

Inhaltsverzeichnis

Autorenverzeichnis	V
Vorwort	XIX
Geleitwort	XXI
1. Einleitung	1
2. Konzepte – Anforderungen	6
2.1 Einführung	6
2.2 Systemische Kopplung der Sektoren Strom und Gas	9
2.2.1 Strom- und Gasinfrastruktur und Kopplungselemente	9
2.2.1.1 Infrastruktur des Stromsektors	9
2.2.1.2 Infrastruktur des Gassektors	11
2.2.1.3 Kopplung der Strom- und Gasinfrastrukturen	13
2.2.2 Nutzen der Systemkopplung	15
2.2.2.1 Bereitstellung „grüner Energie und Rohstoffe“ für Mobilität, Wärmesektor und Industrie	15
2.2.2.2 Langzeitstromspeicher	18
2.2.2.3 Beitrag zur Stabilität des Stromsystems	21
2.2.2.4 Reduzierung des Stromnetzausbaus	23
2.2.3 Herausforderungen der Systemkopplung	27
2.2.3.1 Standortaspekte aus der Netzperspektive	27
2.2.3.2 Gemeinsame Automatisierung von Strom- und Gasnetzen	30
2.3 Power-to-Gas-Konzepte	33
2.3.1 Einführung	33
2.3.2 Gesamtüberblick Power-to-Gas-Konzepte und Hauptanlagenelemente	34
2.3.2.1 Elektrolyse	34
2.3.2.2 Methanisierung	35
2.3.2.3 Verdichter	36
2.3.2.4 Untertage- und Obertagezwischenspeicher/Pufferspeicher	36
2.3.3 Wirkungsgrade von PtG-Konzepten	38

2.3.4 Technische Wertschöpfungsketten und Kombinationsmöglichkeiten	40
2.3.4.1 Grundlage der wirtschaftlichen Berechnung.....	41
2.3.4.2 Gas-Gestehungskosten für Einzelmodelle	43
2.3.4.3 Gas-Gestehungskosten für Kombinationsmodelle	45
2.4 Potenziale zur Erzeugung von Wasserstoff und Methan auf Basis von erneuerbaren Energien	47
2.4.1 Ursprung der Energie für Gase aus Power-to-Gas-Anlagen	48
2.4.2 Definition der Potenziale	48
2.4.3 Theoretisches Erzeugungspotenzial in Deutschland.....	50
2.4.4 Nutzung von Wasserstoff und Methan aus erneuerbaren Energien in Energiesystemszenarien	52
2.4.5 Installierte Power-to-Gas-Leistung in Energiesystemszenarien.....	56
2.4.6 Entwicklung der Einsatzmöglichkeiten von Power-to-Gas	57
2.4.6.1 Entwicklung einer Wasserstoffinfrastruktur	57
2.4.6.2 Entwicklung der Power-to-Gas-Absatzmärkte	58
2.4.6.3 Internationale Aspekte der Power-to-Gas-Entwicklung.....	60
3. Grundlagen der Wasserelektrolyse zur Wasserstoffherzeugung	66
3.1 Die energiepolitische Rolle der Wasserelektrolyse.....	66
3.2 Grundlagen der Wasserelektrolyse	67
3.2.1 Funktionsweise und Arten der Wasserelektrolyse.....	67
3.2.2 Thermodynamische Grundlagen	69
3.2.3 Massen- und Volumenumsätze	71
3.2.4 Kinetische Effekte.....	72
3.2.5 Wirkungsgrad der Wasserelektrolyse	74
3.2.6 Leistungskennwerte der verschiedenen Elektrolysearten.....	77
3.3 Alkalische Wasserelektrolyse	78
3.3.1 Zellaufbau und Zellmaterialien	78
3.3.2 Zellstapel.....	81
3.3.3 Peripherie und Systemaufbau	83
3.3.4 Technische Kennwerte	84
3.4 PEM-Elektrolyse.....	87
3.4.1 Zellmaterialien und -komponenten.....	88
3.4.2 Zell- und Stackdesign.....	92
3.4.3 Peripherie und Systemaufbau	94
3.4.4 Technische Kennwerte	97
3.5 Hochtemperatur-Dampfelektrolyse	101
3.5.1 Materialien, Zellaufbau und Stacks	101

