



Prospektive Lebenszyklusanalysen von Power-to-Gas-Optionen

Jan Christian Koj

Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 649

ISBN 978-3-95806-794-3

Forschungszentrum Jülich GmbH
Institut für Energie- und Klimaforschung (IEK)
Jülicher Systemanalyse (IEK-3)

Prospektive Lebenszyklusanalysen von Power-to-Gas-Optionen

Jan Christian Koj

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 649

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-95806-794-3

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	I
Kurzfassung	II
Abstract	III
Inhaltsverzeichnis	IV
Glossar	VIII
Abkürzungen	IX
Abbildungsverzeichnis	XII
Tabellenverzeichnis	XVII
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung und Forschungsfragen	5
1.2 Aufbau der Arbeit.....	7
2 Technologischer Untersuchungsgegenstand: PtG-Optionen	9
2.1 Erläuterung und Abgrenzung relevanter Begrifflichkeiten	9
2.1.1 Erläuterung des Begriffs „PtX“	9
2.1.2 Erläuterung des Begriffs „PtG“	11
2.1.3 Abgrenzung von „PtX“ und „PtG“ zu „CCU“	11
2.2 PtG Technologien – Grundlegende Funktionsweise, Prozesse und Komponenten.....	13
2.2.1 Wasserstoffsynthese mittels Wasserelektrolyse (PtH ₂)	14
2.2.2 Produktion synthetischen Methans (PtCH ₄).....	20
2.2.3 CO ₂ -Bereitstellung	26
2.2.4 Speicherung und sonstige Infrastrukturen (Distribution).....	28
2.3 Reifegrad der Technologien	32
2.3.1 Technology Readiness Level (TRL).....	33
2.3.2 Weitere Reifegrade von Technologien.....	36
2.3.3 Verortung der Reifegrade der Technologien in dieser Arbeit	37
3 Methodischer Untersuchungsgegenstand: Lebenszyklusanalysen	38
3.1 Methodik der ökologischen Lebenszyklusanalyse	38
3.2 Methodik der Lebenszykluskostenrechnung	42
3.3 Stand der Forschung und des Forschungsbedarfs bezüglich Lebenszyklusanalysen mit Relevanz für Power-to-Gas.....	45
4 Methodischer Untersuchungsgegenstand: Prospektive Analysen	50

4.1	Methodische Aspekte prospektiver Lebenszyklusanalysen.....	50
4.1.1	Vergleichbarkeit: Herausforderungen und Lösungsansätze.....	51
4.1.2	Datenverfügbarkeit, -qualität und -anpassung	52
4.1.3	Unsicherheit: Herausforderungen und Lösungsansätze.....	55
4.2	Methodische Aspekte der Technologiefortschreibung und Skalierung und Stand der Forschung bezüglich ihrer Anwendung in prospektiven Lebenszyklusanalysen....	57
4.2.1	Quantitative Methoden zur Technologiefortschreibung.....	57
4.2.2	Qualitative Methoden zur Technologiefortschreibung	67
4.2.3	Skalierung und Skaleneffekte.....	71
5	Ansatz zur Analyse von Power-to-Gas-Optionen in den Jahren 2020 und 2050	73
5.1	Technologieauswahl und TRL-Bestimmung.....	74
5.1.1	Identifikation – Auswahlkriterium „Nennung der Technologien in relevanten Publikationen“	75
5.1.2	Auswahlkriterium „Mindest-TRL“	75
5.1.3	Auswahlkriterium „Datenverfügbarkeit“	79
5.1.4	Auswahlkriterium „Zukünftige Potenziale“	80
5.1.5	Technologieauswahl	83
5.1.6	Auswahl weiterer Pfad-Komponenten.....	83
5.2	Darstellung des Ansatzes zu den Lebenszyklusanalysen	86
5.2.1	Wahl methodischer Annahmen vor dem Hintergrund relevanter LCA- Richtlinien	86
5.2.2	Wahl methodischer Annahmen zu den Lebenszyklusanalysen im Detail.....	86
5.3	Systembildung für die Lebenszyklusanalysen.....	90
5.3.1	Verwendete Datenquellen.....	91
5.3.2	Technologieübergreifende Annahmen und Randbedingungen	91
5.3.3	Wasserelektrolysetechnologien.....	93
5.3.4	Methanisierungstechnologien	95
5.3.5	Kohlendioxidbereitstellung.....	97
5.3.6	Referenztechnologien: Dampfreformierung und Erdgas inkl. Vorkette	98
5.4	Beschreibung des Ansatzes zur prospektiven Lebenszyklusanalyse mittels Lernkurven und Trendextrapolation.....	99
5.4.1	Trendextrapolation des künftigen Materialbedarfs für den Bau der PtG- Technologien	101
5.4.2	Anpassung der Sachbilanzdaten auf Grundlage der Trendextrapolation.....	106

