

Inhaltsverzeichnis

1	Das deutsche Stromsystem vor dem Hintergrund der Energiewende	1
1.1	Erneuerbare Energien für die Energiewende	1
1.1.1	Auswirkungen und Ziele der Energiewende im Stromsektor	1
1.1.2	Potenziale der erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung	2
1.1.3	Technischer Fortschritt als Grundlage für die Energiewende	6
1.1.4	Förderung regenerativer Erzeugungsanlagen in Deutschland	11
1.2	Entwicklung des deutschen Stromprofils	14
1.2.1	Stromerzeugung – internationaler Vergleich	14
1.2.2	Energieverbrauch – Abgrenzung von Primär- bis Nutzenergieverbrauch	16
1.2.3	Entwicklung des Stromprofils in den 2010er-Jahren	17
1.2.4	Prognosen eines zukünftigen Erzeugungs- und Verbrauchsprofils	18
1.2.5	Mögliche Stromprofile je Ausbaugrad	21
1.3	Ausgangslage und notwendige Anpassungen der Stromnetze und des Stromsystems an eine veränderte Einspeisesituation	33
1.3.1	Netzdaten	33
1.3.2	Stromnetzausbau	34
1.3.3	Strom- und Spannungsgrenzen	45
1.3.4	Qualität, Zuverlässigkeit und Sicherheit	46
1.3.5	Systemdienstleistungen	47
1.3.6	Bilanzkreis- und Ausgleichsenergiesystem	56
1.3.7	Gesicherte Leistung – Leistungsbilanz	58
1.4	Strommärkte für Erzeuger, Zwischenhändler und Verbraucher	60
1.4.1	Strombörse	61
1.4.2	OTC-Handel	63
1.4.3	Leistungsmärkte – Regelleistungsmarkt	63
1.4.4	Grünstrommarkt	67
1.4.5	Einzelhandel – Endkundenstrompreise	69
1.4.6	Strommarkt 2.0	73

1.5	Investitionsentscheidungen bezüglich Stromerzeugungseinheiten	75
1.5.1	Stromgestehungskosten	75
1.5.2	Grenzkosten	79
1.5.3	Grenzpreis unter Berücksichtigung von Ab- und Wiederanfahrkosten	80
1.5.4	Einschränkung der Stromgestehungskosten – Erweiterung zu den volkswirtschaftlichen Gesamtkosten	82
1.5.5	Einheitspreissystem – Merit Order des Kraftwerksparks	86
1.5.6	Investitionsentscheidungen und Vermarktungsmöglichkeiten von konventionellen Kraftwerken	87
1.5.7	Investitionsentscheidungen und Vermarktungsmöglichkeiten von Erneuerbare-Energien-Anlagen	88
1.6	Resümee	91
2	Stromspeicher – Technologien, Kosten und Bedarf	93
2.1	Definition und Klassifizierung von Energie- und Stromspeichern	93
2.2	Technologischer Reifegrad, Kennwerte und Einsatzmöglichkeiten im Stromsektor	96
2.2.1	Technologischer Reifegrad	96
2.2.2	Kennwerte	97
2.2.3	Einsatzmöglichkeiten im Stromsektor	101
2.2.4	Erhöhung des Eigenverbrauchs	103
2.3	Rechtliche Rahmenbedingungen für stationäre Stromspeichersysteme . . .	106
2.4	Bestand stationärer Stromspeichersysteme und Ausblick	111
2.5	Stromspeicherkosten	118
2.5.1	Investitionskosten	118
2.5.2	Erfahrungskurven für Stromspeichertechnologien	121
2.5.3	Stromspeicherungskosten	123
2.6	Stromspeicherbedarf im Zuge der Energiewende	128
2.7	Vorrangige Flexibilitätsoptionen	131
2.7.1	Prognosegüte	131
2.7.2	Flexibler Betrieb von Verbrauchern – Lastmanagement	132
2.7.3	Flexibler Betrieb von Erzeugern – Erzeugungsmanagement	135
2.7.4	Stromexport und -import	136
2.7.5	Alternative Erbringer von Systemdienstleistungen	137
2.7.6	Ausbaugrad des Stromtransportnetzes	138
2.8	Studien zum Stromspeicherbedarf	138
2.8.1	Studienübersicht „Energiespeicher“	138
2.8.2	„Roadmap Speicher“	141
2.8.3	„Energiesystem Deutschland 2050“	151
2.8.4	„Stromspeicher in der Energiewende“	156
2.9	Maximal erforderliche Speicherkapazität aufgrund negativer Residuallasten für eine erneuerbare Vollversorgung	162
2.10	Resümee	166

3 Power-to-Gas – Technologien und Kosten 169

3.1 Das Power-to-Gas-Konzept 169

3.2 Technologieübersicht und Herstellungsverfahren von synthetischen Gasen 171

3.2.1 Elektrolyse 171

3.2.2 Methanisierung 183

3.2.3 Chemische Methanisierung 185

3.2.4 Biologische Methanisierung 191

3.2.5 Kohlendioxidquellen 195

3.3 Verwendung der bestehenden Erdgasinfrastruktur 198

3.3.1 Gasbeschaffenheiten 198

3.3.2 Wasserstofftoleranz der deutschen Erdgasinfrastruktur 200

3.3.3 Gaseinspeisung 202

3.3.4 Speicher- und Transportpotenzial 205

3.3.5 Entwicklung der Nachfrage nach Erdgas 210

3.3.6 Wasserstofftransport 211

3.4 Zusammenfassung der Kosten und Wirkungsgradketten von Power-to-Gas 213

3.4.1 Wirkungsgradketten 213

3.4.2 Kosten 215

3.5 Rechtliche Rahmenbedingungen von Power-to-Gas 219

3.5.1 Stromsektor 219

3.5.2 Gassektor 220

3.6 Direkte Kopplung von Power-to-Gas-Anlagen mit regenerativen Erzeugern 220

3.6.1 Eigenversorgung von Power-to-Gas-Anlagen 220

3.6.2 Rechtliche Rahmenbedingungen der Eigenversorgung 221

3.7 Gasgestehungskosten synthetischer Gase 224

3.7.1 Untersuchungsrahmen 224

3.7.2 Berechnungsmethodik 226

3.7.3 Teillastbetrieb 229

3.7.4 Variante 1: Strombezug am Day-Ahead-Markt – Basisvariante ... 230

3.7.5 Variante 2: Eigenversorgung mit EEG-Vergütung nicht genutzter Windenergiemengen 232

3.7.6 Variante 3: Eigenversorgung ohne EEG-Vergütung nicht genutzter Windenergiemengen 233

3.7.7 Variante 4: Eigenversorgung ohne Netzeinspeisung für abgelegene Standorte 236

3.7.8 Gasgestehungskosten von synthetischem Methan 238

3.8	Netzdienlichkeit von Power-to-Gas-Anlagen	240
3.8.1	Verringerung von Redispatch und Einspeisemanagementmaßnahmen	240
3.8.2	Reduktion von Verteilnetzausbau	240
3.9	Weitere Wasserstoffherstellungsverfahren neben Power-to-Gas	241
3.10	Resümee	243
Literatur		245
Stichwortverzeichnis		259