
Stromspeicher und Power-to-Gas im deutschen Energiesystem

Martin Zapf

Stromspeicher und Power-to-Gas im deutschen Energiesystem

Rahmenbedingungen, Bedarf und
Einsatzmöglichkeiten

 Springer Vieweg

Martin Zapf
Mönchsberg, Deutschland

ISBN 978-3-658-15072-3
DOI 10.1007/978-3-658-15073-0

ISBN 978-3-658-15073-0 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Strasse 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Geleitwort

Bis in die 1990er-Jahre dominierten fossile Energien alle Sektoren – die Erzeugung von Strom, Wärme und die Bereitstellung von Mobilität. Pioniere der erneuerbaren Energien, die sich mit Photovoltaik, Windenergie, Biomasse und anderen erneuerbaren Energiequellen beschäftigten, wurden belächelt. Der durch die Emission aus fossiler Energie verursachte Klimawandel wurde mehr als ein weiteres Jahrzehnt lang von wichtigen Vertretern aus Politik und Wirtschaft infrage gestellt. Im Jahr 2000 wurde in Deutschland das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) verabschiedet. Große Energiekonzerne sahen dieses Gesetz zunächst nicht als Gefahr für ihre Geschäftsmodelle an. Im Jahr 2015 betrug der Anteil erneuerbarer Energien in Deutschland jedoch bereits mehr als 32 % des Bruttostromverbrauchs. Die Erfahrungskurven der Technologien wurden rascher durchlaufen als erwartet, auch aufgrund mehrerer unerwarteter Technologiesprünge. Die Transformation vom fossilen zum erneuerbar dominierten Energiesystem schreitet seit dem Jahr 2000 nicht nur in Deutschland, sondern weltweit immer rascher voran. Das EEG hat einen wesentlichen Beitrag dazu geleistet, dass heute die technologischen Voraussetzungen für das 2°-C-Ziel vorhanden sind. In vielen Anwendungsfällen, abhängig von geografischen Gegebenheiten, sind erneuerbare Technologien bereits heute günstiger als fossil basierte Technologien, und mittlerweile wird für 2023 der endgültige Break-even der Herstellungskosten erneuerbarer und fossiler Energien prognostiziert.

Martin Zapf beschreibt in seinem Buch diese Transformation – v. a. im Bereich der Stromerzeugung. Er stellt dem Leser einen systemorientierten und vollständigen Überblick über Technologien, Infrastrukturen und Marktmechanismen sowohl des fossilen als auch des erneuerbar dominierten Systems gegenüber. Dabei versteht er es, den Detaillierungsgrad seiner Ausführungen so zu wählen, dass das Buch einerseits als Informationsquelle für Experten dienen kann, aber auch einem technisch interessierten Nicht-Experten einen sehr präzisen Einblick über die Problemstellungen gibt, die die oben genannte Transformation nach sich zieht. Insbesondere arbeitet Zapf die Bedeutung von Speichern für ein von fluktuierenden Quellen dominiertes Energiesystem heraus und untersucht die wirtschaftlichen und politischen Rahmenbedingungen, unter denen Power-to-Gas-Anlagen wirtschaftlich werden können. Dabei wird auch die Bedeutung von Power-to-Gas für eine rasche Dekarbonisierung des Transportsektors beleuchtet.

Die Arbeit von Martin Zapf als Forschungsmitarbeiter in meiner Abteilung hatte zum Ziel, Betriebsmodi von Power-to-Gas-Anlagen (Direktanbindung an Windparks oder Netzanbindung) zu vergleichen. Mit dem vorliegenden Buch ist ihm eine Arbeit gelungen, die weit über das ursprüngliche Ziel hinausgeht und wesentliche Erkenntnisse über Technologien, Probleme und Lösungsansätze liefert, die beim Übergang von fossilen zu erneuerbaren Energien auftreten.

Die Transformation des Energiesystems von fossilen zu erneuerbaren Energieträgern ist in vollem Gange. Heute stehen Firmen vor großen wirtschaftlichen Problemen, die jahrzehntelang Kernenergie als wirtschaftlich und die Stromgewinnung aus Braunkohle als umweltfreundlich propagierten. Die Transformation betrifft nicht nur die Märkte der Primärenergieträger und die Energieumwandlungstechnologien, sondern auch alle Infrastrukturen in allen Sektoren und deren Vernetzung untereinander. Ebenso werden sich Marktmodelle radikal ändern, die derzeit von Grenzkosten der Primärenergieträger Kohle und Erdgas dominiert sind.

