

Technical Report

Szenarien für den Strommix zukünftiger, flexibler Verbraucher am Beispiel von P2X-Technologien

Technische Universität München

Lehrstuhl für Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme

Autoren

Kay Bareiß

Konrad Schönleber

Thomas Hamacher

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die zur Verfügung gestellten Fördermittel innerhalb des Projekts Kopernikus ‚P2X: Flexible Nutzung erneuerbarer Ressourcen – Erforschung, Validierung und Implementierung von “Power-to-X” Konzepten‘.

München, den 19.03.2018

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	2
1. Einleitung	3
1.1. Prämissen	3
1.2. Hauptunterscheidungsmerkmale der gewählten Szenarien	4
1.3. Ergebnisse	4
1.3.1. Szenario 1 (Kein P2X).....	5
1.3.2. Szenario 2 (29 % H2-Fahrzeuge).....	6
1.3.3. Szenario 3 (29 % Fahrleistung mit Synfuel).....	7
1.3.4. Szenario 4 (29 % Fahrleistung mit ICE bei 20 % OME Beimischung).....	8
1.4. Szenarienvergleich	9
2. Empfohlener Strommix für P2X Technologien	11
3. Annahmen.....	13
3.1. Detailergebnisse der einzelnen Szenarien	15
3.1.1. Szenario 1	15
3.1.2. Szenario 2.....	16
3.1.3. Szenario 3.....	17
3.1.4. Szenario 4.....	18
Abbildungsverzeichnis.....	19
Literaturverzeichnis:	20
Tabellenverzeichnis.....	21

1. Einleitung

In diesem Arbeitspapier legen wir einen Vorschlag für einen Strom-Mix im Jahr 2050 für das P2X-Projekt vor. Die Arbeitsgrundlage bildet dabei die Studie [1] des Öko-Instituts. Da einerseits der Strom-Mix durch den möglichen Einsatz von P2X-Technologien beeinflusst wird und andererseits der Einsatz der P2X-Technologien, sowie ihre jeweiligen Vor- und Nachteile, empfindlich vom gewählten Strom-Mix abhängen können, ist aus unserer Sicht eine Gesamtsystembetrachtung essentiell. Wir betrachten im Folgenden drei Szenarien mit unterschiedlichem Einsatz von P2X-Technologien. Aus den gewonnenen Erkenntnissen leiten wir dann einen plausiblen, mit dem Ziel einer signifikanten Deckung des Energiebedarfs des Verkehrssektors durch P2X unter Einhaltung der CO₂-Emissionsziele für 2050 ab. Wir gehen damit über die Annahmen der Studie des Öko-Instituts hinaus, um eine belastbare Basis für weitere Analysen der P2X-Technologien zu erhalten.

1.1. Prämissen

Für alle betrachteten Szenarien wählen wir die folgenden Grundannahmen:

- Die Bedarfe nach elektrischer Energie und die installierten Kapazitäten von erneuerbaren Energieanlagen und konventionellen Backup Kraftwerken werden aus der Referenz-Studie [1] entnommen¹.
- Es wird ein zum Großteil elektrifizierter Individualverkehr angenommen, wobei 71 % der Fahrleistung durch Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) erbracht werden, in Anlehnung² an ([2], S260 ff.). Der Strombedarf der BEVs wird auf den allgemeinen Strombedarf proportional addiert. Die Batteriespeicher der Fahrzeuge stehen dem Stromsystem nicht als Speicher zur Verfügung.
- Die zugelassenen CO₂-Emissionen setzen sich jeweils zusammen aus dem Sektorenziel des KS 80 der Leitstudie³ für den Energiesektor in 2050 (42.800.000 t) und einer Menge entsprechend einer 80 %-igen Reduktion gegenüber 1990 der Emissionen des Individualverkehrs (19.900.000 t).
- Die installierbare Windleistung wird nach oben durch die Annahme einer Belegung von 5 % der Landesfläche mit jeweils 20 MW/km² begrenzt. 1/3 der Kapazität wird dabei sehr guten Windstandorten (das Beste drittel jeder Region) zugewiesen (Starkwind). Die restlichen 2/3 werden vereinfachend dem mittleren Drittel zugeordnet (Schwachwind). Dabei wird derzeit der Offshore Wind nicht explizit ausgewiesen. Die installierbare Kapazität von Photovoltaikanlagen wird nicht begrenzt.

¹ Zahlenwerte übernommen von: Franziska Flachsbarth (Öko-Institut)

² Es wurde angenommen, dass ab Wegstrecken über 250 km keine BEV eingesetzt werden

³ [1], Tabelle 5-98, S.275

1.2. Hauptunterscheidungsmerkmale der gewählten Szenarien

Details zu den verwendeten Daten und gemachten Annahmen finden Sie in Kapitel 3. Basierend auf diesen Grundannahmen wird eine ökonomische Energiesystemoptimierung für 4 Szenarien mit jeweils unterschiedlicher Verwendung von P2X-Technologien durchgeführt.

1. Es werden **keine P2X Technologien** eingesetzt. Die Annahme von 71 % BEV-Anteil an der Verkehrsleistung im Individualverkehr bleibt bestehen. Der Rest der Verkehrsleistung wird durch modernisierte Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor (ICE)⁴ mit einem Verbrauch von 3,6 l/100km angetrieben und durch fossile Treibstoffe bereitgestellt. Dieses Szenario dient als Basis für die Evaluierung des Effekts der P2X-Technologien auf das Energiesystem.
2. Die verbliebenen 29 % der Verkehrsleistung im Individualverkehr werden durch **wasserstoffgetriebene Brennstoffzellenfahrzeuge**⁵ gedeckt. Hierbei wird als Wasserstoffträger LOHC angenommen. Es werden Wasserstoffspeicher mit einer maximalen Kapazität von 0,5 TWh angenommen. Auch hier wird von einer Effizienzsteigerung ausgegangen. Somit liegt der Energieverbrauch bei 20,3 kWh/100 km
3. Die verbliebenen 29 % der Verkehrsleistung im Individualverkehr werden durch ICVs wie in Szenario 1 angetrieben und mit **synthetischem Treibstoff** aus P2X-Prozessen gedeckt. Beispielhaft wird hier die SOEC Elektrolyse und Synthese über einen Fischer-Tropsch-Prozess mit einer energetischen Effizienz von 70 % angenommen. Als CO₂-Quelle werden die Backup-Kraftwerke des Stromsystems verwendet. Vereinfachend werden keine Effizienzverluste dieser Kraftwerke für die CO₂ Abtrennung angenommen. Die CO₂ Menge wird getrennt ausgewiesen und nicht als Input für den Prozess genutzt. Die Speichergröße ist in diesem Szenario auf 5 TWh angenommen.
4. Dem fossilen Treibstoff wird zu 20 % (energetisch) **Oxymethylenether (OME)** beigemischt. Der energetische Wirkungsgrad für die P2X Produktion des OME wird auf insgesamt 20 % [5] angenommen. Dem Gesamtsystem stehen 5 TWh an Treibstoffspeichern zur Verfügung.

