.

Daraus leitet das UBA einen Bedarf zur **Technologieentwicklung** und „**frühzeitigem Einsatz**“ bereits für heute ab und rechnet mit einer breiten Marktdurchdringung in allen Anwendungsbereichen zwischen 2030 und 2040.



* Beispielfaht am Standort Süd-Marokko und vereinfachend nur mit Wind onshore und Photovoltaik.

Quelle: eigene Darstellung der Modellberechnungen

Abbildung 2.3: Ausbau und Bedarf an PtG/PtL Importen für Verkehr und Chemie im GreenEe-Szenario des Umweltbundesamtes (-95 % Dekarbonisierung und -60 % Ressourcenverbrauch in 2050). Quelle: [35]

Studien, welche nur rund 80-85 % THG-Emissionsreduktionen annehmen (alte Ziele der BRD) sind in dieser Darstellung nicht enthalten, da sich zum einen die Rahmenbedingungen durch Paris – wie in Abschnitt 1 dargestellt – derart geändert haben, dass die Aussagen daraus hinfällig sind. Zum anderen zeigen die IWES-Leitszenarien 2050 für das Umweltbundesamt [6] auf, dass zwischen 80 und 95 %-Szenarien ein sehr **großer Unterschied** – gerade für PtX – besteht (s. Abbildung 2.4).

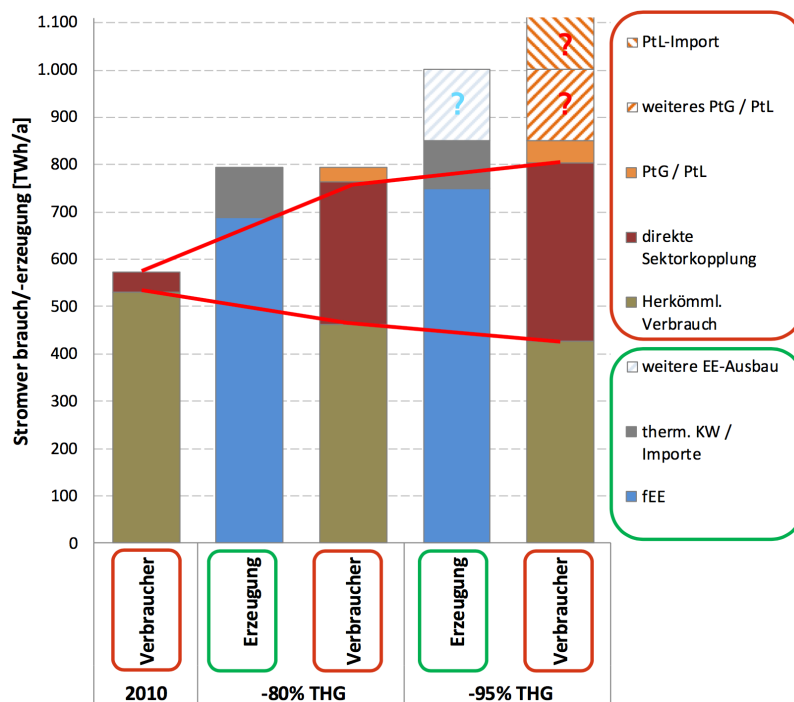


Abbildung 2.4: Stromverbrauch und -erzeugung für die nationale, kosten- und effizienzoptimierte Erreichung einer 80 vs. 95 %-igen THG-Reduktion in allen Sektoren. Quelle: [6]

Szenarien mit geringeren PtX-Leistungen nehmen zur Erreichung der Klimaziele einen verstärkten Einsatz von Anbaubiomasse als Rohstoff für die chemische Industrie und den Verkehr und „negative Emissionstechnologien“ wie **Biomassetechnologien** in Kombination mit **CCS** an. Dieser verstärkte Einsatz von Anbaubiomasse wird allerdings kontrovers diskutiert in Bezug auf Nachhaltigkeitskriterien und Potenzial. Daher kommt sowohl das Umweltbundesamt als auch der WBGU zum Schluss, dass nur biogene Reststoffe aber keine Anbaubiomasse langfristig in klimakonformen Szenarien zum Einsatz kommt [12] [13] [35].

Eine in Potenzialbetrachtungen oft gestellte Frage ist die **Verfügbarkeit von CO₂** für PtG-Methan, PtL und PtC. Prinzipiell kommen hierfür „grüne“ CO₂-Quellen (Biomasse, Abfall, Atmosphäre, CO₂-Recycling) oder „graue“ Quellen (fossile Kraftwerke, fossile Rohstoffnutzung) in Betracht. Während zunächst biogene CO₂-Quellen relevant sind, werden zukünftig in mehreren Bereichen die Technologien zur direkten Abscheidung von CO₂ aus der Atmosphäre relevant (Direct Air Capture). Zum einen für die PtX-Prozesse (CO₂ als Rohstoff über Carbon Capture and Usage (CCU)) und zum anderen für negative Emissionen im Klimaschutz. Viele Klimaschutzmodelle konvergieren nur noch auf das 1,5 °C Ziel unter massivem Einsatz von Technologien der negativen Emissionen, wozu Bioenergieanlagen mit CCS und **DAC** zählen. Auch diese Technologie wird damit zukünftig im Rahmen des Klimaschutzes notwendig, genauso Gasinfrastruktur zum Handling von CO₂. Daher ist es empfehlenswert, PtX-Technologien und Infrastrukturen für Transport und Speicherung von Gasen zu entwickeln. Mit der langfristigen Verfügbarkeit von DAC klärt sich auch die Standort- und Potenzialfrage für CO₂.