Zapfs Arbeit liefert Lösungsansätze für viele der komplexen Probleme, die während der Transformation auftreten und noch auftreten werden. Sie ist somit eine wertvolle Lektüre für alle, die an der Transformation des Energiesystems in Wirtschaft, Wissenschaft und Politik arbeiten.



Dr. Hermann Pengg
Leiter erneuerbare Kraftstoffe und Lebenszyklusanalysen
Audi AG

Vorwort

Initialzündung für die Energiewende in Deutschland war das im Jahr 2000 beschlossene Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG). Trotz der bisher erreichten Zwischenziele der Bundesregierung in Bezug auf den Ausbau der erneuerbaren Energien ist diese Fördermaßnahme umstritten. Dies gründet sich einerseits auf die hohen Endkundenstrompreise Deutschlands im europäischen Vergleich. Zum anderen macht der Ausbau der regenerativen Erzeuger Konsumenten regional augenscheinlich, welcher Eingriffe in die Umwelt der *Energiehunger* des 21. Jahrhunderts bedarf. Das europäische Emissionshandelssystem begrenzt die Nutzung treibhausgasintensiver Energieträger überregional in Europa. Aufgrund des derzeit noch niedrigen Preisniveaus für CO₂-Zertifikate ist die Emissionsminderung durch dieses System gering. Die erzielbaren Einsparungen sind darüber hinaus auf die beteiligten Länder Europas begrenzt. Ein weltweites Emissionshandelssystem mit einem adäquaten Preis je nach Reduktionsziel für CO₂-äquivalente Emissionen würde die weltweite Nachfrage an fossilen Energieträgern sektorenübergreifend einschränken und den Anbietern von fossilen Energieträgern keine Ausweichmöglichkeiten für einen konstanten bzw. steigenden Absatz ermöglichen.

Mit dem weiteren Zubau von Photovoltaik- und Windkraftanlagen in Deutschland resultiert eine hohe Schwankung der potenziell bereitstellbaren Stromerzeugungsleistung im Jahresverlauf aufgrund des natürlichen Dargebots von Wind- und Solarenergie. Hierfür wird Flexibilität im Stromsystem benötigt, welche das schwankende Angebot und die Nachfrage ausgleicht sowie eine effiziente Energieverteilung gewährleistet.

Dieses Buch gibt einen Überblick über die aktuellen Entwicklungen im deutschen Stromsystem, u. a. der Strommärkte und des Netzausbaus, und präsentiert Zukunftsprognosen nach anerkannten Studien. Anhand eines vereinfachten Modells werden mögliche Stromprofile Deutschlands bei steigenden Anteilen dargebotsabhängiger Erzeuger an der Stromversorgung ermittelt und die maximale Stromspeicherkapazität berechnet, welche nach den Ausbauzielen der Bundesregierung bis zum Jahr 2050 notwendig wäre. Der tatsächliche Stromspeicherbedarf ist von zahlreichen Faktoren abhängig und lässt sich nur durch eine umfassende Betrachtung des gesamten Stromsystems ermitteln. In diesem Buch werden zahlreiche Studien, welche zum Stromspeicherbedarf in Deutschland

bis Ende des Jahres 2015 bestanden, zusammengefasst. Daraus lassen sich mögliche zukünftige Entwicklungen und Zusammenhänge verschiedener Komponenten und Märkte im Stromsystem ableiten. Ziel dieser Ausarbeitung ist es zudem, einen Technologieüberblick über aussichtreiche Stromspeichertechnologien und deren Einsatzmöglichkeiten im Stromsystem zu geben. Zudem wird eine Variante zur Ermittlung von Stromspeicherkosten vorgestellt, welche einen Vergleich zwischen den Technologien ermöglicht. Da die Wirtschaftlichkeit von Stromspeichern maßgeblich von den rechtlichen Rahmenbedingungen bestimmt wird, werden diese nach aktueller Gesetzeslage zusammengefasst.