1.3. Ergebnisse

Für alle betrachteten Szenarien analysieren wir neben dem Erzeugungspark des Energiesektors auch die durchschnittlichen CO₂-Emissionen im Stromsektor sowie die durchschnittlichen CO₂-Emissionen des für die jeweiligen P2X Prozesse verwendeten Stroms.

⁴ Effizienz aus [1] Tabelle 5-52, Heizwert Benzin: 41 MJ/kg, Dichte 0,75 kg/l, CO₂ Emissionen 250 g/kWh [4]

⁵ [3] Tabelle 4-16

1.3.1. Szenario 1 (Kein P2X)

Der Kraftwerkspark für Gesamtdeutschland im Referenzszenario ohne P2X-Technologien ist in Abb. 1 dargestellt. Es sind Abweichungen zum Kraftwerkspark aus der Referenzstudie erkennbar. Diese sind durch den hier angenommenen Einsatz von 71 % BEVs für den Individualverkehr und die unterschiedliche Methodik erklärbar. Insbesondere Photovoltaikanlagen werden hier verstärkt gebaut. Eine tabellarische Aufstellung der Werte ist in Kapitel 3.1.1 zu finden. Die CO₂-Emissionen des Gesamten Stromsektors liegen in diesem Szenario bei 105 g/kWh_{el}.

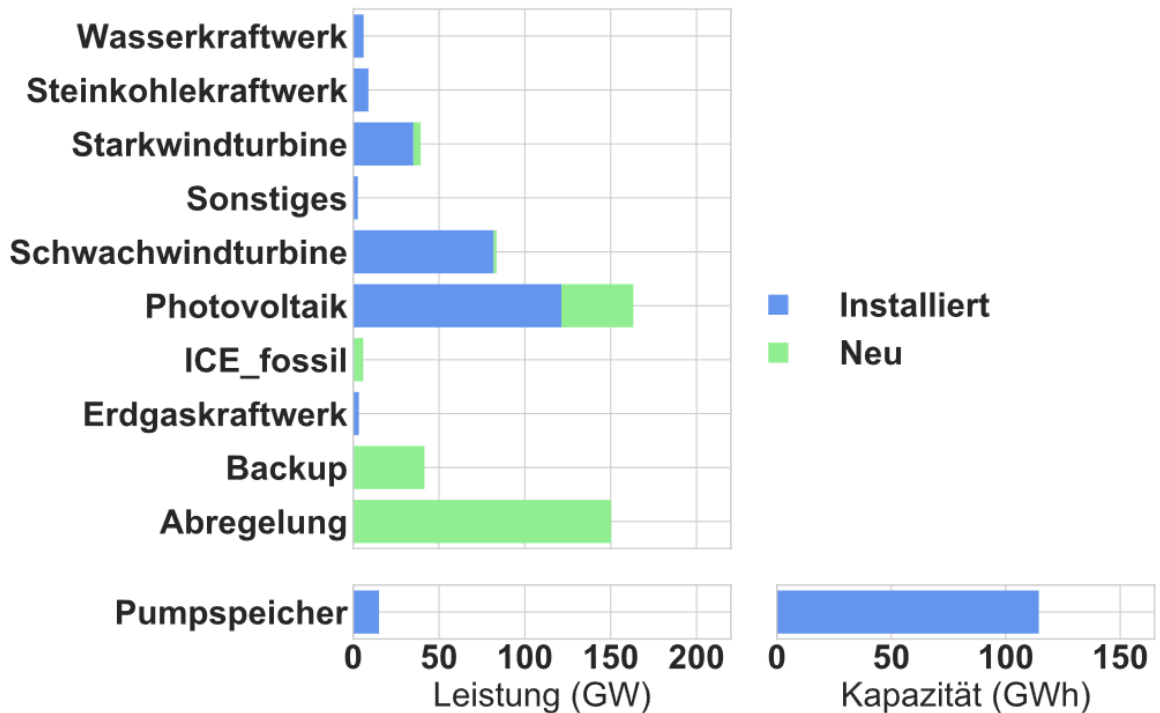


Abbildung 1 Installierte Leistungen des Kraftwerks- und Speicherparks für das Referenzszenarios ohne P2X-Technologien (71 % BEV im Individualverkehr, 29 % fossil getriebene Fahrzeuge).

1.3.2. Szenario 2 (29 % H2-Fahrzeuge)

In diesem Szenario wird die nach Einsatz der BEVs verbliebene Verkehrsleistung im Individualverkehr (29 %) durch Brennstoffzellenfahrzeuge gedeckt. Als Vorkette für den Wasserstoff wird dabei PEM-Elektrolyse und die Speicherung mittels LOHC angenommen. Der Kraftwerkspark für dieses Szenario ist in Abbildung 2 dargestellt.