Dafür sind noch hohe Anstrengungen in Forschung- und Entwicklung zu tätigen, da die DAC-Technologie noch wenig Langzeiterfahrungen vorhanden sind (Korrosion, Lebensdauer) und durch die geringe Konzentration von CO₂ in der Atmosphäre der technische Aufwand und die damit verbundenen Kosten für die Abscheidung mit 600 – 1000 €/t noch sehr hoch sind [3].

3 Wertschöpfungspotenziale und Chancen von Power-to-X

Im dritten Abschnitt wird auf Verwertungschancen von PtX eingegangen und Ideen für ein PtX-Markteinführungsprogramm gesammelt.

3.1 Globale Entwicklung und Chancen für den deutschen Export

Die Bedeutung des Ausbaus erneuerbarer Energien und dessen Notwendigkeit wurde in Deutschland vergleichsweise früh erkannt. Entsprechend wurden Fördermechanismen angestoßen, welche die globale Entwicklung der erneuerbaren Energien und damit des Klimaschutzes forcierten.

Diese Dynamik liegt nun weit über dem, was in den globalen integrierten Energiesystemmodellen angenommen wurde (s. Beispiel PV in Abbildung 3.1).

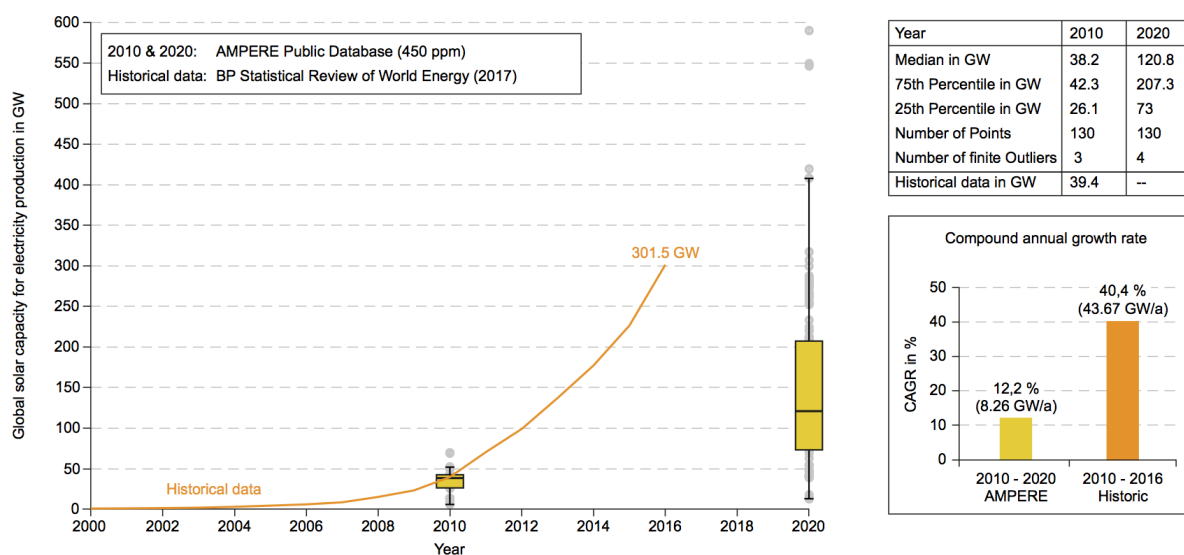


Abbildung 3.1: Globale Entwicklung der installierten PV-Kapazität; Prognose aus allen Szenarien der IEA und des IPCC der letzten Jahre vs. Realität. Quelle: [34]

Eine **ähnliche Dynamik** zeichnet sich auf Basis der bisherigen Entwicklung (s. Abschnitt 1) und hergeleiteten Notwendigkeit (s. Abschnitt 2) für **PtX** ab. Diese Notwendigkeit wurde auch von der deutschen Bundesregierung erkannt, indem sie die Sektorenkopplung und damit auch PtX neben dem Ausbau erneuerbarer Energien und Energieeffizienz als **dritte Säule** der energiebedingten THG-Reduktion manifestiert hat [4].

Der **entscheidende Link** zwischen der frühen Phase der Entwicklung in Form von F&E und Demonstrationsanlagen und der Erschließung des vollen Marktpotenzials ist die Technologieförderung über Instrumente wie Markteinführungsprogramme (s. S-Kurven-Konzept in Abbildung 3.2).

Dieser Markthochlauf ist auch laut [6] der **Flaschenhals** zur Erreichung der **Klimaziele**, welche über 800 TWh Strom nur für PtX in Deutschland benötigen.