Das zweite Hauptaugenmerk dieses Buches besteht darauf, Power-to-Gas – als eine sektorenübergreifende Systemlösung – vorzustellen und Auslegungsvarianten sowie Absatzmöglichkeiten aufzuzeigen. Dieses Konzept wurde in den vergangenen Jahren weitreichend untersucht und erprobt. Anhand des aktuellen Entwicklungsstandes, den Integrationsmöglichkeiten in das Stromsystem und den rechtlichen Rahmenbedingungen werden die kurz- bis mittelfristig erzielbaren Kosten zur Erzeugung synthetischer Gase mittels Power-to-Gas-Anlagen ermittelt. Dabei werden Optionen in den Gesetzgebungen aufgezeigt, wie z. B. der Entfall der EEG-Umlage bei Eigenversorgungskonzepten. Zudem werden die Rückwirkungen dieser Technologie auf das gesamte Stromsystem, wie beispielsweise eine Verminderung von Stromnetzausbaumaßnahmen, untersucht. Der Verkehrssektor bietet die höchsten Erlöspotenziale für synthetische Gase und ist deshalb als Absatzmarkt prädestiniert. Mithilfe des Power-to-Gas-Konzeptes der Audi AG werden die Kosten und Umweltwirkungen beim Einsatz von SNG und CNG für Mobilitätsanwendungen dargelegt und dies als eine Alternative zur ausschließlichen Fokussierung auf die Elektromobilität aufgezeigt.

Entgegen der üblichen Konvention erfolgt die Aufführung von Werken im Literaturverzeichnis aus Gründen der Zuordenbarkeit und aufgrund der Vielzahl der beteiligten Autoren eines Werkes nach dem Herausgeber bzw. nach den betreffenden Institutionen.

Dieses Buch entstand aus einer Forschungstätigkeit bei der Audi AG, welche eine der ersten Power-to-Gas-Anlagen im industriellen Maßstab betreibt. Dadurch wurden mir umfangreiche Einblicke in die Technologie und in den Markt ermöglicht.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Hermann Pengg, der mir mit seinem enormen Fachwissen und Erfahrungsschatz viele Details und Besonderheiten der Power-to-Gas-Technologie aufzeigen konnte und mich bei der Umsetzung dieses Buches maßgeblich beeinflusst und gefördert hat. Für die Bereitstellung der Daten des *Agorameters* möchte ich mich bei Agora Energiewende bedanken. Gleiches gilt für Herrn Tim Brandt von der Planungsgesellschaft Wind to Gas Brunsbüttel GmbH Co. KG für die zur Verfügung gestellten Einspeisezeitreihen des Windparks Dieksanderkoog/Kaiser-Wilhelm-Koog. Ein herzliches Dankeschön gilt auch Herrn Dr. Manfred Groh, Frau Prof. Dr. Sabine Homann-Wenig und Herrn Prof. Dr. Christian Weindl für die fachliche und sprachliche Durchsicht dieses Buches sowie Herrn Dr. Fröhlich für die hervorragende Betreuung seitens des Springer-Verlages.

Abschließend gebührt allen Freunden und Familienmitgliedern mein Dank, die mich während der Bearbeitung dieses Buches unterstützt und motiviert haben. Hervorheben möchte ich dabei Antje und Michael Zapf, Gerda Engelhardt sowie Josephine Scheibli.

Mönchsberg, im Juli 2016

Martin Zapf

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungen

AA-CAES	Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage
ACER	Agency for the Cooperation of Energy Regulators
AbLaV	Abschaltbare Lasten Verordnung
AEL	Alcaline Electrolysis
AusglMechAV	Ausgleichsmechanismus-Ausführungsverordnung
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BBP	Bundesbedarfsplan
BBPIG	Bundesbedarfsplangesetz
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
BEV	Battery Electric Vehicle
BGW	Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege
BHKW	Blockheizkraftwerk
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BK(V)	Bilanzkreis(-Verantwortliche)
BKM	Bilanzkreismanagement
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BNetzA	Bundesnetzagentur
Capex	Capital expenditure
CDU	Christlich Demokratische Union Deutschlands
CNG	Compressed Natural Gas (Erdgas)
CSTR	Continuous stirred-tank reactor
CSU	Christlich-Soziale Union in Bayern
DC	Direct Current (Gleichstrom)
dena	Deutsche Energie-Agentur
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
DKV	Deutscher Kraftverkehr
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DSM	Demand Side Management

DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches
EE	Erneuerbare Energien
EECS	European Energy Certificate System
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EEX	European Energy Exchange
EEWärmeG	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz
EinsMan/EisMan	Einspeisemanagementmaßnahmen
ELIX	European Electricity Index
EnLAG	Energieleitungsausbaugesetz
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
EPEX (SPOT SE)	European Power Exchange
EXAA	Energy Exchange Austria
EU	Europäische Union
EU-ETS	European Emission Trading System
EU-MENA	Großraum Europe-Middle East-North Africa
ENTSO-E RG CE	European Network of Transmission System Operators for Electricity
EVU	Energieversorgungsunternehmen
FENES	Forschungsstelle Energienetze und Energiespeicher
FNN	Das Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE
FÖS	Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft
Fraunhofer IWES	Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik
Fraunhofer ISE	Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme
GasNEV	Gasnetzentgeltverordnung
GasNZV	Gasnetzzugangsverordnung
GKW	Gaskraftwerke
GT	Gasturbine
GuD-Kraftwerk	Gas- und Dampf-Kraftwerk
GVWA	Gasvorwärmanlagen
H-Gas	High Gas
HGÜ	Hochspannungsgleichstrom-Übertragungsstrassen
HT	Hauptzeit
HTES	High Temperature Electrolysis of Steam
ID	Intraday
IEKP	Integriertes Energie- und Klimaprogramm
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor
IGCC	International Grid Control Cooperation
INA	Innovativer Netzausbau
KAV	Konzessionsabgabenverordnung
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KNA	Konventioneller Netzausbau
KW	Kraftwerke
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung

LCA	Life Cycle Assessment
LCOE	Levelized Cost of Electricity
L-Gas	Low Gas
LV	Letztverbraucher
MEA	Membrane Electrode Assembly
Mio.	Million
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MOP	Maximum Operating Pressure
Mrd.	Milliarde
MRL	Minutenregelleistung
MS	Mittelspannung
NABEG	Netzausbaubeschleunigungsgesetz
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NEP	Netzentwicklungsplan
NOW	Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
NS	Niederspannung
NRV	Netzregelverbund
NT	Nebenzeit
O&M	Operation & Maintenance
O-NEP	Offshore-Netzentwicklungsplan
Opex	Operational expenditure
ORC	Organic Rankine Cycle
OTC	Over-The-Counter
PEM	Polymer-Elektrolyt-Membrane
PGC	Prozessgaschromatograph
Phelix	Physical Electricity Index
PKW	Personenkraftwagen
PRL	Primärregelleistung
PSA	Druckwechseladsorption (Pressure Swing Adsorption)
PSW	Pumpspeicherwerk
PtG	Power-to-Gas
PtW	Power-to-Wasserstoff
PV	Photovoltaik
reBAP	regelzonenübergreifender einheitlicher Bilanzausgleichsenergiepreis
REMod-D	Regenerative Energien Modell Deutschland
ResKV	Reservekraftwerksverordnung
RLM-Kunden	Kunden mit registrierender Leistungsmessung
RONs	Regelbarer Ortsnetztransformator
RTA	Reinigungs- und Trocknungsanlage
SAIDI	System Average Interruption Duration Index
SCOE	Society's Cost of Electricity
SLP	Standardlastprofile

SMES	Supraleitende magnetische Energiespeicher
SNG	Synthetic Natural Gas (synthetisches Gas)
SOC	State of Charge (Ladezustand)
SOEL	Solid Oxide Electrolysis
SPD	Sozialdemokratische Partei Deutschlands
SPE	Solid Polymer Electrolyte
StromNEV	Stromnetzentgeltverordnung
StromNZV	Stromnetzzugangsverordnung
StromStG	Stromsteuergesetz
StromStV	Stromsteuer-Durchführungsverordnung
SOEL	Solid Oxide Electrolysis
SRL	Sekundärregelleistung
SRU	Sachverständigenrat für Umweltfragen
TAL	Temperaturbeständige Aluminium-Leiterseile
TCO	Total Cost of Ownership
TR	Technische Richtlinie
TRL	Technology Readiness Levels
TYNDP	Ten-Year Network Development
UBA	Umweltbundesamt
UCTE	Union for the Coordination of Transmission of Electricity
ÜNB	Übertragungsnetzbetreiber
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.
VKU	Verband kommunaler Unternehmen
vNE	vermiedene Netz-Entgelte
VNB	Verteilnetzbetreiber
WEA	Windenergieanlage
WZ	Wirtschaftszweig
ZSW	Zentrum für Solar- und Wasserstoffforschung Baden-Württemberg