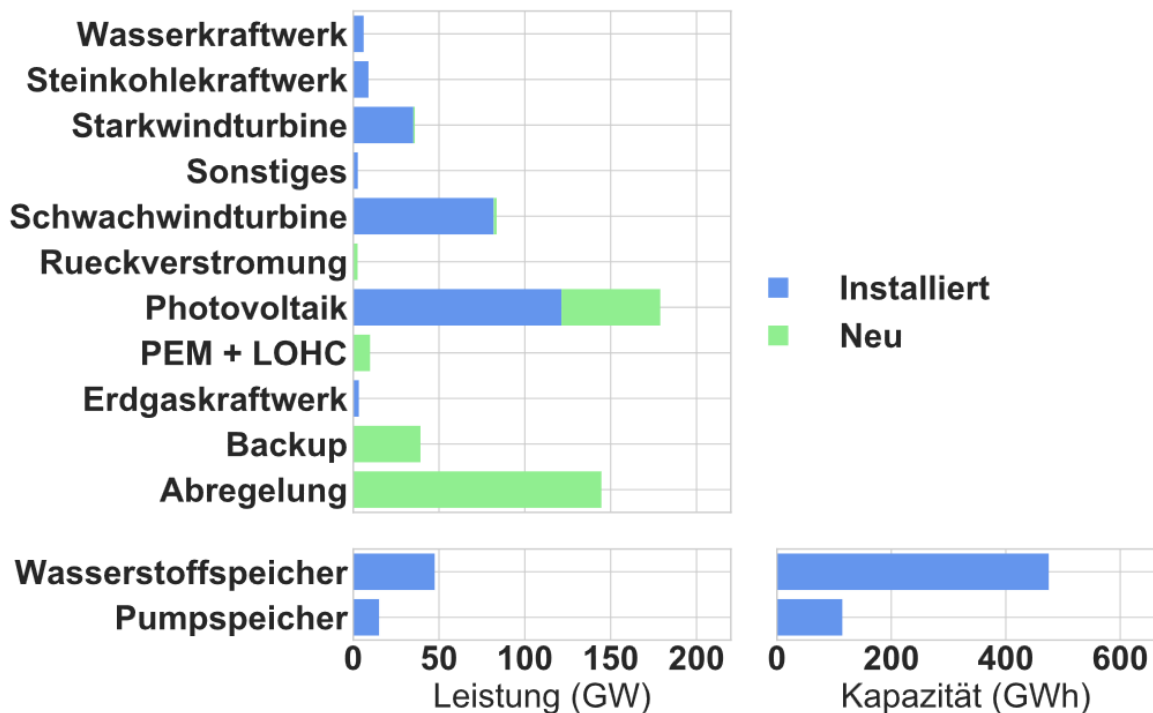


Abbildung 2 Installierte Leistungen des Kraftwerks- und Speicherparks für das Referenzszenario mit P2X-Technologien (71 % BEV im Individualverkehr, 29 % Brennstoffzellenfahrzeuge).

Der Kraftwerkspark verändert sich gegenüber dem Referenzszenario kaum, lediglich die Speichergrößen und –Leistungen sind durch die zusätzliche Möglichkeit der Wasserstoffspeicherung erheblich vergrößert. Es ist anzumerken, dass die Rückverstromung von Wasserstoff nur eine sehr untergeordnete Rolle für das Stromsystem spielt und daher der Wasserstoffspeicher nicht als Stromspeicher, sondern eher als verschiebbare Last anzusehen ist. Im Vergleich zum Referenzszenario ist der spezifische CO₂-Ausstoß des Stromsektors erhöht, er beträgt hier 130 g/kWh_{el}. Der für den P2X-Prozess zeitgleich verwendete Strom verursacht spezifische Emissionen von ca. 5 g/kWh_{el} bei 4.265 Volllaststunden.

1.3.3. Szenario 3 (29 % Fahrleistung mit Synfuel)

In diesem Szenario wird die verbliebene Verkehrsleistung durch Synfuels (hergestellt aus P2X-Technologien) erbracht. Als Vorkette wird dabei eine SOFC mit anschließendem Fischer-Tropsch-Verfahren angenommen. Der Kraftwerkspark des Energiesektors für dieses Szenario ist in Abbildung 3 dargestellt. Zu beachten ist, dass die Skala sich von den beiden vorangegangenen Abbildungen unterscheidet.

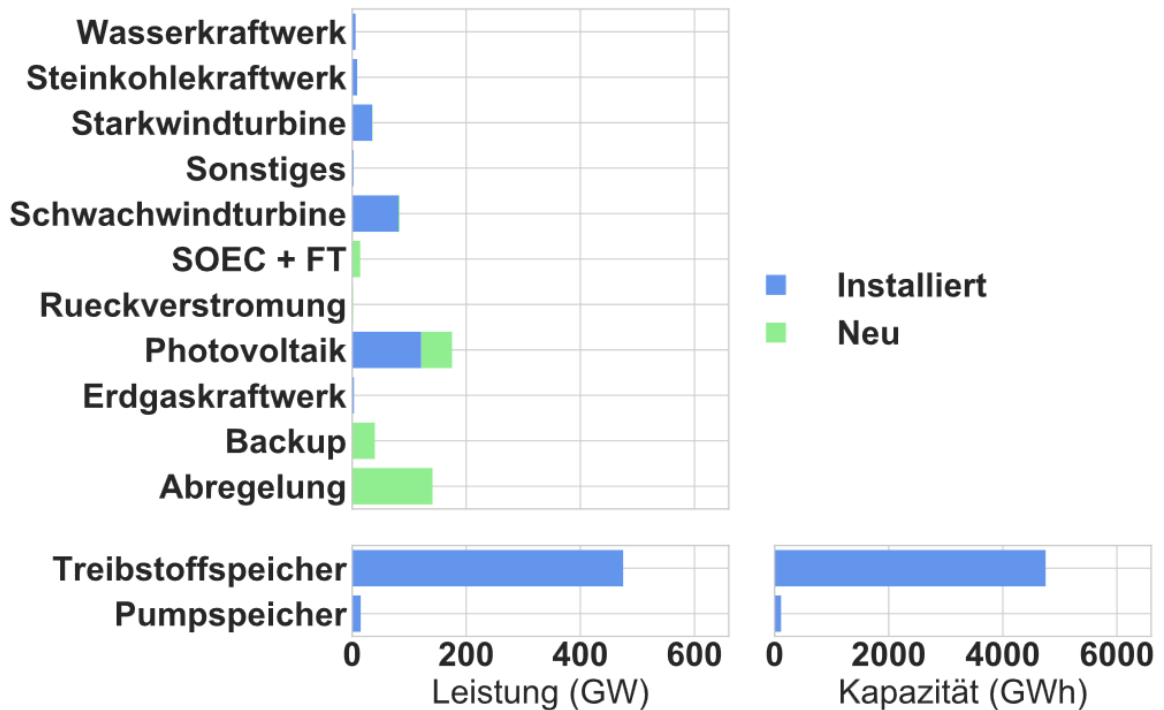


Abbildung 3 Installierte Leistungen des Kraftwerks- und Speicherparks für das Referenzszenario mit P2X-Technologien (71 % BEV im Individualverkehr, 29 % Synfuel).