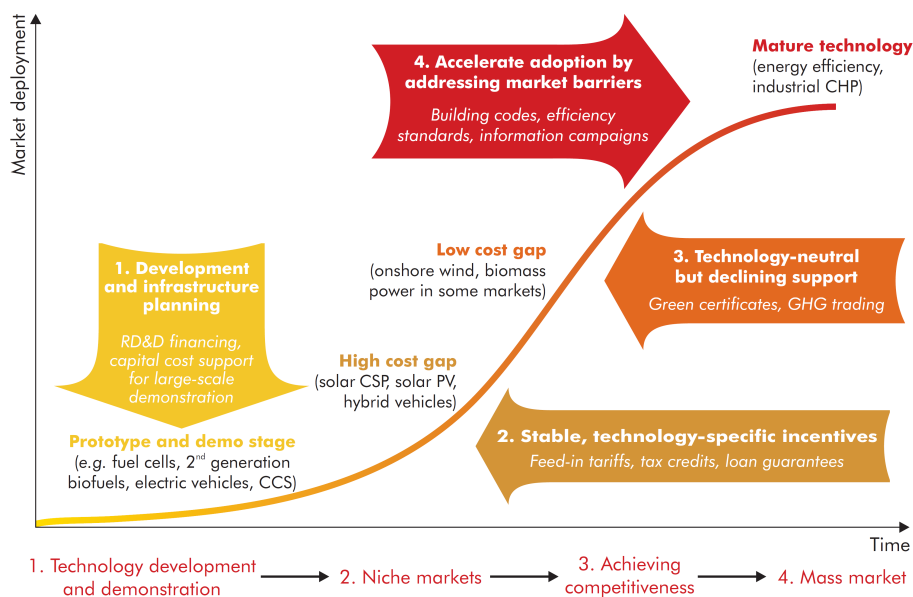
Zu den Kernelementen einer **energiepolitischen Flankierung des Markthochlaufs** innovativer emissionsarmer Technologien gehören nach [35]:

- CO₂-Bepreisung (in einer passenden Form),
- Abbau von (regulatorischen) Hemmnissen in angemessenem Maße,
- technologiespezifische Förderung innovativer Technologien mit dem Ziel einer Kostenreduktion durch technologisches Lernen.

Zu ähnlichen Schlüssen kommt die Arbeitsgruppe „Initiative klimafreundlicher Straßengüterverkehr“ des BMVi [39].

Im Falle der PtX-Technologien stehen die meisten Technologien, mit Ausnahme der alkalischen Elektrolyse (Phase 2) zwischen Phase 1 und 2 [37] [3]. Ist wie im Fall von PtX-Technologien bekannt, dass zu einem späteren Zeitpunkt ein bestimmtes Einsatzpotenzial zu erwarten ist, kann das F&E-Programm sowie die **Markteinführung** mit entsprechendem **zeitlichen Vorlauf** geplant werden.

Neben der reinen Technologieentwicklung bis zu einer Markteinführung sind auch die zeitlichen und finanziellen Ressourcen für den Aufbau von personellen Kapazitäten zur Sicherstellung des laufenden Betriebs sowie die Vermarktung der Produkte einzukalkulieren. Bei der Abschätzung des Marktpotenzials und der Frage wie sich die heutigen F&E-Aufwände (welche für PtX bereits dreistellige Millionenbeträge sind) refinanzieren lassen, sind im Fall von PtX die **Exportmärkte** entscheidend, da die Notwendigkeit zur Dekarbonisierung weltweit gegeben ist. Deutschland kann sich hierbei als **Systemanbieter** von Technologien zur Umsetzung der vollständigen Dekarbonisierung etablieren [36].



Note: The figure includes generalised technology classifications; in most cases, technologies will fall in more than one category at any given time.

Key point

Government support policies need to be appropriately tailored to the stage(s) of development of a technology.

Abbildung 3.2: Förderungsmechanismen für emissionsarme, innovative Energietechnologien. Quelle: [35]

Konkret könnte durch die Installation von etwa 0,5 GW netzdienlicher PtG-Anlagen bei einem PtG-Leistungspreis von 2.000 €/kW etwa 1 Mrd. €/a Kostenersparnis im **Stromsektor** erreicht werden [11]. Dies ist eine 16-fache Erhöhung der bisherigen PtG-Leistung in Deutschland – allein im Stromsektor.

Im **Verkehrssektor** liegt die einfachste und naheliegendste Integration von PtX in **Raffinerien**. Aus der Wasserelektrolyse gewonnener PtG-Wasserstoff kann fossilen Wasserstoff aus Erdgas eins-zu-eins ersetzen und damit im Upstream-Prozess – analog zum Blending mit Biokraftstoffen (E5, E10, B5) – die CO₂-Emissionen fossiler Kraftstoffe senken und über die bestehende Mineralöl- und Kraftstoffinfrastruktur (Tankstellen, Fahr- und Flugzeuge, Maschinen, Schiffe) genutzt werden.

Ferner sieht die PtG Plattform der Deutschen Energie-Agentur im **Verkehrs- und Wärmesektor** kurz- bis mittelfristig Einstiegsmärkte in der Nutzung von erneuerbarem Gas über die bestehenden Erdgasinfrastrukturen zur zügigen Dekarbonisierung dieser Sektoren (Gasfahrzeuge, Gasheizungen, KWK, Industrieprozesse), langfristig auch in Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien. Analog werden Marktchancen in der stofflichen Nutzung (**Chemie, Stahl**) gesehen [33].