3.5.2 Peripherie und Systemaufbau	104
3.5.3 Technische Kennwerte	106
3.6 Herstellerübersicht.....	109
3.7 Ökonomische Betrachtungen und Kostenstrukturen	111
3.7.1 Investitionskosten	112
3.7.2 Wasserstoffgestehungskosten	114
4. Erzeugung von synthetischem Erdgas über PtG-Prozesse.....	124
4.1 Einführung	124
4.2 Technologien zur CO ₂ -Bereitstellung	124
4.2.1 Verfahren zur CO ₂ -Gewinnung aus Punktquellen.....	125
4.2.1.1 Adsorptive Verfahren.....	125
4.2.1.2 Membranverfahren	134
4.2.1.3 Absorptive Verfahren (Gaswäschen)	138
4.2.1.4 Sonstige Verfahren zur CO ₂ -Abtrennung aus Punktquellen.....	153
4.2.1.5 Zusammenfassung.....	154
4.2.2 Verfahren zur CO ₂ -Gewinnung aus Meerwasser.....	156
4.2.3 Verfahren zur CO ₂ -Gewinnung aus Luft	157
4.3 Methanisierung	160
4.3.1 Grundlagen	160
4.3.1.1 Definitionen	162
4.3.1.2 Thermodynamisches Gleichgewicht.....	163
4.3.2 Katalytische Methanisierung.....	165
4.3.2.1 Katalysator.....	165
4.3.2.2 Reaktionskinetik.....	167
4.3.2.3 Reaktorkonzepte	168
4.3.2.4 Dynamisches Betriebsverhalten	175
4.3.3 Biologische Methanisierung	177
4.3.3.1 In-situ-Verfahrenskonzept	178
4.3.3.2 Ex-situ-Verfahrenskonzept	179
4.3.3.3 Reaktorkonzepte	180
4.3.3.4 Demonstrationsanlagen.....	182
4.3.3.5 Dynamisches Betriebsverhalten	183
4.3.4 Vergleich der katalytischen und biologischen Methanisierung	183
4.4 SNG-Prozessketten und Erzeugungspotenziale.....	185
4.4.1 Prozessketten zur Erzeugung von SNG.....	185
4.4.1.1 Methodik zur Erstellung und energetischen Bewertung von PtG-Prozessketten.....	186

4.4.1.2	Parameterfestlegung für die Elektrolyse, Verdichtung und Verflüssigung	189
4.4.1.3	Prozesskette Wirbelschichtvergasung mit katalytischer Methanisierung	189
4.4.1.4	Prozesskette Fermentation mit katalytischer Methanisierung	195
4.4.1.5	Prozesskette Fermentation mit biologischer Methanisierung	198
4.4.1.6	Prozesskette Direct Air Capture mit katalytischer Methanisierung	199
4.4.1.7	Prozesskette CO ₂ -Abtrennung aus industriellem Abgas mit katalytischer Methanisierung	201
4.4.1.8	Perspektiven von PtG-Anlagen – Flexibilität und Dynamik	202
4.4.2	CO ₂ -Potenziale in Deutschland für PtG-Prozesse	204
4.4.2.1	Kategorisierung der CO ₂ -Quellen	205
4.4.2.2	Langfristiges Potenzial der betrachteten Quellen	205
4.4.2.3	Räumliche Verteilung von CO ₂ -Quellen in Deutschland	207
4.4.2.4	Gesamtpotenzial für die Erzeugung von EE-Methan in Deutschland	208
4.5	Import von EE-Gasen	210
4.5.1	Erzeugung von EE-Gasen in der MENA-Region	210
4.5.2	Energiedichte von EE-Gasen	211
4.5.3	Import von EE-Methan	211
4.5.4	Import von EE-Wasserstoff	214
5.	Integration von Wasserstoff in die öffentliche Gasversorgung	230
5.1	Einleitung	230
5.1.1	Wasserstoff in der öffentlichen Gasversorgung – Hintergrund	230
5.1.2	Wasserstoff in der öffentlichen Gasversorgung – zeitliche Entwicklung	231
5.2	Einfluss der Einspeisung auf die Gasbeschaffenheit	234
5.2.1	Einordnung und Rahmenbedingungen	234
5.2.2	Allgemeine Stoffdaten der Grundgase Methan und Wasserstoff	235
5.2.3	Transporteigenschaften von Wasserstoff und Erdgas-Wasserstoff-Gemischen	238
5.2.3.1	Transportkapazität von Leitungen	238
5.2.3.2	Speicherkapazität von Untergrundgasspeichern	242
5.2.3.3	Verdichterleistung	243
5.2.3.4	Der Joule-Thomson-Effekt und die erforderliche Gasvorwärmung	244
5.2.3.5	Transporteigenschaften – ein Fazit	245
5.2.4	Anwendungseigenschaften von Wasserstoff und Erdgas-Wasserstoff-Gemischen bei der Verbrennung	246
5.2.4.1	Veränderungen des Wobbe-Index	246
5.2.4.2	Verbrennungsmittelbedarf und Abgasvolumen	250
5.2.4.3	Brenngeschwindigkeit und adiabate Flammentemperatur	253
5.2.4.4	Einfluss auf die Stoffwerte des Abgases	254
5.2.4.5	Anwendungseigenschaften – ein Fazit	255