Der Erzeugerpark des Energiesektors unterscheidet sich auch hier nur marginal von den beiden anderen Szenarien. Die spezifischen CO₂-Emissionen des Stromsektors liegen in diesem Szenario ebenfalls bei 130 g/kWh_{el}. Die für den P2X-Prozess zeitgleich verwendete elektrische Energie wird mit einem spezifischen CO₂-Ausstoß von ca. 4 g/kWh_{el} bei 3.917 Volllaststunden erzeugt.

1.3.4. Szenario 4 (29 % Fahrleistung mit ICE bei 20 % OME Beimischung)

In diesem Szenario wird die verbliebene Verkehrsleistung durch Treibstoffe bestehend aus 80 % fossilen Brennstoffen und 20 % OME (jeweils energetisch) erbracht. Der für die OME Synthese benötigte Wasserstoff wird durch PEM-Elektrolyse mit einer Effizienz von 70 % hergestellt. Die gesamte Vorkette der OME Synthese wird mit einer Effizienz von 20 % angenommen. Der Kraftwerkspark des Energiesektors für dieses Szenario ist in Abbildung 4 dargestellt.

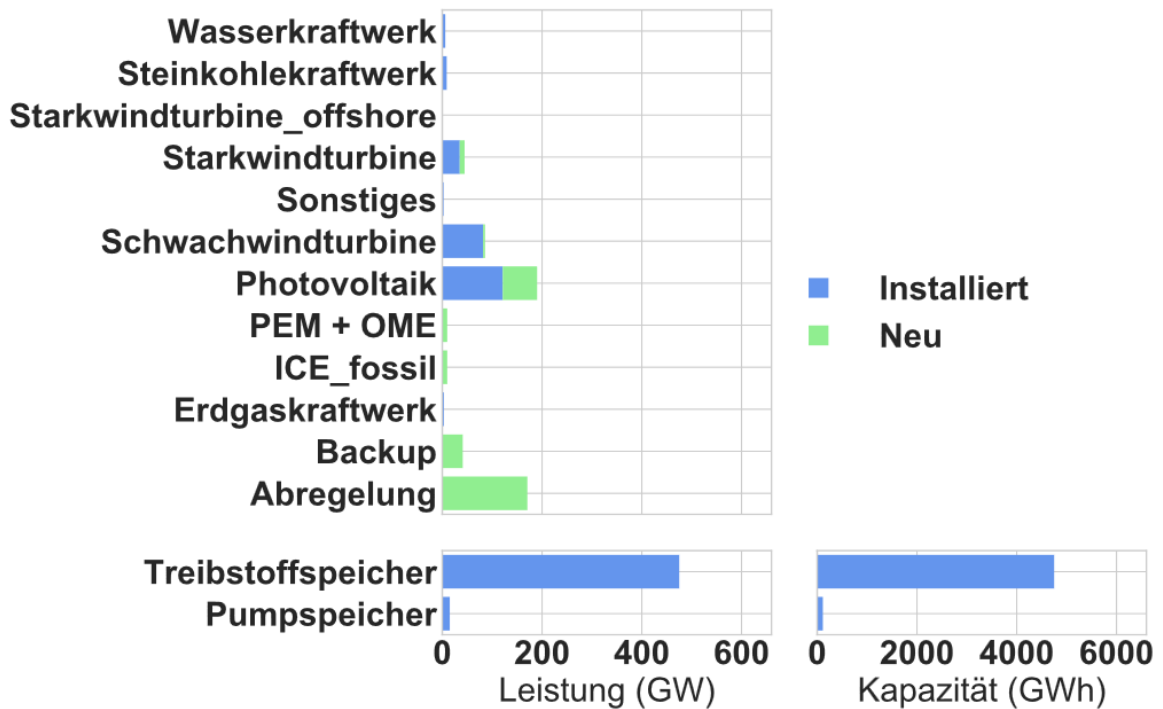


Abbildung 4 Installierte Leistungen des Kraftwerks- und Speicherparks für das Referenzszenarios mit P2X-Technologien (71 % BEV im Individualverkehr, 29 % fossil getriebenen Fahrzeuge mit 20 %-iger OME Beimischung).

Der Kraftwerkspark ist wieder sehr ähnlich zu den anderen betrachteten Szenarien. Es ist lediglich ein weiter verstärkter Zubau an Photovoltaik erkennbar. Im Vergleich zum Referenzszenario ist der spezifische CO₂-Ausstoß des Stromsektors hier nur geringfügig erhöht, er beträgt 115 g/kWh_{el}. Der für den P2X-Prozess zeitgleich verwendete Strom verursacht spezifische Emissionen von ca. 9 g/kWh_{el} bei 5.206 Volllaststunden.

1.4. Szenarienvergleich

In diesem Teil werden die Ergebnisse der 4 Szenarien miteinander verglichen und aus den gewonnenen Erkenntnissen ein Strom-Mix für die weiteren Modellierungen im P2X-Projekt hergeleitet. In Abbildung 5 sind die Jahresenergieerzeugungen der 4 Szenarien aufgeteilt nach Erzeugungsanlagen dargestellt.