Da in Deutschland erneuerbarer Strom zum einen höhere Gestehungskosten als in anderen Ländern hat und zum anderen sehr stark durch staatliche Umlagen belastet ist, lohnt sich die Installation und der

Betrieb einer PtX-Anlage hierzulande derzeit noch nicht. Mittelfristig ist es wahrscheinlicher, dass die vorgegebenen nationalen Quoten und Klimaziele im Verkehrssektor über den **Import** von erneuerbaren PtX-Produkten erfüllt werden. In Abschnitt 2 wurde deutlich, dass der Ersatz bisher importierter fossiler Rohstoffe über PtX einen starken Anstieg des Strombedarfs aus erneuerbaren Energien und damit indirekt auch Akzeptanzprobleme mit sich bringt. Ein Import von PtG/PtL-Energieträgern kann den **Flächenverbrauch** für erneuerbare Energieanlagen in Deutschland reduzieren.

Weltweit gibt es Standorte, an denen erneuerbarer Strom aus Wind-, Solar-, Wasserkraft und Geothermie für 2-3 €-ct/kWh gewonnen werden kann. Entsprechend günstig ist die Herstellung von PtX-Produkten wie Flüssigkraftstoffe. So sind Gestehungskosten von **1,2 € pro Liter PtL-Kerosin** bei entsprechender Kostendegression von PtL und DAC-Anlagen im Einsatz an Standorten mit ca. 6300 Volllaststunden aus kombinierter Wind- und PV-Strom und Meerwasser für die Elektrolyse möglich [6]. Eine weiterführende detaillierte Analyse der Importpotenziale von erneuerbaren Gasen (PtG) findet sich in einer Studie des DBI Leipzig und Fraunhofer IWES für das Umweltbundesamt [37].

Die dazu gehörige Verfahrenstechnik ist jedoch hochkomplex und damit eine **industriepolitische Chance** für Deutschland.

Damit diese **Exportpotenziale** für die PtX-Technologien erschlossen werden können, ist deren Etablierung auf dem **Heimatmarkt** notwendig. Auch und vor allem, um die Funktionstüchtigkeit, Zuverlässigkeit und Robustheit der Anlagen nachzuweisen und zu demonstrieren.

Dies kann über den weiteren Aufbau von nationalen Demonstrationsprojekten in **Netzengpassgebieten** geschehen. Diese PtX-Anlagen könnten im deutschen Stromsystem bei niedrigen bzw. negativen Strompreisen betrieben werden, die **Abregelung von EE-Strom verringern** und zur Behebung von Netzengpässen im Redispatch eingesetzt werden. Dadurch könnten die anfallenden Umlagen über den Netzbetrieb kompensiert werden. Daneben ist der PtX-Einsatz nicht nur auf Stromüberschüsse oder Netzengpassgebiete zu begrenzen, sondern auch für EE-Standorte mit sehr **günstigen EE-Potenzialen** geeignet, welche sonst aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen nicht erschlossen werden.

Deutschland könnte dies nutzen, um die **Technologieführerschaft** für diese PtX-Lösungen aufrecht zu erhalten und mit der Entwicklung der Sektorkopplung die Dekarbonisierung aller Sektoren und damit das Erreichen der Klimaziele voranzutreiben.

Damit sollte vermieden werden, was sich in der Batterietechnologie in den 1980ern abgespielt hat: Deutschland war führend in der Batterieforschung, v. a. im Bereich Natrium-Schwefel. Es fehlte jedoch an passender **Industriepolitik** und einem entsprechenden industriellen Umfeld, um die mit viel Forschungsgeldern entwickelte Hochtechnologie in die breite Marktanwendung zu überführen. Entsprechend wurde das Know-How nach Japan verkauft, wo nun das volle Marktpotenzial ausgeschöpft wird. Heute wird im Zeitalter der Elektromobilität versucht, Teile der Wertschöpfung in der Batteriezellproduktion von Asien nach Europa zurück zu holen: die Bundesregierung (BMBF) unterstützt im großen Umfang den Bau einer deutschen Batteriefabrik [38]. Neben der Technologienentwicklung sind also ein entsprechendes industrielles Umfeld und ein passender Markt wichtig, welche industriepolitisch zu gestalten sind.

3.2 Ideen für ein PtX-Markteinführungsprogramm

- + PtX-Technologien werden im Zuge der Umsetzung des Pariser Klimaschutzabkommens aus heutiger Sicht **notwendige Technologiepfade**, die national und global zum Einsatz kommen. Aus diesem Grunde sind bereits jetzt Strategien für den **Technologiehochlauf** umzusetzen. Eine reine F&E-Förderung ist zu kurz gegriffen, da diese Phase der Entwicklung bereits weitgehend durchlaufen ist. Die nächsten Schritte sind die Etablierung von Nischenmärkten und die Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit im entsprechenden Marktumfeld.