5.2.5 Sicherheitstechnische Fragestellungen beim Umgang mit Wasserstoff	256
5.2.5.1 Zündeigenschaften	256
5.2.5.2 Leckagen	257
5.2.5.3 Sicherheitstechnische Eigenschaften – ein Fazit	259
5.3 Stand des Wissens zum technischen Einfluss von Wasserstoff auf die Gasnetze	260
5.3.1 Transportnetz	262
5.3.2 Untergrundgasspeicherung	262
5.3.3 Gasdruckregelung und Energiemessung	262
5.3.4 Verteilnetz	263
5.3.5 Gasanwendung	263
5.4 Einfluss von Wasserstoff auf die Untergrundgasspeicherung	264
5.4.1 Einführung	264
5.4.2 Grundlagen	264
5.4.3 Wasserstoff und die untertägige Anwendung	267
5.4.4 Wasserstoffspeicherung und Kavernenspeicher	270
5.4.5 Wasserstoffspeicherung und Porenspeicher	271
5.4.6 Wasserstoffspeicherung und der Bohrlochausbau	272
5.4.7 Wasserstoffspeicherung und Geomonitoring	273
5.4.8 Zusammenfassung	273
5.5 Stand des Wissens zum technischen Einfluss von Wasserstoff auf die Gasanwendung	276
5.5.1 Einleitung	276
5.5.2 Einfluss von Wasserstoff auf die Bestandteile der Gasinstallation im häuslichen und gewerblichen Bereich	277
5.5.2.1 Leitungssystem	277
5.5.2.2 Leitungsdimensionierung	277
5.5.2.3 Dichtheit von Verbindern	278
5.5.2.4 Aktives-Sicherheitskonzept – Gasströmungswächter	279
5.5.2.5 Gaszähler	280
5.5.2.6 Flammenüberwachung	281
5.5.3 Einfluss von Wasserstoff auf die Bestandteile der Gasinstallation im industriellen Bereich	281
5.5.4 Einfluss von Wasserstoff auf häusliche und gewerbliche Gasanwendung	284
5.5.4.1 Brennwertgeräte	284
5.5.4.2 BHKW	285
5.5.4.3 Kochgeräte	288
5.5.5 Industrielle Gasanwendung	288
5.5.5.1 Heißwassererzeuger/ Gaskraftwerke	288
5.5.5.2 Gasturbinen und GuD-Kraftwerke	289
5.5.5.3 Industrieanlagen	290

5.6	Laufende Entwicklungsarbeiten.....	293
5.6.1	Transportnetz	294
5.6.2	Verteilnetz.....	298
5.6.3	Hersteller.....	301
5.6.4	Technische Regeln und Normen	304
5.6.5	„Hypos“	304
5.6.6	International UK.....	305
6.	Einspeisesysteme für Wasserstoff und Methan.....	310
6.1	Einführung	310
6.2	Technische Regeln für Einspeisesysteme	310
6.2.1	Einspeisesysteme.....	310
6.2.2	Anforderungen an die Funktion und die Sicherheit von Einspeisesystemen ...	311
6.2.3	Technische Regeln	312
6.2.4	Anwendung Technischer Regelwerke.....	313
6.2.5	Arbeitsschutz, Schulungskonzepte und Sicherheitsdatenblätter.....	314
6.2.6	Einspeiseanlagen als Teil eines Power-to-Gas-Stromspeichers	315
6.2.7	H ₂ -Produktqualität und Einspeiseanforderungen.....	318
6.2.8	Regelwerksverweise.....	320
6.3	Komponenten von Einspeisesystemen.....	323
6.3.1	Wasserstoffreiche Brenngase – die Geschichte der Gasindustrie.....	323
6.3.2	Mindestanforderungen an Komponenten und Anlagen.....	323
6.3.3	Komponenten eines Einspeisesystems.....	325
6.3.3.1	Druckstufentrennung	326
6.3.3.2	Redundante Einspeisesysteme	327
6.3.3.3	Explosionsschutz.....	327
6.3.3.4	Gaswarneinrichtungen und Brandmeldeanlagen.....	328
6.3.3.5	Odorierung	329
6.3.3.6	Einspeisepunkt	329
6.3.3.7	Mischung des Wasserstoffs mit dem Grundgas	330
6.3.3.8	Werkstoffe und Materialauswahl.....	331
6.3.3.9	Auslegung der Wasserstoff-Verbindungsleitungen.....	333
6.3.3.10	Systeme zur Lecküberwachung der Wasserstoffleitungen.....	333
6.3.3.11	H ₂ -Verdichtung	334
6.3.3.12	Regelung des H ₂ -Flusses	334
6.3.3.13	Prüfungen und Inbetriebnahme	335
6.3.3.14	Instandhaltung.....	335
6.3.4	Metrologie der regenerativen Gase	335
6.3.4.1	Verfahrenstechnische und betriebliche Instrumentierung	336