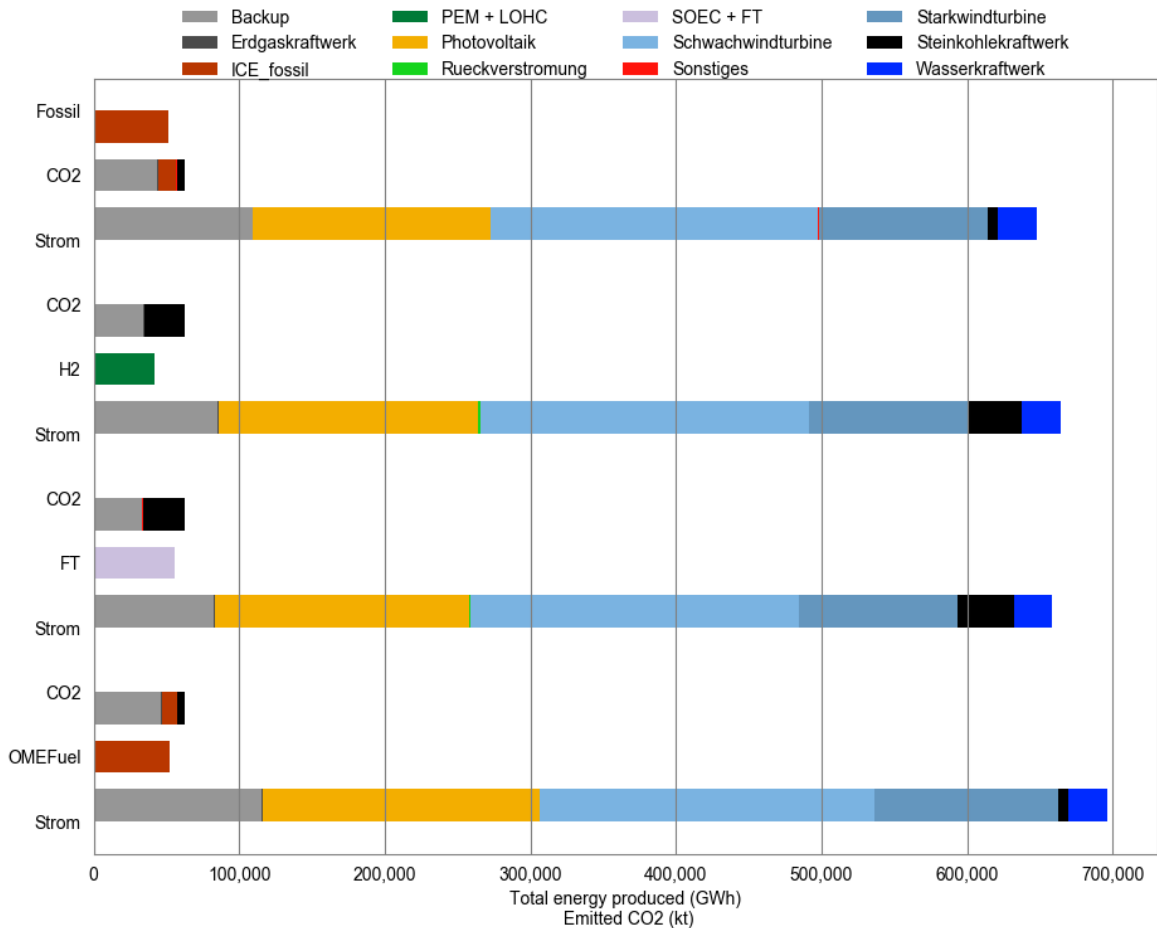


Abbildung 5 Vergleich der Jahresenergieerzeugung für die 4 betrachteten Szenarien und Zusammensetzung der CO₂-Emissionen. Die Energieträger sowie der Strom sind in GWh aufgetragen. Die Emissionen in kt.

Die wichtigste Erkenntnis aus Abbildung 5 ist, dass neben dem sehr ähnlichen Erzeuger-park auch die erzeugten Energiemengen in den 3 Szenarien sehr ähnlich sind. Lediglich im Szenario mit OME-Synthese ist eine deutliche Erhöhung der Gesamtenergieproduktion zu erkennen. Dies bedeutet, dass durch die Nachfrageerhöhung der P2X-Technologien in den Szenarien 2 und 3 keine zusätzliche Stromproduktion verursacht wird und die Energiemengen aufgrund der hohen Flexibilität der an die P2X-Technologien angeschlossenen Speicher durch eine verringerte Abregelung erbracht werden (Es ist zu beachten, dass der Elektromobilität keine Flexibilität unterstellt wurde. Im Laufe des P2X-Projektes wird diese Option integriert). Dieses Ergebnis wird in Abbildung 6 noch einmal verdeutlicht, welche die Residuallast des Stromsektors für die 4 Szenarien als geordnete Jahresdauerlinie zeigt.

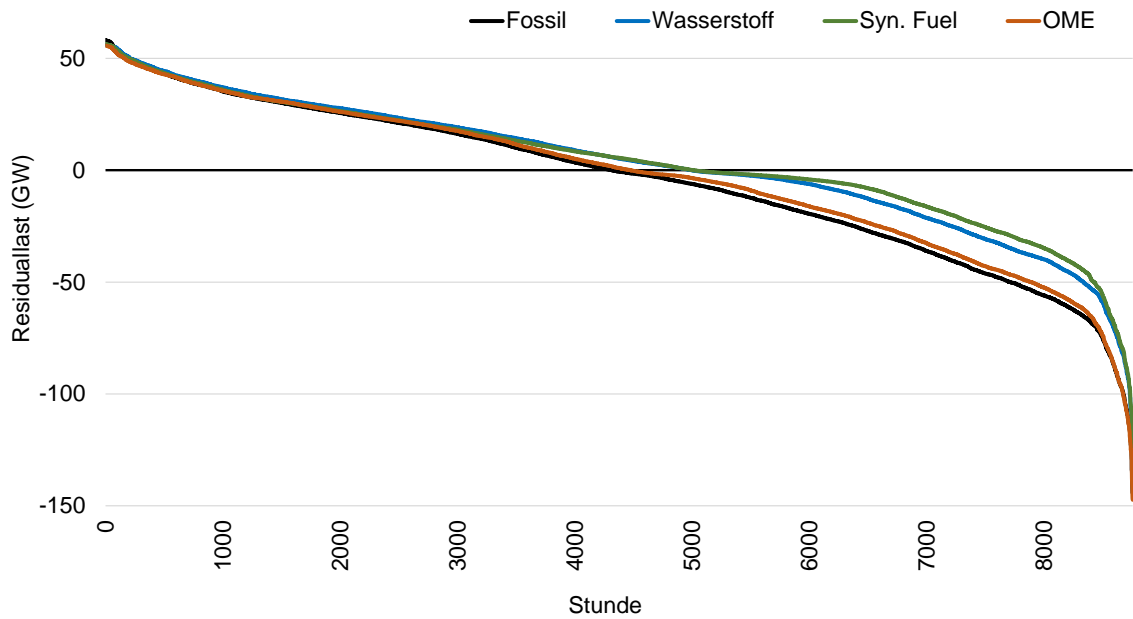


Abbildung 6 Geordnete Jahresdauerlinie der Residuallast des Stromsektors für die 4 betrachteten Szenarien.