- + Die Kerntechnologie der wesentlichen PtX-Technologiepfade PtG, PtL und PtC ist die **Elektrolyse**. Aus diesem Grund ist eine Einbindung der Wasserelektrolyse als Kernelement und Bemessungsgrundlage angebracht. Die Elektrolyse-Hersteller prognostizieren bei entsprechendem Markthochlauf eine Halbierung der Kosten bis zum Jahr 2020. Dieses Kostensenkungspotenzial gilt es zu nutzen. Unabhängig davon gilt es, die gesamte **Verfahrenstechnik** von PtX-Anlagen zu etablieren, welche letztlich einen Wirtschaftszweig darstellt.
- + Auf Dauer sind Redispatch- und Einspeisemanagementkosten in Milliardenhöhe energiepolitisch nicht tragbar und das Abregeln von großen Mengen an Windstrom gesellschaftlich schwer vermittelbar. Daher sollten geförderte PtX-Anlagen innerhalb dieses **Redispatch- und Einspeisemanagement-Regime** betrieben werden und auch räumlich in Netzausbaugebieten angesiedelt werden, um die Kosten des verzögerten Netzausbaus und damit verbundenen Marktversagens zu dämpfen. Damit wird ein **netz- und systemdienlicher Betrieb** der Anlagen sichergestellt. Über eine Wälzung der Kosten mittels Übertragungsnetzbetreiber könnten die Betriebskosten von PtX reduziert werden. Darüber hinaus können sie an der **Strombörse** bei niedrigen und negativen Strompreisen in wind- und solarstarken Stunden betrieben werden und damit die Strompreise stützen. Darüber hinaus bleibt die Möglichkeit, **EE-Anlagen** rein für den Betrieb von PtX-Anlagen zu errichten. In der Kombination verschiedener Betriebsweisen kann die Wirtschaftlichkeit von PtX-Anlagen verbessert werden.
- + Der Einsatz von erneuerbarem Strom ist für die Klimaschutzwirkung aller Technologien der Sektorenkopplung fundamental. Entsprechend ist ein **zeitlicher und räumlicher Bezug zu erneuerbaren Energien im Strombezug** nachzuweisen. Sofern rechtlich umsetzbar wären dazu auch Echtzeit-Trading-Systeme von EE-Zertifikaten passend, wie es bereits in Kalifornien praktiziert wird.
- + Eine **technologieoffene Einbindung** von PtX in die Märkte aller Sektoren ist eine Grundvoraussetzung für den Hochlauf der PtX-Technologie. Dazu zählt auch die diskriminierungsfreie Anrechnung von PtX-Kraftstoffen im Rahmen der nationalen und europäischen Gesetzgebung.
- + Die Höhe eines möglichen **Investitionszuschusses** sollte sich an der **CO₂-Vermeidung** bzw. den **CO₂-Vermeidungskosten** richten und existierenden Fördermechanismen (FQD, RED) abgeglichen werden. Dazu kann analog zum MAP im Wärmebereich ein Portfolio aus den einzelnen PtX-Technologiepfaden erstellt werden, wobei gerade bei EE-Gas die Verwendung bei Erzeugung noch offen ist. Aus diesem Grund mögen andere Formen der Vergütung (Investitionszuschuss, Innovationsbonus etc.) sinnvoller sein. Die Höhe des Zuschusses sollte ferner an die **Kostendegression** der PtX-Technologien (insb. der Elektrolyse-Lernkurve) angelehnt sein, um eine Überförderung zu vermeiden. Eine **Finanzierung** aus den **Zielsektoren** heraus ist angebracht, um den ohnehin stark mit Abgaben, Steuern, Umlagen und Entgelten belasteten Stromsektor nicht noch zusätzlich zu belasten.
- + Langfristig ist das Marktanzreizprogramm durch entsprechend passende **regulatorische Rahmenbedingungen** in Strom- und Gasmärkten zu ersetzen. Da die Notwendigkeit für PtX in Zukunft besteht, sollten diese Technologiepfade bereits heute in den entsprechenden **Planungen** der großen Abgabenreform und den Netzentwicklungsplänen für Strom und Gas aufgenommen werden. Nur so kann ein wirtschaftlicher Betrieb von PtX-Anlagen in Deutschland gewährleistet werden, der heute selbst bei einem Anlagenwirkungsgrad von 100 % und null Investitionskosten aufgrund der Abgabenlast nicht möglich ist.