6.3.4.2	Eichpflichtige Wasserstoffmessung	337
6.3.4.3	Wasserstoffangereicherte Erdgase	339
6.3.4.4	Gasmessstellen im Verteilnetz	340
6.3.4.5	Gasförmiges Kohlenstoffdioxid	340
6.3.5	Fernwirktechnik	341
6.4	Betrieb von Einspeisesystemen und nachgelagerten Gasnetzabschnitten	344
6.4.1	Allgemeine Einführung	344
6.4.2	Begriffsdefinition	344
6.4.3	Betrieb von Einspeiseanlagen für Wasserstoff	345
6.4.4	Betrieb von Einspeiseanlagen für synthetisches Erdgas	346
6.4.5	Betrieb von nachgelagerten Gasnetzabschnitten	347
6.4.6	Betriebsorganisation für Einspeiseanlagen	348
7.	Ökologische, wirtschaftliche und sozioökonomische Bewertung von PtG-Technologien	350
7.1	Einführung	350
7.2	Ökologische Bewertung von PtG-Prozessen	350
7.2.1	Grundlagen der Ökobilanz-Methode	351
7.2.1.1	Ziel und Untersuchungsrahmen	351
7.2.1.2	Sachbilanz (Life Cycle Inventory Analysis, LCI)	352
7.2.1.3	Wirkungsabschätzung (Life Cycle Impact Assessment, LCIA)	353
7.2.1.4	Interpretation	355
7.2.2	Weitere Methoden zur Analyse von Umweltauswirkungen	356
7.2.2.1	Well-to-Wheel-Analyse	356
7.2.2.2	Methode RED	357
7.2.3	Ökobilanzierung von PtG-Produkten	357
7.2.3.1	Methodische und regulatorische Besonderheiten	358
7.2.4	Vereinfachte Klimabilanz für ausgewählte PtG-Prozessketten	361
7.2.4.1	Ergebnisse	363
7.3	Techno-ökonomische Rahmenbedingungen für Power-to-Gas	367
7.3.1	Kapitalgebundene Kostenfaktoren	368
7.3.1.1	Globale Marktpotenziale für Power-to-Gas	368
7.3.1.2	Auswirkung von Lernkurven und Skaleneffekten	371
7.3.2	Verbrauchsgebundene Kostenfaktoren	374
7.3.2.1	Strombezugskosten	374
7.3.2.2	Kosten für CO ₂	376
7.3.2.3	Verkauf von Nebenprodukten	376
7.3.3	Sonstige Parameter	376
7.3.3.1	Effizienz der Elektrolyse	377

7.3.3.2 Lebensdauer des Elektrolyseurs	377
7.3.3.3 Elektrolyseur – Hot Stand-by Stromverbrauch.....	377
7.3.4 Ergebnisse der techno-ökonomischen Bewertung.....	377
7.3.4.1 PtG-Anlage gekoppelt mit PV- oder Windkraftanlage	378
7.3.4.2 PtG-Anlage gekoppelt mit Stromnetz	379
7.3.5 Zusammenfassung	381
7.4 Soziale Akzeptanz von lokalen erneuerbaren Energiesystemen unter Einbeziehung der Power-to-Gas Technologie.....	385
7.4.1 Einleitung	385
7.4.2 Datenbasis	386
7.4.3 Ergebnisse	389
7.4.4 Zusammenfassung	394
8. Projekte aus der Praxis.....	398
8.1 Einleitung	398
8.2 Falkenhagen.....	398
8.2.1 Einführung	399
8.2.2 „Windgas Falkenhagen“.....	399
8.2.2.1 Verfahrensbeschreibung	400
8.2.2.2 Betrieb	401
8.2.3 „STORE&GO“ Methanisierung Falkenhagen.....	401
8.2.3.1 Projektidee.....	401
8.2.3.2 Verfahrensbeschreibung	402
8.2.3.3 Betrieb und Ergebnisse.....	404
8.2.4 Lessons Learned.....	407
8.3 „Portal Green“ – Power-to-Gas-Leitfaden zur Integration erneuerbarer Energien	407
8.4 Untersuchung von stark wasserstoffhaltigen Brenngasen in Gasmotoren.....	408
8.4.1 Einleitung	408
8.4.2 Experimenteller Aufbau.....	409
8.4.3 Untersuchungsergebnisse.....	410
8.4.4 Caterpillar Energy Solutions.....	412
8.4.5 Zusammenfassung	412
Stichwortverzeichnis	414
Inserentenverzeichnis	417