Es ist klar ersichtlich, dass die Ereignisse negativer Residuallast durch den Einsatz von P2X-Technologien deutlich abnehmen, während zugleich nur ein sehr beschränkter Zuwachs an Ereignissen mit positiver Residuallast erkennbar ist.

Durch den massiven Einsatz erneuerbarer Energien schwanken die CO₂-Emissionen des Stromsektors über das Jahr stark. In Abbildung 7 ist dazu die geordnete Jahresdauerlinie des Stromsektors in den gewählten Szenarien gezeigt. Diese Kurve kann zur Abschätzung des anzunehmenden CO₂-Ausstoßes flexibel einsetzbarer P2X-Technologien in Abhängigkeit ihrer Volllaststunden herangezogen werden.

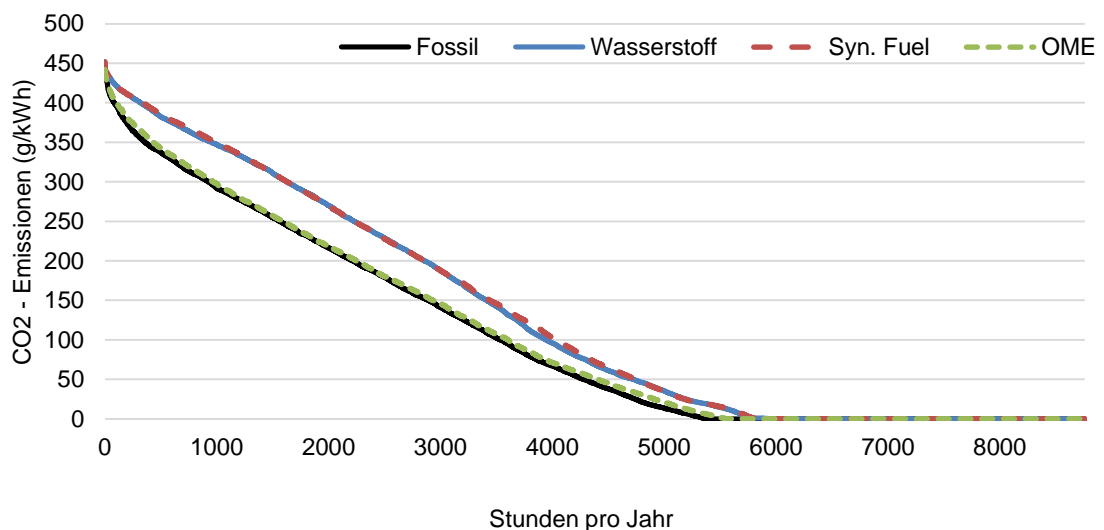


Abbildung 7 Geordnete Jahresdauerlinie der spezifischen CO₂-Emissionen des Stromsektors für die 4 betrachteten Szenarien.

Insgesamt ist eine bemerkenswerte Ähnlichkeit der Erzeugerparke trotz erheblichen Einsatzes von P2X-Technologien erkennbar. Die wesentlichen Unterschiede liegen in der Häufigkeit der Abregelungsereignisse, welche durch den Einsatz von P2X-Technologien erheblich reduziert werden können.

2. Empfohlener Strommix für P2X Technologien

Die Robustheit der Ergebnisse der Szenarien 2 und 3 führt uns zusammenfassend zum Erzeugerpark und einer Kraftwerksauslastung wie in Tabelle 1 dargestellt. Dieser ist durch Mittelwertbildung aus den beiden genannten Szenarien gewonnen. Szenario 4 wird aufgrund der nicht mehr vergleichbaren Annahmen (nur Treibstoffbeimischung) nicht für die Ermittlung des empfohlenen Strom-Mixes verwendet.

Tabelle 1 Kraftwerkspark für den empfohlenen Strommix

	Volllaststunden	Leistung [MW]	Energie [MWh]
Backup	2.420	40.460	98.123.759
Erdgaskraftwerk	137	3.351	459.398
Photovoltaik	998	176.914	176.533.389
Schwachwindturbine	2.690	84.156	226.346.829
Sonstiges	143	2.740	391.747
Starkwindturbine	2.950	39.034	114.838.451
Steinkohlekraftwerk	2.555	8.951	22.866.035
Wasserkraftwerk	4.276	6.142	26.260.706

Bei dem ermittelten Kraftwerkspark und -einsatz steigen die spezifischen Emissionen der P2X Produkte je nach Anzahl an Volllaststunden der Anlage an. Ein exemplarischer Entwicklungsverlauf ist in Abbildung 8 gezeigt.