4 Kernaussagen

- + In Konsequenz der Pariser Klimabeschlüsse ist eine vollständige globale Dekarbonisierung notwendig, die national über den Klimaschutzplan Deutschlands eingeleitet wird. Damit sind Aussagen zu PtX in bisherigen Studien und Energieszenarien (auch NEP für Strom und Gas), die als Endpunkt lediglich eine Dekarbonisierung um bis zu 80-85 % hatten, überholt.
- + Zwischen Energieszenarien mit einem erneuerbaren Energieanteil von 80-90 % und > 95 % entwickelt sich bei idealem Stromnetzausbau unter gleichen Annahmen der Bedarf an PtX exponentiell.
- + Zur Dekarbonisierung von Verkehr (v. a. Flug- und Schiffsverkehr als auch schwerer Straßengüterverkehr und Arbeitsmaschinen) und Grundstoffchemie sind kaum Alternativen zu PtX vorhanden.
- + Im Stromsektor wird PtG als Langzeitspeicher bei sehr hohen EE-Anteilen trotz aller „Efficiency first“ Maßnahmen systemrelevant für die Versorgungssicherheit (Dunkelflaute) und erlaubt eine 100 % regenerative Stromversorgung. Im Wärmesektor wird PtG vor allem in der Hochtemperatur-Prozesswärme und für die KWK benötigt.
- + Deutschland ist Technologievorreiter bei PtX seit knapp einer Dekade. Der Vorsprung wird aber durch betriebswirtschaftlich nachteilige Rahmenbedingungen zunehmend an das Ausland abgegeben, was sich im Anlagenbau zeigt (z. B. Dänemark, Schweiz etc.).
- + PtX ermöglicht die Dekarbonisierung in allen Sektoren und eröffnet vielfältige Möglichkeiten, um kostengünstige Wind- und Solarenergie in speicherbare Energieträger zu wandeln, welche zum größten Teil in bestehender Infrastruktur (v. a. Gas, aber auch Wärme, Chemie und Mineralöl) gespeichert, transportiert und genutzt werden können.
- + Diese Nutzung von Wind- und Solarenergie über die bestehenden Infrastrukturen für Gas, Wärme und Kraftstoffe mittels PtX macht die Energieversorgung insgesamt robuster und resilienter und erhöht damit die Versorgungssicherheit in Deutschland.
- + Nach abgeschlossener Transformation inklusive PtX sind die Kosten nicht höher als in einem Vergleichsszenario, das die heutige fossile Energiewirtschaft weiterführt. Im Gegenteil: die Energiewende ist kostengünstiger als eine Weiterführung des heutigen Energiesystems.
- + Analog zur Wind- und Photovoltaik-Technologie entstehen mit PtX Technologien, die nicht nur in Deutschland, sondern auch in der EU und global Märkte finden werden. Der Bedarf allein für die Klimaneutralität Deutschlands liegt für die Sektoren Strom, Verkehr und Chemie bei 100-330 GW.
- + Deutschland kann durch einen Heimatmarkt einerseits Technologieführer für PtX bleiben, Importabhängigkeiten reduzieren und andererseits dadurch Demonstrator für Exporttechnologien werden, welche global zur Bewältigung des Klimawandels notwendig werden.
- + Ein Einstiegspunkt kann die Verwertung von Überschüssen aus erneuerbaren Energien in Norddeutschland sein, deren Nicht-Nutzung heute einstellige Milliardenkosten verursacht. Unabhängig von den Kosten ist es empfehlenswert, diese Überschüsse einer Verwertung zuzuführen und damit auch eine Ergänzung für den gesellschaftlich gering akzeptierten Stromnetzausbau zu schaffen.
- + Der Betrieb von PtX-Anlagen wird jedoch nicht nur auf Stromüberschüssen basieren, sondern vielmehr eine sinnvolle Verwendung von günstigen und ausreichend vorhandenen Wind- und Solarressourcen zur Dekarbonisierung aller Sektoren darstellen; in Deutschland und global.

5 Literaturverzeichnis

- [1] BMWi, „Fünfter Monitoring-Bericht zur Energiewende - Die Energie der Zukunft,“ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin, 2016.
- [2] IPCC, „Synthesis Report (SYR), 5th Assessment Report (AR5) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC),“ Cambridge University Press, Cambridge, New York, 2014.
- [3] M. Sterner und I. Stadler, Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration, 2 Hrsg., Berlin: Springer Vieweg, 2017.
- [4] BMUB, „Klimaschutzplan 2050 – Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung,“ BMUB, Berlin, 2016.
- [5] A. Kirchner, S. Koziel, N. Mayer und C. Kunz, „Metaanalyse Flexibilität durch Kopplung von Strom, Wärme & Verkehr,“ Prognos AG, Agentur für Erneuerbare Energien e.V., Berlin, 2016.
- [6] N. Gerhardt, „Leitszenarien 2050 für die Energiewende: Welche Rolle spielt Power-to-Gas? Beitrag dena PtG Jahreskonferenz,“ Fraunhofer IWES, UBA, Dessau, Berlin, 2017.
- [7] M. Sterner, A. Hofrichter, F. Eckert und F. Bauer, „Metastudie Analyse sektorenübergreifender Studien zur Dekarbonisierung des deutschen Energiesystems,“ Fraunhofer IWES, dena, Regensburg, Berlin, 2016.
- [8] G. Thomaßen und M. Deutsch, „Future Cost of Onshore Wind - Recent auction results, long-term outlook and implications for upcoming German auctions,“ Agora Energiewende, Berlin, 2017.
- [9] REN21, „Renewables Global Status Report 2016,“ REN21, Paris, 2016.
- [10] M. Sterner, Bioenergy and renewable power methane in integrated 100% renewable energy systems - Limiting global warming by transforming energy systems (Dissertation), Kassel: Universität Kassel, 2009.
- [11] M. Sterner, M. Thema, F. Eckert, A. Moser, A. Schäfer, T. Drees, C. Rehtanz, U. Häger, A. Seack, D.-U. Sauer, M. Leuthold und P. Stöcker, „Stromspeicher in der Energiewende - Untersuchung zum Bedarf an neuen Stromspeichern in Deutschland für den Erzeugungsausgleich, Systemdienstleistungen und im Verteilnetz,“ FENES OTH Regensburg, IAEW RWTH Aachen, ef.Ruhr, ISEA RWTH Aachen, Agora Energiewende, Regensburg, Aachen, Dortmund, Berlin, 2014.
- [12] WBGU, „Zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung,“ Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU), Berlin, 2008.
- [13] UBA, „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050,“ UBA, Dessau-Roßlau, 2014.
- [14] Hydrogenics, „Hydrogenics, Alstom to commercialise fuel cell trains in Europe,“ 2015. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(15\)30144-9](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(15)30144-9). [Zugriff am 1 8 2017].
- [15] T. Trost, Erneuerbare Mobilität im motorisierten Individualverkehr - Modellgestützte Szenarioanalyse der Marktdi usion alternativer Fahrzeugantriebe und deren Auswirkungen auf das Energieversorgungssystem (Dissertation), Leipzig: Fraunhofer IWES, Universität Leipzig, 2016.