Chemische Formelzeichen

CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO	Kohlenmonoxid
COS	Carbonylsulfid
e ⁻	Elektron
H ⁺	(Wasserstoff-)Proton
H ₂	Wasserstoff
HCl	Chlorwasserstoff
H ₂ O	Wasser

H ₂ S	Schwefelwasserstoff
KOH	Kalilauge (Kaliumhydroxid)
NaCl	Natriumchlorid
N	Stickstoff
O ₂	Sauerstoff
OH ⁻	Hydroxid-Ion
P	Phosphor
S	Schwefel

Variablen

EMK	Elektromotorische Kraft [V]
GHSV	Gas Hourly Space Velocity [1/h]
ΔG_R	freie Reaktionsenthalpie [kJ/mol]
ΔH_R	Reaktionsenthalpie [kJ/mol]
H _i	Heizwert [kWh/Nm ³]
H _S	Brennwert [kWh/Nm ³]
k ₀	Investitionskosten [€/kW]
ΔS_R	Reaktionsentropie [J/K]
T	absolute Temperatur [K]
η	Wirkungsgrad [- bzw. %]
k _P	Leistungskosten [€/kWh]
k _Q	Kapazitätskosten [€/kWh]
DOD _{Max}	Maximal Depth of Discharge [- bzw. %]

Symbole

- Keine Relevanz – trifft nicht zu
/ Keine Angabe

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	3
1.1.3	Förderung und Lernkurveneffekt regenerativer Erzeugungsanlagen	6
1.2	Entwicklung des deutschen Stromprofils	10
1.2.1	Stromerzeugung 2013 – internationaler Vergleich	10
1.2.2	Energieverbrauch 2013 – Abgrenzung von Primär- bis Nutzenergieverbrauch	12
1.2.3	Entwicklung des Stromprofils von 2013 bis 2015	13
1.2.4	Prognosen eines zukünftigen Erzeugungs- und Verbrauchsprofils	15
1.2.5	Mögliche Stromprofile je Ausbaugrad	17
1.3	Ausgangslage und notwendige Anpassungen der Stromnetze und des Stromsystems an eine veränderte Einspeisesituation	29
1.3.1	Netzdaten	29
1.3.2	Stromnetzausbau	30
1.3.3	Strom- und Spannungsgrenzen	41
1.3.4	Qualität und Stabilität der Stromnetze	42
1.3.5	Systemdienstleistungen	43
1.3.6	Bilanzkreis- und Ausgleichsenergiesystem	55
1.3.7	Gesicherte Leistung – Leistungsbilanz	57
1.4	Existierende Strommärkte für Erzeuger, Zwischenhändler und Verbraucher	60
1.4.1	Strombörse	60
1.4.2	OTC-Handel	63
1.4.3	Leistungsmärkte – Regelleistungsmarkt	64
1.4.4	Grünstrommarkt	67
1.4.5	Einzelhandel – Endkundenstrompreise	70
1.4.6	Strommarkt 2.0	74
1.5	Investitionsentscheidungen bezüglich Stromerzeugungseinheiten	76
1.5.1	Stromgestehungskosten	77

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	88
1.5.7	Investitionsentscheidungen und Vermarktungsmöglichkeiten von Erneuerbare-Energien-Anlagen	89
1.6	Resümee	93
2	Stromspeicher – Technologien und Bedarf	95
2.1	Definition und Klassifizierung von Energie- und Stromspeichern	95
2.2	Technische Erläuterungen zu Stromspeichertechnologien	97
2.2.1	Speicherkapazität und Ausspeicherdauer	97
2.2.2	Übersicht ausgewählter technischer Parameter	98
2.2.3	Technologischer Entwicklungsstand	99
2.2.4	Systemverträglichkeit und -dienlichkeit	100
2.3	Rechtliche Rahmenbedingungen von Stromspeichern	105
2.4	Stromspeicherbestand	108
2.5	Stromspeicherkosten	109
2.5.1	Kostenbetrachtung ausgewählter Stromspeichertechnologien	109
2.5.2	Berechnungsgrundlagen zu Stromspeicherkosten	111
2.5.3	Variable Stromspeicherkosten für 2020 und 2030	115
2.5.4	Reale annuitätische Fixkosten für 2020 und 2030	116
2.5.5	Reale Stromspeicherkosten von Power-to-Gas im Jahr 2030	118
2.6	Faktoren des Stromspeicherbedarfs	119
2.7	Flexibilitätsoptionen im Stromsystem	121
2.7.1	Prognosegüte	121
2.7.2	Flexibler Betrieb von Verbrauchern – Lastmanagement	123
2.7.3	Flexibler Betrieb von Erzeugern	128
2.7.4	Stromexport und -import	130
2.7.5	Alternative Erbringer für Systemdienstleistungen	130
2.7.6	Ausbaugrad Stromtransportnetz	131
2.8	Studien zum Stromspeicherbedarf	131
2.8.1	Studienübersicht „Energiespeicher“	131
2.8.2	„Roadmap Speicher“	134
2.8.3	„Energiesystem Deutschland 2050“	144
2.8.4	„Stromspeicher in der Energiewende“	151
2.9	Maximal notwendige Speicherkapazität aufgrund negativer Residuallasten	158
2.10	Resümee	162