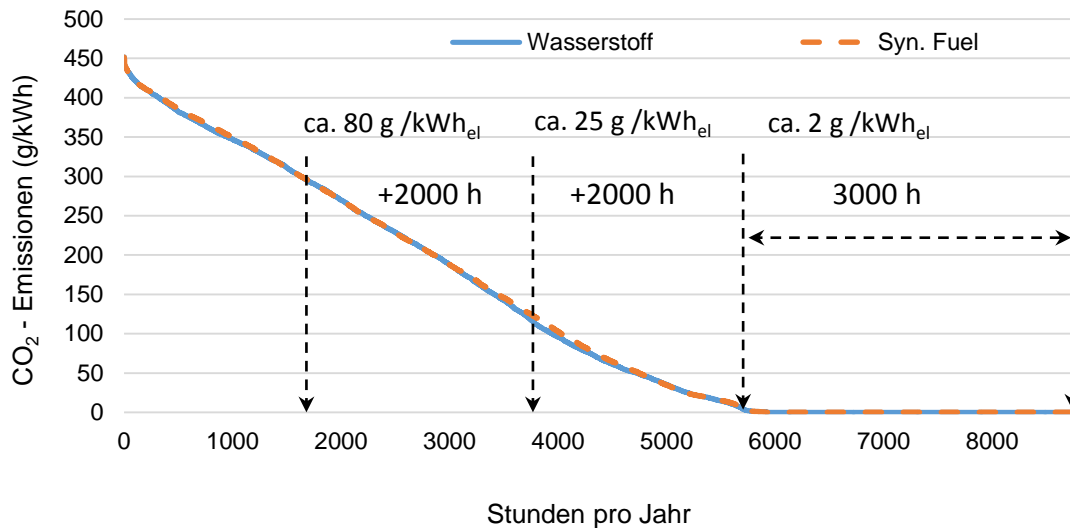


Abbildung 8 Direkte CO₂ Emissionen des P2X Stroms nach Volllaststunden.

Wir betrachten nun noch zwei mögliche Einsatzstrategien für P2X-Anlagen. Diese können als Basis für eine Lebenszyklusanalyse dienen. Vereinfachend nehmen wir nun alle fossilen Kraftwerke als Gas- und Dampf-Kraftwerke (GuD) mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 50 % an. Die Gesamtemissionen werden dabei aus den Szenarien übernommen. Mit diesen Annahmen erhalten wir dann den folgenden zeitgleichen Strom-Mix und die folgenden direkten Emissionen der elektrischen Input-Energie für P2X-Anlagen:

1. Einsatz mit 3000 Volllaststunden:

- 65 % Windenergie
- 35 % Solarenergie
- 0 g/kWh_{el}

2. Einsatz mit 8760 Volllaststunden:

- 40 % GuD mit 60 % elektrischem Wirkungsgrad
- 39 % Windenergie
- 21 % Solarenergie
- 130 g/kWh_{el}

3. Annahmen

Tabelle 2: Fahrzeugeffizienz

Fahrzeugtyp	Effizienz (MJ/km)
Brennstoffzellen (FCV)	0,73
Verbrennungsmotor (ICE)	1,21
Batterieelektrisches Fahrzeug	0,57

Tabelle 3: Installierte Kraftwerkskapazität aus [1]

Prozess	Installierte Kapazität (MW)	Kosten (€/MW)
Steinkohle	8.321	installiert
Erdgas	3.946	installiert
GUD	70.000	installiert
Sonstige	4.414	installiert
Biomasse/Biogas	495	installiert
Geothermie	1.887	installiert
Wasser	6.141	installiert
PV	121.337	571.000
Wind	117.067	1.167.000

Tabelle 4 Endenergiebedarf des Individualverkehrs entsprechend der Szenarien (in TWh)

Szenario	Fossil	BEV	Synfuel	FCV	OME
Referenzszenario	52	60	-	-	-
Szenario 2	-	60	-	31	-
Szenario 3	-	60	52	-	-
Szenario 4	42	60	-	-	52

Tabelle 5 P2X Technologien

Prozess	Wirkungsgrad	Kosten (€/MW)
PEM + LOHC	0,49	1.860.000
Synthetischer Treibstoff ⁶	0,68	1.860.000
Benzin	-	installiert
OME	0,2	1.860.000

Tabelle 6 Energiespezifischen Prozessparameter

Prozess	Emissionen (g/kWh _{el})	Brennstoffkosten ₂₀₅₀ (€/MWh)
Steinkohle	740	16
Erdgas	480	45
GUD	400	45
Sonstige	480	45
Biomasse/Biogas	0	43
Wasser	0	0
PV	0	0
Wind	0	0

Tabelle 7 Gesamtnachfrage nach Strom und Individualverkehr des Modells

Strombedarf (TWh)	432
Individualverkehr (Mrd. Fkm)	534

⁶ Angenommen 3 kg CO₂ benötigt für die Synthese von 1 kg Syn. Fuel

3.1. Detailergebnisse der einzelnen Szenarien

3.1.1. Szenario 1

Detailangaben zu den Ergebnissen des Referenzszenarios.

Tabelle 8 Volllaststunden, installierte Leistungen und produzierte Jahresenergie des Kraftwerksparks für das Referenzszenario ohne Einsatz von P2X-Technologien (71 % BEV im Individualverkehr, 29 % fossilgetriebene Fahrzeuge)

Prozess	Volllaststunden	Leistung (MW)	Energie (MWh)
Abregelung		150.339	132.843.720
Backup	2.620	41.580	108.925.198
Erdgaskraftwerk	120	3.351	401.705
Photovoltaik	999	163.212	162.996.563
Schwachwindturbine	2.694	83.597	225.245.678
Sonstiges	122	2.740	335.469
Starkwindturbine ⁷	2.948	39.356	116.010.601
Steinkohlekraftwerk	834	8.951	7.466.482
Wasserkraftwerk	4.276	6.142	26.260.706

⁷ Die Volllaststunden neuerer Windenergieanlagen (Installation 2016) erreichen im Durchschnitt 2721 Volllaststunden. Die den Starkwindturbinen werden sehr gute Windstandorte unterstellt.

3.1.2. Szenario 2

Detailangaben zu den Ergebnissen des Wasserstoffszenarios.

Tabelle 9 Volllaststunden, installierte Leistungen und produzierte Jahresenergie des Kraftwerksparks für das Szenario 2 (71 % BEV im Individualverkehr, 29 % wasserstoffgetriebene Fahrzeuge).

Prozess	Volllaststunden	Leistung (MW)	Energie (MWh)
Abregelung		144.620	77.962.737
Backup	2.170	39.236	85.126.256
Erdgaskraftwerk	173	3.351	580.429
Photovoltaik	997	178.898	178.297.448
Rueckverstromung	758	2.611	1.978.773
Schwachwindturbine	2.694	83.597	225.245.678
Sonstiges	181	2.740	494.951
Starkwindturbine	3.016	35.937	108.398.219
Steinkohlekraftwerk	4.215	8.951	37.722.751
Wasserkraftwerk	4.276	6.142	26.260.706
P2X	4.265	9.862	42.063.873

3.1.3. Szenario 3

Detailangaben zu den Ergebnissen des Synfuel Szenarios.