- [16] VCI, Chemiewirtschaft in Zahlen, Frankfurt am Main: Verband der Chemischen Industrie e. V., 2016.
- [17] A. Moser, „Kurzgutachten zur infrastrukturellen Sektorenkopplung – Technische Perspektive,“ RWTH Aachen, Aachen, 2017.
- [18] C. Baumann, K. Geschermann, W. Köppel und P. Steffens, „Studie über den Nutzen der PtG-Technologie zur Entlastung der 110-kV-Stromverteilungsnetze,“ IAEW RWTH Aachen, DBI Leipzig, Aachen, Leipzig, 2015.
- [19] A. Moser, M. Zdrallek, H. Krause und F. Graf, „Nutzen von Smart-Grid-Konzepten unter Berücksichtigung der Power-to-Gas-Technologie,“ DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Bonn, 2014.
- [20] J. Hüttenrauch, G. Müller-Syring und H. Krause, „Integration fluktuierender erneuerbarer Energien durch konvergente Nutzung von Strom- und Gasnetzen - Konvergenz Strom- und Gasnetze - Abschlussbericht,“ DBI, KIT-IPP, TUD, IWES, OTH, IEK-STE, IAEW, TUB, WI, UMSICHT, RUB, EBI, GWI, BMWi, Leipzig, Berlin, 2017.
- [21] UBA, Energieziel 2050: 100 % Strom aus erneuerbaren Energien, Dessau-Roßlau: UBA, 2010.
- [22] M. Sterner, M. Thema und T. Lenk, Bedeutung und Notwendigkeit von Windgas für die Energiewende - Windgas-Studie, Berlin: FENES, EBP, Greenpeace Energy, 2015.
- [23] F. Huneke, C. P. Linkenheil und M. Niggemeier, „Kalte Dunkelfaute - Robustheit des Stromsystems bei Extremwetter,“ Energy Brain Pool, Greenpeace Energy, Berlin, 2017.
- [24] F. Steinke, P. Wolfrum und C. Hoffmann, „Grid vs. storage in a 100% renewable Europe,“ *Renewable Energy*, pp. 826-832, 2013.
- [25] P. Götz, F. Huneke, T. Lenck und C. Linkenheil, „Minimaler Bedarf an langfristiger Flexibilität im Stromsystem bis 2050 – Studierenerweiterung,“ EBP, Greenpeace Energy, Berlin, 2016.
- [26] D. Bothe, M. Janssen, T. Bongers, J. Kellermann, M. Ahlert und M. Corneille, „Der Wert der Gasinfrastruktur für die Energiewende in Deutschland - eine modellbasierte Analyse,“ *Frontier Economics*, IAEW, 4Management, EMCEL, Köln, 2017.
- [27] N. Gerhardt, U. Lambrecht, F. Sandau, A. Scholz, H. Hahn, P. Schumacher, C. Sager, F. Bergk, C. Kämper, W. Knörr und J. Kräck, Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr: Analyse der Interaktion zwischen den Sektoren Strom, Wärme/Kälte und Verkehr in Deutschland in Hinblick auf steigende Anteile fluktuierender Erneuerbarer Energien im Strombereich unter Berücksichtigung der europäis, Kassel: Fraunhofer IWES, 2015.
- [28] N. Gerhardt, F. Sandau, S. Becker und A. Scholz, „Wärmewende 2030 - Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudesektor,“ Agora Energiewende, Fraunhofer IWES, Fraunhofer IBP, Berlin, 2017.
- [29] J. Nitsch, M. Sterner, T. Pregger, N. Gerhardt und B. Wenzel, Leitstudie 2011: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global, Berlin: DLR; IWES; IfnE, 2012.
- [30] J. Repenning, S. Braungardt und L. Emele, Klimaschutzszenario 2050 - 2. Endbericht, Berlin: Ökoinstitut e.V., Fraunhofer ISI, 2015.