3	Power-to-Gas – Stand der Technik und Einsatzmöglichkeiten	165
3.1	Das Power-to-Gas-Konzept	165
3.2	Technologieübersicht und Herstellungsverfahren von synthetischen Gasen	167
3.2.1	Elektrolyse	167
3.2.2	Methanisierung	179
3.2.3	Chemische Methanisierung	181
3.2.4	Biologische Methanisierung	187
3.2.5	Kohlendioxidquellen	191
3.3	Verwendung der bestehenden Erdgasinfrastruktur	195
3.3.1	Gasbeschaffenheiten	195
3.3.2	Wasserstofftoleranz der deutschen Erdgasinfrastruktur	197
3.3.3	Gaseinspeisung	199
3.3.4	Speicher- und Transportpotenzial	201
3.3.5	Entwicklung der Nachfrage nach Erdgas	206
3.3.6	Wasserstofftransport zu entfernten Erdgasnetzeinspeisepunkten	207
3.4	Zusammenfassung der Kosten und Wirkungsgradketten von Power-to-Gas	210
3.4.1	Wirkungsgradketten	210
3.4.2	Kosten	211
3.5	Rechtliche Rahmenbedingungen von Power-to-Gas	216
3.5.1	Stromsektor	216
3.5.2	Gassektor	217
3.6	Direkte Kopplung von Power-to-Gas-Anlagen mit regenerativen Erzeugern	219
3.6.1	Eigenversorgung – Kosteneinsparung, Zweckmäßigkeit und Anbindungsmöglichkeiten	219
3.6.2	Rechtliche Rahmenbedingungen der Eigenversorgung	221
3.7	Gasgestehungskosten synthetischer Gase	225
3.7.1	Untersuchungsrahmen	225
3.7.2	Berechnungsgrundlagen zu Gasgestehungskosten	227
3.7.3	Teillastbetrieb	230
3.7.4	Variante 1: Strombezug am Day-Ahead-Markt – Basisvariante	232
3.7.5	Variante 2: Eigenversorgung mit EEG-Vergütung nicht genutzter Windenergiemengen	234
3.7.6	Variante 3: Eigenversorgung ohne EEG-Vergütung nicht genutzter Windenergiemengen	237
3.7.7	Variante 4: Eigenversorgung ohne Netzeinspeisung für abgelegene Standorte	239
3.8	Erlösmöglichkeiten und Kostenminderungen von Power-to-Gas-Anlagen im Stromsektor	241
3.8.1	Verringerung von Redispatch und Einspeisemanagementmaßnahmen	242

3.8.2	Reduktion von Verteilnetzausbau	242
3.8.3	Regelleistungsvermarktung	248
3.8.4	Verminderung von Ausgleichsenergie	249
3.9	Der Verkehrssektor als bevorzugter Absatzmarkt für synthetische Gase	251
3.9.1	Vergleich der Kosten und Umweltwirkungen eines bestehenden Power-to-Gas-Konzeptes für Mobilitätsanwendungen	252
3.9.2	SNG für Mobilitätsanwendungen – Auswirkungen im Erdgasnetz	259
3.9.3	Auswirkungen von Batterie- und SNG-Fahrzeugen auf das Stromsystem	260
3.10	Resümee	263
	Literatur	267
	Sachverzeichnis	279