5.4.3	Trendextrapolation des künftigen Strombedarfs für den Betrieb der PtG-Technologien	108
5.5	Entwickelter Ansatz zur prospektiven Lebenszyklusanalyse von Power-to-Gas	111
6	Lebenszyklusanalysen für Power-to-Gas Optionen im Jahr 2020.....	114
6.1	Elektrolysetechnologien –Wirkungsabschätzung für das Jahr 2020	114
6.1.1	Elektrolysetechnologien – Treibhauspotenzial der Wasserstoffproduktion	114
6.1.2	Elektrolysetechnologien – Beiträge der Elektrolysestacks zum Treibhauspotenzial	116
6.1.3	Elektrolysetechnologien - Wirkungsabschätzung für ergänzende Indikatoren und Vergleich mit einer Referenztechnologie.....	117
6.2	Elektrolysetechnologien – Lebenszykluskosten im Jahr 2020.....	119
6.3	Methanisierungstechnologien – Wirkungsabschätzung für das Jahr 2020	120
6.3.1	Methanisierungstechnologien – Treibhauspotenzial der SNG-Produktion	120
6.3.2	Wirkungsabschätzung für ergänzende Indikatoren.....	122
6.4	Methanisierungstechnologien – Lebenszykluskosten im Jahr 2020	123
7	Lebenszyklusanalysen für Power-to-Gas-Optionen im Jahr 2050	124
7.1	Elektrolysetechnologien – Wirkungsabschätzung für das Jahr 2050	124
7.1.1	Elektrolysetechnologien – Treibhauspotenzial der Wasserstoffproduktion	124
7.1.2	Elektrolysetechnologien – Beiträge der Elektrolysestacks zum Treibhauspotenzial	125
7.1.3	Elektrolysetechnologien – Wirkungsabschätzung für ergänzende Indikatoren und Vergleich mit einer Referenztechnologie.....	126
7.2	Elektrolysetechnologien – Lebenszykluskosten im Jahr 2050.....	128
7.3	Methanisierungstechnologien – Wirkungsabschätzung für das Jahr 2050	129
7.3.1	Methanisierungstechnologien – Treibhauspotenzial der SNG-Produktion	129
7.3.2	Wirkungsabschätzung bezüglich anderer Indikatoren	130
7.4	Methanisierungstechnologien – Lebenszykluskosten im Jahr 2050	131
7.5	Wirkungsabschätzung für das Jahr 2050 unter Berücksichtigung von Lernkurven	133
7.5.1	Umweltlernkurvenanalysen der PtH ₂ -Systeme	133
7.5.2	Umweltlernkurvenanalysen der PtCH ₄ -Systeme	136
7.6	Lebenszykluskosten für das Jahr 2050 unter Berücksichtigung von Lernkurven	138
7.6.1	Lernkurvenanalysen der Wasserstoff-Gestehungskosten von PtH ₂ -Systemen	138
7.6.2	Lernkurvenanalysen der SNG-Gestehungskosten von PtCH ₄ -Systemen.....	141
8	Analysen zu Sensitivitäten, Multifunktionalität und zum flexiblen Anlagenbetrieb .	145

8.1	Sensitivitätsanalysen	145
8.1.1	Sensitivitätsanalysen zu den Ergebnissen der ökologischen Lebenszyklusanalysen	145
8.1.2	Sensitivitätsanalysen zu den Ergebnissen der Lebenszykluskostenrechnungen	150
8.2	Lebenszyklusanalysen der PtG-Systeme unter Berücksichtigung von Allokationen und weiteren Multifunktionalitätsansätzen	153
8.2.1	Elektrolysetechnologien – Multifunktionalitätsanalysen zum Treibhauspotenzial der Wasserstoffproduktion	153
8.2.2	Methanisierungstechnologien – Multifunktionalitätsanalysen zum Treibhauspotenzial der SNG-Produktion.....	156
8.3	Lebenszykluskostenrechnung unter Berücksichtigung der Multifunktionalität der PtG-Systeme.....	160
8.3.1	Elektrolysetechnologien – Wasserstoff-Gestehungskosten unter Berücksichtigung von Erlösen	160
8.3.2	Methanisierungstechnologien – SNG-Gestehungskosten unter Berücksichtigung von Erlösen	161
8.4	Beschreibung von Unsicherheiten der Lebenszyklusanalysen.....	161
8.4.1	Beschreibung der Unsicherheiten der Lebenszyklusanalysen für das Jahr 2020.....	161
8.4.2	Beschreibung der Unsicherheiten der Lebenszyklusanalysen für das Jahr 2050.....	162
8.4.3	Weitere Unsicherheiten unabhängig vom Analysezeitpunkt	164
8.5	Exkurs zu den Effekten des flexiblen Betriebs der PtG-Anlagen	164
9	Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick.....	167
9.1	Zusammenfassung der Analysen der Gegenwart	167
9.2	Zusammenfassung der Erkenntnisse prospektiver Analysen.....	168
9.3	Zusammenfassung der Erkenntnisse zu Sensitivitäten, Multifunktionalität, Unsicherheit und zum flexiblen Betrieb von PtG-Anlagen.....	169
9.4	Zusammenfassung weiterer Erkenntnisse.....	171
9.5	Diskussion und Ausblick	171
	Referenzen	174
	Anhang	191

Energie & Umwelt / Energy & Environment
Band / Volume 649
ISBN 978-3-95806-794-3