- [31] J. Nitsch, „Erfolgreiche Energiewende nur mit verbesserter Energieeffizienz und einem klimagerechten Energiemarkt - Aktuelle Szenarien der deutschen Energieversorgung,“ Stuttgart, 2017.
- [32] D. Kreyenberg, A. Lischke, F. Bergk, F. Duennebeil, C. Heidt, W. Knörr, T. Raksha, P. Schmidt, W. W. K. Naumann, S. Majer und F. Müller-Langer, „Erneuerbare Energien im Verkehr. Potenziale und Entwicklungsperspektiven verschiedener erneuerbarer Energieträger und Energieverbrauch der Verkehrsträger. Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVI in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) AZ Z14/SeV/288.3/1179/UI40,“ DLR, IFEU, LBST, DBFZ, BMVi, Berlin, 2015.
- [33] H.-M. Henning und A. Palzer, „Was kostet die Energiewende?: Sektor- und Energieträgerübergreifende, modellbasierte Untersuchung zur System- und Kostenentwicklung einer klimaschutzkompatiblen Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050,“ Fraunhofer, Freiburg, 2015.
- [34] VDE ETG, „Energiespeicher für die Energiewende - Gesamttext,“ Energietechnische Gesellschaft im VDE, Frankfurt, 2012.
- [35] J. Günther, H. Lehmann, U. Lorenz und K. Purr, „Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten,“ Umweltbundesamt UBA, Dessau, 2017.
- [36] C. Schenuit, R. Heuke und J. Paschke, „Potenzialatlas Power to Gas – Klimaschutz umsetzen, erneuerbare Energien integrieren, regionale Wertschöpfung ermöglichen,“ Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin, 2016.
- [37] F. Bauer, K. Nagl, M. Sterner, A. Schulz, C. Loose und S. Busch, „pathway towards renewables and storage for a 1,5 °C climate goal - Working Paper,“ FENES, WBGU, IIASA, Regensburg, Berlin, Wien, 2017.
- [38] IEA, „Energy Technology Perspectives,“ International Energy Agency, OECD, Paris, 2016.
- [39] M. Kaltschmitt, O. Weinmann, M. Wietschel, G. Larroque, W. Schade und M. Schuckert, „Initiative klimafreundlicher Straßengüterverkehr - Fahrplan für einen klimafreundlichen Straßengüterverkehr (Antriebe und Kraftstoffe),“ BMWi, Berlin, 2017.
- [40] T. Smolinka, M. Günther und J. Garcke, „Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien: Kurzfassung des Abschlussberichts NOW-Studie,“ NOW, Freiburg im Breisgau, 2012.
- [41] T. Bruckner, M. Sterner und H. Kondziella, „Infrastrukturelle Sektorenkopplung (iSK): Entwicklung einer integrierten Perspektive von Strom- und Gasversorgungsnetzen,“ InfraRes, Universität Leipzig, Leipzig, 2017.
- [42] S. Schütz und P. Härtel, „Climate Change 08/2016 - Klimaschutz und regenerativ erzeugte chemische Energieträger – Infrastruktur und Systemanpassung zur Versorgung mit regenerativen chemischen Energieträgern aus in- und ausländischen regenerativen Energien,“ DBI Leipzig, Fraunhofer IWES, Dessau-Roßlau, 2016.
- [43] BMBF, „Bundesforschungsministerin Johanna Wanka zur Gründung des Unternehmens TerraE,“ *Pressemitteilung*, p. 1, 22.05.2017.

-
- [44] M. Jentsch, Potenziale von Power-to-Gas Energiespeichern: Modellbasierte Analyse des markt- und netzseitigen Einsatzes im zukünftigen Stromversorgungssystem, Kassel: Fraunhofer IWES, Universität Kassel, 2014.
- [45] V. Quaschnig, Sektorkopplung durch die Energiewende – Anforderungen an den Ausbau erneuerbarer Energien zum Erreichen der Pariser Klimaschutzziele unter Berücksichtigung der Sektorkopplung, Berlin: HTW Berlin, 2016.
- [46] Sedlacek, „Untertage-Gasspeicherung in Deutschland: Underground Gas Storage in Germany,“ *Erdöl Erdgas Kohle*, pp. 378-388, 2015.

IMPRESSUM

Gutachten im Auftrag der PTX-Allianz:

aireg - Aviation Initiative for Renewable Energy in Germany e.V.
AUDI AG
DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.
Deutscher Wasserstoff-Brennstoffzellen Verband e.V.
ONTRAS Gastransport GmbH
Uniper Energy Storage GmbH

Erstellt von:

Prof. Dr.-Ing. Michael Sterner
Professor für Energiespeicher und Energiewirtschaft
an der Ostbayerischen Technischen Hochschule Regensburg
(OTH Regensburg)

Institut für Energiespeicher IFES
Franz-Mayer-Str. 1
93053 Regensburg

Review durch:

Prof. Dr.-Ing. Martin Kaltschmitt

Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft (IUE)
Technische Universität Hamburg (TUHH)

In Zusammenarbeit mit Johanssen + Kretschmer Strategische Kommunikation GmbH:

J+K Projektleitung:

Timo Bovi
Dr. Thies Clausen
Sybille Neufß

Johanssen + Kretschmer Strategische Kommunikation GmbH

Berliner Freiheit 2
D-10785 Berlin
T +49 (0) 30 520 00 57-0
F +49 (0) 30 520 00 57-77

www.jk-kom.de

Oktober 2017

Disclaimer

Das vorliegende Kurzgutachten wurde sorgfältig und gewissenhaft recherchiert und erarbeitet. Es wird darauf hingewiesen, dass es sich dabei lediglich um eine Orientierungshilfe handeln soll. Die Ergebnisse dieser Arbeit sind daher rechtlich nicht verbindlich und stellen keine Empfehlung dar, diese zu übernehmen. Die Verwendung des Kurzgutachtens oder Teile davon liegt ausschließlich im Verantwortungsbereich des Benutzers.