Tabelle 10 Volllaststunden, installierte Leistungen und produzierte Jahresenergie des Kraftwerksparks für das Szenario 3 (71 % BEV im Individualverkehr, 29 % Synfuel-getriebene Fahrzeuge)

Prozess	Volllaststunden	Leistung (MW)	Energie (MWh)
Abregelung		141.035	61.612.730
Backup	2.070	39.944	82.681.624
Erdgaskraftwerk	129	3.351	433.020
Photovoltaik	997	175.302	174.765.256
Rueckverstromung	704	1.568	1.103.275
Schwachwindturbine	2.694	83.597	225.245.678
Sonstiges	147	2.740	402.847
Starkwindturbine	3.015	35.991	108.518.619
Steinkohlekraftwerk	4.381	8.951	39.209.959
Wasserkraftwerk	4.276	6.142	26.260.706
P2X	3.917	14.252	55.826.721

3.1.4. Szenario 4

Detailangaben zu den Ergebnissen des OME Szenarios.

Tabelle 11 Volllaststunden, installierte Leistungen und produzierte Jahresenergie des Kraftwerksparks für das Szenario 4 (71 % BEV im Individualverkehr, 29 % fossil-getriebene Fahrzeuge mit 20 % OME Beimischung)

Prozess	Volllaststunden	Leistung (MW)	Energie (MWh)
Abregelung		170.663	128.038.780
Backup	2.818	41.080	115.761.959
Erdgaskraftwerk	126	3.351	422.437
Photovoltaik	999	190.245	190.074.289
Schwachwindturbine	2.676	85.834	229.650.281
Sonstiges	122	2.740	333.720
Starkwindturbine	2.819	44.852	126.426.365
Steinkohlekraftwerk	789	8.951	7.064.946
Wasserkraftwerk	4.276	6.142	26.260.706
P2X	5.206	10.051	52.329.697

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Installierte Leistungen des Kraftwerks- und Speicherparks für das Referenzszenarios ohne P2X-Technologien (71 % BEV im Individualverkehr, 29 % fossil getriebene Fahrzeuge).....	5
Abbildung 2 Installierte Leistungen des Kraftwerks- und Speicherparks für das Referenzszenarios mit P2X-Technologien (71 % BEV im Individualverkehr, 29 % Brennstoffzellenfahrzeuge).....	6
Abbildung 3 Installierte Leistungen des Kraftwerks- und Speicherparks für das Referenzszenarios mit P2X-Technologien (71 % BEV im Individualverkehr, 29 % Synfuel).....	7
Abbildung 4 Installierte Leistungen des Kraftwerks- und Speicherparks für das Referenzszenarios mit P2X-Technologien (71 % BEV im Individualverkehr, 29 % fossil getriebenen Fahrzeuge mit 20 %-iger OME Beimischung).....	8
Abbildung 5 Vergleich der Jahresenergieerzeugung für die 4 betrachteten Szenarien und Zusammensetzung der CO ₂ -Emissionen. Die Energieträger sowie der Strom sind in GWh aufgetragen. Die Emissionen in kt.....	9
Abbildung 6 Geordnete Jahresdauerlinie der Residuallast des Stromsektors für die 4 betrachteten Szenarien.....	10
Abbildung 7 Geordnete Jahresdauerlinie der spezifischen CO ₂ -Emissionen des Stromsektors für die 4 betrachteten Szenarien.....	10
Abbildung 8 Direkte CO ₂ Emissionen des P2X Stroms nach Volllaststunden.....	12

Literaturverzeichnis:

- [1] Klimaschutzszenario 2050; Öko Institut e.V, Fraunhofer ISI, 2015
- [2] MiD 2008 – Mobilität in Deutschland 2008, Tabellenband; infas, DLR
- [3] Working Paper, Konventionelle und alternative Fahrzeugtechnologien bei Pkw und schweren Nutzfahrzeugen – Potenziale zur Minderung des Energieverbrauchs bis 2050, Öko-Institut, 2014
- [4] Regenerative Energiesysteme, V. Quaschnig, Technologie - Berechnung – Simulation, Carl Hanser Verlag München, 2015
- [5] E-Fuels – Mehr als eine Option, K. Wagemann, F. Ausfelder, (White Paper), DECHEMA e.V., 2017
- [6] Windenergie Report Deutschland 2016, Fraunhofer IWES, 2017

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Kraftwerkspark für den empfohlenen Strommix.....	11
Tabelle 2: Fahrzeugeffizienz	13
Tabelle 3: Installierte Kraftwerkskapazität aus [1].....	13
Tabelle 4 Endenergiebedarf des Individualverkehrs entsprechend der Szenarien (in TWh)	13
Tabelle 5 P2X Technologien	14
Tabelle 6 Energiespezifischen Prozessparameter.....	14
Tabelle 7 Gesamtnachfrage nach Strom und Individualverkehr des Modells.....	14
Tabelle 8 Volllaststunden, installierte Leistungen und produzierte Jahresenergie des Kraftwerksparks für das Referenzszenario ohne Einsatz von P2X-Technologien (71 % BEV im Individualverkehr, 29 % fossilgetriebene Fahrzeuge).....	15
Tabelle 9 Volllaststunden, installierte Leistungen und produzierte Jahresenergie des Kraftwerksparks für das Szenario 2 (71 % BEV im Individualverkehr, 29 % wasserstoffgetriebene Fahrzeuge).	16
Tabelle 10 Volllaststunden, installierte Leistungen und produzierte Jahresenergie des Kraftwerksparks für das Szenario 3 (71 % BEV im Individualverkehr, 29 % Synfuel- getriebene Fahrzeuge)	17
Tabelle 11 Volllaststunden, installierte Leistungen und produzierte Jahresenergie des Kraftwerksparks für das Szenario 4 (71 % BEV im Individualverkehr, 29 % fossil- getriebene Fahrzeuge mit 20 % OME Beimischung)	18